

PROYECTO “RIESGO Y SEGURO AGROPECUARIO” – ETAPA II

PRÉSTAMO BID 899/OC-AR-1

**INFORME FINAL DEL CONSULTOR
GERMAN M. HEINZENKNECHT**

15 DE FEBRERO DE 2009

OBJETIVOS

- Realizar una revisión de conclusiones de trabajos científicos publicados que relacionen el evento ENOS con las temperaturas en la Argentina.
 - Evaluar las variables o índices relacionados con las temperaturas que resulten relevantes en función de su impacto sobre la producción agropecuaria.
 - Calcular la frecuencia de ocurrencia de índices relacionados a las temperaturas máximas (olas de calor, días calurosos y días fríos) durante eventos El Niño y La Niña a escala estacional.
 - Calcular la frecuencia de ocurrencia de índices relacionados a las temperaturas mínimas (heladas tempranas y tardías, noches frías y noches calurosas) durante eventos El Niño y La Niña a escala estacional.
 - Seleccionar los resultados relevantes y desarrollar la cartografía correspondiente, en formato compatible con un sistema de información geográfica, para responder a cualquier demanda de usuarios.
-

CONTENIDOS

FENÓMENOS DEL PACÍFICO ECUATORIAL (ENOS)	.....Página 4
IMPACTO DEL ENOS SOBRE LA TEMPERATURA	.....Página 10
CLASIFICACIÓN ELEGIDA PARA LOS EVENTOS ENOS	.....Página 14
PARÁMETROS TÉRMICOS A EVALUAR	.....Página 18
MÉTODOS Y RESULTADOS	
1. Frecuencia de días cálidos (DC) y días fríos (DF)	.....Página 20
2. Frecuencia de noches cálidas (NC) y noches frías (NF)	.....Página 26
3. Frecuencia de olas de calor (OC)	.....Página 33
4. Frecuencia de días con helada (DH)	.....Página 46
5. Variaciones en las fechas medias de primera y última helada	.....Página 53
REFERENCIAS	.....Página 57

FENÓMENOS DEL PACÍFICO ECUATORIAL

El fenómeno denominado "El Niño" consiste en un calentamiento anómalo de las aguas superficiales del Océano Pacífico Ecuatorial Central y Oriental. La mancha de agua caliente suele extenderse desde la costa de Perú hasta los 180 grados de longitud sobre el Océano Pacífico, abarcando una faja angosta que va desde 10 grados al norte del Ecuador hasta 10 grados al sur del mismo. Su "anomalía" indica cuántos grados se halla la temperatura del mar por encima o por debajo de la que es normal para la época. El Niño se caracteriza entonces por determinar anomalías positivas de SST ($SST' > 0$).

El fenómeno complementario, denominado "La Niña" o "El Viejo", consiste entonces en un enfriamiento anormal de las mismas aguas. La Niña se caracteriza por determinar anomalías negativas de SST, es decir, temperaturas de la superficie del mar inferiores a las normales para la época ($SST' < 0$).

La anomalía de la temperatura del mar se calcula para distintas zonas dentro del Pacífico Ecuatorial. La que más usualmente se considera como representativa del fenómeno ENOS es la región Niño 3.4, por hallarse en el centro del Pacífico Ecuatorial. En la anomalía de la temperatura del mar en esta región se basan las definiciones de El Niño o La Niña.

Existen modelos numéricos capaces de pronosticar la temperatura de la superficie del mar. Los mayores esfuerzos a este respecto se realizan en la zona del Pacífico Ecuatorial, donde desde hace algunos años se ha instalado un sistema de monitoreo especial que consiste en la medición sistemática de la temperatura del mar y otras variables, no sólo en superficie sino también en profundidad. Así, a partir de las condiciones actuales, se pronostican las condiciones futuras en función de las mediciones realizadas, las corrientes marinas, la circulación atmosférica, etc.

Los grandes institutos internacionales de predicción climática poseen actualmente modelos acoplados de simulación del comportamiento del mar y la atmósfera, que permiten predecir la evolución del sistema. Los resultados se publican semanalmente y constituyen una herramienta cada vez más utilizada por los meteorólogos para elaborar tendencias a mediano y largo plazo.

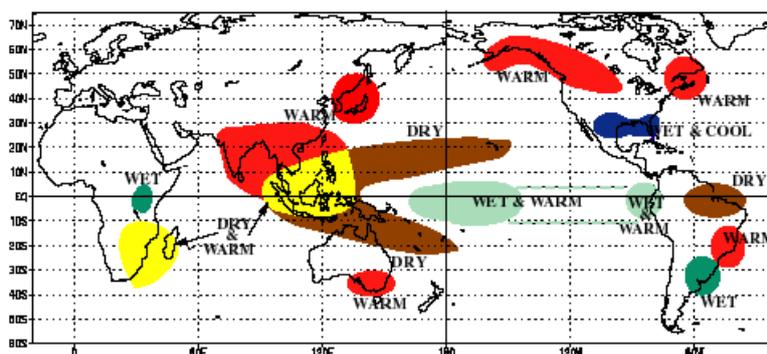
Los pronósticos numéricos pueden ser confiables a unos seis meses, siendo algo conjeturales para plazos mayores, a pesar de los grandes esfuerzos económicos y científicos que la comunidad internacional realiza en pos de obtener estos importantes resultados. Esto se debe a la complejidad de la física del sistema mar - atmósfera que se quiere recrear por medio de estos modelos, llamados "acoplados". El mayor nivel de acierto de los modelos citados se extiende desde agosto hasta marzo, aproximadamente, lo cual favorece la evaluación de la campaña agrícola argentina.

En nuestro país no se corre ningún modelo de pronóstico de la temperatura del mar, debido a la enorme exigencia computacional que requieren estos programas, sólo disponible en los grandes centros internacionales en USA (como la NOAA y la NASA), Japón, Unión Europea, etc. Con las salidas de estos modelos se genera un pronóstico "consensuado", que resulta de promediar los distintos resultados y que es considerado como el "pronóstico oficial" a nivel internacional. Con esto queremos dejar claro que no debería haber diferencias entre lo que distintas fuentes anuncian con respecto a la evolución futura de El Niño. La FIGURA 5 muestra el último resumen de los pronósticos numéricos de temperatura del mar en el Pacífico Ecuatorial Central.

Los modelos numéricos pronostican condiciones de temperatura del mar, pero no pronostican lluvias o temperaturas. Para poder hacer una conexión entre estas variables, lo cual es trascendente para poder determinar una tendencia climática, es necesario conocer los impactos regionales que El Niño o La Niña suelen tener.

Ya a principios del siglo XX comenzaron a investigarse las consecuencias que los fenómenos El Niño y La Niña producirían, no sólo en zonas directamente influenciadas por la circulación del Pacífico Tropical, sino también en áreas distantes. A estas últimas se las llamó “teleconexiones” y su explicación física dista normalmente de ser trivial. Las teleconexiones halladas se refieren en general a precipitaciones y/o temperaturas por encima o por debajo de lo normal. Son tendencias de comportamiento de estas variables en distintos lugares del mundo, en presencia de eventos cálidos o fríos en el Pacífico Ecuatorial.

WARM EPISODE RELATIONSHIPS DECEMBER - FEBRUARY



WARM EPISODE RELATIONSHIPS JUNE - AUGUST

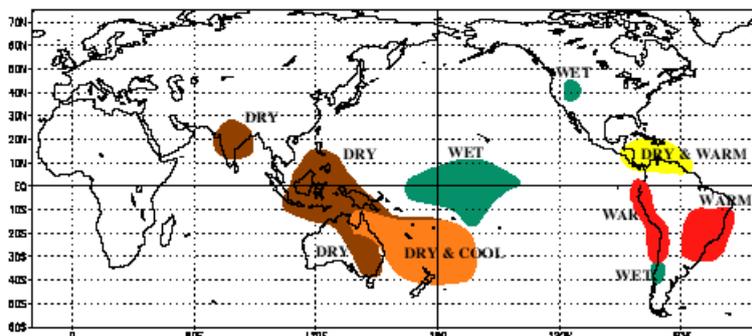


FIGURA 1: Impactos generales de El Niño en verano e invierno.

La FIGURA 1 muestra los impactos globales que en general se atribuyen a la ocurrencia de un evento El Niño (fuente NOAA). Se aprecia una tendencia hacia lluvias superiores a las normales (wet) en verano en el noreste argentino, y hacia temperaturas superiores a las normales (warm) en la misma zona en invierno. También en invierno se muestra la misma tendencia en la zona cordillerana del

Resultados hallados para el impacto del ENOS sobre las precipitaciones estacionales en trabajos científicos locales no se corresponden exactamente con los que muestra la NOAA en los mapas expuestos.

El fenómeno ENOS surge de la interacción de factores oceánicos y atmosféricos y, a su vez, al instalarse produce alteraciones en los patrones normales de las variables oceánicas y atmosféricas. Si bien se asocia al ENOS con una alteración en la temperatura de la superficie del mar, existen otras alteraciones igualmente importantes asociadas al fenómeno, a saber:

- **SOI**
La Oscilación Sur es la parte atmosférica del fenómeno. Conceptualmente representa el cambio de altas a bajas presiones que se da en los polos de la célula de Walker durante los episodios ENOS. Una forma de medirlo es mediante el índice SOI (Índice de la Oscilación Sur): anomalía de la diferencia de presión media mensual entre Tahití (Polinesia Francesa) y Darwin (norte de Australia).
- **TWI**
Como consecuencia de las alteraciones ocurridas en la superficie del mar, la circulación de la atmósfera se ve afectada. Las velocidades normales del viento sobre el Pacífico Ecuatorial pueden verse fortalecidas, debilitadas o incluso pueden cambiar de signo, dando como resultado una circulación inversa a la normal. Los que siguen son algunos indicadores de anomalías en la circulación atmosférica:
200 MB Zonal Winds Equator (165W-110W) Zonally Average
850 MB Trade Wind Index(135E-180W) 5N-5S West Pacific
850 MB Trade Wind Index(175W-140W) 5N-5S Central Pacific
850 MB Trade Wind Index(135W-120W) 5N-5S East Pacific
- **T'**
No sólo la temperatura del mar se ve modificada durante los eventos El Niño / La Niña, sino también la temperatura de la atmósfera. Sobre la zona del ENOS se monitorea la temperatura atmosférica a una altura aproximada de 5000 metros:
500 MB Temperature Anomalies
- **OLR**
Durante El Niño la formación de nubes y precipitación también emigra hacia América pues, como ya se mencionó, en la atmósfera se produce una alteración del patrón de la presión atmosférica, que baja en el lado este del Pacífico (Tahití) y sube en el oeste (Darwin). El aumento de la nubosidad y de la temperatura derivan en un aumento de la energía emitida como "onda larga". La anomalía de la radiación de onda larga saliente en el Pacífico Ecuatorial es otro índice relacionado con el fenómeno ENOS.
Outgoing Long Wave Radiation Equator (160E-160W)

Se ha desarrollado además un índice que integra distintos indicadores, conocido como **MEI** (Multivariate Enso Index), calculado en el Climate Diagnostics Center (NOAA). Este índice se basa en una combinación de las principales seis variables observadas sobre el Pacífico Ecuatorial: presión a nivel del mar (P), componentes zonal (U) y meridional (V) del viento en superficie, temperatura de la superficie del mar (T), temperatura del aire (A) y fracción total de cielo cubierto por nubes (C).

Se aplica el método de componentes principales y luego se estandarizan los valores obtenidos con el objetivo de que sean comparables para distintas épocas del año. Se obtienen así valores bimestrales solapados (ENE/FEB, FEB/MER,..., NOV/DIC) de los cuales puede lograrse una definición de estado El Niño o La Niña que engloba los indicadores de los principales aspectos del fenómeno. Los valores de MEI normalizados se pueden ver en la FIGURA 3 y se hallan disponibles en el siguiente sitio: <http://www.cdc.noaa.gov/people/klaus.wolter/MEI/table.html>

A partir de los valores bimestrales solapados de MEI se establece un rango (“rank”) que permite clasificar cada bimestre con El Niño, La Niña o neutro. Esta clasificación por “rank” se detallará más adelante.

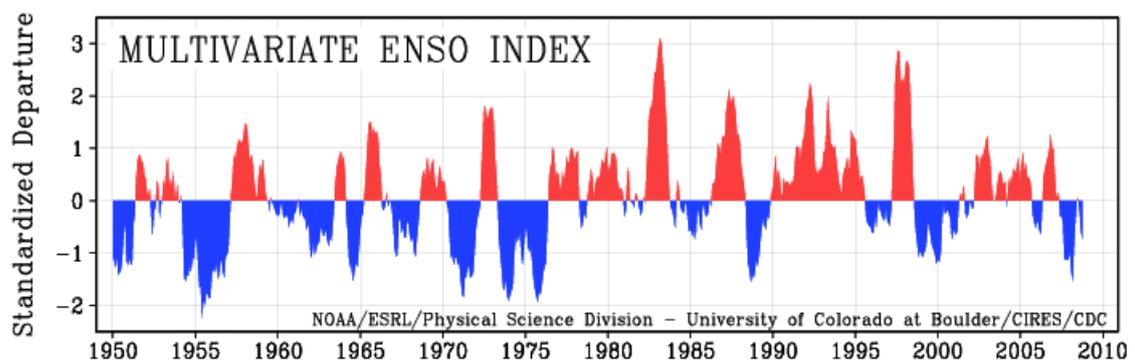


FIGURA 3: Índice MEI

Existen otros índices desarrollados posteriormente que resultan de interés, como el índice BEST (Bivariate EnSo Timeseries). Este índice combina la SST' correspondiente a la zona El Niño 3.4 con valores de SOI. Así, este índice también combina una componente oceánica (SST') y una atmosférica (SOI). Las medias mensuales climatológicas 1898-2000 se remueven de todos los datos y se normalizan, de modo de obtener una media de 0 y una desviación estándar de 1 en todos los casos. Luego se aplican promedios móviles de tres o cinco meses a ambas series.

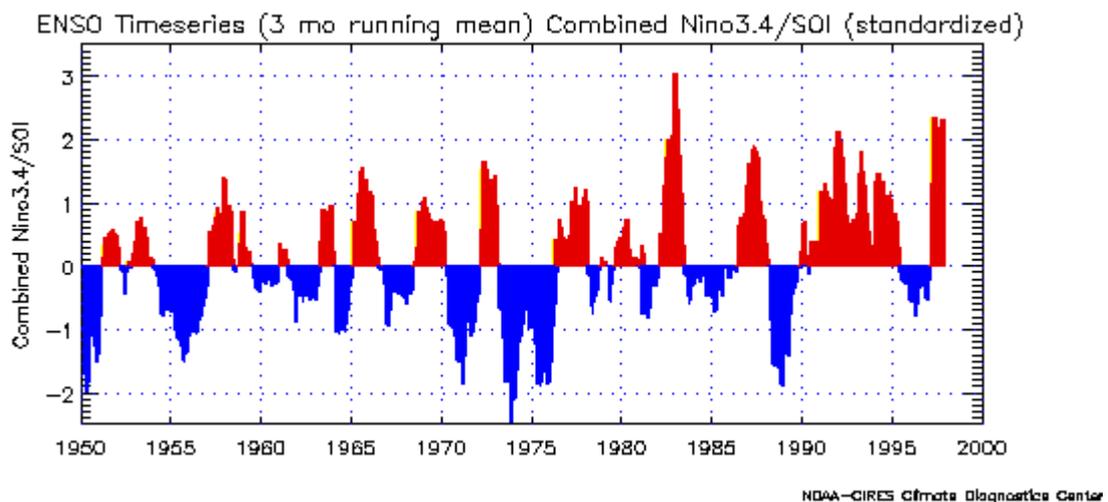


FIGURA 4: Índice BEST

Los valores de BEST normalizados se pueden ver en la FIGURA 4 y se hallan en el siguiente sitio: <http://www.cdc.noaa.gov/people/cathy.smith/best/#values>

Como se ve, el comportamiento de ambos parámetros es muy coherente. Para el análisis de la relación ENSO-temperatura utilizaremos ambos índices. Es decir, debido a su comportamiento concordante, estableceremos si una determinada estación del año se clasifica como El Niño, La Niña o Neutro según estos dos índices similares.

IMPACTO DEL ENOS SOBRE LA TEMPERATURA

Durante la ocurrencia de un evento en el Pacífico Ecuatorial Central, el calentamiento o enfriamiento anómalo de la superficie del mar determina, en virtud de su interacción con la atmósfera, alteraciones en la circulación general. Esto es lo que en definitiva da origen a los impactos en el clima de las diferentes regiones del mundo, aún las que se hallan distantes.

Rodríguez y Albuquerque (2006) muestran las diferencias halladas en la circulación general sobre Sudamérica durante un evento El Niño (1982-1983) y un evento La Niña (1988-1989). La FIGURA 5 reproduce una ilustración publicada por los citados autores.

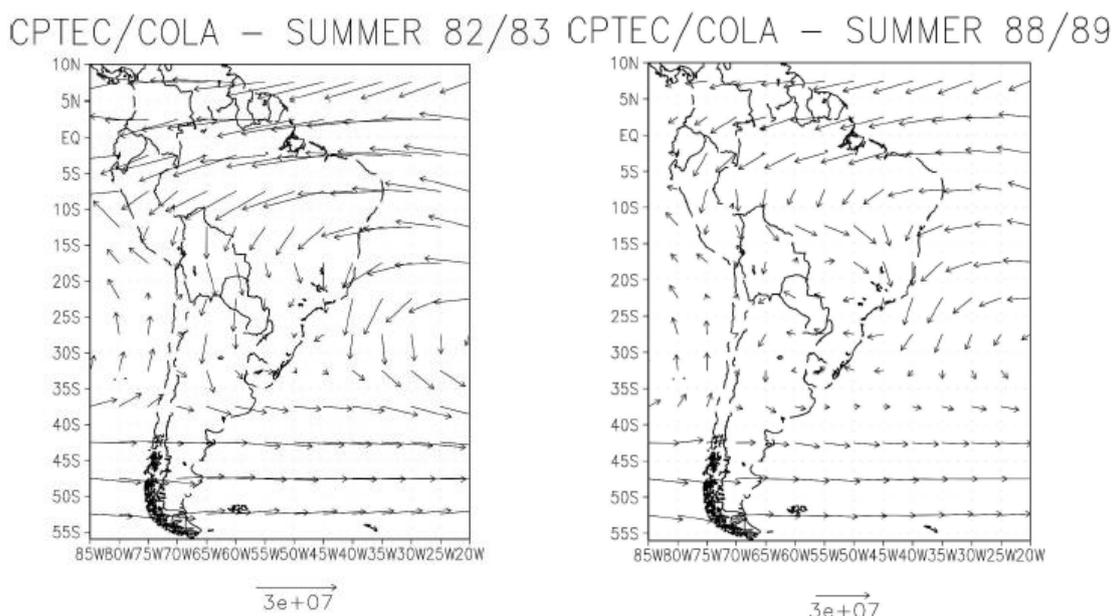


FIGURA 5

Se puede ver que durante un evento El Niño la circulación del norte sobre el centro de Sudamérica inyecta humedad proveniente del Amazonas sobre la mitad norte de Argentina. Durante un evento La Niña esta circulación se ve desfavorecida, debilitada y más bien del este, lo cual inhibe la entrada de humedad sobre el territorio argentino.

Si ante la aparición de un evento El Niño o La Niña las condiciones climáticas son en general alteradas, es lógico pensar que los niveles de riesgo ante eventos climáticos particulares, como sequía, excesos hídricos o heladas, se verán modificados en consecuencia. Si se dispone, entonces, de un pronóstico de ocurrencia de eventos anómalos en el Pacífico Ecuatorial (El Niño, La Niña) y se conocen las tendencias climáticas asociadas a cada uno de ellos en la región de interés, se estará en condiciones de prever mayores o menores niveles de riesgo que en años típicos.

Para que esta previsión pueda llevarse a cabo son necesarias las siguientes condiciones:

- Disponer de un pronóstico de ocurrencia de fases del ENOS (El Niño – Oscilación del Sur), nombre con el que se designa la aparición conjunta de patrones anormales de temperatura en la superficie del mar (Pacífico Ecuatorial Central) y de circulación atmosférica.
- Disponer de evaluaciones objetivas y cuantitativas del impacto del ENOS en las distintas variables meteorológicas relacionadas con los rendimientos agrícolas, que muestren la probabilidad de que los niveles medios de riesgo se vean aumentados o disminuidos en cada caso.
- Discriminar zonas dentro de la región de interés donde los fenómenos relacionados con el ENOS muestran una señal importante en cuanto a su influencia sobre las condiciones climáticas locales.
- Determinar periodos del año en que la señal del ENOS resulta significativa, relacionándolos con la vulnerabilidad de cada cultivo y variedad, lo cual permitirá evidenciar la probabilidad de mayores o menores riesgos de bajos rendimientos, dependiendo de la variable analizada (precipitación, temperatura, reservas, etc).

Existen numerosos trabajos científicos que analizan la **señal ENOS sobre la región pampeana argentina**, desde distintos ángulos. Entre los más recientes se podrían mencionar los de Grim y otros (2000) y Montecinos y otros (2000), que analizan la posibilidad de prever anomalías climáticas como las lluvias excesivas o escasas en función del pronóstico de SST. Podestá y otros (2001) ponen el énfasis en la investigación de consistencia de la señal ENOS dentro de una fase determinada del evento. Uno de los resultados de este trabajo se refiere a la localidad de Pergamino: en este caso, la señal de El Niño resulta débil durante la mayor parte del año, siendo algo mayor en los meses de verano, aunque nunca resulta significativa al nivel $\alpha=0.05$; en cambio, los eventos fríos (La Niña) muestran una señal mucho más consistente, alcanzando valores significativos de septiembre a febrero, especialmente altos alrededor de noviembre y diciembre. Scian (2001) propone la división en cinco fases o ciclos del SOI (Índice de Oscilación del Sur): extremo negativo (F1), extremo positivo (F2), en rápido descenso (F3), en rápido ascenso (F4) y cercanos a cero (F5). La fase F1 estaría relacionada, aunque no siempre, con un evento cálido, mientras que lo contrario se aplicaría a la fase F2. La autora estudió finalmente la relación entre estas fases y el corrimiento de la mediana del IPE (precipitación estandarizada). Los resultados mostraron que en la región pampeana existen anomalías en la precipitación mensual, que corresponden a distintos meses para distintas zonas. Los meses más afectados son noviembre y diciembre, tanto en corrimientos positivos como negativos de la mediana de la precipitación. Diciembre es común a todas las subregiones. La región norte es la que refleja más claramente la incidencia del SOI, en dos épocas del año: de noviembre a febrero y en julio y agosto.

Forte Lay y otros (2004) analizaron las diferencias en la disponibilidad de agua en el suelo de la región pampeana argentina entre los meses estivales de diciembre y enero en relación con el fenómeno ENOS. Estos meses fueron elegidos por su importancia en la determinación de los rendimientos de los principales cultivos. Como indicador del estado del ENOS se utilizaron valores bimensuales imbricados del MEI (índice multivariado del ENOS) desarrollado por K. Wolter (NOAA-CDC) correspondientes al mismo período donde los valores positivos son indicadores de El Niño, los negativos de La Niña y los cercanos a cero de condiciones neutrales. El mismo autor propone para el

diagnóstico de las diferentes fases del ENOS el uso de los “rankings” u ordenamientos del MEI para cada período bimensual.

Todos los trabajos citados se refieren a la relación ENOS-precipitación, que fue la más estudiada en nuestro país, seguramente por la característica agrícola de nuestro país y la extensión de la producción de secano (sin riego). La relación ENOS-temperatura ha sido mucho menos estudiada. En general se asocian los eventos La Niña con temperaturas mínimas bajas, tal vez no tanto por efecto de cambios en la circulación sino por efecto de la menor disponibilidad de humedad: las masas de aire frío que ingresan desde el sudoeste sobre el centro y norte de Argentina se ven poco modificadas durante su avance, llegando a latitudes menores con su temperatura menos morigerada.

En un trabajo de Bernardes Pezza y Ambrizzi (2000) se ha mostrado que durante eventos La Niña existe una mayor concentración de centros de alta presión (anticiclones) sobre el Pacífico Subtropical, mientras que sobre el Atlántico Subtropical se da una aumentada actividad ciclónica (centros de baja presión). Una anomalía positiva de la presión al oeste de Argentina, combinada con una anomalía negativa al este, generaría una **circulación con una componente sur aumentada**.

Müller y Salles (2003) analizaron las características espaciales de los campos de presión en superficie asociados al ENSO durante heladas en la pampa húmeda argentina. Se obtuvieron resultados interesantes, a pesar de la brevedad del periodo considerado (1972 – 1983), en el cual se computaron para los meses considerados (junio, julio y agosto) siete casos El Niño y sólo dos casos La Niña. Como conclusión se obtuvo que **durante La Niña existe un aumento en la cantidad promedio de heladas de invierno, mientras que durante El Niño se observa una disminución**. Estos resultados son consistentes con los obtenidos por Salles (1998), que señala que los inviernos La Niña son más fríos que los inviernos El Niño.

Lo interesante del trabajo de Müller y Salles es la obtención de patrones en el campo de presiones de superficie que son típicos generadores de descensos marcados en la temperatura. Las bajas temperaturas generadas por enfriamiento radiativo (pérdida de calor por radiación) fueron identificadas como la situación más frecuente de formación de heladas. Esta situación corresponde a altas presiones sobre el continente, que abarcan el centro y norte argentinos. Esta configuración es más frecuente en los inviernos El Niño que en los inviernos La Niña.

La segunda situación más frecuente es la que corresponde a un centro de alta presión que se extiende sobre la Patagonia y la porción cercana del Pacífico, asociada a la situación sinóptica conocida como “alta postfrontal”. Esta configuración determina la advección de aire frío desde el sur sobre la región central del país y es más frecuente durante los inviernos La Niña, siendo su frecuencia el doble que la observada en inviernos El Niño. La tercera situación se corresponde a la descrita por Bernardes Pezza y Ambrizzi durante eventos La Niña, con un centro de baja presión sobre el Atlántico, al este de Mar del Plata, y un anticiclón sobre el Pacífico, al oeste de Santiago de Chile. También esta situación se asocia a una fuerte advección de aire frío del sur.

Estas tres situaciones son las que determinan el 85% o más de las heladas que se dan en la región pampeana durante el invierno. Podemos decir que las heladas radiativas son más frecuentes en inviernos El Niño, pero las heladas generadas por advección meridional de aire frío son más frecuentes durante los inviernos La Niña. Lamentablemente no se analizaron las heladas de otoño y primavera, más relevantes

desde el punto de vista agronómico, y su relación con el ENOS, aunque sí en trabajos posteriores similares.

El Niño/Oscilación Sur (ENOS) es reconocido como la principal fuente de variabilidad climática interanual y está demostrado su impacto en el centro-sur de América del Sur. En relación a este fenómeno y las heladas, se encontró que la variabilidad interanual en la frecuencia de ocurrencia de heladas en la Pampa Húmeda está explicada en parte por la ocurrencia de las fases cálida y fría del ENOS, siendo inversa durante las mismas (Müller 2006). En los años El Niño (La Niña) el número de heladas anual es en general inferior (superior) al promedio, lo mismo que en el invierno; en cambio en el otoño y la primavera el número de heladas está condicionado por la etapa de desarrollo del fenómeno, particularmente en El Niño (Müller y otros, 2000).

En relación a este fenómeno y las fechas de primera y última helada de la región de la Pampa Húmeda, Müller y otros (2000) muestran que **en los años El Niño existe un retraso mientras que en los años La Niña se observa un adelanto**. Este hecho, sumado a la relación hallada en las diferentes estaciones del año, indica una asociación entre la ocurrencia de heladas y el estado de desarrollo del evento cálido, con un impacto mayor en los meses de otoño e invierno, para los que también parece tener influencia el evento frío. En cambio para la última helada en primavera no se encontró influencia por la presencia de un evento ENOS en ambas fases (fría y cálida).

Rusticucci y Vargas (2002) realizan un estudio estadístico a nivel mensual de la relación entre los “eventos fríos” y ‘eventos cálidos” en Argentina y las fases del ENOS. Toman en cuenta para el análisis las temperaturas diarias extremas del periodo 1959-1998 (40 años) en 23 estaciones meteorológicas del país. Para determinar eventos fríos y cálidos calculan el cuartil superior de las temperaturas extremas para las fases El Niño, La Niña y Neutral, según la clasificación de Trenberth (1997), extendida un año más por los autores. Luego calculan la diferencia entre las fases El Niño y Neutral, y también La Niña y Neutral. De la misma manera ponderan la diferencia en la permanencia de los eventos cálidos y fríos en meses El Niño y La Niña, en comparación con los meses Neutrales.

Durante La Niña el resultado más significativo se obtuvo para los meses junio y julio, en el centro del país, donde se observó **una mayor intensidad y persistencia de masas de aire frío**. Para los eventos cálidos, se destaca la mayor intensidad y permanencia en los últimos meses del año, también en el centro del país. También se observa en los mismos meses mayor permanencia de eventos fríos, lo que, según los autores, se debe a que el intercambio de masas de aire extremas se ve favorecido en ambas direcciones. Probablemente este efecto se vea reforzado por la falta de humedad en capas bajas, derivada del impacto negativo generalizado que se observa en las primaveras La Niña en Argentina.

Durante El Niño los autores observaron una **mayor intensidad y persistencia de periodos cálidos** de marzo a septiembre: el centro de baja presión del NOA tiende a intensificarse durante esta fase, favoreciendo el flujo de aire del norte y noreste sobre nuestro país, permitiendo que las olas de calor lleguen más la sur. En otoño el efecto se concentra sobre el NOA y en primavera sobre el NEA. En verano también se observa un aumento en la intensidad y persistencia de los periodos cálidos, aunque no significativo, sobre el centro del país.

CLASIFICACIÓN ELEGIDA

Como se dijo, el **MEI** es el indicador más integral del estado mar – atmósfera durante un evento El Niño o La Niña. Se tomará este índice, en primera instancia, como determinante del estado del ENOS y se procederá a la búsqueda de señales del mismo sobre la temperatura en la zona de estudio en función de este índice.

A los valores de MEI estandarizados se les adjudica un “rank” que va desde 1 hasta 55. El “rank 1” identifica al estado La Niña más intenso del que se ha tenido registro; en el otro extremo, el “rank 55” corresponde al evento El Niño más intenso conocido. A partir de este rank se sugiere (NOAA) la siguiente clasificación:

MEI RANK	
< 19	LA NIÑA
> 37	EL NIÑO

Según este criterio, las estaciones del año en el periodo 1970-2007 fueron clasificadas como El Niño, neutro o La Niña. Los resultados se pueden ver en el CUADRO 1.

CUADRO 1: Clasificación de las estaciones del año en El Niño (O), neutro (N) o La Niña (A) según MEI RANK index

AÑO	VERANO	OTOÑO	INVIERNO	PRIMAVERA
	DEF	MAM	JJA	SON
1970	N	N	A	A
1971	A	A	A	A
1972	N	N	O	O
1973	O	N	A	A
1974	A	A	A	A
1975	A	A	A	A
1976	A	A	O	O
1977	O	O	O	O
1978	O	N	N	N
1979	N	N	O	O
1980	O	O	O	N
1981	N	N	N	N
1982	N	N	O	O
1983	O	O	O	N
1984	N	N	N	N
1985	N	N	N	N
1986	N	N	O	O
1987	O	O	O	O
1988	N	N	A	A
1989	A	A	A	N
1990	O	O	N	N
1991	O	O	O	O
1992	O	O	O	O

1993	O	O	O	O
1994	O	O	O	O
1995	O	O	N	A
1996	A	N	N	N
1997	N	O	O	O
1998	O	O	N	A
1999	A	A	A	A
2000	A	N	N	N
2001	N	N	N	N
2002	N	O	O	O
2003	O	N	N	N
2004	N	N	N	O
2005	O	O	N	N
2006	N	N	O	O
2007	O	N	A	A

Del CUADRO 1 se puede observar que los casos El Niño son más numerosos que los casos La Niña, con lo cual las conclusiones y estadísticas generadas para El Niño serán más robustas que para La Niña. El CUADRO 2 muestra la cantidad de casos de que se dispone para el análisis en cada estación del año.

CUADRO 2: Cantidad de casos en cada estación del año según MEI RANK index

CASOS	VERANO	OTOÑO	INVIERNO	PRIMAVERA
EL NIÑO	16	14	16	15
NEUTRO	14	18	13	13
LA NIÑA	8	6	9	10

Se ha hallado que el indicador BEST, descrito anteriormente, tiene también una buena correlación con el comportamiento de las variables meteorológicas y con los rendimientos de los cultivos en la región pampera (Fernández Long 2008). Por lo tanto, se ha decidido explorar la relación ENSO-temperaturas también por medio de este índice.

Los valores de BEST estandarizados tienen media cero y desviación estándar igual a uno. Se sugiere la siguiente clasificación:

BEST INDEX	
< -0.80	LA NIÑA
> 0.80	EL NIÑO

Según este criterio, las estaciones del año en el periodo 1970-2007 fueron clasificadas como El Niño, neutro o La Niña. Los resultados se pueden ver en el CUADRO 3.

**CUADRO 3: Clasificación de las estaciones del año
en El Niño (O), neutro (N) o La Niña (A)
según BEST index**

AÑO	VERANO	OTOÑO	INVIERNO	PRIMAVERA
	DEF	MAM	JJA	SON
1970	N	N	N	A
1971	A	A	A	A
1972	N	N	O	O
1973	O	N	A	A
1974	A	A	N	N
1975	N	A	A	A
1976	A	N	N	N
1977	N	N	O	O
1978	O	N	N	N
1979	N	N	N	N
1980	N	N	N	N
1981	N	N	N	N
1982	N	N	O	O
1983	O	O	N	N
1984	N	N	N	N
1985	N	N	N	N
1986	N	N	N	N
1987	O	O	O	O
1988	N	N	A	A
1989	A	A	N	N
1990	N	N	N	N
1991	N	O	O	O
1992	O	O	N	N
1993	N	O	O	N
1994	N	O	O	O
1995	O	N	N	N
1996	N	N	N	N
1997	N	O	O	O
1998	O	O	A	A
1999	A	A	A	A
2000	A	A	N	A
2001	A	N	N	N
2002	N	O	O	O
2003	O	N	N	N
2004	N	N	O	O
2005	O	O	N	N
2006	N	N	O	O
2007	N	N	N	A

El CUADRO 4 muestra la cantidad de casos de que se dispone para el análisis en cada estación del año. Se observa una menor cantidad de eventos ENOS, en especial menor cantidad de fases cálidas (O). Por ejemplo, si bien para el MEI se produjo un evento El Niño desde el invierno de 1979 hasta el invierno de 1980, esta anomalía no es considerada por el BEST como una situación suficientemente anómala como para definirse como estado El Niño. Proporcionalmente, los eventos La Niña no muestran tantas diferencias en cantidad de casos al comparar los índices MEI y BEST.

CUADRO 4: Cantidad de casos en cada estación del año según BEST index

CASOS	VERANO	OTOÑO	INVIERNO	PRIMAVERA
EL NIÑO	9	10	11	10
NEUTRO	22	22	21	19
LA NIÑA	7	6	6	9

En conclusión, la clasificación de cada estación del año según el índice BEST resulta más estricta que la que se obtiene con el índice MEI, conservando sólo los casos correspondientes a anomalías más intensas, en especial en la fase cálida o El Niño.

PARÁMETROS TÉRMICOS A EVALUAR

A todos aquellos valores numéricos, simples o complejos, que sirven para cuantificar algún tipo de relación entre elementos meteorológicos con los diversos procesos o componentes de la producción agropecuaria, se los conoce con la denominación de “índices”.

El IPCC determinó algunos parámetros o índices relacionados con las temperaturas máximas y mínimas a ser analizados desde el punto de vista de las tendencias que han mostrado en las últimas décadas. Si bien no es el objetivo de este trabajo, es interesante evaluar el comportamiento de estos mismos parámetros en relación al fenómeno ENSO.

CUADRO 5

	INDICE	DESCRIPCIÓN
MÁXIMA	Días tropicales (DT)	Número de días en el año con temperatura máxima superior a 25°C
	Día más caluroso (DMC)	Temperatura máxima más elevada registrada en el año (°C)
	Días calurosos (DC)	Porcentaje de días de cada año con temperatura máxima mayor que el percentil 90 (%)
	Días fríos (DF)	Porcentaje de días de cada año con temperatura máxima menor que el percentil 10 (%)
MÍNIMA	Días con helada (DH)	Número de días en el año con temperatura mínima inferior a 0°C
	Noche más fría (NMF)	Temperatura mínima más baja registrada en el año (°C)
	Noches frías (NF)	Porcentaje de días de cada año con temperatura mínima menor que el percentil 10 (%)
	Noches calurosas (NC)	Porcentaje de días de cada año con temperatura mínima mayor que el percentil 90 (%)
	Noches tropicales (NT)	Número de días en el año con temperatura mínima superior a 20°C
AMBAS	Amplitud diaria (AD)	Valor medio anual de la amplitud diaria (°C)
	Amplitud extrema (AE)	Diferencia entre el día más cálido y la noche más fría, es decir, DMC – NMF (°C)

En el CUADRO 5 se describen los índices que se estudiaron en el trabajo de Vincent el al. (2005). Todos los parámetros se estudiaron a nivel anual, como corresponde a la escala temporal de cambio climático.

Para nuestro trabajo se propone elegir algunos de ellos y estudiarlos en relación al ENSO, pero a nivel estacional, que corresponde a una escala temporal más acorde a la actividad agropecuaria. Los parámetros propuestos para nuestro análisis se describen en el CUADRO 6 y resultan de adaptaciones de los considerados por el IPCC.

CUADRO 6

	INDICE	DESCRIPCIÓN
MÁXIMA	Olas de calor (OC)	Número de casos en cada estación del año con al menos 5 días consecutivos con temperatura máxima superior a 30°C y mínima superior a 20°C
	Días calurosos (DC)	Número de casos con temperatura máxima mayor que el percentil 90 en cada estación del año
	Días fríos (DF)	Número de casos con temperatura máxima menor que el percentil 10 en cada estación del año (%)
MÍNIMA	Días con helada (DH)	Número de casos con temperatura mínima inferior a 0°C y 3°C en cada estación del año
	Noches frías (NF)	Número de casos con temperatura mínima menor que el percentil 10 en cada estación del año (%)
	Noches calurosas (NC)	Número de casos con temperatura mínima mayor que el percentil 90 en cada estación del año (%)

MÉTODO Y RESULTADOS

Se descartaron las series con más de 3% de datos faltantes, que corresponde aproximadamente a un día por mes. Todas las localidades consideradas poseen un récord de temperaturas diarias (máxima y mínima) que va del 01/01/1970 al 31/12/2007, con excepción de: Balcarce (hasta 31/03/2007), Bordenave (hasta 31/03/2007), Villa María del Río Seco (hasta 30/06/2007) y Coronel Suárez (desde 01/06/1971).

1. Frecuencia de días cálidos (DC) y días fríos (DF)

Se compararon las frecuencias de días cálidos y días fríos en estaciones del año bajo condiciones El Niño con las resultantes del análisis de toda la serie completa (38 casos). El mismo procedimiento se realizó para estaciones del año bajo condiciones La Niña. Para la clasificación de los trimestres se utilizaron los índices MEI y BEST.

Primero se procedió a calcular los percentiles 90% (DC) y 10% (DF) para cada estación del año, tomando en cuenta las temperaturas máximas diarias de los 38 trimestres del periodo 1970-2007 y suponiendo una distribución normal. Esto determina una temperatura umbral superior (t_{max90}) y una temperatura umbral inferior (t_{max10}): la probabilidad estadística de que la temperatura máxima esté por encima de t_{max90} (DC) será del 10%; también será del 10% la probabilidad de que la temperatura máxima se halle por debajo de t_{max10} (DF).

Cuando se consideran sólo las estaciones del año que han transcurrido bajo condiciones El Niño, la probabilidad de que la temperatura máxima esté por encima de t_{max90} o por debajo de t_{max10} podrá ser mayor o menor que 10%. Lo mismo puede suceder si se consideran sólo las estaciones del año que han transcurrido bajo condiciones La Niña.

Por ejemplo, si se toman los 38 veranos de la serie de temperaturas máximas de Rosario, $t_{max90} = 34.3^{\circ}\text{C}$ y $t_{max10} = 25.2^{\circ}\text{C}$. Esto es, en esta localidad en verano la probabilidad de que la máxima sea superior a 34.3°C es del 10%, y también hay una probabilidad del 10% de que la máxima sea inferior a 25.2°C . Sin embargo, si se toman sólo los veranos El Niño, la probabilidad de que la temperatura máxima supere los 34.3°C es del 7% (clasificación según MEI). Si se toman sólo los veranos La Niña, la probabilidad de que la temperatura supere los 34.3°C es del 14% (clasificación según MEI). Para la clasificación según el índice BEST, las probabilidades pasan a 8% y 15%, respectivamente. Es decir, la probabilidad de máximas extremadamente altas (DC) en Rosario se ve disminuida para veranos El Niño y aumentada para veranos La Niña.

Paralelamente, la probabilidad de que la mínima no supere los 25.2°C (DF) en Rosario en veranos El Niño es del 11% (MEI y BEST) y en veranos La Niña es del 9% (MEI y BEST). Es decir, la probabilidad de ocurrencia de temperaturas máximas extremadamente bajas en Rosario en veranos El Niño se ve levemente aumentada, mientras que en veranos La Niña se ve levemente disminuida, pero la magnitud de ambas variaciones resulta poco significativa.

Se calculó en cada localidad y para cada estación del año un **ÍNDICE que muestra la diferencia entre la probabilidad de máximas muy elevadas (o muy bajas) durante El Niño (o La Niña) en comparación con la misma probabilidad que surge de toda**

la serie de 38 años que, por definición, es siempre igual al 10%. Así, el índice será positivo cada vez que la probabilidad para casos El Niño (o La Niña) se vea disminuido, mientras que será positivo si esa probabilidad se ve aumentada.

En los mapas siguientes se han trazado isolíneas para este índice y se han coloreado las áreas con índice mayor que 0.02 (aumento del 2% o más) o menor que -0.02% (disminución mayor que 2%). Se han dejado sin colorear las áreas con variaciones menores o iguales que 2%, donde puede esperarse que la frecuencia de DC o DF no se vea significativamente modificada por la ocurrencia de la fase ENOS correspondiente.

1.1 Invierno

No se halló ninguna señal sobre la frecuencia de DF en invierno, para ninguna de las fases de ENOS. Para la frecuencia de DC, al utilizar la clasificación según el índice BEST, se halló una frecuencia ligeramente aumentada durante El Niño el sudoeste del NOA y norte de Cuyo, y también en el extremo noreste del país. Para La Niña, utilizando la clasificación según el mismo índice, se halló un área de frecuencia disminuida de DC que ocupa la Mesopotamia y el este del NEA. No se hallaron resultados significativos para DC cuando se consideró la clasificación según el índice MEI.

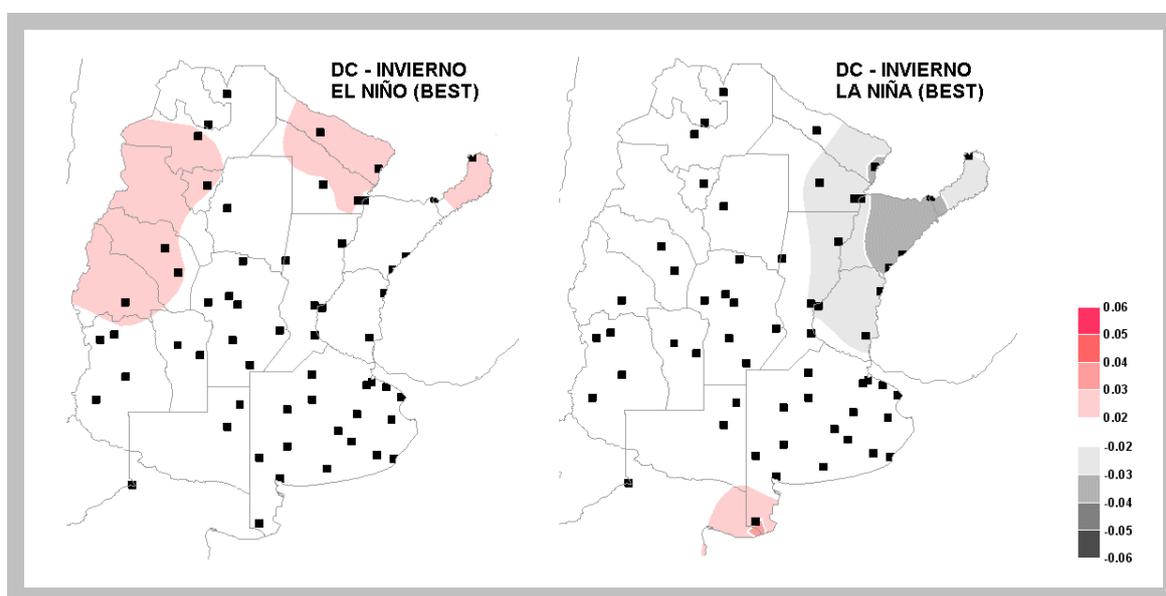


FIGURA 6: Variaciones en la frecuencia de días cálidos en invierno para El Niño y La Niña

1.2 Primavera

Se halló una leve tendencia a la disminución de la cantidad de DC en primavera durante El Niño en el extremo sur del área de estudio. Si se utiliza la clasificación según MEI, la zona abarca el sudoeste de Buenos Aires. Usando la clasificación según BEST, la misma se halla restringida al norte de la Patagonia.

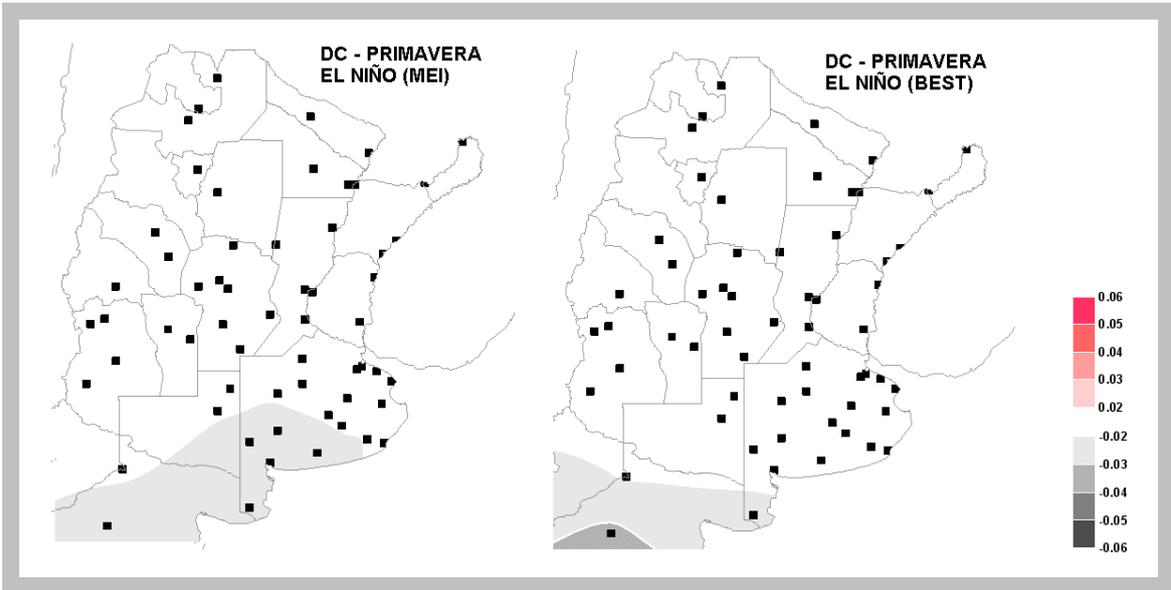


FIGURA 7: Variaciones en la frecuencia de días cálidos en primavera para El Niño

Para la primavera, pero en el caso de La Niña, se halló en el sudoeste de la provincia de Buenos Aires una tendencia a mayor frecuencia de DC, tanto con la clasificación según MEI como según BEST.

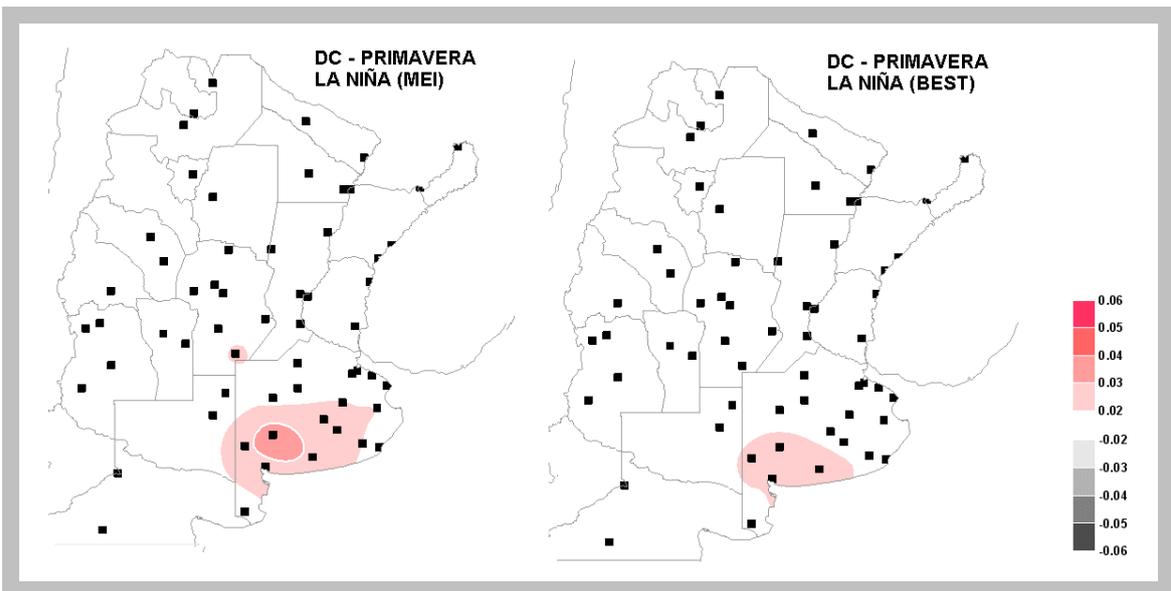


FIGURA 8: Variaciones en la frecuencia de días cálidos en primavera para La Niña

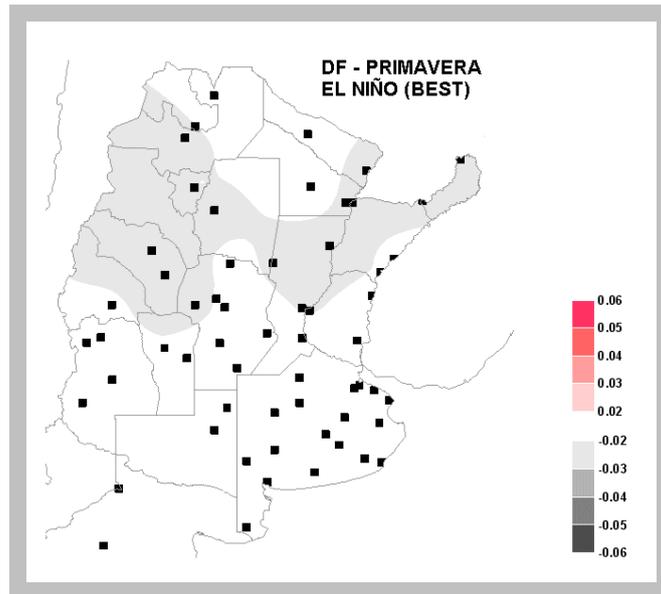


FIGURA 9: Variaciones en la frecuencia de días fríos en primavera para El Niño

La frecuencia de DF en primavera no mostró cambios sustanciales en casos La Niña, con ninguna de las dos clasificaciones. En el caso de El Niño, sólo se obtuvo una leve merma en la frecuencia de DF en el sur del NOA y norte de Cuyo, y también en el norte de Santa Fe y de la Mesopotamia. Este resultado se halló sólo utilizando la clasificación según BEST.

1.3 Verano

Los DC en veranos El Niño muestran una leve disminución en su frecuencia en el centro de la región pampeana y parte del NEA. Si se considera la clasificación según MEI, estas dos zonas se unen, y la alteración en la frecuencia se extiende por todo el noreste de la región pampeana y el este de la Mesopotamia.

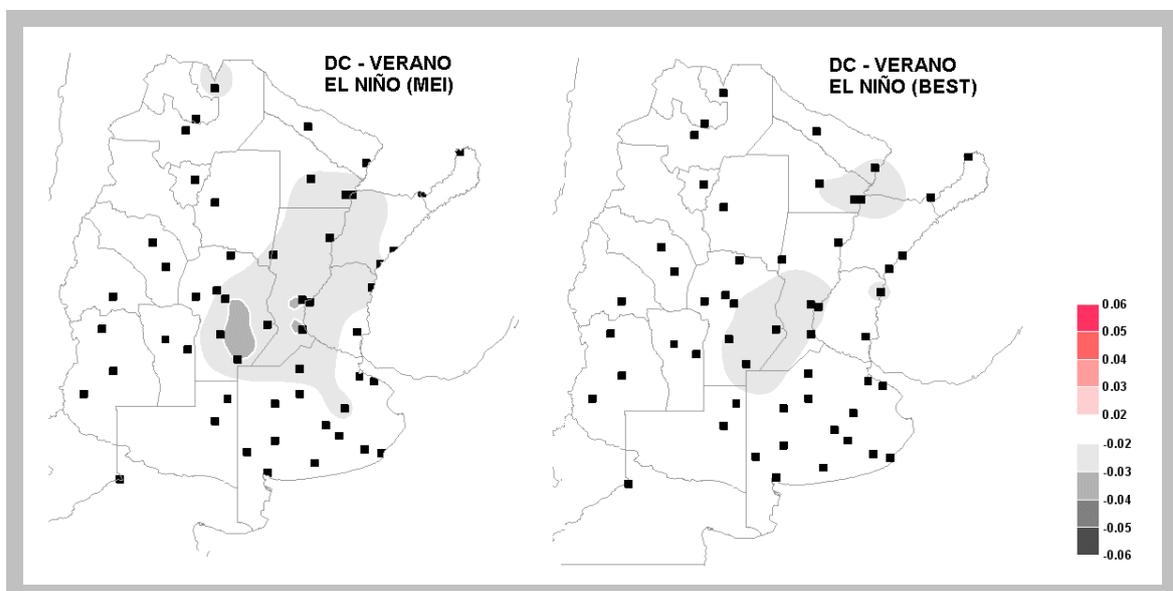


FIGURA 10: Variaciones en la frecuencia de días cálidos en verano para El Niño

Durante los veranos La Niña la frecuencia de DC se ve fuertemente aumentada en el norte del NOA, centro de la región pampeana y sur de Buenos Aires. Este resultado se halló con ligeras variantes tanto para la clasificación según MEI como según BEST y constituye la alteración más evidente en la frecuencia de DC que se ha hallado.

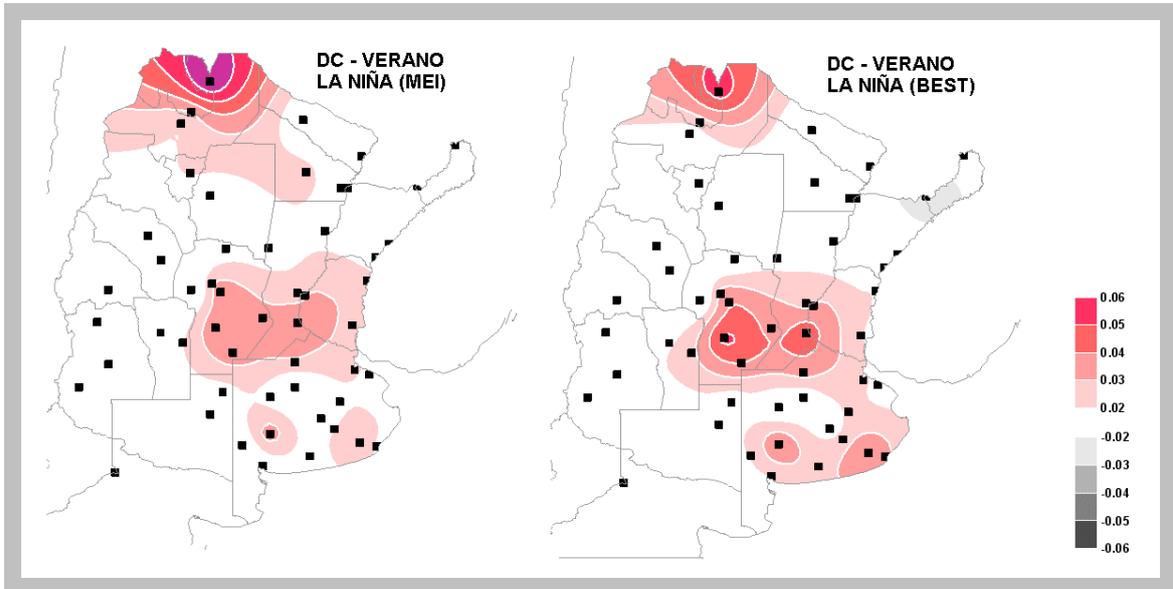


FIGURA 11: Variaciones en la frecuencia de días cálidos en verano para La Niña

En cuanto a la frecuencia de DF, tanto para El Niño como para La Niña la clasificación según MEI no arrojó resultados visibles. Con la clasificación según BEST, se observa un aumento en la frecuencia de DF en Cuyo durante veranos El Niño y una disminución en veranos La Niña. Esta disminución en la frecuencia de DF parece extenderse hacia el norte por la zona cordillerana, pero la cantidad de estaciones meteorológicas dentro de esta zona es pobre como para sacar conclusiones.

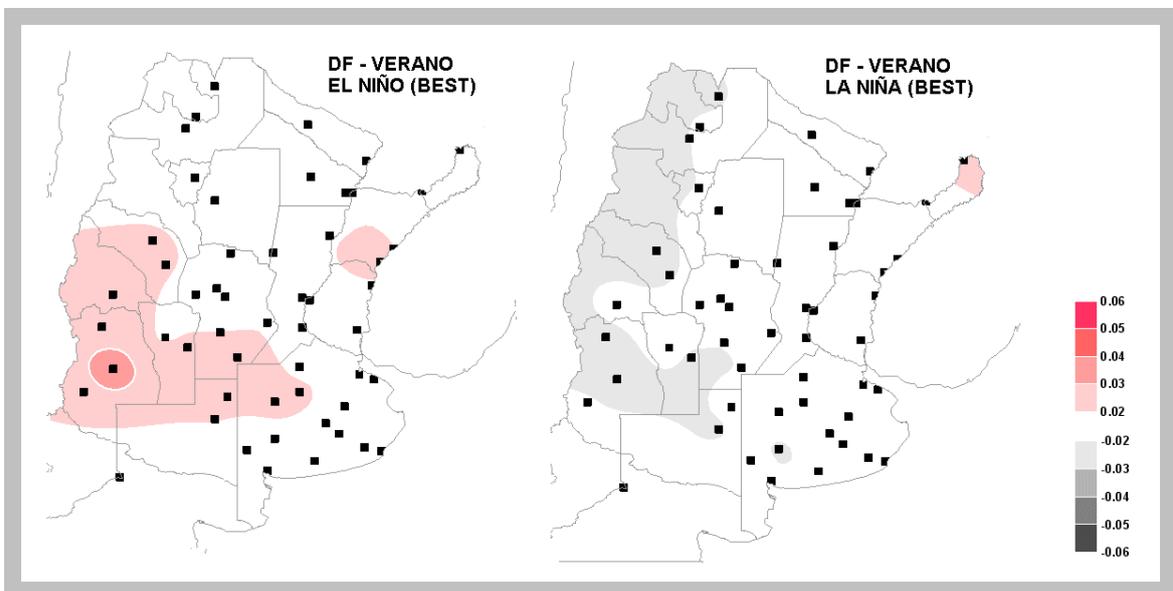


FIGURA 12: Variaciones en la frecuencia de días fríos en verano para El Niño y La Niña

1.4 Otoño

Durante los otoños La Niña se observa una disminución en la frecuencia de DC en el norte del país, con ambas clasificaciones. Se insinúa una disminución en la frecuencia de DC en parte de la provincia de Buenos Aires (MEI) y parte de Cuyo (BEST). No se hallaron resultados destacados para la frecuencia de DC en los otoños El Niño.

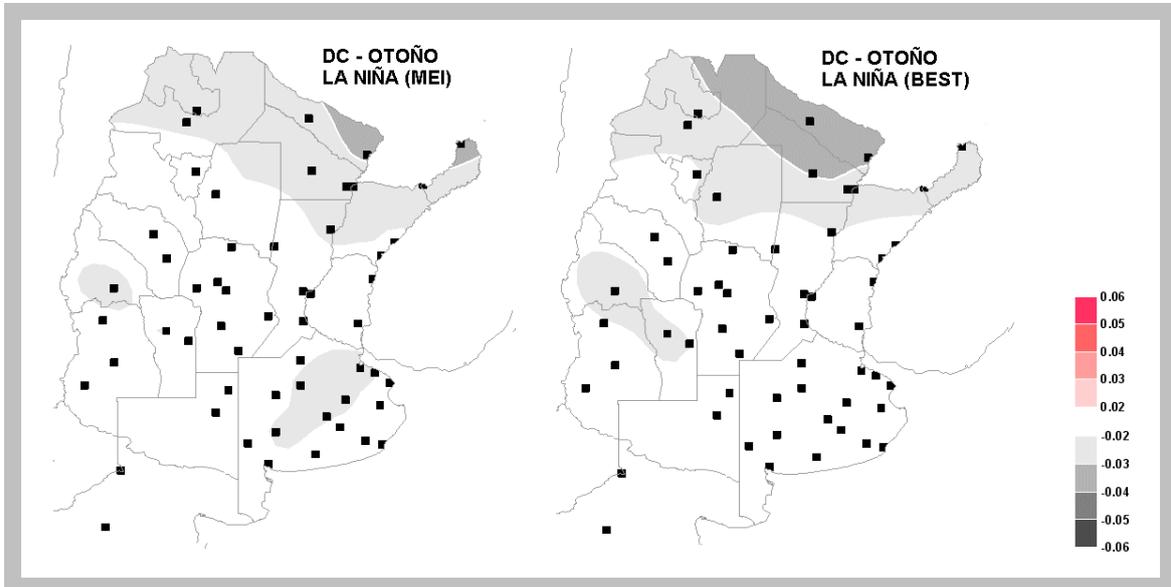


FIGURA 13: Variaciones en la frecuencia de días cálidos en otoño para La Niña

Para la frecuencia de DF tampoco se hallaron impactos de El Niño en otoño. En cuanto a los otoños La Niña, se observa un aumento en la frecuencia de DF en el norte del país, con ambas clasificaciones.

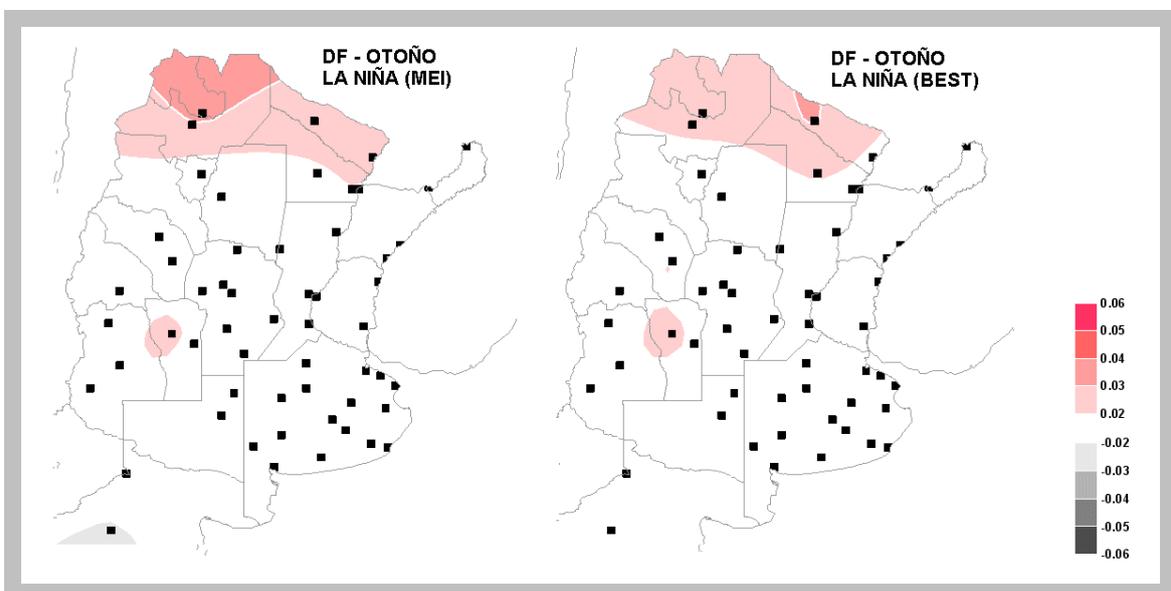


FIGURA 14: Variaciones en la frecuencia de días fríos en otoño para La Niña

Conclusión 1:

- *La clasificación según el índice BEST es más estricta en la determinación de estado El Niño o La Niña y arrojó resultados en más casos que la clasificación según MEI.*
- *En los casos en que se hallaron resultados con ambas clasificaciones, las mismas resultaron similares.*
- *En todas las estaciones del año se obtuvo alguna alteración en la frecuencia de DC bajo condiciones La Niña, siendo la más intensa la que corresponde al verano (aumento).*
- *Sólo se obtuvieron alteraciones en la frecuencia de DF en primaveras El Niño (disminución), veranos El Niño (aumento) y La Niña (disminución), y en otoños La Niña (aumento).*

2. Frecuencia de noches cálidas (NC) y noches frías (NF)

Se compararon las frecuencias de noches cálidas y noches frías en estaciones del año bajo condiciones El Niño con las resultantes del análisis de toda la serie completa (38 casos). El mismo procedimiento se realizó para estaciones del año bajo condiciones La Niña. Para la clasificación de los trimestres se utilizaron los índices MEI y BEST.

Primero se procedió a calcular los percentiles 90% (NC) y 10% (NF) para cada estación del año, tomando en cuenta las temperaturas mínimas diarias de los 38 trimestres del periodo 1970-2007 y suponiendo una distribución normal. Esto determina una temperatura umbral superior (t_{min90}) y una temperatura umbral inferior (t_{min10}): la probabilidad estadística de que la temperatura mínima esté por encima de t_{min90} (NC) será del 10%; también será del 10% la probabilidad de que la temperatura mínima se halle por debajo de t_{min10} (NF).

Al igual que con las temperaturas máximas, cuando se consideran sólo las estaciones del año que han transcurrido bajo condiciones El Niño, la probabilidad de que la temperatura mínima esté por encima de t_{min90} o por debajo de t_{min10} podrá ser mayor o menor que 10%. Lo mismo puede suceder si se consideran sólo las estaciones del año que han transcurrido bajo condiciones La Niña.

Siguiendo con el ejemplo anterior, si se toman los 38 veranos de la serie de temperaturas mínimas de Rosario, $t_{min90} = 21.7^{\circ}\text{C}$ y $t_{min10} = 13.2^{\circ}\text{C}$. Esto es, en esta localidad en verano la probabilidad de que la mínima sea superior a 21.7°C es del 10%, y también hay una probabilidad del 10% de que la mínima sea inferior a 13.2°C . Sin embargo, si se toman sólo los veranos El Niño, la probabilidad de que la temperatura mínima no llegue a los 13.2°C es del 8% (clasificación según MEI). Si se toman sólo los veranos La Niña, la probabilidad de que la temperatura no alcance los 13.2°C es del 14% (clasificación según MEI). Para la clasificación según el índice BEST, las probabilidades pasan a 9% y 12%, respectivamente. Es decir, la probabilidad de mínimas extremadamente bajas (NF) en Rosario se ve disminuida para veranos El Niño y aumentada para veranos La Niña.

Se calculó en cada localidad y para cada estación del año un **ÍNDICE que muestra la diferencia entre la probabilidad de mínimas muy elevadas (o muy bajas) durante El Niño (o La Niña) en comparación con la misma probabilidad que surge de toda la serie de 38 años que, por definición, es siempre igual al 10%**. Así, el índice será positivo cada vez que la probabilidad para casos El Niño (o La Niña) se vea disminuido, mientras que será positivo si esa probabilidad se ve aumentada.

En los mapas siguientes se han trazado isolíneas para este índice y se han coloreado las áreas con índice mayor que 0.02 (aumento del 2% o más) o menor que -0.02% (disminución mayor que 2%). Se han dejado sin colorear las áreas con variaciones menores o iguales que 2%, donde puede esperarse que la frecuencia de NC o NF no se vea significativamente modificada por la ocurrencia de la fase ENOS correspondiente.

2.1 Invierno

Utilizando la clasificación según el índice MEI no se han hallado variaciones marcadas en las frecuencias de NC o NF durante inviernos El Niño. En cambio, utilizando el índice BEST se halló un aumento en la frecuencia de NC, en especial en el extremo noreste del país, y una leve disminución en la frecuencia de NF.

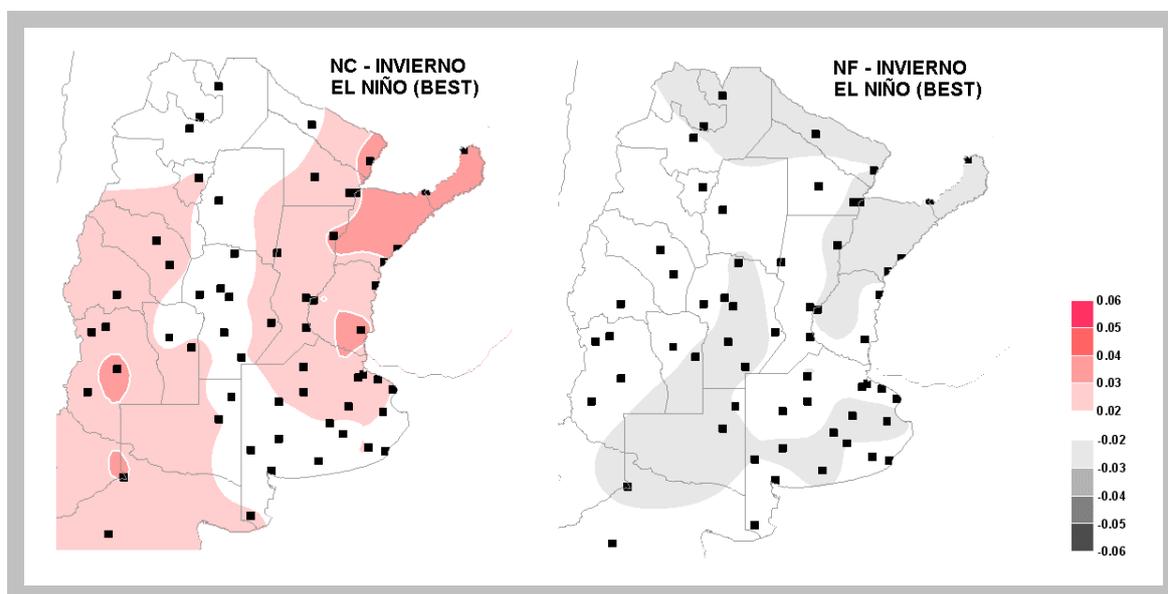


FIGURA 15: Variaciones en la frecuencia de noches cálidas y noches frías en invierno para El Niño

En cuanto a los inviernos La Niña, se han obtenido resultados con ambas clasificaciones. En ambos casos, los resultados que se obtienen con la clasificación según MEI son más marcados, alcanzando mayor magnitud. En estos casos se observa una menor frecuencia de NC durante los inviernos La Niña, en especial en la Mesopotamia y norte de Cuyo, y un aumento en la frecuencia de NF, más marcada en el NOA y Cuyo.

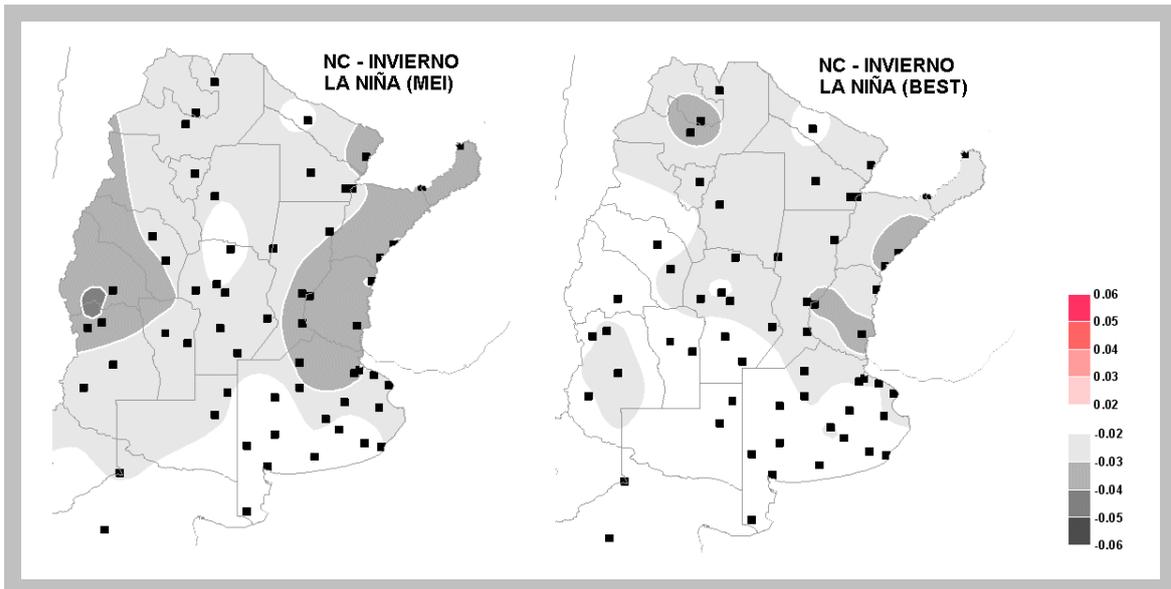


FIGURA 16: Variaciones en la frecuencia de noches cálidas en invierno para La Niña

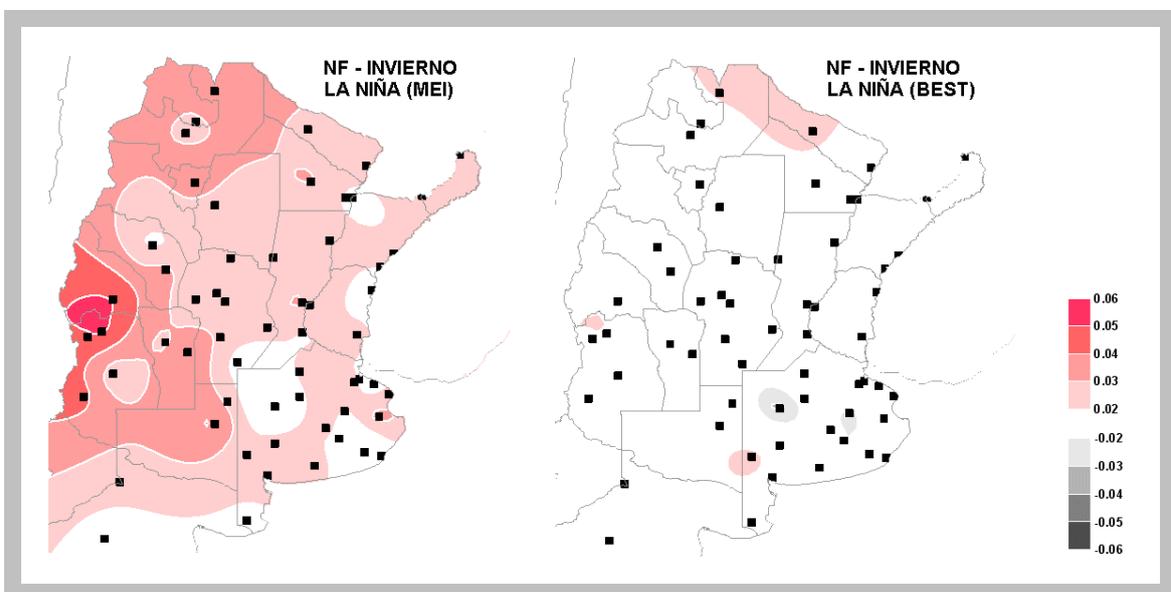


FIGURA 17: Variaciones en la frecuencia de noches frías en invierno para La Niña

2.2 Primavera

Utilizando la clasificación según el índice MEI no se han hallado variaciones marcadas en las frecuencias de NC o NF durante primaveras El Niño. En cambio, utilizando el índice BEST se halló un aumento en la frecuencia de NC, también en el extremo noreste del país, y una leve disminución en la frecuencia de NF.

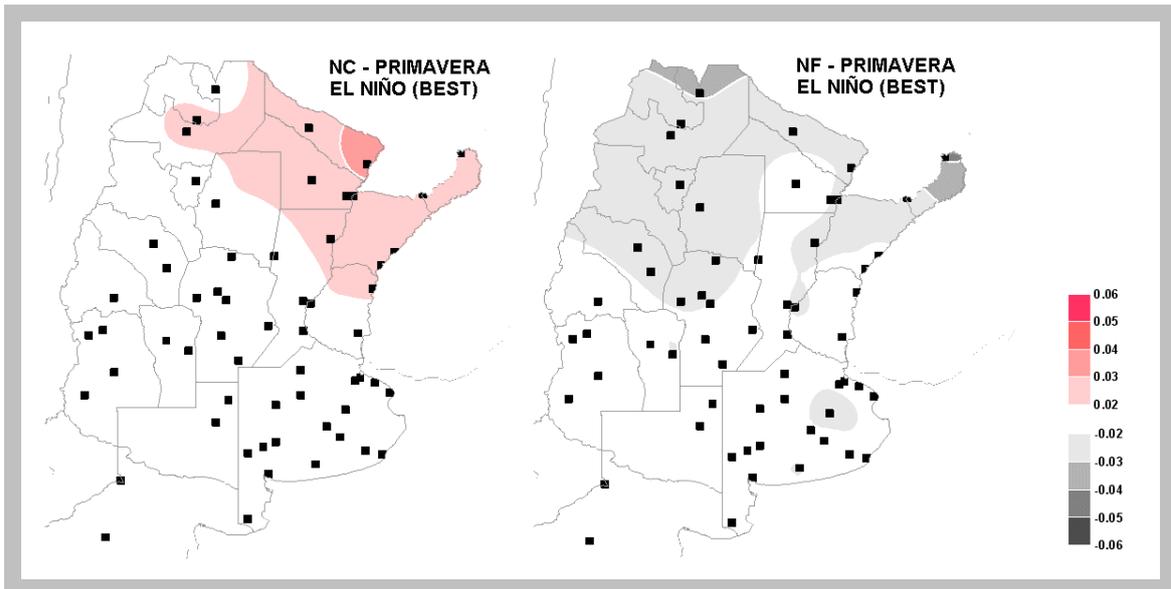


FIGURA 18: Variaciones en la frecuencia de noches cálidas y noches frías en primavera para El Niño

Para La Niña, ambas clasificaciones mostraron una disminución en la frecuencia de NC en la mitad noreste del área de estudio. No se observaron modificaciones marcadas en la frecuencia de NF, con ninguna de las dos clasificaciones.

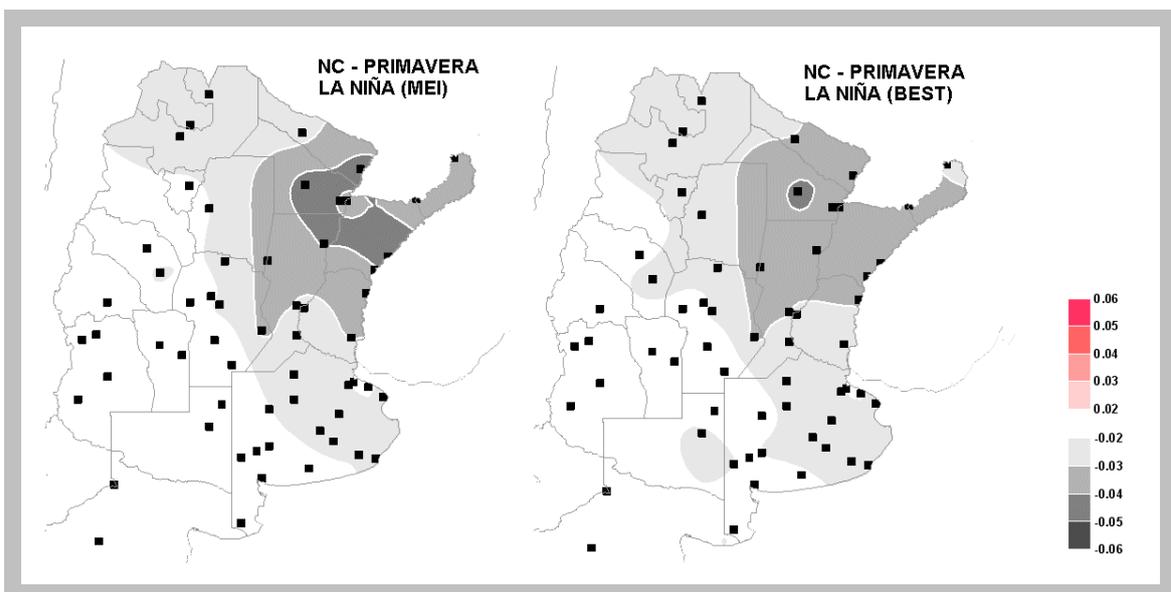


FIGURA 19: Variaciones en la frecuencia de noches cálidas en primavera para La Niña

2.3 Verano

No se obtuvo ninguna señal destacada en la frecuencia de NC, ni en veranos El Niño ni en veranos La Niña, para ninguna de las dos clasificaciones utilizadas. En cuanto a la frecuencia de NF, se observó una disminución en la misma en el este del NEA, mejor resuelta por la clasificación según BEST y apenas insinuada por la clasificación según MEI. La frecuencia de NF durante los veranos La Niña se ve aumentada sobre

el este de la región pampeana y sur del NEA. Con el índice MEI se obtuvo una zona de aumento en la frecuencia de NF sobre las provincias cuyanas.

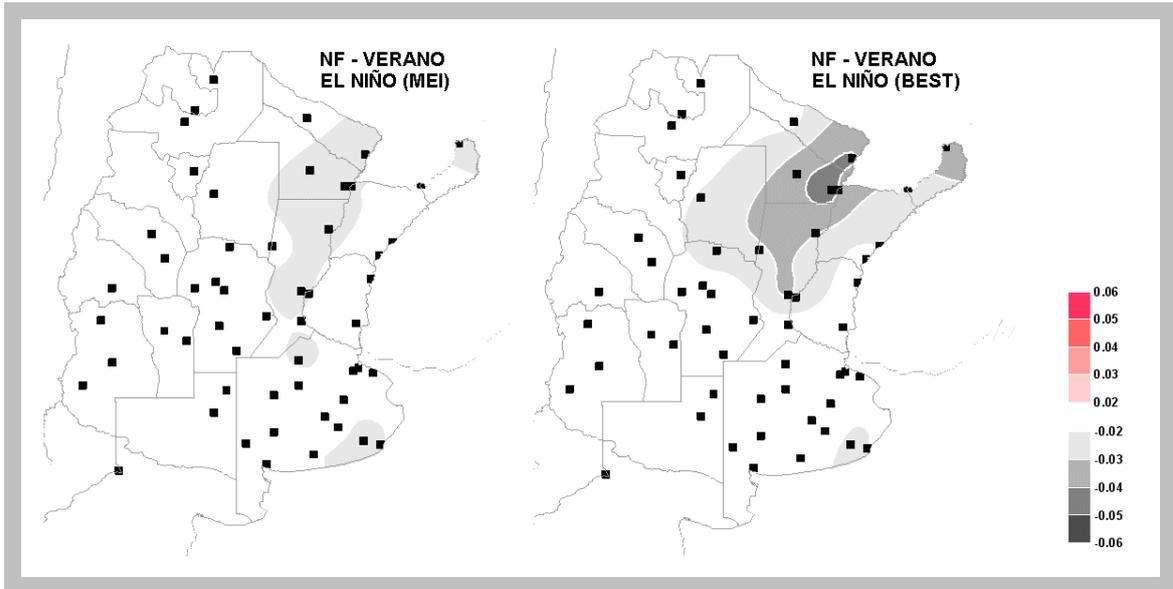


FIGURA 20: Variaciones en la frecuencia de noches frías en verano para El Niño

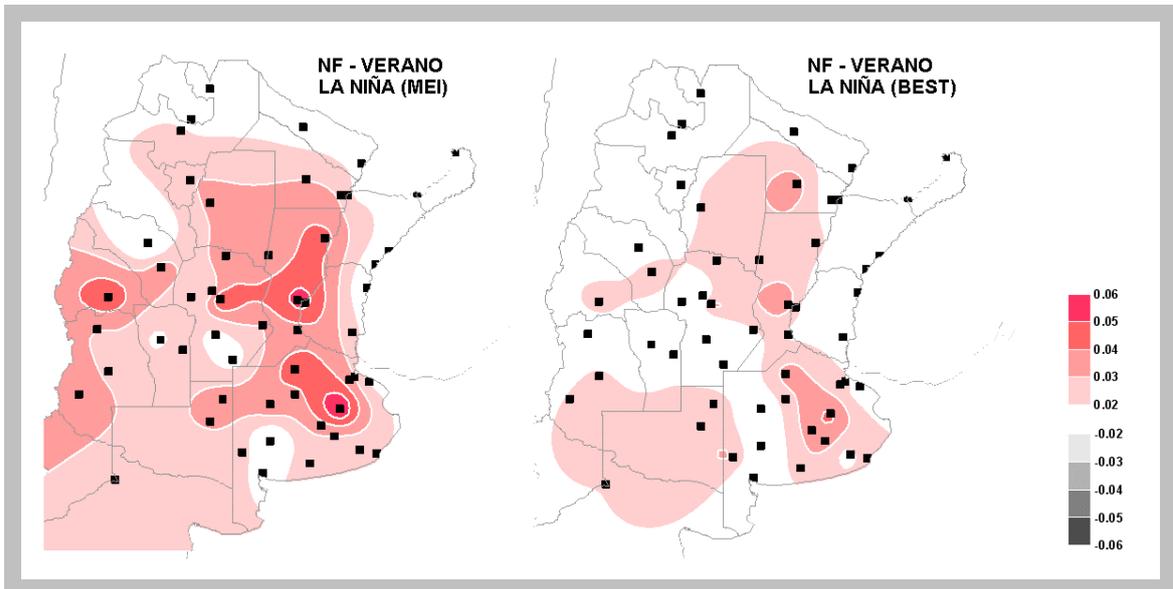


FIGURA 21: Variaciones en la frecuencia de noches frías en verano para La Niña

2.4 Otoño

No se obtuvieron variaciones significativas en las frecuencias de NC durante otoños El Niño, con ninguna de las dos clasificaciones utilizadas. La frecuencia de NF se ve disminuida en otoños El Niño sobre el extremo noreste del país. Este resultado es más notorio si se considera la clasificación según BEST.

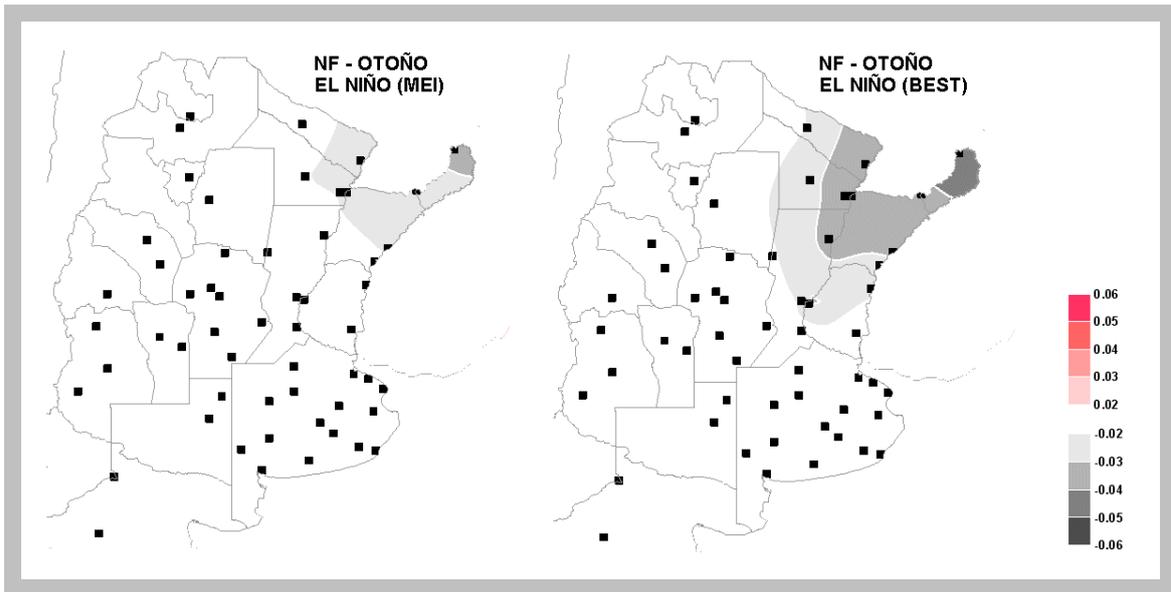


FIGURA 22: Variaciones en la frecuencia de noches frías en otoño para El Niño

Para los otoños La Niña se observó una disminución en la frecuencia de NC, en especial en el NEA. La clasificación según MEI muestra un máximo sobre el centro de la Mesopotamia.

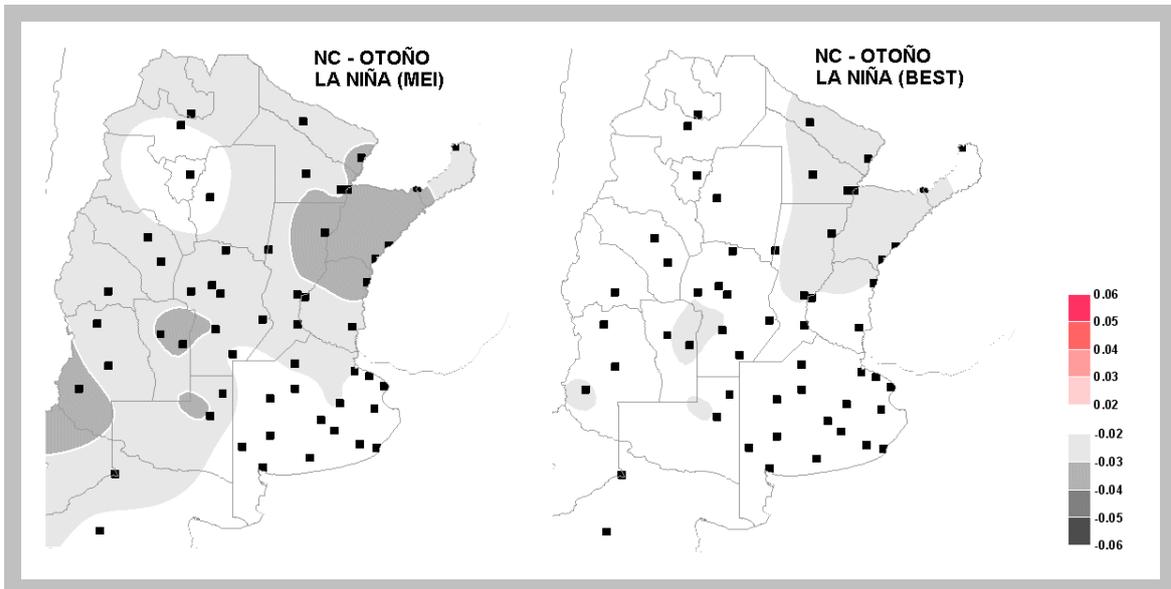


FIGURA 23: Variaciones en la frecuencia de noches cálidas en otoño para La Niña

Las NF durante los otoños La Niña parecen tener una frecuencia mayor. Utilizando la clasificación según MEI, el área de aumento en la frecuencia de NF durante otoños La Niña abarca la mitad norte del área de estudio.

Cabe preguntarse el por qué de las importantes diferencias entre los resultados obtenidos mediante las clasificaciones MEI y BEST para La Niña, en especial teniendo en cuenta que la cantidad de otoños La Niña es la misma en ambos casos. Si bien la cantidad de casos es la misma, la clasificación según MEI incluye el otoño de 1976, mientras que el índice BEST lo excluye. Lo contrario sucede con el otoño de 2000.

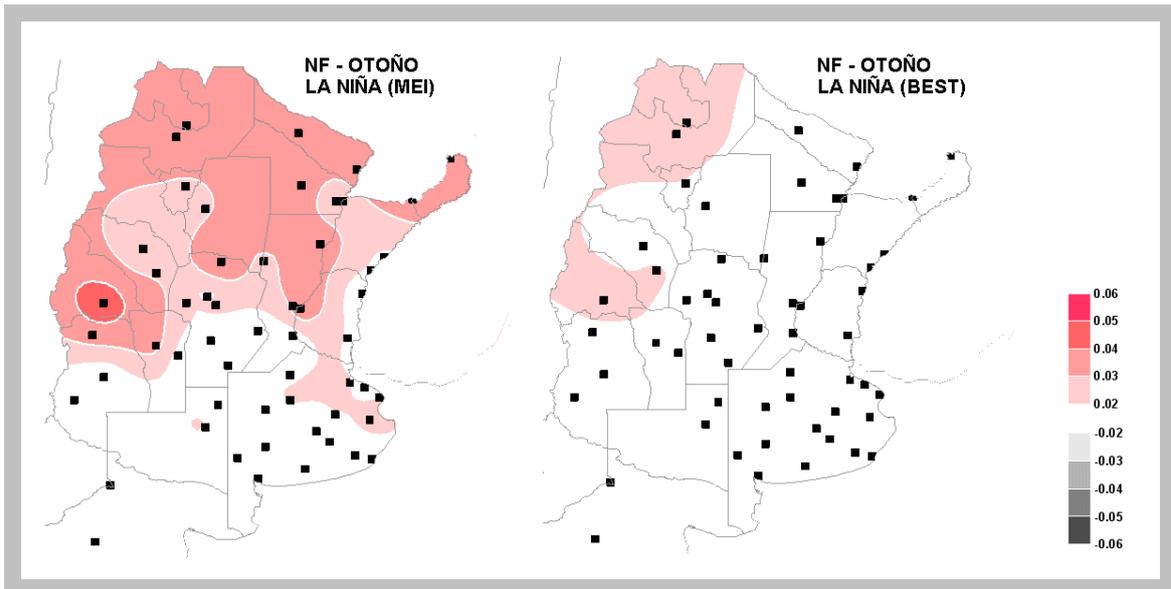


FIGURA 24: Variaciones en la frecuencia de noches frías en otoño para La Niña

El otoño de 1976, considerado como La Niña sólo según MEI, fue bastante más frío que el de 2000, considerado La Niña sólo según BEST: la mínima media de otoño en Formosa fue de 15.3°C en 1976, mientras que en 2000 fue de 17.8°C; en Paraná, en 1976 fue de 10.5°C, mientras que en 2000 fue de 14.0°C. Así, la cantidad de casos es igual a seis en ambos casos, pero la clasificación según MEI incluye un otoño frío (1976) y excluye una con mínimas más altas (2000), contrariamente a lo que ocurre con la clasificación según BEST. Esto pone de manifiesto la fragilidad de los resultados para La Niña, debido a la escasa cantidad de casos disponibles.

Conclusión 2:

- *Para El Niño se obtuvieron resultados más marcados al utilizar el índice BEST. Esto puede deberse a que el mismo es más estricto y mantiene en esta categoría sólo a los casos más extremos.*
- *Para La Niña se obtuvieron resultados más marcados al utilizar el índice MEI. Esto puede deberse a que la cantidad de eventos en esta categoría es muy escasa al utilizar la clasificación según BEST, o a que los efectos sobre las temperaturas mínimas son significativos aún si no se trata de un evento La Niña demasiado intenso.*
- *Para los inviernos y primaveras El Niño, la frecuencia de NC se ve aumentada y la de NF disminuida, en especial en el noreste del país. Para veranos y otoños El Niño, sólo se observa una disminución en la frecuencia de NF.*
- *Para otoños e inviernos La Niña, la frecuencia de NC se ve disminuida y la de NF aumentada, en forma bastante generalizada. En primavera se observa una merma en la frecuencia de NC y en verano un aumento en la frecuencia de NF, con máximos en la región pampeana.*

3. Frecuencia de olas de calor (OC)

3.1 Definición de ola de calor

Una ola de calor es una sucesión de días en los que la temperatura supera un cierto límite. Es un fenómeno meteorológico extremos que puede ocurrir en cualquier estación del año, con mayor probabilidad en verano. En esta estación la sucesión de días sofocantes tiene efecto sobre la salud humana, animal y vegetal, causando fuerte estrés. En todas las épocas del año las olas de calor tienen consecuencias sobre el normal desarrollo de los cultivos y el rendimiento de los animales.

La temperatura es uno de los factores ambientales que por su influencia sobre el metabolismo de las plantas de soja, por ejemplo, y tiene un impacto directo en la productividad, condicionando los dos componentes básicos del rendimiento: número de granos y peso de los mismos (Censig et al, 2008).

En un ensayo realizado en la EEA Rafaela del INTA, sobre un suelo Argiudol típico, serie Rafaela, con rastrojo de maíz de la campaña anterior, los autores concluyeron que la reducción del rendimiento estuvo inversamente asociada al promedio de las temperaturas diurnas ($r = -0.5$; $p = 0.0005$) y al promedio de las temperaturas máximas diarias ($r = -0.6$; $p < 0.0001$).

En la Figura 25 se grafican los valores promedios de rendimientos para cada tratamiento, con respecto al promedio de las temperaturas medias diurnas (9-18hs) en cada momento del período de llenado de granos.

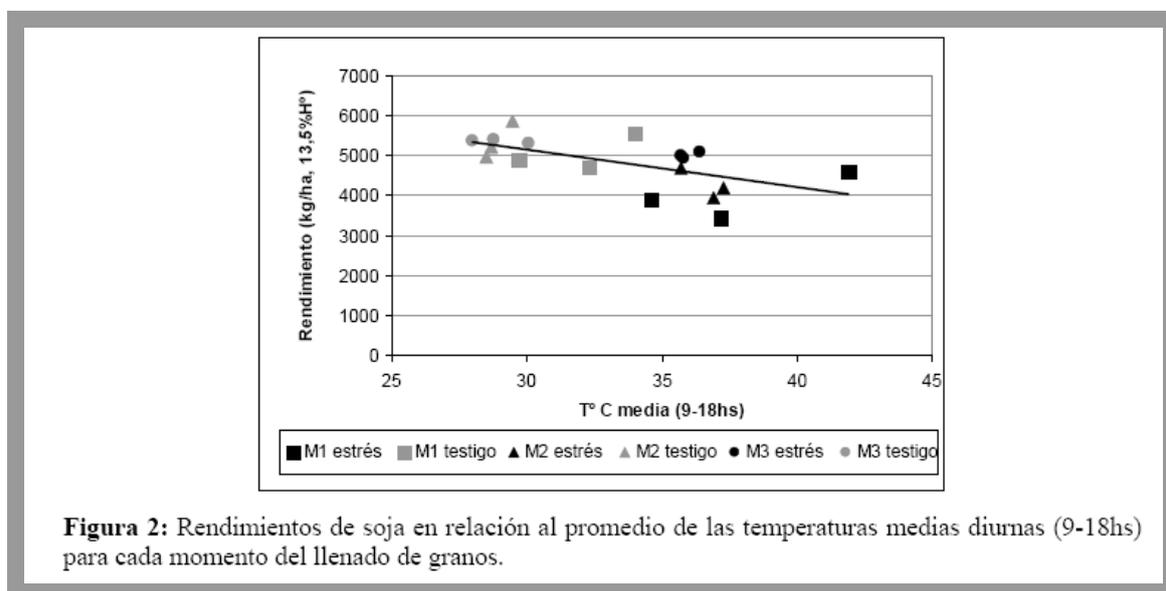


Figura 2: Rendimientos de soja en relación al promedio de las temperaturas medias diurnas (9-18hs) para cada momento del llenado de granos.

FIGURA 25

En definitiva, el estrés por elevadas temperaturas durante el llenado de los granos disminuye la productividad del cultivo de soja, especialmente si este estrés se produce entre R5 y R6. A partir de R6 un estrés de este tipo provoca una disminución en el peso de los granos, pero no tiene efecto sobre el principal componente del rendimiento “número de granos por unidad de superficie”.

En cuanto al trigo, picos de altas temperaturas durante el llenado del grano de trigo están relacionados con modificaciones de la calidad panadera, especialmente con disminuciones en la fuerza de la masa (Gaido et al, 2008). En este trabajo se evaluó la

influencia del estrés térmico en la calidad de progenies de trigo pan clasificándolas en grupos según su sensibilidad, analizando 60 progenies de trigo durante 3 años consecutivos.

Diversos autores coinciden en que la temperatura durante el llenado del grano es posiblemente el factor ambiental más importante en la modificación de la calidad del trigo, y que picos de altas temperaturas durante ese periodo pueden conducir a que el grano maduro produzca masas más débiles que las esperadas. Randall & Moss (1990) informaron que cuando la temperatura incrementa paulatinamente hasta 30 °C durante el llenado del grano generalmente aumenta la fuerza de la masa, mientras que temperaturas por encima de 30 °C, aun por pocos días, producen trigos con masas más débiles. Wrigley *et al.* (1994), en estudios realizados durante 11 años, coincidieron con otros autores en que cuando se producen picos de altas temperaturas ocasionales (superiores a 35 °C) en momentos de sensibilidad del cultivo, en general hubo un debilitamiento de la fuerza de la masa. Finalmente, los resultados de Gaida son coincidentes con algunas investigaciones que mostraron que periodos de altas temperaturas ocurridos durante el llenado efectivo del grano, alteran la calidad final del trigo, según la intensidad y duración del estrés, e influyen sobre la composición y contenido proteico total

Altas temperaturas durante algunas horas al día afectan el peso y la calidad de los granos de girasol, según un ensayo de Mantese *et al.* (2005). En girasol, el peso de grano disminuyó cuando los capítulos fueron sometidos a 7 días de alta temperatura constante (>34°C) durante todo el día. Sin embargo, se desconoce el efecto de altas temperaturas que simulan la marcha diaria natural de temperatura de granos (alternancia día/noche) sobre el rendimiento. Tampoco se conoce la duración mínima (número de días sucesivos de estrés) capaz de afectar al crecimiento del grano.

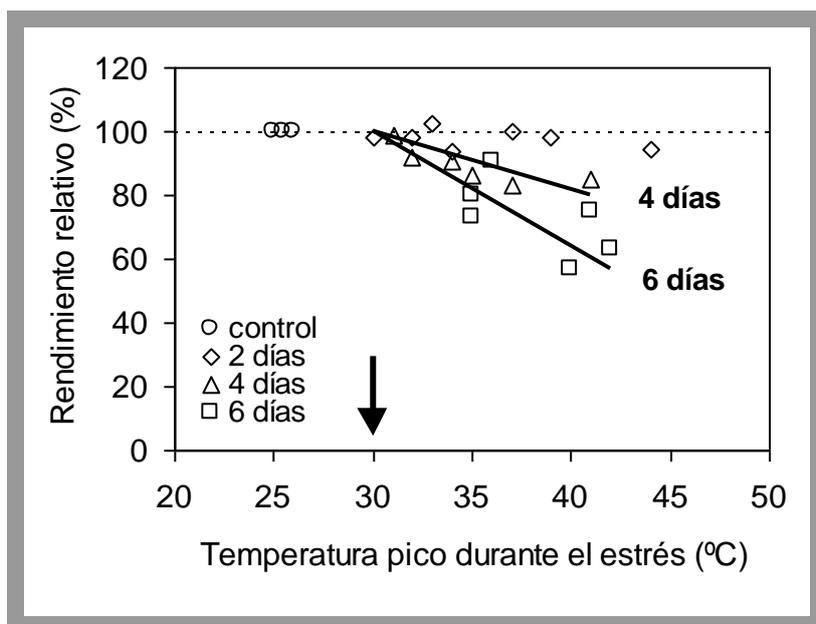


FIGURA 26

La Figura 26 muestra la reducción del rendimiento en grano (relativo a los controles) en capítulos de girasol expuestos a 2, 4 ó 6 días de altas temperaturas pico (temperaturas en las 5 horas centrales del día) aplicadas en etapas tempranas e intermedias durante el llenado.

Las altas y bajas temperaturas por encima y por debajo de los límites críticos afectan el rendimiento del arroz ya que inciden sobre el macollaje, la formación de espiguillas y la maduración (www.fca.uner.edu.ar/pro/pdf/fundamentosfrio.pdf). Así como las altas temperaturas causan estrés térmico sobre las plantas de arroz, las bajas temperaturas limitan la duración de los períodos, la tasa de crecimiento y el desarrollo de las plantas de arroz.

Hasta el momento de la iniciación del primordio de la panoja, los puntos de crecimiento de las hojas y los tallos están debajo del agua y la temperatura del agua controla el crecimiento y el desarrollo de la planta. La elongación de las hojas y la altura de la planta son afectadas, sin embargo, por la temperatura del agua y del aire. En las primeras etapas de crecimiento la temperatura del agua afecta el rendimiento por su incidencia sobre el número de panojas por planta, el número de espiguillas por panoja y el porcentaje de granos que maduran.

En las etapas posteriores la temperatura del aire afecta el rendimiento incidiendo sobre el porcentaje de espiguillas no fertilizadas y el porcentaje de granos que maduran. El tiempo fresco favorece una mayor eficiencia de uso del nitrógeno pero la fertilización nitrogenada aumenta la esterilidad en caso de bajas temperaturas. Cuando las temperaturas se encuentran por encima o por debajo de niveles críticos, la provisión de nitrógeno tiene poco efecto sobre la esterilidad.

En la EEA Rafaela se han llevado a cabo análisis de las respuestas de la producción y la composición de la leche a las variables ambientales durante diferentes épocas del año (Valtorta 2003). Se ha encontrado que el contenido de proteína se ve afectado por la temperatura mínima. Se observa una disminución en el porcentaje de proteína a medida que aumenta la temperatura mínima en primavera y en verano. Estos resultados indican la importancia del período de recuperación nocturno para los animales.

Si la temperatura durante la noche no disminuye a niveles que permitan la pérdida de calor del animal y, por lo tanto, la recuperación de un balance térmico adecuado, se producirán situaciones de estrés inmanejables que determinarán variaciones en la respuesta productiva, tanto en lo que hace al rinde como a la calidad de la leche obtenida. Este tipo de situación es común en el caso que se desarrollen olas de calor, durante las cuales las condiciones son tales que se ven disminuidas las posibilidades de que los animales eliminen los excesos de calor por contar con muy pocas horas con ambiente confortable a lo largo de día.

Queda claro por el breve resumen expuesto, que las condiciones de estrés térmico para plantas y animales proceden de la permanencia de días con altas temperaturas máximas y mínimas. No es fácil establecer los umbrales para las temperaturas extremas, por encima de los cuales se consideran muy superiores a las normales, ni la duración del lapso de días que determina un nivel sustancial de estrés. Así, se deberán determinar condiciones más o menos generales para la definición de ola de calor que será considerada en este trabajo.

Para la contabilización de los casos de ola de calor registrados en las estaciones meteorológicas con series de temperaturas máxima y mínima disponibles desde 1970, se generó un programa computacional que determina las secuencias de cinco días consecutivos o más de temperaturas máximas superiores a 30°C y mínimas superiores a 20°C. El programa considera las olas de calor ocurridas en verano (diciembre a febrero), otoño (marzo a mayo), invierno (junio a agosto), primavera (septiembre a noviembre) y luego suma los cuatro valores hallados para calcular el total anual de olas de calor.

Si bien podría haberse tomado otra definición, la misma permitirá saber cuáles son las áreas que con mayor frecuencia se hallan afectadas por altas temperaturas sostenidas en cada estación del año. Además, el objetivo de este trabajo es la determinación de una relación, si la hay, entre la ocurrencia de olas de calor y el fenómeno ENOS, y la misma puede analizarse perfectamente a partir de los eventos considerados según esta definición.

3.2 Frecuencia de olas de calor

El Cuadro 7 muestra la frecuencia media de olas de calor hallada para cada una de las estaciones con datos de temperaturas diarias extremas en el periodo 1970-2007. Los resultados muestran la frecuencia para cada una de las estaciones del año y la frecuencia anual. La frecuencia más alta corresponde a Las Lomitas (Formosa), donde se observan normalmente 6 ó 7 olas de calor al año. En verano, en esta localidades suelen darse unas 4 olas de calor, 2 en otoño y no todos los años se observan olas de calor en primavera. En invierno se han registrado 1 ó 2 cada 10 años.

CUADRO 7

LOCALIDAD	FRECUENCIA				
	VERANO	OTOÑO	INVIERNO	PRIMAVERA	AÑO
CHAMICAL	2.18	0.34	0.00	0.16	2.68
EZEIZA	0.26	0.03	0.00	0.00	0.29
IGUAZU	2.24	0.66	0.00	0.11	3.01
M. JUAREZ	0.21	0.08	0.00	0.00	0.29
NEUQUEN	0.03	0.00	0.00	0.00	0.03
PEHUAJO	0.00	0.03	0.00	0.00	0.03
PIGUE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
POSADAS	3.87	1.34	0.03	0.29	5.53
RESISTENCIA	2.53	0.82	0.03	0.16	3.54
SALTA	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SAN JUAN	1.39	0.11	0.00	0.00	1.50
AZUL	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
B. BLANCA	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CERES	0.95	0.18	0.00	0.00	1.13
CONCORDIA	1.08	0.26	0.00	0.00	1.34
CORDOBA	0.11	0.03	0.00	0.00	0.14
CORRIENTES	2.79	0.87	0.03	0.18	3.87
C. SUAREZ	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
RIO CUARTO	0.08	0.05	0.00	0.00	0.13
DOLORES	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FORMOSA	4.29	1.79	0.03	0.45	6.56
GRAL. PICO	0.03	0.03	0.00	0.00	0.06
GUALEGUAYCHU	0.68	0.13	0.00	0.00	0.81
BALCARCE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
BORDENAVE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
JUJUY	0.18	0.03	0.00	0.00	0.21
JUNIN	0.05	0.00	0.00	0.00	0.05
LABOULAYE	0.05	0.05	0.00	0.00	0.10
LAS FLORES	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
LAS LOMITAS	4.18	1.82	0.16	0.74	6.90
LA PLATA	0.18	0.03	0.00	0.00	0.21
LA RIOJA	3.63	0.63	0.00	0.42	4.68
MALARGUE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

MAQUINCHAO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MAR DEL PLATA	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MENDOZA	0.68	0.03	0.00	0.00	0.71
M. CASEROS	2.08	0.45	0.00	0.08	2.61
9 DE JULIO	0.08	0.03	0.00	0.00	0.11
ORAN	3.59	1.11	0.00	0.63	5.33
PARANA	0.79	0.16	0.00	0.00	0.95
P. DE LOS LIBRES	2.02	0.27	0.00	0.05	2.34
PILAR	0.26	0.00	0.00	0.00	0.26
P. INDIO	0.05	0.00	0.00	0.00	0.05
P. R. S. PEÑA	3.13	1.16	0.03	0.21	4.53
RECONQUISTA	1.79	0.50	0.00	0.00	2.29
ROSARIO	0.29	0.13	0.00	0.00	0.42
S. DEL ESTERO	2.37	0.37	0.00	0.13	2.87
SAN LUIS	0.32	0.03	0.00	0.00	0.35
S. MARTIN (MENDOZA)	0.18	0.03	0.00	0.00	0.21
SAN MIGUEL (BS. AS.)	0.42	0.05	0.00	0.00	0.47
SAN RAFAEL	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SANTA ROSA	0.03	0.00	0.00	0.00	0.03
SAUCE VIEJO	1.16	0.21	0.00	0.00	1.37
TANDIL	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TRES ARROYOS	0.00	0.03	0.00	0.00	0.03
TUCUMAN	1.45	0.26	0.00	0.00	1.71
V. DOLORES	0.32	0.08	0.00	0.00	0.40
VIDMA	0.03	0.00	0.00	0.00	0.03
V. M. DEL RIO SECO	0.19	0.08	0.00	0.00	0.27
V. REYNOLDS	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Los resultados se muestran además en los mapas de las Figuras 27 a 31, primero para todo el año y después de verano a primavera.

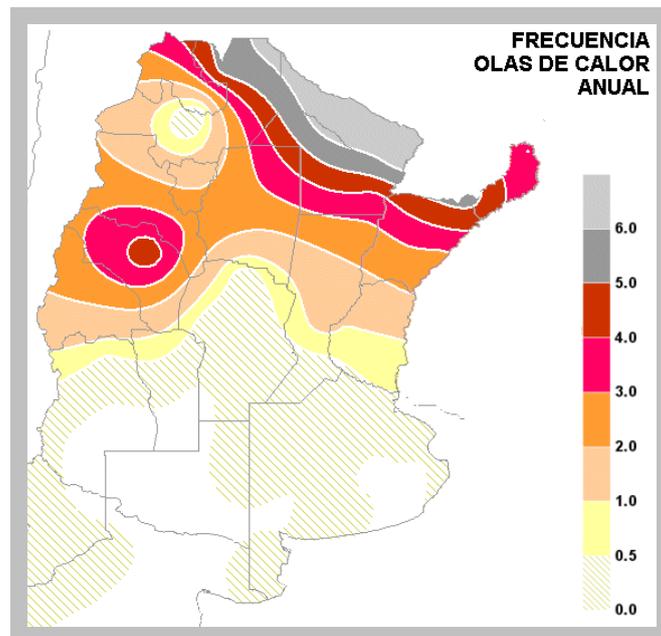


FIGURA 27

En la mitad norte del área de estudio se observa un marcado gradiente sudoeste – noreste, con máximos en la provincia de Formosa (más de seis olas de calor al año). Sobre el norte de la región pampeana los valores ya se ven disminuidos a 1 ó 2 eventos al año. En el resto de la región pampeana y Cuyo la frecuencia es menor a 0.5, es decir una ola de calor cada 2 años.

Sobre el noroeste del país se observan distorsiones del campo debido a que el área es montañosa y no se posee una cantidad adecuada de datos (densidad) como para representar la variabilidad espacial que presentan los parámetros derivados de las temperaturas. Por ejemplo, sobre la estación Salta se observa un mínimo local (ningún caso), mientras que en La Rioja se observa un máximo local (más de 3 casos al año), pero estas diferencias se deben más que nada a la altura de las estaciones: Salta se halla a 1223 m sobre el nivel del mar, mientras que La Rioja está a 429 m. Como la amplitud térmica aumenta con la altura, si bien es probable que las máximas alcancen o superen los 30°C durante al menos cinco días consecutivos, difícilmente las mínimas se mantengan por encima de los 20°C.

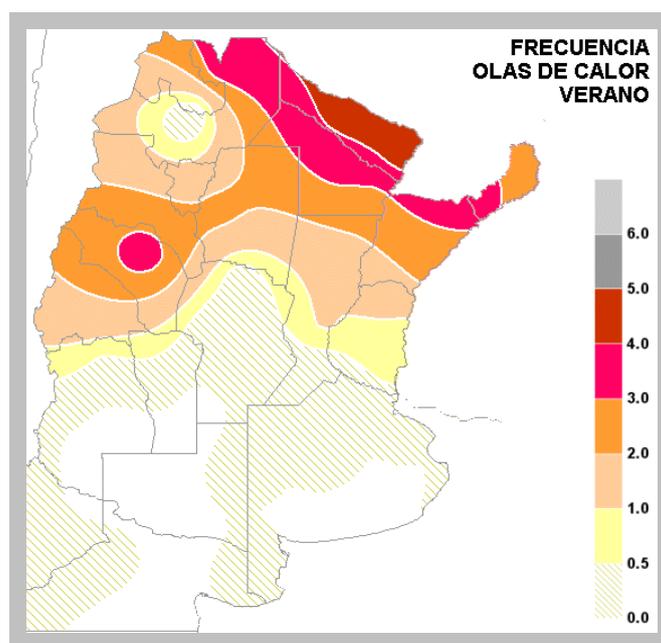


FIGURA 28

Como la mayor parte de las olas de calor se da en verano, el mapa de frecuencias de olas de calor de esta estación presenta un patrón muy similar al anual, con máximos en Formosa (4 casos a año), disminuyendo hacia el norte de la región pampeana (1 caso al año). En el norte de Córdoba se observa una frecuencia menor que la que muestran puntos con la misma latitud pero más al este. Esto también puede deberse al efecto de la moderada diferencia de altura.

En otoño el NEA es prácticamente la única zona que presenta una probabilidad de olas de calor superior a 1 por año. La mayor parte de la región pampeana, NOA y Cuyo presentan una frecuencia media muy baja, inferior a 1 caso cada 2 años.

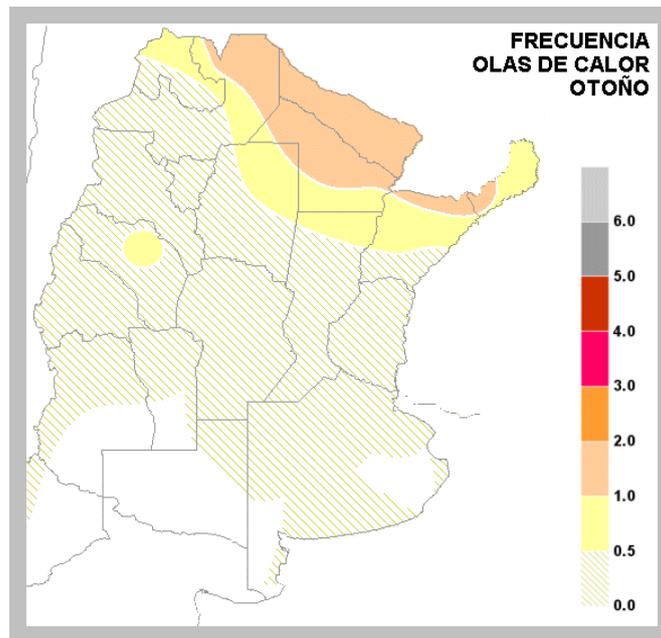


FIGURA 29

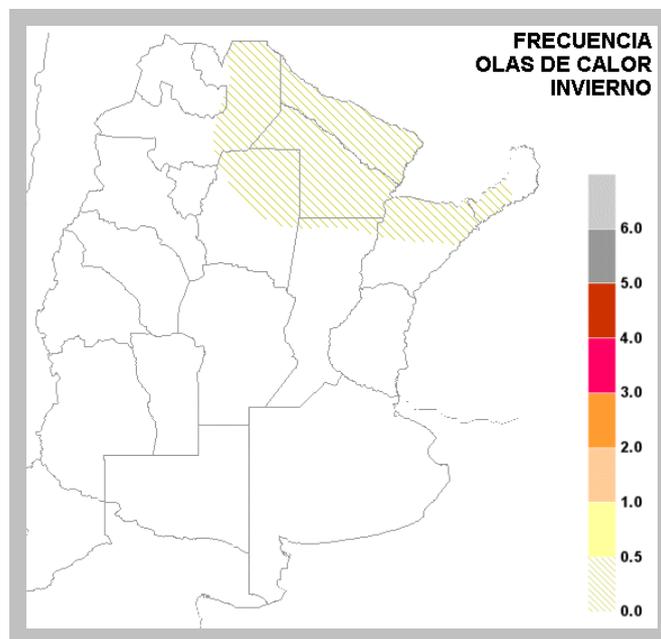


FIGURA 30

En invierno la frecuencia media de olas de calor es prácticamente nula en el área analizada. Sólo en el norte del NEA y noreste del NOA se observa una frecuencia muy baja, menor a 1 caso cada dos años.

En primavera la frecuencia media de olas de calor es significativamente menor que en otoño. Sólo la provincia de Formosa muestra una frecuencia de 1 caso cada 2 años, aproximadamente. El resto del NEA y el NOA presentan en primavera una frecuencia muy baja. En la región pampeana y Cuyo no se han hallado casos en esta estación del año.

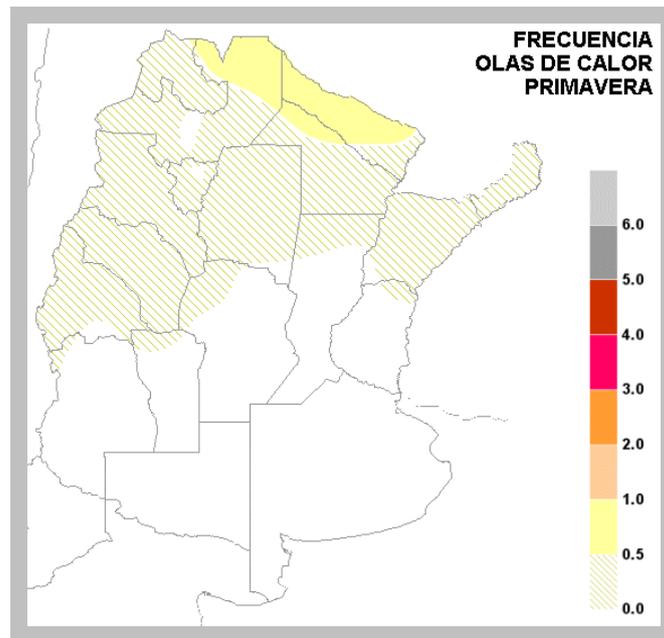


FIGURA 31

3.3 Variaciones en la frecuencia de olas de calor

Conocidas las frecuencias de olas de calor locales (según la definición adoptada y el periodo de años considerado), se pueden establecer nuevas frecuencias, pero en este caso considerando sólo periodos El Niño o La Niña. Luego, estas frecuencias se comparan con las de la serie completa, a fin de establecer las diferencias. Para la separación en estaciones del año El Niño o La Niña se utilizaron los dos criterios anteriores, es decir, el que utiliza el índice MEI y el que utiliza el índice BEST. Sólo se consideraron para cada estación del año las localidades con frecuencia total de olas de calor de al menos una vez cada diez años (0,10) porque en tan pocos casos es muy difícil discernir si existe una relación con el evento ENOS.

Se calculó la diferencia porcentual entre la frecuencia hallada durante eventos El Niño y la que presenta la serie total:

$$\text{(Frecuencia casos El Niño – Frecuencia total de casos) / Frecuencia total de Casos}$$

... y lo mismo para La Niña:

$$\text{(Frecuencia casos La Niña – Frecuencia total) / Frecuencia total}$$

Valores positivos (negativos) indican frecuencias mayores (menores) que las halladas para el total de años de la serie. Por ejemplo, si el resultado es 0,35 significará que la frecuencia de olas de calor se vio incrementada en un 35%. Si el resultado es -0,50 significará que la frecuencia se vio disminuida a la mitad.

Para la visualización de los resultados en mapas, se optó por la clasificación de los resultados en cuatro categorías: incrementos en las frecuencias de al menos 20% y de al menos 50%, y disminuciones de al menos 20% y de al menos 50%. Cada mapa es acompañado por la escala de colores correspondiente. Los puntos que se hallan sin

pintar corresponden a localidades para las cuales las variaciones resultaron menores al 20%.

VERANO

Durante El Niño (Figura 32a), utilizando la clasificación según MEI, los resultados que superan el 20% son muy pocos. Se llega a insinuar una diagonal Jujuy – Villa María del Río Seco – Rosario con aumento en la frecuencia de olas de calor, y algunas localidades al sur de la misma que presentan disminuciones. Utilizando el índice BEST esta diagonal de aumento en la frecuencia de olas de calor se ve más definida, quedando a ambos lados localidades con disminuciones leves en la frecuencia de periodos cálidos.

Según diversos autores (ya citados) durante los veranos El Niño el centro de baja presión del NOA se ve fortalecido, promoviendo el avance de masas de aire cálido del norte y noreste hacia el centro del país, favoreciendo la intensificación y permanencia de las mismas más al sur de lo habitual. Esto explicaría los resultados hallados, que muestran un incremento en la frecuencia de olas de calor en la diagonal típica que presentan los frentes calientes.

El índice BEST parece ser un mejor indicador de la fase El Niño a la hora de prever una mayor frecuencia estival de olas de calor en la diagonal noroeste – sudeste que atraviesa el área de estudio.

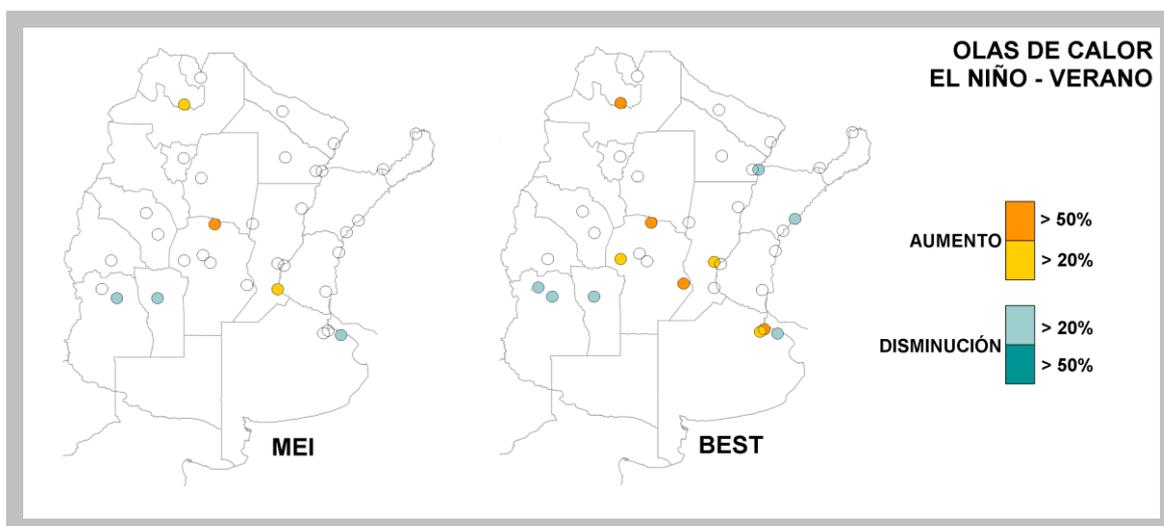


FIGURA 32a

Durante La Niña, la situación se invierte (Figura 32b). Considerando el índice MEI, aparecen numerosas localidades con resultado negativo, es decir, disminución en la frecuencia de olas de calor. Sólo San Luis y Mendoza muestran un comportamiento opuesto (también en la fase El Niño en la Figura 32a).

Con el índice BEST los resultados negativos se ven más concentrados sobre el centro del país, en especial en la provincia de Córdoba. Sobre el sector sudeste aparecen algunos resultados positivos, también en San Luis. En el NEA no se hallaron aumentos ni disminuciones destacables.

Estos resultados se condicen con una circulación del norte pobre, que a su vez desfavorece el ingreso de humedad. Al ingresar menos masas de aire caliente, la frecuencia de olas de calor deberá verse lógicamente disminuye. En etapas previas de este Proyecto se ha determinado la misma zona (centro del país, en particular la provincia de Córdoba) como la de mayor impacto negativo de La Niña sobre las precipitaciones de verano.

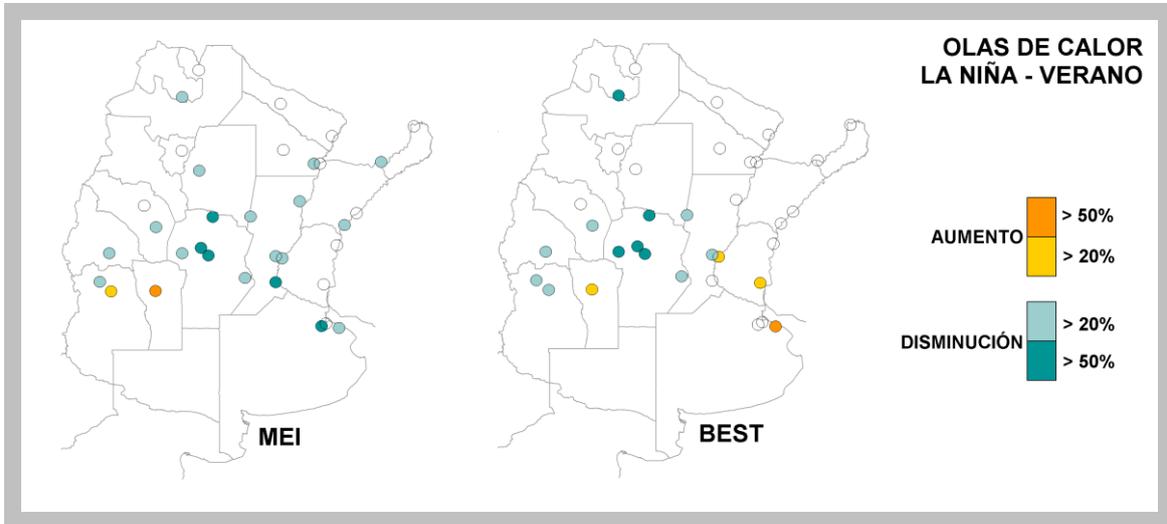


FIGURA 32b

OTOÑO

Durante El Niño, utilizando la clasificación según el índice MEI, los resultados mayores que 20% son muy pocos y no muestran un patrón areal claro (Figura 33a). En cambio, si se utiliza la clasificación según el índice BEST arroja resultados en general negativos y agrupados sobre el este de la región de estudio. Hacia el oeste se insinúa un patrón inverso, con aumento en la frecuencia de olas de calor.

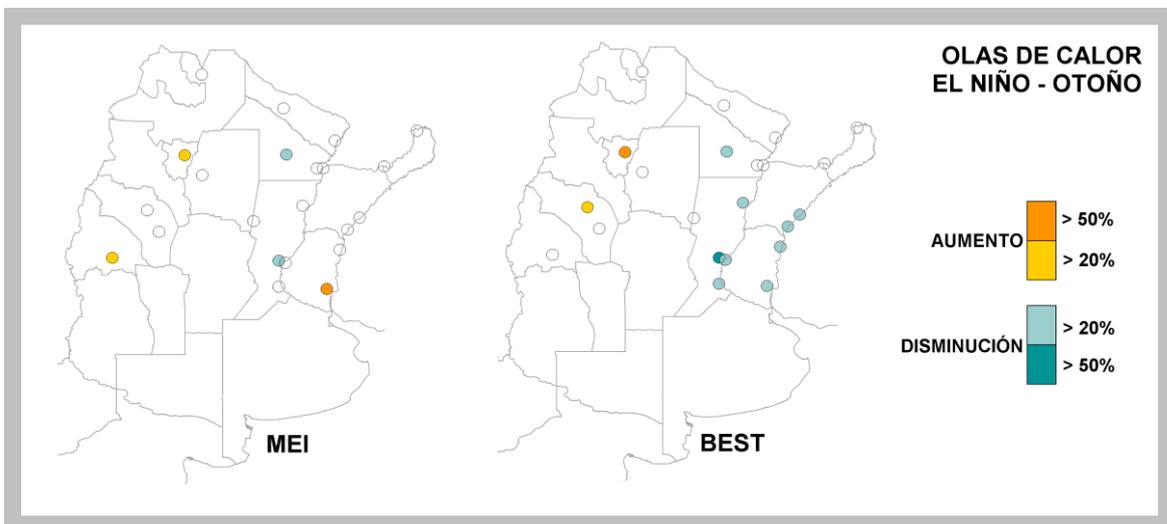


FIGURA 33a

Durante La Niña, la clasificación según MEI y BEST arrojan resultados similares, con predominio de localidades con disminución en la frecuencia otoñal de olas de calor. La excepción se halla representada por los puntos ubicados sobre una línea aproximadamente trazada por las localidades Tucumán, Santiago del Estero, Reconquista, Monte Caseros.

Los resultados hallados para el impacto del ENOS sobre las precipitaciones de otoño no arrojaron resultados claros para la fase El Niño. En el caso de La Niña, se observa mayor concentración de localidades con lluvias otoñales superiores a las normales el sudoeste de Chaco, norte de Santa Fe, Santiago del Estero y Tucumán, e inferiores a las normales más al sur y sobre la Mesopotamia. Uniendo ambos resultados, da la idea de que las masas de aire cálido que ingresan desde el norte se van coartadas e su avance hacia el sur, estacionándose sobre el sur del NEA – NOA, determinando allí más precipitaciones y periodos cálidos.

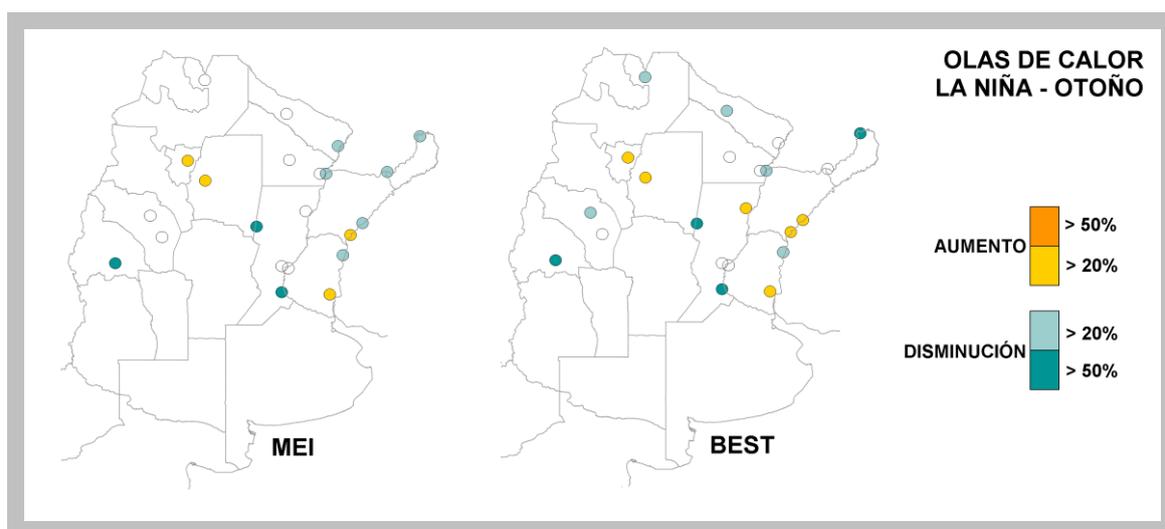


FIGURA 33b

INVIERNO

Como sólo se tuvieron en cuenta las estaciones meteorológicas que en los 38 años considerados hayan mostrado una frecuencia de olas de calor de al menos una cada diez años, en invierno sólo se ha podido considerar una localidad que verificó esta condición: Las Lomitas, en la provincia de Formosa. Para esta localidad, la frecuencia de olas de calor es apenas superior al límite impuesto, es decir, existe una probabilidad de ocurrencia muy baja de estos eventos. Sin embargo, se verifica que esa probabilidad se ve duplicada durante la fase El Niño (para ambos índices) y prácticamente reducida a cero para la fase La Niña.

PRIMAVERA

Durante El Niño el impacto sobre la frecuencia de olas de calor no es claro (Figura 34a). Se insinúa mediante ambos índices un aumento en la frecuencia en el extremo

norte del país, pero con algunos comportamientos contradictorios, como los que mostraron las estaciones Resistencia y Corrientes, muy próximas entre sí, ambas con disminución en la frecuencia de olas de calor. Ambos índices llevan a resultados muy similares.

También durante La Niña estas dos localidades mostraron un resultado contrario al del entorno (Figura 34b). En el caso del índice BEST, todas las localidades, con excepción de las dos citadas, evidenciaron una disminución en la frecuencia de olas de calor. El resultado según BEST aparece como más coherente con el contexto La Niña en primavera, con una circulación del norte modificada y en general debilitada, con fuertes consecuencias negativas sobre la precipitación, pero con menor incidencia de periodos cálidos.

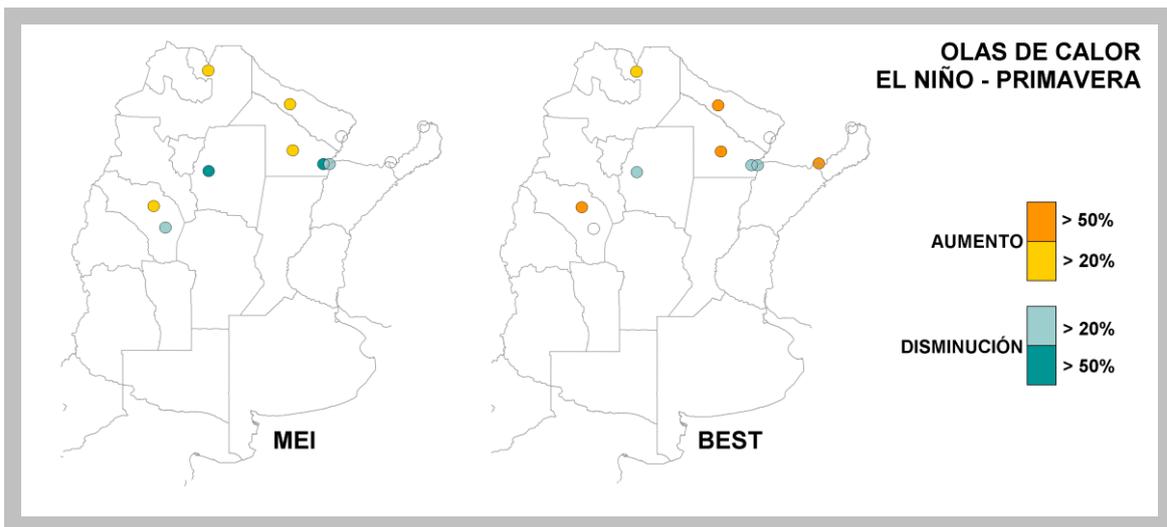


FIGURA 34a

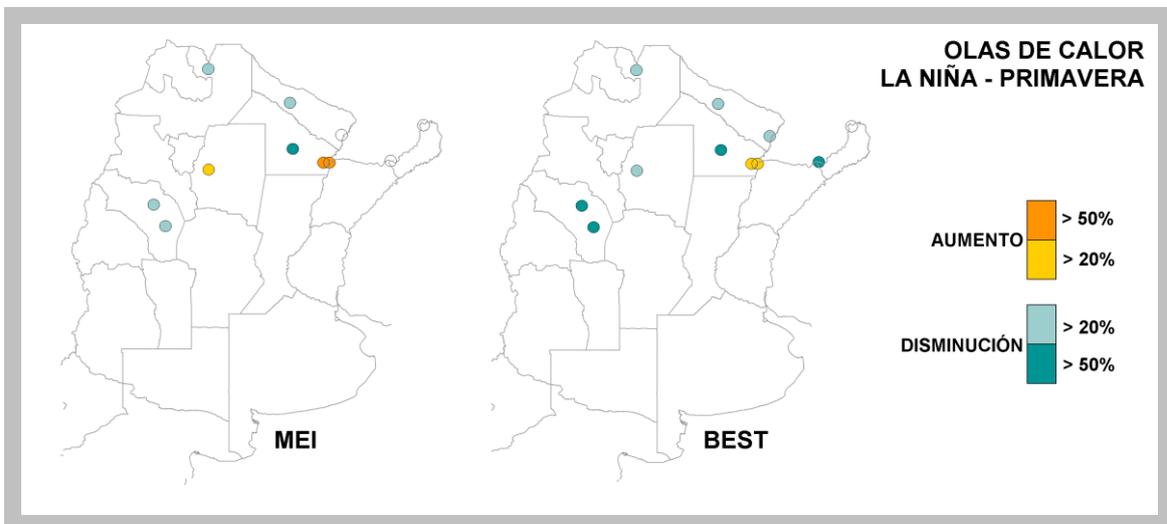


FIGURA 34b

Como no se dispone de una explicación apropiada para el comportamiento contrario de Resistencia y Corrientes, debemos analizar los cálculos realizados. Vemos así que

en Resistencia, por ejemplo, en los 38 años de la serie completa se han contabilizado 6 casos de olas de calor en primavera, dos en septiembre (1994 y 2007), dos en octubre (1984 y 2007) y dos en noviembre (1985 y 1995). De estos 6 casos, 2 casos corresponden a 2007, que es considerado por ambos índices como La Niña, que contaron con una persistencia de 5 días, el mínimo necesario para ser consideradas olas de calor. Por otro lado, sólo la primavera de 1994 es clasificada como El Niño, aportando un solo periodo cálido para esta fase, aunque el más largo hallado, llegando a 7 días consecutivos. Así...

Frecuencia total = 6 casos / 38 años = 0.16

Frecuencia casos El Niño = 1 caso / 10 años = 0.10 (índice BEST)

Frecuencia casos La Niña = 2 casos / 9 años = 0.22 (índice BEST)

La frecuencia de olas de calor durante El Niño es inferior a la del total de la serie en un 38%, mientras que la frecuencia de olas de calor durante La Niña es superior en la misma proporción. Pero, por ejemplo, si uno de los periodos de 2007 (La Niña) hubiera durado un día menos, ya la frecuencia de olas de calor para primaveras La Niña hubiera dado inferior a la frecuencia total, en vez de superior.

Con esto lo que se quiere señalar es que, particularmente en la primavera, se está trabajando con frecuencias muy bajas, es decir, pocos eventos, con lo cual ligeros cambios conducen a resultados contrarios. En este caso, la frecuencia total igual a 0,16 indica 1 ó 2 olas de calor cada 10 años, con lo cual es difícil diferenciar el efecto de cada fase del ENOS.

Conclusión 3:

- *Para El Niño se obtuvieron resultados más marcados al utilizar el índice BEST. Esto puede deberse a que el mismo es más estricto y mantiene en esta categoría sólo a los casos más extremos.*
- *Para La Niña se obtuvieron resultados muy similares con ambos índices.*
- *Para El Niño en verano se observó un aumento en la frecuencia de olas de calor en el norte de Córdoba, sur de Santa Fe y norte de Buenos Aires.*
- *Para El Niño en otoño se observó una disminución de las olas de calor sobre Chaco, Corrientes, Santa Fe y Entre Ríos.*
- *Para El Niño en primavera se insinúa un aumento en la frecuencia de olas de calor en el extremo norte del país.*
- *Para La Niña en verano se observó una disminución en la frecuencia de olas de calor en el centro del país, en particular en la provincia de Córdoba.*
- *Para La Niña en otoño se observó un aumento en la frecuencia de olas de calor en una franja que va de Tucumán al sur de Corrientes, con predominio de disminución en la frecuencia en el resto del área analizada.*
- *Para La Niña en primavera se insinúa una disminución en la frecuencia de olas de calor en el extremo norte del país.*

4. Frecuencia de días con helada (DH)

4.1 Definición de helada

La helada meteorológica ocurre cuando la temperatura medida en abrigo, a 1.5 metros del suelo, desciende por debajo de 0°C. Esta definición es la utilizada normalmente en estudios climáticos.

Cuando los resultados desean ser vinculados a la respuesta de los cultivos, suele tomarse como definición la helada agronómica, que queda determinada cuando esta temperatura desciende por debajo de los 3°C. Esto es debido a que en general la temperatura cerca del suelo es inferior a la medida en abrigo, con lo cual en general se supone que mediciones reglamentarias de menos de 3°C son indicativas de temperaturas cercanas a 0°C cerca del suelo.

Parece exagerada la diferencia de 3°C en 1.5 metros de altura, sin embargo hay que recordar que la mayor parte de los eventos de helada se dan en días con viento leve (o calma), lo cual no promueve la mezcla del aire en contacto con la superficie, enfriado por la noche, con el de niveles un poco superiores, determinando un gradiente importante.

Para el análisis de la relación entre las heladas y el fenómeno ENOS consideraremos las heladas agronómicas en cada estación del año, observadas en la serie de datos 1970-2007 de temperaturas mínimas diarias.

4.2 Frecuencias de helada agronómica

Las heladas en verano tienen una frecuencia prácticamente nula en la mayor parte del área de estudio (ver Figura 35). Sólo se producen con frecuencia considerable en las provincias de Neuquén y Río Negro, por hallarse más al sur. Se observa una probabilidad mayor, en forma local, sobre las zonas serranas de la provincia de Buenos Aires (Tandilia y Ventania), debido a la altura.

Las heladas en otoño (tempranas) se manifiestan en prácticamente toda el área de análisis (ver Figura 36). La frecuencia normal de días con helada en otoño es mayor que 10 días al año desde el sur de Córdoba, sur de Santa Fe y Buenos Aires hacia el sur. Hacia el norte la frecuencia va disminuyendo hasta ser inferior a 1 día por año en Formosa, Corrientes y Misiones.

En la misma zona, al sudoeste del área de estudio, donde existe alguna probabilidad considerable de ocurrencia de helada en verano, la frecuencia normal de heladas otoñales es de 20 días al año o más.

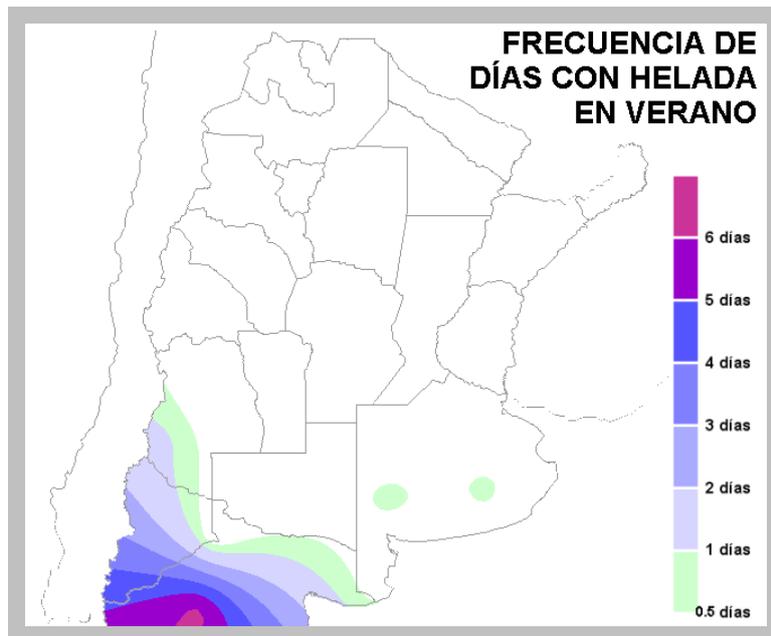


FIGURA 35

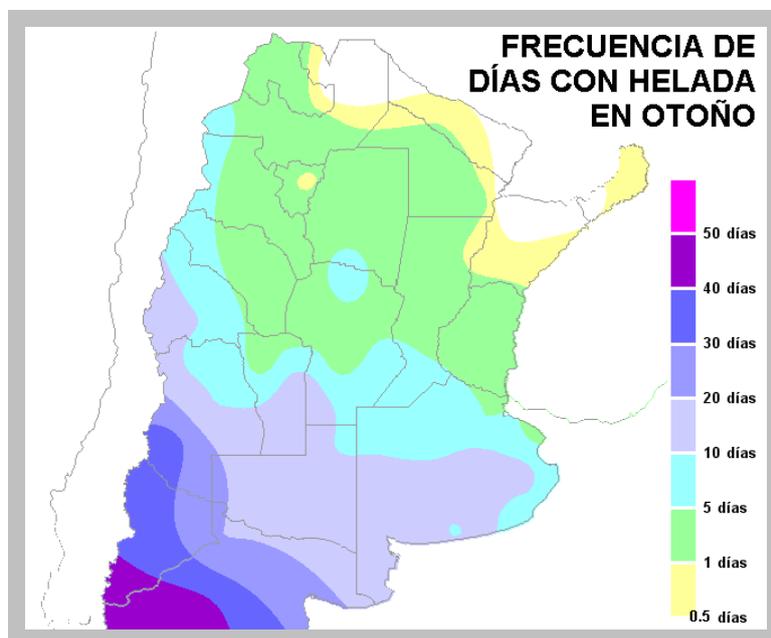


FIGURA 36

En invierno la frecuencia de heladas es significativa en toda el área de análisis (ver Figura 37). Existe un amplio espectro, con frecuencias normales de menos de 5 días cada invierno en el extremo noreste, y más de 80 días por invierno en el extremo sudoeste.

Es interesante destacar algunos detalles sobre el patrón de distribución geográfica de las frecuencias de heladas invernales. Por ejemplo, las isolíneas del mapa muestran una posición noroeste – sudeste más marcada que en los mapas de otoño y primavera. Esto es porque existe una mayor frecuencia de heladas advectivas,

provocadas por la entrada de masas de aire muy frío desde el sudoeste, por detrás de los frentes fríos que atraviesan el país con dirección noreste.

Otro detalle que llama la atención es la entrada de una “lengua” de mayor frecuencia de heladas invernales por las sierras bonaerenses, y otra que ingresa por el este de San Luis y centro de Córdoba hacia el norte, debido al aire frío que es desviado por las sierras puntanas y cordobesas. Además, es notoria la diferencia en las frecuencias de heladas invernales a una misma latitud, mucho mayor al oeste que al este, debido a la diferencia de altura.

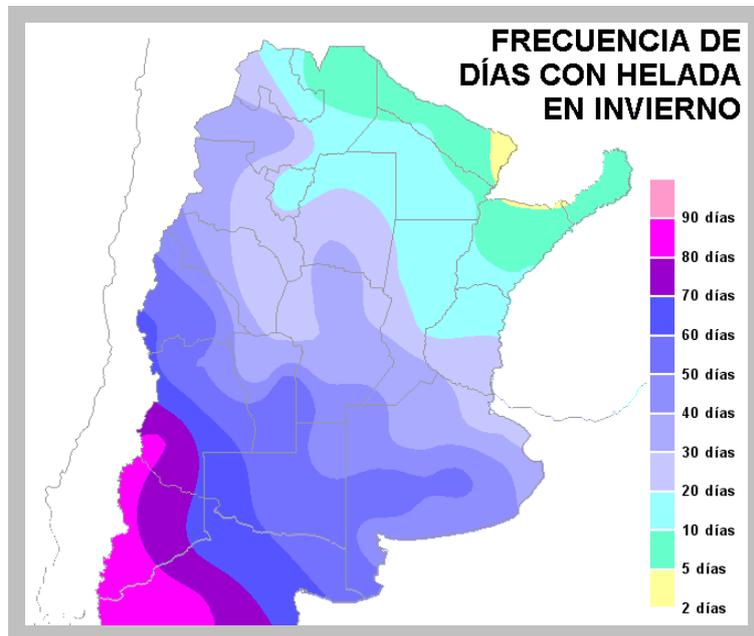


FIGURA 37

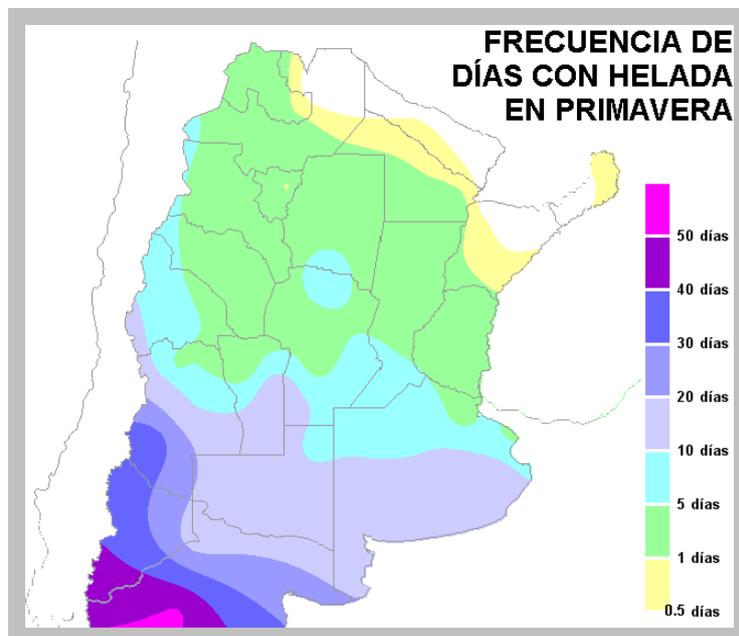


FIGURA 38

La frecuencia de heladas en primavera (tardías) es prácticamente igual que la de otoño (ver Figura 38). La única diferencia, de todas formas leve, se observa en la costa este bonaerense, con menor frecuencia de heladas en otoño.

4.3 Variaciones en la frecuencia de heladas

Una vez determinada la frecuencia normal de heladas en cada localidad y para cada estación del año, se procedió a contabilizar las frecuencias de heladas en casos El Niño y La Niña, para ser comparadas con la frecuencia normal. Nuevamente la clasificación en casos El Niño o La Niña se realizó según el índice MEI y también según el índice BEST.

Por ejemplo, en General Pico (La Pampa) la frecuencia normal de heladas en verano es de 1 vez cada 10 años. Si tomamos en cuenta los veranos El Niño, vemos que nunca ha ocurrido una helada (frecuencia nula), mientras que en veranos La Niña la frecuencia de heladas se ve aumentada a 1 vez cada 4 años. Así, decimos que en General Pico la frecuencia de una helada durante el verano se ve significativamente disminuida durante El Niño y aumentada en forma importante durante La Niña.

Los mapas que siguen muestran para cada localidad si la frecuencia de heladas se ve aumentada o disminuida en forma significativa. El mapa de la izquierda, en todos los casos, corresponde a la clasificación según MEI, y el de la derecha a la clasificación según BEST. Las escalas correspondientes muestran aumentos moderados (del 20% o más) y destacadas (del 50% o más) en la frecuencia de heladas durante la fase ENOS en comparación con la serie total, lo mismo que disminuciones moderadas (del 20% o más) y destacadas (del 50% o más) en la frecuencia.

En el caso del verano se han excluido del análisis las estaciones con frecuencia de helada inferior al 5% (menos de una helada cada 20 años) ya que con casos tan escasos (o nulos) es imposible realizar cualquier estadística.

En veranos El Niño (ver Figura 39) se observa el predominio de disminuciones destacadas en la frecuencia de heladas del centro y sur de la provincia de Buenos Aires. El índice MEI proporciona resultados más generalizados, con disminuciones en las estaciones analizadas de Mendoza, San Luis, La Pampa y Buenos Aires. Dentro de esta área las excepciones son Malargüe y Pehuajó, que no mostraron cambios significativos en la frecuencia, y Bahía Blanca, que evidenció un aumento en la misma (también con BEST).

En veranos La Niña (ver Figura 40) se observa lo contrario, es decir, un aumento bastante generalizado en la frecuencia de heladas en verano en aproximadamente la misma área. Según el índice MEI, las excepciones son Malargüe, Villa Reynolds y General Pico, que muestran aumentos, y Pigüé y Bahía Blanca, que no mostraron cambios significativos. Nuevamente debemos recordar que los casos La Niña son menos numerosos que El Niño y en consecuencia la estadística asociada a La Niña es menos robusta.

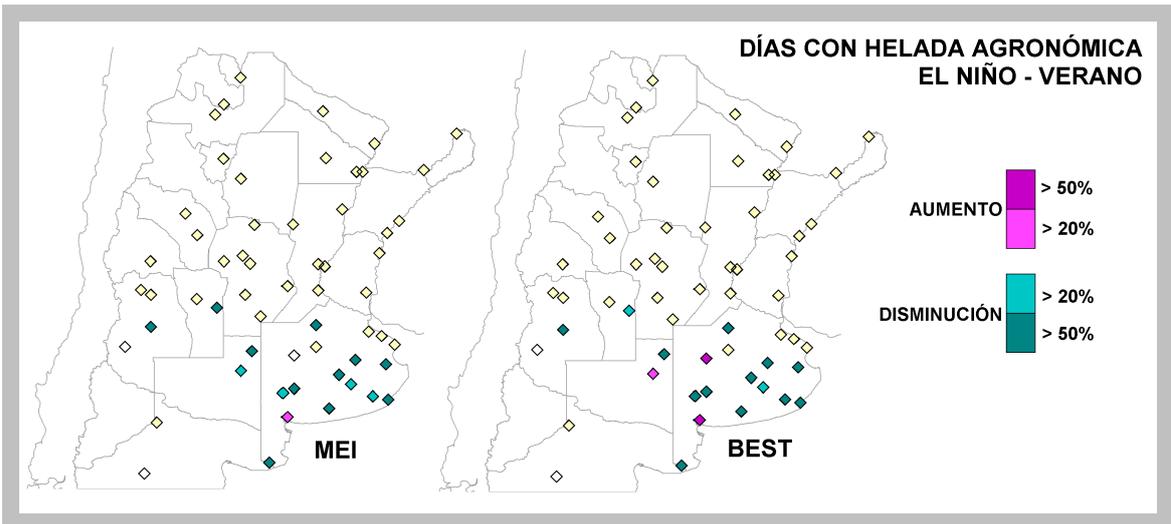


FIGURA 39

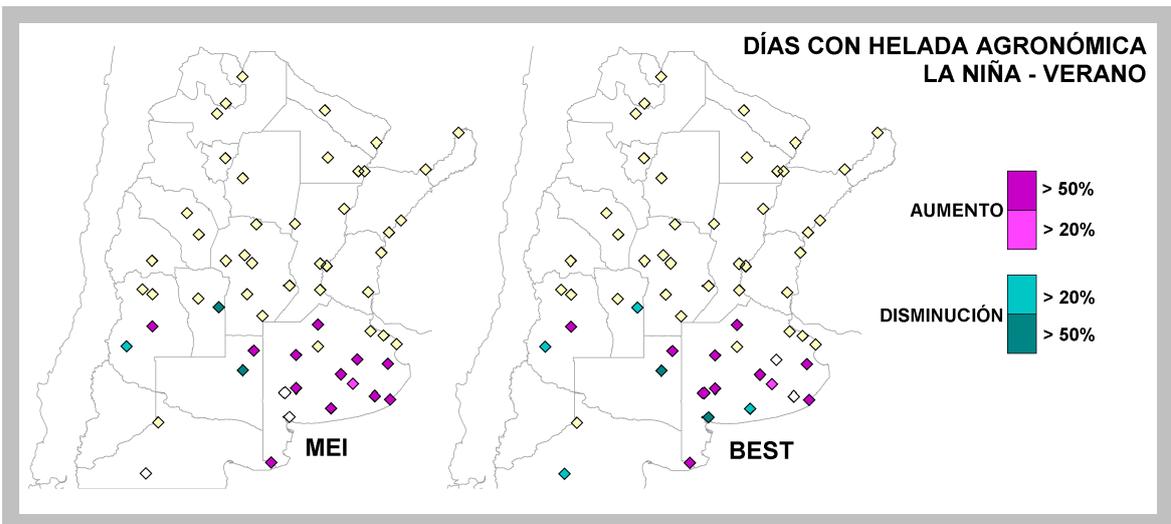


FIGURA 40

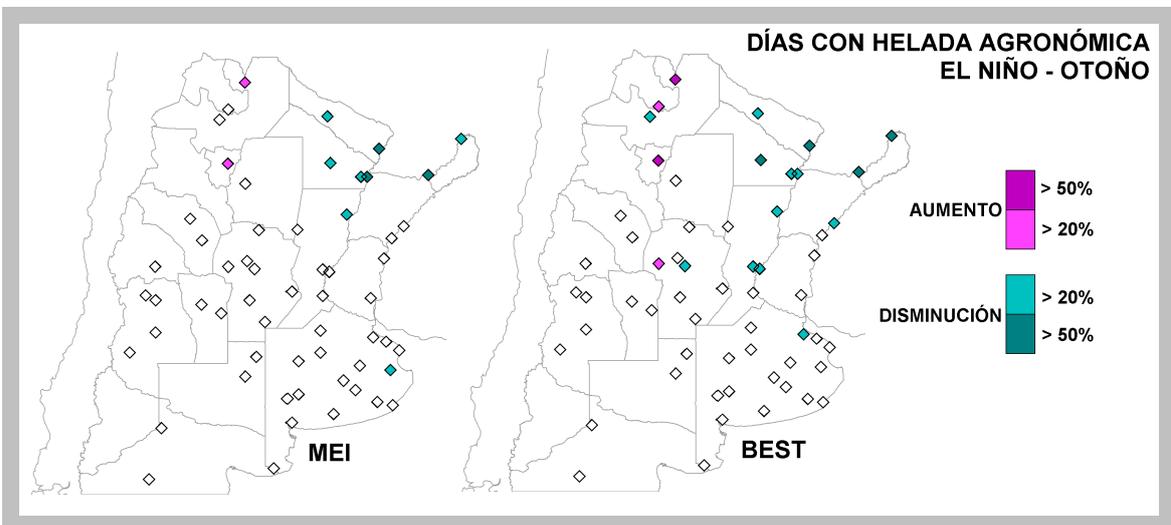


FIGURA 41

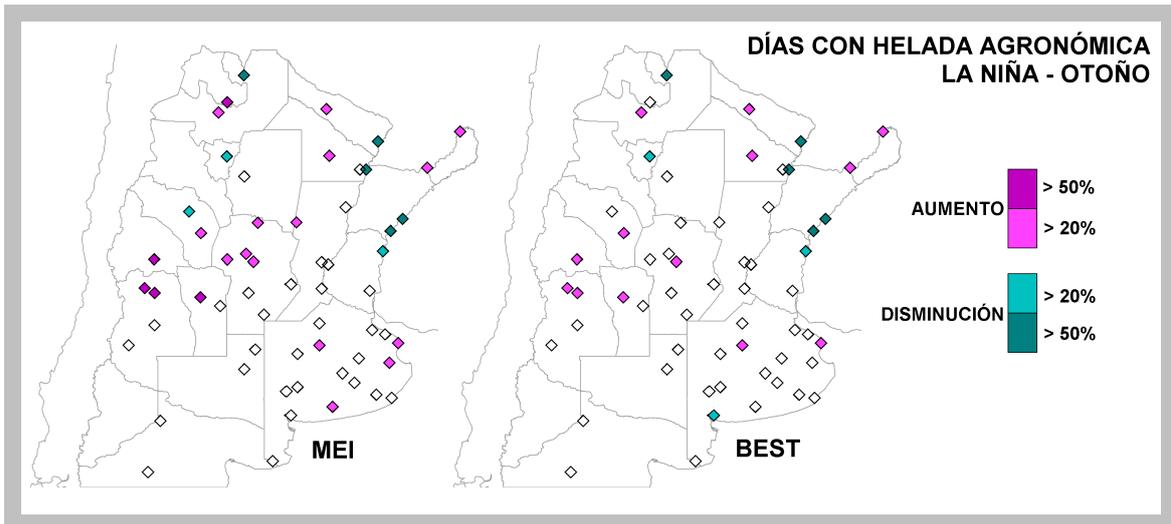


FIGURA 42

En otoños El Niño (ver Figura 41) ambos índices ponen de manifiesto una disminución en la frecuencia de heladas en el noreste del país. Con el índice BEST esta disminución se extiende algo más hacia el norte de la región pampeana. Se insinúa un aumento en la frecuencia de heladas otoñales sobre el NEA. Son muy aisladas las señales sobre la región pampeana centro y sur, Cuyo y norte de la Patagonia.

En otoños La Niña (ver Figura 42) se observan diferencias en los resultados según las zonas. El índice MEI muestra un área de aumentos en la frecuencia de heladas que abarca el norte de Mendoza y de San Luis, San Juan, sur de La Rioja y norte de Córdoba. De allí hacia el sur las señales se vuelven aisladas y a veces contradictorias, lo mismo que en el NOA. En el NEA se observan disminuciones en la frecuencia de heladas en el norte de Entre Ríos, en Corrientes y en el este de Chaco y Formosa. En cambio en Misiones y el centro de Chaco y Formosa se evidencian aumentos. Los resultados para el NEA coinciden utilizando ambos índices.

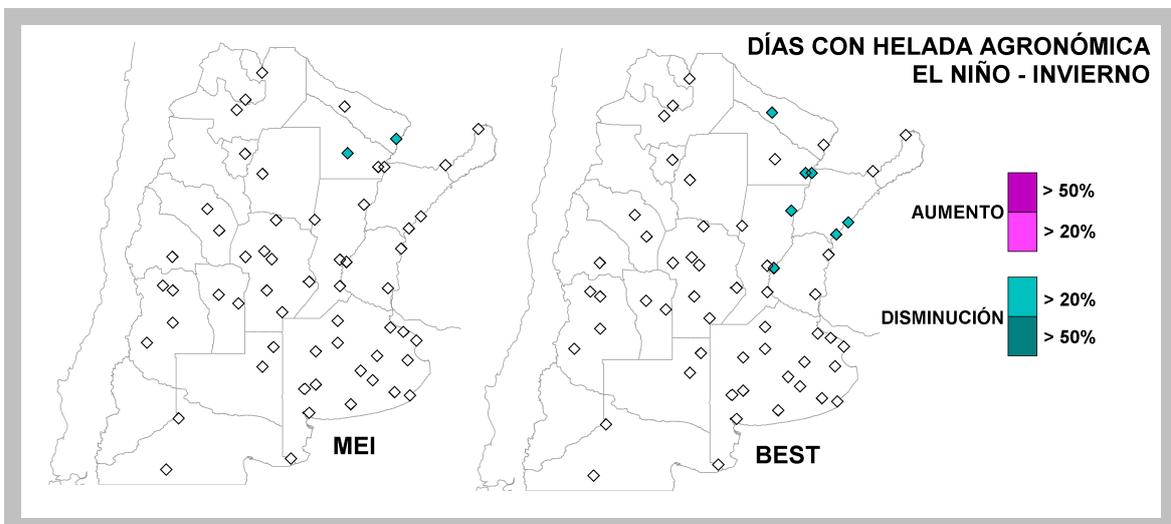


FIGURA 43

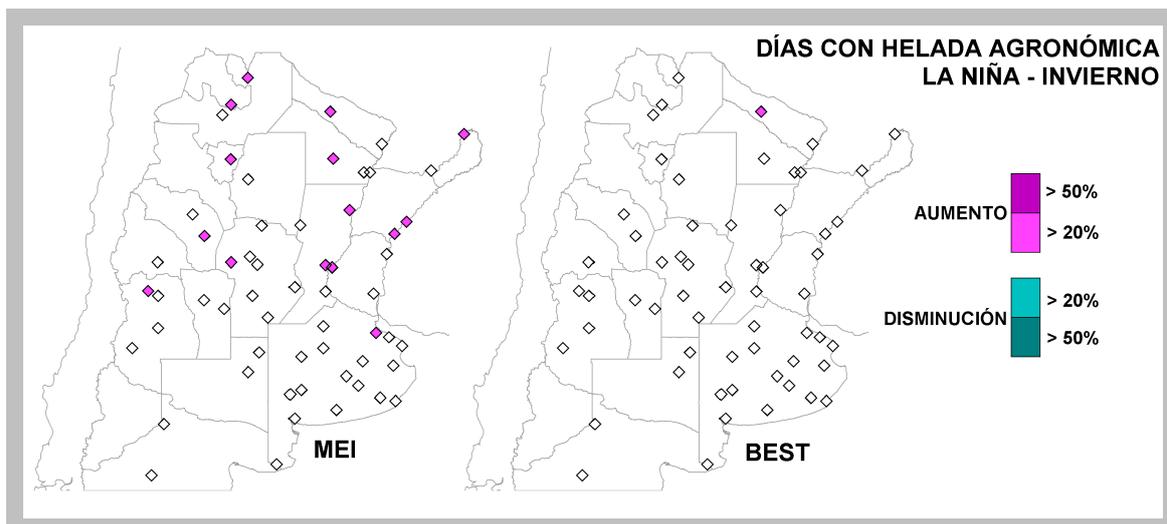


FIGURA 44

En inviernos El Niño (ver Figura 43) las señales son muy escasas y se circunscriben al noreste del país. Los resultados difieren según el índice utilizado, pero todos los resultados significativos evidencian disminuciones en la frecuencia de heladas invernales durante inviernos El Niño en invierno. La diferencia entre ambos resultados puede deberse a que, mientras el índice MEI indica 15 inviernos El Niño, el índice BEST reduce este número a sólo 10 casos, los más intensos. Esto es lo que podría estar generando más diferencias con las frecuencias medias.

En inviernos La Niña (ver Figura 44) existe una gran diferencia en los resultados hallados al utilizar uno u otro índice. El índice BEST sólo sugiere un aumento en la frecuencia de heladas invernales en Las Lomitas. En cambio el índice MEI muestra varias localidades con aumento, todas en la mitad norte del área de estudio, pero dispersas.

En primaveras El Niño (ver Figura 45) también los resultados difieren según el índice utilizado. Para el índice MEI se obtienen muy pocas localidades con señal significativa, destacándose disminuciones moderadas en las frecuencias de helada del extremo noreste del país. En cambio con el índice BEST se obtienen disminuciones concentradas en La Rioja y Córdoba, más otras localidades aisladas, también con disminuciones en la frecuencia de heladas, en el NOA, NEA y resto de la región pampeana.

En primaveras La Niña (ver Figura 46) existe un claro predominio en la disminución de heladas en la mitad norte del área de estudio, según ambos índices. Este resultado contradice lo esperado, o normalmente sobreentendido, que indica que en años La Niña la frecuencia de heladas es mayor. Si bien para veranos y otoños La Niña se hallaron áreas que evidencian un aumento en la frecuencia de heladas con respecto a la serie completa, no se obtuvo lo mismo para las primaveras La Niña, justamente cuando el impacto de La Niña sobre las precipitaciones es mayor y más generalizado. Sólo se destaca una zona, sobre el noreste de la provincia de Buenos Aires, que según el índice MEI muestra un aumento de la frecuencia de heladas durante primaveras La Niña.

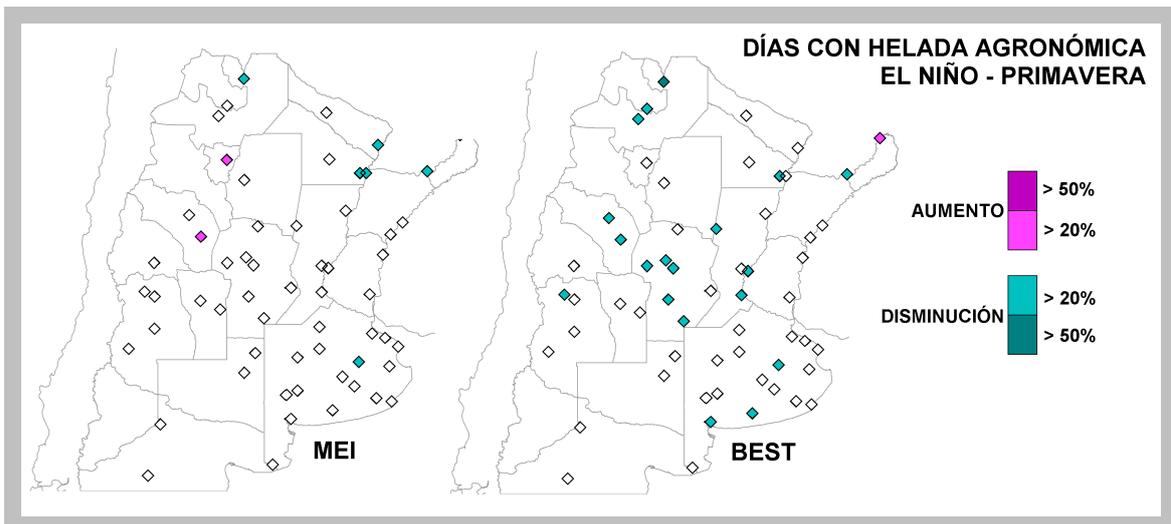


FIGURA 45

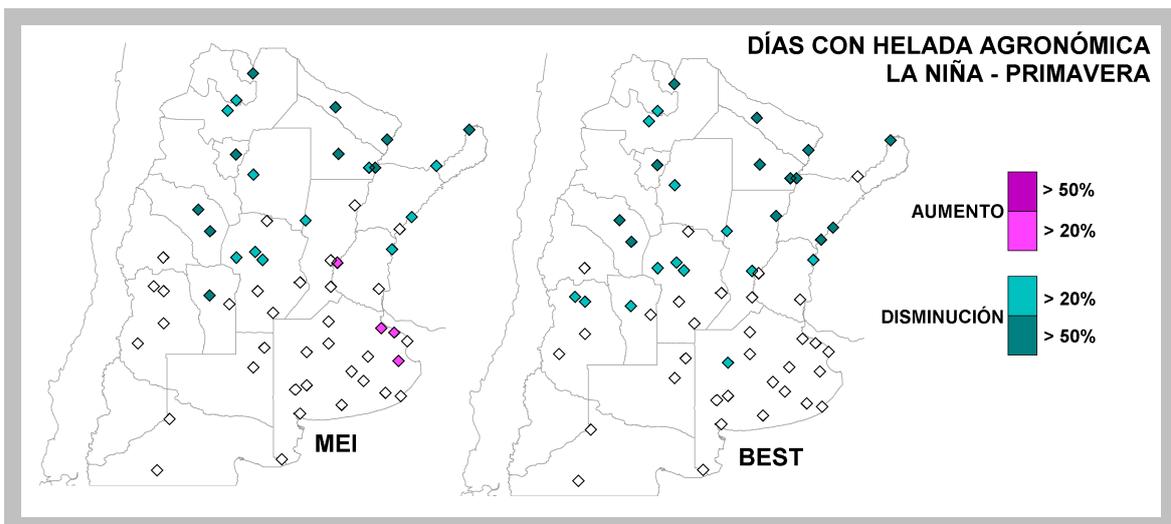


FIGURA 46

5. Variaciones en las fechas medias de primera y última helada

Se ha analizado en el ítem anterior la probabilidad de tener más o menos días con helada que la media estadística, para cada localidad y estación del año. Además de las variaciones en la cantidad de días con helada en relación a las fases del ENOS, es importante investigar el impacto de El Niño y La Niña sobre las fechas en que las heladas ocurren, es decir, si sufren adelantos o retrasos con respecto a la media estadística de la serie completa.

Se analizaron por lo tanto las diferencias entre las fechas medias de primera y última helada en casos El Niño y La Niña con respecto a las que se obtienen para la serie 1970 – 2007 de temperaturas mínimas diarias. Las diferencias se consignaron en días. Los valores positivos indican que la fecha media se retrasa y negativos que se adelanta.

Para seguir el ejemplo de General Pico, se calculó para esta localidad que la **fecha media de primera helada** corresponde al 14/04; según el índice MEI esta fecha media se atrasa 5 días en casos El Niño (9 días según BEST) y se adelanta 15 días en casos La Niña (12 días según BEST). Esto indicaría un mayor riesgo de heladas tempranas durante los otoños La Niña. Para esta misma localidad se calculó como **fecha media de última helada** el 19/10; según el índice MEI esta fecha media se adelanta 3 días en casos El Niño (7 días según BEST) y se atrasa 11 días en casos La Niña (14 días según BEST). Esto indicaría un mayor riesgo también de heladas tardías durante las primaveras La Niña.

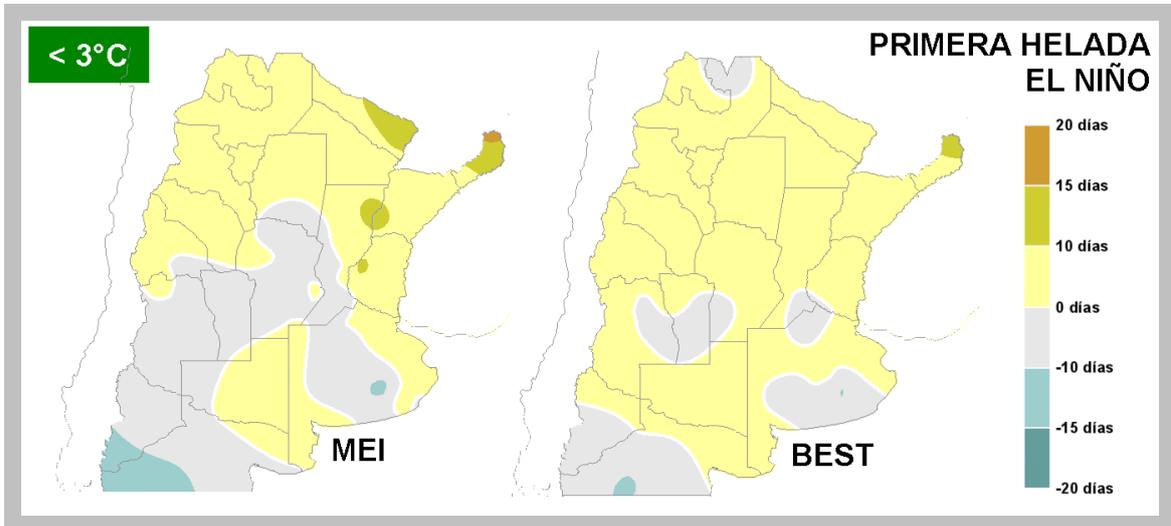


FIGURA 47

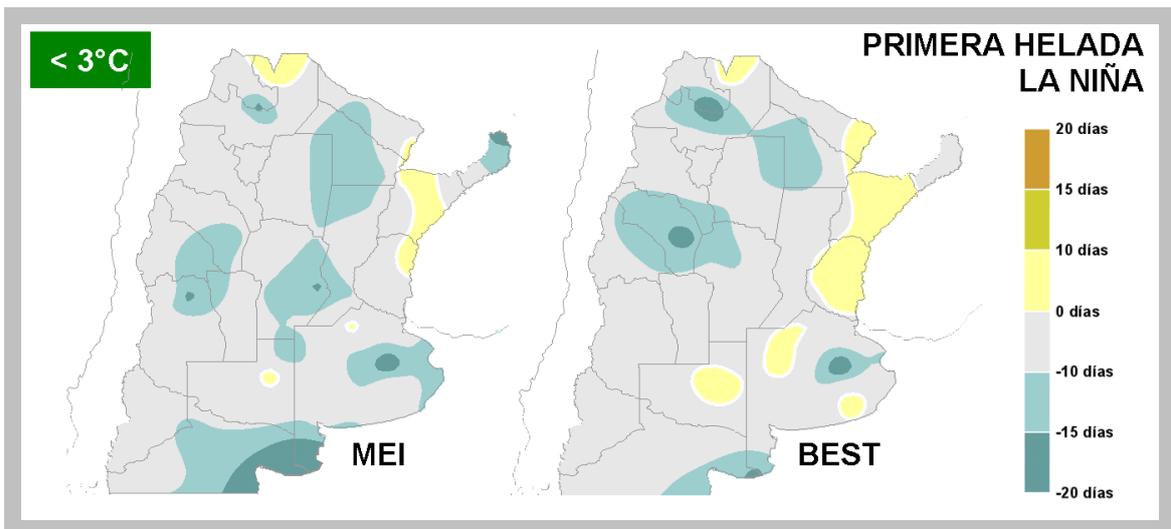


FIGURA 48

Las variaciones halladas en las fechas medias de **primera helada durante años El Niño** pueden verse en la Figura 47. A la derecha, los resultados según el índice BEST no muestran adelantos ni atrasos superiores a 10 días. Según el índice MEI, se insinúa un atraso de más de 10 días en las fechas medias de primera helada durante

El Niño en el extremo noreste del país y un adelantamiento de más de 10 días en el extremo sudoeste del área de estudio.

Las variaciones halladas en las fechas medias de **primera helada durante años La Niña** pueden verse en la Figura 48. No se observaron atrasos de más de 10 días. Aparecen algunas áreas con adelantos de más de 10 días en áreas aisladas, que difieren según el índice utilizado. Uniendo los resultados de ambos índices, se advierte una mayor peligrosidad de heladas anticipadas en el norte de Cuyo, Córdoba, la cuenca baja del Salado bonaerense y las principales áreas agrícolas de Salta, Chaco y Santiago del Estero.

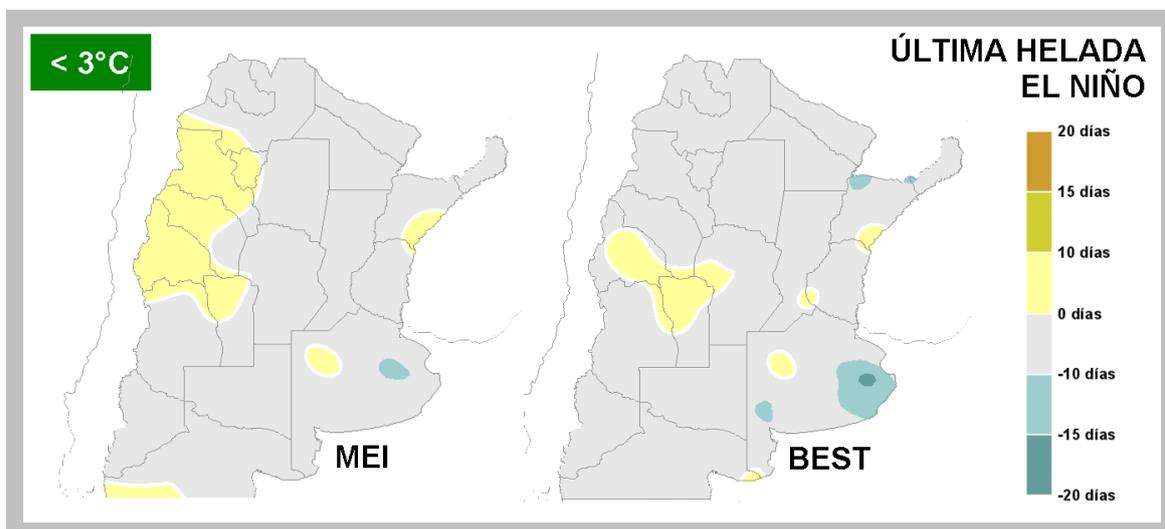


FIGURA 49

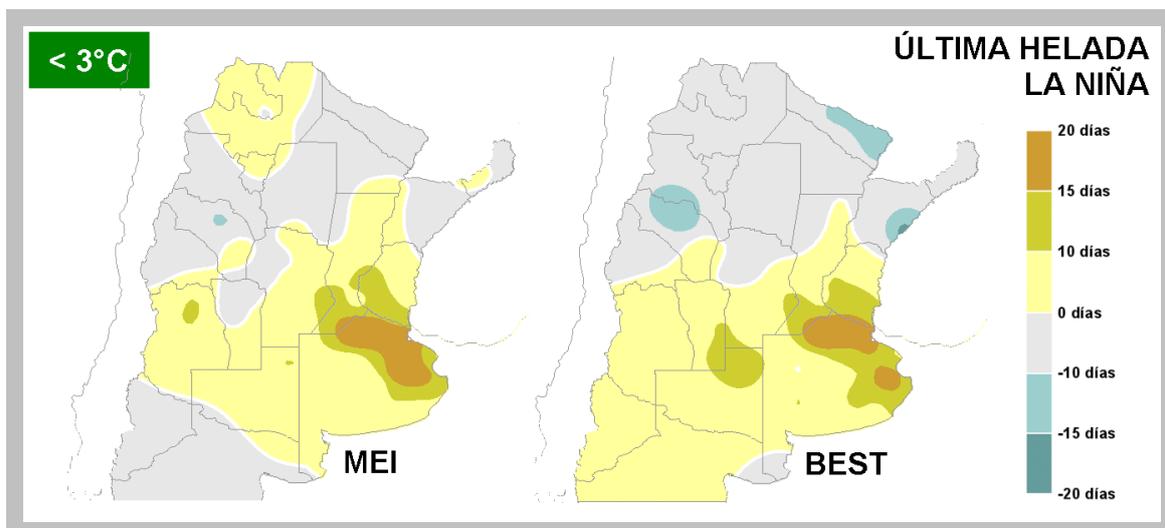


FIGURA 50

Las variaciones halladas en las fechas medias de **última helada durante años El Niño** pueden verse en la Figura 49. No se observan adelantos o atrasos superiores a 10 días, con excepción de un área de la provincia de Buenos Aires que va aproximadamente desde La Flores hasta Mar del Plata, la cual muestra un adelanto de

más de 10 días según el índice BEST. De todas formas, un adelantamiento en la fecha de última helada no reviste mayor gravedad.

Las variaciones halladas en las fechas medias de **última helada durante años La Niña** pueden verse en la Figura 50. Se destaca el atraso de más de 10 días sobre una importante zona que abarca el sur de Santa Fe y de Entre Ríos y el noreste de Buenos Aires. En el sector bonaerense de esta área, el retraso en la fecha media de última helada en casos La Niña supera los 15 días.

Conclusión 4:

- *Para los veranos El Niño se obtuvo una disminución en la frecuencia de heladas, en especial sobre la provincia de Buenos Aires, mientras que para veranos La Niña esta frecuencia se ve aumentada en la misma zona.*
- *Para los otoños El Niño se obtuvo una disminución en la frecuencia de heladas en el noreste del país, donde se identificó además un leve retraso en la fecha media de heladas. Para otoños La Niña se manifiesta un aumento en la frecuencia en un área que abarca el norte de Cuyo y de la provincia Córdoba, donde se observó también un adelanto en la fecha media de primera helada.*
- *Para los inviernos El Niño se observó una disminución en la frecuencia de heladas en el NEA, mientras que para La Niña se observan aumentos en localidades aisladas, dispersas en la mitad norte del área de estudio.*
- *Para las primaveras El Niño se observó una disminución en la frecuencia de heladas en el centro del país y en el norte del NOA. Para La Niña se obtuvo también una disminución generalizada en la frecuencia, que abarca toda la mitad norte del área de estudio, contrastando con un aumento en la frecuencia circunscrito al sur de Santa Fe y de Entre Ríos y el noreste de Buenos Aires, coincidiendo allí con un retraso marcado en las fechas medias de última helada.*

REFERENCIAS

- Barros, V. y Silvestri, G. (2001): La temperatura del mar en la región subtropical del Pacífico Sur y la precipitación en el sudeste de Sudamérica. IX Congreso Latinoamericano e Ibérico de Meteorología. Buenos Aires, Argentina.
- Bernardes Pezza y Ambrizzi (2002): Variability of Southern Hemisphere Cyclone and Anticyclone Behavior: Further Analysis. *Journal of Climate*, Volume 16, Issue 7 (April 2003) pp. 1075–1083
- Bertolli, M.; Penalba, O. y Vargas, M. (2004): Análisis de las campañas de rendimiento de soja extremo en relación con eventos ENOS y las variables climáticas. X Reunión Argentina y IV Latinoamericana de Agrometeorología, Mar del Plata, Argentina
- Burgos, J. J. (1947): Cryokindynoscopia index useful in agroclimatic researches. *Serv. Met. Nac. Buenos Aires. CIR/NO/T 305. Cag M. doc Nro. 30, Toronto, Mimeog.*
- Campetella, C y M. Risticucci (1998): Synoptic analysis of an extreme heat wave over Argentina in March 1980. *Meteorological Applications*, 1998, Vol 5, N.3, 217-226. (ISSN 1350-4827)
- Censig Gabriela y Jorge Villar (2008): Estrés térmico durante el llenado de granos de soja: efecto sobre el rendimiento. INTA – Estación Experimental Agropecuaria Rafaela. Información Técnica Cultivos de Verano. Campaña 2008. Publicación Miscelánea N° 112
- Cerne, B. y M. Rusticucci (1997): Estudio de la situación sinóptica asociada con la ola de frío de febrero de 1996. *Meteorológica*, 1997, Vol 22, No.2, 5-18, Centro Argentino de Meteorólogos, Buenos Aires.
- Compagnucci, R. Y Salles, A. (1997): Surface pressure patterns during the year over Southern South America. *International Journal of Climatology*, 17, 635-653
- Fernández Long, M. E. (2008): Respuesta de los rendimientos de maíz al ENOS, en grupos homogéneos de la región pampeana. AADA. XII Reunión Argentina de Agrometeorología, San Salvador de Jujuy, Argentina
- Forte Lay, J. y Scarpati, O. (2004): El Niño y las diferencias en la distribución estival (diciembre y enero) de la disponibilidad de agua en el suelo en la región pampeana argentina. X Reunión Argentina y IV Latinoamericana de Agrometeorología, Mar del Plata, Argentina
- Forte Lay, J. y Spescha, L. (2001): El Niño, su impacto sobre la reserva de agua en la región pampeana. IX Congreso Latinoamericano e Ibérico de Meteorología. Buenos Aires, Argentina.
- Forte Lay, J. y Spescha, L. (2001) : La Niña, su impacto sobre la reserva de agua en la región pampeana. IX Congreso Latinoamericano e Ibérico de Meteorología. Buenos Aires, Argentina.
- Gaido, Z. A. and M. E. Dubois (2008): Effects of heat stress on breadmaking quality of wheat: progenies with different levels of sensitivity. *Agriscientia XXV (2): 89-96*
- Grimm, A.; Barros, V. Y Doyle, M. (2000): Climate variability in southern South America associated with El Niño and La Niña events. *Journal of Climate* 13, 35-58
- Montecinos, A.; Díaz, A. y Aceituno, P. (2000): Seasonal diagnostics and predictability of rain in subtropical South America based on tropical Pacific SST. *Journal of Climate* 13, 746-758
- Müller, G., Nuñez, M. y Seluchi, M. (2000): Relationship between ENSO cycles and fronts events within the Pampa Húmeda region. *International Journal of Climatology*, 20, N°13, 1619-1637

- Müller G.V, Compagnucci R.H, Nuñez M.N y Salles M.A. (2006): Spatial analysis of surface circulation associated to frost in the wet Pampas. *International Journal of Climatology*.23, 8:943-961.
- Podestá, G.; Jones, J.; Mesina, C.; Royce, F.; Ferreira, R.; Grondona, M.; Llovet, I.; Hordij, H.; Marino, M.; Guevara, E.; Meira, S.; Dandanelli, J.; Hansen, J. Y O'Brien, J. (2001): IX Congreso Latinoamericano e Ibérico de Meteorología. Buenos Aires, Argentina.
- Randall, P.J. and H. J. Moss (1990): Some effects of temperature regime during grain filling on wheat quality. *Australian Journal of Agricultural Research*, 41:603-617.
- Rodriguez D. y I. Albuquerque Cavalcanti (2006): Simulations of the Hydrological Cycle over Southern South America Using the CPTec/COLA AGCM. *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 7, 916-936
- Rusticucci, M. y W. Vargas (1995): Synoptic Situations related to Spells of Extreme Temperatures over Argentina. *Meteorological Applications*, 1995, Vol 2, Part 4, 291-300. (ISSN 1350-4827)
- Rusticucci, M. y W. Vargas (2001): Interannual variability of Temperature Spells over Argentina. *Atmósfera*, 2001 Volumen 14, Numero 2 pags: 75-86. (ISSN 0187-6236.)
- Rusticucci, M. y W. Vargas (2002): Cold and warm events over Argentina and their relationship with the ENSO phases: Risk evaluation analysis. *Int. J. of Climatology*, 2002, vol 22, 467-483.
- Salles, A. (1998): La circulación atmosférica de superficie en el sur de Sudamérica y su relación con las anomalías de temperatura y precipitación. Tesis doctoral. Departamento de Ciencias de la Atmósfera, FCEyN, UBA, 158
- Scian, Beatriz (2001): Fases del SOI y su relación con los corrimientos de la mediana de la precipitación mensual en la pampa argentina. IX Congreso Latinoamericano e Ibérico de Meteorología. Buenos Aires, Argentina.
- Sterm, P. Y Easterling, W. (1999): Making climate forecast matter. National Academy Press, Washington, D. C.
- Trenberth K. (1997): The definition of El Niño. *Bulletin of the American Meteorological Society* 78: 2771–2777.
- Valtorta, Silvia (2003): Manejo del estrés térmico y composición de la leche. INTA Rafaela, Mercoláctea 2003.
- Vincent, L et al. (2005) Observed Trends in Indices of Daily Temperature Extremes in South America 1960–2000, *J. of Climate*, Volume 17, 5011-5023.
- Wrigley, C.W.; C. Blumenthal, P.W. Gras and E.W.R. Barlow (1994): Temperature variation during grain filling and changes in wheat grain quality. *Australian Journal Plant Physiology* 21: 875-885.