

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
ESCUELA DE GRADUADOS

**DETECCIÓN, EVALUACIÓN Y PRONÓSTICO DE
SEQUÍAS Y EXCESOS HÍDRICOS EN ARGENTINA**

Roberto Eduardo Zanvettor

Tesis
Para optar al Grado Académico de
Doctor en Ciencias Agropecuarias

Córdoba, 2019

DETECCIÓN, EVALUACIÓN Y PRONÓSTICO DE SEQUÍAS Y EXCESOS HÍDRICOS EN ARGENTINA

Roberto Eduardo Zanvettor

Comisión Asesora de Tesis

Director: Dr. Andrés C. Ravelo

Asesores: Dra. Ana María Planchuelo (Codirector)

Dr. Roberto A. Seiler

Tribunal examinador de Tesis

Dr. Roberto A. Seiler.....

Dra. Andrea I. Irigoyen.....

Dr. Gustavo G. Ovando.....

Presentación formal académica

25 noviembre de 2019
Facultad de Ciencias Agropecuarias
Universidad Nacional de Córdoba



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons
Atribución – No Comercial – Sin Obra Derivada 4.0 Internacional.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Andrés C. Ravelo, Dra. Ana María Planchuelo y al Dr. Roberto A. Seiler, miembros de la Comisión Asesora por todo su apoyo y tiempo brindado, en especial al Dr. Ravelo por sus valiosas asesorías, colaboración, conducción y permanente apoyo recibido durante el desarrollo de los trabajos realizados y redacción de la tesis.

Gracias a la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la UNC, por brindarme la formación de posgrado a través de su Escuela de Graduados. En particular quiero agradecer al CREAN y sus integrantes por brindarme un lugar de trabajo y apoyo permanente.

A todos mis profesores de los cursos y pasantías de doctorado, por los conocimientos que me transmitieron durante el desarrollo del posgrado y el esfuerzo realizado para apoyarme en mi formación profesional, especialmente a los profesores Dr. Gustavo Ovando y Lic. Mg. Mónica Bocco por sus valiosos aportes brindados sobre redes neuronales artificiales. Al DG Alejandro Barbeito por sus valiosos aportes en la confección de los gráficos presentados en el manuscrito de tesis.

Agradezco también a todos los que si bien no aportaron directamente a esta tesis han ayudado y contribuido a mi maduración profesional, académica y personal. En especial a mis compañeros y amigos de la Cátedra de Climatología y Fenología Agrícolas y del CREAN, de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la UNC. Al Programa EUROCLIMA 2014-2016 por brindarme la posibilidad de participar en las Reuniones y Talleres de Desertificación y Sequía para diferentes países de Latinoamérica, con especial énfasis al Dr. Paulo Barbosa del centro JRC de EUROCLIMA.

A todos los alumnos, docentes, técnicos, personal de apoyo de CONICET por sus valiosos aportes en los trabajos de elaboración de los mapas e índices utilizados en esta tesis.

A mi esposa por ser mi compañera y sostén en todo momento de mi familia.

DEDICATORIA

A mis padres por formarme con valores y enseñarme que la cultura del esfuerzo y el trabajo son necesarios para la realización de sueños y metas en la vida.

A mi esposa Edith por su comprensión y apoyo durante la realización del doctorado.

A mis hijos María Luz, María Gabriela y Roberto Andrés que han sido mi motivación en la vida.

RESUMEN

La ocurrencia de eventos hidrológicos extremos de distinta intensidad a lo largo del tiempo se traduce en cuantiosas pérdidas económicas en las actividades agropecuarias y las consecuencias ambientales que ocasionan como erosión de suelos, inundaciones, incendios forestales y pérdidas de la biodiversidad. Esta tesis presenta la dinámica espacio-temporal de eventos hídricos extremos que se manifiestan recurrentemente en Argentina, identificados, evaluados y pronosticados mediante los índices de severidad de sequía de Palmer (PDSI) y el índice estandarizado de precipitación (SPI). En el cálculo del PDSI y SPI se utilizaron series históricas (1980-2016) de precipitación diaria de estaciones distribuidas en todo el territorio nacional pertenecientes al Servicio Meteorológico Nacional como así también, datos de evapotranspiración mensual y capacidad hídrica del suelo. En las actividades agropecuarias, disponer de información a futuro de la situación hídrica por medio del pronóstico adquiere gran relevancia. El objetivo de este trabajo fue establecer una metodología que permita elaborar pronósticos de los extremos hídricos para escenarios de uno, dos y tres meses según el PDSI y el SPI utilizando redes neuronales (RN). Las RN se componen de una arquitectura y estructura de capas de neuronas unidas entre sí mediante conexiones ponderadas por pesos. El pronóstico mensual fue realizado con el modelo de red neuronal de tres capas. Las RN se entrenaron con el 30% de los datos y se usó el 5% para el test de validación con datos de los índices mensuales. Se utilizaron estadísticos para evaluar la calibración y validación de las redes neuronales en las localidades selectas de las diferentes regiones en que fue subdividido en país. Los resultados demuestran que los índices pronosticados de estaciones o de mapas en comparación con los índices observados de estaciones o mapas permitieron determinar diferencias entre los valores pronosticados y observados. En general, el valor pronosticado permanecía en la misma clase del evento a pesar de las diferencias numéricas. Los resultados obtenidos indican la posibilidad de usar los valores pronosticados para alerta temprana y elaborar medidas de mitigación.

PALABRAS CLAVE: Eventos hídricos extremos, PDSI, SPI, ENSO, redes neuronales.

ABSTRACT

The occurrence of extreme hydrological events of varying intensity over time translates into substantial economic losses in agricultural activities and the environmental consequences they cause, such as soil erosion, flooding, forest fires and loss of biodiversity. This thesis presents the space-time dynamics of extreme water events that recur in Argentina, identified, evaluated and predicted by means of the Palmer drought severity index (PDSI) and the standardized precipitation index (SPI). In the calculation of the PDSI and SPI, historical series (1980-2016) of daily precipitation from stations distributed throughout the national territory belonging to the National Meteorological Service were used, as well as monthly evapotranspiration data and soil water capacity. In the agricultural activities, having future information on the water situation by means of the forecast acquires great relevance. The objective of this work was to establish a methodology that allows to elaborate forecasts of the water extremes for scenarios of one, two and three months according to the PDSI and the SPI using neural networks (RN). The NRs are composed of an architecture and structure of layers of neurons joined by weight-weighted connections. The monthly forecast was made using the three-layer neural network model. RN were trained with 30% of data and 5% was used for the validation test with data from the monthly indices. Statistical were used to evaluate the calibration and validation of neural networks in selected localities of the different regions into which it was subdivided in country. The results show that predicted station or map indices compared to observed station or map indices made it possible to determine differences between predicted and observed values. In general, the predicted value remained in the same class of the event despite numerical differences. The results obtained indicate the possibility of using the predicted values for early warning and developing mitigation measures.

KEY WORDS: Extreme hydric events, PDSI, SPI, ENSO, neuronal networks.

TABLA DE CONTENIDOS

LISTA DE FIGURAS.....	XI
LISTA DE TABLAS.....	XV
LISTA DE FOTOS.....	XVI
LISTA DE ABREVIATURAS.....	XVII
ESTRUCTURA DE LA TESIS.....	XVIII
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
INTRODUCCIÓN.....	2
ASPECTOS CONCEPTUALES SOBRE SEQUÍAS.....	2
LOS IMPACTOS DE LA SEQUÍA.....	5
LAS SEQUÍAS A NIVEL MUNDIAL.....	8
LAS SEQUÍAS EN ARGENTINA.....	11
ASPECTOS CONCEPTUALES SOBRE EXCESOS HÍDRICOS.....	12
LOS IMPACTOS DE LOS EXCESOS HÍDRICOS.....	13
LOS EXCESOS HÍDRICOS A NIVEL MUNDIAL.....	14
LOS EXCESOS HÍDRICOS EN ARGENTINA.....	14
SISTEMAS DE MONITOREO Y EVALUACIÓN DE LOS EXTREMOS HÍDRICOS.....	17
UTILIZACIÓN DE REDES NEURONALES (RN) PARA EL PRONÓSTICO DE EXTREMOS HÍDRICOS.....	21
OCURRENCIA DE LOS FENÓMENOS DE EL NIÑO–LA NIÑA (ENSO).....	23
RELACIONES ENTRE LA OCURRENCIA DE EL NIÑO–LA NIÑA Y LOS EXTREMOS HÍDRICOS.....	27

HIPÓTESIS.....	28
OBJETIVOS GENERAL.....	28
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	28
CAPÍTULO 2: MATERIAL y MÉTODOS.....	29
MATERIAL y MÉTODOS.....	30
ÁREA DE ESTUDIO, CARACTERÍSTICAS GEOGRÁFICAS, CLIMÁTICAS Y SOCIO-ECONÓMICAS.....	30
REGIÓN NOROESTE (NOA).....	31
REGIÓN NORESTE (NEA).....	32
REGIÓN PAMPEANA (RP).....	32
REGIÓN DE CUYO (RC).....	34
REGIÓN PATAGÓNICA (RPA).....	34
DATOS METEOROLÓGICOS, CLIMATOLÓGICOS Y AGRO- ECONÓMICOS.....	35
INFORMACIÓN METEOROLÓGICA.....	35
ÍNDICES DE EXTREMOS HÍDRICOS.....	38
ÍNDICE DE SEVERIDAD DE SEQUÍA DE PALMER (PDSI).....	39
ÍNDICE ESTANDARIZADO DE PRECIPITACIÓN (SPI).....	40
PRONOSTICOS DE LOS ÍNDICES DE EXTREMOS HÍDRICOS MEDIANTE REDES NEURONALES	41
PRECISIÓN DE LOS PRONÓSTICOS.....	43
INFORMACIÓN CLIMATOLÓGICA SOBRE EL NIÑO-LA NIÑA.....	45

DETERMINACIÓN DE LAS RELACIONES ENTRE LA OCURRENCIA DEL ENSO Y LOS EXTREMOS HÍDRICOS.....	47
CAPITULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	48
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	49
VARIABILIDAD DE LAS SEQUÍAS Y LOS EXCESOS HÍDRICOS SEGÚN EL ÍNDICE DE PALMER (PDSI).....	49
VARIABILIDAD DE LAS SEQUÍAS Y LOS EXCESOS DE HUMEDAD SEGÚN EL ÍNDICE ESTANDARIZADO DE PRECIPITACIÓN (SPI).....	56
ENTRENAMIENTO, VALIDACIÓN Y UTILIZACIÓN DE REDES NEURONALES PARA EL PRONÓSTICO DE SEQUÍAS.....	67
ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO EN LOS PRONOSTICOS DE LOS ÍNDICES PDSI, SPI3 y SPI12.....	77
PRONÓSTICOS DE LOS EXTREMOS HÍDRICOS.....	78
PRONÓSTICOS DEL PDSI.....	79
PRONÓSTICOS DEL SPI3.....	81
PRONÓSTICOS DEL SPI12.....	84
PRECISIÓN DE LOS ÍNDICES PRONOSTICADOS.....	86
PRONÓSTICO DE LOS ÍNDICES DE SEQUÍA Y EXCESOS HÍDRICOS.....	87
ÍNDICE PDSI.....	87
ÍNDICE SPI3.....	91
ÍNDICE SPI12.....	95
OCURRENCIA DE EVENTOS EL NIÑO Y LA NIÑA Y LA VARIABILIDAD DE LOS ÍNDICES PDSI Y SPI.....	98
CAPITULO 4: CONCLUSIONES.....	116
CONCLUSIONES.....	117
APORTES DE LAS INVESTIGACIONES REALIZADAS.....	117
SOBRE LA BASE A LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN ESTA TESIS, SE PROPONEN LAS SIGUIENTES LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	119

BIBLIOGRAFÍA CITADA.....	120
ANEXOS.....	133
ANEXO 1; DETALLE METODOLOGÍA DE CÁLCULO DE LOS ÍNDICES.....	134
a. ÍNDICE DE SEVERIDAD DE SEQUÍA DE PALMER (PDSI).....	134
b. ÍNDICE ESTANDARIZADO DE PRECIPITACIÓN (SPI).....	138
ANEXO 2; DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA BASE TEÓRICA DE LA RN.....	141
a. COMPONENTES DE LA RED NEURONAL (RN).....	141
b.DETERMINACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE AJUSTES DE LAS REDES NEURONALES.....	145
c. ENTRENAMIENTO DE LAS REDES NEURONALES.....	146
d. DETERMINACIÓN DE LA PRECISIÓN DE LOS PRONÓSTICO USANDO REDES NEURONALES.....	148
e. PROCEDIMIENTO Y CALCULOS DE LOS PRONÓSTICO.....	148
ANEXO 3; ENTRENAMIENTO, VALIDACIÓN Y AJUSTE DE LOS ÍNDICES PDSI, SPI3 Y SPI12.....	150
a. PDSI.....	150
b. SPI3 Y SPI12.....	156
c. RESULTADOS ESTADÍSTICOS	168
d. PDSI, SPI3 Y SPI12 OBSERVADOS Y PRONOSTICADOS (2015-2018).....	168
e. ANÁLISIS OCHO LOCALIDADES, REGIÓN PAMPEANA EN ESTACIONES CONTRASTANTES	187
ANEXO 4; PRONÓSTICOS DE PDSI.	192
ANEXO 5; PRONÓSTICOS DE SPI3.....	220
ANEXO 6; PRONÓSTICOS DE SPI12.....	247

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Relación de las interacciones y secuencias entre los diferentes tipos de sequías y sus impactos económicos, sociales y ambientales. Fuente: NDMC, 2015.....	7
Figura 1.2	Evento El Niño fuerte caracterizado por temperatura del mar (SST) con anomalías positivas (color rojo) en el Océano Pacífico y en particular frente a las costas de Ecuador. (NASA-NOAA, 2015).....	24
Figura 1.3	Secuencias de El Niño extremo ocurridos en agosto de 1982, 1997 y 2015. Los mapas muestran las elevadas temperaturas del océano Pacífico durante agosto con color rojo intenso Fuente: NOAA.....	25
Figura 1.4	Imagen comparativa de las temperaturas SST en el océano Pacífico durante dos episodios El Niño fuerte ocurridos en octubre de los años 1997 y 2015. Rango escala -180 a +180 MM es la Anomalía de altura de la superficie del mar en milímetros. Fuente: NASA/CNES 2016.....	25
Figura 1.5	Ocurrencia del El Niño en 1997-1998 con sus implicancias en diferentes países de Sudamérica. Las áreas en verde indican aumento de las precipitaciones y áreas rojas señalan una disminución de las precipitaciones. Fuente: CIIFEN (2015).....	26
Figura 2.1	Subregiones de Argentina: Noroeste Argentino (NOA: 1); Noreste Argentino (NEA: 2); Región Pampeana (RP: 3); Región de Cuyo (RC: 4) y Región Patagónica (RPA: 5). Fuente: http://mxmedia.com.ar/capacitacion/practicas/wordAvanzado/Regiones.pdf	31
Figura 2.2	Ubicación geográfica de la red estaciones meteorológicas SMN y numeradas las estaciones seleccionadas: (Salta (1), Resistencia (2), Río Cuarto (3), Rosario (4), Tres Arroyos (5), Mendoza (6), Bariloche (7) y Trelew (8).....	38
Figura 3.1	Deficiencias hídricas o sequías ocurridas en la Región Pampeana a nivel departamental o partido durante enero de 2009 según el PDSI. La Categoría sequía extrema se registra en el 89% del área en la región considerada.....	50
Figura 3.2	El índice PDSI señala los excesos hídricos ocurridos en la Región Pampeana a nivel departamental o partido durante febrero de 2016. La categoría humedad extrema se registra en el 27% del área en la región considerada.....	51
Figura 3.3	Distribución geográfica mensual del PDSI durante 2016. Deben destacarse las zonas con extremos hídricos señaladas con rojo intenso (sequías) y verde intenso (excesos de humedad).....	52
Figura 3.4	Distribución geográfica mensual del PDSI durante 2017. Deben destacarse las zonas con extremos hídricos señaladas con rojo intenso (sequías) y verde intenso (excesos de humedad).....	53
Figura 3.5	Distribución geográfica mensual del PDSI durante enero a agosto del 2018. Deben destacarse las zonas con extremos hídricos señaladas con rojo intenso (sequías) y verde intenso (excesos de humedad).....	54
Figura 3.6	Deficiencias hídricas o sequías ocurridas en la Región Pampeana según el SPI3 a nivel departamental o partido durante el mes de enero del año	

	2009. La categoría sequía extrema se registra en el 43% del área de la región considerada.....	57
Figura 3.7	Sequías ocurridas en la Región Pampeana según el SPI12 a nivel departamental o partido durante el mes de enero del año 2009. La categoría sequía extrema se registra en el 23% del área de la región considerada	58
Figura 3.8	Distribución geográfica mensual del SPI3 durante 2016. Deben destacarse las zonas con extremos hídricos señaladas con rojo intenso (sequías) y verde intenso (excesos de humedad).....	60
Figura 3.9	Distribución geográfica mensual del SPI3 durante 2017. Deben destacarse las zonas con extremos hídricos señaladas con rojo intenso (sequías) y verde intenso (excesos de humedad).....	61
Figura 3.10	Distribución geográfica mensual del SPI3 durante enero a agosto del año 2018. Deben destacarse las zonas con extremos hídricos señaladas con rojo intenso (sequías) y verde intenso (excesos de humedad).....	62
Figura 3.11	Distribución geográfica mensual del SPI12 durante 2016. Deben destacarse las zonas con extremos hídricos señaladas con rojo intenso (sequías) y verde intenso (excesos de humedad).....	63
Figura 3.12	Distribución geográfica mensual del SPI12 durante 2017. Deben destacarse las zonas con extremos hídricos señaladas con rojo intenso (sequías) y verde intenso (excesos de humedad).....	64
Figura 3.13	Distribución geográfica mensual del SPI12 durante 2018. Deben destacarse las zonas con extremos hídricos señaladas con rojo intenso (sequías) y verde intenso (excesos de humedad).....	65
Figura 3.14	Valores de PDSI observados en Resistencia y pronosticados a un mes durante el entrenamiento de RN (1980-2016).....	68
Figura 3.15	Valores PDSI observados en Resistencia y pronosticados durante la verificación de RN (2016).....	68
Figura 3.16	Correlación entre PDSI observados en Resistencia y pronosticados a un mes utilizando redes neuronales (1980-2016).....	68
Figura 3.17	Valores de PDSI observados en Río Cuarto y pronosticados a un mes durante el entrenamiento de RN (1970-2016).....	69
Figura 3.18	Valores PDSI observados en Río Cuarto y pronosticados durante la validación de RN (2016).....	69
Figura 3.19	Correlación entre PDSI observados en Río Cuarto y pronosticados a un mes utilizando redes neuronales (1970-2016).....	69
Figura 3.20	Valores de PDSI observados en Bariloche y pronosticados a un mes durante el entrenamiento de RN (1980-2016).....	70
Figura 3.21	Valores PDSI observados en Bariloche y pronosticados durante la validación de RN (2016).....	70
Figura 3.22	Correlación entre PDSI observados en Bariloche y pronosticados a un mes utilizando redes neuronales (1980-2016).....	70
Figura 3.23	Valores de SPI3 observados en Resistencia y pronosticados a un mes durante el entrenamiento de RN (1980-2016).....	71
Figura 3.24	Valores SPI3 observados en Resistencia y pronosticados durante la validación de RN (2016).....	72
Figura 3.25	Correlación entre SPI3 observados en Resistencia y pronosticados a un mes utilizando redes neuronales (1980-2016).....	72

Figura 3.26	Valores de SPI3 observados en Río Cuarto y pronosticados a un mes durante el entrenamiento de RN (1971-2016).....	72
Figura 3.27	Valores SPI3 observados en Río Cuarto y pronosticados durante la validación de RN (2016).....	73
Figura 3.28	Correlación entre SPI3 observados en Río Cuarto y pronosticados a un mes utilizando redes neuronales (1971-2016).....	73
Figura 3.29	Valores de SPI3 observados en Bariloche y pronosticados a un mes durante el entrenamiento de RN (1980-2016).....	73
Figura 3.30	Valores SPI3 observados en Bariloche y pronosticados durante la validación de RN (2016).....	74
Figura 3.31	Correlación entre SPI3 observados en Bariloche y pronosticados a un mes utilizando redes neuronales (1980-2016).....	74
Figura 3.32	Valores de SPI12 observados en Resistencia y pronosticados a un mes durante el entrenamiento de RN (1981-2016).....	75
Figura 3.33	Valores SPI12 observados en Resistencia y pronosticados durante la validación de RN (2016).....	75
Figura 3.34	Correlación entre SPI12 observados en Resistencia y pronosticados a un mes utilizando redes neuronales (1981-2016).....	75
Figura 3.35	Valores de SPI12 observados en Río Cuarto y pronosticados a un mes durante el entrenamiento de RN (1971-2016).....	76
Figura 3.36	Valores SPI12 observados en Río Cuarto y pronosticados durante la validación de RN (2016).....	76
Figura 3.37	Correlación entre SPI12 observados en Río Cuarto y pronosticados a un mes utilizando redes neuronales (1971-2016).....	76
Figura 3.38	Valores de SPI12 observados en Bariloche y pronosticados a un mes durante el entrenamiento de RN (1981-2016).....	77
Figura 3.39	Valores SPI12 observados en Bariloche y pronosticados durante la validación de RN (2016).....	77
Figura 3.40	Correlación entre SPI12 observados en Bariloche y pronosticados a un mes utilizando redes neuronales (1981-2016).....	77
Figura 3.41	Mapas de PDSI observados y pronosticados para julio, agosto y setiembre a partir de junio de 2017.....	80
Figura 3.42	Mapas de PDSI observados y pronosticados para mayo, junio y julio a partir de abril de 2018.....	81
Figura 3.43	Mapas de SPI3 observados y pronosticados para enero, febrero y marzo de 2017.....	83
Figura 3.44	Mapas de SPI3 observados y pronosticados para abril, mayo y junio a partir marzo de 2018.....	84
Figura 3.45	Mapas de SPI12 observados y pronosticados para octubre, noviembre y diciembre a partir de setiembre de 2017.....	86
Figura 3.46	Mapas de SPI12 observados y pronosticados para julio, agosto y setiembre a partir de junio de 2018.....	87
Figura 3.47	Índices PDSI observados y pronosticados para Resistencia, Chaco, período 2015-2018.....	89
Figura 3.48	Valores de los PDSI observados y pronosticados (+1, +2 y +3) para localidades representativas durante 2017. a. Resistencia, Chaco b.Río Cuarto, Córdoba c. Bariloche, Río Negro.....	90
Figura 3.49	Índices PDSI observados y pronosticados para Río Cuarto, Córdoba,	

	período 2015-2018.....	91
Figura 3.50	Índices PDSI observados y pronosticados para Bariloche, Período 2015-2018.....	92
Figura 3.51	Índices SPI3 observados y pronosticados para Resistencia, Chaco, período 2015-2018.....	93
Figura 3.52	Valores de los SPI3 observados y pronosticados (+1, +2 y +3) para localidades representativas durante 2017. a. Resistencia, Chaco b.Río Cuarto, Córdoba c. Bariloche, Río Negro.....	94
Figura 3.53	Índices SPI3 observados y pronosticados para Río Cuarto, Córdoba, período 2015-2018.....	95
Figura 3.54	Índices SPI3 observados y pronosticados para Bariloche, Río Negro, período 2015-2018.....	95
Figura 3.55	Índices SPI12 observados y pronosticados para Resistencia, Chaco, período 2015-2018.....	96
Figura 3.56	Valores de los SPI12 observados y pronosticados (+1, +2 y +3)par localidades representativas durante 2017, a, Resistencia, Chaco, Río Cuarto, Córdoba y Bariloche.....	98
Figura 3.57	Índices SPI12 observados y pronosticados para Río Cuarto, Córdoba, período 2015-2018.....	98
Figura 3.58	Índices SPI12 observados y pronosticados para Bariloche, Río Negro, período 2015-2018.....	95
Figura 3.59	Mapas mensuales del PDSI con la distribución geográfica de sequías para los meses de noviembre, diciembre y enero en años de ocurrencia de La Niña (1988-89; 1995-96 y 2007-08).....	101
Figura 3.60	Mapas mensuales del PDSI con la distribución geográfica de los excesos hídricos para los meses de noviembre, diciembre y enero en años donde se presento el evento El Niño (1982-83; 1991-92; 1997-98 y 2015-16)....	102
Figura 3.61	Variabilidad mensual del índice PDSI, resaltando los ciclos de excesos hídricos (áreas en azul) y sequías (áreas en rojo) en Marcos Juárez, Córdoba, periodo 1971-2016.....	104
Figura 3.62	Variabilidad mensual del índice PDSI y ONI en Marcos Juárez, Córdoba, período 2012-2016.....	107
Figura 3.63	Variabilidad mensual del índice PDSI, resaltando los ciclos de excesos hídricos (áreas en azul) y sequías (áreas en rojo) en Santa Rosa, La Pampa, periodo 1970-2016.....	108
Figura 3.64	Variabilidad mensual del índice PDSI, resaltando los ciclos de excesos hídricos (áreas en azul) y sequías (áreas en rojo) en Tres Arroyos, Buenos Aires, período 1971-2016.....	111
Figura 3.65	Variabilidad mensual del índice PDSI y el ONI en Tres Arroyos, Buenos Aires, período 2014-2016.....	114

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1	Estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional, identificación internacional de la Organización Meteorológica Mundial y SMN, coordenadas de latitud, longitud, altitud m.s.n.m. (Ordenadas alfabéticamente por provincia).....	36
Tabla 2.2	Categorías de Pronóstico según los valores del índice PDSI y la paleta de colores.....	40
Tabla 2.3	Categorías pronosticadas, valores de los SPI3 y SPI12 y paleta de colores	40
Tabla 2.4	Datos de Período de ocurrencia de la anomalía El Niño (serie 1968-2019) y el índice ONI más alto registrado (Fuente: NOAA, 2019).....	46
Tabla 2.5	Datos de Período de ocurrencia de la anomalía La Niña (serie 1968-2019) y el índice ONI más bajo registrado (Fuente: NOAA, 2019).....	46
Tabla 3.1	Departamentos o partidos afectados por excesos hídricos en la campaña agrícola 2015/16 en las provincias de Buenos Aires, Córdoba, Santa Fe y Entre Ríos,	52
Tabla 3.2	Cantidad de datos para cada uno de los índices y los porcentajes correspondientes que fueron utilizados para el entrenamiento, validación y utilización de las redes neuronales	67
Tabla 3.3	Coeficientes de determinación R^2 , Índice de acuerdo (d), la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE) y error absoluto medio (MAE) para los índices PDSI, SPI3 y SPI12 obtenidos de las localidades de Resistencia, Río Cuarto y Bariloche, Período: 1980-2016.....	78
Tabla 3.4	Valores de los índices PDSI y ONI mensuales para los ciclos de déficit o sequías en Marcos Juárez, Córdoba, durante la ocurrencia del fenómeno de La Niña.....	104
Tabla 3.5	Valores de los índices PDSI y ONI mensuales para los ciclos de excesos hídricos en Marcos Juárez, Córdoba, durante la ocurrencia del fenómeno de El Niño.....	105
Tabla 3.6	Valores de los índices PDSI y ONI mensuales para los ciclos de déficit o sequías en Santa Rosa, La Pampa, durante la ocurrencia del fenómeno de La Niña.	108
Tabla 3.7	Valores de los índices PDSI y ONI mensuales para los ciclos de excesos hídricos en Santa Rosa, La Pampa, durante la ocurrencia del fenómeno de El Niño.	109
Tabla 3.8	Valores de los índices PDSI y ONI mensuales para los ciclos de déficit o sequías en Tres Arroyos, Buenos Aires, durante la ocurrencia del fenómeno de La Niña	111
Tabla 3.9	Valores de los índices PDSI y ONI mensuales para los ciclos de excesos hídricos en Tres Arroyos, Buenos Aires, durante la ocurrencia del fenómeno de El Niño	112

LISTA DE FOTOS

Foto 3.1	Vista aérea de la zona de Laboulaye, Córdoba mostrando campos inundados alrededor de 170 mil has del sur Cordobés (BCC-Agrovoz, 2017) (06/10/2017).....	55
Foto 3.2	Vista aérea de la ruta 7 rodeada de agua en Santa Fe y en los límites con las provincias de Córdoba y Buenos Aires, Octubre 2017 (BCC-Agrovoz, 2017)) (06/10/2017).....	55
Foto 3.3	Cultivo de soja implantado sobre trigo, en campos inundados durante el mes de febrero 2016 en Leones, Córdoba (Agrovoz, campaña 2015/2016).....	56
Foto 3.4	Tambos afectados por inundaciones en el departamento San Justo, Córdoba en Febrero de 2016. (Fuente Agrovoz-BCC 2016).....	66
Foto 3.5	Campos afectados por las inundaciones en el departamento San Justo, Córdoba en febrero 2016 y sus efectos sobre la actividad ganadera (FuenteAgrovoz-BCC, 2016).....	66
Foto 3.6	Pérdidas de vacunos por efectos de la sequia en enero de 2012, (FAO, 2012).....	115
Foto 3.7	Impacto de la sequía con fuertes pérdidas en rendimientos y área sembrada, (CREA, 2018).....	115
Foto 3.8	Efectos de las excesivas precipitaciones por ocurrencia de El Niño en un campo cultivado e inundado debido a los excesos hídricos que afectó el NEA siendo las provincias implicadas Entre Ríos, Santa Fe, Corrientes, Misiones, Chaco y Formosa, (Portal Caña, 2016).....	116

LISTA DE ABREVIATURAS

BCB	Bolsa de Cereales de Buenos Aires
BCC	Bolsa de Cereales Córdoba
BCR	Bolsa Cereales de Rosario
CA	Capacidad de Almacenamiento
CIIFEN	Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno de El Niño
CREAN	Centro de Relevamiento y Evaluación de Recursos Agrícola y Naturales
d	Índice de acuerdo
ETP	Evapotranspiración Potencial
ENSO	El Niño Oscilación del Sur
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
GEA	Guía Estratégica para el Agro
INTA	Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria
IRI	International Research Institute
NDMC	National Drought Mitigation Center
NDVI	Índice Normalizado de Vegetación
NEA	Región noreste
NOA	Región noroeste
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
RC	Región de Cuyo
RP	Región Pampeana
RPA	Región Patagónica
OMM	Organización Meteorológica Mundial
ONI	Oceanic Niño Index
ORA	Oficina de Riesgo Agropecuario
P	Precipitación
PDSI	Índice de Severidad de Sequía de Palmer
RN	Redes Neuronales
r	Coefficiente de correlación
R ²	Coefficiente de determinación
RMSE	Raíz del error cuadrático medio
SCADO	South-Central American Drought Observatory
SMN	Servicio Meteorológico Nacional
SOS	Sistema Operativo de Sequías
SPI	Índice Estandarizado de Precipitación
SST	Temperatura Superficial del Mar
USD	Dólares Americanos
WMO	World Meteorological Organization

ESTRUCTURA DE LA TESIS

El temario de la tesis está desarrollado en cuatro capítulos a saber:

- Capítulo I: Introducción. En este capítulo se analizan todos los antecedentes de los eventos de sequías y de excesos hídricos a nivel mundial y nacional; los sistemas de alerta y de evaluación de extremos hídricos; los pronósticos de los índices utilizando RN de esos eventos hídricos y finalmente la ocurrencia de El Niño-La Niña y su relación con los extremos hídricos. Como parte de la reglamentación de tesis se plantea una hipótesis que constituye los dilemas a resolver; se presenta el objetivo general y los objetivos específicos para confrontar si la hipótesis es aceptable y si los resultados esperados son apropiados para que se cumpla el objetivo general y los específicos planteados. Lo expresado sobre los antecedentes científicos y tecnológicos de la temática está respaldado con referencias bibliográficas que dan crédito al tratamiento de la propuesta de investigación.

- Capítulo II: Materiales y Métodos. En este capítulo se indican las fuentes de datos e información y se explican todas las metodologías evaluativas de los extremos hídricos usando índices calculados mediante datos meteorológicos, climáticos y edáficos. Se detallan los procedimientos para el desarrollo y evaluación de las redes neuronales en los pronósticos. También se indican los datos utilizados para la consideración de los eventos El Niño-La Niña. Todos los métodos utilizados tienen el respaldo de una exhaustiva revisión bibliográfica y una evaluación estadística.

- Capítulo III: Resultados y Discusión. En este capítulo se muestran los resultados de la utilización de los índices agroclimáticos para identificar la ocurrencia de eventos hídricos extremos, los análisis comparativos de los pronósticos de extremos hídricos con diferentes índices y la relación de las ocurrencias de extremos hídricos relacionados con eventos de El Niño-La Niña. Se discute la validez de la hipótesis y el cumplimiento de los objetivos planteados. Se demuestra que la investigación llevada a cabo en el proyecto de tesis tiene un gran valor innovador para evaluar y pronosticar la ocurrencia de sequías y/o excesos hídricos en las principales regiones agro-productoras del país.

- Capítulo IV: Conclusiones. Se hacen las apreciaciones de los resultados obtenidos y se presentan las consideraciones sobre los usos de las metodologías desarrolladas.

- Por último, en la tesis se incluye la lista de las referencias bibliográficas citadas y un conjunto de información adicional que se incluyen en Anexos que avalan los rubros relacionados con los datos, metodologías utilizadas y resultados obtenidos en el desarrollo de la tesis.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

La precipitación puede presentar montos extremos durante períodos prolongados, si estos son menores a los habituales se producen sequías y si las precipitaciones son excesivas esos excesos hídricos pueden resultar en inundaciones. Estos extremos hídricos traen aparejados fenómenos hidrológicos que alteran la gestión de los recursos hídricos y producen impactos negativos en los ecosistemas naturales y agrícolas (Chiang et al., 2007). Por otro lado, según un reciente informe internacional, las inundaciones y las sequías imponen enormes costos sociales y económicos alrededor del mundo y el cambio climático, el cual está evidenciando, producirá mayores extremos hídricos (ONU, 2019). Es por dichas razones que en esta tesis se propone un sistema para el monitoreo y evaluación de los eventos meteorológicos extremos relacionados con la deficiencia y el exceso de lluvias. Para el pronóstico preciso de sequías y excesos hídricos se propone el uso de un sistema redes neuronales.

El propósito de esta tesis se centra en el desarrollo de un sistema operativo de detección, evaluación y pronóstico de los extremos hídricos (sequías y excesos hídricos), que permita establecer acciones de mitigación y la reducción de la vulnerabilidad y el riesgo para ambas adversidades climáticas.

A continuación, se detalla la importancia y los antecedentes de evaluaciones de extremos hídricos, comenzando por una revisión del estado del arte sobre los conocimientos de las sequías y de los excesos hídricos en el mundo y en Argentina.

ASPECTOS CONCEPTUALES SOBRE SEQUÍAS

La sequía es considerada un desastre natural que se origina por una deficiencia en la precipitación durante un período extendido de tiempo. A diferencia de la aridez que es una condición normal en zonas en donde las bajas precipitaciones son una característica típica del clima, las sequías son anomalías temporales que pueden suceder en casi todas las zonas climáticas, aún en aquellas que tienen abundantes precipitaciones. Asimismo, debe diferenciarse entre una estación normalmente seca por las bajas precipitaciones que

ocurren en algunos climas, de aquella, con episodios de sequías en donde las lluvias escasean en períodos normalmente húmedos (Ravelo et al., 2016b).

Si bien las sequías son percibidas como eventos extremos del sistema climático, deberían ser consideradas como sucesos de ocurrencia frecuente puesto que estos eventos han ocurrido muchas veces y continuarán presentándose con asiduidad. Cuando las sequías son intensas y se prolongan en el tiempo generan fuertes pérdidas en las actividades agrícolas, ganaderas e industriales con consecuencias sociales e importantes pérdidas económicas (Wilhite et al., 2007).

Por otro lado, el continuo incremento de las necesidades de agua a nivel mundial indica que las sequías serán más perjudiciales en el futuro, con consecuencias adversas para la sociedad. Por otra parte, las migraciones de las zonas rurales a las zonas urbanas, la urbanización y las exigencias por la mejora de la calidad de vida de las comunidades generan una mayor demanda de agua para los diferentes usos. Si a estos requerimientos le sumamos los efectos del cambio climático, se demuestra que se está reforzando aún más la presión existente sobre los recursos hídricos que se ven agravados por la contaminación y una escasa cultura en el uso racional del agua (Ortega-Gaucin y Velasco, 2013; Magaña y Conde, 2000; Hayes et al., 1999).

De acuerdo con los antecedentes señalados, el manejo de los impactos de las sequías debería ser abordado utilizando análisis de riesgo, en lugar de un manejo de las crisis que traen aparejadas las sequías, las cuales son lamentablemente inevitables y cuya falta de prevención se constituye en un procedimiento actual en muchos países (Panu y Sharma, 2002; Ravelo et al., 2016a). Más allá de las pérdidas productivas y monetarias de los impactos de las sequías en la sociedad, se ha demostrado que sequías prolongadas afectan negativamente al medio ambiente, produciendo desequilibrios ecológicos con consecuencias difíciles de revertir. Es por estas razones, que las instituciones de los sectores gubernamentales, públicos y privados deben tomar medidas que ayuden a mitigar los efectos de las sequías (Ravelo, 2012).

Según la gravedad de las pérdidas ambientales y sociales que causan las sequías, la American Meteorological Society clasificó al fenómeno en cuatro categorías, a saber:

sequía meteorológica, sequía agrícola, sequía hidrológica y sequía socioeconómica (Heim, 2002). Estos conceptos pueden ser definidos en los siguientes términos:

Sequía Meteorológica: se presenta cuando la precipitación es muy inferior a lo esperado en una amplia zona y durante un largo período, siempre en comparación con las condiciones consideradas normales para ese lugar y ese período del año. En este tipo de sequía otros factores meteorológicos concurrentes como las altas temperaturas, la baja humedad del aire, el bajo contenido de humedad del suelo, y elevada velocidad del viento entre otros, agravan la situación.

Sequía Agrícola: se presenta cuando la escasez de agua se alarga en el tiempo y la cantidad de las reservas de agua del suelo no satisface las necesidades de la evapotranspiración. Se produce así un déficit de agua que causa daños por estrés hídrico en las plantas, causando disminución de los rendimientos de los cultivos y de forrajes para la ganadería. La sequía agrícola depende también de la susceptibilidad de las especies y variedades cultivadas, como así también de las diferentes etapas del desarrollo del cultivo, desde la emergencia hasta la madurez. Este tipo de sequía también produce daños ambientales en todos los niveles como falta de pasturas naturales y cultivadas, que afectan al ganado, incremento de los procesos de erosión del suelo por pérdidas de la cobertura vegetal, incendios de bosques y pastizales naturales. Estos impactos se pueden presentar a nivel local, regional, nacional e internacional entre países limítrofes, dependiendo de la dimensión temporal y espacial del fenómeno de sequía.

Sequía Hidrológica: ocurre cuando la escasez de agua continua en el tiempo reduciéndose los caudales en los arroyos y en los ríos, provocando la baja de los niveles de agua en los embalses y lagunas naturales y también disminuyendo las recargas en los acuíferos que hacen que se profundicen los niveles de las aguas subterráneas. Este tipo de sequía tiene impacto en todas las cuencas hidrográficas, en la provisión de agua a ciudades para el consumo domiciliario y en el suministro para el sector industrial.

Sequia Socioeconómica: este tipo de sequía está íntimamente relacionada con los factores adversos que provocan las sequías meteorológica, agrícola e hidrológica, sobre los bienes

económicos que dependen de factores relacionados con el suministro de agua. La sequía socioeconómica ocurre cuando la demanda de un bien económico excede la oferta como resultado de un déficit meteorológico relacionado con el suministro de agua.

Además de este esquema clasificatorio de sequías, hay otros tipos de sequías (Wilhite y Glantz, 1985). Estas sequías son:

Sequía Atmosférica: se presenta cuando las condiciones ambientales son de altas temperaturas, muy baja humedad relativa y/o vientos desecantes. Se puede producir por muy poco tiempo o bien si persiste se puede considerar como el inicio de lo que luego si se extiende en el tiempo llega a ser una sequía meteorológica.

Sequía Edáfica: ocurre en corto plazo cuando el agua disponible para las plantas se va agotando y no se repone por lluvia o riego. Si se mantiene en el tiempo se produce una sequía agrícola.

Según el National Drought Mitigation Center (NDMC, 2016) se debe incorporar un quinto tipo de sequía al esquema inicial presentado, que es la sequía ecológica y que puede definirse de la siguiente manera:

Sequía ecológica: tipo de sequía que impacta a todo el ecosistema por un déficit prolongado y generalizado en los suministros de agua naturalmente disponibles. Por efecto del calentamiento global de la atmósfera, se espera que la intensidad y frecuencia de tales sequías ecológicas en América del Norte aumenten, lo que dará lugar a una amplia gama de impactos sociales y ecológicos.

LOS IMPACTOS DE LA SEQUÍA

La disponibilidad del recurso hídrico incluye el contenido de humedad del suelo, el agua subterránea, la nieve, la escorrentía superficial, el almacenamiento en reservorios y, por supuesto, las precipitaciones. Existe una gran variabilidad temporal de los procesos de

transferencia de la precipitación hasta que el recurso hídrico pueda estar disponible en cada una de las fuentes. En general, la demanda y usos del agua se manejan en diversas escalas temporales; en consecuencia, los impactos de los déficits o excesos de agua son el resultado de una compleja interacción entre las fuentes y los usos del agua (McKee et al., 1993; 1995).

Los extremos hídricos, sean sequías o excesos de humedad, generalmente ocasionan enormes perjuicios principalmente a los sistemas productivos agrícolas en las distintas etapas de sus ciclos, dependiendo de su intensidad y duración. Entre los problemas y/o impactos negativos se pueden mencionar: pérdidas económicas en empresas dedicadas a la producción agropecuaria, ganadera y forestal, pérdidas económicas a empresas comerciales industriales y de servicios que están relacionadas con la actividades agropecuarias, como así también mayores gastos para implementar medidas de traslados de ganados de una región a otra, fábricas de alimentos, procesadoras de alimentos balanceados, fábricas de fertilizantes, instituciones financieras, bancarias, cooperativas, etc.

La evaluación de los impactos de las sequías se puede facilitar si el fenómeno es considerado en un contexto de sistemas, representado en un esquema o diagrama de flujos (Figura 1.1) en el que se integran los diferentes sistemas asociados a las sequías y la relación entre ellos. En el mismo, es importante observar que los distintos grados de sequías provocan impactos a dos grandes sistemas, uno es el físico-ambiental y el otro el económico-social (Ravelo, 2012).

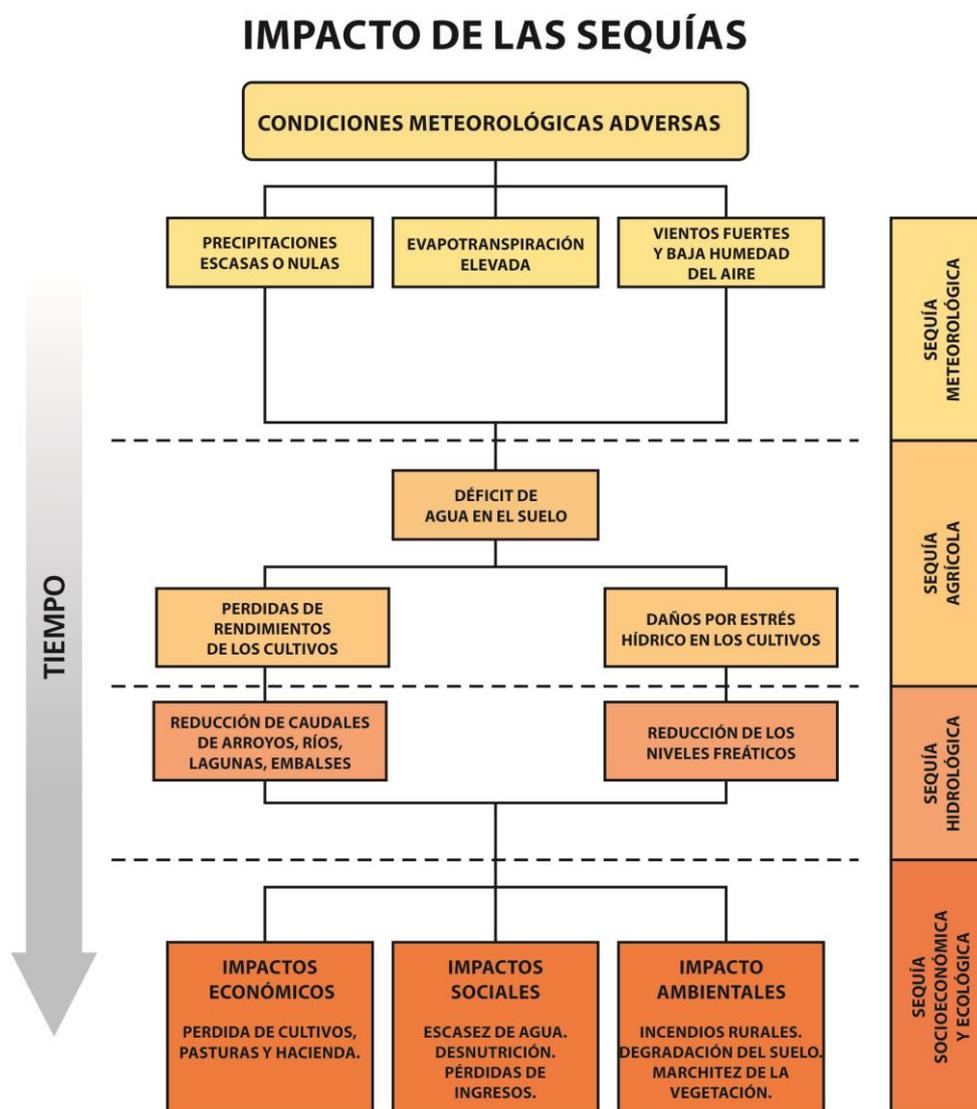


Figura 1.1 Relación de las interacciones y secuencias entre los diferentes tipos de sequías y sus impactos económicos, sociales y ambientales. Fuente: NDMC, 2015.

Por ello, es importante el monitoreo y pronóstico de esos extremos hídricos en forma continua y actualizada, tarea que en Argentina realiza el CREAN (2019) desde el año 2000. Los resultados de dicho monitoreo y pronóstico se difunden a través de una página web (www.crean.unc.edu.ar) y son actualizados mensualmente.

LAS SEQUÍAS A NIVEL MUNDIAL

Los eventos de sequías afectan a una amplia variedad de áreas geográficas y las condiciones extremas en el clima siempre han afectado a la humanidad. (Magaña y Conde, 2000). Durante los últimos años, los efectos del cambio climático a nivel mundial se pueden observar más estrechamente vinculados a las variabilidades extremas del clima y a su relación con la ocurrencia de sequías y excesos hídricos. Las características de un episodio de sequía no se conocen a menudo fácilmente hasta que ocurre la adversidad. Durante el período comprendido entre 1967 y 1992, aproximadamente el 50% de los 2,8 millones de personas que fueron afectados por todos los desastres naturales, lo han sido por eventos de sequías severas. De los 3,5 millones de personas que murieron por desastres, cerca de 1,3 millones fueron víctimas de las sequías (Obasi, 1994). Entre 2003 y 2013 desastres causados por eventos climáticos como sequías, hidrológicos como inundaciones y meteorológicos como tormentas han afectado a 2.023 millones de personas (FAO, 2015). Además, se espera que debido al cambio climático se incrementen los riesgos a las sequías, con afectaciones en la disponibilidad de las aguas superficiales y subterráneas debido a la variabilidad estacional e interanual del caudal fluvial (Moss et al., 2008).

Según un informe de la Organización de las Naciones Unidas, las sequías son una de las principales causas que origina la pobreza en el mundo y que año a año lleva a millones de personas a emigrar de sus países. Así, por ejemplo, en África entre 10 y 12 millones de personas anualmente se enfrentan a una grave escasez de alimentos, debido a la deficiencia de las lluvias (We are Water, 2018). Entre los países del continente africano más afectados podemos mencionar a Uganda, Sudan, South África, Etiopía, Somalia y Marruecos. En Asia, Afganistán e Irán entre otros, sufren las sequías y sus efectos sobre las poblaciones, lo que produce escasez de alimentos de forma directa e indirecta y los pobladores se ven obligados a emigrar hacia otras regiones más prosperas (Moradi y Erfanzadeh, 2001).

El oeste de África, durante las décadas de 1970 y 1980, fue afectado por largos periodos de sequías que se destacan como las peores sequías ocurridas en el siglo XX y que afectaron principalmente a la agricultura que es una de las principales fuentes de

empleo (WMO, 2006). Este evento meteorológico ocasionó una disminución de la productividad, pérdidas de cultivos, mortalidad de animales, escasez de alimentos, desnutrición, enfermedades y pérdidas de vidas humanas, migración de las zonas rurales a las ciudades y consecuentemente un aumento de las importaciones de alimentos (WMO, 2006).

En los Estados Unidos, alrededor de 7 billones de dólares se pierden cada año por la sequía (NSTC, 2005). Landsberg (1975) menciona que la sequía de los años 30 en los Estados Unidos provocó uno de los mayores desastres, debido a que los suelos se encontraban desnudos y sumado a los fuertes vientos causó la pérdida de millones de toneladas de suelo. Esto llevó a que muchos ganaderos y agricultores emigraran de Kansas, Oklahoma, Arkansas a otros estados menos afectados. Esto permitió que se destine mayor esfuerzo a la investigación sobre el manejo y la conservación de suelos y sobre los factores del tiempo meteorológico, relacionados a la sequía. Como resultado de estas investigaciones es que aparece el índice de sequía de Palmer (1965).

Durante 1996 las sequías afectaron el centro y sur de las grandes planicies y el suroeste de los EE.UU abarcando principalmente a los estados de Texas, New México, Kansas, Oklahoma, Arizona, con una duración de aproximadamente 9 meses y ocasionando pérdidas estimadas en u\$s 2,1 mil millones (Hayes et al., 1999). Rosemberg et al., (1983) observó los impactos de la sequía de los años 70 que se presentó en las Grandes Planicies de los Estados Unidos, y ocasionó la disminución de la superficie sembrada con maíz en 350.000 acres entre 1974 y 1976. En el estado de Nebraska en el año 1974 se perdió un billón de dólares en la producción de soja, maíz, sorgo, trigo y heno. Otro ejemplo de la afectación de las sequías fue la más reciente en California (2014-2015), caracterizada como la peor sequía de los últimos 100 años (Griffin y Anchukaitis, 2014). También, en el periodo 2010-2013 las sequías afectaron el sur de Estados Unidos (Ma et al., 2013).

En Canada, McKay (1986) realizó un análisis histórico de la ocurrencia de sequías. Los registros de los eventos comienzan a partir de 1890 y tuvieron una duración de aproximadamente nueve años, lo que motivo el abandono de los agricultores de sus

campos en las praderas canadienses. Otra gran sequía ocurrió en 1930, lo que provocó que alrededor de un cuarto de millón de personas abandonaran las planicies y a su vez generó una de las peores erosiones de suelo observada en la región. También afectó a la vida silvestre, principalmente a las aves acuáticas, favoreció la aparición de plagas, se incrementaron los incendios de bosques y pastizales. Otra gran sequía ocurrió durante el verano de 1976 y finalizó en la primavera de 1977, afectando a agricultores que no pudieron sembrar en primavera debido a que las condiciones de humedad del suelo fueron insuficientes para la germinación de las semillas de cultivos. También se incrementaron los incendios forestales y hubo tormentas de tierra semejantes a las ocurridas en la década del 30.

Una vasta zona de América Central durante los años 2015-2016 fue afectada por sequías severas y extremas abarcando a Nicaragua, El Salvador, Honduras, Guatemala y Panamá. En Panamá, esta adversidad impactó sobre la producción de sus principales cultivos como maíz y arroz, con pérdidas totales en algunas regiones. Esos cultivos, denominados básicos en la dieta alimentaria, representan una agricultura de subsistencia de la población del país. Debido a estas pérdidas severas, el país se vio obligado a importar granos y harinas para proporcionar alimentos a la población más vulnerable (Ministerio de Desarrollo Agropecuario-MiDA, 2016). La producción de arroz fue deficitaria, porque se vio afectada por la sequía en las provincias de Chiriquí, Veraguas, Coclé, donde se sembraron menos hectáreas que el promedio de los años anteriores. También debido a los bajos niveles de los embalses de Fortuna y Bayano fue necesario realizar cortes programados del servicio de electricidad, varias horas al día (Diaadiapa, 2016). El denominado corredor seco integrado por Nicaragua, Honduras y El Salvador, estuvo afectado por sequía principalmente sobre áreas agrícolas de los cultivos de maíz y frijoles, ocasionando problemas de racionamiento. También hubo escasez en el abastecimiento y distribución de agua a la población de la ciudad capital de El Salvador (Ministerio de Agricultura y Ganadería-MAG, 2016). Como consecuencia de todos estos episodios de sequías el Joint Research Centre de la European Commission perteneciente a la Unión Europea, propició un seminario de expertos para investigar y dar pautas de monitoreo y evaluación de la degradación de la tierra en el denominado Corredor Seco de Centroamérica (Ravelo et al., 2016a).

En Portugal, durante 2004-2005, se presentó una severa sequía que disminuyó considerablemente las reservas de agua de los embalses o diques y por lo tanto una fuerte caída en la producción de energía hidroeléctrica, reducción de la producción agrícola y se vio afectado el suministro de agua potable en algunas zonas urbanas (WMO, 2006).

Una visión de todos los eventos de sequía, que ocurrieron a nivel mundial en los últimos 100 años y las consecuencias de las personas afectadas por estos eventos, puede encontrarse en la base de datos internacional de desastres EM-DAT (OFDA/CRED, 2016). Algunos de los eventos de sequía más importantes en el mundo desde 1996 a 2015 pueden encontrarse en CRED-UNISDR (2016). Un análisis de dichas bases de datos permite identificar a las sequías más impactantes ocurridas en Irán en el 2001; en la región del río Amazonas en 2005; en Argentina en 2007-08 y 2012; en el sur de Estados Unidos en 2010-2013; en China en 2010-15; en el sur de Chile en 2015 (Moradi y Erfanzadeh, 2001; Qiu, 2010; Zongxing et al., 2012; Ma et al., 2013).

LAS SEQUÍAS EN ARGENTINA

En Argentina, la sequía se manifiesta con mayor incidencia económica en numerosas áreas agrícolas-ganaderas de la región pampeana húmeda (Zanvettor y Ravelo, 2000). En la zona árida del país como la provincia de Mendoza, se estudió la relación entre eventos El Niño/La Niña y la ocurrencia de sequías (Cicero et al., 2007). En la región noroeste del país, las sequías pueden extenderse por cinco, seis y hasta siete años consecutivos, como las ocurridas en Santiago del Estero en el período 2003-2009 (Boletta et al., 2010).

El Servicio Meteorológico Nacional (SMN) posee un sistema para el monitoreo y evaluación de sequías basado en información de precipitación actual e histórica y pronósticos estacionales de precipitaciones para determinar los períodos secos y se pueden visualizar en la página web del SMN (<http://www.smn.gov.ar/DroughtMonitor>). Este sistema de monitoreo utiliza al Índice Estandarizado de Precipitación (SPI, por sus siglas en inglés) como indicador de sequías y genera mapas con las condiciones mensuales de

humedad o sequedad según los valores que alcance el mismo. El índice SPI es utilizado para evaluar los efectos acumulativos de la falta o reducción de la precipitación para diferentes períodos de tiempo.

Dado el gran impacto económico que tienen las sequías en Argentina, a partir del año 2000, el Centro de Relevamiento y Evaluación de Recursos Agrícolas y Naturales (CREAN) de CONICET-Universidad Nacional de Córdoba, comenzó con el desarrollo y operación de un Sistema Operativo de Sequías (SOS) para el monitoreo, evaluación y pronóstico de sequías en mapas temáticos. En un principio, el sistema consideró solo a la región pampeana y luego se extendió a todo el territorio nacional (Ravelo, 2007). Los índices de sequía utilizados para tal fin son: Índice Severidad de Sequía de Palmer (PDSI) (Palmer, 1965), Crop Moisture Index (CMI) (Palmer, 1968) y el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) (McKee et al., 1993) para diferentes escalas de tiempo.

ASPECTOS CONCEPTUALES SOBRE EXCESOS HÍDRICOS

El planeta Tierra, según las estimaciones actuales, está conformado por aproximadamente el 70% de su superficie por agua, que se encuentra en los mares y océanos. El agua dulce disponible es de tan solo el 2,5%, que en su mayoría (68,7%) se encuentra en los glaciares de los casquetes polares y altas cumbres nevadas.

Según un informe del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2012) la frecuencia futura de los fenómenos extremos de precipitación en Sudamérica aumentará probablemente en un 66%. Mientras que las sequías afectan una parte de Sudamérica, la otra parte se ve afectada por lluvias extremas, como en el caso de Bolivia y Brasil que son dos países fuertemente afectados por inundaciones repentinas. Las inundaciones en los países limítrofes con Argentina también afectan a áreas de nuestro país como el caso de las inundaciones que ocurren por las crecidas del río Paraná cuando trae excesos de caudal causado por lluvias copiosas producidas en sus nacientes.

LOS IMPACTOS DE LOS EXCESOS HÍDRICOS

Los comportamientos climáticos erráticos, que provocan lluvias intensas en cortos períodos de tiempo, repercuten inmediatamente en los cauces de los ríos, que desbordan y pueden arrasar con la vegetación y las construcciones que frenan su paso, causando tragedias ecológicas y sociales. Ejemplos de este tipo son reportados en forma reiterada por los medios informativos, como por ejemplo las inundaciones ocurridas en Villa Allende y Mendiolaza, (Córdoba, Argentina) que afectó una amplia zona turística en febrero de 2015 (La Voz del Interior 15/02/2015a-b) y los campos anegados en el sudeste de Córdoba que trajo un impacto negativo al sector agropecuario (La Voz del Interior 3/01/2018).

Las precipitaciones excesivas no sólo repercuten negativamente en las áreas donde ocurren sino también en las zonas aledañas donde las escorrentías violentas producen cárcavas y anegamientos en las partes bajas que impiden las actividades agropecuarias.

De la misma manera que las sequías causan daños y producen impactos económicos negativos a los sectores productivos y a la sociedad en general, los excesos hídricos en épocas y en áreas determinadas pueden causar, en un corto período de tiempo, grandes catástrofes ambientales y sociales. Los extremos húmedos producen inundaciones, excesos de humedad del suelo, anegamientos y/o encharcamientos que generan el ascenso de las napas freáticas y que, finalmente, afectan directa o indirectamente a las actividades productivas agropecuarias, agroindustriales, transporte y sociales de las poblaciones urbano-rurales. Durante los períodos climáticamente húmedos el nivel del agua subterránea, en las regiones de llanuras, se eleva rápidamente y luego bajan durante los períodos secos, esos cambios sucesivos de las napas freáticas afectan a la producción agropecuaria y demás actividades afines en la región.

Si se reconoce que el problema de los anegamientos no sólo radica en la magnitud del exceso de agua puntual, sino también en la cantidad de agua almacenada en el suelo, queda claro que las soluciones incluyen aumentar el consumo y la evacuación de agua durante los períodos húmedos. Sin embargo, también se deben maximizar el consumo y

vaciado de la humedad y reducción del nivel freático del perfil del suelo en los períodos secos. Respecto a esto, las cortinas vegetales y los remanentes de vegetación natural prestan un servicio hidrológico tan importante como ignorado.

Los impactos económicos de excesos hídricos que producen las inundaciones, se generan por todo un conjunto de factores entre los que podemos mencionar: el daño por rotura y deterioro de la infraestructura civil de rutas, caminos, puentes, inmuebles, campos y maquinarias para las actividades productivas. Las pérdidas directas o indirectas de las actividades económicas como son los daños de cultivos, caída de la producción en actividades ganaderas y lecheras, impactan sobre la vulnerabilidad social de las poblaciones afectadas por posibles daños físicos y mentales hasta la capacidad económica de recuperación y sostenimiento del nivel de vida en la etapa post-inundación (Borden et al., 2007; Hinkel, 2011).

LOS EXCESOS HÍDRICOS A NIVEL MUNDIAL

En los países asiáticos, la India principalmente, que están expuestos a los vientos húmedos del verano, son frecuentes las lluvias torrenciales que producen grandes inundaciones y problemas de anegamiento (NASA-CNES, 2016; El País, 2019). En otras regiones, otros tipos de inestabilidades atmosféricas entre centros de baja presión continental y alta presión oceánica han ampliado los conceptos sobre los vientos húmedos que causan abundantes precipitaciones por encima de los registros normales. Estos eventos se asocian con episodios de tormentas breves pero torrenciales y no con lluvias continuas. El área oriental de Sudamérica no está exenta de vientos monzónicos en el verano. Así la mayor parte de Brasil se ve influenciada por un monzón de verano a tal punto que Río de Janeiro es afectada por las inundaciones durante esa estación (Grimm et al 2007).

LOS EXCESOS HÍDRICOS EN ARGENTINA

Con relación a los excesos hídricos, se puede inferir que existe una relación estrecha entre la ocurrencia de El Niño y los elevados montos de precipitaciones en la

pradera pampeana de Argentina. Sin embargo, la distribución geográfica de esos excesos en las precipitaciones es sumamente variable. Muchas áreas se pueden ver favorecidas y sus cultivos beneficiados por lluvias de moderadas a abundantes, mientras que otras áreas pueden ser perjudicadas por los anegamientos permanentes que son el producto de excesos de precipitaciones conducentes a inundaciones (Labraga et al., 2002; Scian et al., 2006).

En la región pampeana existen áreas que históricamente han sufrido ciclos de anegamiento y que atravesaron grandes inundaciones como en el período 1996-2001, cuando llovió un 20% por encima del promedio histórico. En ese lapso, la superficie afectada en la región creció del 3 al 27% y las napas subterráneas subieron de 3,5 m de profundidad a 1,3 m del nivel del suelo. En otros términos, un aumento de 800 mm en el almacenaje de agua en el suelo durante 5 años redujo un 50% el área agrícola. Si bien la inundación se retrajo, los niveles freáticos no volvieron a los mismos de 1996, y actualmente están a 2 m de profundidad. Esto implica que, la misma inundación se podría repetir con sólo la mitad del aumento del almacenaje que ocurrió en 2001 (Jobbágy, 2016).

En Argentina, el 80% de la población y más del 80% de la producción agrícola del país están en la planicie de inundación del Paraná y los que no están en esa zona, también sufren de inundaciones urbanas y rurales. Esto es cada vez más importante debido a que hay una manifestación de la variabilidad climática por el cambio climático, con ocurrencias de fenómenos mucho más intensos y extremos, que tendrá mayores consecuencias en las actividades agropecuarias (Jobbágy, 2017).

Durante la campaña 2017, la provincia de Buenos Aires fue afectada por inundaciones en aproximadamente 8 millones de hectáreas, este es un problema que cada vez se va tornando más reiterativo de año a año (Coninagro, 2017). Todos los pronósticos y su relación con el cambio climático indican que la pampa húmeda será más húmeda, de lo que es actualmente y que habrá más escurrimiento de agua de la que había antes, en zonas que son muy planas y la capacidad de evacuación por los cauces naturales será limitada (Ameghino, 1884; Forte Lay et al., 2008; Clarín, 2015; Coninagro, 2017; Jobbágy, 2017). Las soluciones no tienen que ver sólo con hacer obras de ingeniería de conductos y dragado, porque de esa manera se trasladará el problema hacia otras regiones donde se

desplace el agua. Se necesita entender mejor la relación, que existe entre el agua y la capacidad de absorción, infiltración y escurrimiento del suelo, lo que implica manejar el agua acumulada en el suelo y de las napas freáticas.

En varias zonas de la llanura pampeana sin registros históricos de anegamientos masivos comenzaron a exhibirlos en los últimos cinco años. En la región centro-este de Córdoba, cuyas tierras originalmente fueron pastizales y se encontraban entre las más fértiles del país, en el 2016 quedaron alrededor del 25% bajo el agua, (Agro Voz, Bolsa Cereales de Córdoba, 2016). En la localidad de Marcos Juárez, los niveles freáticos medidos por el INTA han ido ascendiendo desde una profundidad de 11 m (1970) hasta 1 m (2016). Por primera vez en la zona, las construcciones están sufriendo daños físicos y fallas estructurales asociadas al anegamiento (Agro Voz, Bolsa Cereales de Córdoba, 2016). Por ejemplo, en los períodos de máximo anegamiento -sobre todo cuando los impactos incluyen a la producción primaria y afectan al transporte y la vida urbana- surgen las demandas de obras hidráulicas como la construcción de canales con el fin de facilitar la salida del agua del establecimiento, pueblo, región o provincia en cuestión. Medidas que son positivas sólo mientras dura la emergencia y transfieren el problema de una localidad a otra, desatando conflictos de muy diversa índole y complejos de solucionar.

Todos estos análisis sobre la problemática de los excesos hídricos en Argentina datan del siglo XIX, si se consideran los consejos del escritor Florentino Ameghino que planteó en 1884 en su publicación **Secas y las Inundaciones en la Pampa**. Entre sus conclusiones más importantes proponía: “poner un techo al campo para retener en origen la lluvia caída y complementar con cubrir la llanura bonaerense de represas, estanques y lagunas artificiales combinadas con canales y plantaciones de arboledas en gran escala”. Además, continuaba diciendo que esa “sería indudablemente una obra más colosal que la proyectada de desagüe simple e ilimitado, pero de resultados benéficos que permitirían un enorme desarrollo de la ganadería y la agricultura que no estarían ya expuestas a los azares de las inundaciones y las secas, y aumentarían de un modo extraordinario el valor de las tierras en beneficio de cada productor y de la comunidad”. Por lo tanto, aclaraba que: “mientras que el proyecto de desagüe simple e ilimitado no tan sólo no reportaría tales ventajas, sino que daría resultados desastrosos”.

SISTEMAS DE MONITOREO Y EVALUACIÓN DE LOS EXTREMOS HÍDRICOS

Actualmente no existen mecanismos que puedan evitar la ocurrencia de las sequías o de los excesos hídricos, pero es posible, mediante el análisis de datos climáticos, meteorológicos e hidrológicos, obtener información que permita preparar planes de contingencia en el caso de ocurrencia de esas adversidades.

Se han desarrollado índices que evalúan las condiciones ambientales y utilizando datos meteorológicos registrados y estimados por medio de fórmulas y modelos matemáticos, pueden valorar y tabular en escalas numéricas los episodios de sequías y de excesos hídricos. Los índices más utilizados, que serán descritos en el Capítulo II Materiales y Métodos de esta tesis, son: el índice de severidad de sequía de Palmer (PDSI) y el índice estandarizado de precipitación (SPI), (Palmer, 1965; McKee, 1993).

Para mitigar los daños que causan los eventos meteorológicos extremos es necesario contar con sistemas de alerta para la detección, seguimiento y evaluación de los extremos hídricos que provean información actualizada y fidedigna, de forma que permitan realizar la planificación anticipada de acciones y así, estar preparados para enfrentar esas contingencias extremas y atenuar sus efectos perjudiciales. Estos sistemas deberán integrar al conjunto de los aspectos biofísicos-ambientales y socio-económicos para lograr un uso sustentable del recurso agua. Unos de los componentes más importantes para la correcta operación de un sistema integrado de sequías es disponer de un centro debidamente equipado para la detección y evaluación de la sequía, con personal capacitado en los aspectos científicos y técnicos (Ravelo et al., 2014; 2016a).

Entre los numerosos países que cuentan con sistemas de monitoreo y seguimiento de sequías se puede mencionar a EEUU, que cuenta con el centro de monitoreo de sequías denominado United States Drought Monitor (USDM) funcionando desde 1999 con la misión de monitorear las condiciones de sequías y del suministro de agua para todo el país. El National Drought Mitigation Center (NDMC) con sede en la Universidad de Nebraska-Lincoln EEUU mantiene al USDM y publica sus resultados en la página web:

<http://www.droughth.unl.edu/index.htm>. La función del Centro es elaborar mapas con las condiciones de sequedad o humedad existentes y todos sus resultados son difundidos a través de internet para todos los usuarios, agencias estatales o privadas que requieren de esta información. El NDMC integra información de parámetros meteorológicos, climáticos y agrometeorológicos para obtener índices de sequías que caracterizan temporal y espacialmente las condiciones de humedad existentes. De este modo, se evalúan las condiciones de sequedad, representadas en mapas semanales, mensuales y estacionales de las actuales condiciones de sequías. Los mapas se presentan en colores y muestran las áreas afectadas por sequías para los 50 estados de los EEUU y Puerto Rico.

La metodología del uso de índices para evaluar las sequías se fue desarrollando para toda América del Norte a través de proyectos de colaboración internacionales, existente entre los países miembros como North American Drought Monitor (NADM) entre EEUU, México y Canadá. El National Drought Monitor Center comenzó en 2002 a generar mapas de las condiciones de sequías a través de instituciones oficiales vinculadas como la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), el Departamento de Agricultura (USDA) en EEUU, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y ministerios de Medio Ambiente y de Agricultura en México y Agri-Food en Canadá.

Otros ejemplos son los monitores a gran escala como los del Observatorio de la Desertificación, la Degradación de las Tierras y la Sequía (DDTS) de América Latina (SCADO, 2013) del Joint Research Center, European Commission del Programa EUROCLIMA (Barbosa, 2015) (<http://edo.jrc.ec.europa.eu/scado>) y el Latin American Flood and Drought Monitor (LAFDM), que permiten visualizar de manera histórica y actual, las condiciones diarias como también las previsiones meteorológicas e hidrológicas mensuales para toda América Latina (<http://stream.princeton.edu/lafdm/webpage>). El SCADO suministra datos e informaciones necesarios para realizar unos análisis exhaustivos del fenómeno de la sequía y el problema de la degradación de las tierras y la desertificación en América Latina. Su propósito fue facilitar la integración de las estrategias y medidas de mitigación y de adaptación ante el cambio climático, en las políticas y planes públicos de desarrollo en América Latina. Una red de instituciones latinoamericanas apoyó al desarrollo del Observatorio EUROCLIMA de la DDTS y que

actualmente contribuye al servidor web cartográfico con sus propios productos desarrollados a escalas nacionales y/o locales. El CREAN aporta resultados de su sistema de monitoreo y evaluación de las sequías en Argentina (<http://edo.jrc.ec.europa.eu/scado>).

En México, existe el Organismo de Cuenca Pacífico Norte de la CONAGUA (OCPN-CONAGUA) y en El Salvador el Observatorio Ambiental (<http://mapas.snet.gob.sv/meteorologia/decadico.pdf>), ambos son ejemplos de monitoreo de sequías que posibilitan el acceso a mapas y servicios de datos. El OCPN-CONAGUA desarrolló el Proyecto de Fortalecimiento del Manejo Integrado del Agua (PREMIA) para diseñar con un sistema operativo que permita la identificación, caracterización, monitoreo y evaluación de escenarios de sequías, para elaborar planes y/o programas estratégicos de gestión del agua en la ciudad de Culiacán, Sinaloa (OCPN, 2006; Ravelo, 2007). Este programa estratégico de gestión del agua para el monitoreo de las sequías meteorológicas e hidrológicas y utiliza los siguientes índices SPI, PDSI, CMI, NDVI y SDI a escala regional o de cuenca. Entre las bondades que presenta el manejo del sistema a baja escala es una mayor precisión en la estimación de las características puntuales y espaciales de la sequía a nivel regional, permitiendo estimar la vulnerabilidad y riesgo por municipio, cuenca y consejo de cuenca. La información se puede visualizar en <http://www.conagua.gob.mx/OCPN07/Noticias/Boletin>.

En 2013 se creó en México el Programa Nacional contra la Sequía (PRONACOSE), a fin de atender de manera integral este fenómeno, lo que implica, la identificación e implementación de acciones en la toma de decisiones para la prevención y mitigación, acordando con las autoridades locales los programas y acciones necesarias en cada cuenca y usuarios de agua a nivel nacional (Arreguín et al., 2016). El OCPN realiza Programas de Medidas Preventivas y de Mitigación de Sequías (PMPMS) para atender los efectos del fenómeno en todos los Consejos de Cuenca (CONAGUA, 2014; Torrecillas et al., 2013) con el objetivo general de instrumentar acciones emergentes para prevenir y mitigar los efectos causados por el desabastecimiento de agua en los diferentes usuarios del agua, originados por la sequía. Durante los años 2014 y 2015 estos PMPMS fueron actualizados y se elaboraron los PMPMS de las ciudades de Culiacán en Sinaloa y Victoria en Durango en 2014 y el de la ciudad de Mazatlán en Sinaloa en 2015 (<http://www.pronacose.gob.mx>).

En Portugal utilizan el índice de sequía de Palmer (PDSI) para caracterizar las sequías. Este índice ha sido adaptado y calibrado a las condiciones climáticas específicas de Portugal continental para evaluar y monitorear las condiciones de humedad del suelo y su distribución espacial en las principales áreas destinadas a la agricultura. Los mapas generados se utilizan para supervisar las variaciones espaciales y temporales de la sequía en este país, lo que permite delinear las posibles áreas de desastre para la agricultura y otros sectores, de modo de mejorar las decisiones en las fincas y así reducir los impactos de las sequías. Los efectos de la sequía registrados sobre la agricultura, la energía y el abastecimiento de agua urbana fueron significativos en el año 2005, cuando el número de personas afectadas por la sequía (con suspensión de suministro de agua) de abril a diciembre de ese año, fue de alrededor de unas 100.000 personas (WMO, 2006).

Australia cuenta con su servicio de monitoreo de sequía que depende del Australian Weather Bureau y utiliza como indicador el índice de los percentiles mensuales e identifica regiones con déficit y excesos de precipitación en su territorio. Desde 2005, una comisión especial creó un sistema de monitoreo denominado National Agricultural Monitoring System (NAMS) para el seguimiento de las sequías agrícolas.

En Sudáfrica, la sequía es una característica normal y recurrente del clima. El Servicio meteorológico sudafricano, South Africa Weather Service (SAWS) estableció un sistema para el monitoreo y evaluación de sequías basado en información de precipitación actual e histórica y pronósticos estacionales de precipitaciones, para determinar los períodos secos que se pueden visualizar en la web (<http://www.weathersa.co.za/droughtmonitor/dmdesk.jsp>). Los índices que utiliza son: el porcentaje de la precipitación normal, los deciles de precipitación y el SPI para evaluar los efectos acumulativos de la falta o reducción de la precipitación normal para diferentes períodos de tiempo. Como ejemplo, el Departamento de Agricultura informó en el 2005, que ocho de las nueve provincias que tiene Sudáfrica fueron declaradas afectadas por sequías severas y la provincia de Limpopo al norte, presentó áreas de desastre por sequías en 2003-2004, con veintisiete de treinta y siete municipios afectados (WMO, 2006).

China cuenta con el Beijing Climate Center (BCC) que pertenece a la Administración Meteorológica de China (CMA) (WMO, 2006). El BCC realiza el monitoreo de la ocurrencia de sequías y utiliza el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) para una escala temporal de 10 días. Los productos resultantes del monitoreo y evaluación de sequías son publicados en un boletín por el BCC para las agencias del gobierno y público en general. Toda la información generada es difundida en una página web (<http://www.bcc.cma.gov.cn>) donde se pueden observar los mapas con las condiciones de sequías existentes.

UTILIZACIÓN DE REDES NEURONALES (RN) PARA EL PRONÓSTICO DE EXTREMOS HÍDRICOS

En general, los modelos matemáticos de redes neuronales se basan en estudios biológicos y fisiológicos del cerebro humano. Sin embargo, los modelos simplificados utilizados en ingeniería distan bastante del funcionamiento real del cerebro humano, pero los mismos presentan propiedades interesantes que son empleadas para obtener resultados prácticos en disciplinas de la ciencia como son la ingeniería, física, economía, robótica, procesamiento de imágenes, medicina, ecología, agronomía, hidrología, etc. (Bocco et al., 2006; Bonaccorso et al., 2015; Mitall et al., 2012; Makwana y Tiwini, 2014).

Las RN constituyen un área de investigación relativamente nueva, desarrollada hacia fines de la década del 80. Sin embargo, muchos trabajos en este campo se pueden encontrar en la década del cuarenta. Los primeros trabajos que desarrollaron esta técnica fueron aplicados para entender el cerebro humano y simular su funcionamiento, usando álgebra de Boole para construir un modelo matemático (Mc Culloch y Pitts, 1943).

En la década del noventa los avances tecnológicos permitieron el resurgimiento de este campo con el desarrollo de sofisticados algoritmos y poderosas herramientas de cálculo, demostrando el potencial de las RN en la adquisición, representación y cálculo en espacios multivariados (Wasserman, 1989).

Una red neuronal se considera matemáticamente como una aproximación universal. Entre las múltiples definiciones de RN encontradas en la bibliografía, se tratará de usar

aquella que sea más representativa o aplicada al campo de estudio de la ingeniería y la meteorología. Así una RN es una estructura de procesamiento de información paralela y distribuida, formada por elementos de procesamiento denominada neuronas o nodos, interconectados mediante canales de información denominados conexiones (<biblio>).

Según la American Society of Civil Engineers (ASCE, 2000a-b), una RN es un sistema de procesamiento de información con características similares a las funciones biológicas del cerebro humano. El proceso de la información se desarrolla sobre los nodos y las señales se propagan entre los mismos mediante conexiones con una intensidad de conexión que es representada mediante un valor o peso numérico. Los pesos o sinapsis son un valor o parámetro ajustable asociado con el grado de intensidad de la conexión entre los nodos de la RN. El proceso de aprendizaje generalmente se realiza mediante la actualización o ajuste de los pesos. A los nodos generalmente, se le aplican transformaciones no lineales denominadas funciones de activación, que son asignadas a la entrada neta del nodo para producir una señal de salida. Las funciones de activación confieren a la red neuronal capacidades para el manejo de relaciones no lineales. Los nodos que se encuentran conectados al ambiente externo se definen como nodos de entrada y de salida. Cuando los pesos son modificados, el comportamiento de los nodos de entrada/salida de la red se ajusta a lo observado en el ambiente.

Las características propias de las redes neuronales las convierte en herramientas eficaces para la solución de problemas relacionados con los pronósticos. Las RN difieren de los métodos tradicionales, basados en modelos, ya que ellas son métodos adaptativos conducidos por la información y en los que no se requiere de suposiciones *a priori* acerca de los problemas bajo estudio. Ellas pueden aprender de ejemplos y capturar relaciones ocultas o leyes que gobiernan el proceso. Según Funahashi (1989), las RN son funciones de aproximación universales y está demostrado que una red neuronal de tres capas, con un número adecuado de nodos o neuronas elementales de proceso en su capa oculta, tiene la capacidad de poder aproximar cualquier función continua con la precisión requerida.

El proceso de aprendizaje permite que las RN puedan producir respuestas adecuadas de datos no observados por la red, incluso si la información utilizada en el

entrenamiento contiene ruido; por este motivo, las RN son ideales para ser utilizadas como método del comportamiento futuro en función del comportamiento pasado.

En el área de los recursos hídricos, se han realizado estudios y aplicaciones de RN en el desarrollo de modelos de precipitación-escorrentía, pronóstico de precipitaciones y caudales, modelación de agua subterránea, calidad de aguas superficiales, políticas de gestión de recursos hídricos, operación de reservorios y otras formas de captación y almacenamiento de aguas (Bordi y Sutera, 2007; Dawson y Wilby, 1998; Douriet, 2017; Mishra y Singh, 2010, 2011; Morid y Bagherzadeh, 2007; Moss et al., 2008; Ravelo et al., 2014; Torrecillas Nuñez et al., 2015).

OCURRENCIA DE LOS FENÓMENOS DE EL NIÑO-LA NIÑA (ENSO)

El Niño es un fenómeno natural caracterizado por la fluctuación de las temperaturas en la parte central y oriental del Océano Pacífico ecuatorial, asociada a cambios en la atmósfera. Este fenómeno tiene una gran influencia en las condiciones climáticas con mayores o menores precipitaciones en diversas partes del mundo y particularmente en Sudamérica y Argentina. Se ha establecido que la ocurrencia de El Niño está asociada a sequías en el NE de Brasil, Centroamérica, el sudeste de Asia, Australia y partes de África (CIIFEN, 2015).

Hay varias maneras de definir a este evento, una de ellas es a través del denominado Índice Niño Océano (ONI, por sus siglas en inglés) desarrollado por NOAA de Estados Unidos, que debe alcanzar un valor 0,5 grados por sobre la temperatura normal y mantenerse en ese nivel durante tres a cinco meses consecutivos. Según el valor del ONI, se pueden identificar tres condiciones (NOAA, 2016).

1. El evento El Niño ocurre como consecuencia del calentamiento o aumento de la temperatura del mar, mayor o igual a +0,5 °C del Océano Pacífico tropical a la altura de las costas de Ecuador y Perú.
2. El evento La Niña ocurre cuando la temperatura del Océano Pacífico tropical disminuye -0,5 °C o menos que el valor normal durante tres meses consecutivos.

3. La condición normal o Neutro ocurre cuando los valores de las temperaturas del Océano Pacífico tropical se encuentran entre valores $+0,4$ y $-0,4$ °C del valor normal indicando condiciones de neutralidad.

A manera de ejemplo de una situación, en la Figura 1.2 se pueden observar las Temperaturas de la Superficie del Mar (SST, por sus siglas en inglés) a nivel global durante la ocurrencia de un evento El Niño y las SST son más cálidas en el Océano Pacífico tropical frente al continente americano.

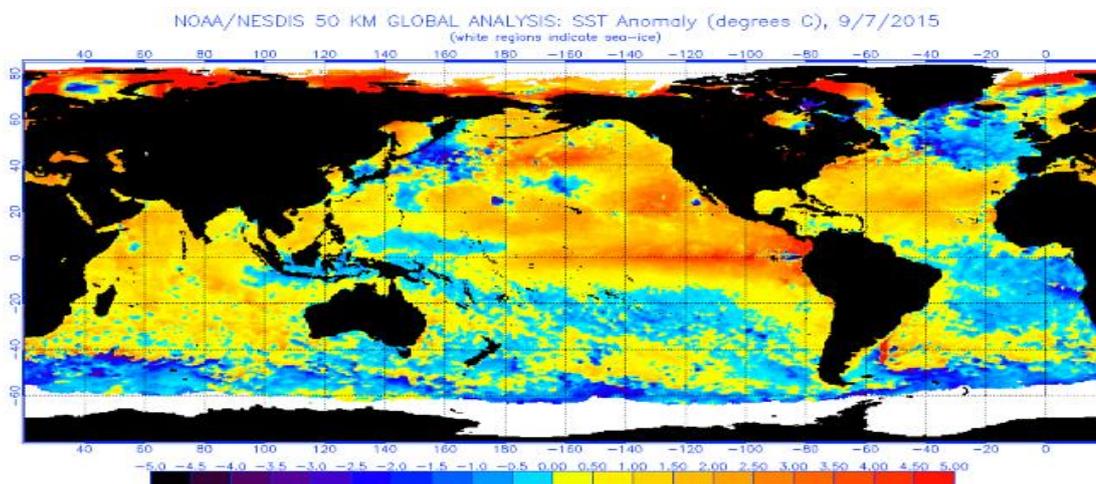


Figura 1.2. Evento El Niño fuerte caracterizado por temperatura del mar (SST) con anomalías positivas (color rojo) en el Océano Pacífico y en particular frente a las costas de Ecuador (NASA-NOAA, 2015).

El Niño ocurre aproximadamente entre 3 a 7 años. En la Figura 1.3 se muestra la situación observada durante los meses de agosto de ocurrencias de fenómenos El Niño de gran magnitud ocurridos en 1982, 1997 y 2015. Uno de los períodos con máximas SST jamás registradas ocurrió durante 12 meses consecutivos (mayo 1997- abril 1998), caracterizado por un evento El Niño fuerte. En la primavera del 2015, comenzó un nuevo El Niño que se establece en el océano nuevamente como lo muestra la imagen con la distribución del calor (zonas rojas) y su extensión (Figura 1.3). Durante 2015 y 2016, El Niño se estableció en el océano Pacífico y los expertos predijeron que esta vez podría ser de gran alcance con consecuencias en América del Sur y Argentina. Se identificaron condiciones que un fuerte fenómeno "El Niño" estaba en desarrollo ya que las características oceánicas del 2015 son muy similares a las de 1997 (Figuras 1.3 y 1.4).

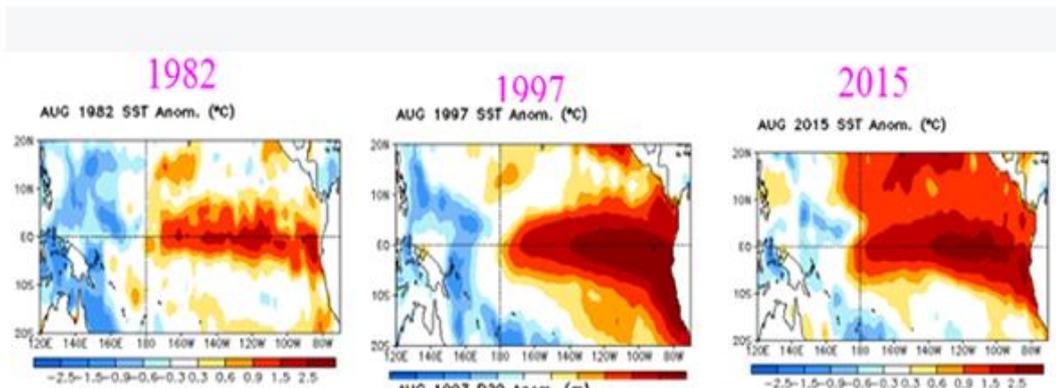


Figura 1.3. Secuencias de El Niño extremo ocurridos en agosto de 1982, 1997 y 2015. Los mapas muestran las elevadas temperaturas del océano Pacífico durante agosto con color rojo intenso. Fuente: NOAA.

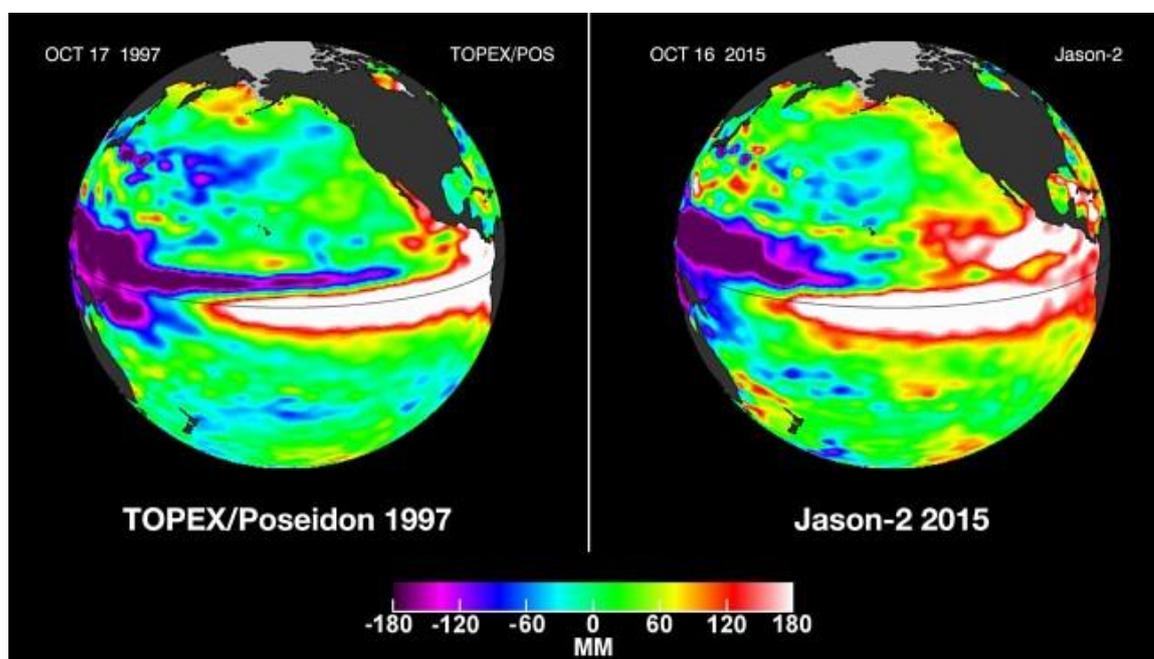


Figura 1.4. Imagen comparativa de las temperaturas SST en el océano Pacífico durante dos episodios El Niño fuertes ocurridos en octubre de los años 1997 y 2015. Rango escala -180 a +180 MM es la Anomalía de altura de la superficie del mar en milímetros. Fuente: NASA/CNES 2016.

Las situaciones hídricas estacionales para Sudamérica con las condiciones de sequías y de excesos de humedad marcadas a escala geográfica durante El Niño 1997-1998 se presentan en la Figura 1.5 (CIIFEN, 2015; IRI, 2015). Dada la similitud entre El Niño 1997-1998 y El Niño 2015-2016, las mismas situaciones hídricas se presentaron en ambos eventos. En general, El Niño conduce a una mayor precipitación en América del Sur y a condiciones de sequía en Centroamérica, sudeste de Asia, Australia y partes de África

(CIIFEN, 2015). Las condiciones de El Niño 2015-2016 tuvo características de un evento fuerte por la intensidad que alcanzó el ONI de 2,4 a 2,5, comparable con el más fuerte alcanzado hasta ese momento que fue el de 1997-1998. Se produjeron precipitaciones sobre los valores normales en la región central y noreste de Argentina con inundaciones en el litoral y en muchas áreas de la región pampeana.

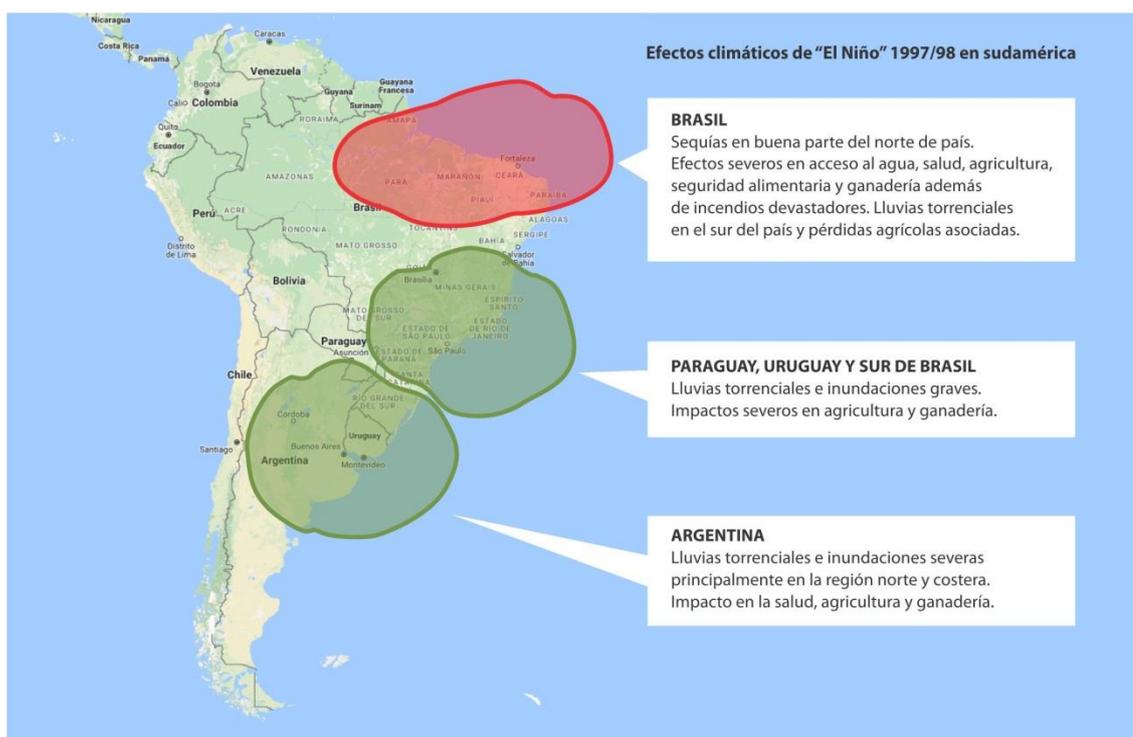


Figura 1.5. Ocurrencia del El Niño en 1997-1998 con sus implicancias en diferentes países de Sudamérica. Las áreas en verde indican aumento de las precipitaciones y las áreas rojas señalan una disminución de las precipitaciones. Fuente: CIIFEN (2015).

Los episodios de La Niña, al igual que los episodios El Niño, producen cambios a gran escala en los vientos atmosféricos sobre el Océano Pacífico, incluyendo un incremento en la intensidad de los vientos alisios del Este (Este-Oeste) en la atmósfera baja sobre la parte oriental del océano Pacífico en Sudamérica, y de los vientos del oeste en la atmósfera superior. El fenómeno La Niña puede durar de 9 meses a 3 años y según su intensidad se clasifica en débil, moderado y fuerte.

De acuerdo a los registros de NOAA, los eventos La Niña de mayor duración han sido los ocurridos en 1954-1956 y en 1998-2001, siendo este último de 2 años, 9 meses de duración. Es más fuerte mientras menor es su duración y su mayor impacto en las

condiciones meteorológicas se observa en los primeros 6 meses de vida del fenómeno. Se presenta con menos frecuencia que El Niño y se dice que ocurre cada 3 a 7 años.

En Argentina, el fenómeno de La Niña está asociado a sequías severas y extremas afectando considerablemente a las actividades agropecuarias (Barros y Silvestri, 2002; Cicero et al., 2007; Fernández Long et al., 2011).

RELACIONES ENTRE LA OCURRENCIA DE EPISODIOS EL NIÑO-LA NIÑA Y LOS EXTREMOS HÍDRICOS

El Niño-La Niña son los responsables de gran parte de la variabilidad climática mundial, eventos que poseen dos componentes del sistema climático intrínsecamente relacionados: atmósfera y océano. Los siguientes son algunos ejemplos de la variabilidad causada por las complejas interacciones existentes entre la atmósfera y los océanos con sus efectos sobre los continentes. Sequías severas en el África, veranos excepcionalmente cálidos y secos en Norteamérica, desastres generados en la India por los monzones, incremento excepcional de las precipitaciones en la costa norte del Perú que permite la transformación de zonas desérticas en pastizales y variaciones importantes de la temperatura del mar, que provocan la migración de gran variedad de peces en el mar peruano. El estudio de las interrelaciones existentes entre las sequías y los fenómenos océano-atmosféricos de carácter global permitirá comprender mejor esos procesos y desarrollar estrategias de planificación y mitigación de sus efectos negativos.

En Australia se ha evidenciado una correlación entre la Oscilación del Sur y la temperatura del mar, con precipitaciones e indicadores de sequía, relaciones que pueden ser usadas en la predicción de la precipitación con varios meses de anticipación (Chiew et al., 1998).

Diversos estudios indican conexión entre las anomalías de las temperaturas del océano Pacífico ecuatorial y la variabilidad alrededor del mundo. La mayor parte de las anomalías observadas en la zona intertropical y una parte significativa de la variabilidad del resto del mundo está relacionada con el ENOS. Son diversos los trabajos que han

estudiado la influencia del ENOS sobre los regímenes de precipitación y caudales en distintas regiones del planeta (Herzer et al., 2004).

En Argentina, El Niño se ha manifestado de forma catastrófica, originando fuertes precipitaciones, inundaciones, daños a la infraestructura edilicia, vial, rural y urbana a lo que se suma pérdidas de vidas (Barros y Silvestri, 2002; Herzer et al., 2004). El Niño está asociado principalmente con un incremento anómalo de las precipitaciones en la región pampeana, central y toda la Mesopotamia mientras que La Niña se asocia a la ocurrencia de sequías (Hurtado et al., 2005; Fernández Long et al., 2011; Jozami et al., 2017). También se le ha asociado con sequías en la zona sur patagónica (Forquera et al., 2016). Resulta importante determinar la relación entre la ocurrencia de eventos hídricos extremos asociados al ENSO y la variabilidad de los índices agroclimáticos para extremos hídricos.

HIPÓTESIS

La utilización de los índices de sequías PDSI y SPI permitirá detectar, evaluar y pronosticar las sequías y excesos hídricos e identificar geográficamente sus potenciales efectos adversos en las actividades económicas de las principales regiones agroproductoras del país.

OBJETIVOS GENERAL

Desarrollar un sistema operativo para la detección, evaluación y pronóstico de los extremos hídricos mediante el uso de información terrestre para todo el territorio nacional.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obtener una valoración cuantitativa de la ocurrencia de sequías y excesos hídricos históricos a través de los índices PDSI y SPI en una cartografía adecuada.
- Pronosticar la ocurrencia e intensidad de las sequías y los excesos hídricos mediante redes neuronales considerando los índices PDSI y SPI.
- Determinar la variabilidad geográfica de la intensidad y distribución de las sequías y excesos hídricos y su relación con la ocurrencia de El Niño y La Niña.

CAPÍTULO 2

MATERIAL y MÉTODOS

MATERIAL y MÉTODOS

ÁREA DE ESTUDIO: CARACTERÍSTICAS GEOGRÁFICAS, CLIMÁTICAS Y SOCIO-ECONÓMICAS

El área de estudio seleccionada corresponde al territorio nacional de Argentina, excepto las islas Malvinas. El país se dividió en cinco regiones (Figura 2.1) con características climáticas específicas para sus localidades y estaciones comprendidas y se eligió a una o varias estaciones meteorológicas para cada región. Las estaciones meteorológicas seleccionadas en cada región tienen registros de más de treinta años y estas fueron: Salta en la región noroeste (NOA); Resistencia, Chaco en la región noreste (NEA); Río Cuarto, Rosario y Tres Arroyos, en la región pampeana (RP); Mendoza en la región de Cuyo (RC); Trelew y Bariloche en la región Patagónica (RPA). Estas estaciones se utilizaron para detectar, evaluar y pronosticar los extremos hídricos.

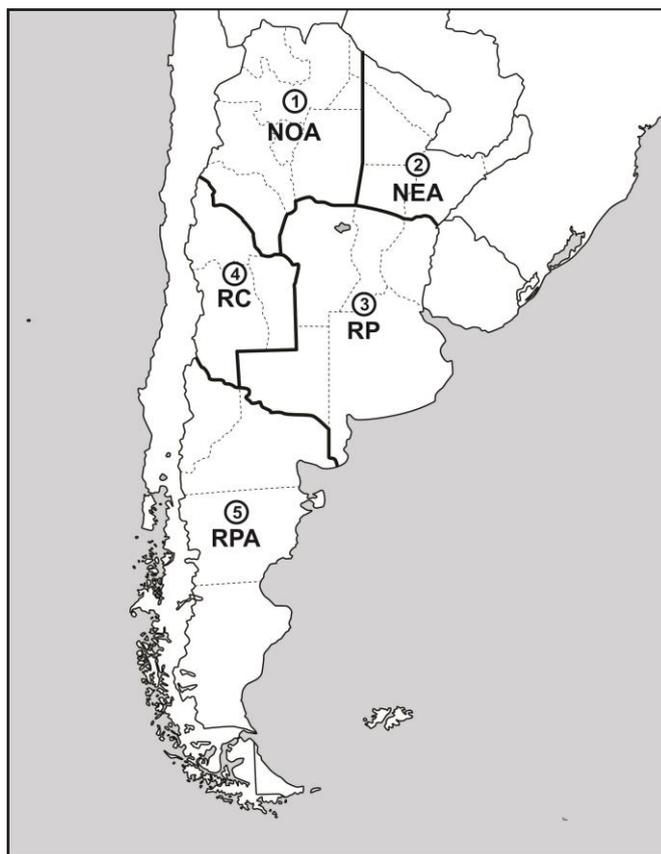


Figura 2.1 Subregiones de Argentina: Noroeste Argentino (NOA: 1); Noreste Argentino (NEA: 2); Región Pampeana (RP: 3); Región de Cuyo (RC: 4) y Región Patagónica (RPA: 5). Fuente: <http://mxmedia.com.ar/capacitacion/practicas/wordAvanzado/Regiones.pdf>

REGIÓN NOROESTE (NOA)

La región noroeste de Argentina incluye a las provincias de Jujuy, Salta, Tucumán, Catamarca, La Rioja, Santiago del Estero y una porción oeste de Formosa y Chaco.

Esta región es afectada por frecuentes sequías y excesos hídricos que impactan negativamente la importante producción hortícola que abastece gran parte del país, como son: tomates, pimientos y porotos; los cultivos regionales como la palta, olivo, nogales y las plantas aromáticas; así como cultivos extensivos de secano principalmente la caña de azúcar y soja y pasturas naturales y cultivadas. Estas adversidades climáticas afectan las economías regionales en todos sus aspectos agropecuarios.

Según la posición geofísica y la altura se pueden observar diferentes tipos de climas, como por ejemplo las selvas montañosas presentan un clima más húmedo y lluvioso con temperaturas templadas, mientras que la Puna es más fría y seca. Los vientos del este descargan su humedad sobre las laderas orientales del cordón serrano en Salta y Jujuy, resultando un clima cálido subtropical serrano con abundantes precipitaciones. Los vientos pasan más secos hacia oeste dando como resultado climas más áridos en las laderas occidentales del cordón serrano y en la Puna. La primavera-verano es la época de lluvias y calor extremo, con una media anual de 700-900 mm, que se concentra en el semestre cálido y presentan una fuerte variabilidad interanual, periodo 1934-1990, (Bianchi y Cravero, 2010). La temperatura media anual es de 23°C, con registros extremos de hasta 50°C en verano y heladas en invierno. Este gran contraste térmico es característico de la región y tiene que ver con la topografía y la altura. La temperatura media más alta corresponde al mes de enero 27,3°C y la más baja al mes de julio 3,4°C. La evapotranspiración es mayor a 1300 mm con déficit hídrico mayores a los 600 mm en los meses más cálidos.

En la localidad de Salta, la temperatura media enero es de 21,2°C y precipitación media de 182 mm y en julio 10,1°C y 3,5 mm, (Geografianoa, 2010)

(<http://Geografiadelnoa.blogspot.com/2010/11/datos-generales.html>;
<http://inta.gob.ar/documentos/las-precipitaciones-del-noroeste-argentino-periodo-1934-1990/>).

REGIÓN NORESTE (NEA)

La región noreste incluye a la porción oriental de Formosa y Chaco, a Corrientes y Misiones y la parte norte de Santa Fe, donde los efectos de las sequías y excesos hídricos sobre la producción agrícola y forestal adquieren mayor relevancia dado que los cultivos industriales como la yerba mate, te y frutales de cítricos representan la principal actividad económica regional. También son importantes, en menor escala, los cultivos de soja, maíz, sorgo, arroz y pasturas naturales y cultivadas para la actividad ganadera principalmente. Fuente: (http://mininterior.gov.ar/municipios/gestión/regiones_archivos/NEA.pdf).

El clima es subtropical durante casi todo el año, de tipo sub-húmedo-húmedo con veranos cálidos y húmedos hacia el norte e inviernos templados y secos hacia el oeste. Con un régimen pluviométrico de alrededor de 1300 mm anuales en Resistencia, Chaco, las temperaturas medias anuales inferiores a 20°C con amplitudes térmicas entre 13°C y 14°C. Pueden ocurrir heladas por la invasión de alguna masa polar sobre el territorio (APA, 2010), periodo 1960-2000.

REGIÓN PAMPEANA (RP)

La región pampeana incluye a las provincias de Buenos Aires, Córdoba, Entre Ríos, La Pampa y centro-sur de Santa Fe, donde los efectos de las sequías y excesos hídricos sobre la producción agrícola adquieren mayor relevancia económica dada la gran superficie con cultivos de secano como maíz, trigo y sorgo, las oleaginosas soja y girasol, y las pasturas naturales y cultivadas como alfalfa para la producción ganadera de carne y leche.

La región pampeana tiene predominantemente un clima templado-húmedo con una temperatura media de 16 a 18°C y las precipitaciones disminuyen de este a oeste entre 1200 mm a 600 mm.

El clima de Rosario, en Santa Fe es considerado templado pampeano, húmedo debido a la cercanía al río Paraná, con temperaturas moderadas la mayor parte del año. La temperatura media anual es de alrededor de 17°C, siendo el mes de enero el mes más cálido con una temperatura media de 24°C aproximadamente. Junio y julio son los meses más frescos con promedios de 10°C a 11°C. La humedad relativa media es de 76%, con picos superiores a 80% durante los meses de abril a julio. La precipitación media es aproximadamente de unos 1000 mm anuales. Se reparten de forma bastante regular a lo largo del año, con un régimen de precipitaciones isohigro aunque en los meses de diciembre a marzo llueve con mayor intensidad.

La localidad de Río Cuarto se encuentra hacia el sudoeste de la provincia de Córdoba, tiene un clima templado. Los veranos suelen ser calurosos durante el día, pero con noches templadas. Los inviernos, por su parte, son frescos y con noches muy frías. La temperatura media anual es de alrededor de los 18°C, con una amplitud térmica bastante considerable; desde los 35°C en muchos días de verano (diciembre-febrero) hasta los 2°C de alguna noche de invierno (junio-agosto). Enero es el mes más caluroso con una temperatura media de 24°C. Las temperaturas más extremas registradas en Río Cuarto son de -10,6°C y 45,3°C. Las precipitaciones anuales pueden ir desde los 700 mm a los 900 mm y se concentran principalmente durante los meses de verano. El mes más lluvioso es enero, con una precipitación media de 140 mm.

La localidad de Tres Arroyos se encuentra en el sudoeste de la provincia de Buenos Aires y presenta un régimen hídrico húmedo-sub-húmedo, con nula o pequeña deficiencia hídrica e influencia oceánica, lo que incidió en la formación de los suelos y de la vegetación de la zona. La precipitación media anual 760 mm y máximas que oscila entre 950 mm y 1000 mm, siendo los meses más lluviosos enero, febrero y marzo y el trimestre más seco, junio, julio y agosto, período 1938 a 2016. La temperatura media anual es de 14,9°C (INTA, 2019b). El período medio libre de heladas abarca desde principios de

octubre a mediados de mayo, período analizado 1950-2012 (Fernández Long y Barnatán, 2013; Fernández Long et al., 2005).

REGIÓN DE CUYO (RC)

La región de Cuyo incluye a las provincias de San Juan, Mendoza y San Luis, siendo las dos primeras vitivinícolas por excelencia y donde los efectos de las sequías y excesos hídricos sobre la producción agrícola adquieren mayor relevancia. Posee un clima seco e inviernos fríos ideal para el desarrollo de la vid, además de otros cultivos hortícolas bajo riego como tomates, pimientos, berenjenas, cebollas que abastecen al mercado nacional y pasturas naturales y cultivadas para la producción ganadera. En esta región predominan las condiciones de aridez lo que determina que se realice una agricultura con riego.

La provincia de Mendoza se encuentra en una franja árida con un régimen térmico templado-cálido y con precipitaciones escasas. Se caracteriza por poseer un déficit pluviométrico permanente con amplitudes térmicas anuales elevadas, baja humedad del aire y con elevada evapotranspiración potencial. La precipitación media anual es de alrededor de 213 mm, con gran variabilidad interanual muy heterogéneas en el espacio y en el tiempo. La mayor cantidad ocurre en verano y de altas intensidades (Capitanelli, 2005). La estación meteorológica de Mendoza se encuentra localizada en el centro norte de la provincia a los 32°50' S y 68°47' W a 704 m de altura sobre el nivel del mar. Tiene un clima desértico de tipo BWk según la clasificación de Köppen. La temperatura media anual es de 16,2°C con temperaturas promedios del mes más caluroso, enero de 24,0°C. y frío de 6,1°C. <http://es/climate/-data-org/america-del-sur/argentina/mendoza/mendoza/>.

REGIÓN PATAGÓNICA (RPA)

La región patagónica incluye a las provincias de Neuquén, Río Negro, Chubut, Santa Cruz y Tierra del Fuego, en su gran mayoría presenta condiciones áridas y frías donde los efectos de las sequías y excesos hídricos sobre la producción de pasturas adquieren mayor relevancia para el ganado ovino principalmente y el cultivo de frutales bajo riego en determinados valles en Río Negro y Neuquén.

La región Patagonia se subdivide en dos grandes subregiones climáticas, la occidental o andina en torno a la cordillera de los Andes donde la precipitación es en forma de nieve principalmente desde abril a octubre y va de 500 a 2000 mm con un gradiente abrupto de oeste a este. En Bariloche la temperatura media de enero y julio son: 14,3°C y 2,1°C y la precipitación mensual 22 mm y 129 mm, respectivamente.

El clima de la Patagonia oriental es semiárido con zonas desertificadas por sobrepastoreo, los inviernos son gélidos con precipitaciones de tipo nival y temperaturas medias anuales de 10 a 15°C, con heladas frecuente y precipitaciones de 200 a 400 mm. En el extremo sur de la Patagonia la temperatura media es inferior a 5°C y las precipitaciones de 300 mm. Fuente: <http://patagonia-ffg.blogspot.com/p/clima.html>.

El clima de Trelew es desértico tipo BWk según la clasificación de Köppen, con una temperatura media anual de 13,5°C y precipitación total anual de 186 mm, con temperaturas promedios del mes más caluroso, enero de 20,6°C. y frío de 6,0°C, Fuente: <http://es/climate//-data-org/america-del-sur/argentina/chubut/trelew-3649/>.

DATOS METEOROLÓGICOS, CLIMATOLÓGICOS Y AGRO-ECONÓMICOS

La información meteorológica, climática y agro-económica fue obtenida de varias instituciones oficiales a nivel provincial y nacional: Servicio Meteorológico Nacional (SMN), Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA); Ministerio de Agro industria de la Nación (MAGyP), Bolsa de Cereales Córdoba (BCC), Bolsa Cereales de Buenos Aires (BCB); Bolsa Cereales de Rosario (BCR); Guía Estratégica para el Agro (GEA) de la Bolsa de Comercio de Rosario, etc. La información meteorológica proveniente del SMN se utilizó para el cálculo de los índices de sequía de Palmer (PDSI) y el índice estandarizado de precipitación (SPI) para períodos de tres y doce meses.

INFORMACIÓN METEOROLÓGICA

Se utilizó información meteorológica mensual perteneciente a la red de estaciones meteorológicas del SMN de la República Argentina (Tabla 2.1). Las variables utilizadas

fueron la precipitación diaria y mensual desde el año 1970 hasta 2019 y evapotranspiración media mensual según Thornthwhite y Mather (1957). Esta información proviene de 95 estaciones distribuidas en todo el territorio nacional (Figura 2.2) para elaborar mapas de sequías de cada uno de los índices.

Tabla 2.1. Estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional, identificación internacional de la Organización Meteorológica Mundial y SMN, coordenadas de latitud, longitud, altitud m.s.n.m. (Ordenadas alfabéticamente por provincia)

Estación	Latitud	Longitud	Altura	Provincia	No OMM	No SMN
BAHIA BLANCA AERO	-38,73	-62,17	83	BUENOS AIRES	87750	221
TRES ARROYOS	-38,33	-60,25	115	BUENOS AIRES	87688	490
CORONEL PRINGLES AERO	-38,02	-61,33	247	BUENOS AIRES	87683	562
MAR DEL PLATA AERO	-37,93	-57,58	21	BUENOS AIRES	87692	210
BENITO JUAREZ AERO	-37,72	-59,78	207	BUENOS AIRES	87649	8
PIGUE AERO	-37,60	-62,38	304	BUENOS AIRES	87679	206
CORONEL SUAREZ AERO	-37,43	-61,88	233	BUENOS AIRES	87637	204
TANDIL AERO	-37,23	-59,25	175	BUENOS AIRES	87645	311
OLAVARRIA AERO	-36,88	-60,22	166	BUENOS AIRES	87643	531
AZUL AERO	-36,83	-59,88	147	BUENOS AIRES	87641	565
DOLORES AERO	-36,35	-57,73	9	BUENOS AIRES	87648	190
BOLIVAR AERO	-36,20	-61,07	94	BUENOS AIRES	87640	544
LAS FLORES AERO	-36,03	-59,13	36	BUENOS AIRES	87563	546
PEHUAJO AERO	-35,87	-61,90	87	BUENOS AIRES	87544	456
NUEVE DE JULIO	-35,45	-60,88	76	BUENOS AIRES	87550	178
LA PLATA AERO	-34,97	-57,90	19	BUENOS AIRES	87593	450
EZEIZA AERO	-34,82	-58,53	20	BUENOS AIRES	87576	166
EL PALOMAR AERO	-34,60	-58,60	12	BUENOS AIRES	87571	159
JUNIN AERO	-34,55	-60,92	81	BUENOS AIRES	87548	453
MARIANO MORENO AERO	-34,55	-58,82	32	BUENOS AIRES	87572	48
SAN MIGUEL	-34,55	-58,73	26	BUENOS AIRES	87569	154
BUENOS AIRES	-34,58	-58,48	25	C. FEDERAL	87585	156
AEROPARQUE AERO	-34,57	-58,42	6	C. FEDERAL	87582	332
CATAMARCA AERO	-28,60	-65,77	454	CATAMARCA	87222	44
TINOGASTA	-28,07	-67,57	1201	CATAMARCA	87211	65
RESISTENCIA AERO	-27,45	-59,05	52	CHACO	87155	489
PCIA. ROQUE SAENZ PEÑA AERO	-26,82	-60,45	92	CHACO	87149	34
COMODORO RIVADAVIA AERO	-45,78	-67,50	46	CHUBUT	87860	270
TRELEW AERO	-43,20	-65,27	43	CHUBUT	87828	258
ESQUEL AERO	-42,93	-71,15	797	CHUBUT	87803	303
PUERTO MADRYN AERO	-42,73	-65,07	136	CHUBUT	87823	561
LABOULAYE AERO	-34,13	-63,37	137	CORDOBA	87534	148
RIO CUARTO AERO	-33,12	-64,23	421	CORDOBA	87453	138
MARCOS JUAREZ AERO	-32,70	-62,15	114	CORDOBA	87467	369
VILLA DOLORES AERO	-31,95	-65,13	569	CORDOBA	87328	117
PILAR OBS.	-31,67	-63,88	338	CORDOBA	87349	111
CORDOBA OBSERVATORIO	-31,40	-64,18	425	CORDOBA	87345	105
CORDOBA AERO	-31,32	-64,22	474	CORDOBA	87344	100

VILLA MARIA DEL RIO SECO	-29,90	-63,68	341	CORDOBA	87244	82
MONTE CASEROS AERO	-30,27	-57,65	54	CORRIENTES	87393	87
PASO DE LOS LIBRES AERO	-29,68	-57,15	70	CORRIENTES	87289	346
ITUZAINGO	-27,58	-56,67	72	CORRIENTES	87173	522
CORRIENTES AERO	-27,45	-58,77	62	CORRIENTES	87166	470
GUALEGUAYCHU AERO	-33,00	-58,62	21	ENTRE RIOS	87497	134
PARANA AERO	-31,78	-60,48	78	ENTRE RIOS	87374	113
CONCORDIA AERO	-31,30	-58,02	38	ENTRE RIOS	87395	477
FORMOSA AERO	-26,20	-58,23	60	FORMOSA	87162	483
LAS LOMITAS	-24,70	-60,58	130	FORMOSA	87078	11
JUJUY AERO	-24,38	-65,08	905	JUJUY	87046	500
LA QUIACA OBS.	-22,10	-65,60	3459	JUJUY	87007	1
SANTA ROSA AERO	-36,57	-64,27	191	LA PAMPA	87623	192
GENERAL PICO AERO	-35,70	-63,75	145	LA PAMPA	87532	334
CHEPES	-31,33	-66,60	658	LA RIOJA	87322	102
CHAMICAL AERO	-30,37	-66,28	461	LA RIOJA	87320	476
LA RIOJA AERO	-29,38	-66,82	429	LA RIOJA	87217	77
CHILECITO AERO	-29,23	-67,43	945	LA RIOJA	87213	31
MALARGUE AERO	-35,50	-69,58	1425	MENDOZA	87506	179
SAN RAFAEL AERO	-34,58	-68,40	748	MENDOZA	87509	325
MENDOZA OBSERVATORIO	-32,88	-68,85	827	MENDOZA	87420	132
MENDOZA AERO	-32,83	-68,78	704	MENDOZA	87418	131
OBERA AERO	-27,48	-55,13	303	MISIONES	87187	556
POSADAS AERO	-27,37	-55,97	125	MISIONES	87178	362
BERNARDO DE IRIGOYEN AERO	-26,25	-53,65	815	MISIONES	87163	523
IGUAZU AERO	-25,73	-54,47	270	MISIONES	87097	353
CHAPELCO AERO	-40,08	-71,13	779	NEUQUEN	87761	525
NEUQUEN AERO	-38,95	-68,13	271	NEUQUEN	87715	227
EL BOLSON AERO	-41,97	-71,52	337	RIO NEGRO	87800	158
MAQUINCHAO	-41,25	-68,73	888	RIO NEGRO	87774	248
BARILOCHE AERO	-41,15	-71,17	840	RIO NEGRO	87765	323
VIEDMA AERO	-40,85	-63,02	7	RIO NEGRO	87791	501
SAN ANTONIO OESTE AERO	-40,78	-65,10	20	RIO NEGRO	87784	560
RIO COLORADO	-39,02	-64,08	79	RIO NEGRO	87736	229
SALTA AERO	-24,85	-65,48	1221	SALTA	87047	12
ORAN AERO	-23,15	-64,32	357	SALTA	87016	339
TARTAGAL AERO	-22,65	-63,82	450	SALTA	87022	326
SAN JUAN AERO	-31,57	-68,42	598	SAN JUAN	87311	495
JACHAL	-30,23	-68,75	1175	SAN JUAN	87305	86
VILLA REYNOLDS AERO	-33,73	-65,38	486	SAN LUIS	87448	335
SAN LUIS AERO	-33,27	-66,35	713	SAN LUIS	87436	139
RIO GALLEGOS AERO	-51,62	-69,28	19	SANTA CRUZ	87925	293
EL CALAFATE AERO	-50,27	-72,05	204	SANTA CRUZ	87904	571
SAN JULIAN AERO	-49,32	-67,78	62	SANTA CRUZ	87909	285
GOBERNADOR GREGORES AERO	-48,78	-70,17	358	SANTA CRUZ	87880	283
PUERTO DESEADO AERO	-47,73	-65,92	80	SANTA CRUZ	87896	280
PERITO MORENO AERO	-46,52	-71,02	429	SANTA CRUZ	87852	272
VENADO TUERTO	-33,67	-61,97	112	SANTA FE	87468	551
ROSARIO AERO	-32,92	-60,78	25	SANTA FE	87480	133
EL TREBOL	-32,50	-61,67	96	SANTA FE	87470	552
SAUCE VIEJO AERO	-31,70	-60,82	18	SANTA FE	87371	451
CERES AERO	-29,88	-61,95	88	SANTA FE	87257	81

RECONQUISTA AERO	-29,18	-59,70	53	SANTA FE	87270	309
SANTIAGO DEL ESTERO AERO	-27,77	-64,30	199	SGO DEL ESTERO	87129	62
USHUAIA AERO	-54,80	-68,32	57	T. DEL FUEGO	87938	548
RIO GRANDE B.A.	-53,80	-67,75	22	T. DEL FUEGO	87934	296
TUCUMAN AERO	-26,85	-65,10	450	TUCUMAN	87121	17

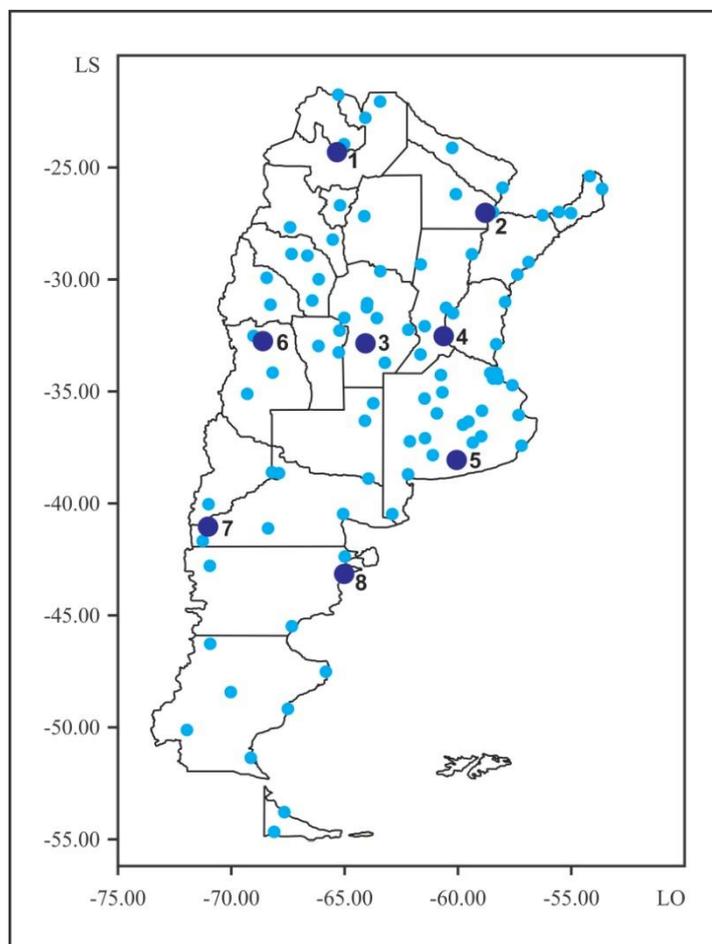


Figura 2.2. Ubicación geográfica de la red estaciones meteorológicas SMN y numeradas las estaciones seleccionadas: Salta (1), Resistencia (2), Río Cuarto (3), Rosario (4), Tres Arroyos (5), Mendoza (6), Bariloche (7) y Trelew (8).

ÍNDICES DE EXTREMOS HÍDRICOS

De todas las estaciones mencionadas en Tabla 2.1, el SOS selecciona 95 estaciones, debido a que las mismas presentan archivos de precipitación mensuales completos e ininterrumpidos desde 1970 hasta 2019, para elaborar los índices PDSI y SPI. En el cálculo del PDSI se utiliza la evapotranspiración potencial media (1985-2010).

ÍNDICE DE SEVERIDAD DE SEQUÍA DE PALMER (PDSI)

El PDSI (Palmer, 1965) es calculado a partir de un balance hídrico seriado mensual, usando registros de precipitación mensual y evapotranspiración potencial media mensual. El almacenamiento de agua en el suelo es obtenido de la siguiente forma: el suelo es dividido en dos capas, no definidas en profundidad sino por su capacidad de retención hídrica. Se considera que en la capa superficial se pueden almacenar hasta 25 mm. En la capa sub-superficial la cantidad de agua que se puede almacenar es la capacidad de almacenamiento (CA) de todo el perfil del suelo menos 25 mm que se puede almacenar solo en la primera capa. La humedad no puede ser removida de la capa sub-superficial hasta que toda la humedad de la capa superficial haya sido removida. La evapotranspiración potencial (ETP) fue calculada por el método de Thornthwaite y Mather (1957) pero puede ser estimada por cualquier otro método. Las pérdidas de humedad del suelo para satisfacer la demanda de la ETP ocurren solamente si la ETP es mayor que la precipitación (P) del mes. Las pérdidas por ETP de la capa superficial (Ls) se asume que toma lugar en forma potencial. Las pérdidas por ETP de la capa sub-superficial (Lu) dependen del contenido de humedad inicial en la capa sub-superficial, la magnitud de ETP y del almacenamiento de agua de la capa sub-superficial. Los detalles del cálculo del PDSI se presentan en el Anexo 1.

Las series de precipitación mensual fueron sometidas a control de calidad respecto a continuidad, consistencia, magnitud, variabilidad y confiabilidad. Para esto se utilizaron métodos gráficos y estadísticos particularmente la desviación estándar para controlar la variabilidad y magnitud de los datos de cada serie (SMN, 2018; 1992). Se utilizaron sólo series completas y continuas de todas las estaciones meteorológicas del SMN y no fueron consideradas aquellas con datos faltantes. Las series temporales de datos de precipitación fueron desarrolladas a partir de los registros de 95 estaciones (son las remanentes luego de eliminar estaciones con problemas de confiabilidad) correspondientes al período que va desde 1980 hasta 2018. Se presentan resultados de índices para 1971-2019 para algunas estaciones

Para representar las condiciones pronosticadas del índice PDSI mensual se utilizó una paleta de colores. La paleta del PDSI utilizada consta de siete colores que identifican a cada categoría según el grado de sequedad o humedad tal como se indica en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Categorías de Pronóstico según los valores del índice PDSI y la paleta de colores.

	Categorías Pronóstico	PDSI	Color	
1	Sequias extrema	-3 o inferior	Rojo	
2	Sequias severa	-2 a -3	Marrón	
3	Sequias moderada	-1 a -2	Crema oscuro	
4	Normal	-1 a 1	Amarillo	
5	Humedad moderada	1 a 2	Verde claro	
6	Humedad excesiva	2 a 3	Verde intermedio	
7	Humedad extrema	3 o más	Verde oscuro	

ÍNDICE ESTANDARIZADO DE PRECIPITACIÓN (SPI)

El SPI (McKee, 1993) utiliza la función gamma para ajustar la distribución de probabilidades de las series de precipitaciones, ya que según Thom (1971) y Young (1992) la distribución de probabilidades gamma es la función que mejor ajusta las series de precipitación. Detalles sobre el cálculo del SPI se presentan en el Anexo 1. El SPI de tres y doce meses se representaron con nueve categorías según McKee (1993), que van desde sequías extremas color rojo a humedad extrema, color verde oscuro. En las categorías intermedias como 4 o sequía incipiente y la 3 o sequía moderada se usó el mismo color crema. Las categorías 5 o normal y 6 o humedad incipiente se representaron en un solo color amarillo (Tabla 2.3).

Tabla 2.3 Categorías pronosticadas, valores de los SPI3 y SPI12 y paleta de colores.

	Categorías Pronóstico	SPI3 y SPI12	Color	
1	Sequias extrema	-10 a -2	Rojo	
2	Sequias severa	-2 a -1,5	Marrón	
3	Sequias moderada	-1,5 a -1	Crema	
4	Sequias incipiente	-1 a -0,5	Crema	
5	Normal	-0,5 a 0,5	Amarillo	
6	Humedad incipiente	0,5 a 1	Amarillo	
7	Humedad moderada	1 a 1,5	Verde claro	
8	Humedad excesiva	1,5 a 2	Verde intermedio	
9	Humedad extrema	2 a 10	Verde oscuro	

PRONÓSTICO DE LOS ÍNDICES DE EXTREMOS HÍDRICOS MEDIANTE REDES NEURONALES

Las tareas previa a realizar a los fines de obtener los pronósticos mensuales para cada estación meteorológica es la de actualizar de manera mensual los archivos de datos de los tres índices para cada estación de la red (Tabla 2.1) como ejemplo se toma Resistencia. Los valores o índices mensuales de PDSI, SPI3 y SPI12 de Resistencia fueron calculados por el programa SOS de forma mensual (CREAN ,2017). Una detallada descripción metodológica para los dos índices se presenta en el Anexo I. Los archivos de datos que se confeccionaron, fueron utilizados para realizar el entrenamiento de las RN para las 95 estaciones en una primera etapa desde 1970 o 1980 hasta 2016 según la disponibilidad de datos históricos de cada estación y luego para realizar los pronósticos hasta 2019.

Las tareas realizadas se detallan a continuación:

- 1- Preparación de las bases de datos de 95 estaciones meteorológicas (Tabla 2.1)
- 2- Entrenamiento de las RN para los índices PDSI y SPI
- 3- Cálculo de los pronósticos de los índices mediante redes neuronales
- 4- Análisis y evaluación de los mapas e índices pronosticados

El programa empleado para el desarrollo y entrenamiento de las RN y cálculo del pronóstico fue el NeuroSolutions v4.0, utilizando el perceptron multicapa (MLP), de tres capas para los índices PDSI, SPI3 y SPI12 de la localidad de Resistencia. Como entrada el programa requiere un archivo individual de la estación Resistencia para los tres índices, confeccionado previamente con los valores mensuales de salida del SOS. Luego el programa NeuroSolutions v.0 selecciona a la RN entrenada de Resistencia y le pide como entrada el archivo actualizado de Resistencia y hace el cálculo, salida del pronóstico para Resistencia a uno, dos y tres meses (Anexo2: Procedimiento y Cálculo de los Pronósticos).

A fin de acelerar los procesos de aprendizaje de la red neuronal, es recomendable que a los datos de entrada se les realice un pre-procesamiento o normalización. Para realizar esta tarea de normalización se aplicó la siguiente ecuación (2.1):

- Transformación lineal entre [0, 1]:

$$X^n = \frac{(X_o - X_{min})}{(X_{max} - X_{min})} \quad \text{Lapedes y Farber (1987)} \quad (2.1)$$

Donde:

X_o representan los datos sin procesar y X^n los datos normalizados

X_{min} , X_{max} , representan el mínimo, máximo respectivamente.

La elección de los pesos y desvíos influyen en lograr que la red llegue a encontrar el óptimo global o no, así como en la rapidez de convergencia. Debido a las características de las funciones de activación, es necesario evitar que los pesos iniciales hagan próxima a cero las activaciones o sus derivadas, por lo cual, los pesos y desvíos iniciales no deben de ser muy grandes, para evitar que las neuronas se saturen y su derivada sea cero; ni muy bajas, para evitar activaciones próximas a cero (Nguyen y Widrow, 1990).

El algoritmo de Nguyen y Widrow ha sido utilizado en la inicialización de los pesos y desvíos de las redes neuronales desarrolladas en el presente estudio. Este algoritmo asume que los pesos se ajustan dividiendo la región a predecir en pequeñas zonas. Por lo que, para acelerar la convergencia de proceso, se asigna desde el principio a cada uno de los pesos su propio intervalo de inicio del entrenamiento. Estos intervalos individuales se superponen ligeramente y durante el proceso de entrenamiento se va reajustando su rango de acción. Detalles sobre el entrenamiento, la validación y utilización de las RN se presentan en el Anexo 2.

Una vez entrenadas y validadas las RN para las estaciones meteorológicas representativas de cada región se procedió a pronosticar los valores de PDSI y SPI para uno, dos y tres meses posteriores al mes de inicio. Los valores pronosticados para cada localidad y mes fueron interpolados con la metodología Krigging del programa IDRISI (Eastman, 2015) y representados en mapas.

Se elaboraron mapas mensuales de los índices PDSI y SPI pronosticados para cada uno de los meses analizados con sus respectivas condiciones de sequías y/o excesos. Para

representar las condiciones pronosticadas del índice PDSI mensual se utilizó la paleta de colores de la Tabla 2.2, mientras que para los índices SPI3 y SPI12 se empleó la paleta de colores presentada en la Tabla 2.3.

PRECISIÓN DE LOS PRONÓSTICOS

El comportamiento de la red neuronal se evaluó comparando los valores generados luego del proceso de entrenamiento con los valores observados, mediante coeficientes estadísticos. Estos coeficientes permitieron definir criterios para la realización y finalización del proceso de entrenamiento y establecer comparaciones entre distintas redes neuronales. Los coeficientes estadísticos empleados fueron:

- Coeficiente de Determinación R^2 (Coefficient of determination) (Dawson y Wilby, 1998; 2001).

El coeficiente de determinación también es conocido como R^2 y calculado como el cuadrado de la correlación de Pearson r . En el caso de datos emparejados, esta es una medida de la proporción de la varianza compartida por las dos variables y varía entre 0 a 1. R^2 es la proporción de la varianza en la variable dependiente que es predecible a partir de la variable independiente (ecuación 2.2). Así, por ejemplo, con un r de 0,20 el coeficiente de determinación es 0,04 lo que significa que el 4 % de la varianza de cualquiera de las variables se comparte con la otra variable.

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (\text{Obs}.i - \bar{\text{Obs}}.) (\hat{\text{Pron}}.i - \bar{\text{Pron}}.)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\text{Obs}.i - \bar{\text{Obs}}.)^2 \sum_{i=1}^n (\hat{\text{Pron}}.i - \bar{\text{Pron}}.)^2}} \right]^2 \quad (2.2)$$

Donde:

Obs.i = valores observados

$\bar{\text{Obs}}$. = valores medios observados

$\hat{\text{Pron}}.i$ = valores pronosticados

$\bar{\text{Pron}}$. = valores medios pronosticados

n = número de casos

Se estableció como un criterio de aceptación para el entrenamiento de RN, que el coeficiente de determinación obtenido entre los datos observados y pronosticados de cada estación debería ser igual o mayor al 0,85 para ser aceptada como red neuronal entrenada.

- Índice de medida de acuerdo d (index of agreement measure)

El índice de medida de acuerdo d (ecuación 2.3) ha sido propuesto por Legates y McCabe (1999) como una posible alternativa, pero aún es sensible a valores extremos, debido al uso de diferencias al cuadrado. También se han descrito versiones modificadas de d que se ajustan en la línea de base (ajustadas a las series de tiempo con las que se compara el modelo) y se adaptan de diferencias cuadradas absolutas. La adaptación reduce la sensibilidad de estas medidas a los valores atípicos.

Para el cálculo de d para valores de índices observados y pronosticados se utiliza la siguiente ecuación:

$$d = \frac{\sum_{i=1}^n (\text{Obs}.i - \hat{\text{Pron}}.i)^2}{\sum_{i=1}^n (|\hat{\text{Pron}}.i - \bar{\text{Obs}}.| + |\text{Obs}.i - \bar{\text{Obs}}.|)^2} \quad (2.3)$$

Donde:

Obs.i = valores observados

$\bar{\text{Obs}}.$ = valores medios observados

$\hat{\text{Pron}}.i$ = valores pronosticados

n = número de casos

- Raíz de error cuadrático medio RMSE (Root Mean Squared Error)

La raíz del error cuadrático medio (RMSE) es un indicador de los errores de pronóstico y se puede definir como la raíz cuadrada del valor medio de los cuadrados de las diferencias entre los valores calculados y observados (Kobayashi y Salam, 2000). Un RMSE bajo implica un comportamiento adecuado del modelo con pequeños errores entre valores observados y pronosticados. Se calculó de la siguiente manera:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(e_i)^2}{n}} \quad (2.4)$$

Donde:

e_i = diferencia o error entre los valores observados y pronosticados

n = número de casos.

- Error absoluto medio = MAE (Mean Absolute Error)

El error medio absoluto (MAE) mide la magnitud media de los errores en un conjunto de predicciones, sin considerar su dirección. Es el promedio sobre la muestra de prueba de las diferencias absolutas entre los valores pronosticados y observados reales, donde todas las diferencias individuales tienen el mismo peso (Dawson y Wilby, 2001). Se calculó de la siguiente manera:

$$MAE = \frac{\sum |e_i|}{n} \quad (2.5)$$

Donde:

e_i = diferencia o error entre los valores observados y pronosticados

n = número de casos.

INFORMACIÓN CLIMATOLÓGICA SOBRE EL NIÑO Y LA NIÑA

En las Tablas 2.4 y 2.5 se indican los episodios históricos de El Niño y La Niña ocurridos, los meses de inicio y finalización del calentamiento o enfriamiento del océano y el valor del índice ONI, desde 1968 hasta 2019 (NOAA, 2019). El ONI se obtuvo del promedio de 3 meses de (Extended Reconstructed Sea Surface Temperature) [ERSST.v4 SST dataset anomalías] en El Niño región 3.4 (5°N-5°S, 120°-170°W) (Huang et al., 2014; NOAA, 2019-2016).

Tabla 2.4 Período de ocurrencia de la anomalía El Niño (serie 1968-2019) y el índice ONI más alto registrado (Fuente: NOAA, 2019).

Anomalia, El Niño		índice ONI (valor más alto)
Comienzo	Finaliza	
JAS 1968	DJF 1970	1,1
AMJ 1972	FMA 1973	2,1
ASO 1976	JFM 1977	0,8
ASO 1977	JFM 1978	0,8
AMJ 1982	MJJ 1983	2,2
JAS 1986	JFM 1988	1,6
AMJ 1991	MJJ 1992	1,6
ASO 1994	FMA 1995	1,2
AMJ 1997	MAM 1998	2,4
AMJ 2002	JFM 2003	1,3
JJA 2004	MAM 2005	0,7
ASO 2006	DJF 2007	1,0
JJA 2009	MAM 2010	1,3
FMA 2014	AMJ 2016	2,3
SON 2018	DJF 2019	0,9

Tabla 2.5 Período de ocurrencia de la anomalía La Niña (serie 1968-2019) y el índice ONI más bajo registrado (Fuente: NOAA, 2019).

Anomalia, La Niña		índice ONI (valor más bajo)
Comienzo	Finaliza	
JJA 1970	DJF 1972	-1,3
AMJ 1973	JJA 1974	-2,0
SON 1974	MAM 1976	-1,7
ASO 1983	DJF 1984	-0,9
SON 1984	ASO 1985	-1,1
AMJ 1988	AMJ 1989	-1,9
ASO 1995	FMA 1996	-0,9
JJA 1998	FMA 2001	-1,7
OND 2005	FMA 2006	-0,9
JAS 2007	MJJ 2008	-1,4
JJA 2010	MAM 2011	-1,5
JAS 2011	FMA 2012	-1,0
JAS 2016	NDJ 2016	-0,8
SON 2017	FMA 2018	-1,0

DETERMINACIÓN DE LAS RELACIONES ENTRE LA OCURRENCIA DEL ENSO Y LOS EXTREMOS HÍDRICOS

Las relaciones entre la ocurrencia del ENOS (El Niño y La Niña) y la identificación de extremos hídricos en distintas regiones se realizaron mediante el análisis de mapas de los índices PDSI y SPI para los períodos de ocurrencia de los eventos más importantes del ENOS (Tablas Tablas 2.4 y 2.5).

Solo se hace una introducción a la problemática de la relación extremos hídricos y fenómeno del ENSO.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS y DISCUSIÓN

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

VARIABILIDAD DE LAS SEQUÍAS Y LOS EXCESOS HÍDRICOS SEGÚN EL ÍNDICE DE PALMER (PDSI)

El análisis se realizó a dos escalas: una comprendió a toda Argentina y la otra a la región pampeana, dado su importancia agroeconómica. Se seleccionaron años con sequías y excesos hídricos extremos por su incidencia sobre las actividades agropecuarias.

En la Figura 3.1 se presenta a título de ejemplo el PDSI para la región pampeana en el mes de enero de 2009 y puede destacarse la ocurrencia de sequías extremas y severas que abarcaron a casi toda la provincia de Buenos Aires y los departamentos de la zona este de La Pampa que limitan con Buenos Aires. Este evento en Córdoba alcanzó a los departamentos de las zonas norte, noreste, centro, este y sudeste provincial; en Santa Fe, los departamentos de las zonas centro y sur mientras que en Entre Ríos afectó a las zonas centro y sur.

El efecto de la sequía en la disminución de rendimientos en cultivos como soja fueron cuantiosos durante la campaña 2008/09 para las provincias de Buenos Aires, Córdoba, Santa Fe y La Pampa con pérdidas económicas de alrededor de 4.115 millones de USD (Thomasz et al., 2017), solo en la provincia de Buenos Aires se perdieron 700 millones de dólares (Scarpati y Capriolo, 2013; Pérez Ballari et al., 2009).

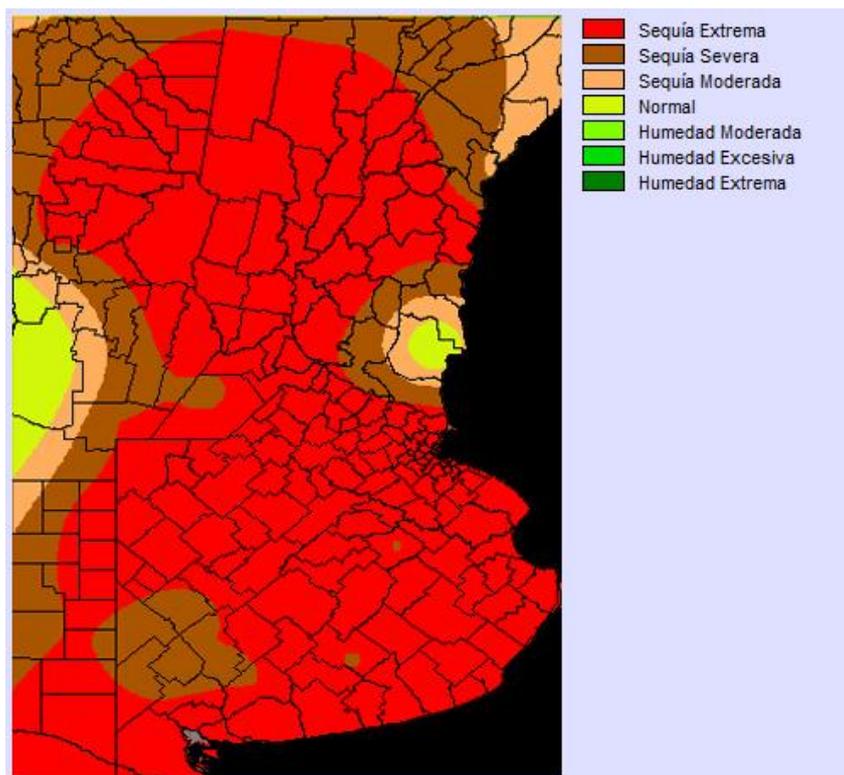


Figura 3.1. Deficiencias hídricas o sequías ocurridas en la Región Pampeana a nivel departamental o partido durante enero de 2009 según el PDSI. La categoría sequía extrema se registra en el 89% del área en la región considerada.

Si se consideran los resultados para los años 2016, 2017 y 2018 según el PDSI, se observa que se presentaron diferentes condiciones de deficiencia, normalidad y excesos de humedad en las localidades seleccionadas para cada una de las regiones en que fue subdividido el país.

En la región pampeana se observaron condiciones de humedad sobre lo normal con excesos hídricos durante el año 2016 hasta el mes de setiembre de 2017. En la Figura 3.2 se observan las condiciones hídricas extremas y excesivas que ocurrieron desde enero hasta abril de 2016 en el sur y este de la provincia de Córdoba, sur de Santa Fe, La Pampa, norte y oeste de Buenos Aires y los departamentos afectados por excesos hídricos en la región pampeana, ver Tabla 3.1 (Fotos 3.1 y 3.2) (IRI, 2015; FAO, 2016; Jobbágy, 2016; Zanvettor et al., 2016; Agrositio, 2017; BCC, 2017; CREAN, 2017; Zanvettor et al., 2017).

De manera simultánea con la ocurrencia de excesos hubo condiciones de sequías en otras localidades de la región pampeana como en Tres Arroyos y Río Cuarto en los meses

de noviembre, diciembre de 2016 y enero, febrero de 2017 (Agrovoz, 2017; Universal, 2017) donde el índice observado fue negativo mostrando condiciones entre normales y moderadamente secas para el período 2016/17 (Figuras 3.3 y 3.4), con sequías severas y extremas puntualmente hacia el norte del país. En los meses posteriores de octubre a diciembre 2017, desaparecen las condiciones de excesos para casi todas las regiones de Argentina, debido a un mayor desecamiento del suelo respecto a los meses anteriores y comenzando el año 2018 con sequías severas y extremas en la parte central y norte del país hasta el mes de abril, (Figuras 3.4 y 3.5).

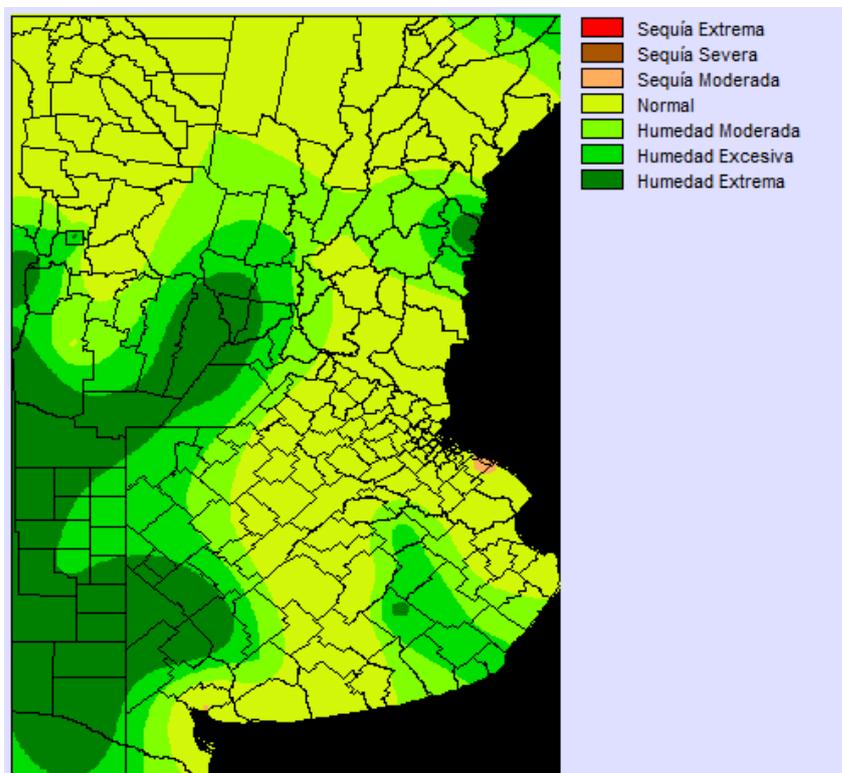


Figura 3.2. El índice PDSI señala los excesos hídricos ocurridos en la Región Pampeana a nivel departamental o partido durante febrero de 2016. La categoría humedad extrema se registra en el 27% del área en la región considerada.

Tabla 3.1 Departamentos o partidos afectados por excesos hídricos en la campaña agrícola 2015/16 en las provincias de Buenos Aires, Córdoba, Santa Fe y Entre Ríos.

Buenos Aires	Córdoba	Santa Fe	Entre Ríos
Adolfo Alsina	Gral. Roca	Belgrano	Concordia
Cnel. Suarez	Marcos Juárez	Caseros	
Gral. Villegas	Pte. R. Sáenz Peña	Gral. López	
Guamini	Río Cuarto	Iriondo	
Puán	Unión	San Jerónimo	
Saavedra		San Martín	
Saniqueoló			
Tres Lomas			



Figura 3.3. Distribución geográfica mensual del PDSI durante 2016. Deben destacarse las zonas con extremos hídricos señaladas con rojo intenso (sequías) y verde intenso (excesos de humedad).

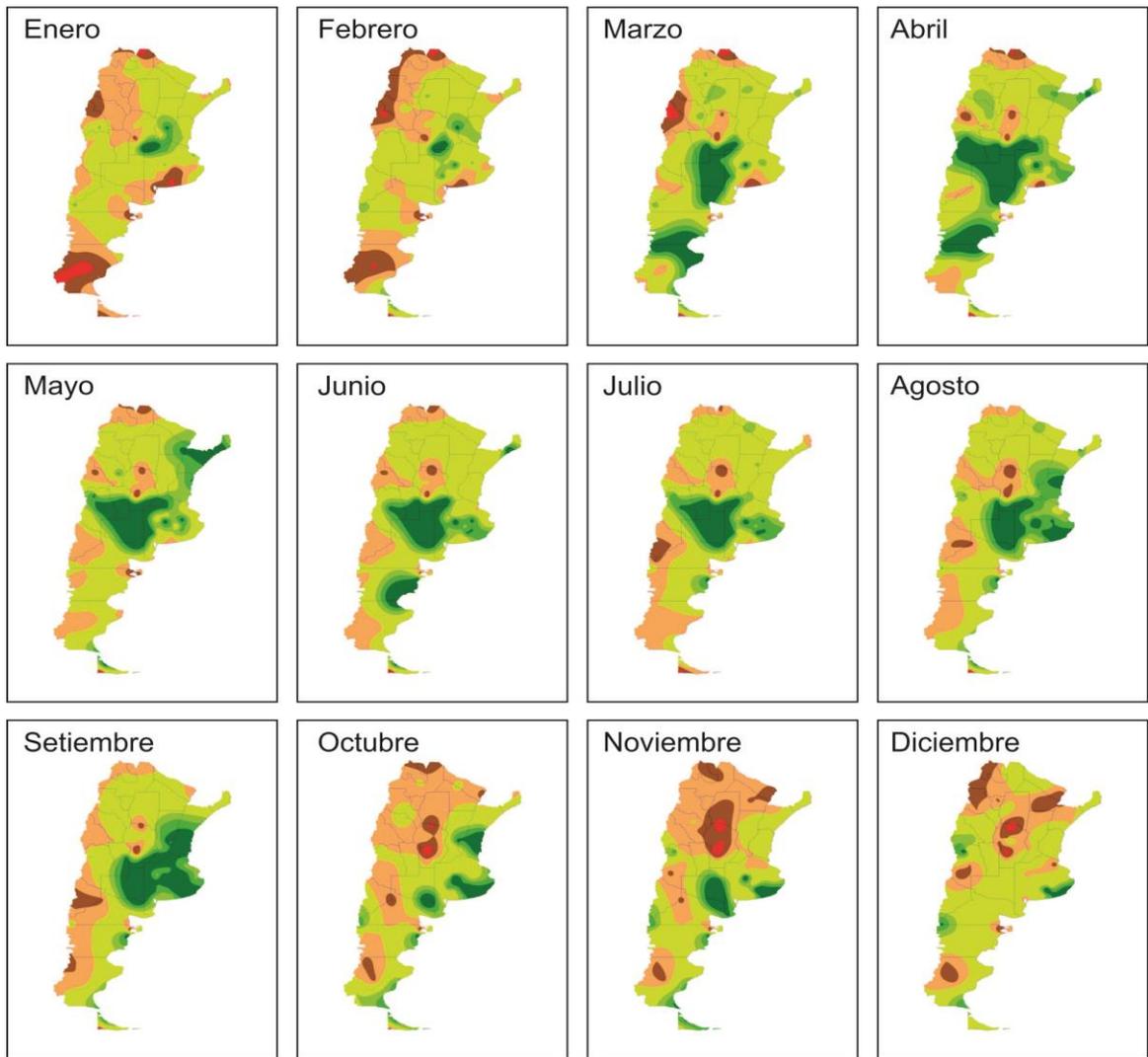


Figura 3.4. Distribución geográfica mensual del PDSI durante 2017. Deben destacarse las zonas con extremos hídricos señaladas con rojo intenso (sequías) y verde intenso (excesos de humedad).

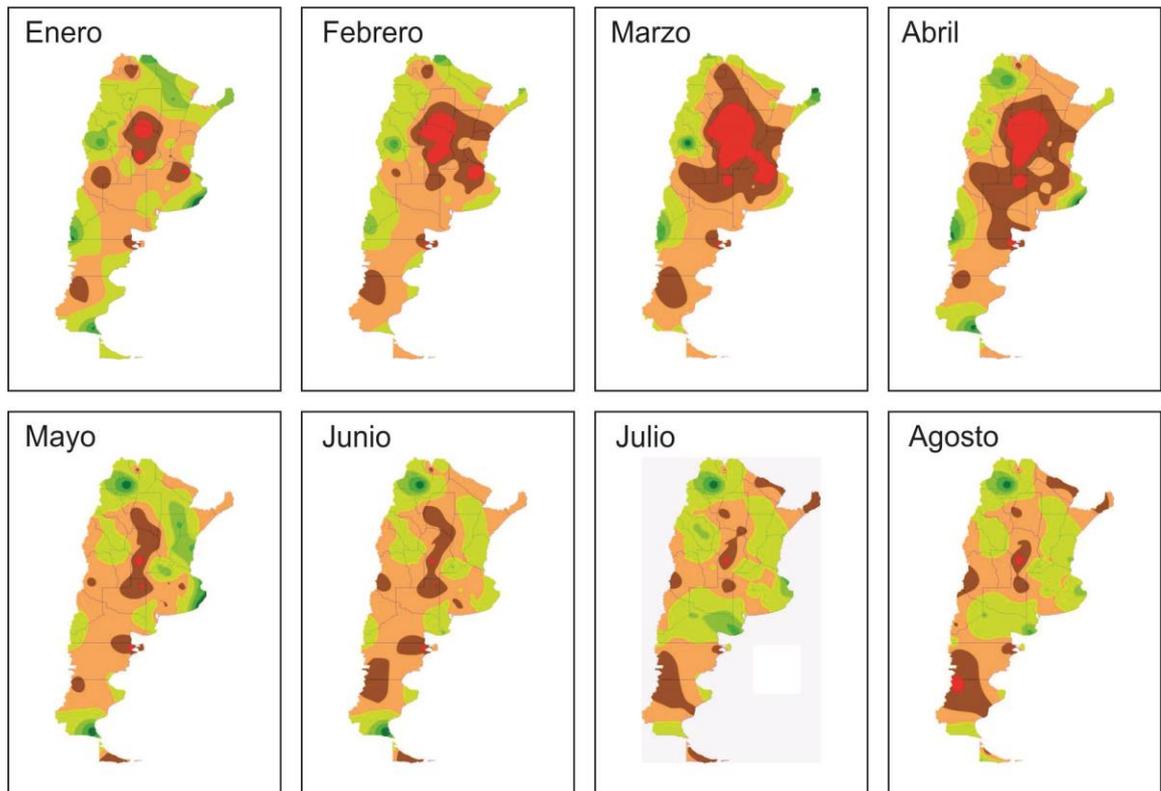


Figura 3.5. Distribución geográfica mensual del PDSI durante enero a agosto del 2018. Deben destacarse las zonas con extremos hídricos señaladas con rojo intenso (sequías) y verde intenso (excesos de humedad).

Durante el año 2016, la distribución del PDSI señala áreas con excesos de humedad que van afectando las regiones NOA, NEA, Pampeana y Cuyo en casi todos los meses. Por ejemplo, en el norte de La Pampa ocurren inundaciones desde noviembre de 2015 a marzo de 2016 y luego de octubre de 2016 a marzo de 2017 (INTA, 2019a) (Figuras 3.3 y 3.4). También se pueden observar sequías en pequeñas zonas de la región NOA y a lo largo de la cordillera Patagónica. En general, hacia el sur del Río Colorado se pudo verificar extensas áreas con deficiencias hídricas y con sequías severas durante varios meses del año 2016 (Télam, 2016; Chacra, 2017). En la región Patagónica se presentan sequías que se van reduciendo en extensión para concentrarse en el extremo más austral y finalizar en febrero-marzo de 2017 (Figuras 3.3 y 3.4).

A partir del mes de octubre de 2017 comienzan a manifestarse sequías severas en la zona centro norte de Córdoba y se extienden hacia el NOA (Figura 3.4), agravándose entre los meses de enero a abril del 2018 cuando prevalecen sequías severas y extremas, mientras que en la Patagonia continúan las condiciones de sequedad, pero más moderadas

(Figura 3.5). El mayor impacto negativo fue sobre las cosechas de soja y maíz con pérdidas de aproximadamente 10 y 4 millones de toneladas, respectivamente según la Sociedad Rural y Bolsa de Comercio de Rosario, afectando el norte de la provincia de Buenos Aires, sur de Santa Fe y sudeste de Córdoba durante la campaña 2017/18 (Perfil, 2018; BCR, 2018; La Capital, 2018).



Foto 3.1. Vista aérea de la zona de Laboulaye, Córdoba mostrando campos inundados, alrededor de 170 mil has del sur Cordobés (BCC-Agrovoz, 2017). (06/10/2017)



Foto 3.2. Vista aérea de la ruta 7 rodeada de agua en Santa Fe y en los límites con las provincias de Córdoba y Buenos Aires (BCC-Agrovoz, 2017). (06/10/2017)

Durante la campaña 2015/16 en la provincia Córdoba se registró una pérdida de aproximadamente 6 millones de toneladas en los cultivos de soja y maíz por inundaciones de campos y enfermedades (Agrositio, 2017; infoCampo, 2017; Agrovoz, 2016).

Los extremos hídricos como las sequías ocurridas en 2008/09 y los excesos de humedad en el 2015/16 tuvieron consecuencias negativas para las actividades ganaderas, agroindustriales, en la distribución y abastecimientos de agua para usos industriales y consumo humanos e infraestructura vial, etc. (Agrovoz, 2016; Agrositio, 2017; BCC-Agrovoz, 2017).



Foto 3.3. Cultivo de soja implantado sobre trigo, en campos inundados durante el mes de febrero 2016 en Leones, Córdoba (Agrovoz, campaña 2015/2016).

VARIABILIDAD DE LAS SEQUÍAS Y LOS EXCESOS DE HUMEDAD SEGÚN EL ÍNDICE ESTANDARIZADO DE PRECIPITACIÓN (SPI)

La Figura 3.6 presenta el SPI3 para la región Pampeana durante enero de 2009 y puede destacarse la ocurrencia de sequías severas y extremas, con una extensión que abarcó un área menor a la indicada por el PDSI de enero del mismo año (Figura 3.1). Esta área incluyó a los partidos del área central, noreste, este y sudeste de la provincia de Buenos Aires, a los departamentos de San Cristóbal, Las Colonias, La Capital, Garay, San

Justo, San Javier y parte sur de Vera, en la provincia de Santa Fe; a los departamentos de Paraná, Colón, Villaguay, San Salvador, La Paz, Federal, Concordia, Federación y Feliciano en la provincia de Entre Ríos. Importa más la superficie que los departamentos. Podría hacer referencia a los que entraron en emergencia.

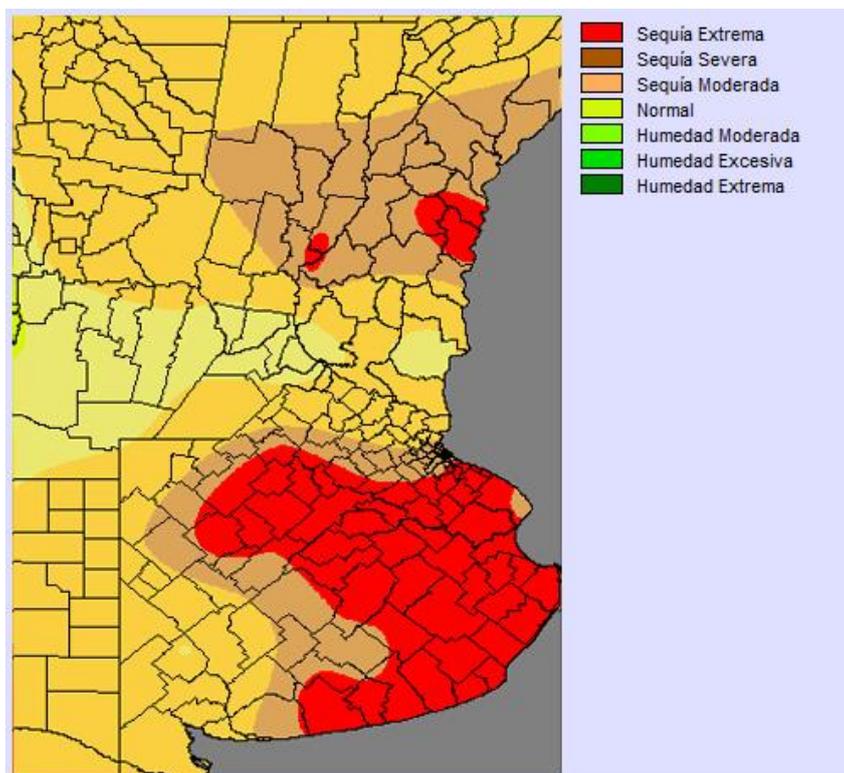


Figura 3.6. Deficiencias hídricas o sequías ocurridas en la Región Pampeana según el SPI3 a nivel departamental o partido durante el mes de enero del año 2009. La categoría sequía extrema se registra en el 23% del área de la región considerada.

En la Figura 3.7 se presenta el SPI12 para la región Pampeana en el mes de enero de 2009, donde pueden destacarse la ocurrencia de sequías severas que abarcan a los partidos del área central, noreste, este y sudeste de la provincia de Buenos Aires, mientras que las sequías extremas solo se visualizan en los partidos de Bolívar y Bahía Blanca hacia el sur; Alvarado, Gral. Pueyrredón, Balcarce, Mar Chiquita, Ayacucho y Tandil hacia el sudeste; San Nicolás, Ramallo, San Pedro, Baradero, Zárate, Campana, San Fernando, Exaltación de la Cruz, Carmen de Areco, Sarmiento y Arrecifes al norte de la provincia de Buenos Aires. Este índice representa o caracteriza bien a las sequías hidrológicas que en ese año también fueron observadas en los departamentos del sudoeste de la provincia de Buenos Aires por Pérez Ballari et al. (2009). En la provincia de Santa Fe se extendió sobre

la parte norte de los departamentos de Rosario, San Lorenzo, Iriondo, San Martín, San Jerónimo, Castellanos, Las Colonias, La Capital, Garay, San Javier, San Justo y San Cristóbal; mientras que en la parte sur abarcó a los departamentos de Nueve de Julio, Vera y Gral. Obligado; el área afectada en la provincia de Córdoba correspondió a los departamentos de San Justo, Tulumba, Río Seco y partes de los departamentos de Sobremonte y Río Primero.

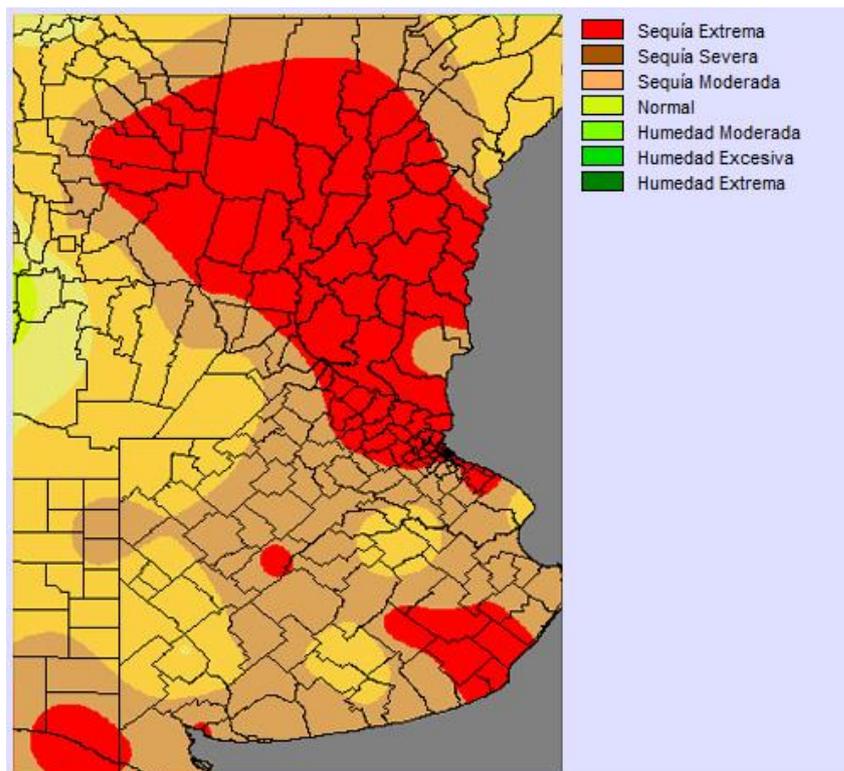


Figura 3.7. Sequías ocurridas en la Región Pampeana según el SPI12 a nivel departamental o partido durante el mes de enero del año 2009. La categoría sequía extrema se registra en el 43% del área en la región considerada.

Si se comparan los tres índices, el PDSI SPI3 y SPI12 para esa misma fecha, enero 2009 que un evento de sequía severas y extremas en amplias zonas de la pradera pampeana, vemos que la distribución geográfica para las sequías extremas presentan diferencias entre los tres índices. El PDSI presentó sequías extremas en el 89 % del área, el SPI3 un 23% y el SPI12 un 43%. En los SPI3 y SPI12 se observó una gran diferencia del área delimitada bajo condiciones de deficiencia, pero entre los índices SPI12 y PDSI resultaron más comparables, aunque no iguales. La diferencia que se observó fue entre las

intensidades o categorías de sequías entre PDSI y SPI12, así por ejemplo para el SPI12 las sequías extremas se observan hacia el norte coincidiendo con las extremas del PDSI mientras que las sequías severas para el SPI12 corresponden a la categoría de sequía extremas para el PDSI (Figuras 3.1, 3.6 y 3.7).

A nivel nacional y en enero de 2009, el SPI12 señala sequías severas afectando a otras zonas provinciales como el sureste de Santiago del Estero, Chaco y Formosa.

Durante la campaña 2016/2017 se puede observar la evolución las condiciones de deficiencias y/o excesos hídricos mediante los mapas SPI3 y SPI12 mensuales obtenidos por el programa SOS (Figuras 3.8 a 3.13). Entre enero y abril de 2016, el SPI3 señala regiones con excesos de humedad que van afectando las provincias de Mendoza, San Luis, sur de Córdoba y Misiones presentando su máxima expansión territorial desde Bahía Blanca hasta Salta y de Cuyo hasta la parte oeste de la provincia de Córdoba (Los Andes, 2016; El Once, 2017). También se pueden observar sequías en pequeñas zonas de la región NOA y a lo largo de la cordillera Patagónica. En general, hacia el sur del Río Colorado se observan extensas áreas con deficiencias hídricas y con sequías severas y extremas, durante los meses de marzo a agosto y en noviembre de 2016 (Figura, 3.8) (Télam, 2016).

Durante 2017, el SPI3 presentó condiciones de humedad moderada con excesos a partir de marzo y hasta septiembre en la región central del país, Mendoza, San Luis, norte de La Pampa, Buenos Aires, Santa Fe y Entre Ríos y sur de la Patagonia (Figura 3.9). Desde octubre de 2017 comienzan a manifestarse sequías que van aumentando en intensidad con los meses siguientes hasta abril de 2018 para desaparecer en los meses siguientes (Figura 3.10) (Perfil 2018; BCR 2018).

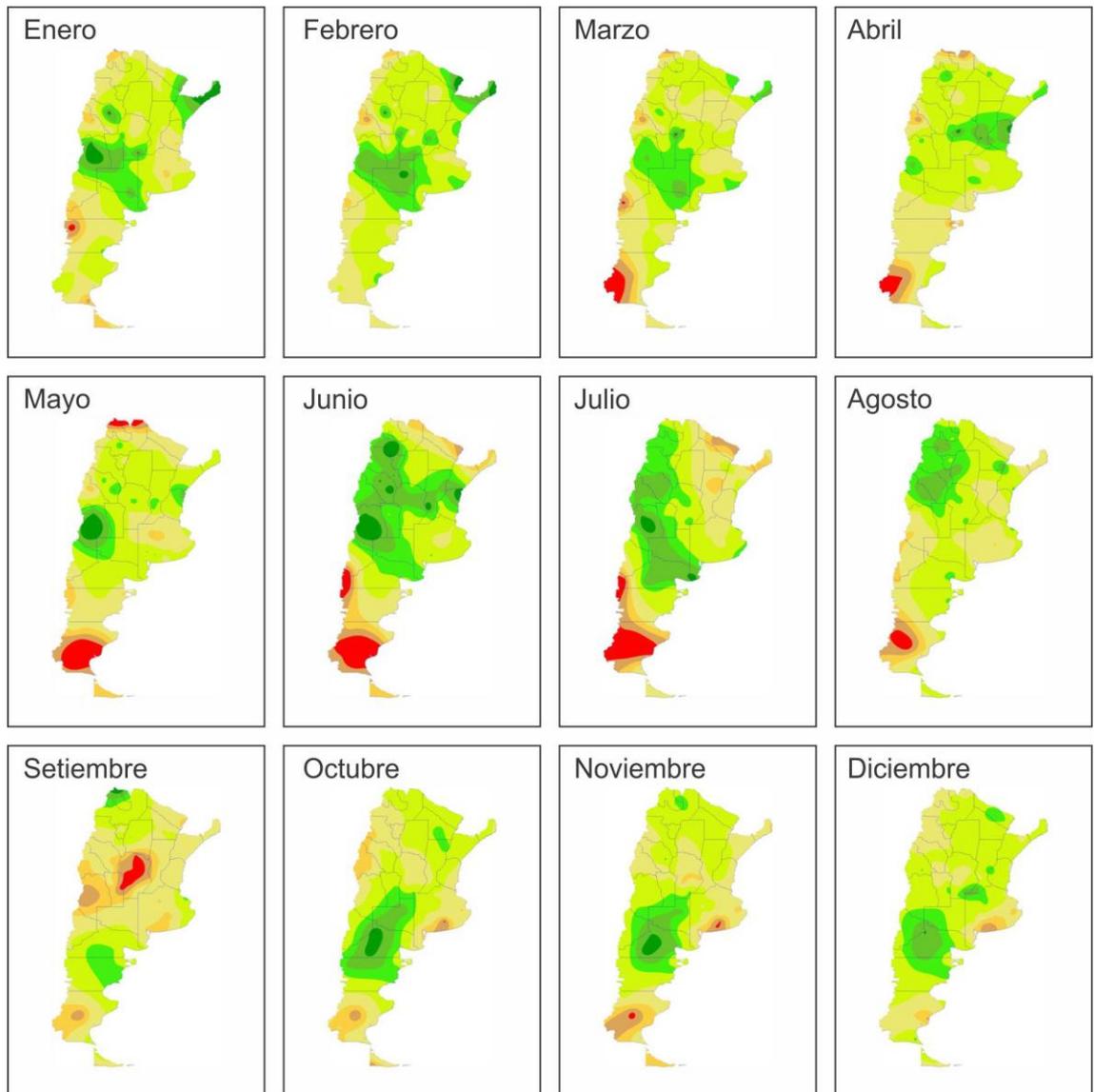


Figura 3.8. Distribución geográfica mensual del SPI3 durante 2016. Deben destacarse las zonas con extremos hídricos señaladas con rojo intenso (sequías) y verde intenso (excesos de humedad).

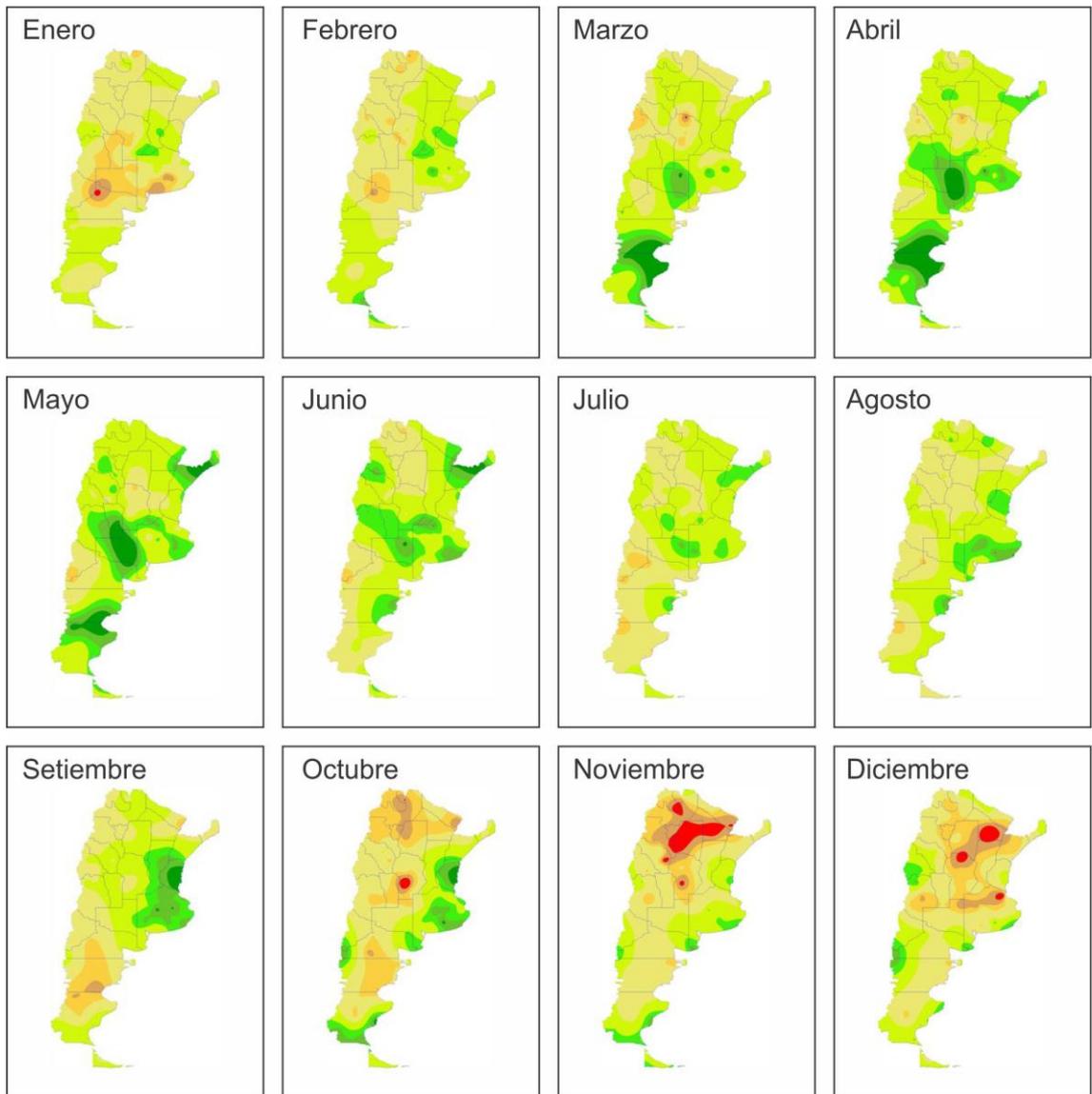


Figura 3.9. Distribución geográfica mensual del SPI3 durante 2017. Deben destacarse las zonas con extremos hídricos señaladas con rojo intenso (sequías) y verde intenso (excesos de humedad).

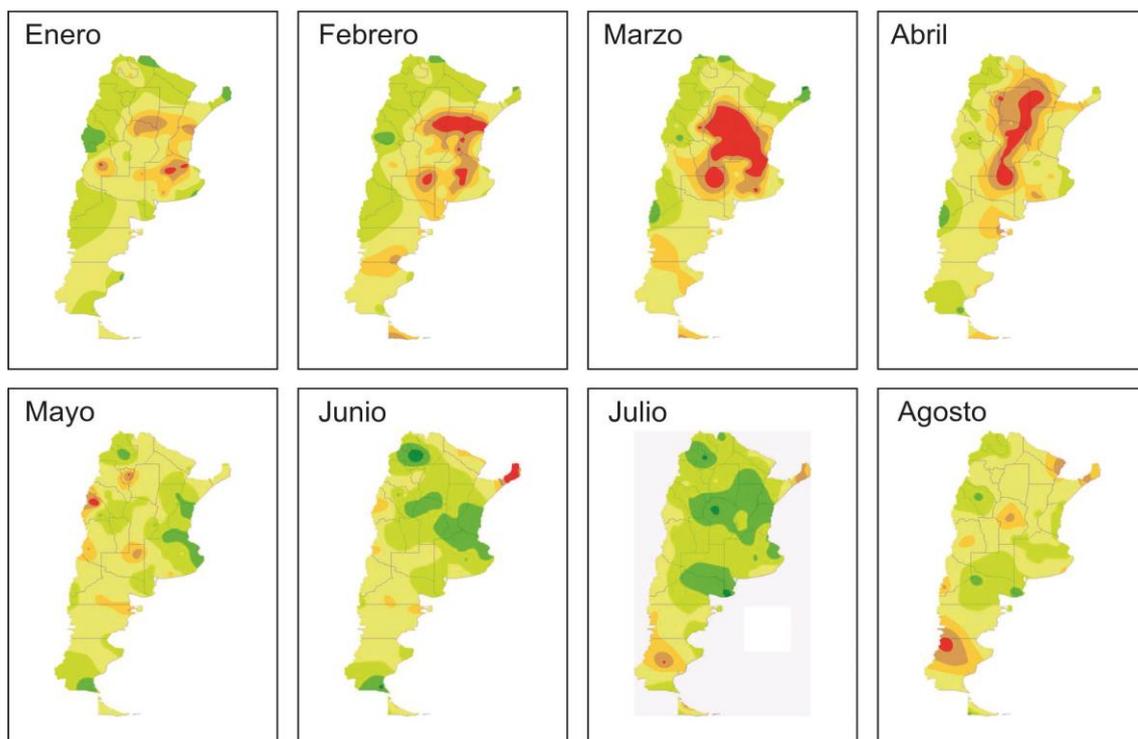


Figura 3.10. Distribución geográfica mensual del SPI3 durante enero a agosto del año 2018. Deben destacarse las zonas con extremos hídricos señaladas con rojo intenso (sequías) y verde intenso (excesos de humedad).

Durante el año 2016, el SPI12 señala regiones con excesos de humedad que van afectando las regiones NOA, NEA, Pampeana y Cuyo durante casi todos los meses. Por ejemplo, en el norte de provincia de La Pampa ocurren inundaciones de noviembre de 2015 a marzo de 2016 y nuevamente en octubre de 2016 a marzo de 2017 (INTA, 2019a; Diario Norte, 2019). En general, hacia el sur del río Colorado se pueden observar extensas áreas con deficiencias hídricas hasta sequías severas durante varios meses del año 2016 (Télam, 2016; Chacra, 2017). En la región Patagónica se presentaron sequías que se van reduciendo en extensión territorial para concentrarse en el extremo más austral y finalizar en febrero de 2017 (Figura 3.11).

A partir del mes de octubre de 2017 comienza a manifestarse sequías en la zona centro y norte de Córdoba y se extienden hacia el NOA, situación que se agrava entre los meses de verano de 2018, cuando prevalecen las sequias moderadas y severas, mientras que en la Patagonia continúan las condiciones de sequedad pero de forma moderada (Figuras 3.12 y 3.13).

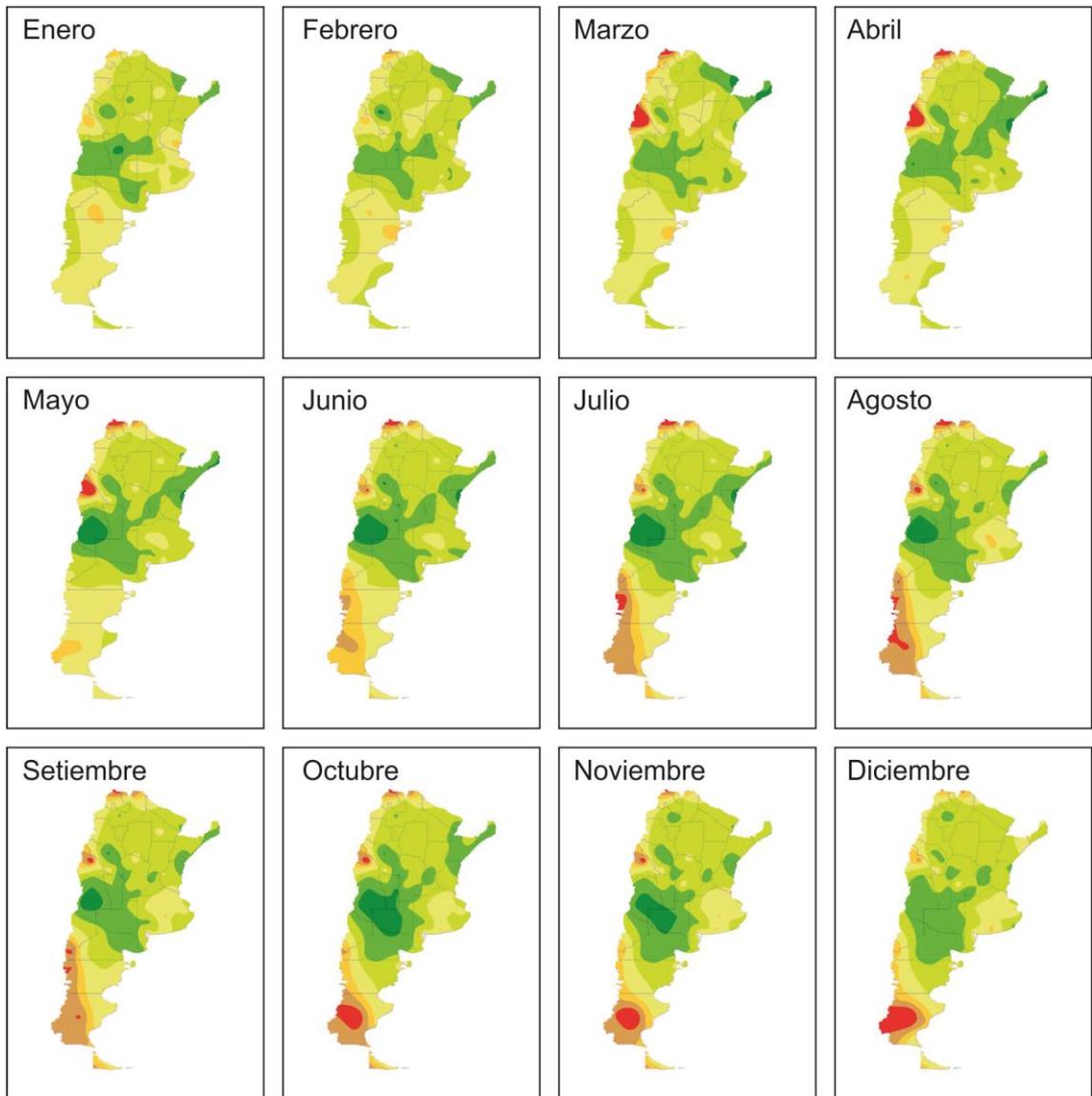


Figura 3.11. Distribución geográfica mensual del SPI12 durante 2016. Deben destacarse las zonas con extremos hídricos señaladas con rojo intenso (sequías) y verde intenso (excesos de humedad).



Figura 3.12. Distribución geográfica mensual del SPI12 durante 2017. Deben destacarse las zonas con extremos hídricos señaladas con rojo intenso (sequías) y verde intenso (excesos de humedad).

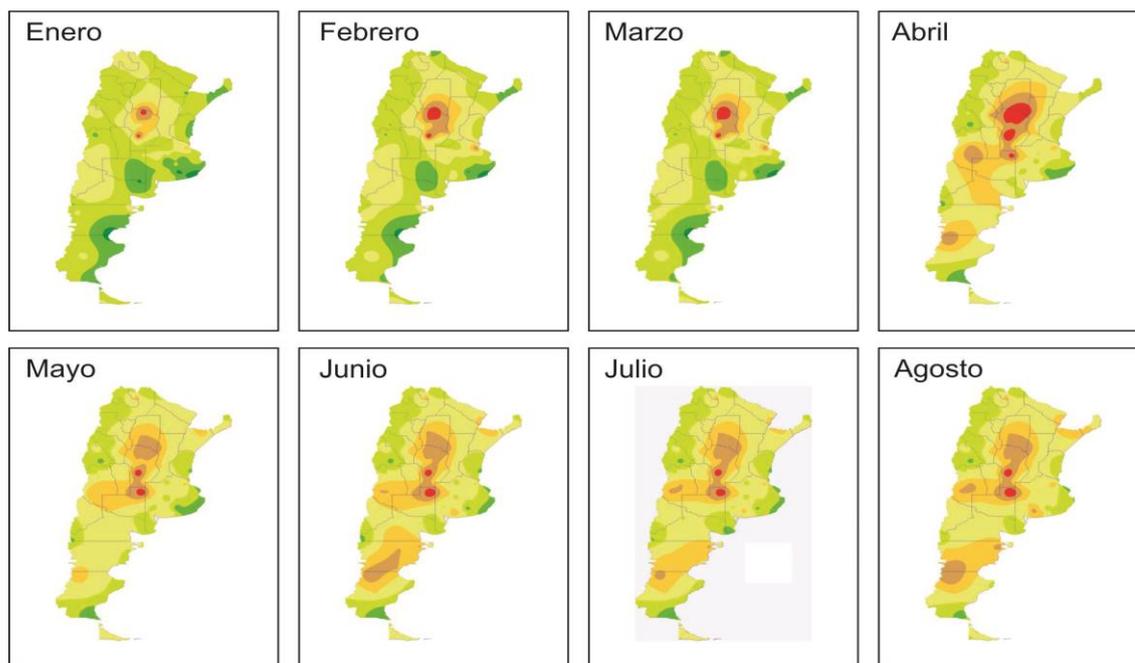


Figura 3.13. Distribución geográfica mensual del SPI12 durante 2018. Deben destacarse las zonas con extremos hídricos señaladas con rojo intenso (sequías) y verde intenso (excesos de humedad).

Se observó que durante 2016, el SPI12 indica condiciones de humedad normal a excesos en la mayoría de las localidades de las regiones NEA, NOA y Pampeana. Se identificaron inundaciones en alrededor de 170 mil hectáreas en el sur de Córdoba y en los departamentos Unión, General Roca, Roque Sáenz Peña y Marcos Juárez cuyo impacto fue principalmente sobre las actividades rurales (Fotos 3.3; 3.4 y 3.5) con pérdidas cuantiosas en la agricultura y ganadería (Agrovoz-BCC, 2016; Agrovoz, 2017; Jozami et al., 2017).

Durante 2016, en Cuyo y sur de la Patagonia se observaron condiciones de sequías severas (Figura 3.11).

En 2017, el SPI12 señala condiciones de humedad sobre lo normal y con excesos en la región central pampeana y litoral del país. Excepto para los meses de enero y febrero, dichas condiciones se extendieron hacia el sur y sureste en la región Patagónica (Forquera et al., 2016). También se observaron en forma simultánea condiciones de sequías moderadas y severas en el centro-norte de Córdoba (Figura 3.13).



Foto 3.4. Tambos afectados por inundaciones en el departamento San Justo, Córdoba en Febrero de 2016. (Fuente Agrovoz-BCC, 2016).



Foto 3.5. Campos afectados por las inundaciones en el departamento San Justo, Córdoba en Febrero 2016 y sus efectos sobre la actividad ganadera (Fuente Agrovoz-BCC, 2016).

Los excesos hídricos señalados por los índices fueron verificados en el terreno por la visualización de inundaciones en varias partes de la región (Fotos 3.1 a 3.5).

ENTRENAMIENTO, VALIDACIÓN Y UTILIZACIÓN DE REDES NEURONALES PARA EL PRONÓSTICO DE SEQUÍAS

La cantidad de datos y los porcentajes correspondientes para cada uno de los índices (PDSI, SPI3 y SPI12) en el entrenamiento, validación y utilización de la red neuronal se presentan en la Tabla 3.2. Los 278 valores mensuales son utilizados en la red neuronal (RN) durante el proceso de entrenamiento y el cual se ajusta de acuerdo al error de pronóstico. Los datos de validación se utilizan para evaluar la capacidad de generalización de la red. Finalmente, los datos de utilización no intervienen en los procesos de entrenamiento y validación, los cuales representan una medida independiente de la capacidad predictiva del modelo durante y luego del entrenamiento y validación.

Tabla 3.2 Cantidad de datos para cada uno de los índices y los porcentajes correspondientes que fueron utilizados para el entrenamiento, validación y utilización de las redes neuronales.

<u>Proceso</u>	<u>Cantidad de datos</u>	<u>Porcentaje (%)</u>
Entrenamiento	278	65
Validación	21	5
Utilización	128	30
Total	406	100

Se presentan los resultados de utilizar el PDSI como entrada para el entrenamiento y validación de redes neuronales y luego el ajuste de los PDSI pronosticados para tres localidades correspondientes a las zonas norte (Resistencia), centro (Río Cuarto) y sur (Bariloche) (Figuras 3.14 a 3.22) e idéntica información para otras cinco localidades se detalla en el (**Anexo 3: ENTRENAMIENTO, VALIDACIÓN Y AJUSTE DE LOS ÍNDICES PDSI, SPI3 Y SPI12, a.PDSI**).

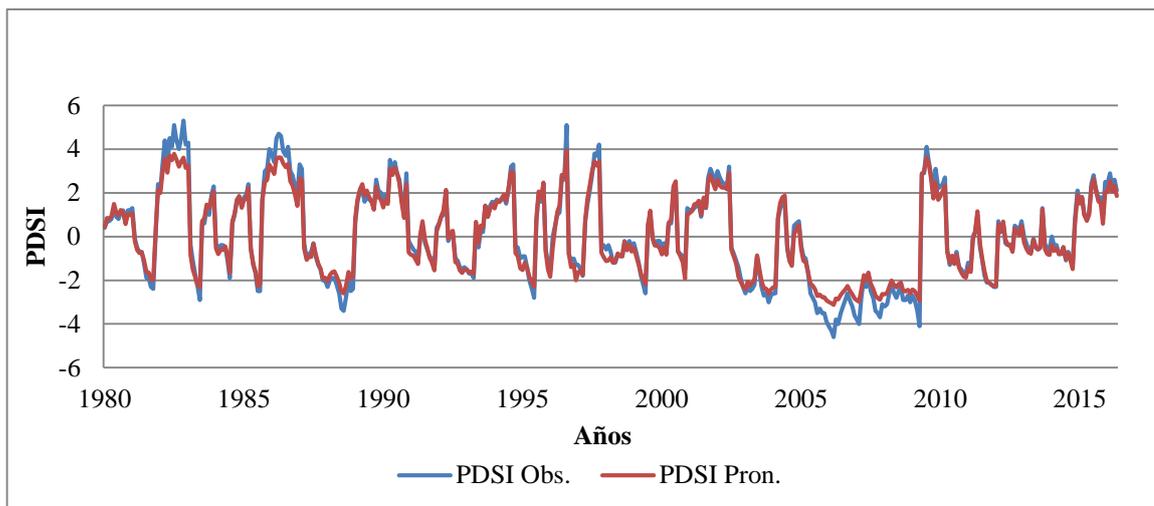


Figura 3.14. Valores de PDSI observados en Resistencia y pronosticados a un mes durante el entrenamiento de RN (1980-2016).

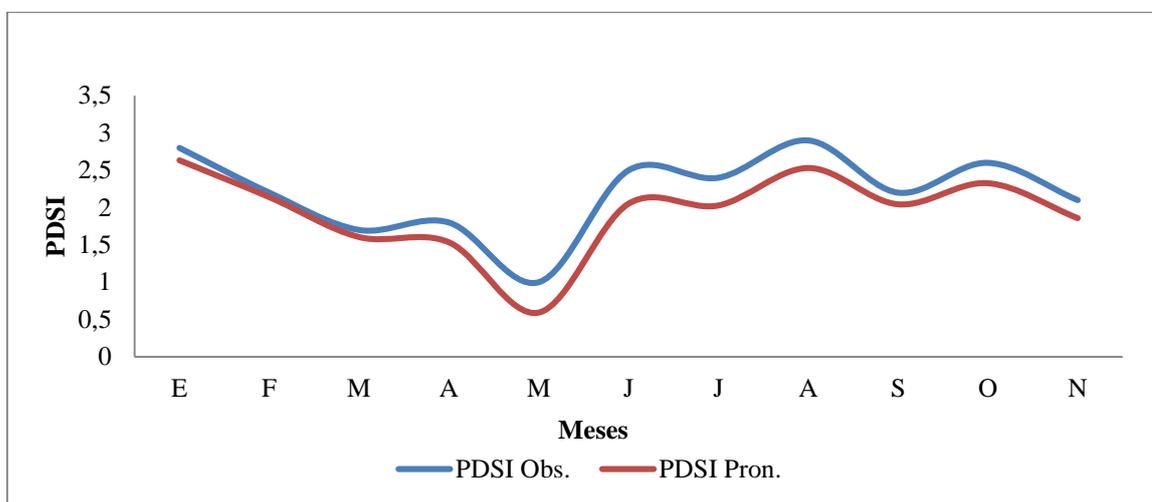


Figura 3.15. Valores de PDSI observados en Resistencia y pronosticados durante la validación de RN (2016).

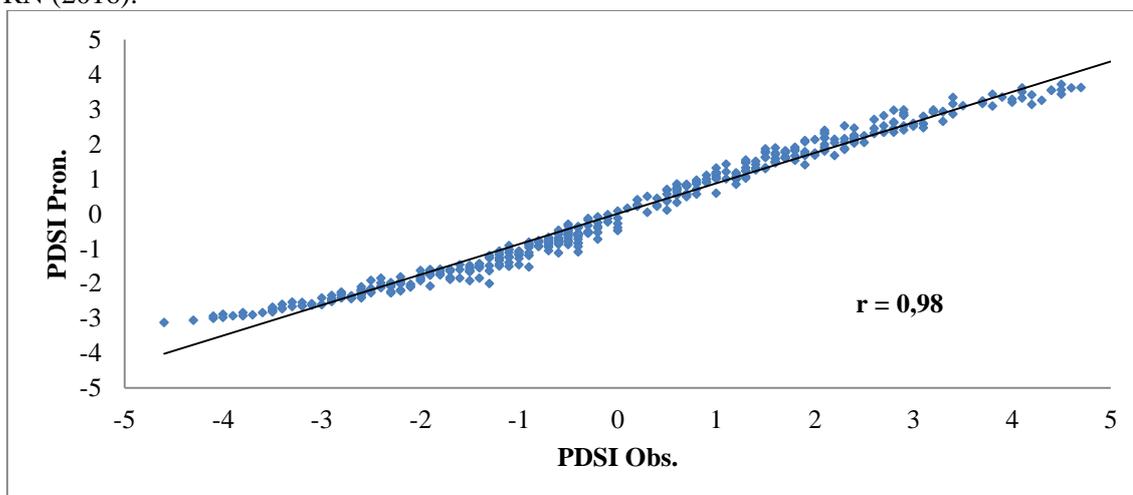


Figura 3.16. Correlación entre PDSI observados en Resistencia y pronosticado a un mes utilizando redes neuronales (1980-2016).

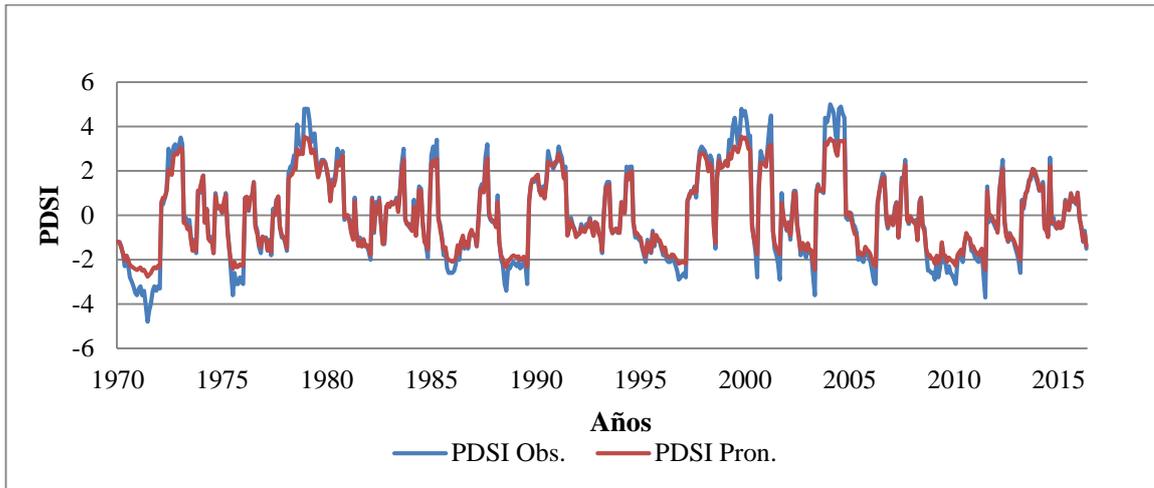


Figura 3.17. Valores de PDSI observados en Río Cuarto y pronosticados a un mes durante el entrenamiento de RN (1970-2016).

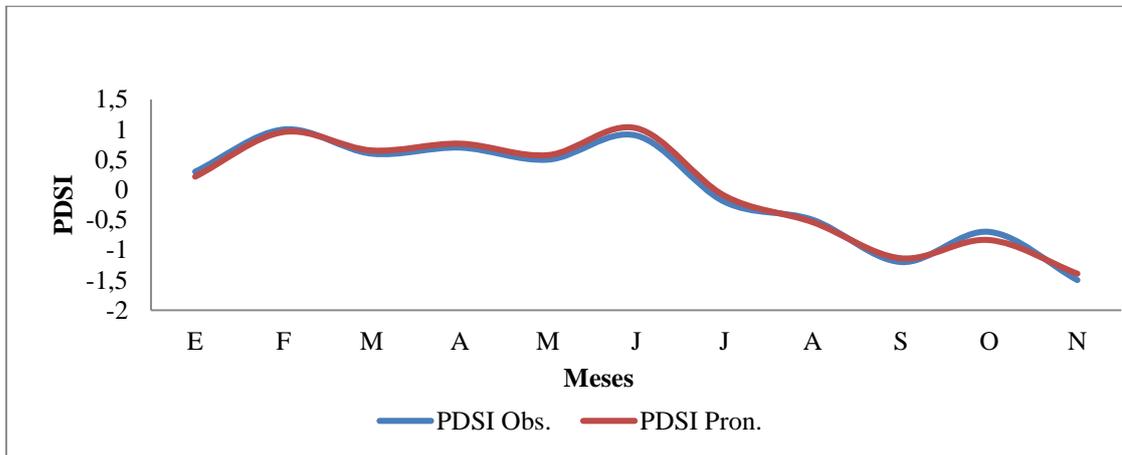


Figura 3.18. Valores de PDSI observados en Río Cuarto y pronosticados durante la validación de RN (2016).

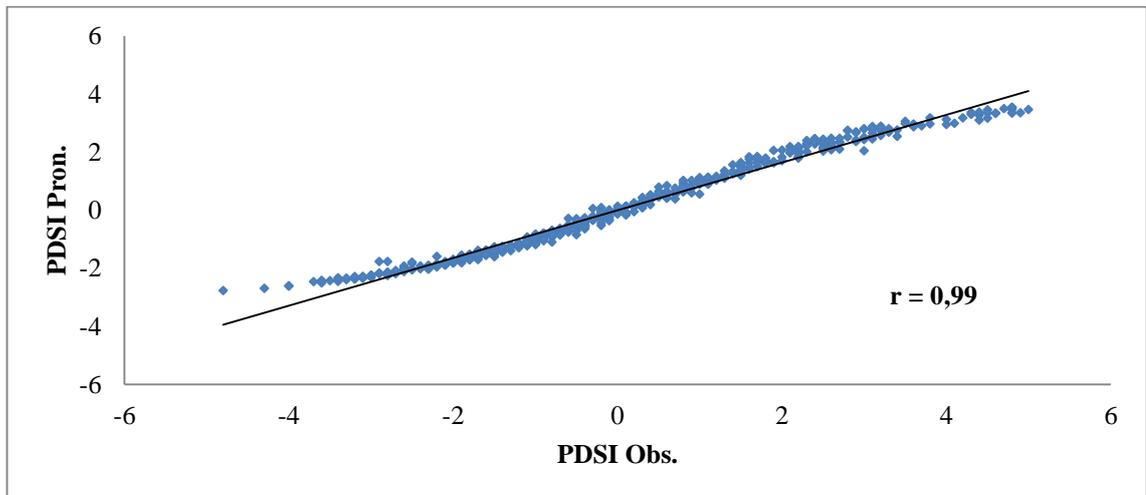


Figura 3.19. Correlación entre PDSI observados Río Cuarto y pronosticados a un mes utilizando redes neuronales (1970-2016).

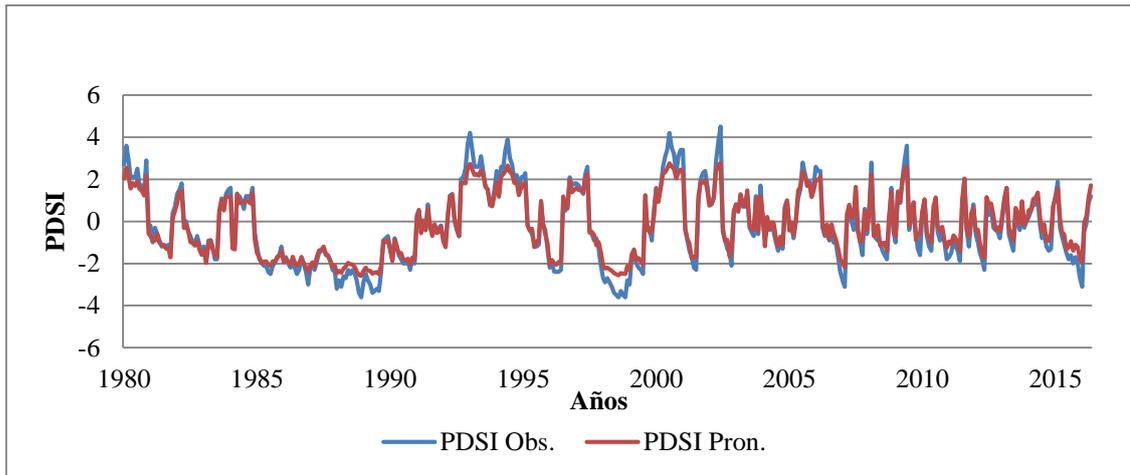


Figura 3.20. Valores de PDSI observados en Bariloche y pronosticados a un mes durante el entrenamiento de RN (1980-2016).

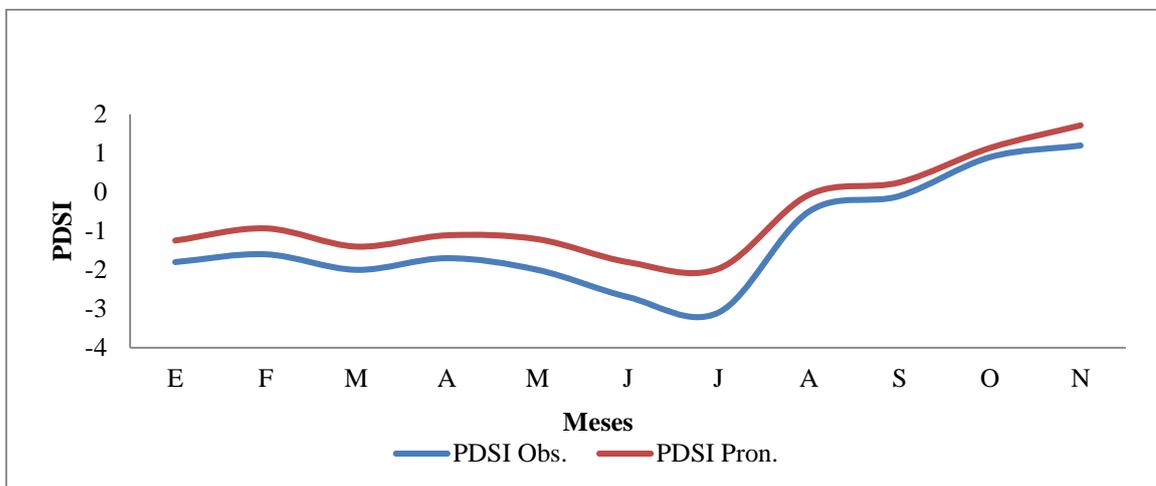


Figura 3.21. Valores de PDSI observados en Bariloche y pronosticados durante la validación de RN (2016).

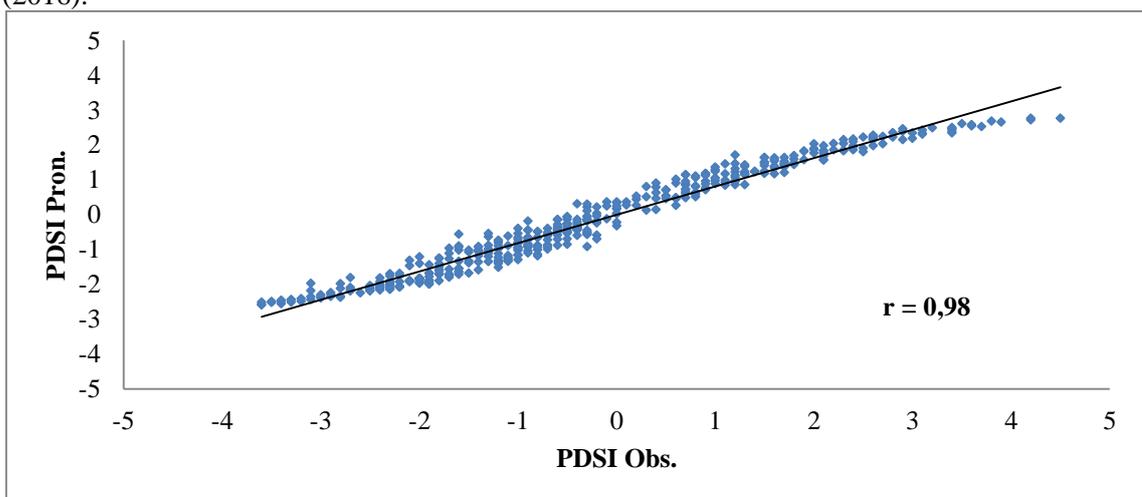
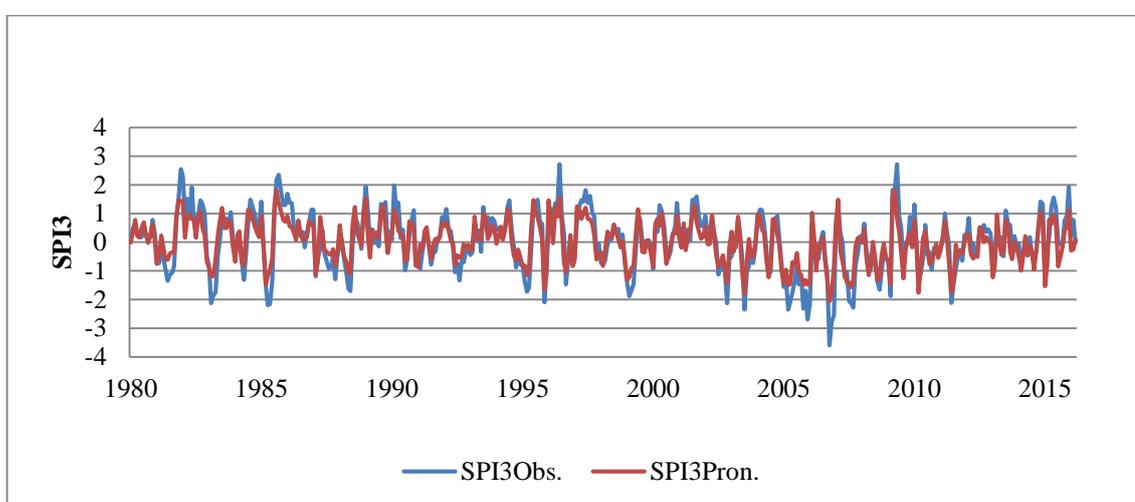


Figura 3.22. Correlación entre PDSI observados en Bariloche y pronosticados a un mes utilizando redes neuronales (1980-2016).

A continuación, se presentan las figuras del SPI para las mismas tres localidades consideradas con el PDSI. Se observa el entrenamiento del SPI3 en las Figuras 3.23, 3.26 y 3.29; la validación en las Figuras 3.24, 3.27 y 3.30 y el ajuste en las Figuras 3.25, 3.28 y 3.31 mientras que para el SPI12, se observa el entrenamiento en las Figuras 3.32, 3.35 y 3.38; la validación en las Figuras 3.33, 3.36 y 3.39 y el ajuste en las Figuras 3.34, 3.37 y 3.40 de las tres localidades seleccionadas, e idéntica información para otras cinco localidades se detalla en el (**Anexo 3: ENTRENAMIENTO, VALIDACIÓN Y AJUSTE DE LOS ÍNDICES PDSI, SPI3 Y SPI12, b. SPI3 y SPI12**).



Figuras 3.23. Valores de SPI3 observados en Resistencia y pronosticados a un mes durante el entrenamiento de RN (1980-2016).

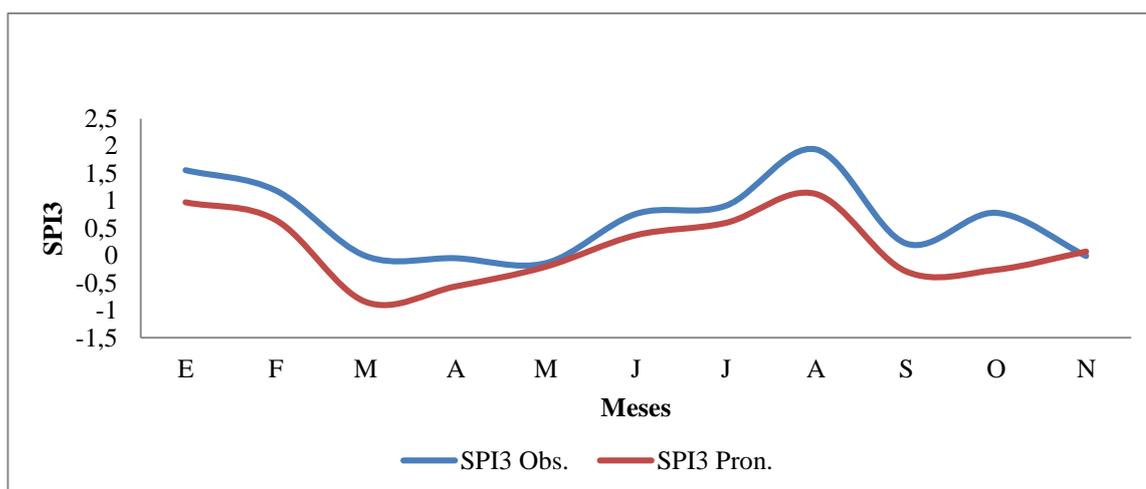


Figura 3.24. Valores de SPI3 observados en Resistencia y pronosticados durante la validación de RN (2016).

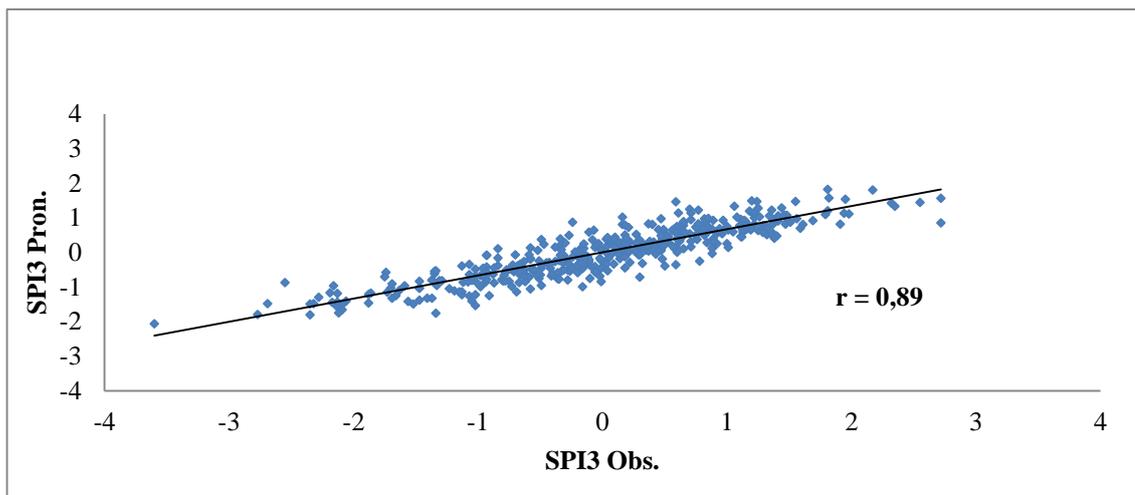
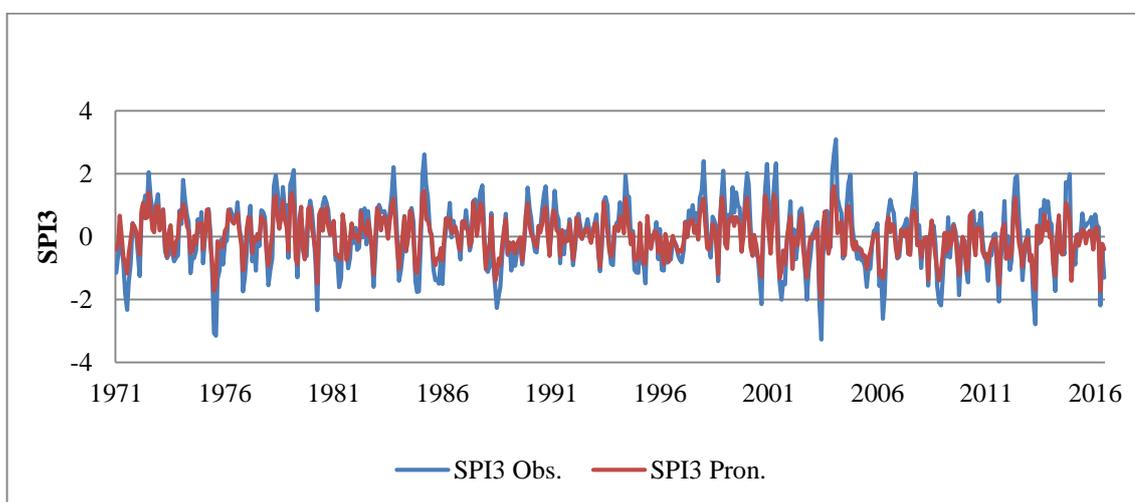


Figura 3.25. Correlación entre SPI3 observados en Resistencia y pronosticados a un mes utilizando redes neuronales (1980-2016).



Figuras 3.26. Valores de SPI3 observados en Río Cuarto y pronosticados a un mes durante el entrenamiento de RN (1971-2016).

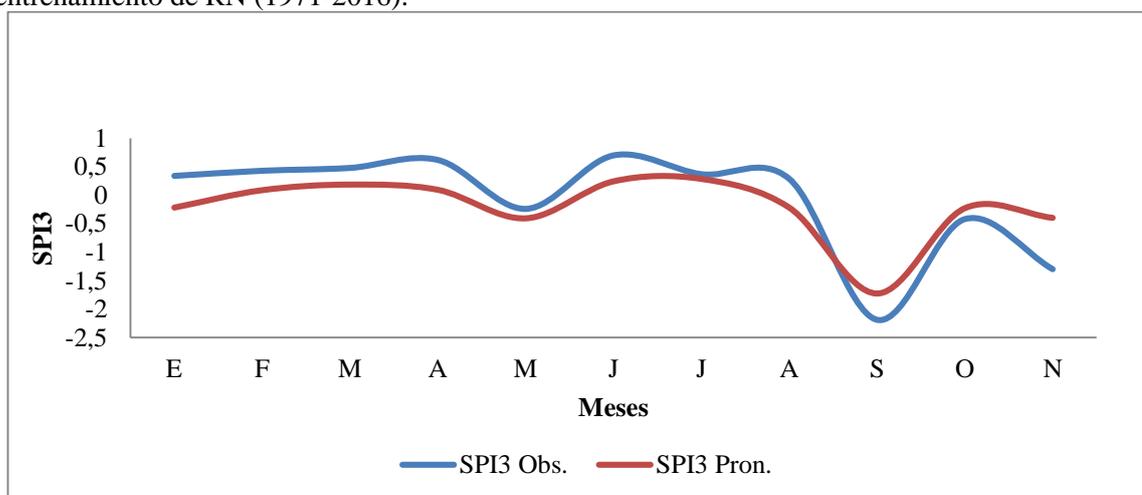


Figura 3.27. Valores de SPI3 observados en Río Cuarto y pronosticados durante la validación de RN (2016).

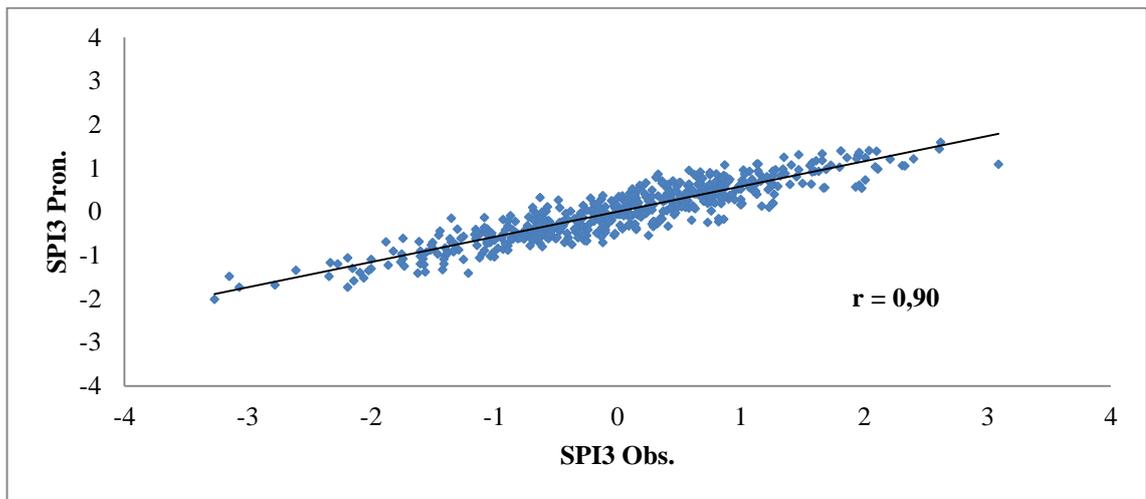
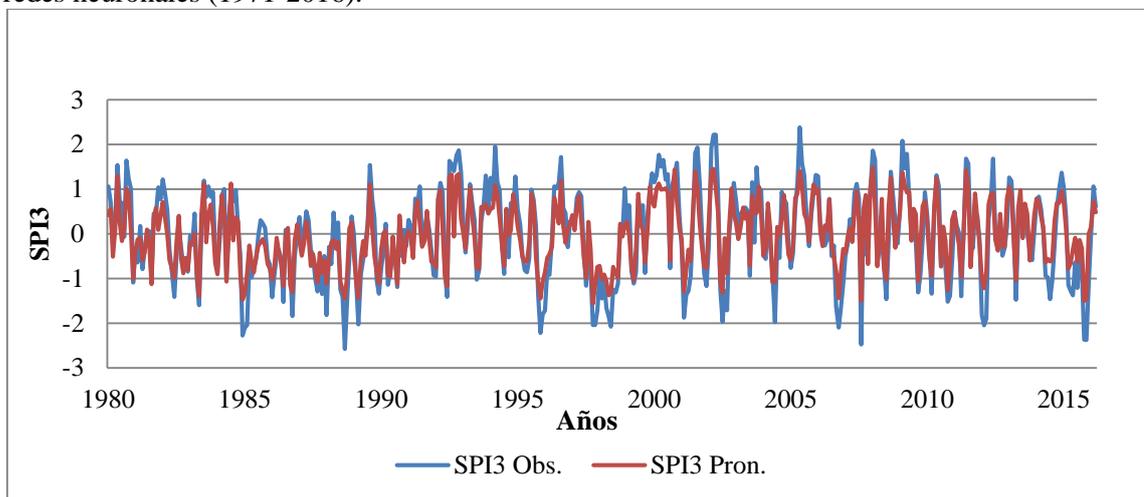


Figura 3.28. Correlación entre SPI3 observados en Río Cuarto y pronosticados a un mes utilizando redes neuronales (1971-2016).



Figuras 3.29. Valores de SPI3 observados en Bariloche y pronosticados a un mes durante el entrenamiento de RN (1980-2016).

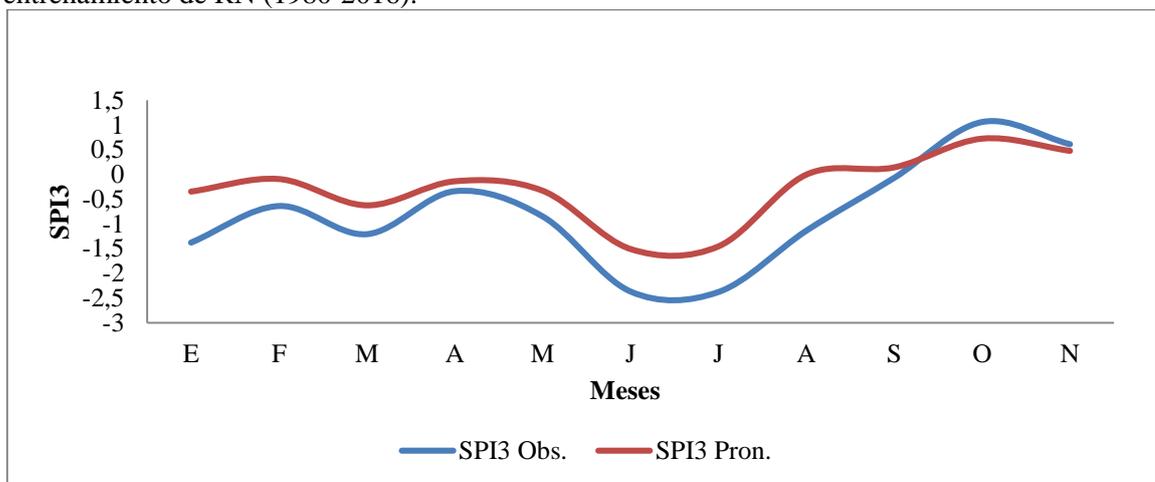


Figura 3.30. Valores de SPI3 observados en Bariloche y pronosticados durante la validación de RN (2016).

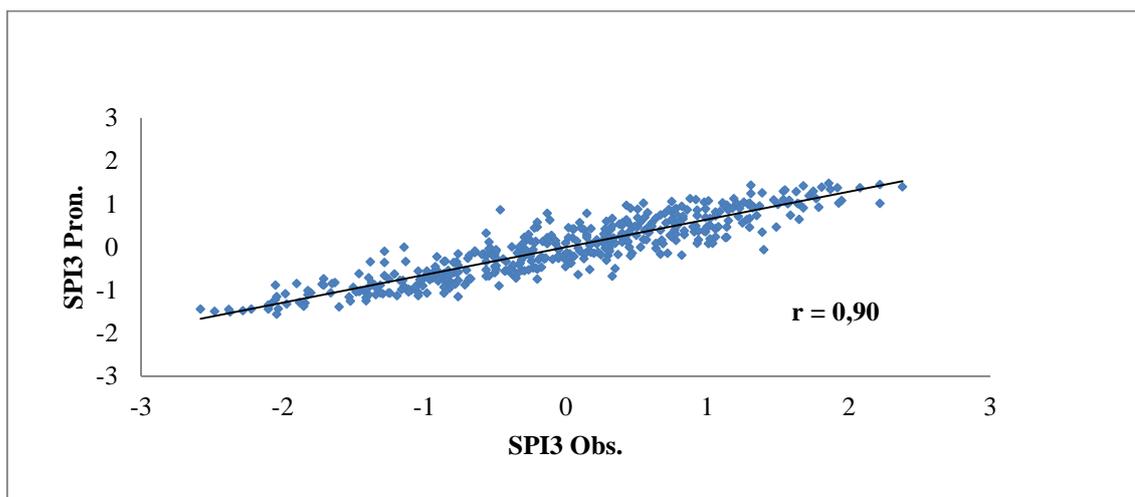
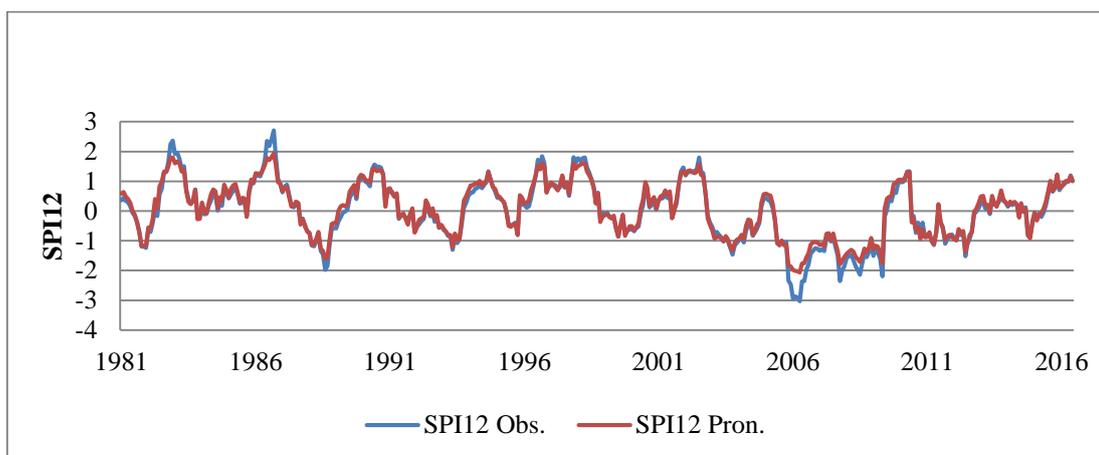


Figura 3.31. Correlación entre SPI3 observados en Bariloche y pronosticados a un mes utilizando redes neuronales (1980-2016).

A continuación, se presentan los gráficos del índice SPI12 para las localidades consideradas en el SPI3:



Figuras 3.32. Valores de SPI12 observados en Resistencia y pronosticados a un mes durante el entrenamiento de RN (1981-2016).

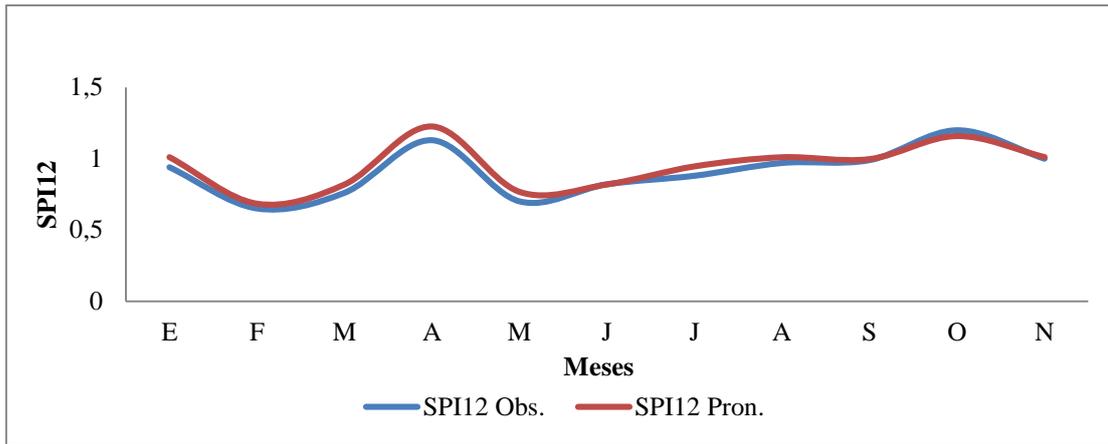


Figura 3.33. Valores de SPI12 observados en Resistencia y pronosticados durante la validación de RN (2016).

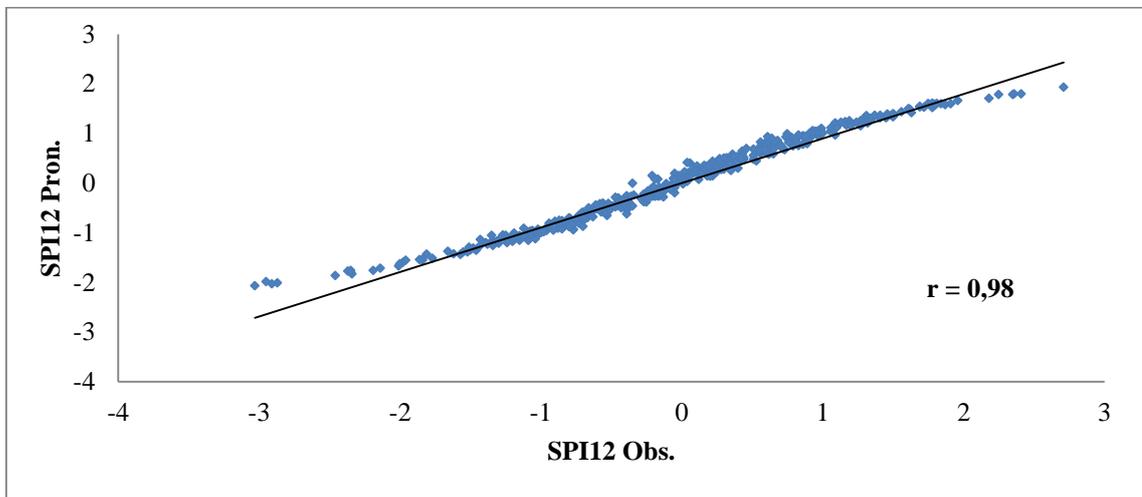
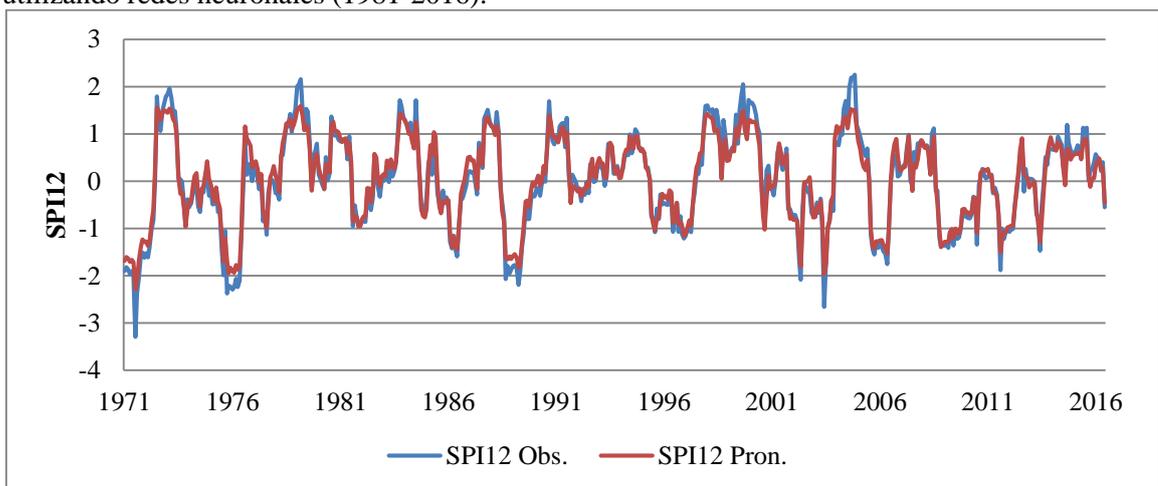


Figura 3.34. Correlación entre SPI12 observados en Resistencia y pronosticados a un mes utilizando redes neuronales (1981-2016).



Figuras 3.35. Valores de SPI12 observados en Río Cuarto y pronosticados a un mes durante el entrenamiento de RN (1971-2016).

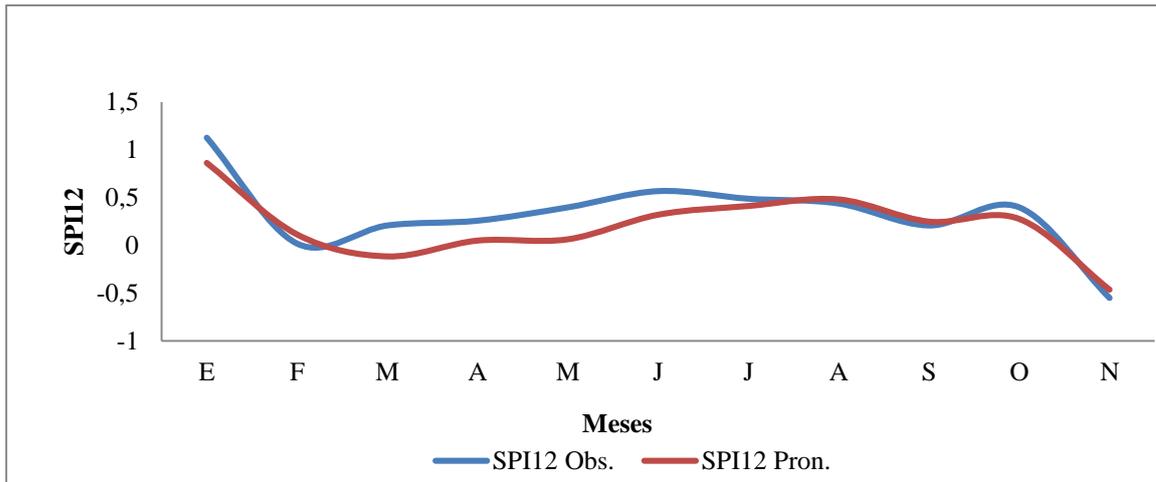


Figura 3.36. Valores de SPI12 observados en Río Cuarto y pronosticados durante la validación de RN (2016).

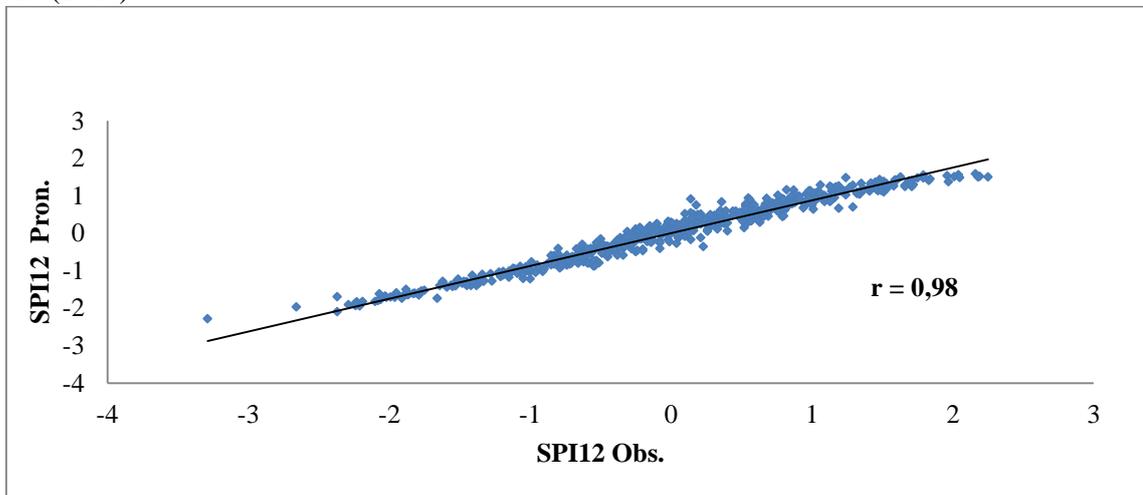
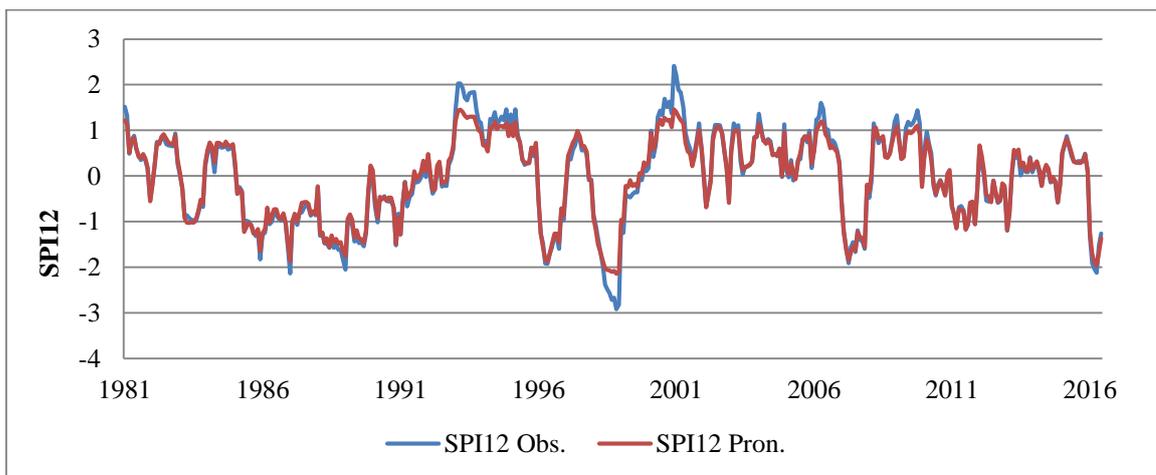


Figura 3.37. Correlación entre SPI12 observados en Río Cuarto y pronosticados a un mes utilizando redes neuronales (1971-2016).



Figuras 3.38. Valores de SPI12 observados en Bariloche y pronosticados a un mes durante el entrenamiento de RN (1981-2016).

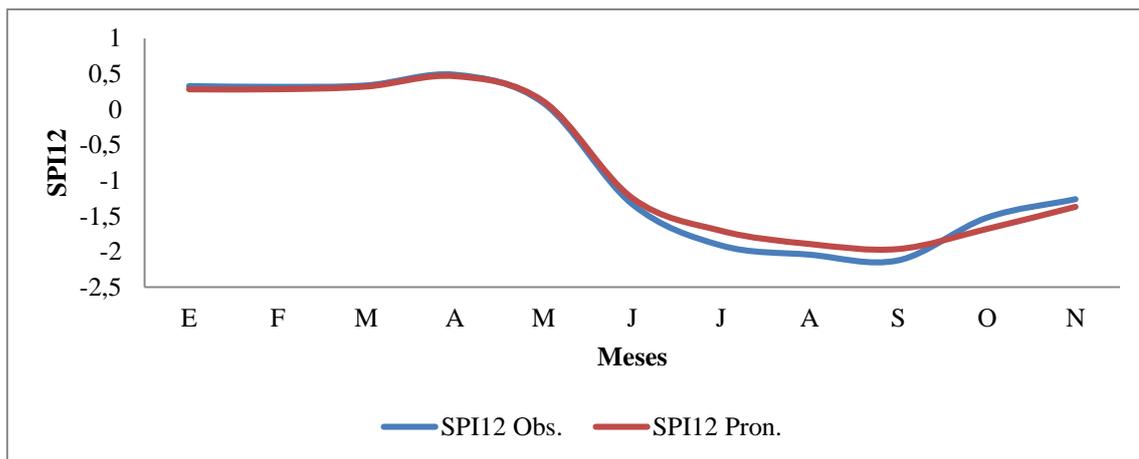


Figura 3.39. Valores de SPI12 observados en Bariloche y pronosticados durante la validación de RN (2016).

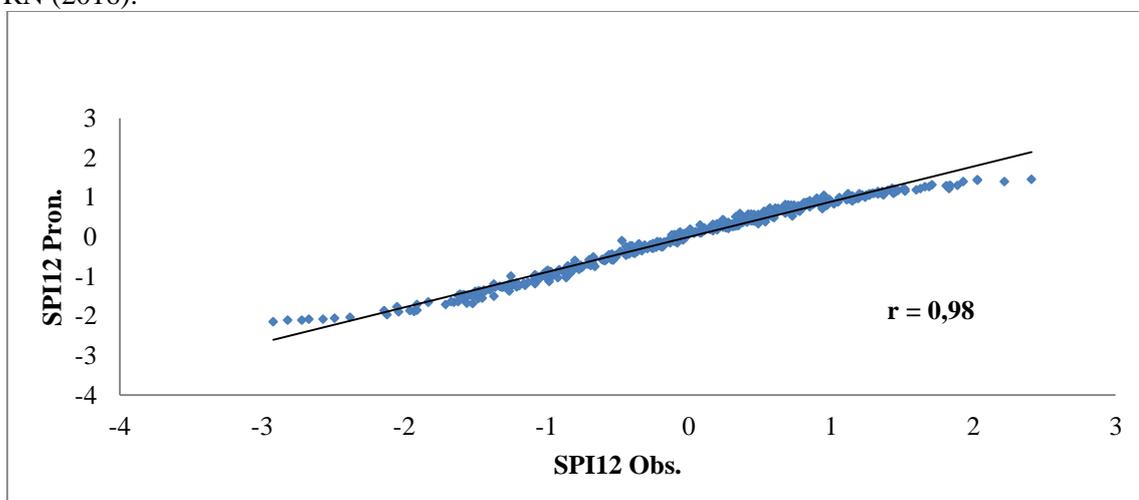


Figura 3.40. Correlación entre SPI12 observados en Bariloche y pronosticados a un mes utilizando redes neuronales (1981-2016).

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO EN LOS PRONOSTICOS DE LOS ÍNDICES PDSI, SPI3 y SPI12

Se realizó un análisis del coeficiente de determinación R^2 , del índice de acuerdo (Index of agreement), del RMSE (raíz cuadrada del error cuadrático medio) y MAE (error absoluto medio), entre los valores observados y pronosticados históricamente para evaluar comparativamente el comportamiento de los índices (Tabla 3.3).

En las tres localidades seleccionadas y para los tres índices se observó que hubo un buen ajuste para el PDSI entre los valores observados y pronosticados en las estaciones evaluadas con coeficientes de determinación de 0,96 a 0,98 (Tabla 3.3); las otras cinco

localidades se presentan en Anexo 3:c. Resultados estadísticos. Los índices SPI12 y SPI3 presentaron valores menores de R^2 , pero en un rango aceptable (Tabla 3.3); las otras cinco localidades se presentan en Anexo 3: c. Resultados estadísticos. El RMSE tuvo una mayor fluctuación entre las ocho localidades y para los tres índices. Los menores valores de RMSE y MAE corresponden a Resistencia y Bariloche para el SPI12 (0,19; 0,12) y (0,20; 0,12) respectivamente.

Tabla 3.3 Coeficientes de determinación R^2 , Índice de acuerdo (d), raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE) y error absoluto medio (MAE) para PDSI, SPI3 y SPI12 obtenidos de las localidades de Resistencia, Río Cuarto y Bariloche, Período:1980-2016.

Localidades	R^2			d			RMSE			MAE		
	PDSI	SPI3	SPI12	PDSI	SPI3	SPI12	PDSI	SPI3	SPI12	PDSI	SPI3	SPI12
Resistencia NEA	0,98	0,80	0,98	0,99	0,92	0,99	0,38	0,47	0,19	0,28	0,38	0,12
Río Cuarto RP	0,98	0,83	0,96	0,99	0,90	0,99	0,43	0,50	0,21	0,28	0,39	0,16
Bariloche RPA	0,97	0,80	0,97	0,98	0,92	0,99	0,43	0,49	0,20	0,32	0,39	0,12

PRONÓSTICOS DE LOS EXTREMOS HÍDRICOS

A continuación, se analizan los mapas de pronósticos para los índices PDSI pronosticados y observados para los meses de julio, agosto y setiembre 2017 donde se observó gran similitud entre los mapas de uno y dos meses de pronosticados, respecto a los observados, en la categoría de extrema humedad para la región central pampeana y noreste de Patagonia. Esta abarcó el sur y sureste de Córdoba, sur de San Luis, La Pampa, noreste de Río Negro. También se realizó el pronóstico de los índices SPI3 y SPI12 mensuales de otros meses y se realizó una discusión de la extensión geográfica sobre el grado de coincidencia o no de las categorías de sequía extrema y humedad extrema.

Posteriormente, se presentan y discuten los resultados para tres localidades selectas correspondientes una al norte la segunda centro y la tercera al sur del país. Los resultados y discusión de las otras cinco localidades restantes son presentados en el (Anexo 3: d. PDSI, SPI3 y SPI12 observados y pronosticados (2015-2018)).

PRONÓSTICOS DEL PDSI

En las figuras siguientes se ilustran los mapas de PDSI observados y pronosticados mensuales, a fin de comparar las diferencias y/o semejanzas entre ambos. En los mapas del PDSI pronosticados para julio, agosto y setiembre de 2017 se puede observar una buena correspondencia entre los valores pronosticados y observados bajo condiciones de excesos hídricos durante dichos meses en la Región Pampeana. También se observa la evolución mensual del PDSI para el resto del territorio nacional donde prevalecen condiciones normales y secas con sequía moderada a severa en el norte de Córdoba, San Juan, oeste de Patagonía (Figura 3.41).

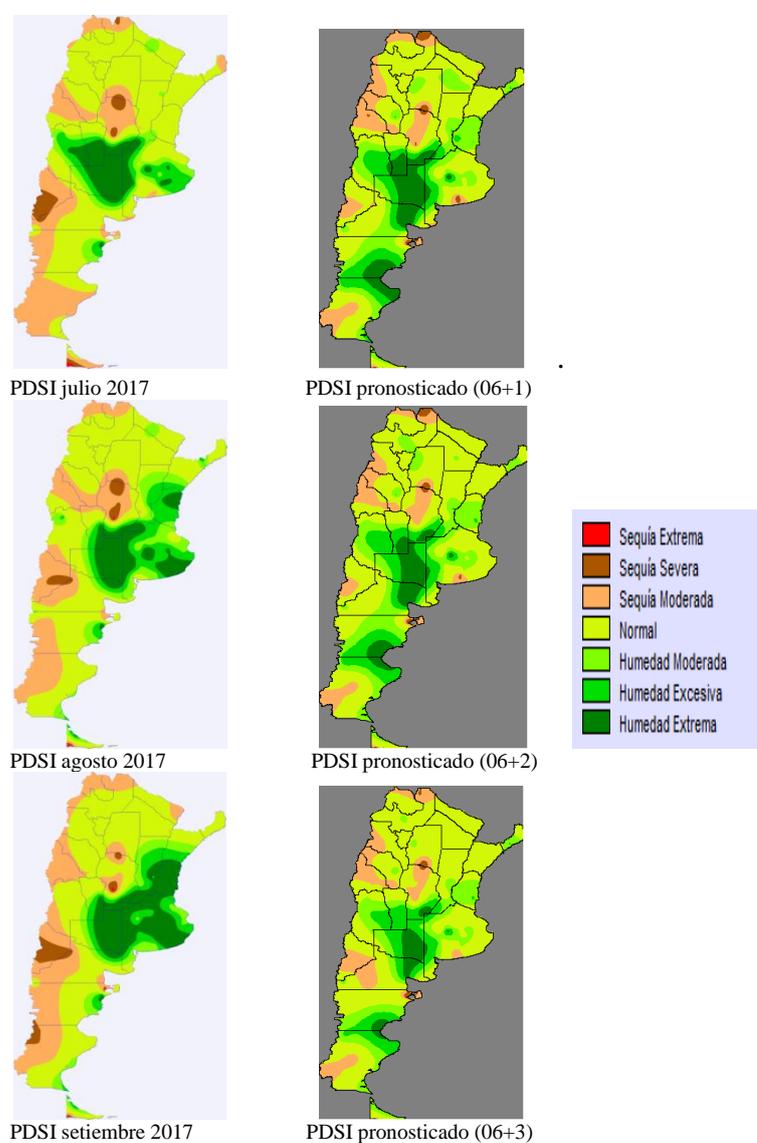
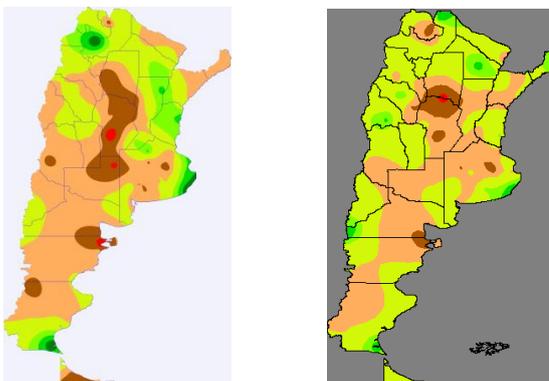


Figura 3.41. Mapas de PDSI observados y pronosticados para julio, agosto y setiembre a partir de junio de 2017.

Durante el mes de julio se observaron condiciones de un incremento de humedad excesiva a humedad extrema en el centro de la región Pampeana y parte este de región Patagónica, particularmente en el sureste de Córdoba, sur de San Luis y Santa Fe, La Pampa hasta el noreste de Río Negro y límite oeste de la provincia de Buenos Aires. En Patagonia, Comodoro Rivadavia y Puerto Deseado se destacan con excesos hídricos debido a la ocurrencia de precipitaciones sobre los valores normales en esas localidades (BCC-Agrovoz, 2017; Jozami et al., 2017). Los pronósticos mensuales del PDSI realizado con RN muestran condiciones extremas humedad particularmente excesos hídricos en le región pampeana. Estos son coincidentes con los pronósticos estacionales de eventos húmedos obtenidos por Spennemann et al., (2017) para Sudamérica mediante la evaluación de los índices SPI (3-6) y las Anomalias Estandarizada Humedad Suelo (SSMA por sus siglas en inglés standardized soil moisture anomalies).

En el otoño e invierno del 2018, los mapas de PDSI pronosticados de mayo, junio y julio muestran que hubo similitud entre los índices observados y pronosticados, para condiciones muy marcadas de sequías extremas y severas en el centro del país, (CREAN, 2018; ORA, 2018; NOAA, 2018; SMN, 2018). En general, se observaron las siguientes condiciones: sequías moderadas en la región central hacia el sureste y sur de Argentina con sequías severas en el norte de la provincia de Córdoba y extremas en Villa María del Río Seco, sur de Santiago del Estero y en Puerto Madryn. Las provincias del NOA y NEA, zona cuyana, sureste de Buenos Aires, Neuquén, oeste de Río Negro y Patagonia Este se mantuvieron con condiciones de humedad normal y moderada (Figura 3.42).



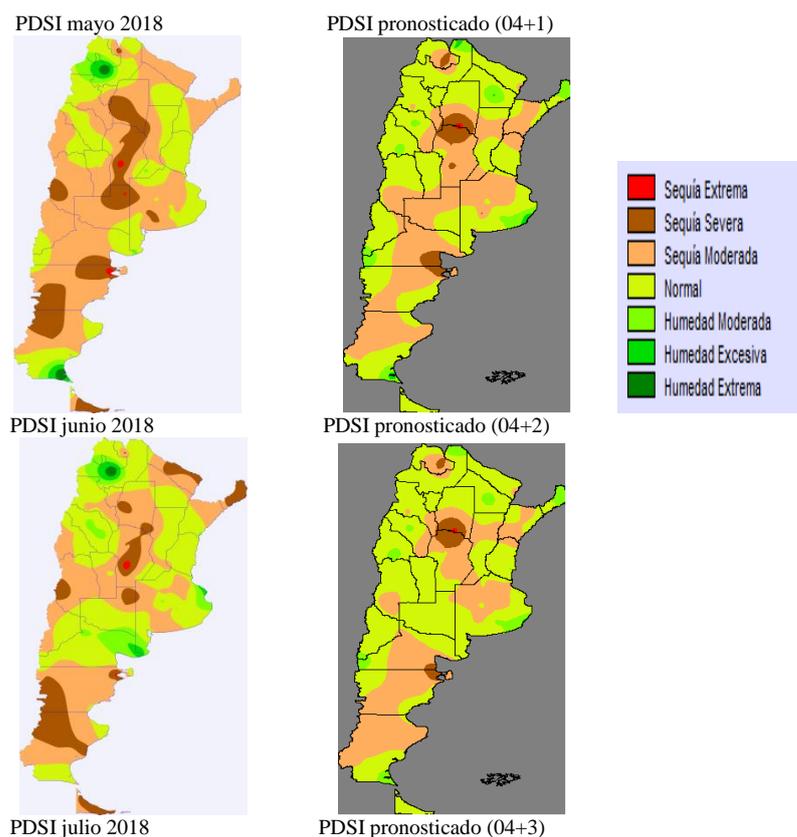


Figura 3.42. Mapas de PDSI observados y pronosticados para mayo, junio y julio a partir de abril de 2018.

Se comenzó a elaborar los mapas del PDSI pronosticado a partir del índice observado en el mes de abril de 2017. Se obtuvo el pronóstico para los meses de mayo (+1), junio (+2) y julio (+3) de forma mensual. Los mapas con los pronósticos de los meses siguientes hasta noviembre de 2019 se pueden observar en el (Anexo 4: Mapas de Pronósticos PDSI a 1 (+1), 2 (+2) y 3 (+3) meses).

PRONÓSTICOS DEL SPI3

Se elaboraron los mapas con el pronóstico del SPI3 a partir del índice observado para diciembre de 2016, pronosticando enero, febrero, marzo del 2017. **Los pronósticos de los meses siguientes hasta agosto de 2019 se presentan en el (Anexo 5: Mapas de PRONÓSTICOS SPI3 a 1 (+1), 2 (+2) y 3 (+3) meses).** Los mapas del SPI3 pronosticado para enero, febrero y marzo del 2017 nos muestran hubo mayores diferencias entre mapas observados y pronosticados, donde predominan condiciones de excesos hídricos en áreas de la provincia Jujuy mientras que los observados tienen esta categoría la provincia de

Santa Fe, parte de Entre Ríos de la región Pampeana (Agrovoz 2017; Jozami 2017) y en Patagonía. En las regiones Pampeana y Cuyana en general se registran sequías moderadas y condiciones normales (Figura 3.43). Los meses de abril, mayo y junio de 2018 mejoran levemente los pronósticos a un mes, bajo condiciones de deficiencias, presentando los mapas observados condiciones de sequía extrema y severa en el centro del país, con diferencias en los mapas de índices pronosticados que muestran sequías moderadas. (Figura 3.44).

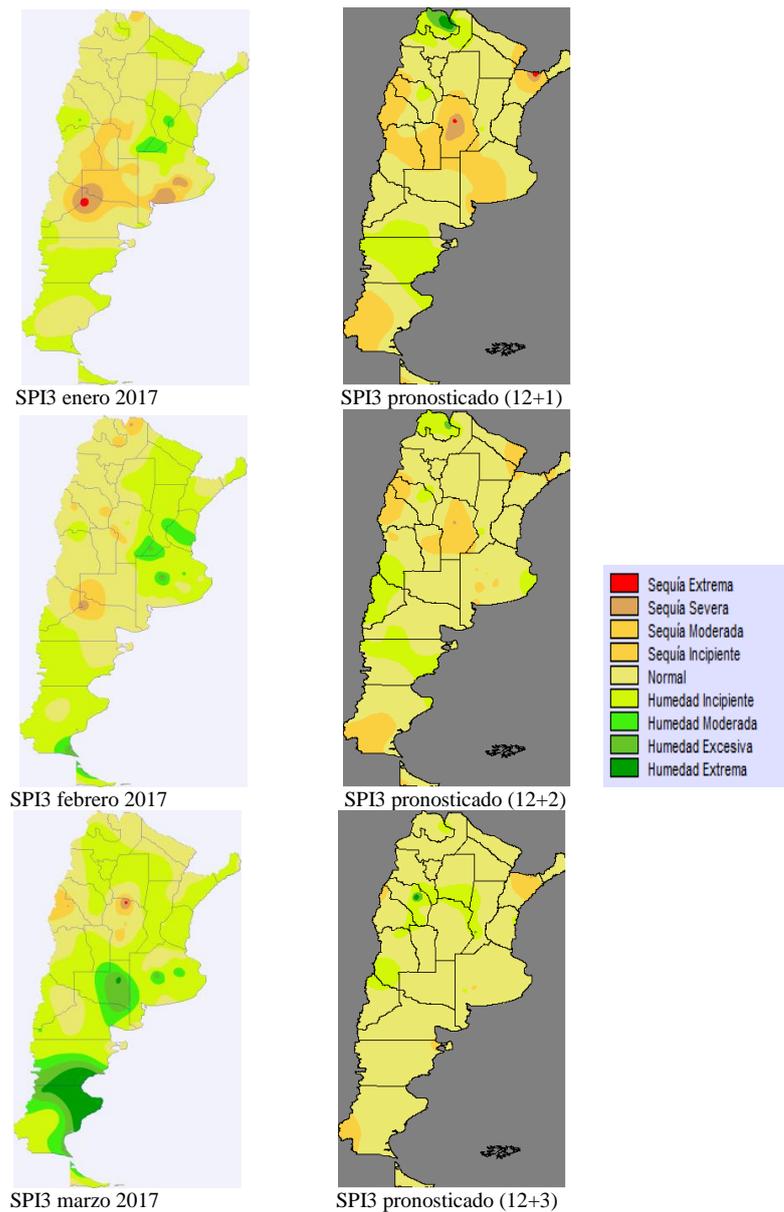


Figura 3.43. Mapas de SPI3 observados y pronosticados para enero, febrero y marzo de 2017.

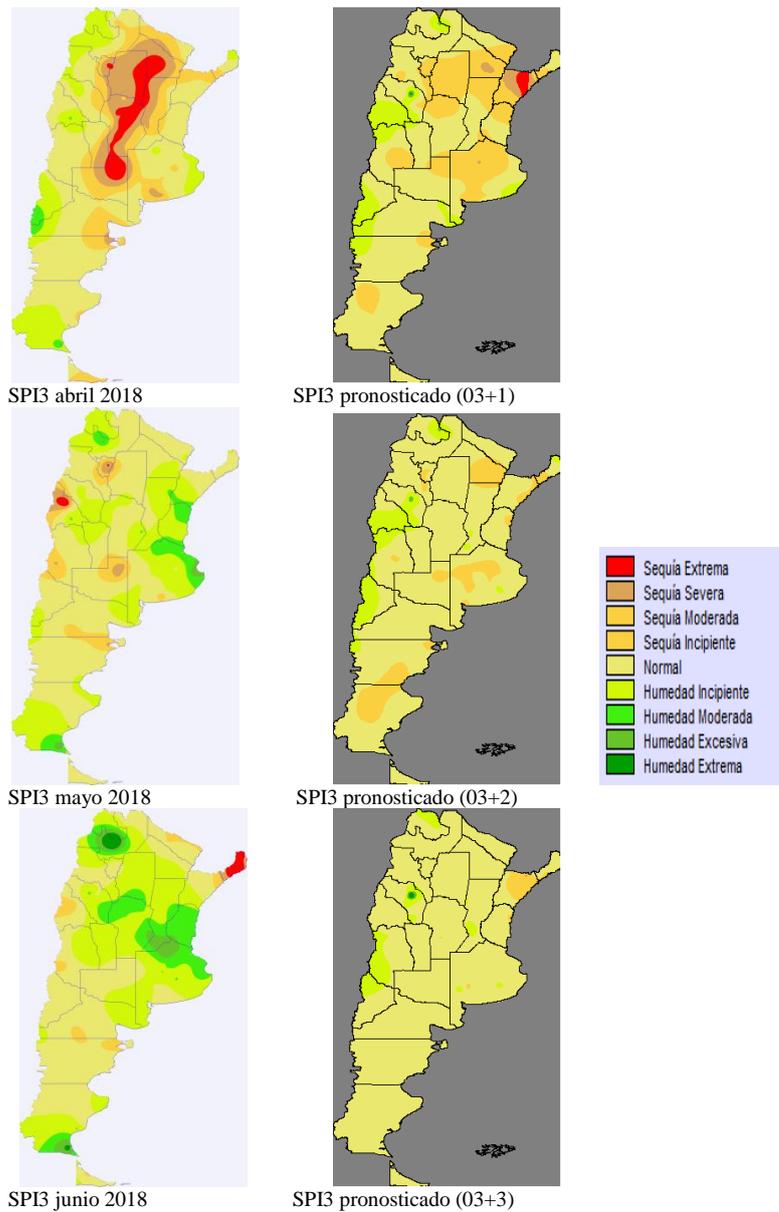


Figura 3.44. Mapas de SPI3 observados y pronosticados para abril, mayo y junio a partir de marzo de 2018.

Existen considerables diferencias entre las categorías de sequías encontradas con respecto a los mapas observados y pronosticados para el SPI3 a escala de todo el país. En los mapas pronosticados para enero, febrero y marzo de 2017 se observa condiciones de normal a sequías moderadas cuando los observados están marcando condiciones de humedad moderada para la región NEA, Pampeana. Hay mayor similitud para la región Patagónica para el el primer y segundo mes pronosticado. Esto señala diferencias regionales marcadas confirmando lo señalado por Saha et al. (2010; 2006), que observó en

los EE.UU que el rendimiento de los pronósticos depende fuertemente de la región y de la estación considerada. Respeto a las diferencias encontradas de SPI3 con lo pronosticado por Spennemann et al., (2017), debido a que utilizaron los SPI3 y SPI6 donde este último al tener una escala de mayor tiempo agrega autocorrelación a la serie temporal, mejorando el comportamiento del pronóstico del SPI6 respecto al SPI3. Dicho comportamiento se observa en otoño e invierno dado el incremento de humedad de enero a marzo del 2017 en la región NEA, Pampeana y este de Patagonía.

PRONÓSTICOS DEL SPI12

Se elaboraron los mapas con pronósticos utilizando los valores del SPI12 de abril de 2017 y pronosticando mayo, junio y julio. Los pronósticos de los meses siguientes hasta noviembre de 2019 se presentan en el (Anexo 6: PRONÓSTICOS SPI12). Este proceso permitió comparar los mapas del SPI12 observados y pronosticados mensualmente y se pudo determinar si presentan diferencias y/o semejanzas entre los mismos.

En los pronósticos del SPI12 se pudo observar humedad excesiva en las provincias de Entre Ríos, Buenos Aires, La Pampa y la zona de Trelew en Chubut. Se señalan condiciones de humedad moderada para octubre, noviembre y diciembre de 2017. Los mapas observados presentan una situación un poco más marcada o resaltada de excesos hídricos respecto de los pronósticos, pero con áreas superpuestas en ambos mapas (Figura 3.45).

Estos pronósticos SPI12 mensuales obtenidos con RN demostraron un aceptable comportamiento sobre las condiciones excesos hídricos puntualmente humedad excesiva en la región pampeana que son coincidentes con los pronósticos estacionales de eventos húmedos realizado por Spennemann et al., (2017) para el sur de Sudamérica, a través de la evaluación las Anomalías Estandarizada Humedad Suelo (SSMA).

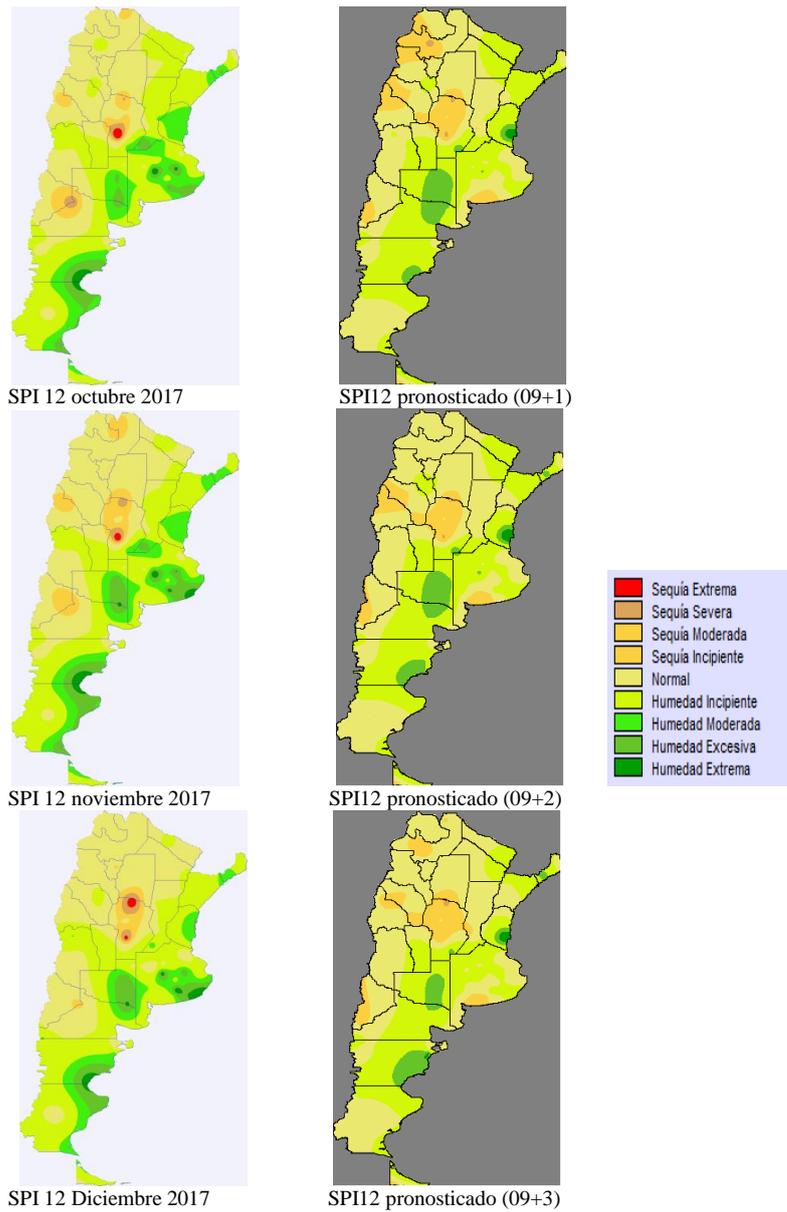


Figura 3.45. Mapas de SPI12 observados y pronosticados para octubre, noviembre y diciembre a partir de setiembre de 2017.

En forma similar se puede describir la situación ocurrida para las sequías registradas en 2018. Es posible observar el pronóstico a uno y dos meses del SPI12 para julio, agosto y setiembre de 2018 que muestran sequías severas y extremas específicamente en la provincia de Córdoba acompañadas por sequías moderadas en la RP, NOA, NEA y RPA (Figura 3.46).

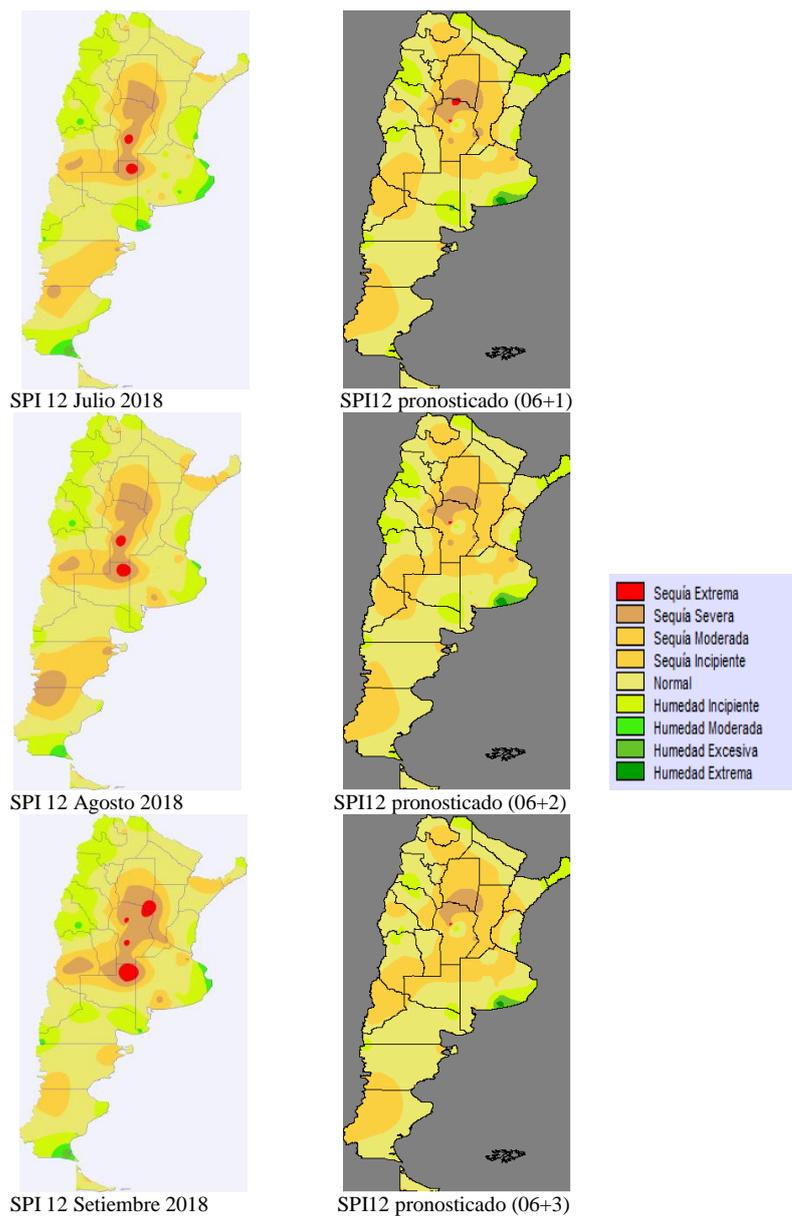


Figura 3.46. Mapas de SPI12 observados y pronosticados para julio, agosto y setiembre a partir de junio de 2018.

Si comparamos los índices SPI3 y SPI12 podemos decir que se obtuvo, en general, una mejor precisión de los pronósticos para los mapas observados y pronosticados del SPI12 respecto a los mapas observados y pronosticados del SPI3, según los mapas y grado de error obtenidos (Tabla 3.3).

PRECISIÓN DE LOS ÍNDICES PRONOSTICADOS

Como resultado del monitoreo de las condiciones de extremos hídricos a través de los diferentes índices se observa un buen comportamiento de los índices mensuales PDSI y SPI para la detección de áreas con sequías y/o excesos de humedad con relación a la época de ocurrencia, el comienzo, su intensidad, grado de evolución o desarrollo del tipo o categoría de sequía y/o exceso. Existen diferencias entre ambos índices, en el inicio, la finalización y el área de cobertura de esos eventos debido a las variables o parámetros que utiliza cada uno para el cálculo. Los parámetros estadísticos utilizados para evaluar la precisión de los pronósticos indicaron una estrecha relación entre los valores observados y pronosticados con errores variables.

PRONÓSTICO DE LOS ÍNDICES DE SEQUÍA Y EXCESOS HIDRICOS

Índice PDSI

A partir de los índices de sequías obtenidos a través del programa SOS para todas las estaciones de la red meteorológica del SMN de Argentina, se realizó el pronóstico con redes neuronales para el PDSI y aquellas localidades representativas de cada región. El uso de redes neuronales permitió pronosticar, usando el PDSI, los tres meses posteriores al mes considerado, como por ejemplo si se utiliza setiembre como mes inicial se pronosticará el PDSI para los meses de octubre, noviembre y diciembre.

El modelo de pronóstico puede hacer previsiones certeras de las sequías regionales detectadas a través del monitoreo con el SOS y predecir con elevada precisión cuando en el entrenamiento de las RN se logró un R^2 igual o superior a 0,85, de esta forma el error de los valores pronosticados en el primer mes es pequeño y para luego ir aumentando para los pronósticos del segundo y tercer mes. Esto permite a los tomadores de decisiones planificar acciones y planes o programas de mitigación para reducir el impacto del fenómeno a nivel social, ambiental y económico.

Se puede observar en las Figuras 3.47 a 3.50, el comportamiento de los índices PDSI observados y pronosticados para las tres localidades representativas en el periodo

2015-2018 mientras que las otras localidades se presentan en el Anexo 3: d. PDSI, SPI3 y SPI12 Observados y Pronosticados (2015-2018).

En el norte del país se seleccionó a la localidad de Resistencia, Chaco. Los resultados de presentan en las Figuras 3.47 y 3.48.

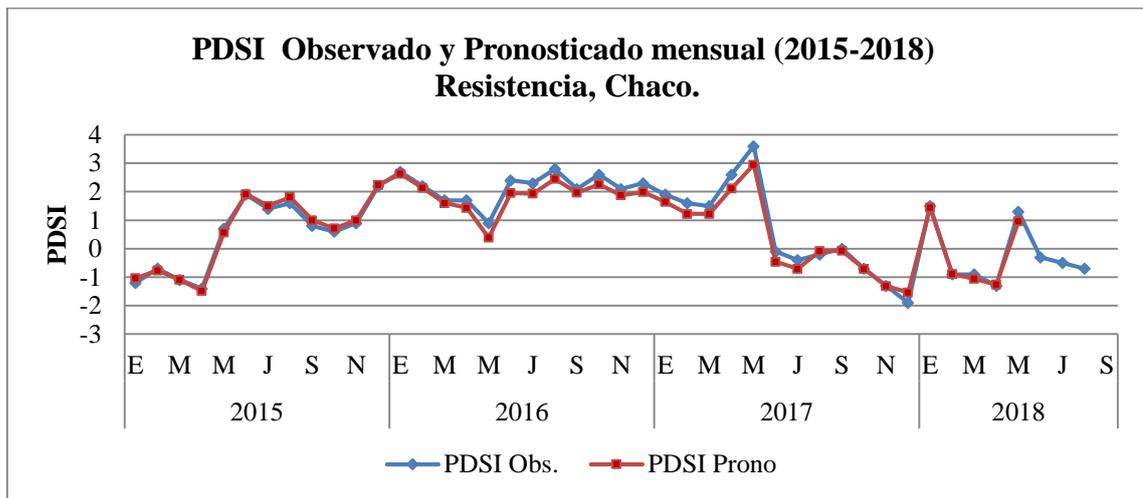


Figura 3.47. Índices PDSI observados y pronosticados para Resistencia, Chaco, período 2015-2018.

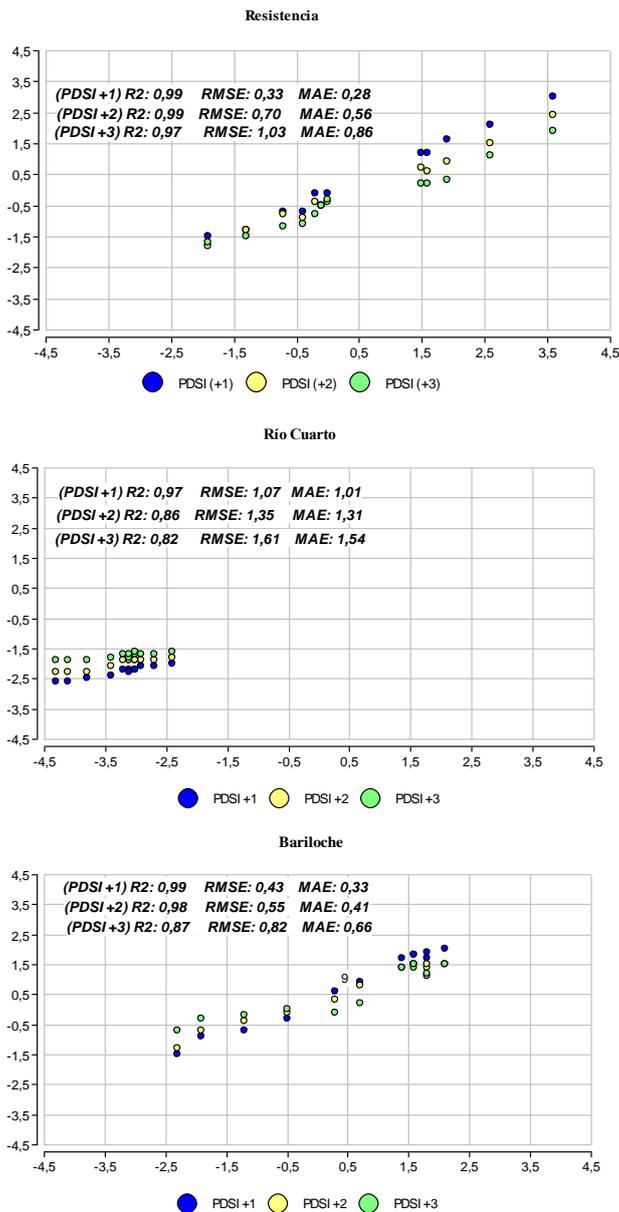


Figura 3.48. Valores de los PDSI observados y pronosticados (+1, +2 y +3) para localidades selectas durante 2017.a. Resistencia, Chaco. b. Río Cuarto, Córdoba. c. Bariloche, Río Negro.

Los valores del PDSI observados para Resistencia son prácticamente iguales a los pronosticados aún para 3 meses presentando valores de R^2 cercanos a la unidad. Los valores RMSE aumentan de 0,33 a 1,03 para pronósticos de 1 y 3 meses, respectivamente. Lo cual indica la posibilidad de usar los valores pronosticados hasta tres meses para fines operacionales de alerta temprana y elaborar medidas de mitigación.

Para el centro del país se seleccionó a Río Cuarto y los resultados se presentan en las Figuras 3.48 y 3.49. El período analizado fue de enero a diciembre de 2017. Se realizó el pronóstico a partir de enero para los meses siguientes de 2017.

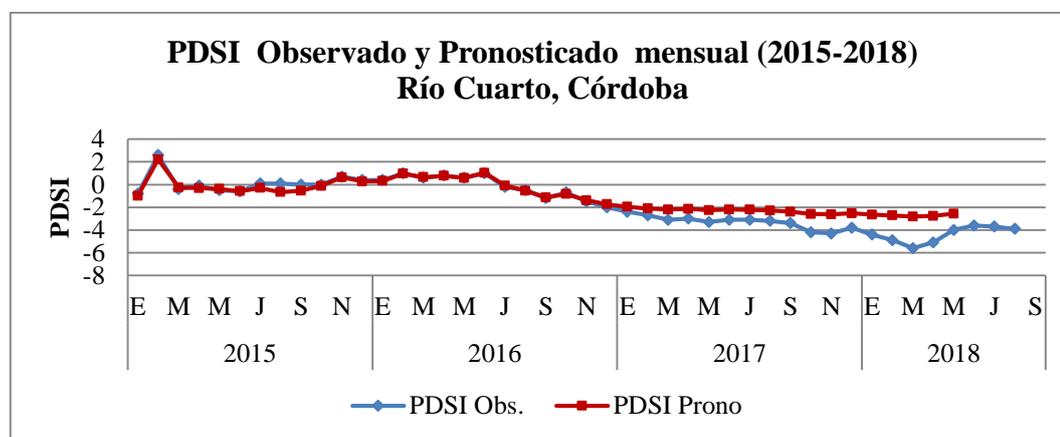


Figura 3.49. Índices PDSI observados y pronosticados para Río Cuarto, Córdoba, período 2015-2018.

Los valores pronosticados son similares a los índices observados. A partir de marzo de 2017, las diferencias entre los índices son mayores con condiciones de sequías severas desde setiembre a abril de 2018 para los observados y condiciones de sequías moderadas en los pronosticados. El valor del índice pronosticado sobreestimó ligeramente al observado a partir de enero 2017, pero mantuvo la misma tendencia (Figura 3.49).

Durante la campaña 2016/2017 se registraron excesos hídricos que produjeron retrasos en las labores de siembras de los cultivos de soja y maíz en el norte de Buenos Aires, sur y sureste de Córdoba, sur y centro de Santa Fe y noroeste de Entre Ríos. Santa Fe fue la provincia más afectada por anegamientos, sumado a que desde etapas tempranas se produjeron enfermedades fúngicas en gran parte del área implantada con trigo (<http://www.rosariofinanzas.com.ar/informe-agro-resumen-semanal-13-05-18>; Coninagro, 2017).

Existió una marcada diferencia entre la zona noroeste y sur de Buenos Aires donde hubo excesos hídricos en la primera y sequías en la segunda coincidiendo con las sequías de Pilar y Río Cuarto como se puede observar en la Tabla 3.3 (**Anexo 3: d. PDSI**,

SPI3 y SPI12 Observados y Pronosticados (2015-2018)). A partir de marzo-abril de 2018 se pasa a condiciones de sequías afectando a gran parte de la región Pampeana.

En el sur del país se seleccionó a la localidad de Bariloche y los resultados se presentan en las Figuras 3.48 y 3.50. El período analizado fue de enero a diciembre de 2017 y partir de enero se realizó el pronóstico con redes neuronales para los meses siguientes.

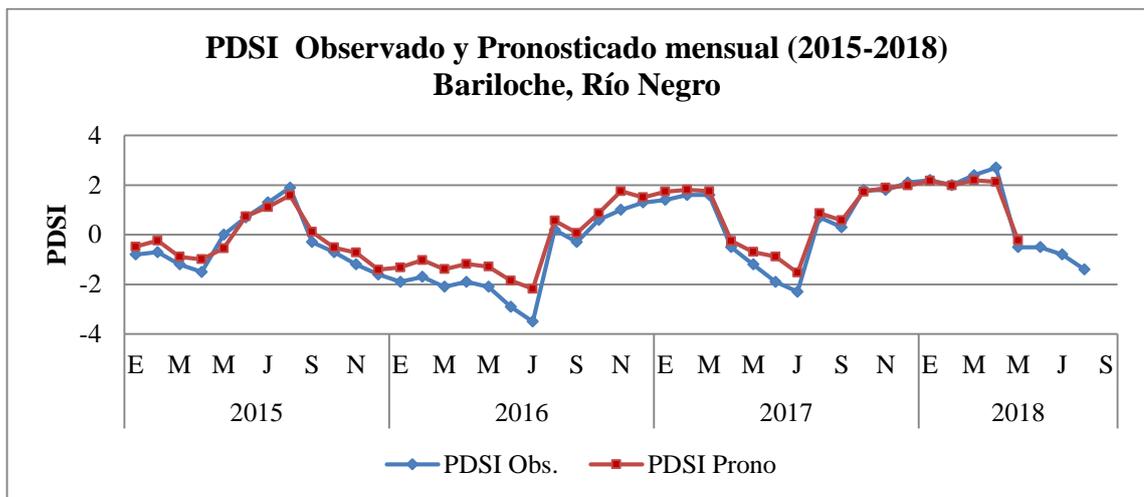


Figura 3.50. Índices PDSI observados y pronosticados para Bariloche, período 2015-2018.

Los valores del PDSI observados para Bariloche son muy similares a los pronosticados aún para pronósticos de tres meses presentando valores del R^2 y d superiores a 0,85 y RMSE inferiores a 0,50 para el primer y segundo mes pronosticado. Lo cual indica la posibilidad de usar los valores pronosticados a tres meses para fines operacionales de alerta temprana, elaborar medidas de mitigación y establecer mapas de riesgo a futuro.

Índice SPI3

La evolución mensual del índice **SPI3** pronosticado y observado se muestra en las figuras siguientes para Resistencia, Río Cuarto y Bariloche y en Anexo 3. Se encontró una buena correspondencia para Resistencia con valores de R^2 y d superiores al 0,78 para el primer y segundo mes pronosticado con un error RMSE inferior a 0,50 lo que señala la

posibilidad de usar los pronósticos de uno a dos meses (Figura 3.51). Río Cuarto y Bariloche (Figuras 3.53 y 3.54) también presentaron valores altos de R^2 y d y bajos RMSE. En las Figuras 3.51 y 3.52 se puede observar el R^2 obtenido para la localidad de Resistencia para el primer mes pronosticado disminuyendo al segundo y tercer mes.

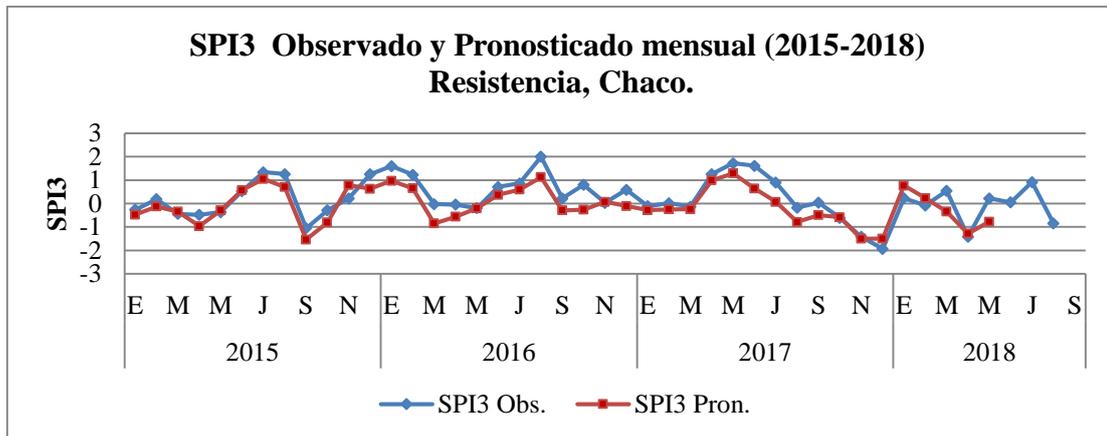
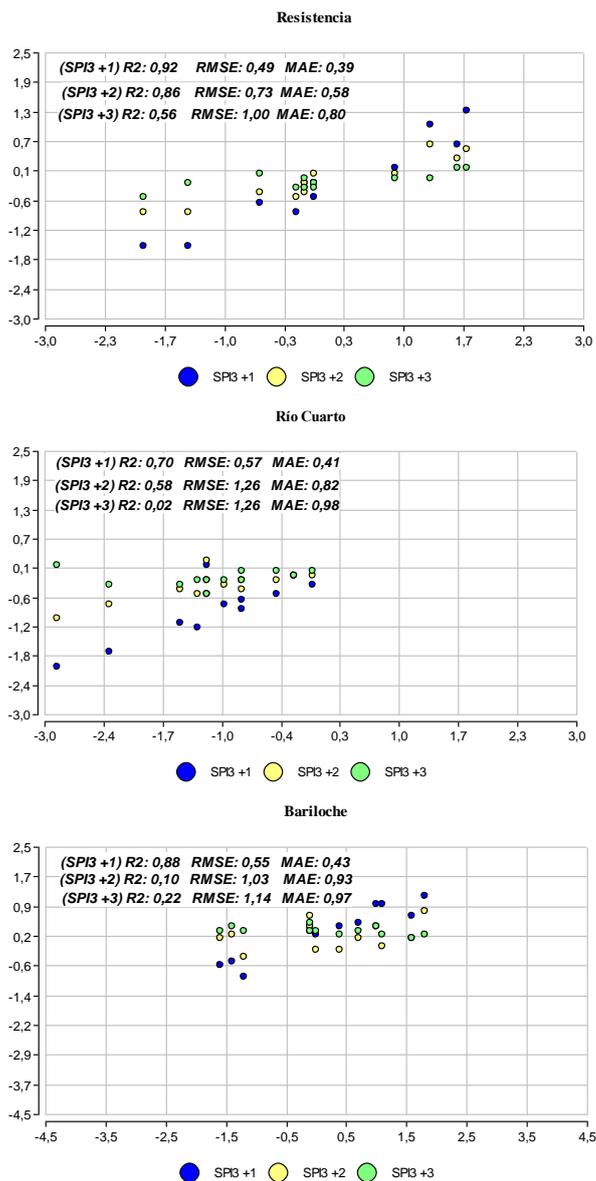


Figura 3.51. Índices SPI3 observados y pronosticados para Resistencia, Chaco, período 2015-2018.



3.52. Valores de los SPI3 observados y pronosticados (+1, +2 y +3) para localidades selectas durante 2017.a. Resistencia, Chaco. b. Río Cuarto, Córdoba. c. Bariloche, Río Negro.

Los valores del SPI3 observados para Resistencia de R^2 y d superiores a 0,85 y 0,70 pronosticados para el primer y segundo mes son aceptables para el primer mes de pronóstico. Pero los valores RMSE aumentan de 0,49 a 1,00 para pronósticos de tres meses, señalan errores importantes que se producen al tercer mes de pronóstico. Lo cual indica la poca posibilidad de usar los valores pronosticados a más de dos mes para fines operacionales de alerta temprana y elaborar medidas de mitigación.

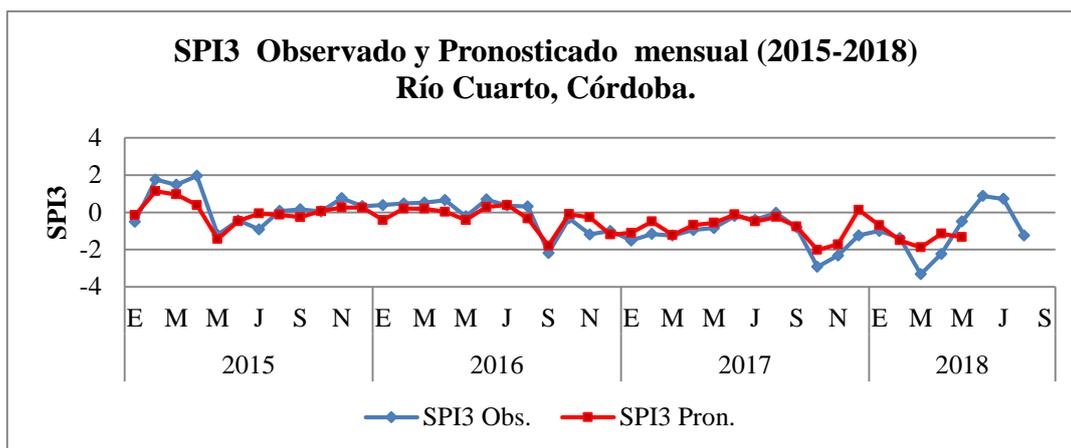


Figura 3.53. Índices SPI3 observados y pronosticados para Río Cuarto, Córdoba, período 2015-2018.

Los valores del SPI3 calculados para Río Cuarto de R^2 y d iguales a 0,70 para el primer y segundo mes pronosticado son aceptables, pero no para el tercer mes. Los valores RMSE aumentan de 0,57 a 1,26 para pronósticos de 1 a 3 meses, señalando los errores importantes que se producen a más de dos meses de antelación Tabla 3.6 (**Anexo 3: d. PDSI, SPI3 y SPI12 Observados y Pronosticados (2015-2018)**). Lo cual indica la poca posibilidad de usar los valores pronosticados a más de dos meses para fines operacionales de alerta temprana y elaborar medidas de mitigación.

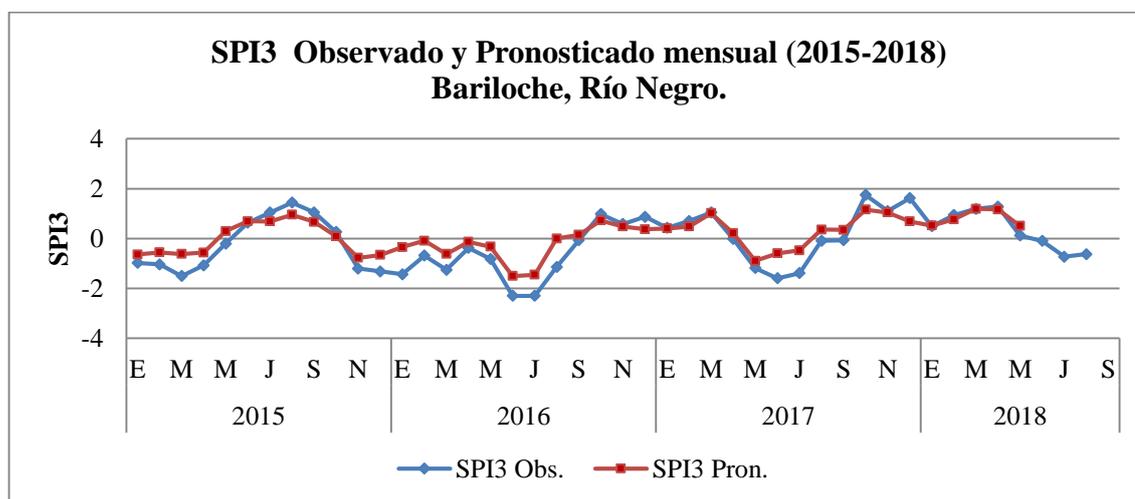


Figura 3.54. Índices SPI3 observados y pronosticados para Bariloche, Río Negro, período 2015-2018.

Los valores del SPI3 calculados para Bariloche de R^2 y d es superior a 0,80 solo para el primer mes pronosticado y RMSE igual a 0,55 son aceptables Figura 3.52 y Tabla

3.7 (Anexo 3: d. PDSI, SPI3 y SPI12 Observados y Pronosticados (2015-2018)). Lo cual indica la posibilidad de usar los valores pronosticados limitada a un mes para fines operacionales de alerta temprana y elaborar medidas de mitigación. Debido a que los valores de R^2 , d y RSME son muy bajos e irregulares para el segundo y tercer mes pronosticado indicando errores importantes.

Índice SPI12

La evolución mensual del índice **SPI12** pronosticado y observado se presenta en las figuras siguientes para las tres localidades consideradas (Figuras 3.55 a 3.58) y las otras en Anexo 3. Se observa un comportamiento aceptable para Bariloche y Resistencia donde los R^2 y d fueron muy cercanos a la unidad para los tres meses pronosticados. Asimismo, los valores del RMSE son inferiores a 0,50 en los tres meses, lo cual indica la posibilidad certera de usar los valores pronosticados para fines operacionales de alerta temprana.

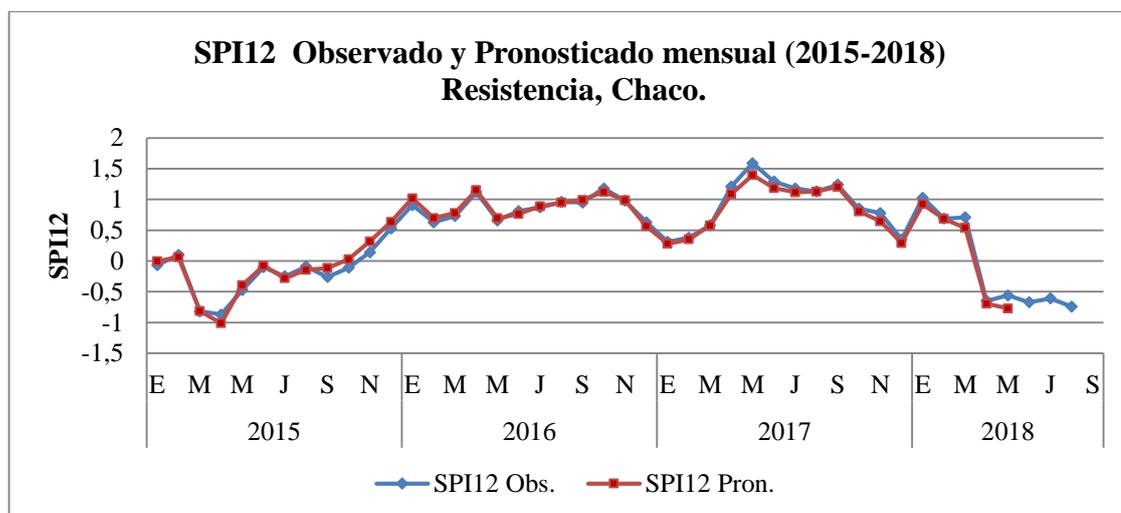


Figura 3.55. Índices SPI12 observados y pronosticados para Resistencia, Chaco, período 2015-2018.

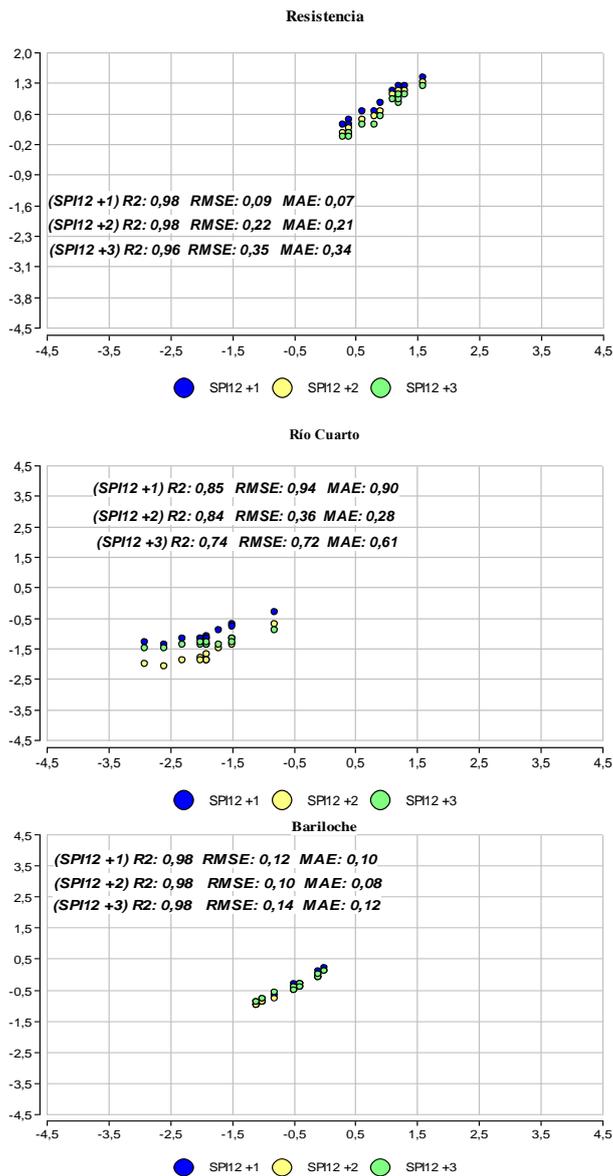


Figura 3.56. Valores de los SPI12 observados y pronosticados (+1, +2 y +3) para localidades selectas durante 2017.a. Resistencia, Chaco. b. Río Cuarto, Córdoba. c. Bariloche, Río Negro.

Los valores del SPI12 observados son muy similares a los pronosticados aún para pronósticos de 3 meses presentando valores del R^2 y d superiores a 0,90 y RMSE inferiores a 0,50 Figuras 3.55 y 3.56. Lo cual indica la posibilidad de usar los valores pronosticados para alerta temprana y elaborar medidas de mitigación.

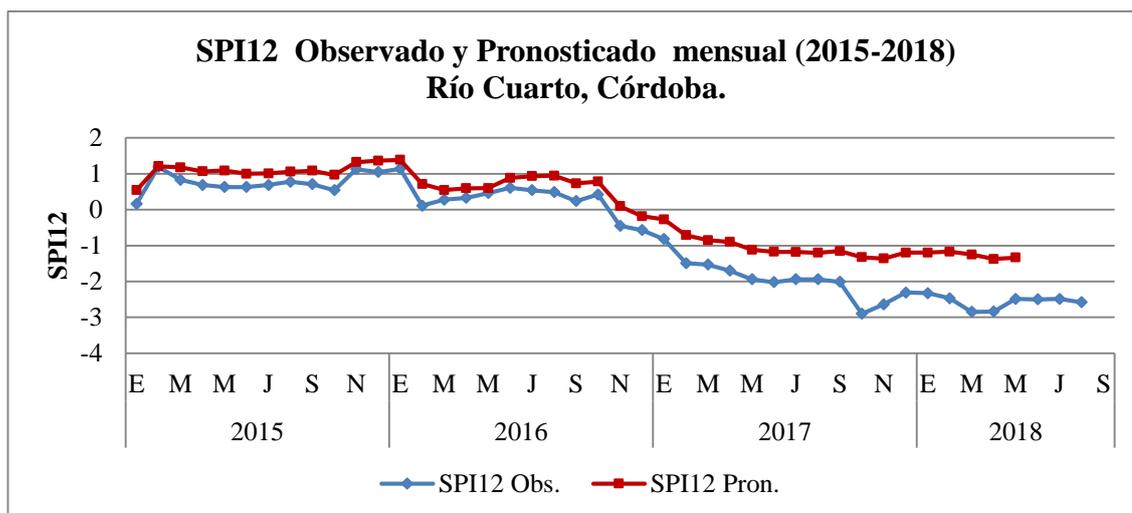


Figura 3.57. Índices SPI12 observados y pronosticados para Río Cuarto, Córdoba, período 2015-2018.

Los valores del SPI12 observados son muy similares a los pronosticados aún para pronósticos de tres meses presentando valores del R^2 superiores a 0,70. Los valores de los coeficientes de error d y el RMSE fueron muy bajos. Esto indica la posibilidad de usar los valores pronosticados para los tres meses para fines operacionales de alerta temprana y elaboración de medidas de mitigación.

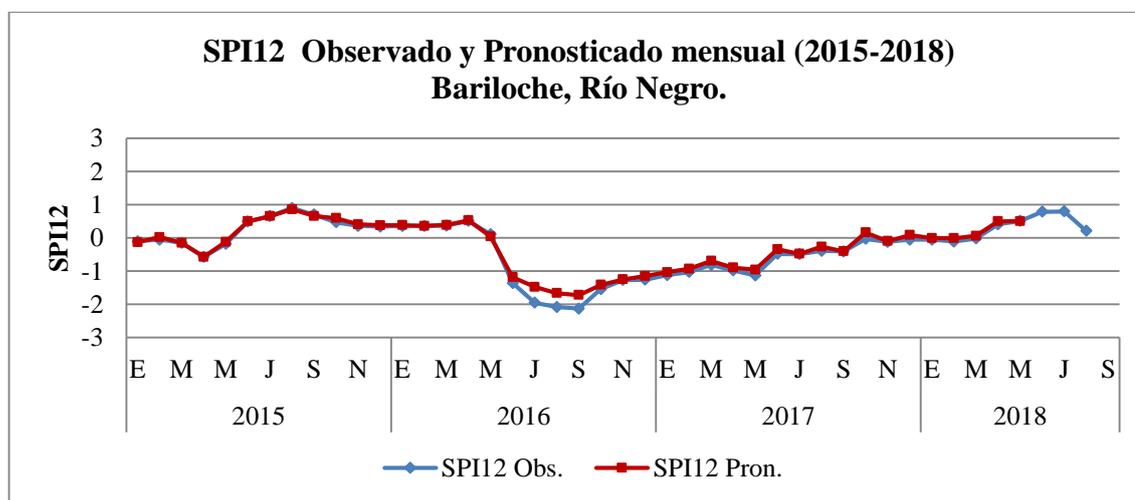


Figura 3.58. Índices SPI12 observados y pronosticados para Bariloche, Río Negro, período 2015-2018.

Los valores del SPI12 observados en Bariloche son muy similares a los pronosticados aún para pronósticos de tres meses presentando valores del R^2 y d superiores

a 0,90. Los valores de RMSE son inferiores a 0,50 Figuras 3.56 y 3.58. Lo cual indica la posibilidad de usar los valores pronosticados hasta tres meses de antelación para alerta temprana y para establecer medidas de mitigación.

OCURRENCIA DE EVENTOS EL NIÑO Y LA NIÑA Y VARIABILIDAD DE LOS INDICES PDSI Y SPI

Se **analizaron** los mapas generados con los valores del índice PDSI para noviembre, diciembre y enero coincidentes con la ocurrencia de La Niña en los años 1988-89; 1995-96 y 2007-08, de manera de puntualizar que fueron años críticos por la severidad de las sequías generalizadas que en todo el país. Entre las regiones y provincias afectadas Chaco como parte del NEA, Santiago del Estero del NOA, Chubut de la RPA y San Juan de la RC (Clarín, 2009; El Mundo, 2009; El País, 2009; Thomasz et al., 2017) (Figura 3.59).

Asimismo, con el fin de ilustrar una situación hídrica opuesta y extrema se presentan los mapas generados con los valores del índice PDSI para noviembre a enero en que se registra la ocurrencia de El Niño en los años 1982-83; 1991-92; 1997-98 y 2015-16, cuando ocurrieron excesos hídricos a nivel nacional (Figura 3.60 (.Agrovoz, 2017; Jobbágy, 2016; Zanvettor et al., 2017).

En la sequía severas y extremas ocurrida de noviembre 1988 a enero 1989 (Figura 3,59) observamos cómo se fue expandiendo la misma en las regiones NEA, parte este del NOA, RP, RC y RPA a excepción de la parte oeste del NOA y Tierra del Fuego.

El predominio de las sequías severas y extremas en la RP repercutió sobre las áreas sembradas y cosechadas como así también sobre mermas en los rendimientos de los principales cultivos. En la RPA hubo grandes pérdidas ambientales ocasionadas por incendios forestales y quemadas de bosques y pasturas naturales (Télam, 2016). Durante 1995 hubo sequías comparativamente de menor extensión geográfica y menor intensidad que las del 1988-89 que afectó en mayor grado a la RP y centro del país. En los mapas, figura 3.59 no se observa afectadas las regiones NOA, RPA y con una gran recuperación de humedad durante enero 1996 en la región NEA del país.

En 2007-08 la parte más afectada por sequías extremas y severas fue la Patagonia y con menor intensidad en el norte y centro de la provincia de Córdoba y Buenos Aires en la RP. Esto indicaría a priori que no existe una distribución geográfica del PDSI de sequías que siempre se corresponda con los eventos del Niño en un sitio determinado.

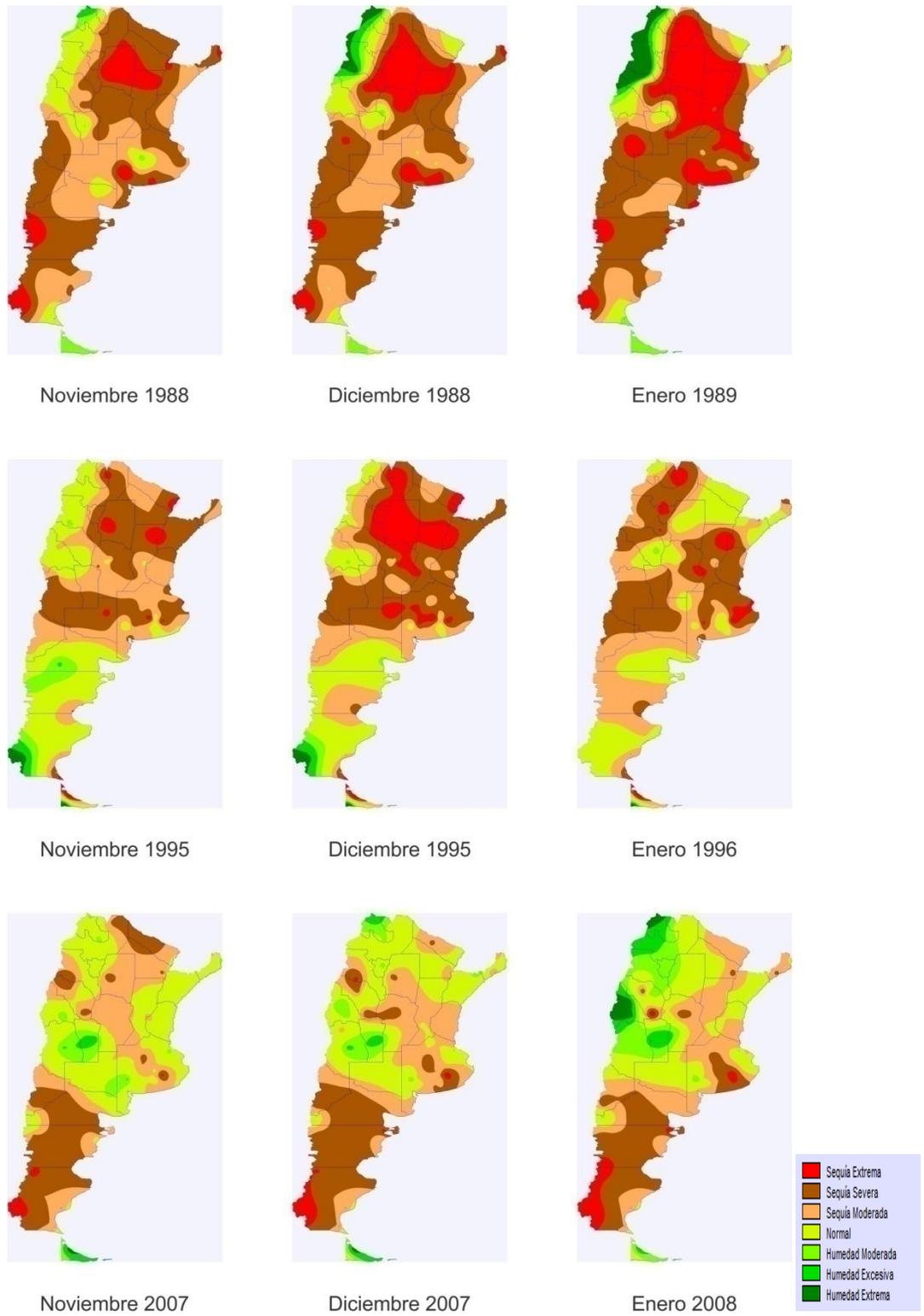


Figura 3.59 Mapas mensuales del PDSI con la distribución geográfica de sequías para los meses de noviembre, diciembre y enero en años de ocurrencia de La Niña (1988-89; 1995-96 y 2007-08).

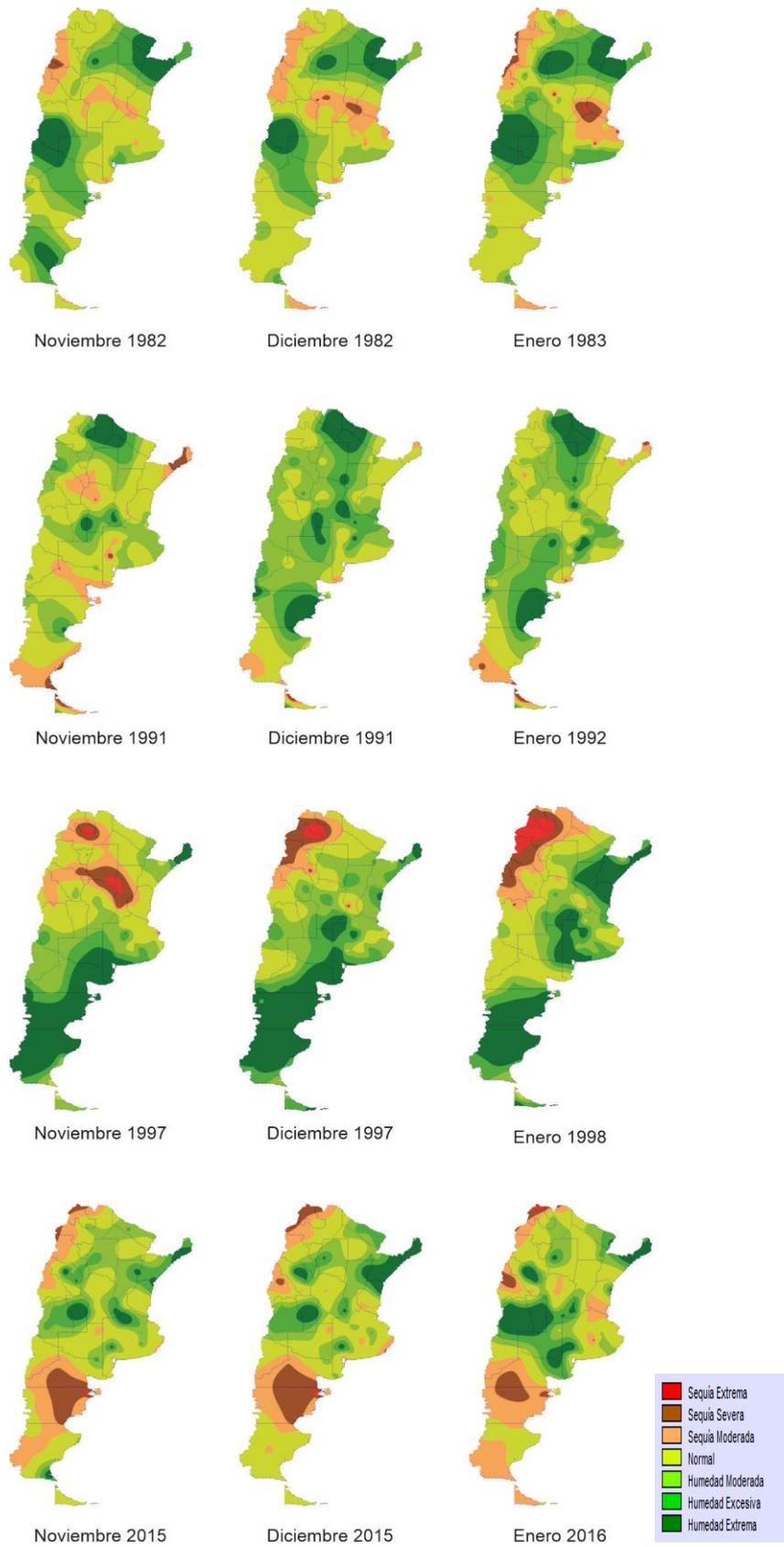


Figura 3.60 Mapas mensuales del PDSI con la distribución geográfica de los excesos hídricos para los meses de noviembre, diciembre y enero en años de ocurrencia de El Niño (1982-83; 1991-92; 1997-98 y 2015-16).

La distribución geográfica con humedad extrema de los PDSI para los años en se produjo la ocurrencia de El Niño fue diferente para cada episodio del ENSO. Así observamos, Figura 3,60 que durante el Niño del 1982-83 se produjo humedad extremas para los meses noviembre, diciembre y enero, en las regiones de Cuyo, norte y NEA con sequías severas hacia el norte de Buenos Aires, sur de Santa Fe y Córdoba. En 1991-92 el PDSI indico humedad extrema y excesiva en el NOA y Patagonia este más precisamente al centro y este de la provincia de Chubut. Durante 1997-98 las condiciones de humedad extrema se observa abarcando a casi toda la Patagonia con condiciones opuestas de humedad en la región del NOA, donde se visualiza sequías extremas, situación opuesta a la ocurrida al ciclo anterior del fenómeno del Niño. En el período 2015-16 sobre la zona del Litoral (Misiones y Corrientes) se observó condiciones de humedad extrema, zona de cuyo hacia el centro del país como en San Luis y noreste de la Patagonia. Esto indicaría que no existe un patrón determinado entre la distribución geográfica de humedad extrema medido a través del PDSI con los eventos El Niño ocurridos ya que siempre estos excesos de precipitación ocurren en diferente zonas del país (BCC-Agrovoz, 2017; Agrositio, 2017; Portal Caña, 2016).

Se seleccionaron tres localidades (Marcos Juárez, Santa Rosa y Tres Arroyos) como representativas de la región pampeana y se analizaron los mapas históricos del PDSI para verificar si en los eventos La Niña hubo sequías severas y extremas y si en los años El Niño se produjeron excesos hídricos. Como indicador de la ocurrencia de El Niño o La Niña se utilizó el índice ONI obtenido y publicado por el IRI-NOAA (2016) (Tablas 3.4 y 3.5).

Los excesos hídricos y las sequías severas y extremas fueron establecidos según el PDSI mensual del período 1971-2016 (Figuras 3.61 a 3.63). Las categorías de las sequías destacadas con áreas en rojo fueron desde sequía severa a extrema.

En Marcos Juárez se puede apreciar que las sequías de mayor intensidad ocurrieron en los períodos: 1971-72 (diciembre a mayo); 1974-75 (febrero a febrero); 1988-89 (noviembre a diciembre); 1995-97 (setiembre a octubre) y 2008-2009 (mayo a agosto) (Figura 3.61 y Tabla 3.4).

**PDSI con períodos de excesos de humedad y sequías,
Marcos Juárez, Córdoba (1971-2016)**

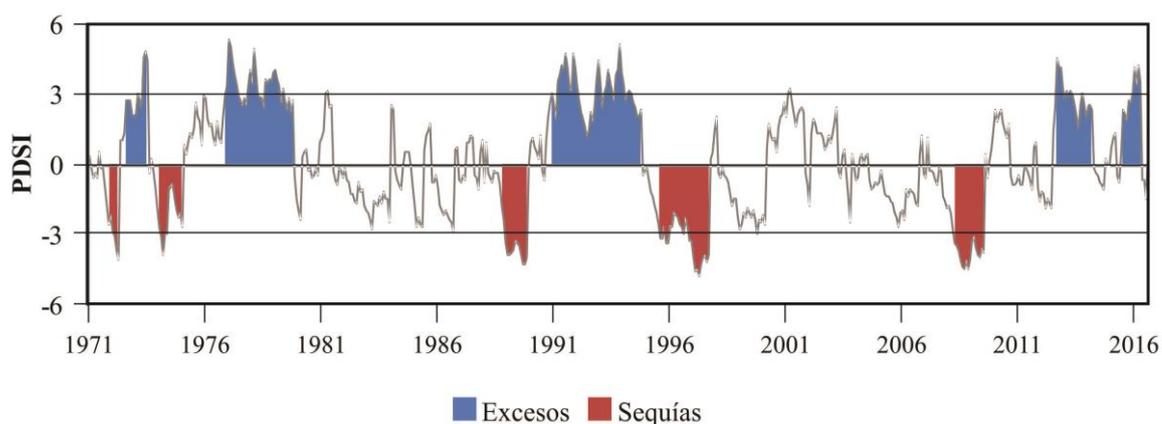


Figura 3.61. Variabilidad mensual del índice PDSI, resaltando los ciclos de excesos hídricos (áreas en azul) y sequías (áreas en rojo) en Marcos Juárez, Córdoba, periodo 1971-2016.

Tabla 3.4 Valores de los índices PDSI y ONI mensuales para los ciclos de déficit o sequías en Marcos Juárez, Córdoba, durante la ocurrencia del fenómeno de La Niña.

	Meses	PDSI	ONI		Meses	PDSI	ONI		Meses	PDSI	ONI
1988	1-ene	1,1	0,8	1995	1-ene	-0,2	1,0	2007	1-ene	-0,2	0,7
	2-feb	-0,7	0,5		2-feb	-0,1	0,8		2-feb	-0,1	0,3
	3-mar	1,0	0,1		3-mar	-0,6	0,6		3-mar	-0,6	-0,1
	4-abr	-0,3	-0,2		4-abr	-1,1	0,3		4-abr	-1,1	-0,2
	5-may	-0,5	-0,8		5-may	-1,3	0,2		5-may	-1,3	-0,3
	6-jun	-0,7	-1,2		6-jun	-1,7	0,0		6-jun	-1,7	-0,3
	7-jul	-0,2	-1,3		7-jul	-2,0	-0,2		7-jul	-2,0	-0,4
	8-ago	-0,3	-1,2		8-ago	-2,5	-0,4		8-ago	-2,5	-0,6
	9-set	-0,3	-1,3		9-set	-3,1	-0,7		9-set	-3,1	-0,8
	10-oct	-0,8	-1,6		10-oct	-3,1	-0,8		10-oct	-3,1	-1,1
	11-nov	-1,7	-1,9		11-nov	-2,6	-0,9		11-nov	-2,6	-1,2
	12-dic	-2,3	-1,9		12-dic	-3,3	-0,9		12-dic	-3,3	-1,4
1989	1-ene	-3,3	-1,7	1996	1-ene	-3,3	-0,9	2008	1-ene	-3,3	-1,5
	2-feb	-3,8	-1,5		2-feb	-2,6	-0,8		2-feb	-2,6	-1,5
	3-mar	-3,8	-1,1		3-mar	-2,6	-0,6		3-mar	-2,6	-1,2
	4-abr	-3,7	-0,8		4-abr	-2,0	-0,4		4-abr	-2,0	-0,9
	5-may	-3,6	-0,6		5-may	-2,1	-0,3		5-may	-2,1	-0,7
	6-jun	-3,2	-0,4		6-jun	-2,2	-0,2		6-jun	-2,2	-0,5
	7-jul	-3,3	-0,3		7-jul	-2,5	-0,2		7-jul	-2,5	-0,3
	8-ago	-3,4	-0,3		8-ago	-2,6	-0,3		8-ago	-2,6	-0,2
	9-set	-3,8	-0,3		9-set	-2,9	-0,3		9-set	-2,9	-0,1
	10-oct	-4,2	-0,3		10-oct	-2,2	-0,3		10-oct	-2,2	-0,2

11-nov	-4,2	-0,2		11-nov	-2,6	-0,4		11-nov	-2,6	-0,5
12-dic	-3,9	-0,1		12-dic	-3,2	-0,5		12-dic	-3,2	-0,7
			1997	1-ene	-3,2	-0,5	2009	1-ene	-3,2	-0,8
				2-feb	-3,9	-0,4		2-feb	-3,9	-0,7
				3-mar	-4,5	-0,1		3-mar	-4,5	-0,5
				4-abr	-4,4	0,3		4-abr	-4,4	-0,2
				5-may	-4,7	0,7		5-may	-4,7	0,2
				6-jun	-4,2	1,2		6-jun	-4,2	0,4
				7-jul	-3,9	1,5		7-jul	-3,9	0,5
				8-ago	-3,8	1,8		8-ago	-3,8	0,6
				9-set	-4,1	2,1		9-set	-4,1	0,8
				10-oct	-3,8	2,3		10-oct	-3,8	1,1
				11-nov	0,3	2,4		11-nov	0,3	1,4
				12-dic	0,6	2,3		12-dic	0,6	1,6

Los excesos hídricos identificados corresponden a cinco períodos muy húmedos que ocurrieron en: 1972-73 (setiembre a agosto), 1976-79 (diciembre a noviembre); 1991-94 (Enero a Noviembre), 2012-14 (Octubre a Abril) y 2015-16 (Agosto a Mayo), oscilando entre las categorías de humedad extrema a excesiva. En los últimos años de la serie analizada se observó un período seco hacia fines de 2014 y luego se reinicia el período húmedo nuevamente en el mes de agosto de 2015 que se prolongó durante todo el año y primeros meses de 2016 (Figura 3.61 y Tabla 3.5).

Tabla 3.5 Valores de los índices PDSI y ONI mensuales para los ciclos de excesos hídricos en Marcos Juárez, Córdoba, durante la ocurrencia del fenómeno de El Niño.

	Meses	PDSI	ONI		Meses	PDSI	ONI		Meses	PDSI	ONI
1977	1-ene	3,4	0,6	1991	1-ene	3,1	0,3	2012	1-ene	-1,5	-0,9
	2-feb	5,4	0,6		2-feb	2,6	0,2		2-feb	-1,1	-0,6
	3-mar	5,1	0,3		3-mar	1,9	0,2		3-mar	-1,2	-0,5
	4-abr	4,4	0,3		4-abr	3,6	0,3		4-abr	-1,8	-0,3
	5-may	3,9	0,3		5-may	3,9	0,5		5-may	-1,4	-0,2
	6-jun	3,5	0,4		6-jun	4,3	0,7		6-jun	-1,6	0,0
	7-jul	3,0	0,4		7-jul	4,1	0,8		7-jul	-1,8	0,1
	8-ago	2,8	0,4		8-ago	4,8	0,7		8-ago	1,4	0,4
	9-set	2,5	0,5		9-set	4,2	0,7		9-set	2,6	0,5
	10-oct	2,9	0,7		10-oct	3,4	0,8		10-oct	4,6	0,6
	11-nov	2,5	0,8		11-nov	3,1	1,2		11-nov	4,2	0,2
	12-dic	3,4	0,8		12-dic	4,8	1,4		12-dic	4,2	-0,3
1978	1-ene	4,1	0,7	1992	1-ene	4,2	1,6	2013	1-ene	3,3	-0,6
	2-feb	3,4	0,5		2-feb	3,4	1,5		2-feb	2,8	-0,6

	3-mar	5,0	0,1		3-mar	2,8	1,4		3-mar	3,2	-0,4
	4-abr	4,0	-0,2		4-abr	2,3	1,2		4-abr	3,0	-0,2
	5-may	3,0	-0,3		5-may	2,0	1,0		5-may	3,2	-0,2
	6-jun	2,9	-0,3		6-jun	1,7	0,7		6-jun	3,0	-0,3
	7-jul	2,9	-0,3		7-jul	1,2	0,3		7-jul	2,6	-0,3
	8-ago	2,4	-0,4		8-ago	1,5	0,0		8-ago	2,1	-0,3
	9-set	3,7	-0,4		9-set	2,3	-0,2		9-set	1,5	-0,3
	10-oct	3,5	-0,3		10-oct	1,8	-0,3		10-oct	2,6	-0,2
	11-nov	3,7	-0,1		11-nov	2,6	-0,2		11-nov	3,1	-0,3
	12-dic	3,6	-0,1		12-dic	3,7	0,0		12-dic	2,6	-0,4
1979	1-ene	4,0	-0,1	1993	1-ene	4,5	0,2	2014	1-ene	2,0	-0,6
	2-feb	4,1	0,1		2-feb	3,5	0,3		2-feb	2,5	-0,6
	3-mar	3,7	0,2		3-mar	2,4	0,5		3-mar	2,6	-0,5
	4-abr	3,4	0,3		4-abr	3,1	0,6		4-abr	2,4	-0,1
	5-may	2,6	0,2		5-may	3,4	0,6		5-may	-0,1	0,1
	6-jun	3,3	0,0		6-jun	4,1	0,5		6-jun	-0,3	0,1
	7-jul	2,8	0,0		7-jul	3,6	0,3		7-jul	-0,4	0,0
	8-ago	2,3	0,2		8-ago	3,2	0,2		8-ago	-0,7	0,0
	9-set	2,9	0,3		9-set	2,7	0,2		9-set	-0,8	0,2
	10-oct	2,2	0,5		10-oct	3,9	0,2		10-oct	-1,0	0,4
	11-nov	2,8	0,5		11-nov	4,1	0,1		11-nov	0,3	0,6
	12-dic	-0,4	0,6		12-dic	5,2	0,1		12-dic	0,0	0,6
				1994	1-ene	4,0	0,1	2015	1-ene	0,0	0,5
					2-feb	3,5	0,1		2-feb	0,8	0,4
					3-mar	2,7	0,2		3-mar	1,2	0,5
					4-abr	3,1	0,3		4-abr	1,4	0,7
					5-may	3,2	0,4		5-may	-0,4	0,9
					6-jun	3,1	0,4		6-jun	-0,7	1,0
					7-jul	2,7	0,4		7-jul	0,5	1,2
					8-ago	2,5	0,4		8-ago	2,4	1,5
					9-Set	2,1	0,5		9-set	2,2	1,8
					10-oct	2,1	0,7		10-oct	1,9	2,1
					11-nov	2,4	1,0		11-nov	2,8	2,2
					12-dic	-0,4	1,2		12-dic	2,7	2,3
								2016	1-ene	3,1	2,2
									2-feb	4,2	2,0
									3-mar	3,4	1,6
									4-abr	4,3	1,1
									5-may	3,6	0,6
									6-jun	4,2	0,1
									7-jul	3,8	-0,3
									8-ago	3,1	-0,6
									9-set	2,4	-0,8

10-oct	2,1	-0,8
11nov	1	-0,8
12-dic	1,7	-0,7

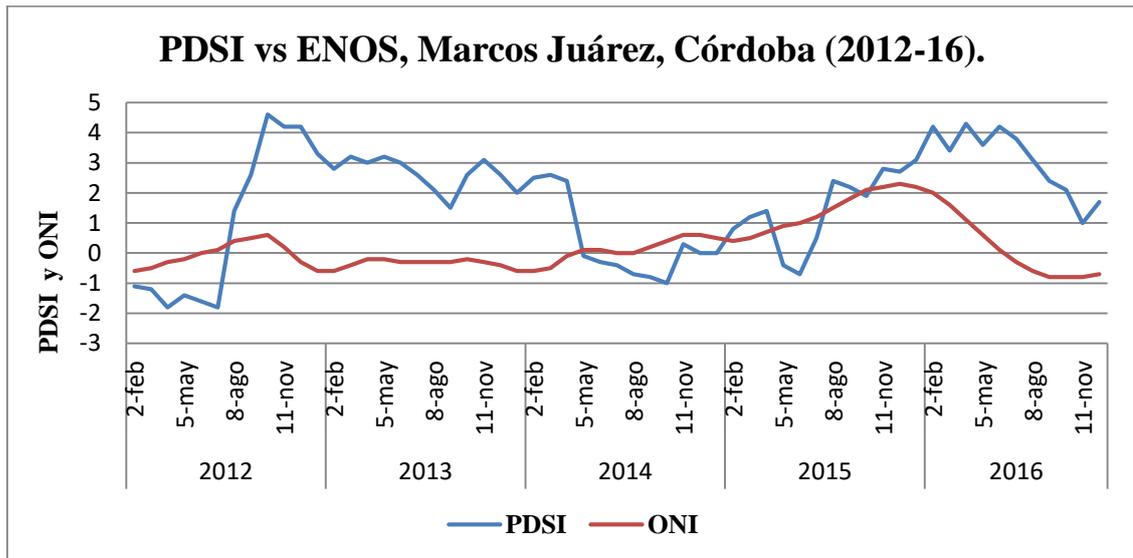


Figura 3.62. Variabilidad mensual de los índices PDSI y ONI en Marcos Juárez, Córdoba, período 2012-2016.

En la localidad de Santa Rosa se puede apreciar que las sequías de mayor intensidad ocurrieron en los períodos: 1971-72 (enero a marzo); 1995-96 (enero/95 a octubre/96); 2003-2004 (enero/03 a junio/04) y 2009-2010 (enero a enero), este período seco fue el más intenso (Figura 3.63 y Tabla 3.6).

**PDSI con períodos de excesos de humedad y sequías,
Santa Rosa, La Pampa (1971-2016)**

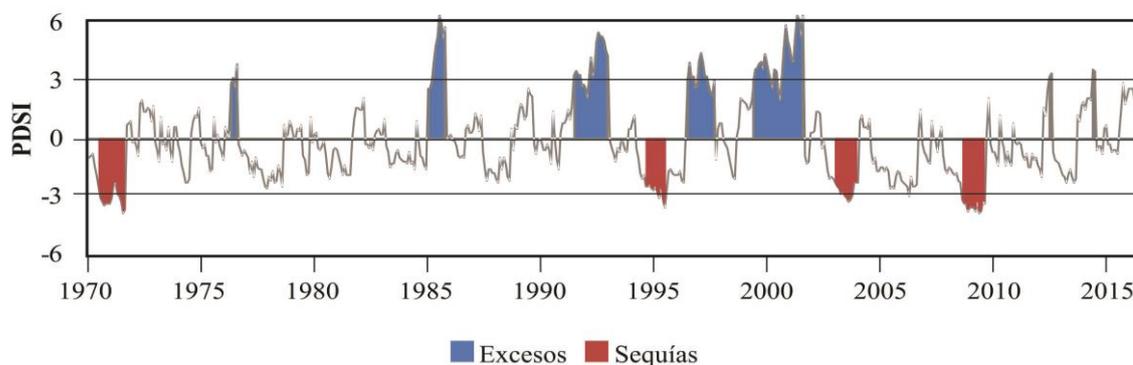


Figura 3.63. Variabilidad mensual del índice PDSI, resaltando los ciclos de excesos hídricos (áreas en azul) y sequías (áreas en rojo) en Santa Rosa, La Pampa, período 1970-2016.

Tabla 3.6 Valores de los índices PDSI y ONI mensuales para los ciclos de déficit o sequías en Santa Rosa, La Pampa, durante la ocurrencia del fenómeno de La Niña.

	Meses	PDSI	ONI		Meses	PDSI	ONI		Meses	PDSI	ONI
1971	1-ene	-2,5	-1,2	1995	1-ene	-1,9	1,0	2003	1-ene	-0,9	1,1
	2-feb	-3,1	-1,3		2-feb	-2,5	0,8		2-feb	-1,7	0,8
	3-mar	-3,3	-1,1		3-mar	-2,5	0,6		3-mar	-2,1	0,4
	4-abr	-3,5	-0,8		4-abr	-2,4	0,3		4-abr	-2,0	0,0
	5may	-3,4	-0,7		5may	-2,6	0,2		5may	-2,1	-0,2
	6-jun	-3,4	-0,7		6-jun	-2,7	0,0		6-jun	-2,3	-0,1
	7-jul	-3,4	-0,7		7-jul	-2,5	-0,2		7-jul	-2,5	0,2
	8-ago	-3,1	-0,7		8-ago	-2,8	-0,4		8-ago	-2,6	0,4
	9-set	-2,4	-0,7		9-set	-3,1	-0,7		9-set	-2,9	0,4
	10-oct	-2,3	-0,8		10-oct	-2,6	-0,8		10-oct	-2,8	0,4
	11nov	-2,9	-0,9		11nov	-3,2	-0,9		11nov	-3,0	0,4
	12-dic	-3	-0,8		12-dic	-3,6	-0,9		12-dic	-3,1	0,3
1976	1-ene	-1,6	-1,5	1996	1-ene	-2,7	-0,9	2004	1-ene	-3,3	0,3
	2-feb	1,1	-1,1		2-feb	-1,7	-0,8		2-feb	-3,2	0,2
	3-mar	-0,2	-0,7		3-mar	-1,6	-0,6		3-mar	-3,0	0,1
	4-abr	0,2	-0,5		4-abr	-1,8	-0,4		4-abr	-2,3	0,1
	5may	-0,4	-0,3		5may	-1,9	-0,3		5may	-2,3	0,2
	6-jun	-0,7	-0,1		6-jun	-1,9	-0,2		6-jun	-2,3	0,3
	7-jul	-1,1	0,2		7-jul	-1,9	-0,2		7-jul	0,9	0,5
	8-ago	0,6	0,4		8-ago	-1,7	-0,3		8-ago	1,2	0,7
	9-set	0,1	0,6		9-set	-2,2	-0,3		9-set	0,6	0,8
	10-oct	0,5	0,7		10-oct	-2,3	-0,3		10-oct	0,6	0,7

11nov	2,8	0,8		11nov	0,0	-0,4		11nov	0,5	0,7
12-dic	3,1	0,8		12-dic	3,0	-0,5		12-dic	1,0	0,7
			1998/99	7-jul	-0,1	-0,7	2009	1-ene	-3,2	-0,7
				8-ago	-0,3	-1,0		2-feb	-3,4	-0,6
				9-set	-0,5	-1,2		3-mar	-3,4	-0,4
				10-oct	-1,0	-1,3		4-abr	-3,8	-0,1
				11nov	-1,5	-1,4		5may	-3,6	0,2
				12-dic	-2,0	-1,5		6-jun	-3,6	0,4
				1-ene	-2,1	-1,5		7-jul	-3,6	0,5
				2-feb	0,1	-1,3		8-ago	-3,8	0,5
				3-mar	0,6	-1,0		9-set	-3,3	0,6
				4-abr	2,1	-0,9		10-oct	-3,9	0,9
				5may	2	-0,9		11nov	-3,8	1,1
				6-jun	1,9	-1,0		12-dic	-3,3	1,3

Los excesos hídricos identificados en Santa Rosa, corresponden a cinco períodos húmedos: 1976-77 (noviembre a febrero); 1985-86 (julio a abril); 1991-93 (diciembre a junio); 1996-98 (diciembre a febrero) y 1999-2002 (noviembre a febrero), oscilando entre humedad extrema a excesiva (PDSI mayor a 4) en tres de los cinco ciclos identificados (Figura 3.63 y Tabla 3.7).

Tabla 3.7 Valores de los índices PDSI y ONI mensuales para los ciclos de excesos hídricos en Santa Rosa, La Pampa, durante la ocurrencia del fenómeno de El Niño.

	Meses	PDSI	ONI		Meses	PDSI	ONI		Meses	PDSI	ONI
1976/77	7-jul	-1,1	0,2	1992	1-ene	3,5	1,6	2000	1-ene	3,7	-1,7
	8-ago	0,6	0,4		2-feb	3,3	1,5		2-feb	3,9	-1,5
	9-set	0,1	0,6		3-mar	3,3	1,4		3-mar	4,0	-1,2
	10-oct	0,5	0,7		4-abr	2,7	1,2		4-abr	3,6	-0,9
	11nov	2,8	0,8		5-may	2,8	1,0		5-may	4,4	-0,8
	12-dic	3,1	0,8		6-jun	2,6	0,7		6-jun	3,9	-0,7
	1-ene	2,6	0,6		7-jul	2,1	0,3		7-jul	3,4	-0,6
	2-feb	3,8	0,6		8-ago	3,1	0,0		8-ago	3,0	-0,5
	3-mar	-0,3	0,3		9-set	4,2	-0,2		9-set	2,6	-0,6
	4-abr	-0,6	0,3		10-oct	3,2	-0,3		10-oct	3,6	-0,6
	5may	-0,9	0,3		11nov	3,7	-0,2		11nov	3,5	-0,8
	6-jun	-0,6	0,4		12-dic	5,0	0,0		12-dic	2,5	-0,8
1985/86	7-jul	2,6	-0,5	1993	1-ene	5,5	0,2	2002	1-ene	6,4	-0,2
	8-ago	2,6	-0,5		2-feb	5,3	0,3		2-feb	-0,9	0,0
	9-set	3,0	-0,5		3-mar	5,3	0,5		3-mar	-1,3	0,1
	10-oct	4,0	-0,4		4-abr	5,1	0,6		4-abr	-1,2	0,3

11nov	4,8	-0,4		5-may	4,6	0,6		5-may	0,3	0,5
12-dic	5,3	-0,4		6-jun	4,3	0,5		6-jun	0,3	0,7
1-ene	6,4	-0,5		7-jul	-0,1	0,3		7-jul	0,4	0,8
2-feb	6,0	-0,4		8-ago	-0,5	0,2		8-ago	1,4	0,8
3-mar	5,2	-0,2		9-set	-0,8	0,2		9-set	1,4	0,9
4-abr	5,8	-0,2		10-oct	-1,2	0,2		10-oct	1,3	1,2
5-may	0,0	-0,1		11nov	-0,5	0,1		11nov	-0,5	1,3
6-jun	0,1	0,0		12-dic	-0,7	0,1		12-dic	-0,2	1,3
			1997	1-ene	3,9	-0,5	2012	1-ene	-1,5	-0,7
				2-feb	3,0	-0,4		2-feb	-0,8	-0,5
				3-mar	3,2	-0,1		3-mar	-1,1	-0,4
				4-abr	2,6	0,2		4-abr	-1,0	-0,4
				5-may	2,7	0,7		5-may	-1,4	-0,3
				6-jun	4,0	1,2		6-jun	-1,6	-0,1
				7-jul	4,4	1,5		7-jul	-2,0	0,1
				8-ago	3,9	1,8		8-ago	1,6	0,3
				9-set	3,2	2,1		9-set	1,2	0,3
				10-oct	3,2	2,3		10-oct	2,5	0,3
				11nov	2,7	2,4		11nov	3,2	0,1
				12-dic	2,3	2,3		12-dic	3,4	-0,2
							2016	1-ene	1,6	2,2
								2-feb	2,9	2,0
								3-mar	1,8	1,6
								4-abr	2,2	1,1
								5-may	2,6	0,6
								6-jun	2,6	0,1
								7-jul	2,6	-0,3
								8-ago	2,1	-0,6
								9-set	2,0	-0,8
								10-oct	3,6	-0,8
								11nov	3,6	-0,8
								12-dic	3,4	-0,7

En la localidad de Tres Arroyos se identificaron siete períodos de sequías severas y extremas donde se observó que las sequías de mayor intensidad ocurrieron en los períodos: 1973-74 (setiembre a mayo), 1978 (enero a junio), 1988-89 (julio a abril), 1998-99

(diciembre a agosto), 2003 (abril a setiembre), 2006 (mayo a setiembre) y 2008-2010 (noviembre a enero) (Figura 3.64 y Tabla 3.8). Se observo para Tres Arroyos coincidencias entre varios períodos de excesos de humedad y sequías obtenidos con los estudios realizados sobre los eventos de El Niño y La Niña para Sudamérica (Grimm et al., 2000).

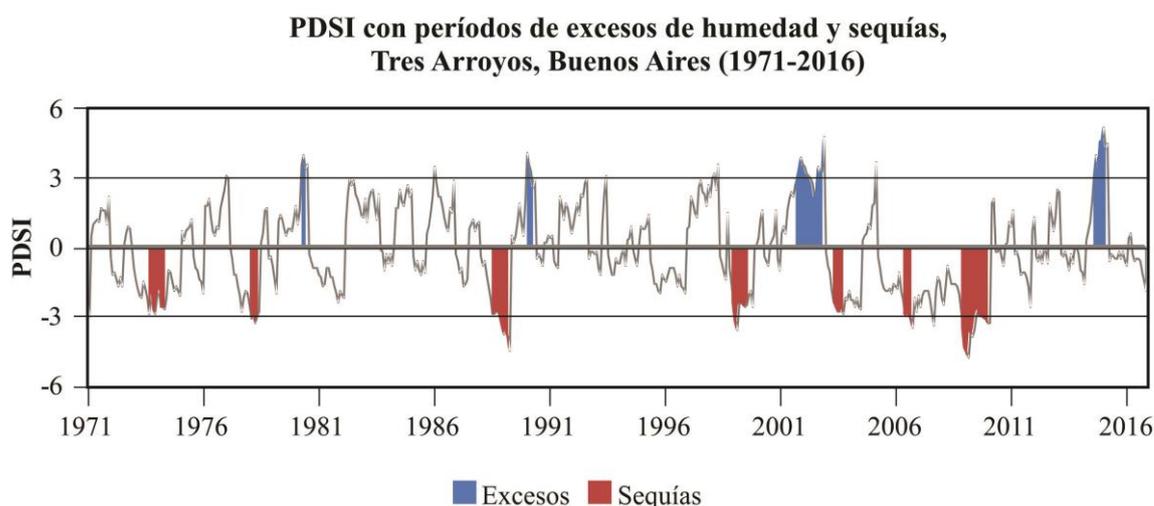


Figura 3.64. Variabilidad mensual del índice PDSI, resaltando los ciclos de excesos hídricos (áreas en azul) y sequías (áreas en rojo) en Tres Arroyos, Buenos Aires, período 1971-2016.

Tabla 3.8 Valores de los índices PDSI y ONI mensuales para los ciclos de déficit o sequías en Tres Arroyos, Buenos Aires, durante la ocurrencia del fenómeno de La Niña.

	Meses	PDSI	ONI		Meses	PDSI	ONI		Meses	PDSI	ONI
1973/74	7-jul	-1,8	-1,0	1988/89	7-jul	-2,9	-1,3	2003	1-ene	-0,8	1,1
	8-ago	-2,2	-1,2		8-ago	-2,9	-1,2		2-feb	-1,1	0,8
	9-set	-2,9	-1,3		9-set	-2,8	-1,3		3-mar	-1,9	0,4
	10-oct	-2,0	-1,6		10-oct	-2,8	-1,6		4-abr	-2,4	0,0
	11-nov	-2,7	-1,9		11-nov	-3,1	-1,9		5-may	-2,6	-0,2
	12-dic	-2,9	-2,0		12-dic	-3,5	-1,9		6-jun	-2,8	-0,1
	1-ene	-2,2	-1,9		1-ene	-3,8	-1,7		7-jul	-2,8	0,2
	2-feb	-1,8	-1,6		2-feb	-3,6	-1,5		8-ago	-2,7	0,4
	3-mar	-2,6	-1,2		3-mar	-3,9	-1,1		9-set	-2,9	0,4
	4-abr	-2,6	-1,0		4-abr	-4,5	-0,8		10-oct	-2,2	0,4
	5-may	-2,7	-0,8		5-may	0,5	-0,6		11-nov	-2,3	0,4
	6-jun	-2,2	-0,7		6-jun	0,2	-0,4		12-dic	-1,9	0,3
1977/78	7-jul	-1,7	0,4	1999	1-ene	-3,2	-1,5	2006	1-ene	-1,8	-0,7
	8-ago	-2,1	0,4		2-feb	-3,6	-1,3		2-feb	-1,1	-0,6
	9-set	-2,8	0,5		3-mar	-2,5	-1,0		3-mar	-1,9	-0,4
	10-oct	-2,2	0,7		4-abr	-2,4	-0,9		4-abr	-2,3	-0,2

11nov	-1,9	0,8	5may	-2,5	-0,9	5may	-2,9	0,0	
12-dic	-2,0	0,8	6-jun	-2,6	-1,0	6-jun	-3,0	0,0	
1-ene	-2,5	0,7	7-jul	-2,5	-1,0	7-jul	-2,9	0,1	
2-feb	-3,1	0,5	8-ago	-2,1	-1,1	8-ago	-3,1	0,3	
3-mar	-3,0	0,1	9-set	-1,9	-1,1	9-set	-3,5	0,5	
4-abr	-3,3	-0,2	10-oct	-2,6	-1,3	10-oct	-2,2	0,7	
5may	-3,0	-0,3	11nov	0,0	-1,5	11nov	-2,8	0,9	
6-jun	-2,8	-0,3	12-dic	0,1	-1,7	12-dic	-2,1	0,9	
						2008/09	7-jul	-1,6	-0,4
							8-ago	-1,7	-0,3
							9-set	-2,0	-0,3
							10-oct	-2,7	-0,4
							11nov	-3,5	-0,6
							12-dic	-4,4	-0,7
							1-ene	-4,6	-0,7
							2-feb	-4,8	-0,6
							3-mar	-3,7	-0,4
							4-abr	-3,9	-0,1
							5may	-3,6	0,2
							6-jun	-3,0	0,4

Los excesos de humedad identificados corresponden a cuatro períodos de excesos hídricos que ocurren en: 1980 (Abril a Julio), 1990 (Enero a Mayo), 2001-02 (Setiembre a Noviembre) y 2014-15 (Julio a Febrero), oscilando entre las categorías de humedad extrema a excesiva (Figura 3.64 y Tabla 3.9). Hacia el final de la serie analizada se observó un ciclo húmedo desde fines de 2014 y comienzos de 2015 (Figura 3.65).

Tabla 3.9. Valores de los índices PDSI y ONI mensuales para los ciclos de excesos hídricos en Tres Arroyos, Buenos Aires, durante la ocurrencia del fenómeno de El Niño.

	Meses	PDSI	ONI		Meses	PDSI	ONI
2001	1-ene	0,6	-0,7	2014	1-ene	-1,1	-0,6
	2-feb	0,9	-0,6		2-feb	-1,6	-0,6
	3-mar	0,6	-0,5		3-mar	0,3	-0,5
	4-abr	1,6	-0,4		4-abr	0,7	-0,1
	5-may	2,1	-0,2		5-may	1,1	0,1
	6-jun	2,4	-0,1		6-jun	2,0	0,1
	7-jul	2,2	0,0		7-jul	3,2	0,0

	8-ago	2,7	0,0		8-ago	4,0	0,0
	9-set	3,0	-0,1		9-set	3,4	0,2
	10-oct	3,4	-0,2		10-oct	4,6	0,4
	11-nov	3,9	-0,3		11-nov	4,6	0,6
	12-dic	3,6	-0,3		12-dic	5,2	0,6
2002	1-ene	3,5	-0,2	2015	1-ene	4,3	0,5
	2-feb	3,2	0,0		2-feb	4,5	0,4
	3-mar	3,1	0,1		3-mar	-0,6	0,5
	4-abr	3,0	0,3		4-abr	-0,3	0,7
	5-may	2,8	0,5		5-may	-0,4	0,9
	6-jun	2,2	0,7		6-jun	-0,5	1,0
	7-jul	2,4	0,8		7-jul	-0,5	1,2
	8-ago	3,5	0,8		8-ago	-0,2	1,3
	9-set	3,2	0,9		9-set	-0,5	1,8
	10-oct	3,3	1,2		10-oct	-0,2	2,1
	11-nov	4,8	1,3		11-nov	-0,6	2,2
	12-dic	-0,2	1,3		12-dic	-0,8	2,3
2003	1-ene	-0,8	1,1	2016	1-ene	0,4	2,2
	2-feb	-1,1	0,8		2-feb	0,6	2,0
	3-mar	-1,9	0,4		3-mar	-0,3	1,6
	4-abr	-2,4	0,0		4-abr	-0,6	1,1
	5-may	-2,6	-0,2		5-may	-0,5	0,6
	6-jun	-2,8	-0,1		6-jun	-0,5	0,1
	7-jul	-2,8	0,2		7-jul	-0,6	-0,3
	8-ago	-2,7	0,4		8-ago	-1,1	-0,6
	9-set	-2,9	0,4		9-set	-1,5	-0,8
	10-oct	-2,2	0,4		10-oct	-2,0	-0,8
	11-nov	-2,3	0,4		11-nov	-2,7	-0,8
	12-dic	-1,9	0,3		12-dic	-3,3	-0,7

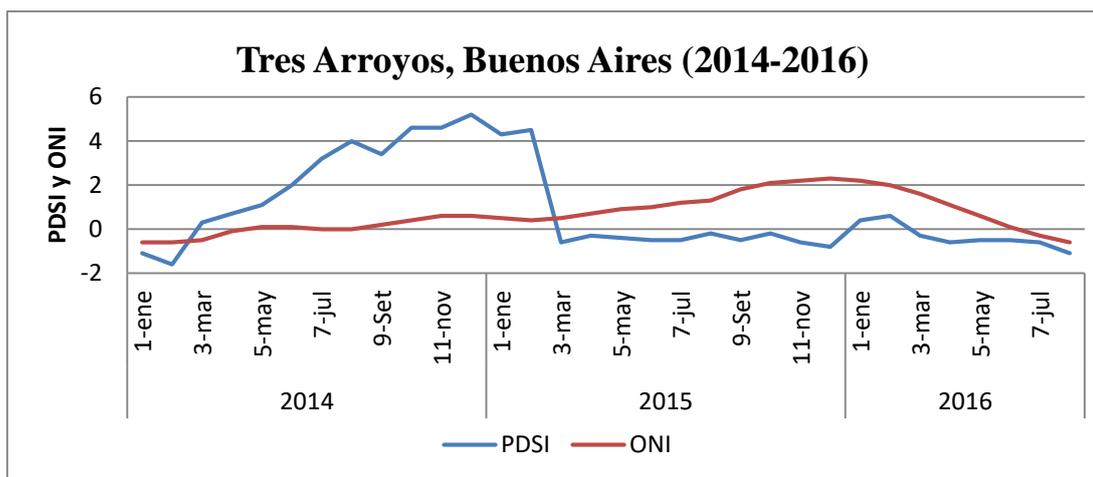


Figura 3.65. Variabilidad mensual del índice PDSI y el ONI en Tres Arroyos, Buenos Aires, período 2014-2016.

Durante la ocurrencia de El Niño se registraron fuertes precipitaciones con inundaciones y daños a infraestructura edilicia, vial, rural, urbana y pérdidas de vidas (Barros y Silvestri, 2002; Herzer et al., 2004). El Niño está asociado principalmente con un incremento anómalo de las precipitaciones en la región pampeana, central, noreste litoral y toda la Mesopotamia (Hurtado et al., 2005; Fernández Long et al., 2011; Jozami et al., 2017); sin embargo, también se lo ha asociado con sequías en la zona sur de la Patagonia (Forquera et al., 2016).

Por el contrario, el fenómeno de La Niña se manifiesta de forma extrema con precipitaciones muy inferiores a lo normal o muy escasas como las ocurridas durante 2007-2008 provocando sequías severas y extremas. En dicho período, se afectó principalmente al rendimiento del cultivo de maíz en la región pampeana con notables pérdidas en el sector agropecuario argentino (Fernández Long et al., 2011; FAO, 2012; Thomasz et al., 2017).



Foto 3.6. Pérdidas de vacunos por efectos de la sequía en enero de 2012, (FAO, 2012).

Durante la campaña 2017/18, se registraron pérdidas económicas por sequía y fueron evaluadas por expertos para la región agrícola argentina. Dichas pérdidas alcanzarían los 2.150 millones de dólares debido a la caída de rendimientos de los cultivos y una merma en la producción que se ubicaría entre 15% y 20% (CREA, 2018).



Foto 3.7. Impacto de la sequía con fuertes pérdidas en rendimientos y área sembrada (CREA, 2018).

El fenómeno de EL Niño que se manifiesta de forma extrema con precipitaciones superiores a lo normal provocando en algunos casos importantes inundaciones. Así por ejemplo, el evento El Niño ocurrido en 1997-1998, afectó a 290.000 personas y hubo pérdidas económicas por 33.200 millones de dólares a nivel global (Portal Caña, 2016).



Foto 3.8. Efectos de las excesivas precipitaciones por ocurrencia de El Niño en un campo cultivado e inundado debido a los excesos hídricos que afectó el NEA siendo las provincias implicadas Entre Ríos, Santa Fe, Corrientes, Misiones, Chaco y Formosa (Portal Caña, 2016).

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

APORTES DE LAS INVESTIGACIONES REALIZADAS

La aplicación de los índices de sequías PDSI y SPI estimados a través del sistema de monitoreo denominado SOS en las regiones del Noroeste, Noreste, Pampeana, Cuyana y Patagónica de Argentina, para todas las estaciones meteorológicas y durante el período 1980-2018 permitió determinar y caracterizar a las sequías y excesos hídricos con respecto a su duración, intensidad, extensión y frecuencia. Posteriormente, se realizó el pronóstico de ambos índices para escenarios a uno, dos y tres meses de manera sucesiva en el tiempo mediante un modelo de redes neuronales. La base de datos meteorológicos, climatológicos, agrometeorológicos e hidrológicos que se fue generando para el cálculo de los índices PDSI y SPI permitió realizar los mapas de los pronósticos de sequías y excesos hídricos e identificar las áreas de localización y extensión de cada categoría evaluada para los extremos hídricos.

Los resultados del análisis temporal y espacial de la sequía y excesos hídricos indican la presencia de dichos eventos hídricos en la mayoría de los años, pero con diferentes características respecto a su duración, intensidad, extensión y severidad para una escala local, regional y nacional. El análisis general sobre la caracterización y evaluación de esos fenómenos, ya sea de manera puntual o espacial, permitió concluir que las sequías y los excesos no tienen un patrón definido de comienzo y finalización ya que pueden ocurrir en cualquier época del año y en diferentes años, la intensidad también es variable y la variabilidad espacial no tiene una distribución geográfica definida ya que pueden ocurrir en cualquier parte de una región determinada.

En el análisis comparativo de los mapas PDSI pronosticado a nivel nacional, en 2017 y con hasta tres meses de antelación se observó una adecuada semejanza entre los mapas observados y pronosticados bajo condiciones de humedad excesiva y extrema con elevados coeficientes de determinación. En 2018, cuando predominaron condiciones de sequías severas y moderadas los valores de R^2 fueron inferiores para las mismas ocho

localidades representativas del territorio nacional. El R^2 obtenido a nivel nacional de todas las regiones de Argentina en conjunto fue aún más bajo lo que indicó que el análisis debe hacerse a una escala geográfica menor, considerando una región individual y agrupando a aquellas estaciones más próximas entre sí. En Patagonia, los pronósticos tuvieron mayores errores y los mapas presentaron una mayor diferencia entre los valores observados y pronosticados, debido probablemente a la gran extensión territorial con una baja cobertura de la red de estaciones e inadecuada información meteorológica.

Con la realización de los pronósticos de los extremos hídricos se incorpora una herramienta para mejorar la optimización de la planificación y gestión de los recursos agrícolas e hidrológicos. La metodología propuesta se orienta a pronosticar la intensidad y distribución geográfica de la sequía y el exceso hídrico a nivel trimestral durante todo el año, con lo cual se determina la disponibilidad y evaluación del recurso hidrológico de manera precisa y eficiente a nivel estacional.

Se pudo comprobar que existió una estrecha relación entre los eventos extremos de ocurrencia de sequías y excesos hídricos con la ocurrencia de eventos ENSO, respecto a sus fases negativa y positiva durante el período 1971-2016. La mayoría de los períodos con sequías agrícolas identificados se presentaron durante la ocurrencia de los eventos La Niña, según lo indicado por el índice ONI, cuyo valor de mayor intensidad alcanzado fue de -1,9 durante la campaña 1988/89. Se identificó y verificó, según el índice de Palmer, sequías severas y extremas en los siguientes períodos: 1971/1972 (dic. a may); 1974/1975 (feb. a feb.); 1988/1989 (nov. a dic.); 1995/1997 (set. a oct.); 2008/2009 (may. a ago.); 2011/2012 (dic. a jul.) y 2017/2018 (dic. a mar.). Los períodos de excesos hídricos fueron coincidentes con la ocurrencia del evento El Niño, donde el índice ONI de mayor intensidad alcanzado fue de 2,3 en 1997/98 y de 2,4 en 2014/16. Las categorías del PDSI denominadas humedad extrema y humedad excesiva se detectaron en 1972/73 (set. a ago.); 1976/79 (dic. a nov.); 1991/94 (ene. a nov.); 2012/14 (oct. a abr.); 2015/16 (ago. a may.).

Debido a la magnitud de las pérdidas económicas asociadas a los extremos hídricos es fundamental optimizar el monitoreo y pronóstico de dichos extremos hídricos. Los sistemas de alertas tempranas presentan dos componentes, una es el monitoreo, que hace

referencia al seguimiento y comprensión del fenómeno que está ocurriendo y la otra componente se refiere al pronóstico del evento. La finalidad de pronosticar sequías o excesos hídricos es a fin de proporcionar información puntual de manera anticipada durante cualquier fase del fenómeno que está ocurriendo en una determinada región de forma de poder adoptar medidas preventivas para atenuar los daños o pérdidas potenciales.

**SOBRE LA BASE A LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN ESTA TESIS,
SE PROPONEN LAS SIGUIENTES LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN**

a. Continuar con la realización del monitoreo, evaluación y pronóstico de diferentes escenarios con uno, dos y tres meses de antelación a la ocurrencia de sequías o excesos hídricos con los índices PDSI y SPI y promover su difusión a los usuarios de tal información.

b. Construir modelos complementarios de pronóstico con otros índices de caracterización de las sequías y excesos hídricos como son el índice de frecuencia de sequías y el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI). El objetivo es aprovechar su potencial de predecir eventos utilizando análisis de regresión para mejorar y delimitar con mayor precisión la distribución espacial que alcanzan los fenómenos hídricos extremos.

c. Determinar los niveles de vulnerabilidad y riesgos asociados a la intensidad y duración de las sequías y excesos hídricos.

d. Evaluar la posibilidad de utilizar los modelos de pronóstico existentes del fenómeno del ENSO (El Niño y La Niña) para Argentina, a fines de establecer una interrelación genuina con el pronóstico de sequías y excesos hídricos.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Abramowitz M. y Stegun I.A. 1965. Handbook of Mathematical Functions. Dover Publications, New York. 361 pp.
- Agrositio, 2017. Se estiman Fuertes pérdidas en soja y maíz por el efecto de las inundaciones, 22-01-2017 Bolsa de Cereales de Buenos Aires. <http://agrositio.com.ar/noticia/182227-se-estiman-fuertes-perdidas-en-soja-y-maiz-por-el-efecto-de-las-inundaciones>. (Consultado 30/08/2019).
- Agrovoz, 2017. <Http://www.agrovoz.com.ar/agricultura/entre-inundaciones-y-sequia-la-soja-ya-se-comprometida>, (06/01/2017). (Consultado, 30/08/2019).
- Agrovoz BCC, 2016. <http://www.agrovoz.com.ar/actualidad/lasinundaciones-dejan-una-perdida-de-13000-millones-en-cordoba>.
- Ameghino F., 1884. Las Secas y las Inundaciones en la Provincia de Buenos Aires. "Obras de Retención y no de Desagüe". Ministerio de Asuntos Agrarios de la Provincia de Buenos Aires, 1884-1984. 5ta Edición.
- APA, 2010. Administración Provincial de Aguas Provincia de Chaco. Anuario (1956-2010). Isohietas Medias Anuales Período:1956-2010 <https://www.ecomchaco.com.ar/apa/ANUARIO1956-2010.PDF>. (Consultada 27/03/2017).
- Arreguín C., López P.M.A., Ortega G.D. e Ibañez H.O. 2016. La política pública contra la sequía en México: avances, necesidades y perspectivas. ISSN 2007-2422. Tecnología y Ciencias del Agua, vol. VII, núm. 5. pp. 63-76.
- ASCE, 2000a.Task Committee on Application of Artificial Neural Networks in Hydrology. "Artificial neural networks in hydrology. I: Preliminary concepts." Journal of Hydrology. Eng., 52: 115–123.
- ASCE, 2000b.Task Committee on Application of Artificial Neural Networks in Hydrology. "Artificial neural networks in hydrology. II: Hydrologic applications." Journal of Hydrology. Eng., 52: 124–137.
- Barbosa P., 2015. Observatorio Latino Americano de Sequías (SCADO). JRC (Joint Research Center, European Commission). <http://edo.jrc.ec.europa.eu/scado>.
- Barros V.R. y Silvestri G.E. 2002. The relation between sea surface temperature at the subtropical south-central Pacific and precipitation in southeastern South America. Journal of Climate 15: 251-267.
- BCC-Agrovoz, 2017. Bolsa de Cereales de Córdoba. Diario La Voz del Interior-Agrovoz, <http://www.agrovoz.com.ar/actualidad/lasinundaciones-emergencia-en-cordoba>.

- BCR, 2018. Bolsa de Comercio de Rosario (GEA) Guía Estratégica para el Agro Resumen del informe. <http://bcr.com.ar/es/maercados/gea/seguimiento-de-cultivos/informe-semanal-zona-nucleo/ahora-los-excesos-podrian-cobrarse>.(Consultado 28/08/2019).
- Bianchi A.R. y Cravero S.A.C. 2010. Atlas climático de la República Argentina. Salta: Ed. INTA, 84pag. ISBN 978-987-1623-95-2. <http://inta.gob.ar/documentos/atlas-climatico-digital-de-la-republica-argentina-1/>.
- Bocco M., Ovando G. y Sayago S. 2006. Development and evaluation of neural network models to estimate daily solar radiation at Córdoba, Argentina. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira* v41(2) p:179-184. over the Northeast Region of Brazil, *Journal of Arid Environments*, 67(2) 288-307.
- Boletta P.E., Ravelo A.C., Planchuelo A.M., Grilli M. y Zanvetor R.E. 2010. Evaluación de Sequías, deforestación y desertificación en el Chaco Seco. Actas XI Reunión Argentina y VI Latinoamericana de Agrometeorología. Bahía Blanca, Argentina. ISBN 978-987-26317-0-3.
- Bonaccorso B., Cancelliere A. y Rossi G. 2015. Probabilistic forecasting of drought class transitions in Sicily (Italy) using Standardized Precipitation Index and North Atlantic Oscillation Index. *Journal of Hydrology*, 526: 136-150.
- Borden K.A., Schmidlein M.C., Emrich C.T., Piegorsch W.W. y Cutter S.L. 2007. Vulnerability of U.S. Cities to Environmental Hazards. *Journal of Homeland Security and Emergency Management*, 4(2).
- Bordi I. y Sutera A. 2007. Drought monitoring and forecasting at large scale. In *Methods and Tools for Drought Analysis and Management* (pp.3-37). Springer Dordrecht.
- Bryson A.E. y Jr. Ho Y.C. 1969. *Applied optimal control: optimization, estimation, and control*. Waltham, MA: Blaisdell, 1969. 481 p. [Stanford Univ., Stanford, CA and Harvard Univ., Cambridge, MA].
- Capitanelli R., 2005. *Climatología de Mendoza*. Ed. Fac. de Filosofía y Letras. Universidad Nacional de Cuyo. Colección Cumbre Andina Primera edicion 1967.
- Chacra, 2017. Sequía crítica en casi toda la región Patagonia. *Revista Chacra*, sección, Clima 06/02/2017. <http://revistachacra.com.ar/nota/11729-sequia-critica-en-casi-la-region-patagonia/>. (Consultada, 08/08/2019).
- Chiang Y.M., Chang F.J., Jou B.J.D. y Lin P.F. 2007. Dynamic ANN for precipitation estimation and forecasting from radar observations. *Journal of Hydrology* 334, 250–261.
- Chiew F.H.S., Piechota T.C., Dracup J.A. y McMahon T.A. 1998. El Niño/Southern Oscillation and Australian rainfall, stream flow, and drought: Links and potential for forecasting. *Journal of Hydrology*, 204: 138–149.

- Cicero A.R., Ravelo A.C. y Zanvetto R.E. 2007. Relación entre Eventos El Niño/La Niña y la Ocurrencia de Sequías en Mendoza, Argentina. *Revista Argentina de Agrometeorología*, (5-6): 31-37.
- CIIFEN, 2015. Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno de El Niño. <http://crc-osa.cifen.org> ; <http://www.ciifen.org/>
- Clarín, 2015. Rural, Anuncio oficial. Por las inundaciones, declaran la emergencia agropecuaria en Buenos Aires. http://clarin.com/agricultura/inundaciones-buenos-aires-daniel-scioli-emergencia-agropecuaria_0_rJv7TmYPQx.html (consultada 15/11/2017).
- Clarín, 2009. El Drama de la falta de agua. La sequía afecta el 90% del país. *Diario Clarín Home* 01/11/2009. [Http://clarin.com/ediciones-antteriores/sequia-afecta-90-pais_O_H1_f9VORaYl.html](http://clarin.com/ediciones-antteriores/sequia-afecta-90-pais_O_H1_f9VORaYl.html). (Consultado 21/08/2019).
- CONAGUA, 2014. Comisión Nacional del Agua/ Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Programa de Medidas Preventivas y de Mitigación de la Sequía, Consejos de Cuenca Ríos Presidio al San Pedro, Ríos Mocorito al Quelite y Fuerte al Sinaloa. <<http://www.conagua.gob.mx/pronacose/Contenido.aspx?n1=7yn2=54>> (Consultado el 12/01/2014).
- Coninagro, 2017. <https://www.infocampo.com.ar/coninagro-compartio-un-completo-informe-sobre-las-inundaciones-del-2017/>
- CREA, 2018. Consorcio de productores CREA. Sitio Andino <https://www.sitioandino.com.ar/n/256922-por-la-sequia-la-zona-pampeana-perdiera-us2-150-millones/>
- CREAN, 2019. Centro de Relevamiento y Evaluación de Recursos Agrícolas y Naturales, CONICET/UNC. Monitoreo de Sequías. [http://crean.org .ar/monitoreo](http://crean.org.ar/monitoreo). (Consultado, 31/07/2019).
- CREAN, 2018. Centro de Relevamiento y Evaluación de Recursos Agrícolas y Naturales, CONICET/UNC. Monitoreo de Sequías. [http://crean.org .ar/monitoreo](http://crean.org.ar/monitoreo). (Consultado, 09/10/2018).
- CREAN, 2017. Centro de Relevamiento y Evaluación de Recursos Agrícolas y Naturales, CONICET/UNC. Monitoreo de Sequías. [http://crean.org .ar/monitoreo](http://crean.org.ar/monitoreo). (Consultado, 09/12/2017).
- CRED-UNISDR, 2016. Mortality trends from major disasters from 1996 to 2015. *Poverty and Death: Disaster Mortality*. *Climate Research*, 75(3), 241-260.
- Dawson C.W. y Wilby R.L. 2001. Hydrological modeling using artificial neural networks. *Progress in Physical Geography*. 25(1): 80-108.

- Dawson C.W. y Wilby R.L. 1998. An artificial neural networks approach to rainfall- runoff modelling. *Hydrological Sciences Journal*. 43: 47-66.
- Diaadiapa, 2016. Diario Díaadía, Panamá. <http://www.diaadia.com.pa> (Consultado 30/08/2016).
- Diario Norte, 2019. Tiempo loco: hay exceso en algunas zonas del Chaco, mientras en otras sigue faltando agua. Nota: 19 junio 2016. <Http://diarionorte.com/article/140134/tiempo-loco-hay-exceso-en -algunas-zonas-del-chaco-mientras-en-otras-sigue-faltando-agua>. (Consultado 30/08/2019).
- Douriet Cárdenas, J.C., 2017. Determinación de escenarios por sequía mediante análisis multivariado temporal usando Redes Neuronales en México. Tesis de Doctorado. Consultada 12/11/2019
- Eastman J.R., 2015. *Idrisi Manual*. Clark Laboratories, Clark University. Worcester, USA. (2): 1-151.
- El Mundo, 2009. El país enfrenta la peor sequía de los últimos cincuenta años. Diario El Mundo, España. América, Argentina, Sección, Sociedad 13/11/09. <http://elmundo.es/america/2009/11/05/argentina/1257433211.html>. (Consultado, 22/08/19).
- ELONCE, 2017. Catamarca y Mendoza, en emergencia agrícola por inundaciones. *Elonce Economía* 14/04/2016. <http://elonce.co/secciones/economicas/458328-catamarca-y-mendoza-en-emergencia-agricola-por-inundacion.html>. (Consultado 04/09/2019).
- El País, 2019. Diario El País, Edición impresa jueves 29 de enero 2009. Http://elpais.com/elpais/2019/07/04/planeta_futuro/1562233972_183006.html.
- El País, 2009. Diario El País, Edición impresa jueves 29 de enero 2009. https://el pais.com/diario/2009/01/29/internacional/1233183612_850215.html.
- FAO, 2016. The impact of disasters on agriculture and food security. Libro electrónico. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-i5128e.pdf>. (Consultado 30/11/2017).
- FAO, 2015. The impact of natural hazards and disasters on agriculture, food security and nutrition. ISBN 978-92-5-108962-0 <http://www.fao.org/3/a-i5128e.pdf>. (Consultado 30/11/2017).
- FAO, 2012. Aumenta la preocupación en el sector agropecuario argentino por la prolongada sequía. *Agronoticias: Actualidad agropecuaria de América Latina y el Caribe*. <http://www.fao.org/in-action/agronoticias/detail/es/c/508977/>. (Consultada 11/10/2019).
- Fernández Long M.E. y Barnatán I. 2013. Adversidades Climáticas: Heladas. En: *Agrometeorología*. Murphy y Hurtado (Eds). Editorial Facultad de Agronomía. PP 315-341, ISBN 978-950-29-1324-7.

- Fernández Long M.E., Spescha L., Hurtado R. y Murphy, G.M. 2011. Impact of the ENSO on corn yields in the Argentinean pampas region. *Agriscientia XXVIII*: 31-38.
- Fernández Long M.E., Barnatán I., Spescha L., Hurtado R. y Murphy G.M. 2005. Caracterización de las heladas en la Región Pampeana y su variabilidad en los últimos 10 años. *Rev. Facultad de Agronomía*, 25(3): 247-257.
- Forquera J., Gonzalez D. y Prieto C. 2016. Termopluviometria y efecto Niño en la Patagonia Norte. *RALDA 2016*, 2 pp. Puerto Madryn, Chubut, Argentina.
- Forte Lay J.A., Scarpati O.E. y Capriolo A.D. 2008. "Precipitation variability and soil water content in pampean flatlands (Argentina)" *Geofísica Internacional*, vol.47, No,4: 341-354.
- Funahashi K., 1989. On the approximate realization of continuous mappings by neural networks. *Neural Networks*, 2: 183-192.
- Geografíanoa, 2010. (<http://Geografiadelnoa.blogspot.com/2010/11/datos-generales.html> (Consultada 15/10/2019).
- Griffin D. y Anchukaitis K.J. 2014. How unusual is the 2012-2014 California drought? *American Geophysical Union, Geophysical Research Letters*, 41: 9017-9023. doi:10.1002/2014GLO62433.
- Grimm A.M., Pal J. y Giorgi F. 2007. Connection between spring conditions and peak summer monsoon rainfall in South America; Role of soil moisture, surface temperature and topography in Eastern Brazil. *Journal of Climate*, V(20):5929-5945.
- Grimm A.M., Barros V.R. y Doyle M.E. 2000. Climate variability in southern South America associated with El Niño and la Niña events. *Journal of Climate* 13: 35-58.
- Hayes M.J., Svoboda M.D., Wilhite D.A. y Vanyarkho O.V. 1999. Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index. *Bulletin of the American Meteorology Society*, (80)3:420-438.
- Hecht-Nielsen R., 1990. *Neurocomputing*. Addison Wesley, 1990. 125 pp.
- Heim R.R., 2002. A review of twentieth-century drought indices used in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society* 83 (8): 1149-1166.
- Herzer H., Caputo M.G. y Celis A. 2004. Gestión de riesgos de desastre ENSO en América Latina. Informe final Argentina. Capítulo II. 53 pp. Consultado en: <http://www.cambioglobal.org/enso/informes/anho4/Argentina->.
- Hinkel J., 2011. Indicators of vulnerability and adaptive capacity: towards a clarification of the science-policy interface. *Global Environmental Change*, vol.21, Issue 1, pp. 198-208.

- http://mininterior.gov.ar/municipios/gestión/regiones_archivos/NEA.pdf.(Consultado 10/11/2019).
- <http://mxmedia.com.ar/capacitacion/practicas/wordAvanzado/Regiones.pdf>
(Consultado 25/11/2019)
- <http://www.rosariofinanzas.com.ar/informe-agro-resumen-semanal-13-05-18>.
- <http://patagonia-ffg.blogspot.com/p/clima.html>. (Consultado 05/11/2019).
- <http://es/climate/-data-org/america-del-sur/argentina/mendoza/mendoza>.(Consultado 25/11/2019)
- <http://es/climate/-data-org/america-del-sur/argentina/chubut/trelew-3649>.(Consultado 04/12/2019)
- Huang B., Banzon V.F., Freeman E., Lawrimore J., Liu W., Peterson T.C. y Smith T.M. 2014. Surface Temperature version 4(ERSST,v4): Part I. Upgrades and intercomparisons. *Journal of Climate*, 28: 911-930, doi; 10.1175/JCLI-D-14-00006.1.
- Hurtado R.H., Serio L.A., Spescha L.B., Fernández Long M.E y Murphy G.M. 2005, Análisis de la sensibilidad de distintos índices del ENOS para explicar los rendimientos de maíz en la región pampeana. *Rev. Fac. Agronomía UBA*,25:53-60.
- InfoCampo, 2017. Por las inundaciones, hay 290 mil hectáreas de maíz en riesgo. 19-01-2017. <http://infocampo.com.ar/por-las-inundaciones-hay-290-mil-hectareas-de-maiz-en-riesgo/>. (Consultado, 30/08/2019)
- INTA, 2019a. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. EEA Anguil. Informe Técnico sobre sequía en La Pampa. <http://inta.gob.ar/documentos/informe-tecnico-sobre-sequia-en-la-pampa-abril-2019>. (Consultada 20/08/2019).
- INTA, 2019b. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. EEA Chacra Experimental Integrada Barrow. http://inta.gob.ar/otec/chacra_experimental_integrada_barrow. (Consultada 10/08/2019).
- IPCC, 2012. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Adaptation. Informe Especial de los Grupos de Trabajo I y II del IPCC [Field C.B., Barros V.R., Stocker T.F., Qin D., Dokken D.J., Ebi K.L., Mastrandrea M.D., Mach K.J., Plattner G.K., Allen S.K., Tignor M. y Midgley P.M. (eds.)]. Cambridge y New York, Cambridge University Press.
- IRI-NOAA, 2016. National Center for the Environmental Information. Land and Ocean Temperature Percentiles Aug 2016. Data Source: GHCN-M version 3.3.0 y ERSST version 4.0.0. web: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/>. (Consultado 08/09/2016).

- IRI, 2015. Pronóstico del ENOS con diferentes modelos. http://iri.columbia.edu/climate/ENSO/currentinfo/SST_table.html. (Consultado 10/12/2015).
- Jobbágy E., 2017 (<http://www.todociencia.com.ar/preocupante/aumento-del-area-anegada-en-la-region-pampeana>). (Consultado el 09/09/2017).
- Jobbágy E., 2016. El suelo no absorbe el agua. <http://www.pagina12.com.ar/32250-el> (Consultado el 09/10/2016).
- Jozami E., Montero Bulacio E. y Coronel A. 2017. Temporal variability of ENSO effects on corn yield at the central region of Argentina. *International Journal of Climatology*, 38:1-12.
- Kobayashi K. y Salam M.U. 2000. Comparing Simulated and Measured Values Using Mean Squared Deviation and its Components. *Agronomy Journal*. 92:345-352.
- Labraga J.C., Scian B. y Frumento O. 2002. Anomalies in the atmospheric circulation associated with the rainfall excess or déficit in the Pampa Region in Argentina. *JGR-Atmospheres*, DOI: 10.1029/2002JD002113, 107, D23, 1-15.
- La Capital, 2018. Diario la Capital, Rosario.Secciones Economía. La Sociedad Rural de Rosario alerta que el campo padece "la peor sequía en 70 años", 20/02/2018.<http://lacapital.com.ar/economia/la-sociedad-rural-rosario-alerta-que-el-campo-padece-la-peor-sequia-70-años-n1560046.html> (Consultado 22/08/2019).
- Lachtermacher G. y Fuller, J.D. 1995. Backpropagation in time-series forecasting. *Journal of Forecasting*, 14: 381–393.
- Landsberg H.E. 1975. A Recurrent Element of Climate in Drought. Special Environmental Report No 5. Publ. World Meteorological Organization WMO-403, Genova, Switzerland, 113 pp.
- Lapedes A. y Farber R. 1987. "Nonlinear signal Processing Using Neural Networks. Prediction and modeling". Technical Report N° LA-UR-87-2662. Los Alamos National Laboratory. Los Alamos, NM.
- LaVoz del Interior, 2018. <http://www.lavoz.com.ar/temas/inundaciones-en-cordoba>.
- LaVoz del Interior, 2015a. <http://www.lavoz.com.ar/ciudadanos/villa-allende-se-transforma-en-una-zona-de-desastre>.
- LaVoz del Interior, 2015b. <http://www.lavoz.com.ar/ciudadanos/sierras-chicas-muerte-desastre-y-destruccion-por-las-lluvias>.
- Legates D.R. y McCabe G.J. 1999. Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*, Vol. 35 (1): 233-241.

- Los Andes, 2016. Mendoza, desbordada por las lluvias. Sociedad 06/01/2016
[Http://losandes.com.ar/article/mendoza-desbordada-por-las-lluvias](http://losandes.com.ar/article/mendoza-desbordada-por-las-lluvias). (Consultado 04/09/2029).
- Ma M., Song S., Ren L., Jiang S. y Song J. 2013. Multivariate drought characteristics using trivariate Gaussian and Student t copulas. *Hydrol. Process.* 27 (8), 1175– 1190. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.8432>.
- MAG, 2016. Ministerio de Agricultura y Ganadería. <Http://www.diaadia.com.pa2016>.
- Magaña V.O. y Conde C. 2000. Climate and freshwater resources in northern Mexico: Sonora, a case study. *Environmental Monitoring and Assessment*. KLUWER Academic Publishers. 61: 167-185.
- Makwana J.J. y Tiwari, M.K. 2014. Intermittent Streamflow Forecasting and Extreme Event Modelling using Wavelet based Artificial Neural Networks. *Water Resour Manage.*, 28: 4857. doi:10.1007/s11269-014-0781-1
- McCulloch W.S. y Pitts W.H. 1943 "A logical calculus of ideas immanent in nervous activity," *Bulletin of Mathematical Biophysics*, Vol. 5: 115-133.
- McKay G.A., 1986. "Drought: A Global Perspective." *CHS: 86 Proc.* 1-26.
- McKee T.B., Doesken N.J. y Kleist J. 1995. Drought monitoring with multiple time scales. *Proceedings of the 9th Conference on Applied Climatology*. Dallas, TX, American Meteorological Society, pp, 233-236.
- McKee T.B., Doesken, N.J. y Kleist J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology*. American Meteorological Society. Boston, Massachusetts. pp. 179-184.
- MiDA, 2016. (Ministerio de Desarrollo Agropecuario de Panamá) <http://www.excelsior.com.mx/global/2016/01/29/1071878> .
- Mishra A.K. y Singh V.P. 2011. A review of Drought modelin. *Journal of Hydrology*, 403: 157–175. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.03.049.
- Mishra, A. K., y Singh V.P. 2010. A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391 (1–2), 202–216.
- Mittal P., Chowdhury S., Roy S., Bhatia N. y Srivastav R., 2012. Dual Artificial Neural Network for Rainfall-Runoff Forecasting. *Journal of Water Resource and Protection*, 2012, 4, 1024-1028 . <http://dx.doi.org/10.4236/jwarp.2012.412118>.
- Moradi H.R. y Erfanzadeh R. 2001. Investigation of droughts trend in Haraz River Watershed, pp. 283–292.

- Morid S., Smakhtin V. and. Bagherzadeh K. 2007: Drought forecasting using artificial neural networks and time series of drought indices. *Int. J. Climatology*, 27: 2103–2111.
- Moss R.H., Nakicenovic N. O'Neill B. 2008. This report summarizes the findings and recommendations from the IPCC Expert Meeting on New Scenarios in Noordwijkerhout, The Netherlands, 19-21 September 2007 IPCC.
- NADM, 2016. National Drought Mitigation Center <https://www.drought.gov/nadm/content/2016-nadm-workshop>.
- NDMC, 2015. National Drought Mitigation Center What is drought? National Drought Mitigation Center. <http://drought.unl.edu/whatis/what.htm>. (Consultado 15/10/2016).
- NASA- NOAA, 2015. National Oceanic and Atmospheric Administration. ENSO: Recent Evolution, Current Status and Predictions. Boletín de octubre 2015. En línea: http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/lanina/enso_evolution-status-fcsts-web.pdf. (Consultado 12/11/2015).
- NASA-CNES, 2016. <https://www.nurserymag.com/article/el-nino-set-to-bear-down-on-united-states-1215/>. (Consultado 15/01/16)
- Nguyen D. y Widrow B. 1990. "Improving the learning speed of 2-layer neural networks by choosing initial values of the adaptive weights," *Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks*, Vol. 3: 2126.
- NOAA, 2019. National Oceanic and Atmospheric Administration. <http://www.nede.noaa.gov/teleconnections/enso/>. (Consultado 15/06/2019).
- NOAA, 2018. National Oceanic and Atmospheric Administration. <http://www.nede.noaa.gov/teleconnections/enso/>. (Consultado 12/02/2018).
- NOAA, 2016. National Center for the Environmental Information. Land and Ocean Temperature Percentiles Aug 2016. Data Source: GHCN-M version 3.3.0 y ERSST version 4.0.0. web: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/>. (Consultado 08/09/2016).
- NSTC, 2005. Grand challenges for disaster reduction. National Science and Technology Council Rep., 25 pp. [Available online at <http://www.sdr.gov/docs/SDRGrandChallengesforDisasterReduction.pdf>.].
- Obasi G.O.P., 1994. WMO's role in the international decade for natural disaster reduction, *Bull. Am. Meteorological. Soc.* 75(1), 655-1661.
- OCPN, 2006. (Organismo de Cuenca Pacifico Norte) Programa Hidráulico Regional 2007-2012. OCPN-CONAGUA. Imprenta de oficina de gobierno.

- OFDA/CRED, 2016. EM.Dat., <http://www.cred.be/emdat/intro.html> (Access date: Nov 28, 2016).
- ONU, 2019. Organización Naciones Unidas. Noticias ONU. Temas, Cambio –Climático y Medioambiente. Australia tiene cada vez más días propicios para incendios “catastróficos” <https://news.un.org/es/news/topic/climate-change> (Consultado 10/10/2019)
- Ortega–Gaucin D. y Velasco I. 2013. Socioeconomic and environmental aspects of in México. Aqua-LAC – Vol 5 N° 2 pp 78-90.
- ORA, 2018. Oficina de Riesgo Agropecuario. Secretaria de Agroindustria. Ministerio de Producción y Trabajo Presidencia de la Nación, <http://www.ora.gob.ar/>
- Ovando G., Bocco M. y Sayago S. 2005. Redes neuronales para modelar predicción de heladas. Agricultura Técnica vol. 65(1): 65-73.
- Palmer W.C., 1968. Keeping track of crop moisture conditions, nationwide: the new Crop Moisture Index - Weatherwise, 21: 156-161.
- Palmer W.C., 1965. Meteorological drought. U.S. Department of Commerce Weather Bureau Research Paper No 45, 58pp.
- Panu U.S. y Sharma, T.C. 2002. Challenges in drought reserarch: Some perspectives and future directions. Hydrological Sciences Journal 47: S19-S30.
- Pérez Ballari A., Botana M.I., Laporta P. y Lezzi L. 2009. Sequías en la provincia de Buenos Aires: Resultados de un proceso de investigación. XI Jornadas de Investigación del Centro de Investigaciones Geográficas y del Departamento de Geografía. ISSN 1850-0862.
http://www.fuentesmemoria.fahce.unlp.edu.ar/trab_eventos/ev.824/ev.824.pdf
- Perfil, 2018. Fotos “La sequía más importante de los últimos 70 años” en Argentina. Diario Perfil Sección, Sociedad/Sequías 21/02/2018
<http://perfil.com/noticias/sociedad/fotos-de-la-sequia-mas-importante-de-los-ultimos-70-años-en-argentina.phtml> (Consultado 28/08/2019).
- Portal Cañas, 2016. Noticias del Mundo Cañero.
<https://www.portalcania.com.ar/noticia/aseguran-que-el-fenomeno-el-nino-seria-aun-mas-fuerte/>.
- Qiu J., 2010. China drought highlights future climate threats. Nature Climate Change, 465(7295): 142–143.
- Ravelo A.C., Planchuelo A.M., Aroche R., Douriet C.J.C., Hallack A.M., Jimenez R., Maureira H., Peña P.T., Tiscornia G., Zanvettor R., y Zimmermann R. 2016a. Monitoreo y Evaluación de las Sequías en América Central, Estudio de Caso:

- Corredor seco de El Salvador, Honduras y Nicaragua. Serie de Estudios Temáticos EUROCLIMA-acción en desertificación, degradación de tierras y sequías (DDTS). Reporte Técnico del Joint Research Centre de European Commission. JRC Science Hub, <https://ec.europa.eu/jrc>. JRC102117, EUR27974ES. ISBN9789279594106.
- Ravelo A.C., Planchuelo A.M., Zanvettor R.E. y Boletta, P.E.C. 2016b. Sistema de monitoreo y evaluación de las sequías en Argentina. *Agrometeoros*, Passo Fundo, v.24, n.1, p.113-120.
- Ravelo A.C., Sanz Ramos R. y Douriet Cárdenas J.C. 2014. Detección, evaluación y pronóstico de las sequías en la región del Organismo de cuenca Pacífico Norte, México. *AgriScientia* Vol. 31(1): 11-24.
- Ravelo A.C., 2012. Monitoreo, Pronóstico y Evaluación de Riesgo por Sequía Hidrológica en la RH10 el OCPN; Utilización de información satelital en el monitoreo de las sequías. Informe OMM/PREMIA No. GINT 01/2012. OMM-CONAGUA. 85 págs.
- Ravelo A.C., 2007. Centro de Relevamiento y Evaluación de Recursos Agrícolas y Naturales (CREAN),FCA/UNC. Monitoreo de Sequías. <http://www.crean.agro.unc.edu.ar>.
- Rosenberg N.J., Blad B.L. y Verma S.B. 1983. *Microclimate: The Biological Environment*. 2nd edn., Wiley Interscience, 495 pp.
- SCADO, 2013. Factsheets of SCADO Indicators. Vegetation Productivity Anomaly (Fapar Anomaly) South-Central American Drought Observatory. Joint Research Center. scado.jrc.ec.europa.eu/.../factsheets/factsheet_fapar.pdf 6 pp.
- Scarpati O. y Capriolo A.D. 2013. Drought and floods in Buenos Aires province (Argentina) and their space temporal distribution. *Investigación Geográfica*, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM ISSN 0188-4611 Num. 82 pp38-51.
- Scian B., Labraga J.C., Reimers W. y Frumento O., 2006. Characteristics of large-scale atmospheric circulation related to extreme monthly rainfall anomalies in the Pampas Region, Argentina, under non-ENSO conditions. *Theor. Appl. Climatology*, DOI 10.1007/s00704-005-0182-8, 85, 89-106.
- Saha S. y Coauthors, 2010: The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 91, 1015–1057, doi:10.1175/2010BAMS3001.1.
- Saha S. y Coauthors, 2006: The NCEP Climate Forecast System. *J. Climate*, 19, 3483–3517, doi:10.1175/JCLI3812.1.
- SMN, 2018. Servicio Meteorológico Nacional. <http://ssl.smn.gob.ar/serviciosclimaticos> (Consultado 10/02/2018).
- SMN, 1992. Servicio Meteorológico Nacional. *Estadísticas climatológicas 1981-1990*, Buenos Aires 709 pág.

- Spennemann P.C., Rivera J. A., Osman M., Saulo A.C. y Penalba O.C. 2017: Assessment of Seasonal Soil Moisture Forecasts over Southern South America with Emphasis on Dry and Wet Events. *Journal of Hydrometeorology*, 18, 2297–2311, doi:10.1175/JHM-D-17-0015.1.
- Srinivasan A. y Batur, C. 1994. “Hopfield – ART1 Neural Network-Based Fault Detection and Isolation”, *IEEE Transactions on neural networks*, Vol. 5, NO. 6, pp. 890-8990.
- Tang H. y Fishwick P.A. 1993. Feedforward neural nets as models for time series forecasting *ORSA Journal on Computing*, 5(4): 374-385.
- Télam, 2016. El Norte de la Patagonia enfrenta una de las peores sequías en 60 años. *Sociedad* 27/09/2016. Alerta. <http://telam.com.ar/notas/201609/164750-norte-patagonia-enfrenta-peores-sequias-60-años.html>. (Consultado 06/08/2019).
- Thom H., 1971. Some methods of climatological analysis. Technical note No 81, Organización Meteorológica Mundial, (WMO), 199; TP, 103; Ginebra, Suiza, 1-11pp.
- Thomasz E., Rondinone G., Vilker A. y Eriz M. 2017. El impacto económico de los eventos climáticos extremos en Argentina: el caso de la soja en la zona núcleo ¿Riesgo climático o déficit de infraestructura?. Consultado en <http://www.economicas.uba.ar>.
- Thornthwaite C.W. y Mather J.R. 1957. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. Drexel Institute of Technology. *Climatology* 10(3):185-311.
- Torrecillas Nuñez C.E., Ravelo A.C., Miguel A. 2015. PMPMS 2015. Actualización de los Programa de Medidas Preventivas y de Mitigación de Sequías de los Consejos de Cuenca de los ríos Fuerte y Sinaloa, Mocorito al Quelite y Presidio al San Pedro. www.conagua.gob.mx.
- Torrecillas Nuñez C.E., Miguel A., Ravelo A.C. 2013. PMPMS 2013. Programa de Medidas Preventivas y de Mitigación de Sequías de los Consejos de Cuenca de los ríos Fuerte y Sinaloa, Mocorito al Quelite y Presidio al San Pedro. www.conagua.gob.mx.
- Universal, 2017. Entre Inundaciones y sequías, la soja ya se ve comprometida *Universal medios.com.ar/ Sección: Agropecuarias Http://universalmedios.com.ar/agropecuarias/inundaciones-sequía-la-soja-ya-se-ve-comprometida/*. (Consultado 31/08/2019).
- Wasserman P.D. 1989. *Neural Computing: theory and practice*. New York: Van Nostrand Reinhold. ISBN-978-0-442-20743-4.

- We are Water, 2018. Foundation. http://www.wearewater.org/es/la-fundacion_253356. (Consultado 03/07/2018).
- Weigend A.S., Huberman B.A. y Rumelhart D.E. 1990 “Predicting the Future: A connectionist Approach” *Intl. J. Neur. Sys.* 1: 193-209.
- Wilhite D.A., Svoboda M.D. y Hayes M.J. 2007. Understanding the complex impacts of drought: A key to enhancing drought mitigation and preparedness. *Water Resources Management* 21: 763-774.
- Wilhite D.A., Glantz M.H. 1985. Understanding the drought phenomenon: The role of definitions. *Water International* 10, 111-120.
- WMO, 2018. World Meteorological Organization
http://www.wmo.int/pages/wcp/wcasp/enso_updates.html
- WMO, 2006. World Meteorological Organization No 1006 Drought monitoring and early warning: concepts, progress and future challenges. Weather and climate information for sustainable agricultural development. ISBN 92-63-11006-9 24pp.
- Young K. 1992. A three way model for interpolating for monthly precipitation values. *Mon. Wea. Rev.* 120:2561-2569.
- Zanvettor R.E., Ravelo A.C., Thomasz E.O. y Sanchez S.S. 2017. Evaluación Agroclimática y Económica de los Efectos Adversos de Excesos Hídricos en la Región Pampeana Argentina. *Revista Argentina de Agrometeorología RADA*. Vol. VIII: (1-13). ISSN 2545-8418.
- Zanvettor R.E., Ravelo A.C., Boletta P.E.C. 2016. Monitoreo y Evaluación de las Condiciones Hídricas Extremas (Sequías y Excesos de Humedad) en Argentina. *Revista Argentina de Agrometeorología RADA*. Vol. VII: (15-25). ISSN 2545-8418.
- Zanvettor R. y Ravelo A. 2000. Using the SPI to Monitor the 1999-2000 Drought in Northeastern Argentina. *Drought Network News*. International Drought Information Center and the National Drought Mitigation Center, University of Nebraska-Lincoln, USA. Vol.12 (3): 3-4pp.
- Zongxing L., He Y., Wang P.H., Theakstone W.H., An W., Wang X., Lu A., Zhang W., Cao W. 2012. Changes of daily climate extremes in southwestern China during 1961–2008. *Global and Planetary Change*, 80–81, 255–272.

ANEXOS

ANEXO 1

DETALLE METODOLOGÍA DE CÁLCULO DE LOS ÍNDICES

a. ÍNDICE DE SEVERIDAD DE SEQUÍA DE PALMER (PDSI)

El método de Palmer (Palmer, 1965) inicia un balance hídrico a nivel mensual, usa registros de precipitación total acumulada y temperatura media mensual. El almacenamiento de agua en el suelo es manejado de la siguiente forma: el suelo es dividido en dos capas de suelo, no definidas en profundidad, pero si en su comportamiento hídrico. Palmer asume que en la capa superficial se pueden almacenar 25 mm y lo considera como constante para todos los casos. En la capa subsuperficial la cantidad de agua que se puede almacenar es la Capacidad de Almacenamiento (CA) de todo el suelo menos 25 mm que se puede almacenar solo en la primera capa. La humedad no puede ser removida de (o recargada hacia) la capa subsuperficial hasta que toda la humedad de la capa superficial haya sido removida o se encuentre llena de agua por completo. La Evapotranspiración Potencial (ETP) es calculada por el método de Thornthwaite, sin embargo, menciona que puede ser calculada por cualquier otro método. Las pérdidas de humedad del suelo para satisfacer la demanda de la ETP ocurren solamente si la ETP es mayor que la Precipitación (P) del mes. Las pérdidas por ETP de la capa superficial (Ls) se asume que toma lugar en forma potencial. Las pérdidas por ETP de la capa subsuperficial (Lu) dependen del contenido de humedad inicial en la capa subsuperficial, la cantidad de ETP y la CA de todo el suelo. Esto es, si $ETP > P$.

$Ls = \text{el menor valor de } [Ss, \text{ o } (ETP - P)], \text{ y}$

$Lu = [(ETP - P) - Ls] Su/CA, Lu \text{ menor o igual que } Su.$

Donde:

Ss es la cantidad de humedad almacenada en mm al inicio del mes en la capa superficial.

Su es la cantidad de humedad almacenada en mm al inicio del mes en la capa subsuperficial.

El escurrimiento (RO) se asume que ocurre solamente si ambas capas de suelo se encuentran a su máxima capacidad de almacenamiento, es decir se encuentran llenas, y además la precipitación es mayor que ETP. Cuando se presentan esas dos condiciones, entonces $RO = (P - ETP)$.

Como parte del balance hídrico, el método de Palmer calcula tres términos adicionales: Recarga Potencial (PR), Pérdida Potencial (PL) y Escurrimiento Potencia (PRO).

La **Recarga Potencial (PR)** se define como la cantidad de humedad en mm requerida para llevar el suelo a capacidad de campo y se calcula como:

$$PR = CA - (Ss + Su) \quad (1.1)$$

La **pérdida Potencial (PL)** se define como la cantidad de humedad en mm que podría perderse del suelo por la demanda de la ETP si el suministro de precipitación durante el mes es cero y se calcula como:

$$PL = PLs + PLu \quad (1.2)$$

Donde:

$$PLs = \text{menor valor de } [ETP, \text{ o } Ss]$$

$$PLu = (ETP - PLs) Su/CA, PLu \text{ menor o igual que } Su$$

El **Escurrimiento Potencial (PRO)** en mm, es definido como la precipitación potencial menos la recarga potencial, Palmer (1965) asume que la precipitación es igual a la CA, entonces:

$$PRO = CA - PR = S_s + S_u \quad (1.3)$$

Los cuatro valores potenciales (*ETP*, *PR*, *PL* y *PRO*) son usados para calcular cuatro coeficientes o constantes (adimensionales) los cuales son dependientes del clima del área o sitio que se analiza:

a) Coeficiente de evapotranspiración, α (Alfa).

$$\alpha_i = ET/ETP, \quad (1.4)$$

Donde:

ET = Evapotranspiración media mensual real del mes *i*, en mm.

ETP = Evapotranspiración media mensual potencial del mes *i*, en mm.

b) Coeficiente de recarga, β (Beta)

$$\beta_i = R / PR \quad (1.5)$$

Donde:

R = Promedio mensual de la recarga real del mes *i*, en mm.

PR = Promedio mensual de la recarga potencial del mes *i*, en mm.

c) Coeficiente de escurrimiento, γ (Gamma)

$$\gamma_i = RO / PRO, \quad (1.6)$$

Donde:

RO = Promedio mensual del escurrimiento real del mes *i*, en mm.

PRO = Promedio mensual del escurrimiento potencial del mes *i*, en mm.

d) Coeficiente de pérdidas Δ (Delta).

$$\Delta_i = L / PL \quad (1.7)$$

L = Promedio mensual de la pérdida real del mes *i*, en mm.

PL = Promedio mensual de pérdida potencial del mes *i*, en mm

En todos los casos $i=1, 2, \dots, 12$, que corresponden a los doce meses del año.

Estos cuatro coeficientes son usados para calcular las diferencias d_j en mm de cada mes de todos los registros de todos los años, entre la precipitación actual o real (P_j) y la precipitación estimada (Pe_j) o climáticamente adecuada para las condiciones existentes.

d_j = diferencia en mm de cada mes

$$d_j = P_j - Pe_j$$

$$d_j = P_j - (\alpha_i ETP_j + \beta_i PR_j + \gamma_i PRO_j - \Delta_i PL_j) \quad (1.8)$$

Esta precipitación estimada (Pe_j) es la que tendría que ocurrir en un mes particular para satisfacer la evapotranspiración, escurrimiento y humedad almacenada, consideradas como normales y apropiadas para el clima.

Esta precipitación calculada es en efecto una precipitación normal ajustada. El ajuste depende del tiempo antecedente, reflejado por el almacenamiento de humedad calculado y de la anomalía de la evapotranspiración potencial durante el mes en cuestión. Sobre un período de tiempo largo, la media de la precipitación calculada es igual a la media de la precipitación actual, pero para un mes particular la precipitación actual menos la calculada proporciona una medida, (d_j), del grado al cual el mes fue anormalmente seco o anormalmente húmedo.

La definición de la precipitación estimada es análoga a un simple balance hídrico donde la precipitación es igual a la evapotranspiración potencial más el escurrimiento más o menos cualquier cambio en la humedad almacenada en el suelo.

Las series temporales de datos de precipitación históricos climatológicos y meteorológicos utilizados, son registros de 96 estaciones, correspondientes al período de monitoreo que va desde 1980 hasta la fecha actual 2018. Estas series de precipitación mensual fueron sometidas a control de calidad respecto a continuidad, consistencia, magnitud, variabilidad y confiabilidad. Para esto se utilizó métodos gráficos y estadísticos,

particularmente la desviación estándar para chequear la variabilidad y magnitud de los datos de cada serie. Se utilizó solo series completas y continuas de todas las estaciones meteorológicas del SMN de Argentina y fueron descartadas aquellas con datos faltantes.

b. ÍNDICE ESTANDARIZADO DE PRECIPITACIÓN (SPI)

El SPI para cuantificar a las sequías utiliza la función gamma para ajustar la distribución de probabilidades de las series de precipitaciones, ya que según Thom (1971) y Young (1992) la distribución de probabilidades gamma, es la función que mejor ajusta las series de precipitación. La Figura A1.1 muestra la función de densidad de probabilidades gamma, la cual es sesgada a la derecha, con el límite inferior cero.

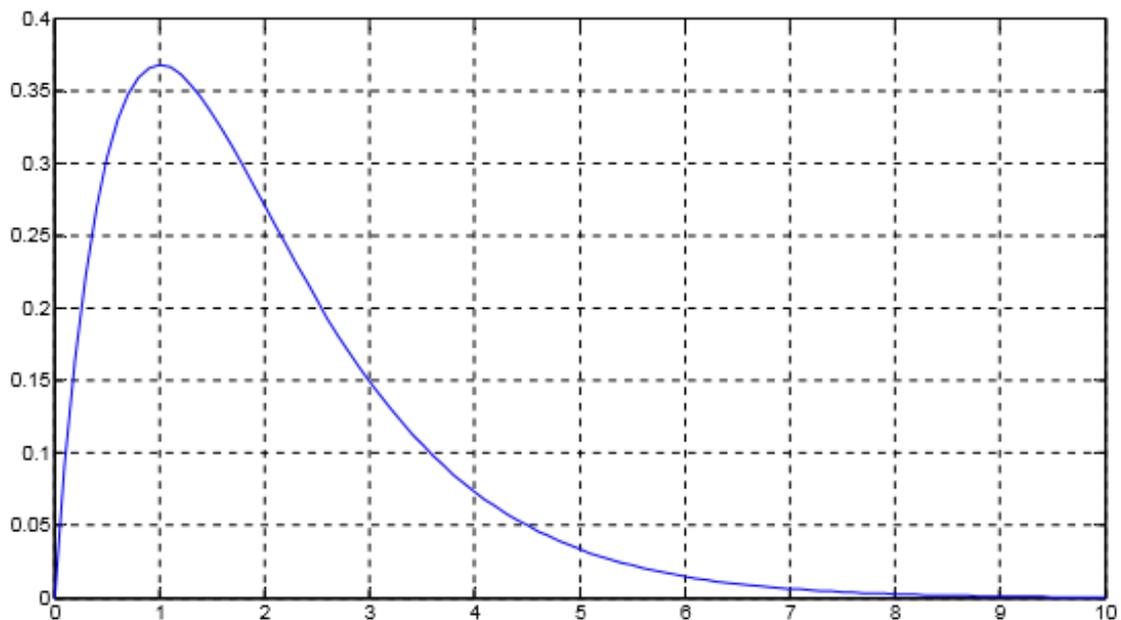


Figura A1.1. Función de Densidad de Probabilidad Gamma ($\alpha=2$, $\beta=1$) (McKee, 1993).

La función de densidad de probabilidades gamma está definida por:

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} \cdot e^{-x/\beta} \quad (1.9)$$

Donde:

Γ es la función gamma

α y β son parámetros de la función de probabilidad gamma, los cuales son estimados para cada estación y para cada escala de tiempo. De acuerdo a Thom (1971) los valores de los parámetros α y β se determinan por el método de máxima verosimilitud mediante las siguientes ecuaciones:

$$\alpha = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right) \quad \text{Factor de forma} \quad (1.10)$$

$$\beta = \frac{x}{\alpha} \quad \text{Factor de escala} \quad (1.11)$$

$$A = \ln(x) - \frac{\sum \ln(x)}{n} \quad (1.12)$$

Donde:

\bar{x} = Es la media de las precipitaciones

n = Número de observaciones de precipitación

Estos parámetros son utilizados en el cálculo de la probabilidad acumulada de la precipitación observada. La función de distribución acumulada gamma esta expresada por:

$$G(x) = \int_0^x g(x) dx = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_0^x x^{\alpha-1} \cdot e^{-x/\beta} dx \quad (1.13)$$

Utilizando la transformación: $t = x/\beta$ la ecuación toma la forma de la función gamma incompleta:

$$G(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^t t^{\alpha-1} \cdot e^{-t} dt \quad (1.14)$$

Dado que la función gamma incompleta es indefinida para $x=0$ y la distribución puede contener valores de precipitación igual a cero, la probabilidad acumulada se convierte en:

$$H(x) = q + (1 - q) G(x) \quad (1.15)$$

Donde:

q es la probabilidad estimada para un valor cero de precipitación.

La probabilidad acumulada $H(x)$ es transformada a una variable normal Z con media 0 y varianza 1, mediante la aproximación de Abramowitz y Stegun (1965), que convierte la probabilidad acumulada a la equivalente de una variable normal estándar asociada al valor de SPI mediante:

$$Z = SPI = -(t - \frac{C_0 + C_1t + C_2t^2}{1 + d_1t + d_2t^2 + d_3t^3})$$

Para $0 < H(x) \leq 0,5$ (1.16)

$$Z = SPI = + (t - \frac{C_0 + C_1t + C_2t^2}{1 + d_1t + d_2t^2 + d_3t^3})$$

Para $0,5 < H(x) \leq 1,0$ (1.17)

Donde:

$$t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(H(x))^2}\right)}$$

Para $0 < H(x) \leq 0,5$ (1.18)

$$t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(1.0-H(x))^2}\right)}$$

Para $0,5 < H(x) \leq 1,0$ (1.19)

$C_0 = 2.515517$
 $C_1 = 0.802853$
 $C_3 = 0.010328$
 $d_1 = 1.432788$
 $d_2 = 0.189269$
 $d_3 = 0.001308$

La ventaja de este método es que el valor obtenido de $SPI = Z$ corresponde a una variable con distribución normal, la cual permite comparar diversas estaciones pluviométricas con diferentes rangos de precipitación, también es posible realizar comparaciones a lo largo del tiempo y a distintos niveles de agregación temporal.

ANEXO 2

DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA BASE TEÓRICA DE LA RN

a. COMPONENTES DE LA RED NEURONAL (RN)

Las RN pueden clasificarse en función al número de capas que contienen las mismas en: simples (redes de Hopfield), bicapa, multicapa; así como, por la dirección del flujo de información en: redes multicapas estáticas hacia adelante (feedforward) o perceptrón multicapa y redes recurrentes o dinámicas.

Los nodos están organizados en las siguientes capas; los que reciben los estímulos de la variable ambiental y lo distribuyen a la red donde se ubican en la primera capa denominada "capa de entrada" o input layer y los nodos de salida que generan la respuesta de la red y se ordenan en la "capa de salida" o output layer.

El perceptron multicapa (MLP por sus siglas en inglés) es uno de los más sencillos de redes neuronales multicapa y se deriva del concepto de perceptron simple, presentando capas de neuronas, en lugar de una sola neurona, que van ocultas, es decir, no pertenecen ni a la entrada ni a la salida de la red. Este tipo de redes al componerse de varias capas, tiene la característica de no ser lineal, y es capaz de clasificar entradas que pertenecen a dos o más clases que no son linealmente separables. La Figura A2.1 muestra los elementos del nodo j , las entradas al nodo están definidas por el vector $X = (X_1, X_i, X_n)$, los valores de X son datos de entrada a la red o puede ser de las salidas de otros nodos. El vector de pesos es $W_j = (w_{1j}, \dots, w_{ij}, \dots, w_{nj})$; w_{ij} representa el grado de conexión entre el nodo i y el j , y se denomina b_j al umbral o bias. La respuesta del nodo y_j se determina utilizando la siguiente función:

$$Y_j = f(XW_j - b_j) \quad (2.1)$$

Donde: $(XW_j - b_j)$ representa la combinación lineal de los pesos y las entradas, b_j es el término independiente y f es la llamada Función de Activación (FA) o función de

transferencia (Figura A2.1), que determina la respuesta del nodo a las señales de entrada recibidas. En general, las funciones de activación introducen grados de no linealidad a la red neuronal.

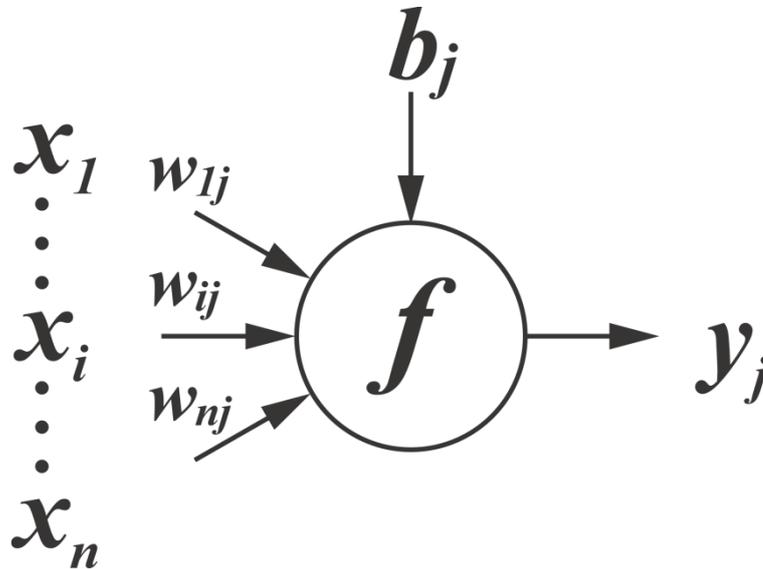


Figura A2.1 Diagrama esquemático de los elementos del nodo j, las entradas (X_n), los pesos (W_{nj}) y el umbral (b_j).

Entre las funciones de activación más utilizadas podemos mencionar a las siguientes:

- Función logística:
$$f(x) = \frac{1}{(1 + e^{-x})} \quad (2.2)$$

- Función tangente hiperbólica:

$$f(x) = \frac{(e^x - e^{-x})}{(e^x + e^{-x})} \quad (2.3)$$

- Función sigmoidea y tangente hiperbólica:

$$f(x_j) = \frac{1}{1 + e^{-\alpha(x_j - \theta)}} \quad \text{función sigmoidea} \quad (2.4)$$

$$f(x_j) = \text{tgh}(x_j) = \frac{1 - e^{-\alpha(x_j - \theta)}}{1 + e^{-\alpha(x_j - \theta)}} \quad (2.5)$$

Donde:

α y θ son constantes reales denominada ganancia y umbral.

Las capas ocultas se encuentran ubicadas entre la capa de entrada y la de salida, no teniendo conexión directa con el medio exterior a la red. El número de capas ocultas y el número de nodos en cada capa oculta se determina a partir de procedimientos de prueba y error. Los nodos se relacionan con nodos de otras capas mediante conexiones; las cuales, tienen asignados valores numéricos o pesos que indican el grado de intensidad de la conexión y su relación entre los nodos. La respuesta de un nodo depende de las señales de entrada, procedentes de los nodos ubicados en las capas previas, de los pesos de las conexiones de los nodos y de la función de activación correspondiente. En las redes alimentadas hacia adelante denominada "Feedforward" el flujo de la información pasa desde la capa de entrada hacia la capa de salida, mientras que en las redes neuronales recurrentes, el flujo de la información puede circular en ambos sentidos; con lo cual, ciertos nodos de la capa de salida pueden retroalimentar a la red, siendo sus salidas conectadas a la capa de entrada.

Una de las arquitecturas de RN más empleadas para el pronóstico es la del perceptron multicapas que presenta tres capas de neuronas (figura A2.2), una capa de entrada cuyas neuronas son X_i (en la que ingresan los datos, en este caso los valores del índice PDSI de los seis meses anteriores, una o más capas ocultas con neuronas O_j y una capa de salida con neuronas S_k (en este caso tres neuronas con el pronóstico a tres meses). De igual forma se hace para los índices SPI de tres y doce meses. El error de pronóstico de las RN se puede ir corrigiendo a través de diversos algoritmos; uno de los más usados es el conocido como "backpropagation", que propaga el error hacia atrás desde la capa de salida hasta la de entrada. De esta manera se ajustan los pesos (W_{ji} y W_{jk}) para conseguir disminuir el error en cada paso y el error final; de esta manera se "aprende" la relación que existe entre el conjunto de patrones dados como ejemplo y sus salidas correspondientes (Ovando et al., 2005).

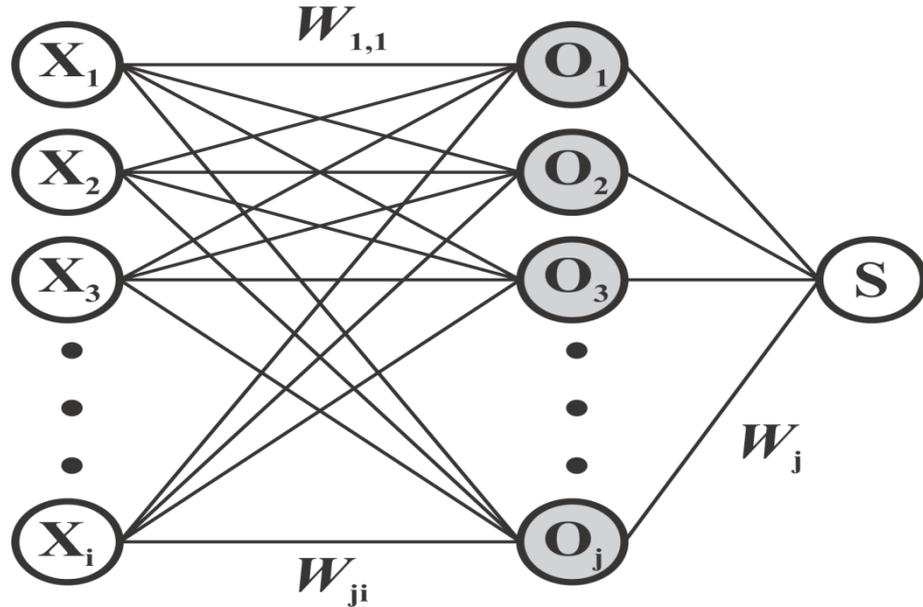


Figura A2.2 Esquema donde se representa la estructura de una RN feedforward de tres capas.

A los datos de entrada se les realiza un pre-procesamiento o normalización mediante las siguientes formulas que son generalmente indicadas para los datos de entrada:

- Transformación lineal entre [0, 1]:

$$X^n = \frac{(X_o - X_{min})}{(X_{max} - X_{min})} \quad \text{Lapedes y Farber, (1987)} \quad (2.6)$$

- Transformación lineal entre [a, b]:

$$X^n = (b - a) \frac{(X_o - X_{min})}{(X_{max} - X_{min})} + a \quad \text{Srinivasan y Batur, (1994)} \quad (2.7)$$

- Normalización estadística:

$$X^n = \frac{(X_o - \bar{X})}{s} \quad \text{Weigend et al., (1990)} \quad (2.8)$$

- Normalización simple:

$$X^n = \frac{(x_o)}{x_{max}} \quad \text{Lachtermacher y Fuller, (1995)} \quad (2.9)$$

Donde: X_o representan los datos sin procesar y X^n los datos normalizados, X_{min} , X_{max} , X y S representan el mínimo, máximo, promedio y la desviación estándar de los datos, respectivamente.

El proceso de normalización de los datos de salida generalmente es independiente al de los datos de entrada, aunque para el pronóstico de series temporales se recomienda que la normalización sea de forma conjunta entre los datos de entrada y salida. Debe de tenerse en cuenta en el proceso de normalización, los rangos de salidas de las funciones de activación de los nodos. El rango de salida de la función logística es de [0,1], el de la tangente hiperbólica es de [-1, 1]. Se utilizan rangos de normalización que varían de [0.1, 0.9] según Srinivasan y Batur (1994) y [0.2, 0.8] según Tang y Fishwick (1993), para funciones logísticas, basado en que las funciones de activación tienen límites asintóticos y para no limitar la capacidad de extrapolación de la red. Se debe considerar que cuando se utilizan datos normalizados, los valores de salida de la red se encuentran escalados en el rango de normalización, por lo que para evaluar la precisión del método se deben re-escalar los datos.

b. DETERMINACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE AJUSTES DE LAS REDES NEURONALES

Un método ampliamente utilizado en el entrenamiento de la red es asignarle valores aleatorios a los pesos de una red; sin embargo, esto fue señalado como un inconveniente por (Nguyen y Widrow, 1990) dado que al usar valores aleatorios para los pesos se puede conducir a una situación en la que muchas neuronas contribuyan muy poco al desempeño de la red durante el proceso de entrenamiento y con la inseguridad que los nodos restantes sean suficientes para representar adecuadamente el sistema a representar.

La elección de los pesos influye en lograr que la red llegue a encontrar el óptimo global o no, así como en la rapidez de convergencia. Debido a las características de las funciones de activación, es necesario evitar que los pesos iniciales hagan próxima a cero las activaciones o sus derivadas; por lo cual, los pesos iniciales asignados no deben de ser muy grandes, para evitar que las neuronas se saturen y su derivada sea cero ni muy pequeños para evitar activaciones próximas a cero.

c. ENTRENAMIENTO DE LAS REDES NEURONALES

El proceso de entrenamiento consiste en un problema de minimización no lineal de la función de error, a partir de la modificación de los pesos de la red. La existencia de diversos métodos para la optimización de la función de error, tiene como consecuencia directa a la existencia de diversos algoritmos de entrenamiento. Actualmente no existe ningún método que garantice un óptimo global debido a que todos los métodos de optimización tienen la posibilidad de quedar atrapados en mínimos locales.

Uno de los principales objetivos de una red neuronal es generalizar una función que presente las siguientes características:

$$Y^n = f(X^m . p) \quad (2.10)$$

Donde;

Y^n es el vector n dimensional de salidas

X^m es el vector m dimensional de entradas

p representa los parámetros de la red

Un método de aprendizaje muy utilizado en redes neuronales de varias capas se conoce como retropropagación o backpropagation, que fue desarrollado por Bryson y Ho (1969), (Figura A2.3). El método se basa en la minimización de los errores, mediante el ajuste de los pesos de la red que utiliza la técnica del descenso del gradiente, en el cual se determina la respuesta de la red a los datos de entrada para los patrones de entrenamiento. Los valores se comparan con los datos deseados determinándose el error mediante la evaluación una función de error seleccionada. La función por lo general es la suma cuadrática del error,

luego el error es propagado hacia atrás a través de cada nodo de la red, mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta w_{ij}(n) = -\varepsilon \frac{\partial E}{\partial w_{ij}} + \alpha \cdot \Delta w_{ij}(n - 1) \quad (2.11)$$

Donde;

$\Delta w_{ij}(n)$ y $w_{ij}(n-1)$ es el ajuste realizado al peso de la conexión entre los nodos i y j para la época n y $n-1$ respectivamente.

ε y α son los denominados radio y momento de entrenamiento.

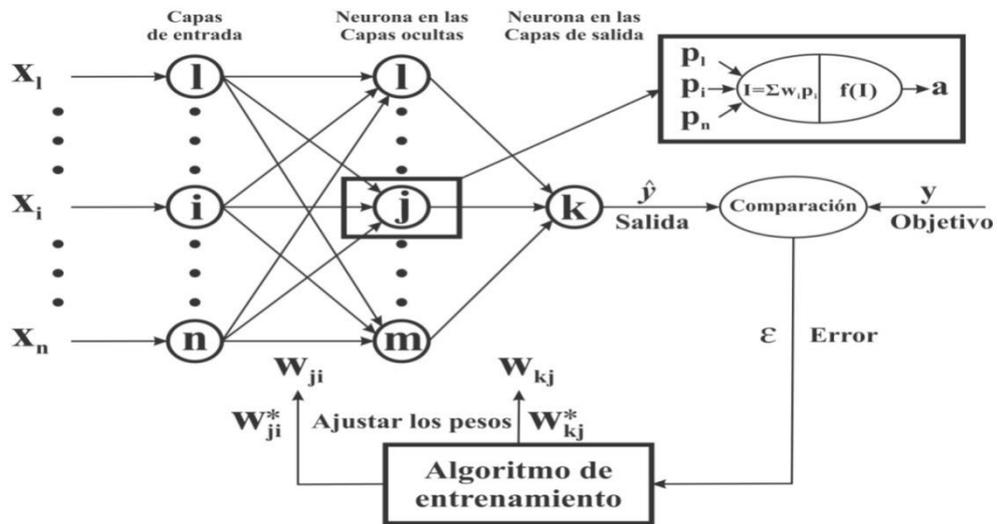


Figura A2.3 Esquema de una red neuronal de tres capas de alimentación con un algoritmo de entrenamiento “backpropagation”. El error se propaga hacia atrás desde la capa de salida hasta la de entrada para ajustar los pesos.

El método de propagación posterior tiene dos fases, la primera consiste en la determinación de la respuesta de la red a partir de los datos de entrada y la posterior evaluación del error. La segunda fase consiste en propagar el error hacia los nodos de inicio modificando los pesos de las conexiones utilizando la ecuación (2.11).

d. DETERMINACIÓN DE LA PRECISIÓN DE LOS PRONÓSTICO USANDO REDES NEURONALES

El comportamiento de la red neuronal se puede evaluar comparando los valores generados por la red tras el proceso de entrenamiento con los valores observados mediante coeficientes estadísticos. Estos coeficientes permitirán definir criterios para la realización y finalización del proceso de entrenamiento y establecer comparaciones entre distintos tipos de redes neuronales. Entre los coeficientes más empleados se encuentran el coeficiente de determinación R^2 o r^2 y es calculado como el cuadrado de la correlación de Pearson r . R^2 es la proporción de la varianza en la variable dependiente que es predecible a partir de la variable independiente. Otro indicador es el índice de medida de acuerdo d es sensible a valores extremos, debido al uso de diferencias al cuadrado. También se utiliza como coeficiente a la raíz del error cuadrático medio (RMSE) que es una medida del error y se puede definir como la raíz cuadrada del valor medio de los cuadrados de las diferencias entre el índice calculado y el índice observado.

e. PROCEDIMIENTO Y CALCULOS DE LOS PRONÓSTICO

Las tareas previas a realizar a los fines de obtener los pronósticos mensuales para cada estación meteorológica es actualizar de forma mensual los archivos de datos de los tres índices para cada estación de la red (Tabla 2.1). Como ejemplo hacemos la localidad de Resistencia y se busca el archivo de los valores o índices PDSI, SPI3 y SPI12 que fueron calculados por el programa SOS de manera mensual. Cabe aclarar que los mismos archivos que se confeccionaron, ahora son datos actualizados para realizar el pronóstico trimestral. Previamente este archivo fue utilizado para realizar el entrenamiento de la RN de Resistencia y para cada una de las 95 estaciones del SMN durante los períodos 1980-2016 o 1970-2016 según la disponibilidad de datos históricos comiencen en una u otra fecha para las estaciones consideradas.

El programa empleado para el desarrollo y entrenamiento de las RN y cálculo del pronóstico fue el NeuroSolutions v4.0, utilizando el perceptron multicapa (MLP), de tres

capas para los índices PDSI, SPI3 y SPI12 de la localidad de Resistencia. Como entrada el programa requiere para la localidad seleccionada la RN entrenada de Resistencia y el archivo de datos del PDSI de Resistencia actualizado mensualmente para realizar el cálculo del pronóstico para Resistencia a uno, dos y tres meses. De igual modo se hace para todas las estaciones y los otros dos índices (SPI3 y SPI12), confeccionado previamente con los valores mensuales de salida del SOS.

ANEXO 3

1. Evaluación para cinco localidades seleccionadas en el país.

Tabla Resumen de los índices con

Localidades	Resumen contenido Anexo 3		
	Entrenamiento	Validación	Correlación
PDSI			
Salta (1)	1980-2016	2016	1980-2016
Rosario (4)	1971-2016	2016	1971-2016
Tres Arroyos(5)	1971-2016	2016	1971-2016
Mendoza (6)	1980-2016	2016	1980-2016
Trelew (8)	1980-2016	2016	1980-2016
SPI3 y SPI12			
Salta (1)	1980-2016	2016	1980-2016
Rosario (4)	1970-2016	2016	1971-2016
Tres Arroyos(5)	1971-2016	2016	1971-2016
Mendoza (6)	1980-2016	2016	1980-2016
Trelew (8)	1980-2016	2016	1980-2016

2. Análisis para ocho localidades de la región pampeana en estaciones contrastantes

ENTRENAMIENTO, VALIDACIÓN Y AJUSTE DE LOS ÍNDICES PDSI, SPI3 Y SPI12

a. PDSI

Región Noroeste (NOA)

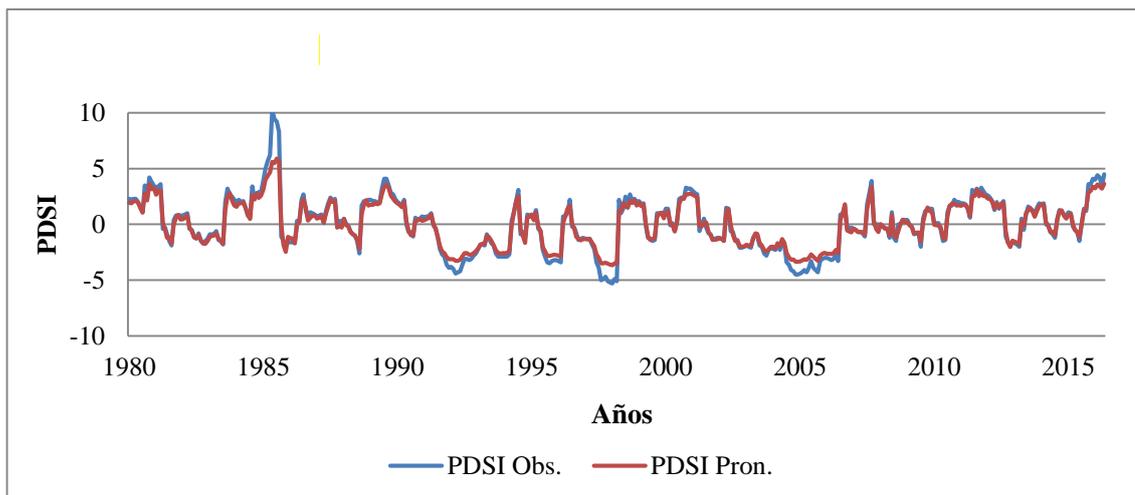


Figura A3.1. Valores de PDSI observados en Salta y pronosticados a un mes durante el entrenamiento de RN (1980-2016).

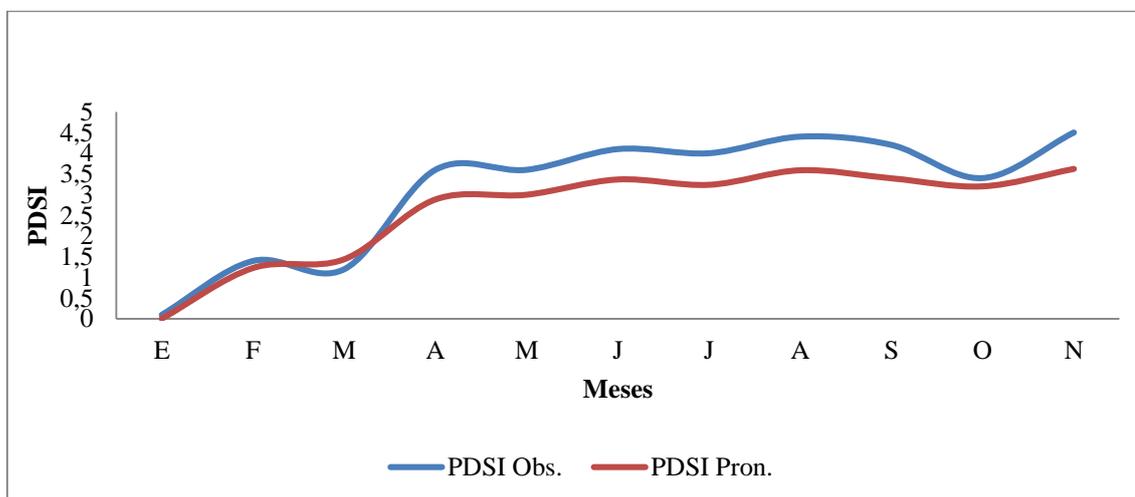


Figura A3.2. Valores de PDSI observados en Salta y pronosticados durante la validación de RN (2016).

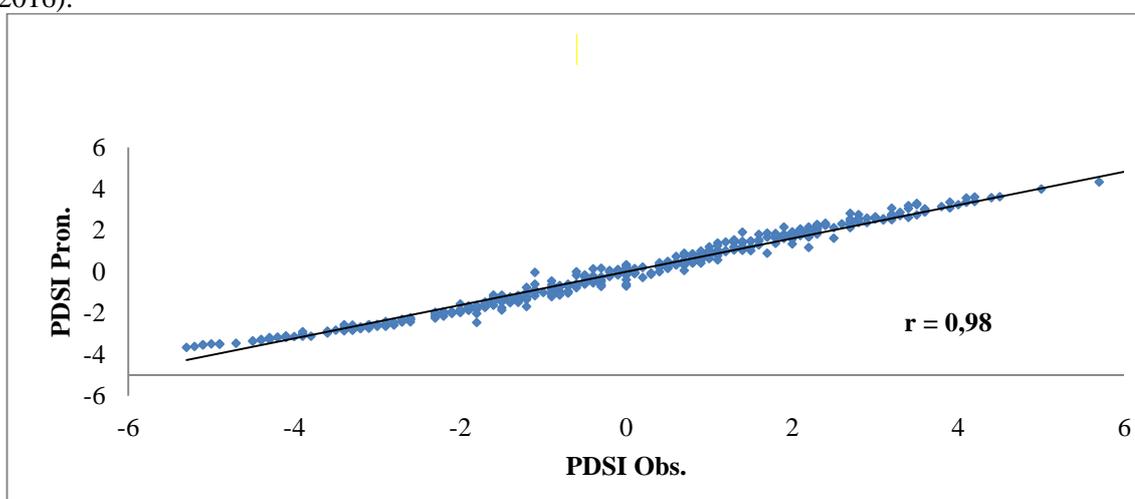


Figura A3.3. Correlación entre PDSI observados en Salta y pronosticados a un mes utilizando redes neuronales (1980-2016).

Región Pampeana (RP)

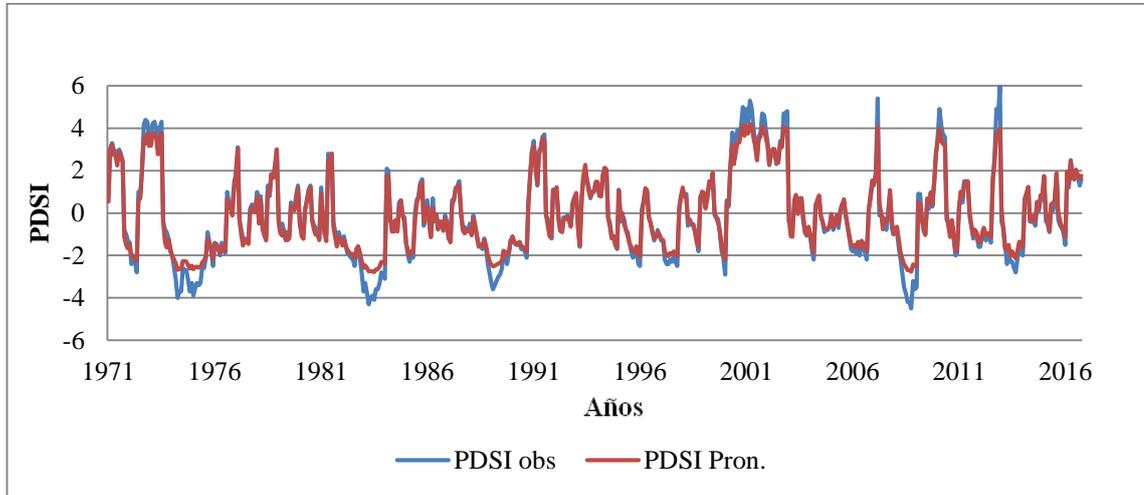


Figura A3.4. Valores de PDSI observados en Rosario y pronosticados a un mes durante el entrenamiento de RN (1971-2016).

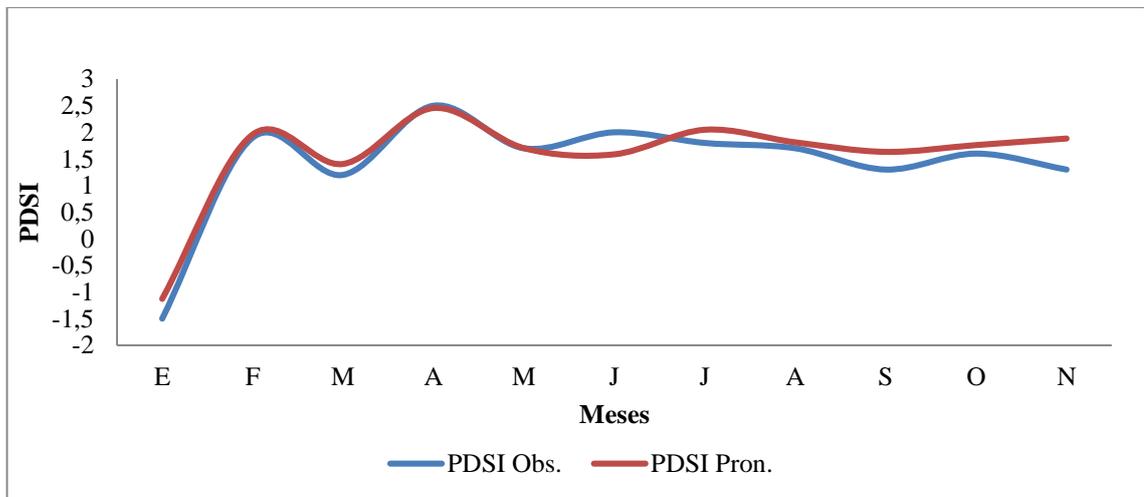


Figura A3.5. Valores de PDSI observados en Rosario y pronosticados durante la validación de RN (2016).

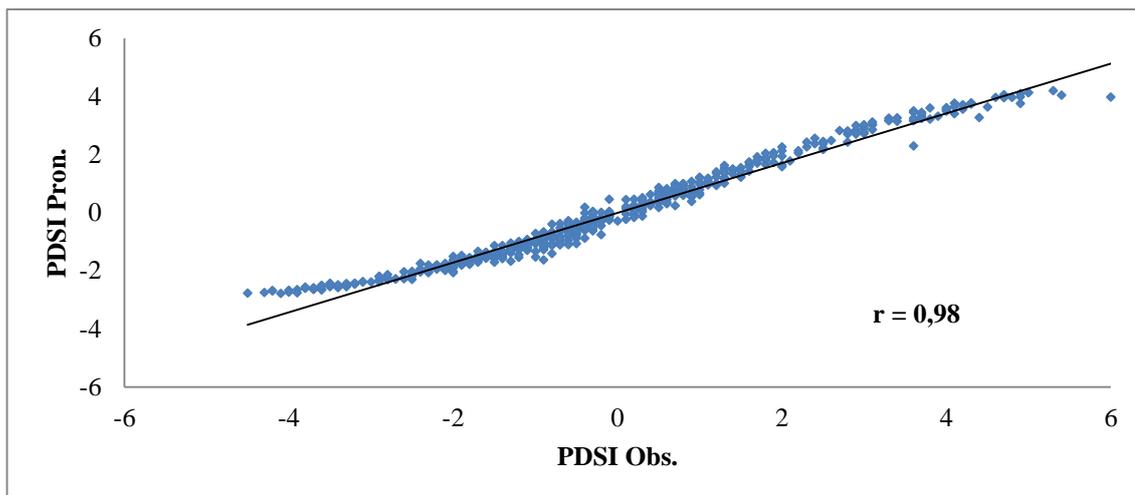


Figura A3.6. Correlación entre PDSI observados en Rosario y pronosticados a un mes utilizando redes neuronales (1971-2016).

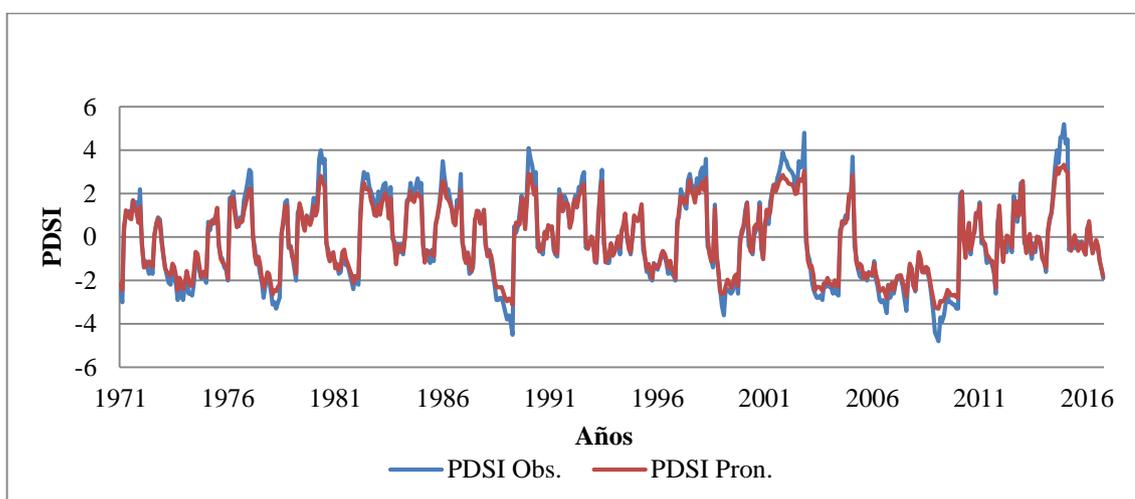


Figura A3.7. Valores de PDSI observados en Tres Arroyos y pronosticados a un mes durante el entrenamiento de RN (1971-2016).

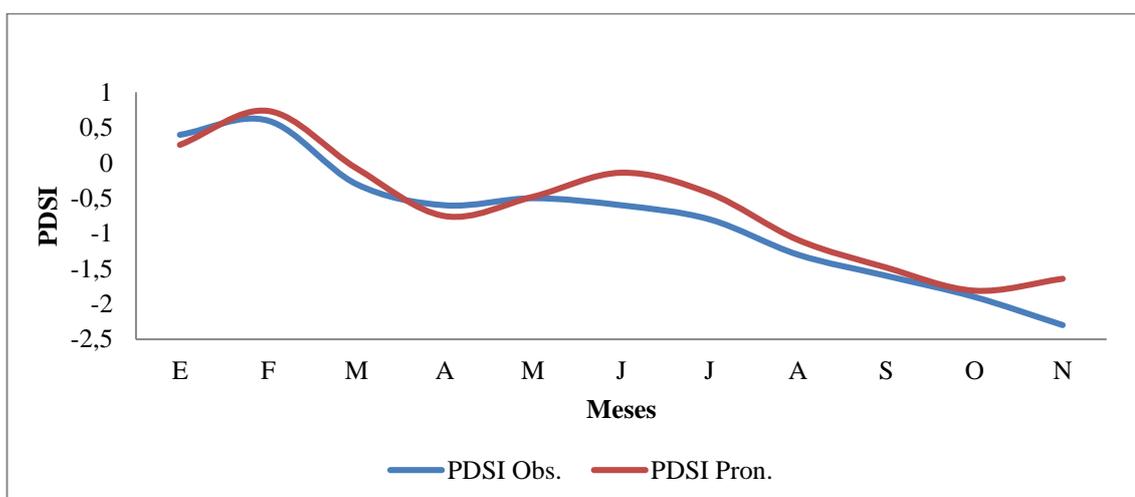


Figura A3.8. Valores de PDSI observados en Tres Arroyos y pronosticados durante la validación de RN (2016).

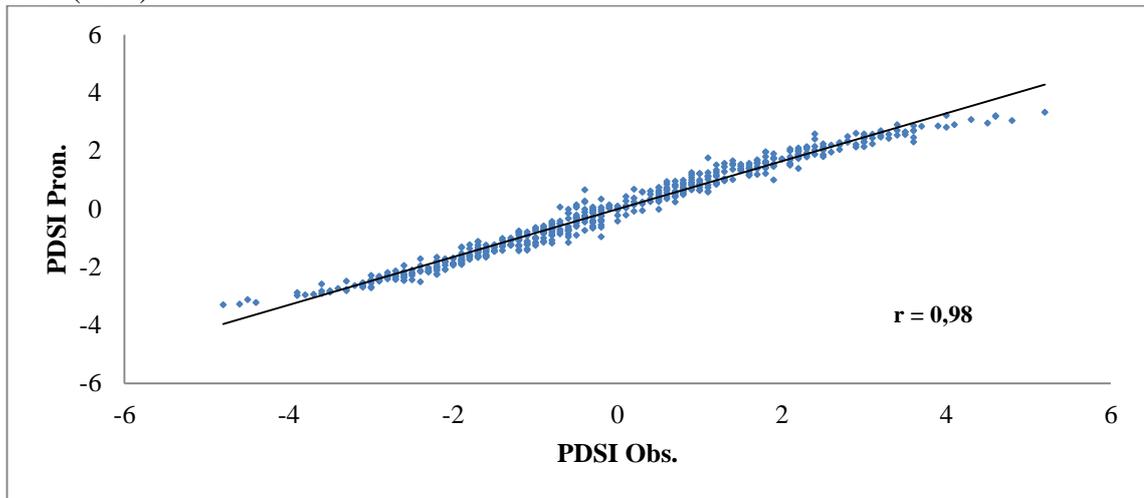


Figura A3.9. Correlación entre PDSI observados en Tres Arroyos y pronosticado a un mes utilizando redes neuronales (1971-2016).

Región de Cuyo (RC)

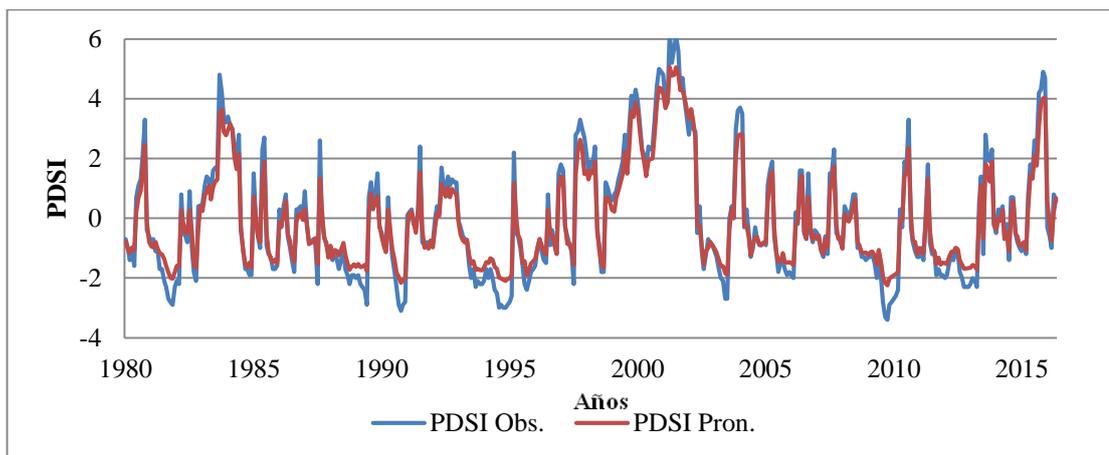


Figura A3.10. Valores de PDSI observados en Mendoza y pronosticados a un mes durante el entrenamiento de RN (1980-2016).

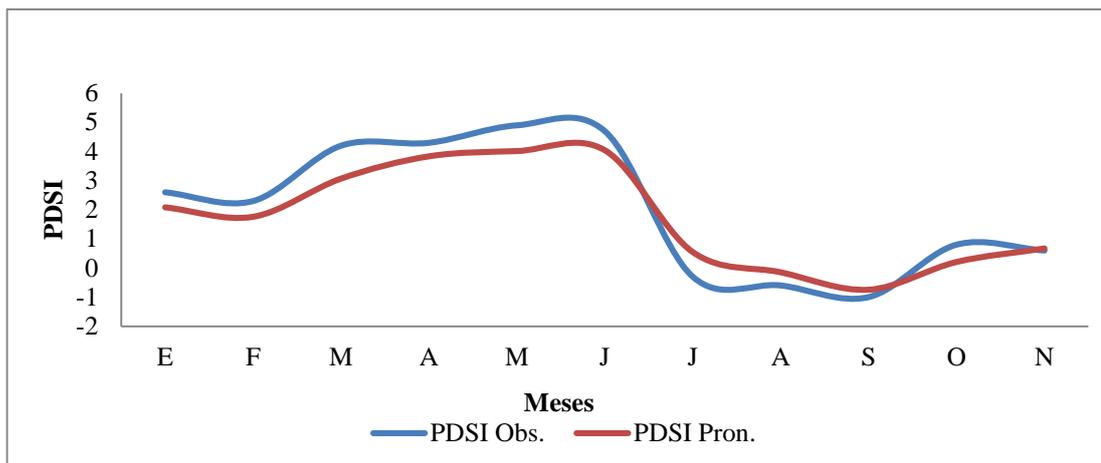


Figura A3.11. Valores de PDSI observados en Mendoza y pronosticados durante la validación de RN (2016).

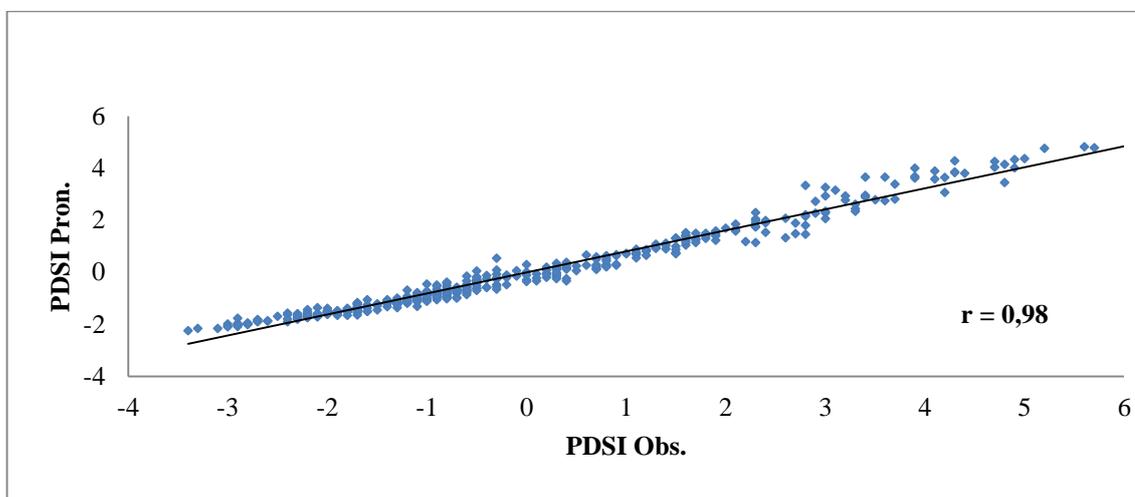


Figura A3.12. Correlación entre PDSI observados en Mendoza y pronosticados a un mes utilizando redes neuronales (1980-2016).

Región Patagónica (RPA)

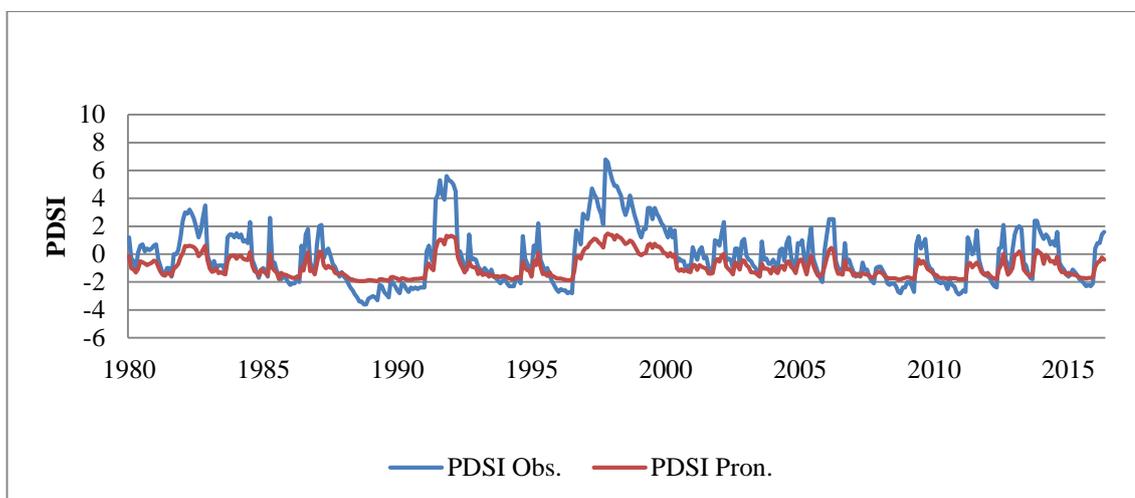


Figura A3.13. Valores de PDSI observados en Trelew y pronosticados a un mes durante el entrenamiento de RN (1980-2016).

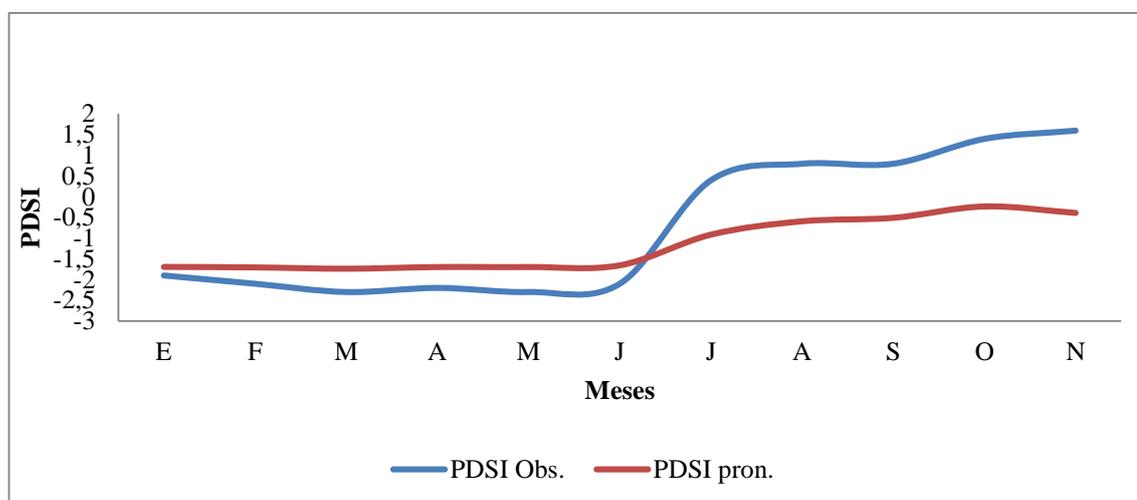


Figura A3.14. Valores de PDSI observados en Trelew y pronosticados durante la validación de RN (2016).

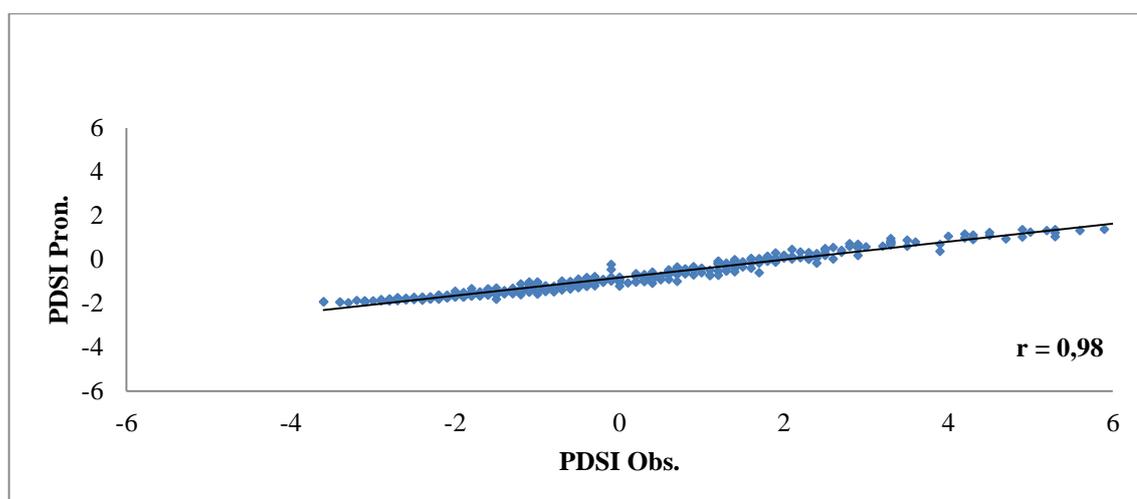
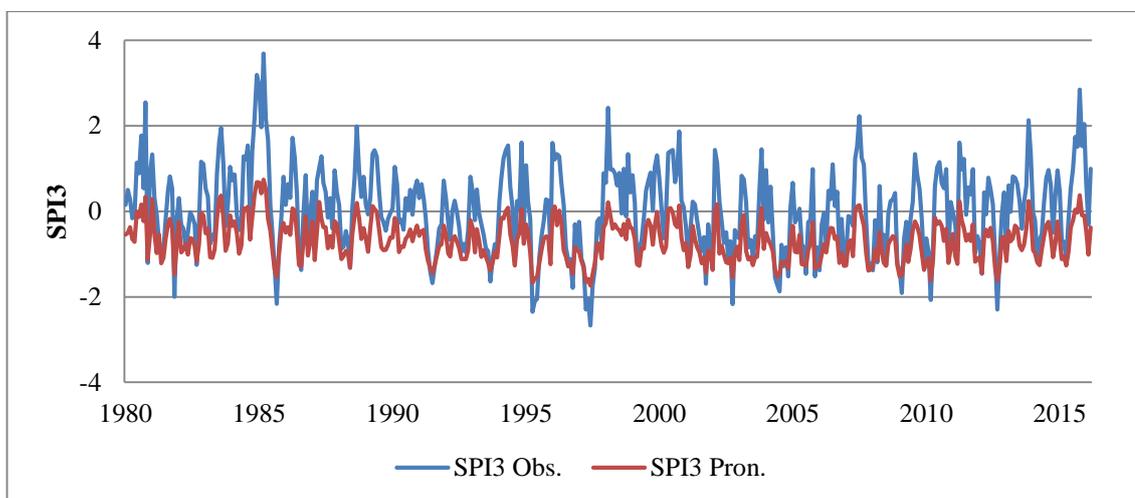


Figura A3.15. Correlación entre PDSI observados en Trelew y pronosticados a un mes utilizando redes neuronales (1980-2016).

b. SPI3 y SPI12

Para los índices SPI3 y SPI12, se observa el entrenamiento del SPI3 en las Figuras A3.16, A3.19, A3.22, A3.25, A3.28, la validación en las Figuras A3.17, A3.20, A3.23, A3.26, A3.29 y la dispersión en las Figuras A3.18, A3.21, A3.24, A3.27, A3.30 mientras que para el SPI12 se observa el entrenamiento en las Figuras A3.31, A3.34, A3.37, A3.40, A3.43, la validación en las Figuras A3.32, A3.35, A3.38, A3.41, A3.44 y el ajuste en las Figuras A3.33, A3.36, A3.39, A3.42, A3.45 de las localidades seleccionadas en cada región, respectivamente.

Región Noroeste (NOA)



Figuras A3.16. Valores de SPI3 observados en Salta y pronosticados a un mes durante el entrenamiento de RN (1980-2016).

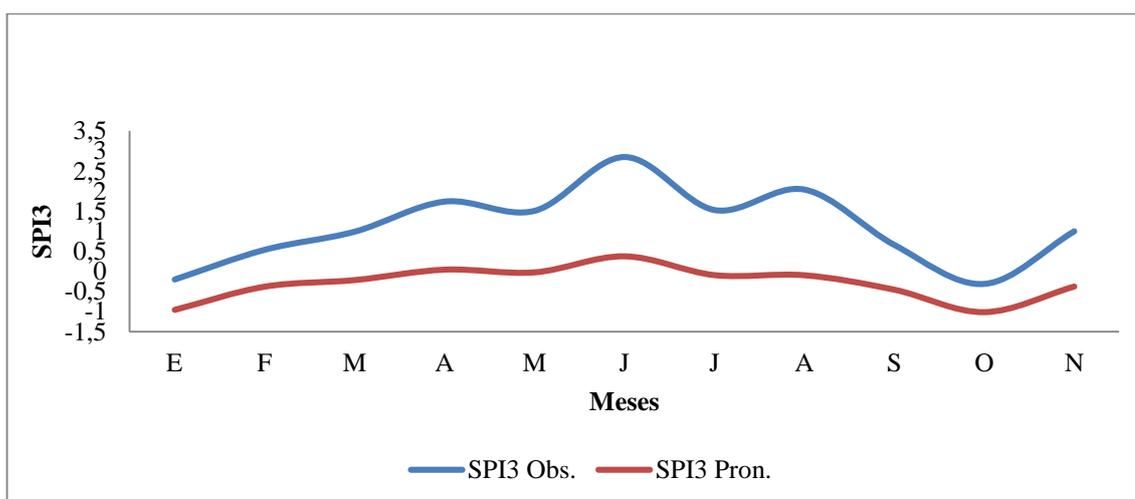


Figura A3.17. Valores de SPI3 observados en Salta y pronosticados durante la validación de RN (2016).

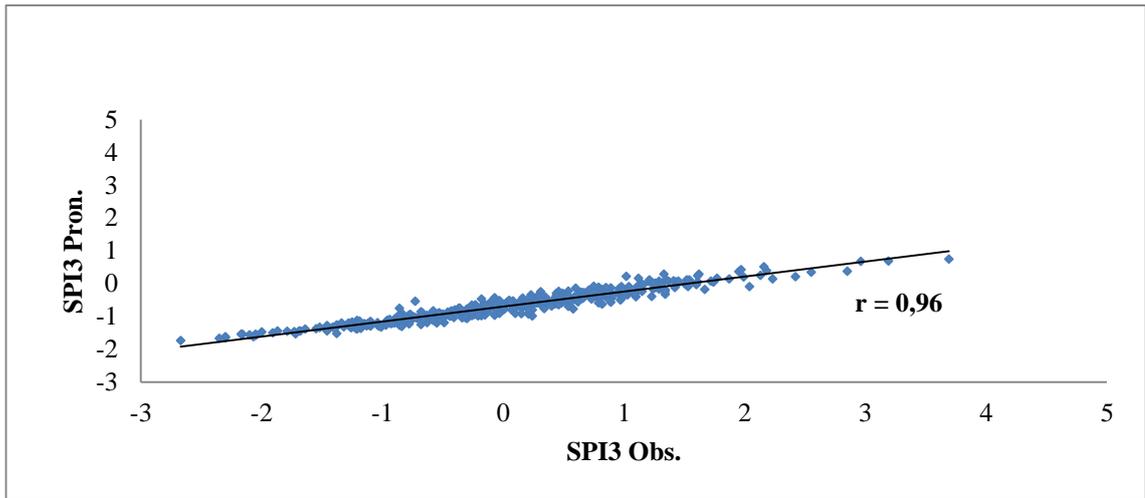
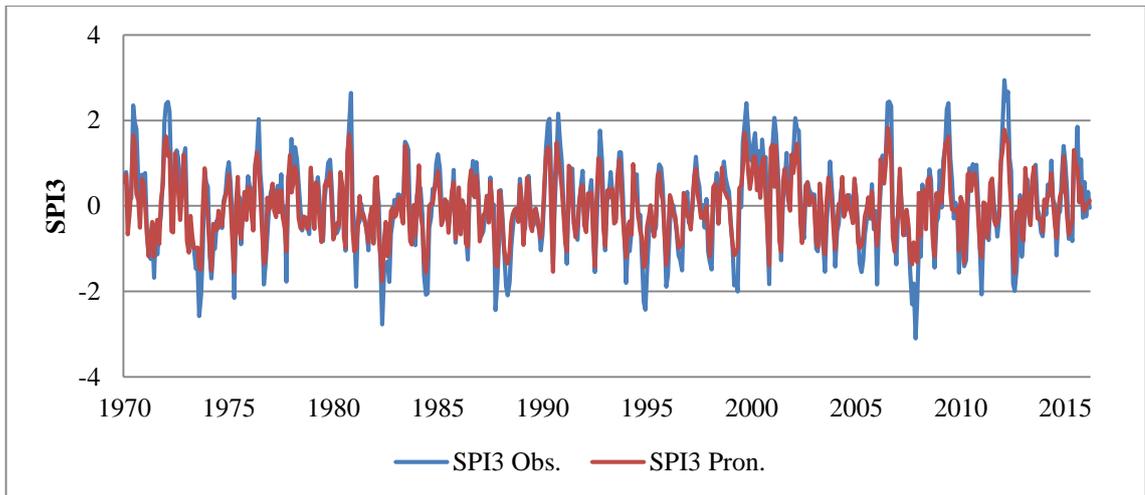


Figura A3.18. Correlación entre SPI3 observados en Salta y pronosticados a un mes utilizando redes neuronales (1980-2016).

Región Pampeana



Figuras A3.19. Valores de SPI3 observados en Rosario y pronosticados a un mes durante el entrenamiento de RN pronosticados (1970-2016).

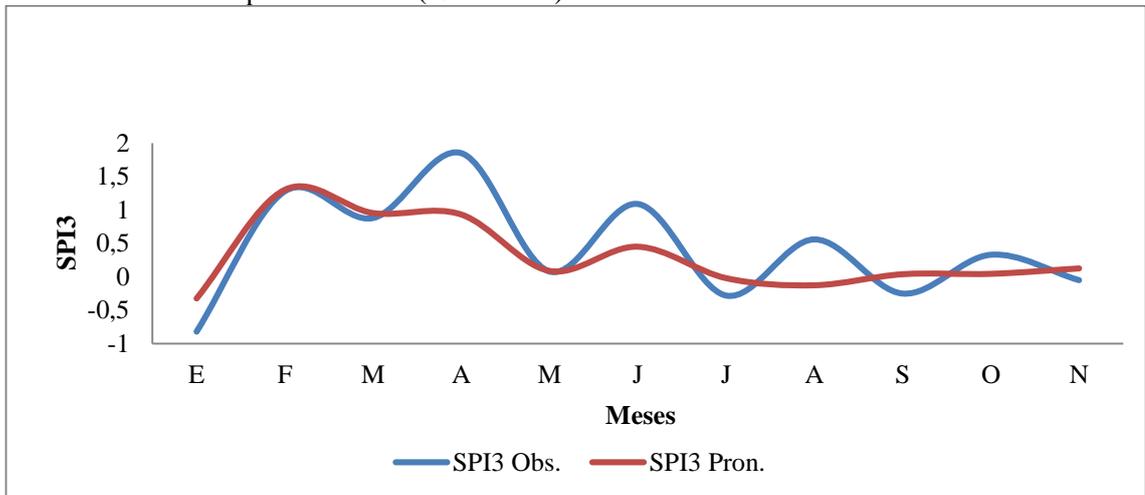


Figura A3.20. Valores de SPI3 observados en Rosario y pronosticados durante la validación de RN (2016).

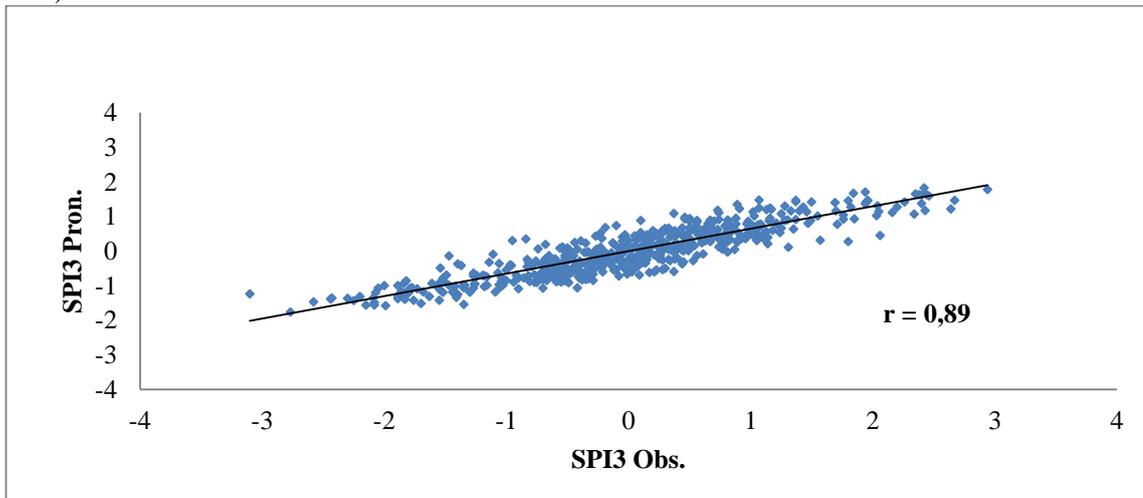
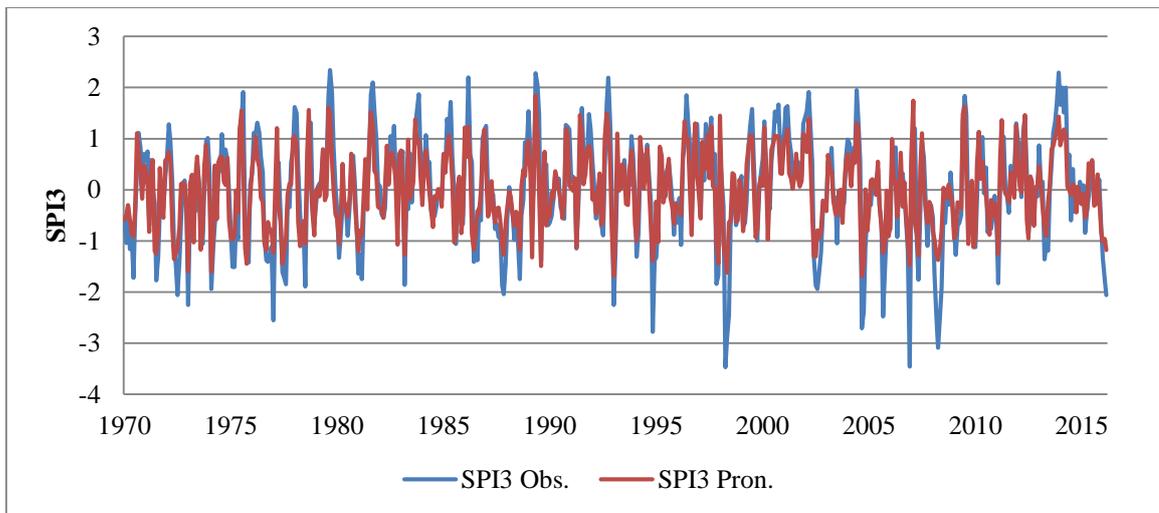


Figura A3.21. Correlación entre SPI3 observados en Rosario y pronosticados a un mes utilizando redes neuronales (1970-2016).



Figuras A3.22. Valores de SPI3 observados en Tres Arroyos y pronosticados a un mes durante el entrenamiento de RN (1970-2016).

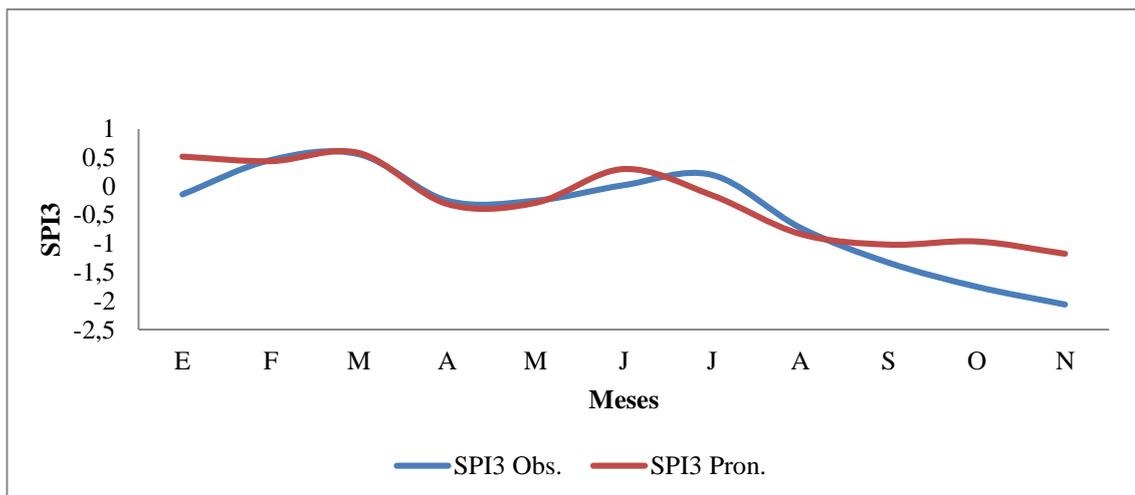


Figura A3.23. Valores de SPI3 observados en Salta y pronosticados durante la validación de RN (2016).

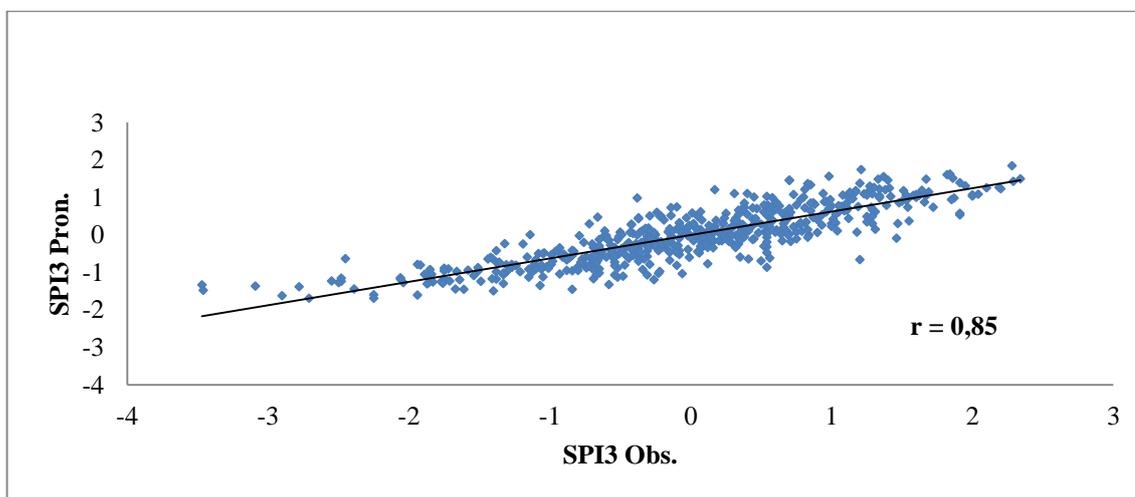
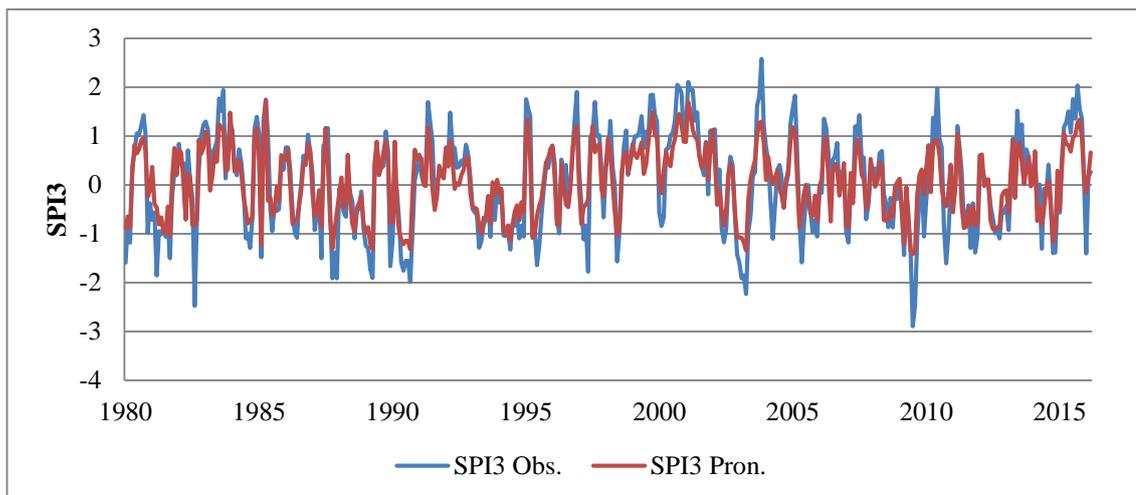


Figura A3.24. Correlación entre SPI3 observados en Tres Arroyos y pronosticados a un mes utilizando redes neuronales (1970-2016).

Región de Cuyo



Figuras A3.25. Valores de SPI3 observados en Mendoza y pronosticados a un mes durante el entrenamiento de RN (1980-2016).

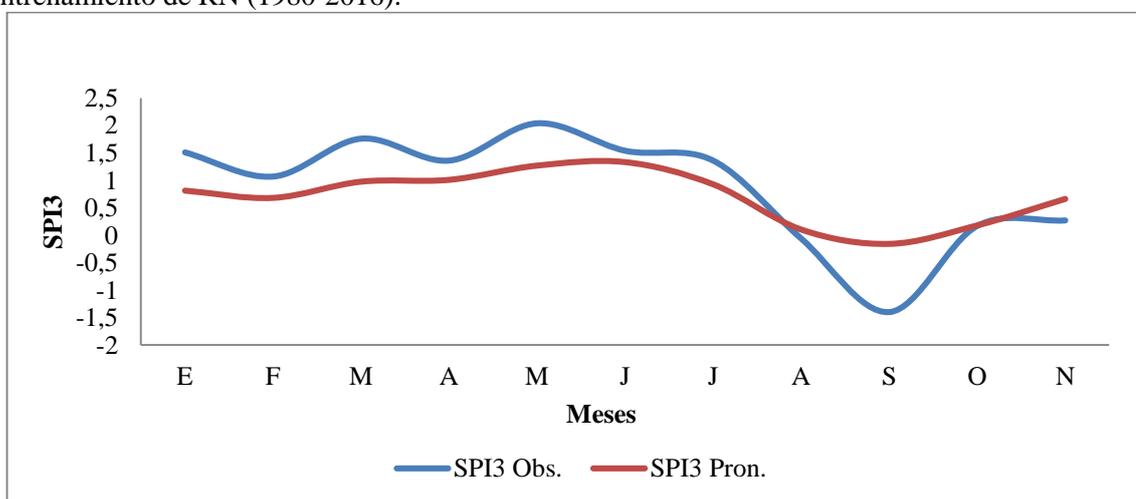


Figura A3.26. Validación del entrenamiento RN con SPI3 observados y pronosticados, 2016.

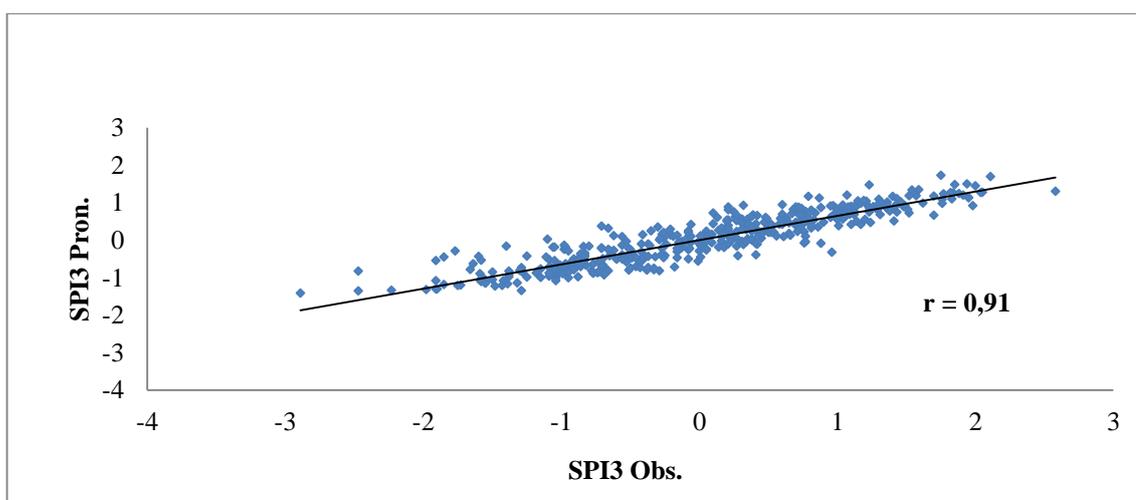
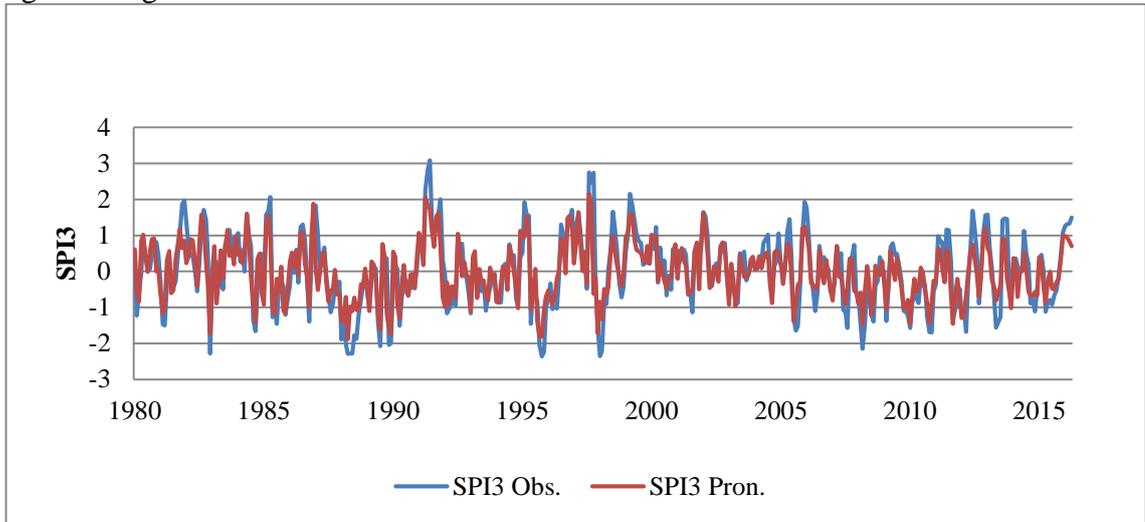


Figura A3.27. Correlación entre SPI3 observados en Mendoza y pronosticados a un mes utilizando redes neuronales (1980-2016).

Región Patagónica



Figuras A3.28. Valores de SPI3 observados en Trelew y pronosticados a un mes durante el entrenamiento de RN (1980-2016).

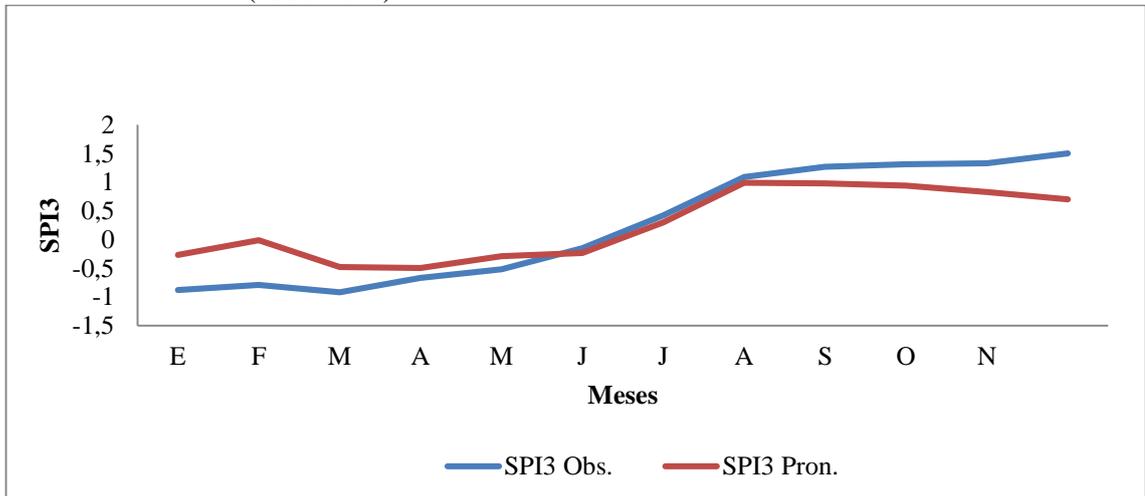


Figura A3.29. Validación del entrenamiento RN con SPI3 observados y pronosticados, 2016.

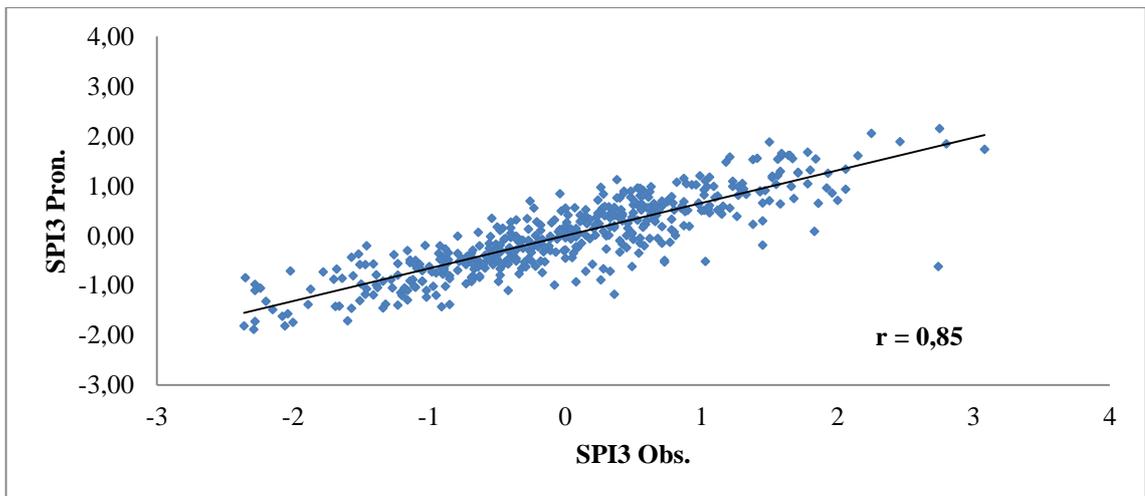
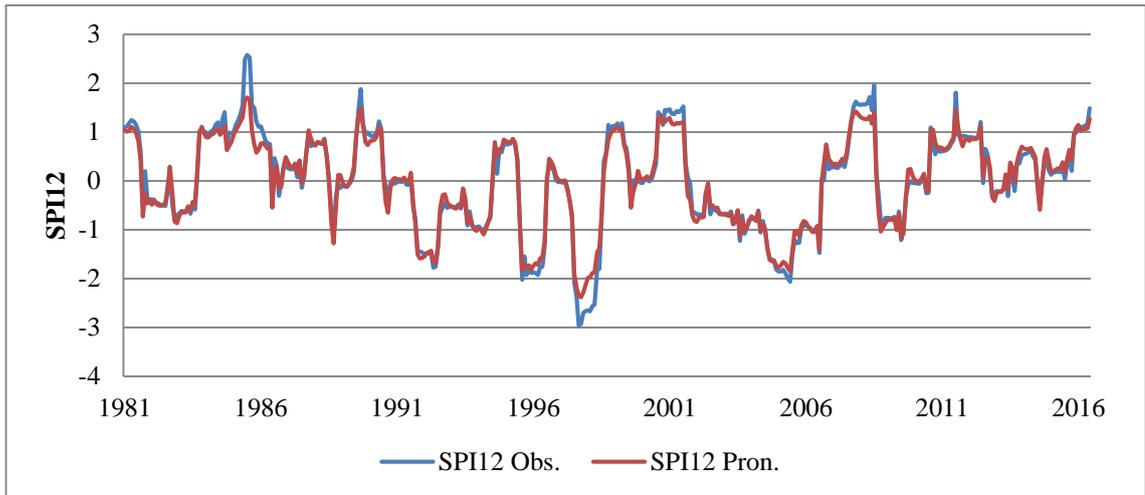


Figura A3.30. Correlación entre SPI3 observados en Trelew y pronosticados a un mes utilizando redes neuronales (1980-2016).



Figuras A3.31. Valores de SPI12 observados en Salta y pronosticados a un mes durante el entrenamiento de RN (1981-2016).

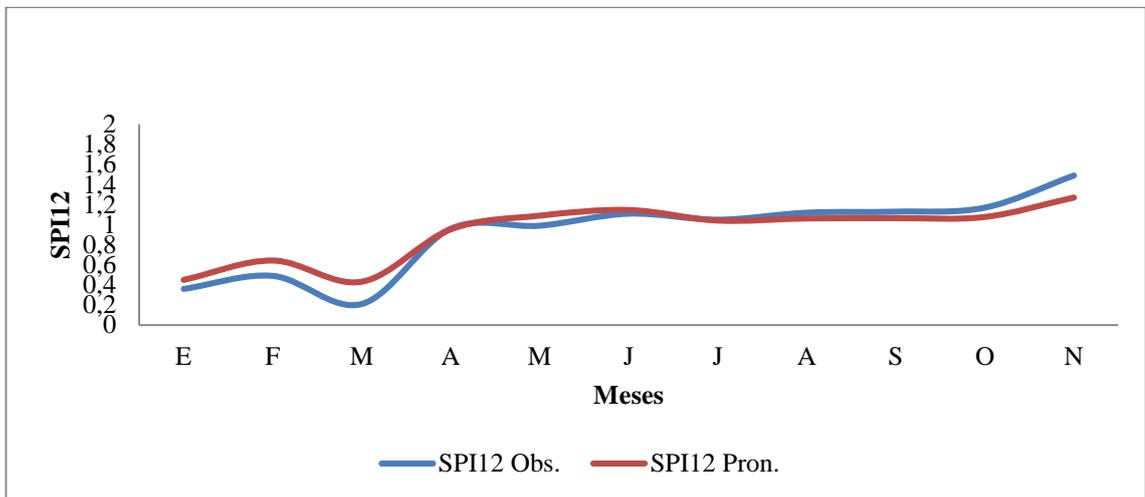


Figura A3.32. Valores de SPI12 observados en Salta y pronosticados durante la validación de RN (2016).

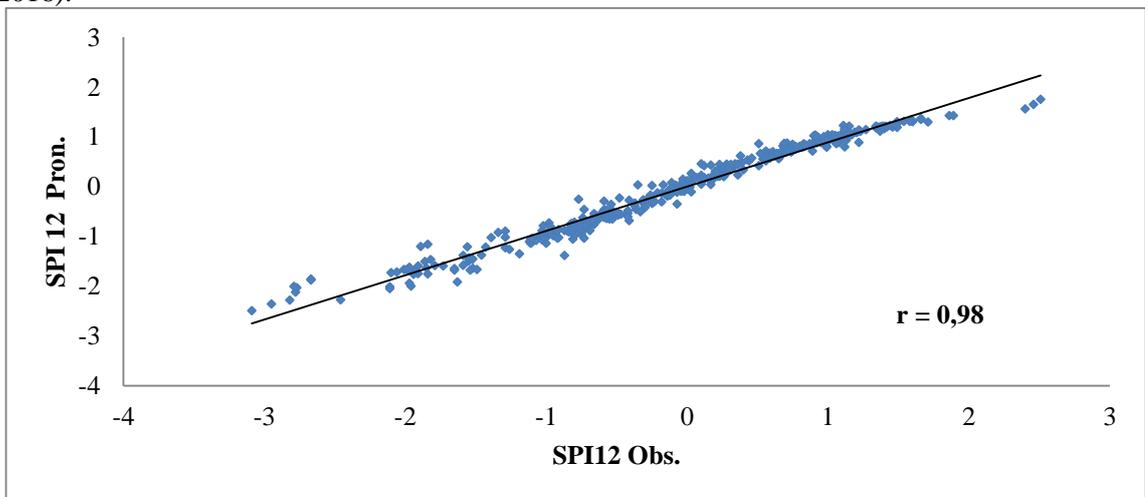
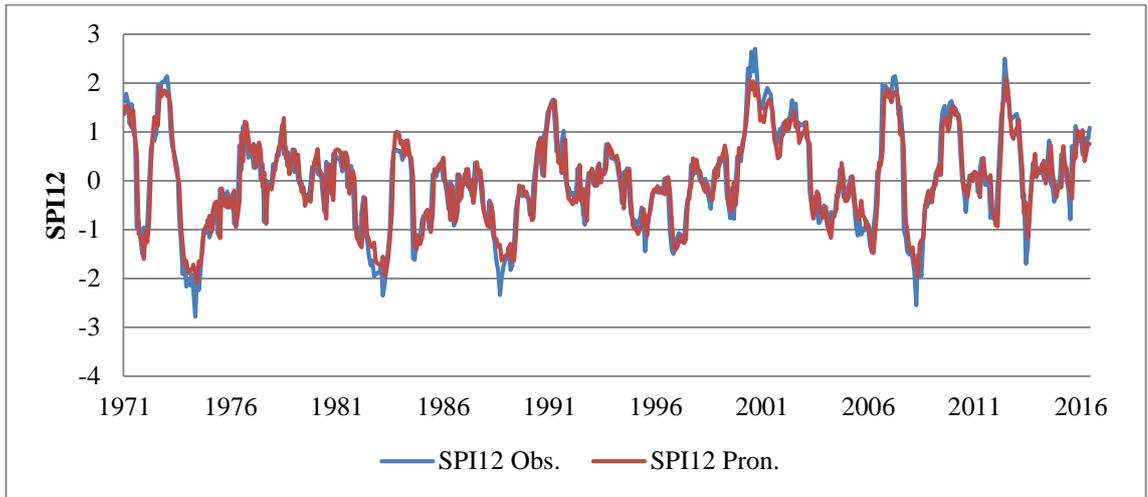


Figura A3.33. Correlación entre SPI12 observados en Salta y pronosticados a un mes utilizando redes neuronales (1980-2016).



Figuras A3.34. Valores de SPI12 observados en Rosario y pronosticados a un mes durante el entrenamiento de RN (1971-2016).

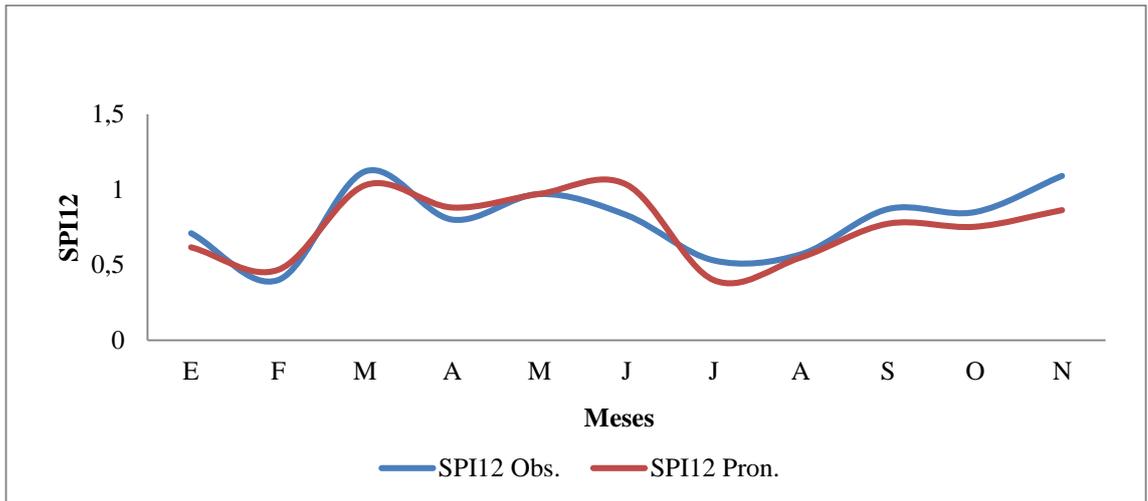


Figura A3.35. Valores de SPI12 observados en Rosario y pronosticados durante la validación de RN (2016).

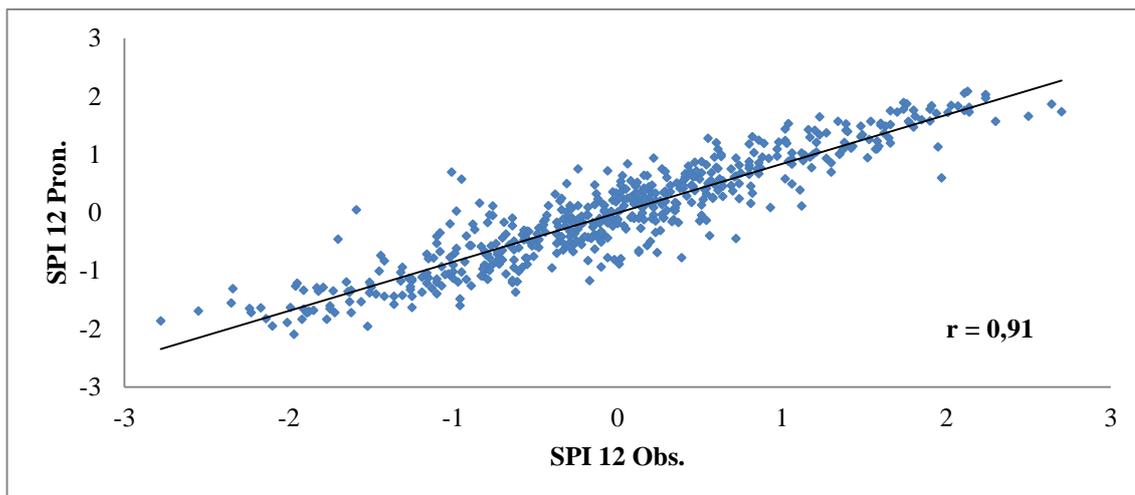
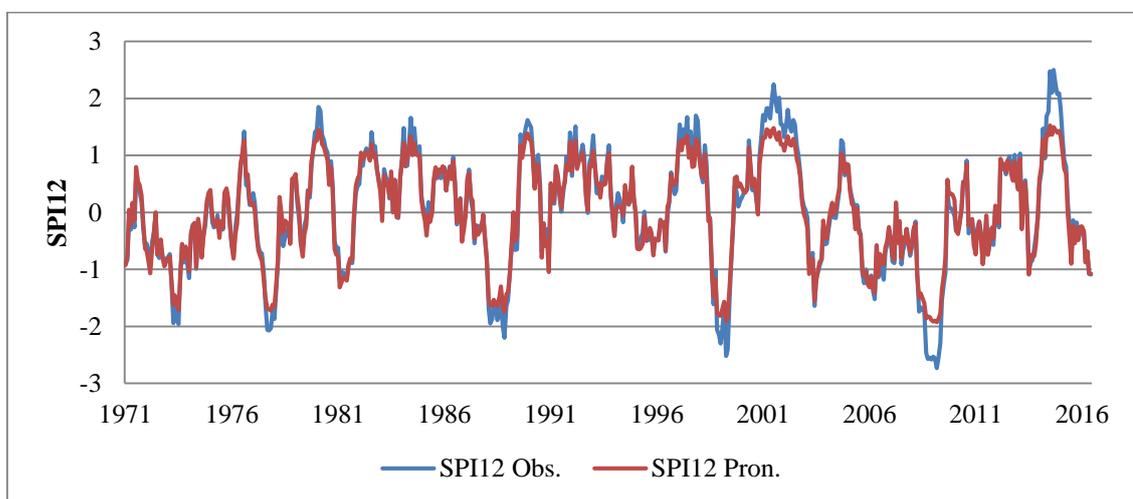
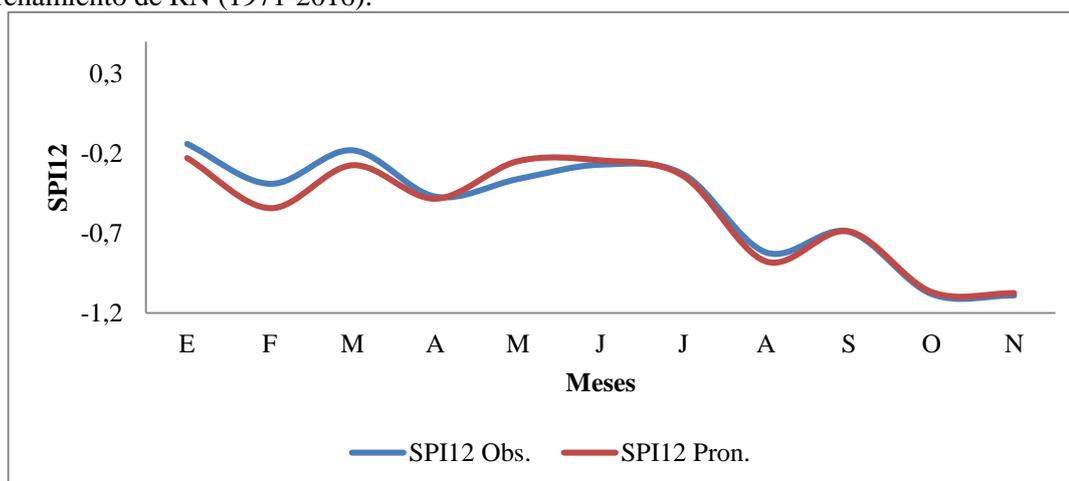


Figura A3.36. Correlación entre SPI12 observados en Rosario y pronosticados a un mes utilizando redes neuronales (1980-2016).



Figuras A3.37. Valores de SPI12 observados en Tres Arroyos y pronosticados a un mes durante el entrenamiento de RN (1971-2016).



Figuras A3.38. Valores de SPI12 observados en Tres Arroyos y pronosticados durante la validación de RN (2016).

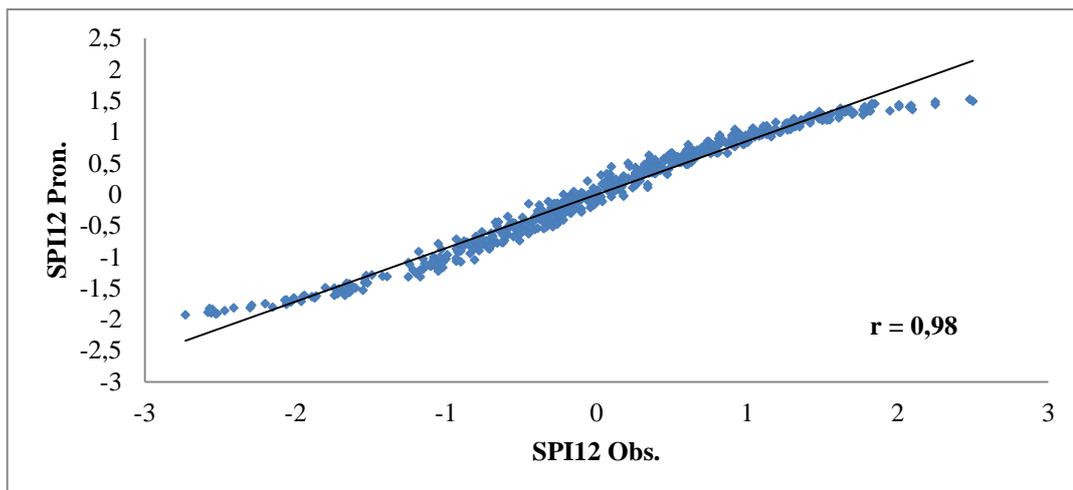


Figura A3.39. Correlación entre SPI12 observados en Tres Arroyos y pronosticados a un mes utilizando redes neuronales (1971-2016).

Región de Cuyo

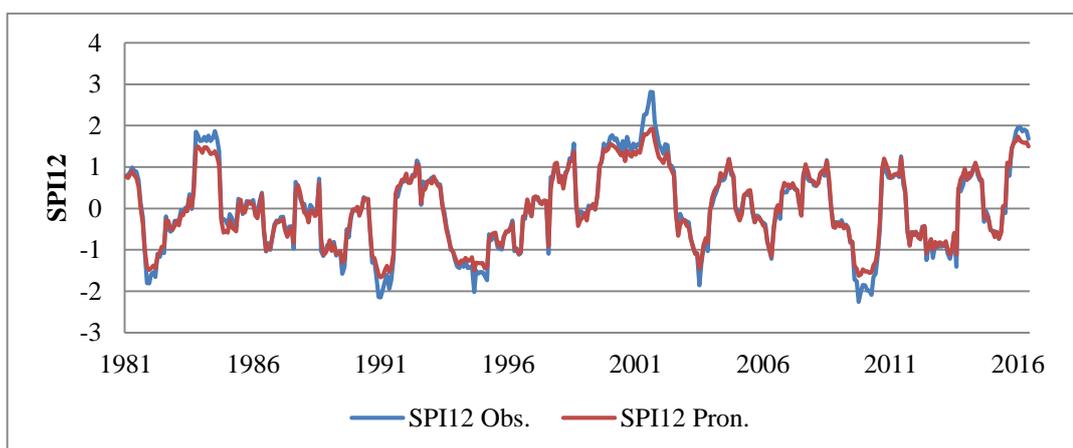


Figura A3.40. Valores de SPI12 observados en Mendoza y pronosticados a un mes durante el entrenamiento de RN (1981-2016).

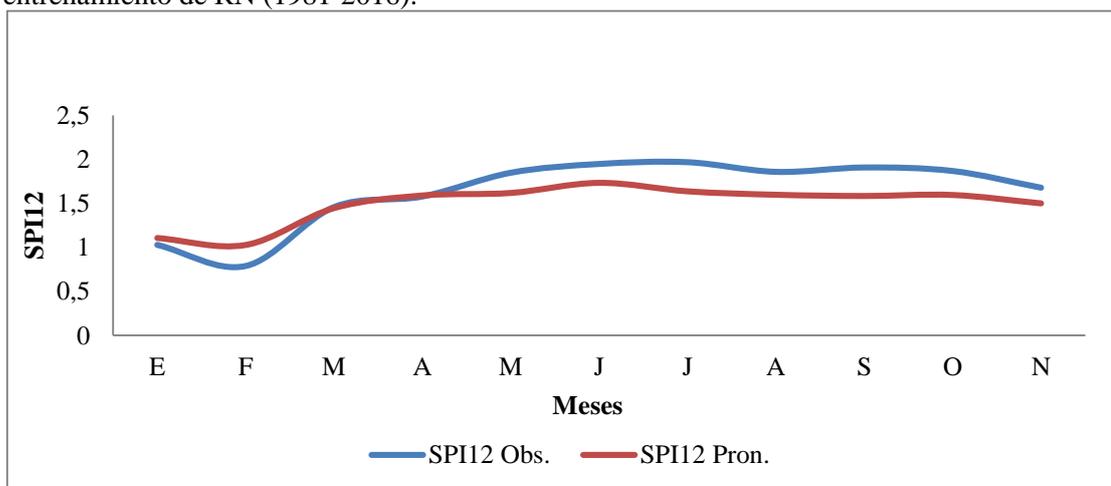


Figura A3.41. Valores de SPI12 observados en Mendoza y pronosticados durante la validación de RN (2016).

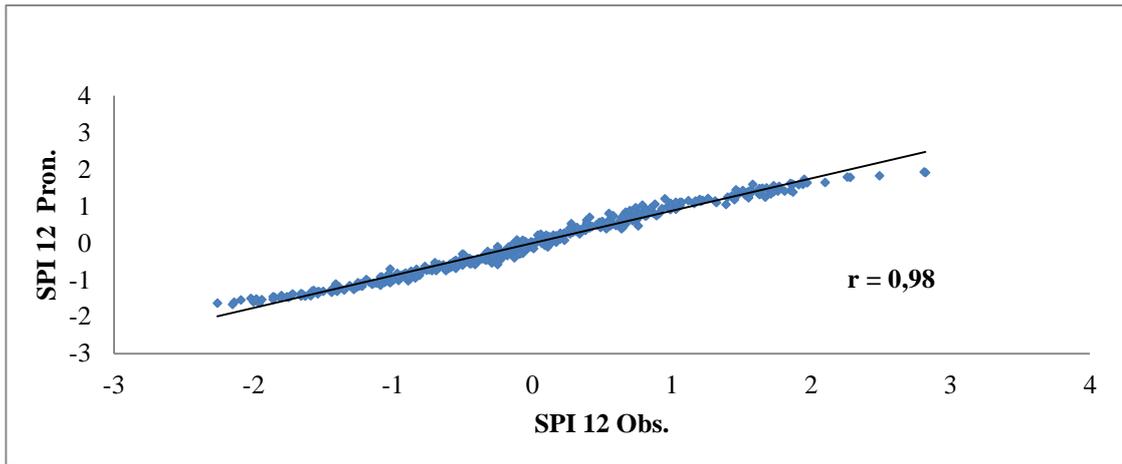
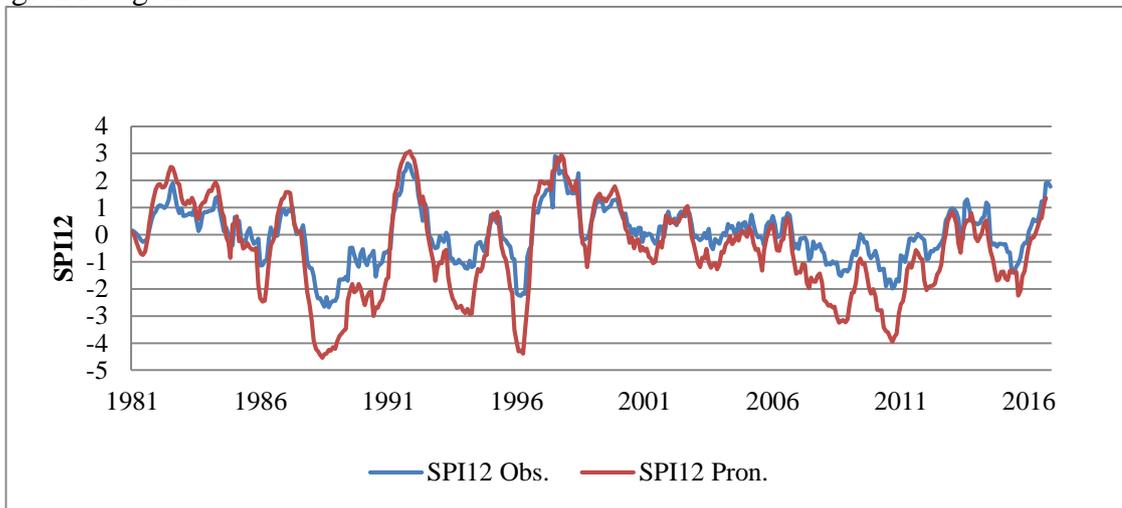


Figura A3.42. Correlación entre SPI12 observados en Mendoza y pronosticados a un mes utilizando redes neuronales (1971-2016).

Región Patagónica



Figuras A3.43. Valores de SPI12 observados en Trelew y pronosticados a un mes durante el entrenamiento de RN (1981-2016).

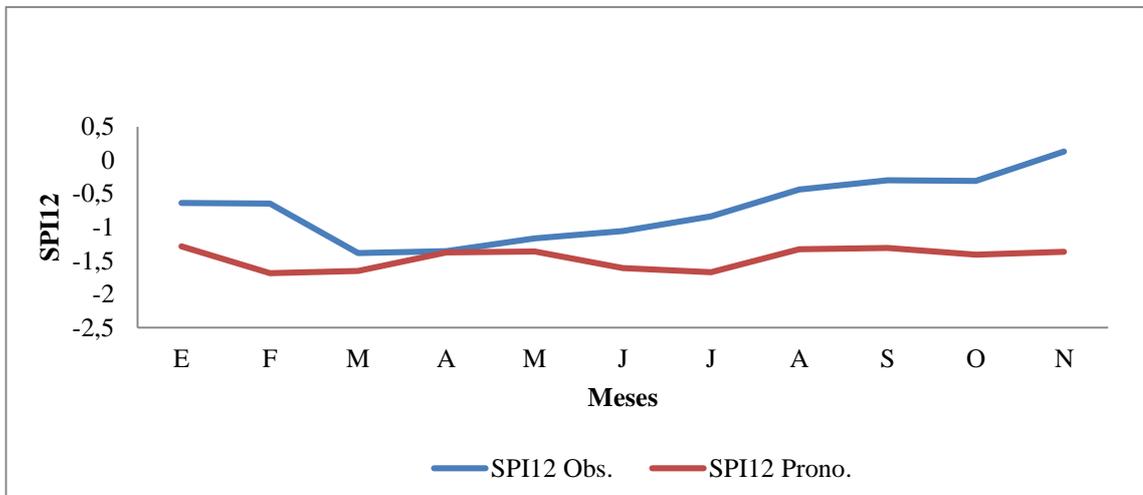


Figura A3.44. Valores de SPI12 observados en Trelew y pronosticados durante la validación de RN (2016).

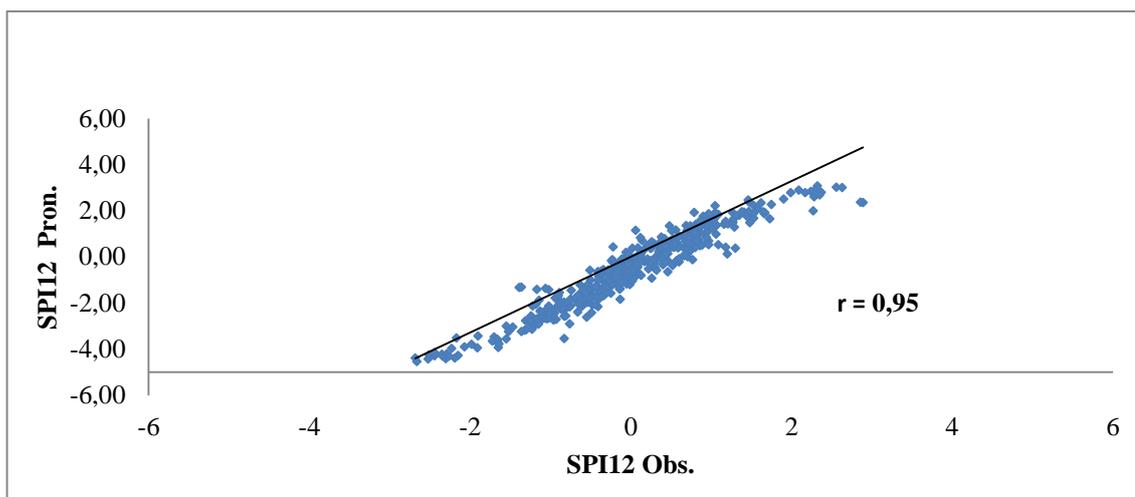


Figura A3.45. Correlación entre SPI12 observados en Trelew y pronosticados a un mes utilizando redes neuronales (1981-2016).

c. Resultados Estadísticos

Tabla 3.1 Coeficientes de determinación R^2 , Índice de acuerdo (d) y la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE) para los índices PDSI, SPI3 y SPI12 obtenidos de las localidades, Salta, Rosario, Tres Arroyos, Mendoza y Trelew. Período: 1980-2016.

Localidades	R^2			d			RMSE			MAE		
	PDSI	SPI3	SPI12	PDSI	SPI3	SPI12	PDSI	SPI3	SPI12	PDSI	SPI3	SPI12
Salta NOA	0,97	0,92	0,86	0,98	0,72	0,96	0,57	0,91	0,38	0,35	0,78	0,21
Rosario RP	0,98	0,80	0,85	0,99	0,92	0,96	0,40	0,48	0,39	0,27	0,37	0,29
TresArroyoRP	0,98	0,72	0,97	0,99	0,90	0,99	0,42	0,54	0,20	0,31	0,42	0,14
Mendoza CU	0,97	0,83	0,98	0,98	0,92	0,99	0,46	0,48	0,21	0,37	0,36	0,14
Trelew RPA	0,96	0,73	0,91	0,78	0,90	0,87	1,41	0,52	0,97	1,05	0,85	1,09

d. PDSI, SPI3 y SPI12 observados y pronosticados (2015-2018)

Tabla 3.2 Valores de los PDSI observados y pronosticados, R² y coeficientes de error para la localidad de Resistencia de enero a diciembre de 2017.

Mes	PDSI Obs.	PDSI Pron.		
		PDSI +1	PDSI +2	PDSI +3
ene-17	1,9	1,6	0,9	0,3
feb-17	1,6	1,2	0,6	0,2
mar-17	1,5	1,2	0,7	0,2
abr-17	2,6	2,1	1,5	1,1
may-17	3,6	3,0	2,4	1,9
jun-17	-0,1	-0,5	-0,5	-0,5
jul-17	-0,4	-0,7	-0,9	-1,1
ago-17	-0,2	-0,1	-0,4	-0,8
sep-17	0	-0,1	-0,4	-0,3
oct-17	-0,7	-0,7	-0,8	-1,2
nov-17	-1,3	-1,3	-1,3	-1,5
dic-17	-1,9	-1,5	-1,8	-1,7
	R ²	0,99	0,99	0,97
	d	0,99	0,94	0,87
	RMSE	0,33	0,70	1,03
	MAE	0,28	0,56	0,86

Tabla 3.3 Valores de los PDSI observados y pronosticados, R² y coeficientes de error para la localidad de Río Cuarto, de enero a diciembre de 2017.

Mes	PDSI Obs .	PDSI Pron.		
		PDSI+1	PDSI+2	PDSI+3
ene-17	-2,4	-2,0	-1,8	-1,6
feb-17	-2,7	-2,1	-1,9	-1,7
mar-17	-3,1	-2,2	-1,9	-1,8
abr-17	-2,9	-2,1	-1,9	-1,7
may-17	-3,2	-2,2	-1,9	-1,7
jun-17	-3	-2,2	-1,9	-1,7
jul-17	-3	-2,2	-1,9	-1,6
ago-17	-3,1	-2,3	-1,9	-1,7
set-17	-3,4	-2,4	-2,1	-1,8
oct-17	-4,1	-2,6	-2,3	-1,9
nov-17	-4,3	-2,6	-2,3	-1,9
dic-17	-3,8	-2,5	-2,3	-1,9
	R ²	0,97	0,86	0,82
	d	0,47	0,40	0,34
	RMSE	1,07	1,35	1,61
	MAE	1,01	1,31	1,54

Tabla 3.4 Valores de los PDSI observados y pronosticados, R² y coeficientes de error para Bariloche de enero a diciembre de 2017.

Mes	PDSI Obs.	PDSIPron.		
		PDSI +1	PDSI +2	PDSI +3
ene-17	1,4	1,7	1,4	1,4
feb-17	1,6	1,8	1,5	1,4
mar-17	1,6	1,8	1,5	1,5
abr-17	-0,5	-0,3	-0,1	0,0
may-17	-1,2	-0,7	-0,4	-0,2
jun-17	-1,9	-0,9	-0,7	-0,3
jul-17	-2,3	-1,5	-1,3	-0,7
ago-17	0,7	0,9	0,8	0,2
sep-17	0,3	0,6	0,3	-0,1
oct-17	1,8	1,7	1,4	1,1
nov-17	1,8	1,9	1,5	1,2
dic-17	2,1	2,0	1,5	1,5
	R ²	0,99	0,98	0,87
	d	0,97	0,95	0,87
	RMSE	0,43	0,55	0,82
	MAE	0,33	0,41	0,66

Tabla 3.5 Valores de los SPI3 observados y pronosticados, R² y coeficientes de error para Resistencia, de enero a diciembre de 2017.

Mes	SPI3 Obs.	SPI3 Pron.		
		SPI3+1	SPI3+2	SPI3+3
ene-17	-0,1	-0,3	-0,4	-0,1
feb-17	0,0	-0,2	0,0	-0,2
mar17	-0,1	-0,2	-0,2	-0,3
abr-17	1,3	1,0	0,6	-0,1
may17	1,7	1,3	0,5	0,1
jun-17	1,6	0,6	0,3	0,1
jul-17	0,9	0,1	0,0	-0,1
ago17	-0,2	-0,8	-0,5	-0,3
sep-17	0,0	-0,5	-0,2	-0,3
oct-17	-0,6	-0,6	-0,4	0,0
nov17	-1,4	-1,5	-0,8	-0,2
dic-17	-1,9	-1,5	-0,8	-0,5
	R ²	0,92	0,86	0,56
	d	0,94	0,78	0,40
	RMSE	0,49	0,73	1,00
	MAE	0,39	0,58	0,80

Tabla 3.6 Valores de los SPI3 observados y pronosticados, R^2 y coeficientes de error para Río Cuarto, de enero a diciembre de 2017.

Mes	SPI3 Obs.	SPI3 Pron.		
		SPI3+1	SPI3+2	SPI3+3
ene-17	-1,5	-1,1	-0,4	-0,3
feb-17	-1,2	-0,5	-0,2	-0,2
mar-17	-1,3	-1,2	-0,5	-0,2
abr-17	-1,0	-0,7	-0,3	-0,2
may-17	-0,8	-0,6	-0,2	-0,2
jun-17	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1
jul-17	-0,4	-0,5	-0,2	0,0
ago-17	0,0	-0,3	-0,1	0,0
set-17	-0,8	-0,8	-0,4	0,0
oct-17	-2,9	-2,0	-1,0	0,1
nov-17	-2,3	-1,7	-0,7	-0,3
dic-17	-1,2	0,1	0,2	-0,5
	R^2	0,70	0,58	0,02
	d	0,84	0,53	0,45
	RMSE	0,57	1,26	1,26
	MAE	0,41	0,82	0,98

Tabla 3.7 Valores de los SPI3 observados y pronosticados, R^2 y coeficientes de error para Bariloche, de enero a diciembre de 2017.

Mes	SPI3Obs.	SPI3Pron.		
		SPI3+1	SPI3+2	SPI3+3
ene-17	0,4	0,4	-0,2	0,2
feb-17	0,7	0,5	0,1	0,3
mar-17	1,0	1,0	0,4	0,4
abr-17	0,0	0,2	-0,2	0,3
may-17	-1,2	-0,9	-0,4	0,3
jun-17	-1,6	-0,6	0,1	0,3
jul-17	-1,4	-0,5	0,2	0,4
ago-17	-0,1	0,4	0,7	0,5
sep-17	-0,1	0,3	0,4	0,3
oct-17	1,8	1,2	0,8	0,2
nov-17	1,1	1,0	-0,1	0,2
dic-17	1,6	0,7	0,1	0,1
	R^2	0,88	0,10	0,22
	d	0,90	0,40	0,08
	RMSE	0,55	1,03	1,14
	MAE	0,43	0,93	0,97

Tabla 3.8 Valores de los SPI12 observados y pronosticados, R^2 y coeficientes de error para Resistencia, de enero a diciembre de 2017.

Mes	SPI12 Obs.	SPI12 Pron.		
		SPI12+1	SPI12+2	SPI12+3
ene-17	0,3	0,3	0,1	0,0
feb-17	0,4	0,4	0,2	0,1
mar-17	0,6	0,6	0,4	0,3
abr-17	1,2	1,1	1,0	0,8
may-17	1,6	1,4	1,3	1,2
jun-17	1,3	1,2	1,1	1,0
jul-17	1,2	1,1	1,0	0,9
ago-17	1,1	1,1	1,0	0,9
sep-17	1,2	1,2	1,1	1,0
oct-17	0,9	0,8	0,6	0,5
nov-17	0,8	0,6	0,5	0,3
dic-17	0,4	0,3	0,1	0,0
	R^2	0,98	0,98	0,96
	d	0,99	0,94	0,85
	RMSE	0,09	0,22	0,35
	MAE	0,07	0,21	0,34

Tabla 3.9 Valores de los SPI12 observados y pronosticados, R^2 y coeficientes de error para Río Cuarto, de enero a diciembre de 2017.

Mes	SPI12 Obs.	SPI12 Pron.		
		SPI12+1	SPI12+2	SPI12+3
ene-17	-0,8	-0,3	-0,7	-0,9
feb-17	-1,5	-0,7	-1,2	-1,2
mar-17	-1,5	-0,8	-1,4	-1,3
abr-17	-1,7	-0,9	-1,5	-1,4
may-17	-1,9	-1,1	-1,7	-1,4
jun-17	-2,0	-1,2	-1,8	-1,4
jul-17	-1,9	-1,2	-1,9	-1,4
ago-17	-1,9	-1,2	-1,9	-1,3
sep-17	-2,0	-1,2	-1,9	-1,3
oct-17	-2,9	-1,3	-2,0	-1,5
nov-17	-2,6	-1,4	-2,1	-1,5
dic-17	-2,3	-1,2	-1,9	-1,4
	R^2	0,85	0,84	0,74
	d	0,54	0,85	0,55
	RMSE	0,94	0,36	0,72
	MAE	0,90	0,28	0,61

Tabla 3.10. Valores de los SPI12 observados y pronosticados, R^2 y coeficientes de error para Bariloche, de enero a diciembre de 2017.

Mes	SPI12Obs.	SPI12Pron.		
		SPI12+1	SPI12+2	SPI12+3
ene-17	-1,1	-1,0	-1,0	-0,9
feb-17	-1,0	-0,9	-0,9	-0,8
mar-17	-0,8	-0,7	-0,8	-0,6
abr-17	-1,0	-0,9	-0,9	-0,8
may-17	-1,1	-1,0	-0,9	-0,9
jun-17	-0,5	-0,3	-0,4	-0,4
jul-17	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5
ago-17	-0,4	-0,3	-0,4	-0,3
sep-17	-0,4	-0,4	-0,3	-0,4
oct-17	0,0	0,2	0,1	0,1
nov-17	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1
dic-17	-0,1	0,1	0,0	0,0
	R ²	0,98	0,98	0,98
	d	0,98	0,98	0,97
	RMSE	0,12	0,10	0,14
	MAE	0,10	0,08	0,12

Región Noroeste Argentina

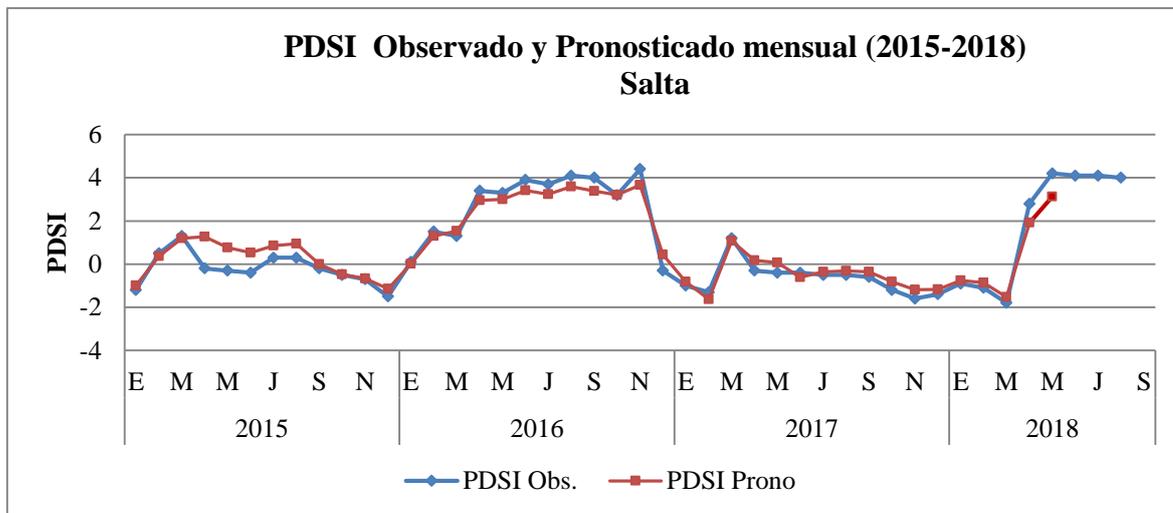


Figura A3.46. Índices PDSI observados y pronosticados para Salta, período 2015-2018.

Tabla 3.11 Valores de los PDSI observados y pronosticados, R² y coeficientes de error para la localidad de Salta de enero a diciembre de 2017.

Salta				
Mes	PDSI Obs.	PDSI Pron.		
		PDSI +1	PDSI +2	PDSI +3
ene-17	-1	-0,8	-1,0	-1,0
feb-17	-1,3	-1,6	-1,2	-1,1
mar-17	1,2	1,1	1,7	1,2
abr-17	-0,3	0,2	0,6	0,7
may-17	-0,4	0,1	-0,5	-0,2
jun-17	-0,4	-0,6	-0,6	-0,6
jul-17	-0,5	-0,4	-0,1	-0,4
ago-17	-0,5	-0,3	0,0	-0,2
sep-17	-0,6	-0,4	-0,3	-0,2
oct-17	-1,2	-0,8	-0,6	-0,6
nov-17	-1,6	-1,2	-0,9	-0,8
dic-17	-1,4	-1,2	-0,8	-0,8
	R ²	0,87	0,82	0,77
	d	0,95	0,90	0,88
	RMSE	0,31	0,48	0,47
	MAE	0,28	0,41	0,36

Los valores del PDSI observados son muy similares a los pronosticados aún para pronósticos de 3 meses presentando valores del R² superiores a 0,70 y RMSE inferiores a 0,50. Lo cual indica la posibilidad de usar los valores pronosticados para fines operacionales de alerta temprana y elaborar medidas de mitigación.

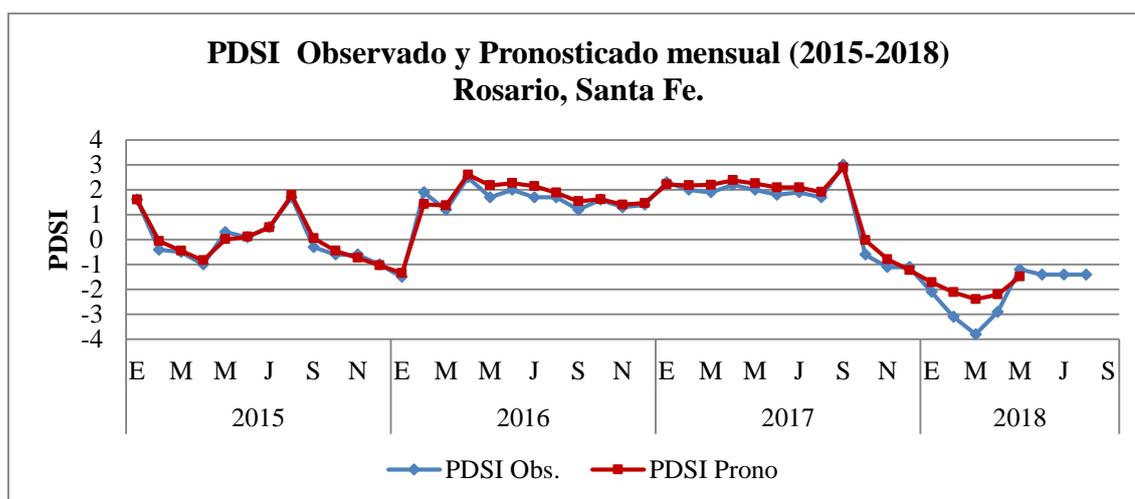


Figura 3.47. Índices PDSI observados y pronosticados para Rosario, Santa Fe, período 2015-2018.

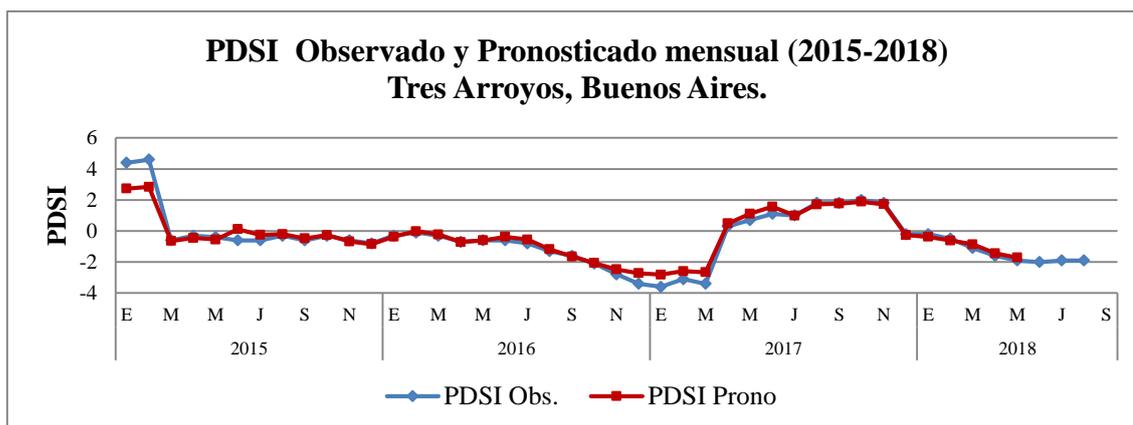


Figura 3.48. Índices PDSI observados y pronosticados para Tres Arroyos, Buenos Aires, período 2015.

Tabla 3.12 Valores de los PDSI observados y pronosticados, R^2 y coeficientes de error para las localidades de Rosario y Tres Arroyos, de enero a diciembre de 2017.

Mes	Rosario				Tres Arroyos			
	PDSI Obs	PDSI Pron.			PDSI Obs	PDSI Pron.		
		PDSI+1	PDSI+2	PDSI+3		PDSI+1	PDSI+2	PDSI+3
ene-17	2,3	2,2	2,2	1,6	-3,6	-2,8	-2,5	-2,1
feb-17	2,0	2,2	2,0	1,5	-3,1	-2,6	-2,3	-1,9
mar-17	1,9	2,2	1,8	1,4	-3,4	-2,7	-2,4	-1,9
abr-17	2,2	2,4	1,8	1,4	0,3	0,5	-0,3	0,3
may-17	2	2,3	1,6	1,3	0,7	1,1	1,0	1,2
jun-17	1,8	2,1	1,5	1,2	1,1	1,6	1,3	1,1
jul-17	1,9	2,1	1,5	1,2	1,0	1,0	0,8	0,7
ago-17	1,7	1,9	1,5	1,1	1,8	1,7	1,5	1,0
set-17	3	2,9	2,5	1,9	1,8	1,8	1,5	1,4
oct-17	-0,6	0,0	-0,3	-0,3	2,0	1,9	1,6	1,4
nov-17	-1,1	-0,8	-0,6	-0,8	1,8	1,7	1,5	1,2
dic-17	-1,1	-1,2	-0,9	-1,1	-0,2	-0,3	-0,2	-0,3
	R^2	0,98	0,98	0,99	R^2	0,99	0,99	0,97
	d	0,99	0,98	0,93	d	0,99	0,98	0,94
	RMSE	0,27	0,33	0,64	RMSE	0,39	0,55	0,80
	MAE	0,24	0,29	0,58	MAE	0,29	0,42	0,62

Según un informe de la Bolsa de Comercio de Rosario, la proyección de producción nacional de trigo para la campaña 2017/2018 retrocedió en un millón de toneladas debido a las 150.000 hectáreas que no lograron sembrarse por excesos hídricos y a las 135.000 que se perdieron por intensas lluvias en Buenos Aires y La Pampa. Esto significó pérdidas por US\$ 180 millones en exportaciones (<http://www.>

lanacion.com.ar/economia/campo/trigo-estiman-en-us-180-millones-las-perdidas-por-las inundaciones-nid2063313).

En la localidad de Tres Arroyos, los índices observados y pronosticados presentaron durante el 2017, la ocurrencia de sequías hasta el mes de abril y el resto del año con aumento o reposición de humedad mientras que en Rosario contrariamente hubo humedad moderada hasta setiembre 2017 y luego disminuye hacia valores negativos de sequías durante el 2018 (Figura 3.47).

Los valores del PDSI observados prácticamente son iguales a los pronosticados aún para pronósticos de tres meses presentando valores de R^2 para Rosario y Tres Arroyos cercanos a la unidad. Los valores de RMSE para las dos localidades indican la posibilidad de usar los valores pronosticados a más de 2 meses para fines operacionales de alerta temprana y elaborar medidas de mitigación.

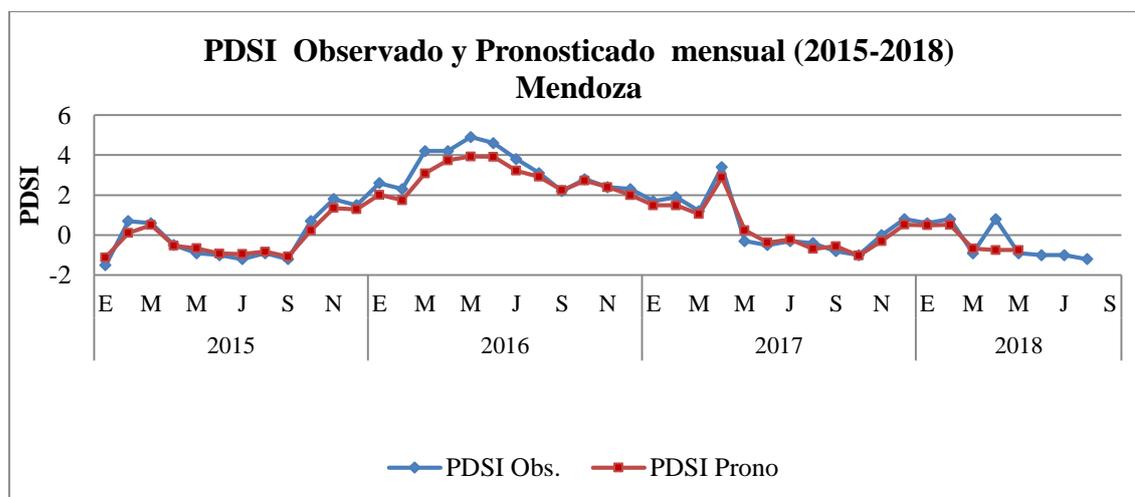


Figura 3.49. Índices PDSI observados y pronosticados para Mendoza, período 2015-2018

Tabla 3.13 Valores de los PDSI observados y pronosticados, R^2 y coeficientes de error para la localidad de Mendoza de enero a diciembre de 2017.

Mes	PDSI Obs.	PDSI Pron.		
		PDSI +1	PDSI +2	PDSI +3
ene-17	1,7	1,5	1,3	1,1
feb-17	1,9	1,5	1,3	1,1
mar-17	1,2	1,0	0,9	0,7

abr-17	3,4	2,9	2,4	2,3
may-17	-0,3	0,2	0,5	0,2
jun-17	-0,5	-0,4	0,1	-0,4
jul-17	-0,3	-0,2	-0,3	-0,3
ago-17	-0,4	-0,7	0,0	-0,2
sep-17	-0,8	-0,6	-0,3	-0,2
oct-17	-1	-1,0	-0,2	-0,2
nov-17	0	-0,3	-0,1	-0,1
dic-17	0,8	0,5	0,8	0,6
	R ²	0,96	0,93	0,94
	d	0,98	0,93	0,92
	RMSE	0,31	0,54	0,56
	MAE	0,26	0,46	0,46

Los valores del PDSI observados son muy similares a los pronosticados aún para pronósticos de 3 meses presentando valores del R² y d superiores a 0,90 y RMSE inferiores a 0,50. Lo cual indica la posibilidad de usar los valores pronosticados para fines operacionales de alerta temprana y elaborar medidas de mitigación.

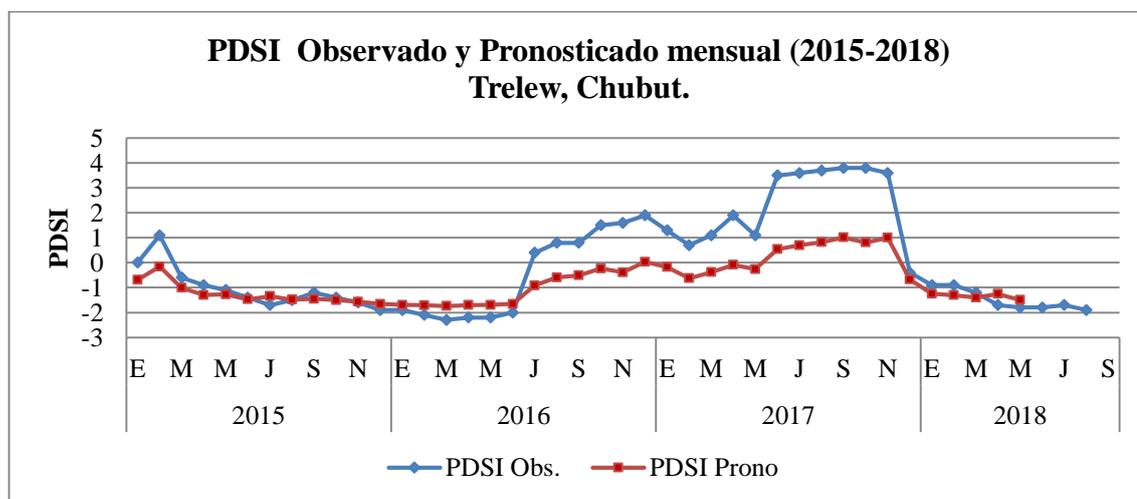


Figura 3.50. Índices PDSI observados y pronosticados para Trelew, período 2015-2018.

Tabla 3.14 Valores de los PDSI observados y pronosticados, R² y coeficientes de error para la localidad de Trelew de enero a diciembre de 2017.

Mes	PDSI Obs.	PDSI Pron.		
		PDSI +1	PDSI +2	PDSI +3
ene-17	1,3	-0,2	-0,4	-0,4
feb-17	0,7	-0,6	-0,7	-0,7
mar-17	1,1	-0,4	-0,5	-0,4

abr-17	1,9	-0,1	-0,3	-0,1
may-17	1,1	-0,3	-0,4	-0,2
jun-17	3,5	0,5	0,1	0,2
jul-17	3,6	0,7	0,2	0,2
ago-17	3,7	0,8	0,5	0,4
sep-17	3,8	1,0	0,7	0,5
oct-17	3,8	0,8	0,8	0,6
nov-17	3,6	1,0	1,1	0,6
dic-17	-0,4	-0,7	-0,2	-0,6
	R ²	0,95	0,70	0,91
	d	0,60	0,55	0,55
	RMSE	2,25	2,45	2,51
	MAE	2,08	2,26	2,30

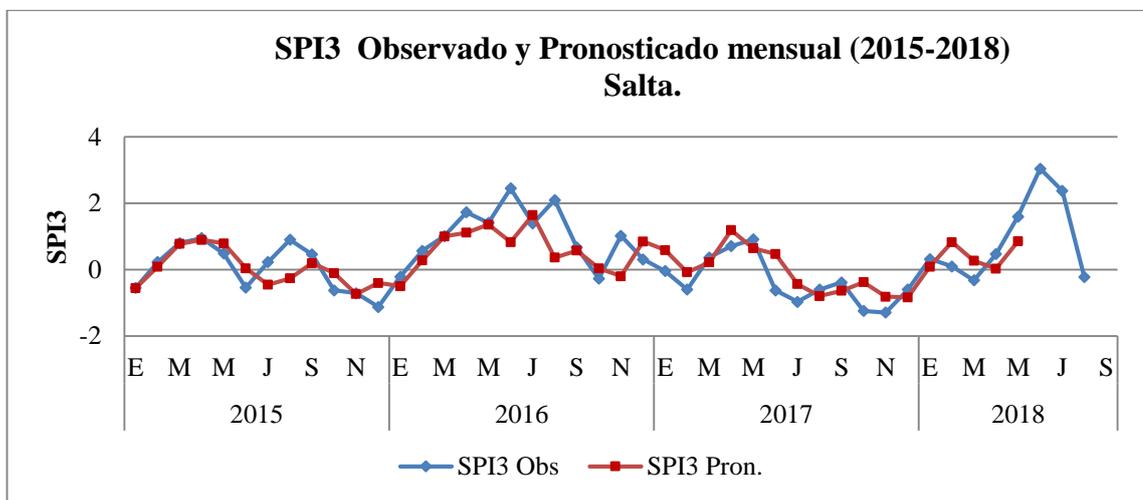


Figura 3.51. Índices SPI3 observados y pronosticados para Salta, período 2015-2018.

Los valores del SPI3 observados para Salta son similares a los pronosticados para el pronóstico del segundo mes presentando valores de R^2 y d iguales a 0,71 y 0,90; no así para el primer y tercer mes pronosticado más bajos, mientras que los valores del RMSE 0,55 a 0,68 señala errores importantes y dada esta irregularidad los hace poco confiables a los mismos. Estas variaciones que hay entre el error del segundo mes respecto al primer y tercer mes de pronóstico, indicaría una baja posibilidad de usar los valores del SPI3 pronosticados para Salta dado su gran variabilidad para fines operacionales de alerta temprana y elaborar medidas de mitigación (Tabla 3.15).

Tabla 3.15. Valores de los SPI3 observados y pronosticados, R^2 y coeficientes de error para la localidad de Salta de enero a diciembre de 2017.

Mes	SPI3 Obs.	SPI3 Prono.		
		SPI3+1	SPI3+2	SPI3+3
ene-17	-0,04	0,04	-0,52	-0,15
feb-17	-0,59	-0,20	-0,81	0,21
mar-17	0,36	0,85	0,96	0,10
abr-17	0,72	0,59	-0,39	0,68
may-17	0,97	-0,08	-0,40	0,28
jun-17	-0,61	0,22	0,15	0,35
jul-17	-0,97	1,19	0,87	0,51
ago-17	-0,59	0,64	0,25	0,14
Set-17	-0,38	0,47	-0,04	0,13
oct-17	-1,24	-0,44	-0,76	-0,20
nov-17	-1,29	-0,80	-0,83	-0,22
dic-17	-0,60	-0,63	-0,61	-0,33
	R ²	0,10	0,02	0,20
	d	0,40	0,40	0,40
	RMSE	77,94	77,87	77,97
	MAE	69,60	69,46	69,62

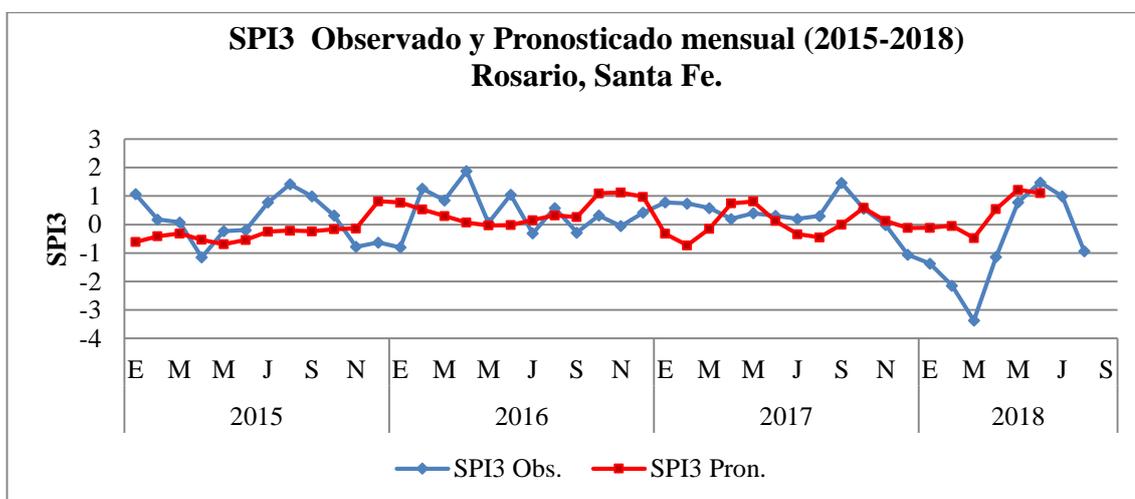


Figura 3.52. Índices SPI3 observados y pronosticados para Rosario, Santa Fe, período 2015-2018.

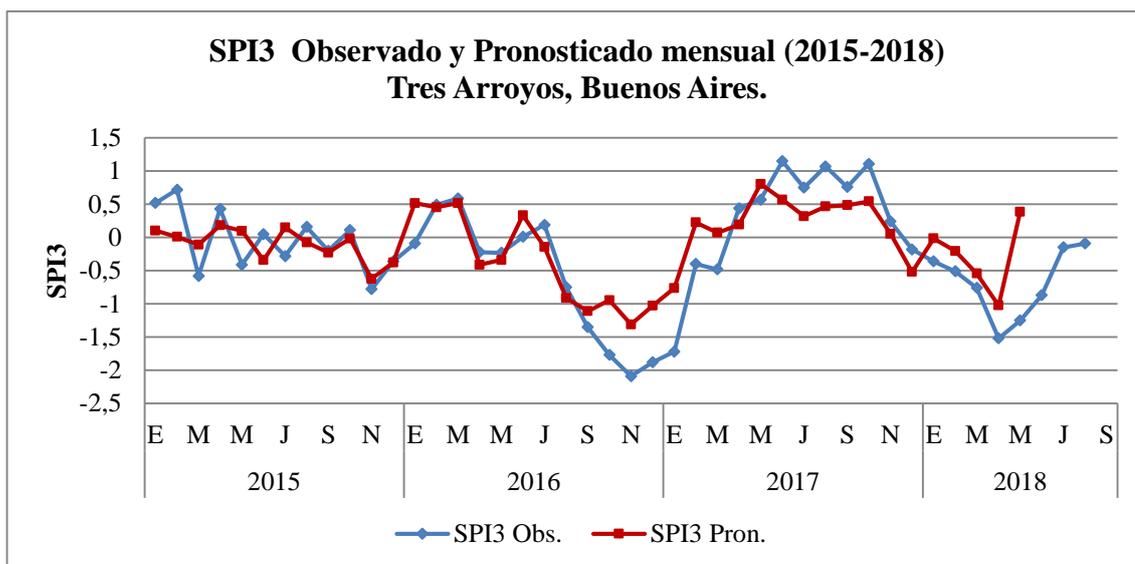


Figura 3.53. Índices SPI3 observados y pronosticados para Tres Arroyos, Buenos Aires, período 2015-2018.

Tabla 3.16. Valores de los SPI3 observados y pronosticados, R^2 y coeficientes de error para la localidad de Rosario de enero a diciembre de 2017.

Mes	Rosario SPI3 Prono.			
	SPI3 Obs.	SPI3+1	SPI3+2	SPI3+3
ene-17	0.76	0,06	-0,05	0,04
feb-17	0.72	0,15	0,12	0,22
mar-17	0.57	0,12	0,12	0,14
abr-17	0.17	0,32	0,22	0,26
may-17	0.42	0,82	0,71	0,31
jun-17	0.34	0,46	0,08	0,21
jul-17	0.22	0,11	0,07	0,21
ago-17	0.28	0,01	-0,12	0,18
Set-17	1.46	0,27	0,25	0,23
oct-17	0.56	0,34	0,10	0,15
nov-17	-0.02	-0,03	-0,07	0,12
dic-17	-1.06	0,31	0,39	0,24
	R^2	0,00	0,02	0,04
	d	0,38	0,38	0,38
	RMSE	67,19	67,26	67,22
	MAE	54,64	54,73	54,70

Tabla 3,17. Valores de los SPI3 observados y pronosticados, R^2 y coeficientes de error para la localidad de Salta de enero a diciembre de 2017.

Mes	Tres Arroyos SPI3 Prono.			
	SPI3 Obs.	SPI3+1	SPI3+2	SPI3+3
ene-17	-1.72	-1,11	-0,45	0,13
feb-17	-0.41	-0,94	-0,52	0,02
mar-17	-0.49	-1,31	-0,90	-0,19
abr-17	0.42	-1,03	-0,35	0,16
may-17	0.55	-0,76	-0,05	0,28
jun-17	1.12	0,23	0,68	0,51
jul-17	0.74	0,07	0,24	0,15
ago-17	1.06	0,19	0,60	0,44
Set-17	0.76	0,81	0,56	0,13
oct-17	1.11	0,57	0,36	0,07
nov-17	0.24	0,32	0,11	0,00
dic-17	-0.18	0,47	0,35	0,15
	R ²	0,41	0,54	0,25
	d	0,33	0,33	0,32
	RMSE	84,63	84,65	84,87
	MAE	73,06	73,03	73,20

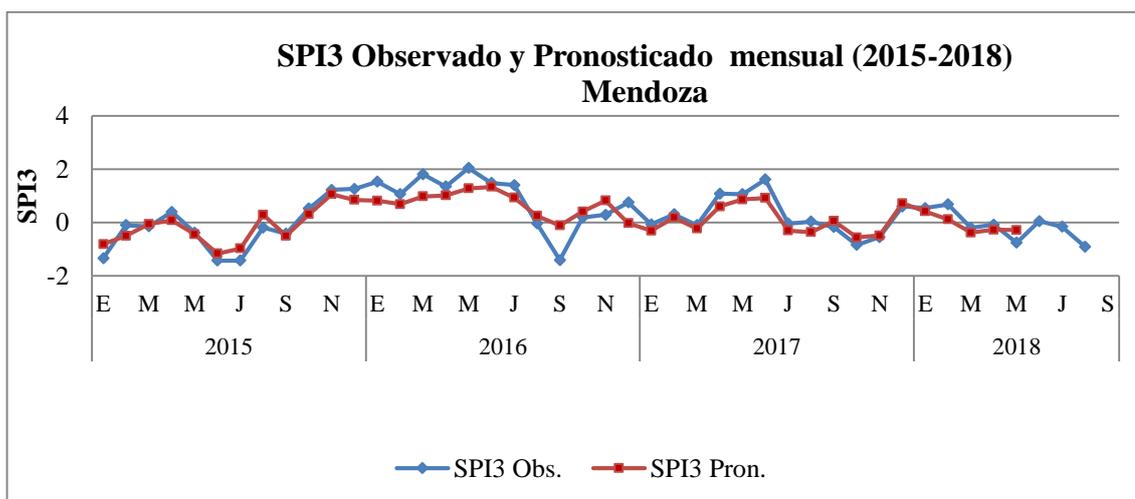


Figura 3.54. Índices SPI3 observados y pronosticados para Mendoza, período 2015-2018.

Tabla 3.18 Valores de los SPI3 observados y pronosticados, R² y coeficientes de error para la localidad de Mendoza, de enero a diciembre de 2017.

Mes	SPI3 Obs.	Mendoza SPI3 Pron.		
		SPI3+1	SPI3+2	SPI3+3
ene-17	-0,07	-0,30	-0,14	0,01
feb-17	0,31	0,18	0,37	0,14
mar-17	-0,10	-0,23	-0,37	-0,29
abr-17	1,08	0,60	0,63	0,06

may-17	1,06	0,86	0,38	0,06
jun-17	1,61	0,91	0,73	0,24
jul-17	-0,04	-0,30	-0,48	-0,15
ago-17	0,03	-0,36	-0,08	-0,19
sep-17	-0,17	0,05	-0,16	-0,17
oct-17	-0,84	-0,56	-0,34	0,17
nov-17	-0,55	-0,48	-0,02	0,08
dic-17	0,6	0,71	0,68	0,19
R^2		0,86	0,70	0,14
d		0,93	0,84	0,37
RMSE		0,32	0,43	0,68
MAE		0,27	0,34	0,52

Los valores del SPI3 calculados para Mendoza de R^2 y d son superiores a 0,70 para el primer y segundo mes y el RMSE es inferior a 0,50 para primer y segundo mes. Estos valores son aceptables lo cual indica la utilidad de usar los valores pronosticados hasta dos meses de antelación para fines operacionales de alerta temprana y elaborar medidas de mitigación.

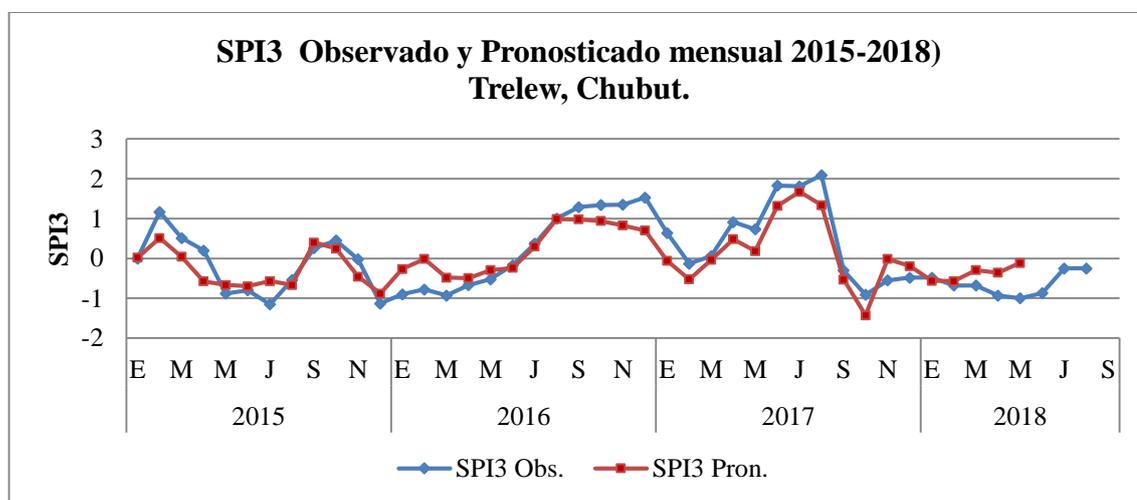


Figura 3.55. Índices SPI3 observados y pronosticados para Trelew, Chubut, período 2015-2018.

Tabla 3.19 Valores de los SPI3 observados y pronosticados, R^2 y coeficientes de error para Trelew, de enero a diciembre de 2017.

Mes	SPI3Obs.	SPI3Pron.		
		SPI3+1	SPI3+2	SPI3+3
ene-17	0,6	-0,1	-0,3	-0,1
feb-17	-0,1	-0,5	0,0	0,3
mar-17	0,1	0,0	0,6	0,2

abr-17	0,9	0,5	0,5	-0,3
may-17	0,7	0,2	-0,2	-0,2
jun-17	1,8	1,3	1,6	0,6
jul-17	1,8	1,7	1,1	0,6
ago-17	2,1	1,3	1,1	0,5
sep-17	-0,3	-0,5	-0,7	0,3
oct-17	-0,9	-1,4	-0,1	0,2
nov-17	-0,6	0,0	0,7	0,3
dic-17	-0,5	-0,2	-0,2	-0,1
R2		0,86	0,47	0,11
d		0,93	0,79	0,38
RMSE		0,47	0,73	0,97
MAE		0,43	0,64	0,88

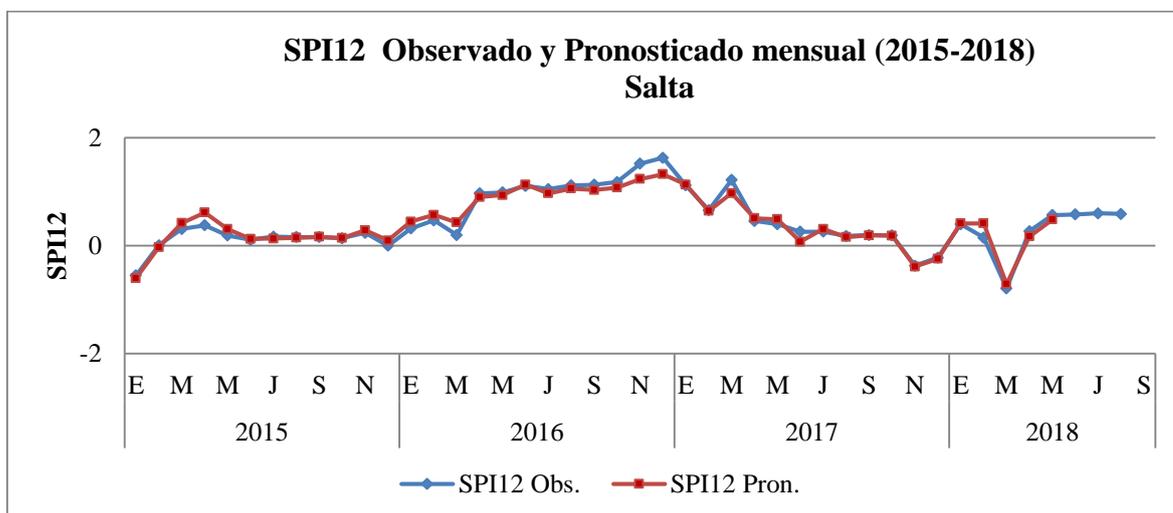


Figura 3.56. Índices SPI12 observados y pronosticados para Salta, período 2015-2018.

Los valores del SPI12 pronosticados para Salta presentan valores de R^2 , d, MAE y RMSE muy aceptables señalando bajos errores de pronóstico.

Tabla 3.20. Valores de los SPI12 observados y pronosticados, R^2 y coeficientes de error para Salta, de enero a diciembre de 2017.

Mes	SPI12 Obs.		SPI12 Pron.	
		SPI12+1	SPI12+1	SPI12+2
ene-17	1,1	0,2	0,5	0,7
feb-17	0,7	-1,1	-2,1	-1,9
mar-17	1,2	-1,9	-0,2	-1,0
abr-17	0,5	-1,1	-2,1	-1,9

may-17	0,4	-1,1	-2,1	-1,9
jun-17	0,3	2,1	0,7	1,0
jul-17	0,3	1,6	2,1	1,8
ago-17	0,2	2,1	0,7	1,0
sep-17	0,2	1,1	-1,5	-0,4
oct-17	0,2	1,1	-1,5	-0,4
nov-17	-0,4	1,1	-1,5	-0,4
dic-17	-0,2	1,1	-1,5	-0,4
	R ²	0,96	0,93	0,92
	d	0,99	0,95	0,91
	RMSE	0,10	0,18	0,24
	MAE	0,06	0,13	0,18

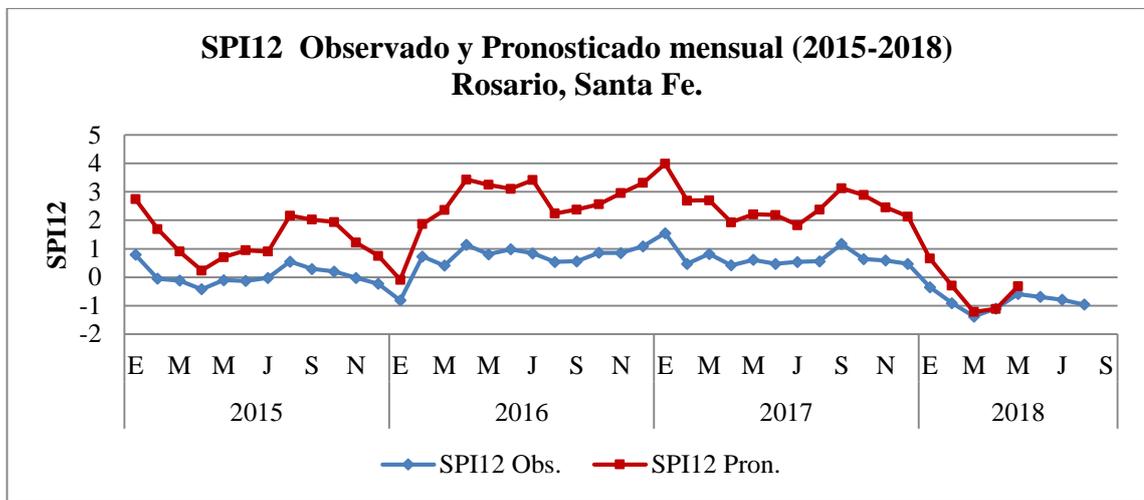


Figura 3.57. Índices SPI12 observados y pronosticados para Rosario, Santa Fe, período 2015-2018.

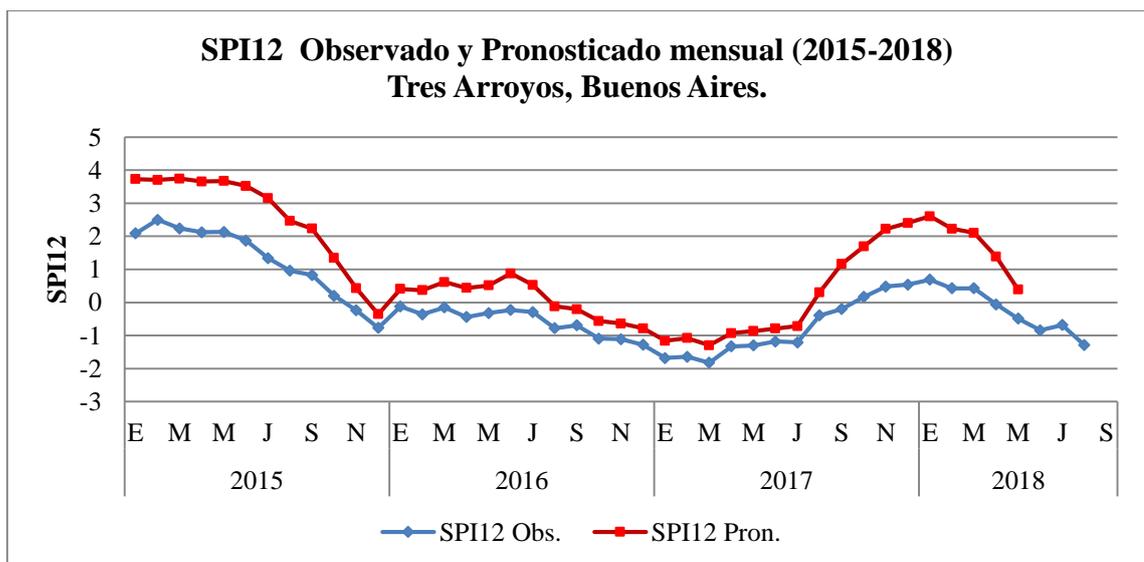


Figura 3.58. Índices SPI12 observados y pronosticados para Tres Arroyos, Buenos Aires, período 2015-2018.

Mes	Rosario				Tres Arroyos			
	SPI12+1	SPI12+2	SPI12+3		SPI12+1	SPI12+2	SPI12+3	
ene-17	1,6	4,0	4,0	3,1	-1,7	-1,2	-1,1	-1,1
feb-17	0,5	2,7	2,3	2,2	-1,6	-1,1	-1,0	-0,9
mar-17	0,8	2,7	2,5	2,1	-1,8	-1,3	-1,2	-1,2
abr-17	0,4	1,9	2,0	1,4	-1,3	-0,9	-0,9	-0,7
may-17	0,6	2,2	2,0	1,9	-1,3	-0,9	-0,8	-0,7
jun-17	0,5	2,2	2,3	1,6	-1,2	-0,8	-0,8	-0,4
jul-17	0,5	1,8	2,3	1,6	-1,2	-0,7	-0,7	-0,1
ago-17	0,6	2,4	2,4	1,9	-0,4	0,3	0,3	0,9
set-17	1,2	3,1	3,4	2,6	-0,2	1,2	1,2	1,4
oct-17	0,6	2,9	2,8	2,4	0,2	1,7	1,7	1,8
nov-17	0,6	2,5	2,6	2,1	0,5	2,2	2,2	2,4
dic-17	0,5	2,1	2,3	1,7	0,5	2,4	2,4	2,4
	R ²	0,80	0,88	0,77	R ²	0,98	0,97	0,99
	d	0,29	0,29	0,36	d	0,81	0,80	0,75
	RMSE	1,88	1,91	1,38	RMSE	1,03	1,06	1,22
	MAE	1,85	1,88	1,36	MAE	0,88	0,91	1,12

Tabla 3.21. Valores de los SPI12 observados y pronosticados, R² y coeficientes de error para las localidades de Rosario y Tres Arroyos de enero a diciembre de 2017.

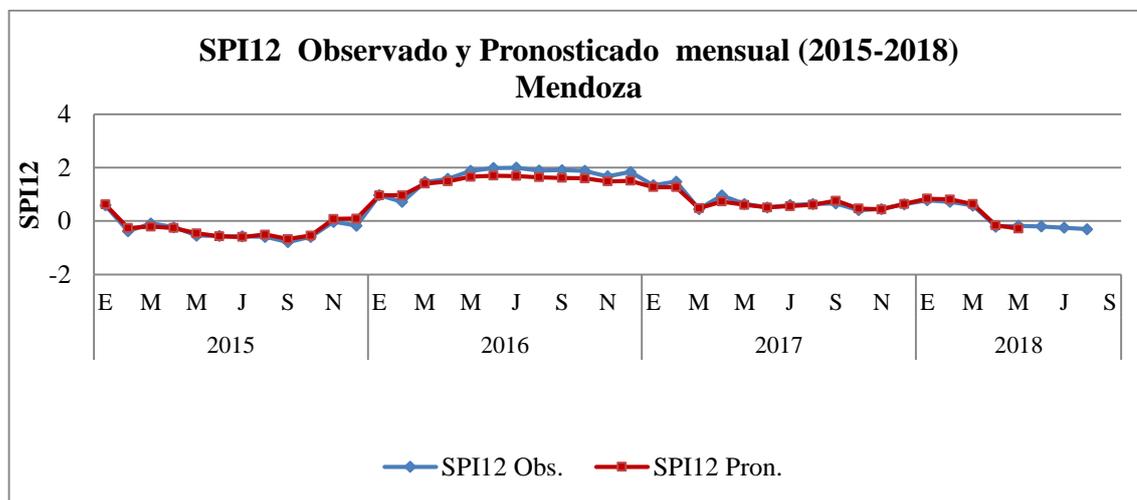


Figura 3.59. Índices SPI12 observados y pronosticados para Mendoza, período 2015-2018.

Tabla 3.22. Valores de los SPI12 observados y pronosticados, R² y coeficientes de error para la localidad de Mendoza, de enero a diciembre de 2017.

Mes	SPI12Obs.	SPI12Pron.		
		SPI12+1	SPI12+2	SPI12+3
ene-17	1,3	1,3	1,1	0,9
feb-17	1,5	1,3	1,1	0,9
mar-17	0,5	0,5	0,4	0,2
abr-17	1,0	0,7	0,6	0,4
may-17	0,6	0,6	0,5	0,4
jun-17	0,5	0,5	0,4	0,1
jul-17	0,6	0,6	0,5	0,4
ago-17	0,6	0,6	0,5	0,3
sep-17	0,7	0,8	0,7	0,6
oct-17	0,4	0,5	0,4	0,3
nov-17	0,5	0,4	0,4	0,4
dic-17	0,6	0,6	0,5	0,6
	R ²	0,95	0,93	0,75
	d	0,97	0,92	0,75
	RMSE	0,10	0,18	0,31
	MAE	0,07	0,14	0,26

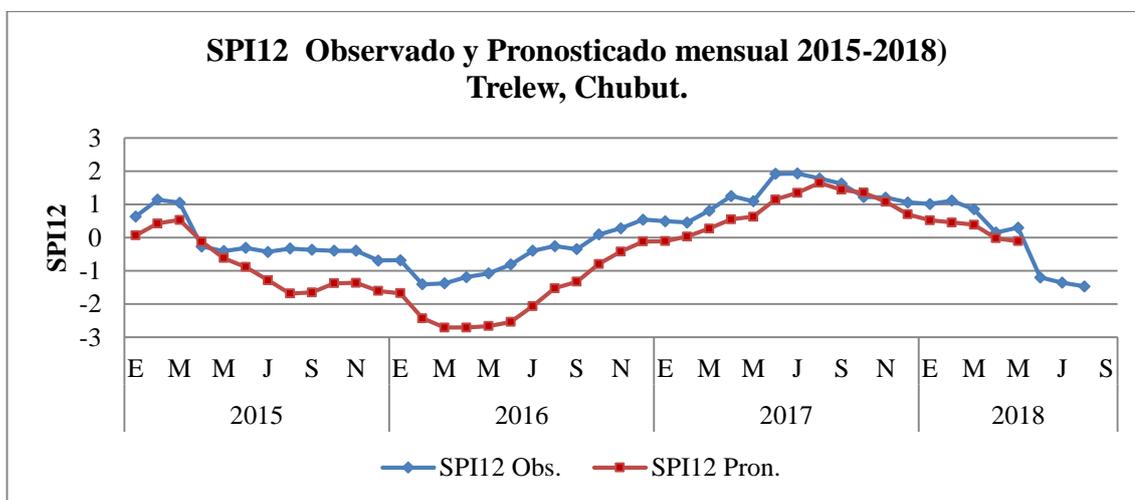


Figura 3.60. Índices SPI12 observados y pronosticados para Trelew, Chubut, período 2015-2018.

Tabla 3.23 Valores de los SPI12 observados y pronosticados, R² y coeficientes de error para Trelew, de enero a diciembre de 2017.

Mes	SPI12Obs.	SPI12Pron.		
		SPI12+1	SPI12+2	SPI12+3
ene-17	0,5	-0,1	-0,2	0,1
feb-17	0,5	0,0	-0,2	0,1
mar-17	0,8	0,3	0,2	0,7
abr-17	1,3	0,5	0,6	1,2
may-17	1,1	0,6	0,7	1,2
jun-17	1,9	1,1	1,4	2,1
jul-17	1,9	1,3	1,9	2,7
ago-17	1,8	1,6	1,9	2,4
sep-17	1,6	1,4	1,7	2,5
oct-17	1,2	1,4	1,2	1,8
nov-17	1,2	1,1	1,1	1,7
dic-17	1,1	0,7	0,6	1,1
	R ²	0,78	0,89	0,91
	d	0,81	0,87	0,87
	RMSE	0,48	0,44	0,48
	MAE	0,42	0,36	0,38

e. Análisis ocho localidades Región Pampeana en estaciones contrastantes

A los fines de observar el comportamiento de los índices utilizados, se consideraron dos estaciones contrastantes: el verano y el invierno y se calcularon los coeficientes de determinación y los errores d y RMSE entre los valores observados y pronosticados para ocho estaciones de la región Pampeana seleccionadas por su proximidad geográfica: Bolivar, Laboulaye, Pilar, Río Cuarto, Rosario, Sauce Viejo, Tres Arroyos y Venado Tuerto. En este grupo de estaciones hubo excedentes de humedad en los meses invernales y deficiencias en el verano. Durante los meses de junio, julio, agosto del 2017 se presentaron condiciones de excesos de humedad (Figura 3.41).

Tabla 3.24 Valores de PDSI observados y pronosticados, para las siguientes ocho estaciones con modelos basados en RN: Bolívar, Laboulaye, Pilar, Río Cuarto, Rosario, Sauce Viejo, Tres Arroyos y Venado Tuerto pertenecientes la región pampeana, durante los meses de junio, julio y agosto de 2017 y 2018.

		PDSI				PDSI			
		Obs.	Prono.	Prono.	Prono.	Obs.	Prono.	Prono.	Prono.
			Jun/17	Jul/17	Ago/17		Jun/18	Jul/18	Ago/18
Bolívar	jun	4,3	3,4	3,1	2,6	1,5	-0,9	-0,8	-0,7
	jul	4,3	4,0	3,9	3,4	2,2	-1,1	-1,0	-0,8
	ago	5,0	4,3	4,2	3,9	2,2	-0,4	-0,7	-0,6
Laboulaye	jun	5,3	4,1	3,9	3,8	-1,2	-1,8	-1,6	-1,2
	jul	4,8	4,7	4,5	4,4	-0,8	-2,1	-1,9	-1,8
	ago	4,4	5,3	5,1	4,9	-0,9	-1,9	-1,8	-1,6
Pilar	jun	-1,3	-1,1	-1,6	-1,0	-2,4	-2,7	-2,4	-2,2
	jul	-1,5	-1,7	-1,8	-1,5	-2,5	-3,1	-2,7	-2,6
	ago	-2,0	-1,4	-1,6	-1,3	-2,7	-3,2	-2,8	-2,7
Río Cuarto	jun	-3,0	-2,1	-1,9	-1,7	-3,6	-2,7	-2,4	-2,0
	jul	-3,0	-2,2	-1,9	-1,7	-3,7	-2,8	-2,4	-2,0
	ago	-3,1	-2,1	-1,8	-1,7	-3,9	-2,7	-2,3	-2,0
Rosario	jun	1,8	2,1	2,0	1,4	-1,4	-2,1	-1,7	-1,4
	jul	1,9	2,1	1,8	1,3	-1,4	-2,3	-2,3	-1,9
	ago	1,7	2,3	1,8	1,4	-1,4	-2,2	-1,7	-1,4
Sauce Viejo	jun	2,5	2,6	2,6	2,2	0,6	-0,8	-0,7	-0,6
	jul	2,4	2,1	2,1	1,9	0,9	-1,5	-1,4	-1,2
	ago	3,1	2,4	2,3	2,0	1,1	0,7	0,8	0,8
Tres Arroyos	jun	1,0	-2,5	-2,2	-1,9	-2,0	-0,5	-0,2	-0,5
	jul	1,8	-2,6	-2,3	-1,9	-1,9	-0,6	-0,3	-0,6
	ago	1,8	0,4	0,3	0,3	-1,9	-1,0	-0,5	-0,9
Venado Tuerto	jun	4,5	3,0	2,7	2,5	1,4	-1,6	-1,7	-1,6
	jul	4,2	2,8	2,5	2,4	1,2	-2,0	-1,9	-1,6
	ago	4,1	3,3	3,0	3,1	1,3	0,0	-0,0	-0,0

Las condiciones del invierno 2017 fueron muy húmedas con excesos hídricos y los valores estimados de R^2 fueron para el PDSI: 0,77, 0,78 y 0,80, para el SPI3: 0,30, 0,24 y 0,15 y para el SPI12: 0,86, 0,87 y 0,85 (Tabla 3.25). En el invierno de 2018 las condiciones de humedad fueron cambiando a muy secas y los errores obtenidos entre los índices

observados y pronosticados resultaron ser mucho más bajos, lo que demuestra una diferencia de comportamiento de los índices evaluados bajo condiciones extremas de sequías o de excesos.

Se realizó el cálculo del R^2 y coeficientes de los errores agrupando a los índices observados y pronosticados de las ocho estaciones selectas de la RP (Tabla 3.25).

Tabla 3.25 Coeficientes de determinación R^2 , errores d, RMSE y MAE obtenidos para los índices PDSI, SPI3 y SPI12 observados y pronosticados de junio, julio, agosto de 2017 y 2018 para las estaciones Bolívar, Laboulaye, Pilar, Río Cuarto, Rosario, Sauce Viejo, Tres Arroyos y Venado Tuerto de la RP.

Año	PDSI			SPI3			SPI12		
	2017			2017			2017		
	Jun+1	Jul+2	Ago+3	Jun+1	Jul+2	Ago+3	Jun+1	Jul+2	Ago+3
R²	0,77	0,78	0,80	0,30	0,24	0,15	0,86	0,87	0,85
d	0,93	0,92	0,92	0,68	0,62	0,54	0,94	0,93	0,89
RMSE	1,39	1,39	1,40	0,77	0,74	0,81	0,68	0,72	0,84
MAE	0,95	0,99	1,11	0,66	0,59	0,64	0,62	0,61	0,70

Año	PDSI			SPI3			SPI2		
	2018			2018			2018		
	Jun+1	Jul+2	Ago+3	Jun +1	Jul2	Ago+3	Jun+1	Jul+2	Ago+3
R²	0,40	0,30	0,37	0,09	0,12	0,04	0,24	0,20	0,11
d	0,67	0,64	0,64	0,34	0,32	0,37	0,60	0,58	0,50
RMSE	1,69	1,71	1,62	1,88	1,46	1,03	1,21	1,20	1,25
MAE	1,42	1,39	1,27	1,60	1,25	0,90	0,76	0,75	0,81

Durante los meses de enero, febrero y marzo de los años 2017 y 2018, hubo diferencias entre los coeficientes R^2 obtenido para los PDSI observados y pronosticados, cuyos valores fueron: 0.70, 0.69, 0.68 en 2017 y 0.62, 0.63, 0.27 en 2018. Los valores más elevados de R^2 se registraron con los excesos hídricos durante 2017(Tabla 3.27). Los valores del R^2 para el índice SPI3 obtenidos fueron relativamente bajos: 0.17, 0.14, 0.08 y 0.29, 0.17, 0.00, señalando un considerable error entre los SPI3 observados y pronosticados. Mientras que para el SPI12 no hubo diferencias entre los R^2 para años con excesos o sequías, siendo estos: 0.39, 0.35, 0.40 y 0.40, 0.38, 0.41, señalando una leve

mejoría del R^2 respecto al SPI3, pero con considerable error entre los SPI12 observados y pronosticados (Tabla 3.27).

Tabla 3.26 Valores de PDSI observados y pronosticados, para las siguientes ocho estaciones con modelos basados en RN: Bolívar, Laboulaye, Pilar, Río Cuarto, Rosario, Sauce Viejo, Tres Arroyos y Venado Tuerto pertenecientes la región pampeana, durante los meses de enero, febrero y marzo 2017 y 2018.

		PDSI			PDSI				
		Obs.	Prono.	Prono.	Prono.	Obs.	Prono.	Prono.	Prono.
		Ene/17	Feb/17	Mar/17	Ene/18	Feb/18	Mar/18		
Bolívar	ene	1,5	-1,2	-1,1	-1,2	-0,7	3,8	3,0	2,8
	feb	3,6	0,7	0,4	0,2	-1,4	3,3	2,0	1,9
	mar	4,2	0,4	0,1	0,0	-1,9	3,0	1,5	1,4
Laboulaye	ene	5,3	2,6	2,4	1,9	-0,9	4,6	4,4	4,3
	feb	4,9	3,5	3,0	2,3	-1,8	-1,4	-1,0	-0,8
	mar	5,1	3,1	2,6	1,8	-2,3	-1,3	-1,0	-0,7
Pilar	ene	-1,5	-0,5	-0,8	-0,3	-2,5	-1,7	-1,7	-1,5
	feb	-1,3	-0,1	-0,2	0,0	-3,1	-2,4	-2,2	-2,0
	mar	-1,9	-0,7	-1,1	-0,5	-3,9	-2,6	-2,4	-2,2
Río Cuarto	ene	-2,4	-1,1	-1,1	-1,1	-4,4	-2,4	-2,1	-1,8
	feb	-2,7	-0,8	-0,8	-1,0	-4,8	-2,6	-2,3	-1,9
	mar	-3,1	-1,4	-1,3	-1,3	-5,6	-2,6	-2,3	-1,9
Rosario	ene	2,3	1,5	1,2	0,9	-2,1	2,9	2,5	1,9
	feb	2,1	1,6	1,6	1,0	-3	0,0	-0,3	-0,3
	mar	1,9	1,4	1,4	0,9	-3,8	-0,8	-0,6	-0,8
Sauce Viejo	ene	3,8	0,8	0,9	0,7	-0,3	2,9	2,7	2,4
	feb	3,8	1,0	1,0	0,9	-1,2	2,1	2,0	1,8
	mar	2,9	1,0	1,0	0,9	-2,2	-0,7	-0,7	-0,6
Tres Arroyos	ene	-3,1	-1,6	-1,4	-1,3	-0,5	1,8	1,5	1,4
	feb	-3,3	-2,1	-1,8	-1,5	-0,5	1,9	1,6	1,4
	mar	0,3	-2,5	-2,2	-1,8	-1,1	1,7	1,5	1,2
Venado Tuerto	ene	3,6	1,4	0,8	0,6	-0,4	3,6	3,1	3,0
	feb	3,5	2,8	1,3	1,2	-1,4	-1,1	-1,2	-1,3
	mar	3,3	3,3	0,6	0,4	-2,1	-1,0	-1,1	-1,1

Tabla 3.27 Coeficientes de determinación R^2 , errores d y RMSE obtenidos para los índices PDSI, SPI3 y SPI12 observados vs. Pronosticados de enero, febrero, marzo, 2017 y 2018, para las estaciones Bolivar, Laboulaye, Pilar, Río Cuarto, Rosario, Sauce Viejo, Tres Arroyos y Venado Tuerto de la RP.

Año	PDSI			SPI3			SPI12		
	2017			2017			2017		
	Ene+1	Feb+2	Mar+3	Ene+1	Feb+2	Mar+3	Ene+1	Feb+2	Mar+3
R²	0,70	0,69	0,68	0,17	0,14	0,08	0,39	0,35	0,40
d	0,80	0,76	0,70	0,63	0,58	0,39	0,77	0,75	0,77
RMSE	2,04	2,19	2,40	1,30	1,20	1,21	1,07	1,10	1,00
MAE	1,85	1,99	2,23	1,07	1,00	1,09	0,85	0,89	0,84

Año	PDSI			SPI3			SPI12		
	2018			2018			2018		
	Ene+1	Feb+2	Mar+3	Ene+1	Feb+2	Mar+3	Ene+1	Feb+2	Mar+3
R²	0,62	0,63	0,27	0,29	0,17	0,00	0,40	0,38	0,41
d	0,56	0,57	0,68	0,58	0,50	0,42	0,67	0,66	0,67
RMSE	3,03	2,76	1,72	1,37	1,39	1,47	1,63	1,65	1,49
MAE	2,61	2,46	1,50	1,11	1,16	1,16	1,19	1,21	1,14

ANEXO 4

Pronósticos de PDSI:

Se presentan mapas PDSI, observados y pronosticados a 1(+1); 2(+2) y 3(+3) meses desde mayo de 2017 a noviembre de 2019.

Se realizó una comparación entre los mapas observados y pronosticados para la serie completa de mapas del PDSI pronosticados obtenidos mensualmente con un breve comentario sobre las condiciones de humedad o sequedad ocurridas. Las figuras faltantes o interrupción de la secuencia mensual se debe a que las mismas fueron incorporadas como figuras en el cuerpo de la tesis.

Pronóstico PDSI: mayo, junio y julio 2017.

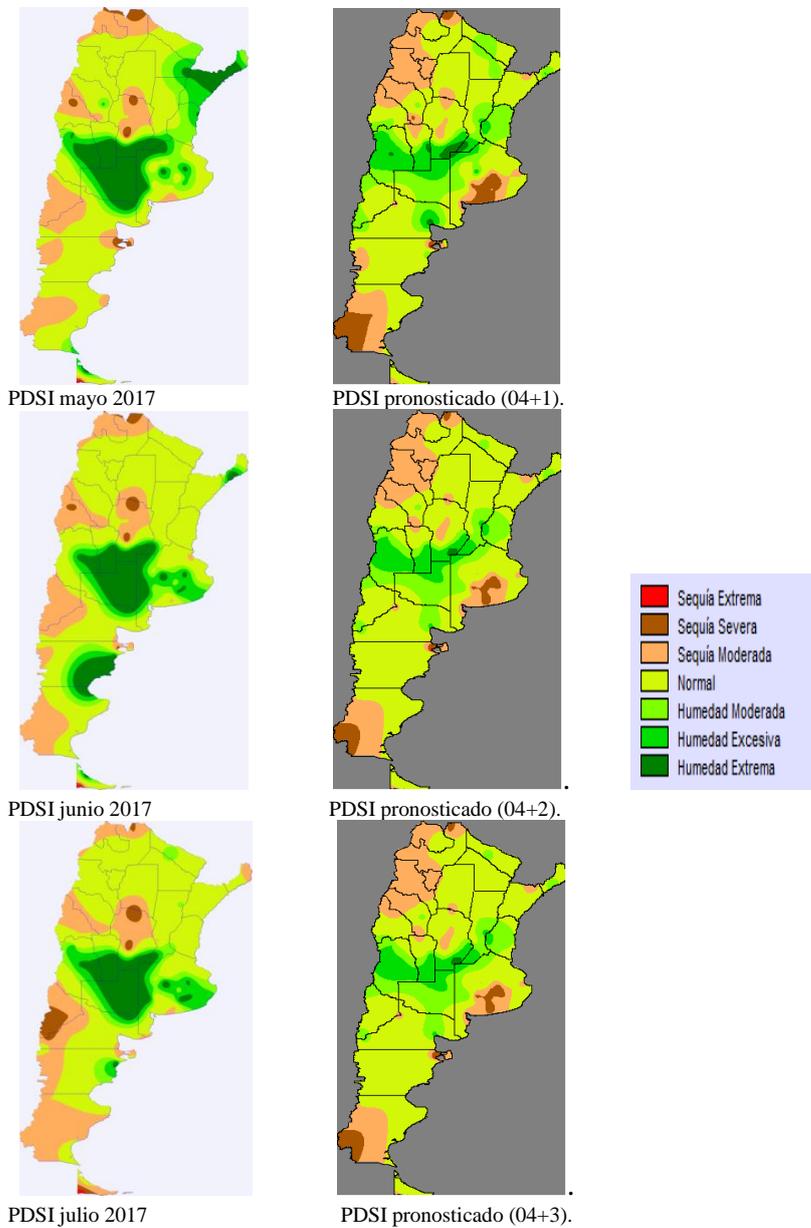


Figura A4.1. Mapas de PDSI observados vs. pronosticados para mayo, junio y julio a partir de abril de 2017.

Para el trimestre mayo-julio los pronósticos fueron bastante parecidos a los observados en excesos de humedad, no así en la extensión de los mismos, para los departamentos del sureste de Córdoba, sur de Santa Fe y noroeste de Buenos Aires y norte de La Pampa, sur de San Luis y centro de Mendoza.

Pronóstico PDSI: junio, julio y agosto 2017.

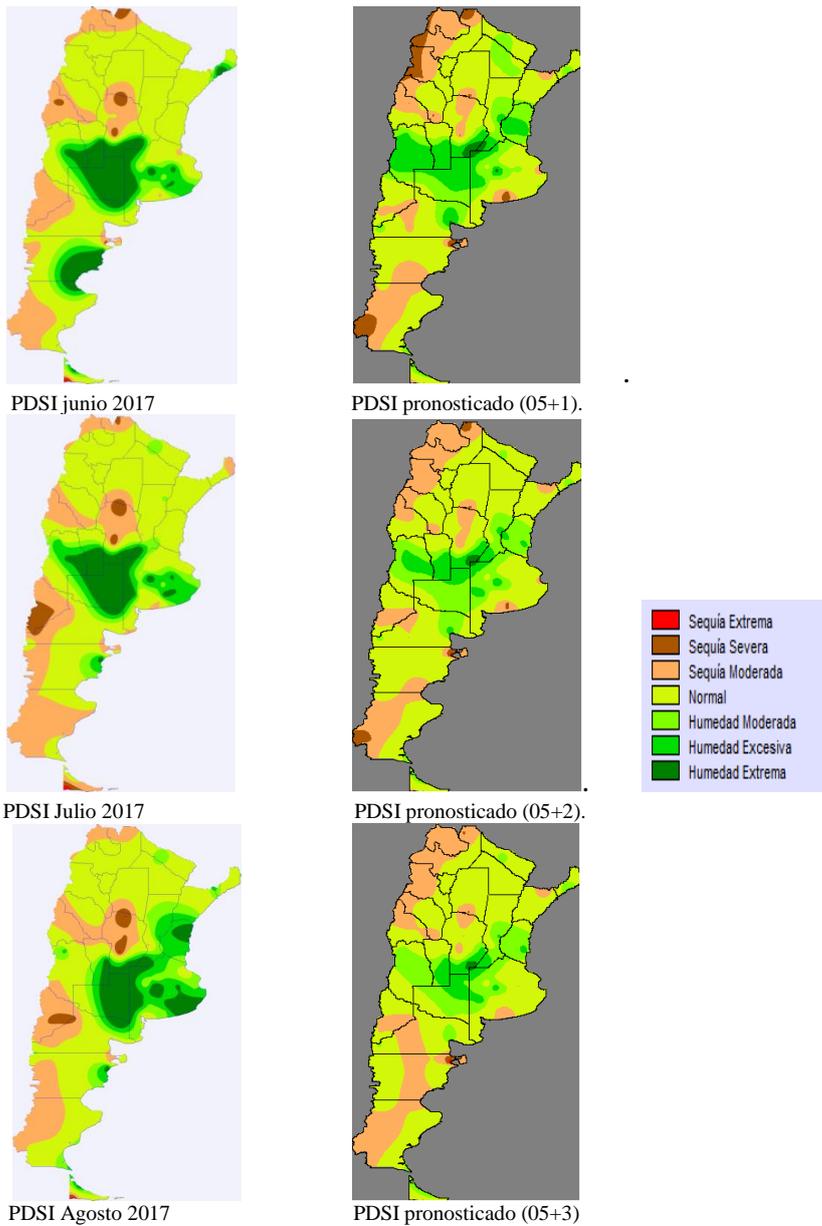


Figura A4.2. Mapas de PDSI observados vs. pronosticados para (junio-julio-agosto) 2017.

Para el trimestre junio-agosto los pronósticos se mantienen con condiciones similares de humedad a las del trimestre anterior, donde prevalecen humedad moderada a excesiva en la parte central y NEA de Argentina y sequías moderadas en oeste de NOA, sur de Patagonía.

Pronóstico PDSI para julio, agosto y setiembre 2017 cuerpo de tesis, (Fig. 3.41, Pág. 80)

Pronóstico PDSI para agosto, setiembre y octubre 2017.

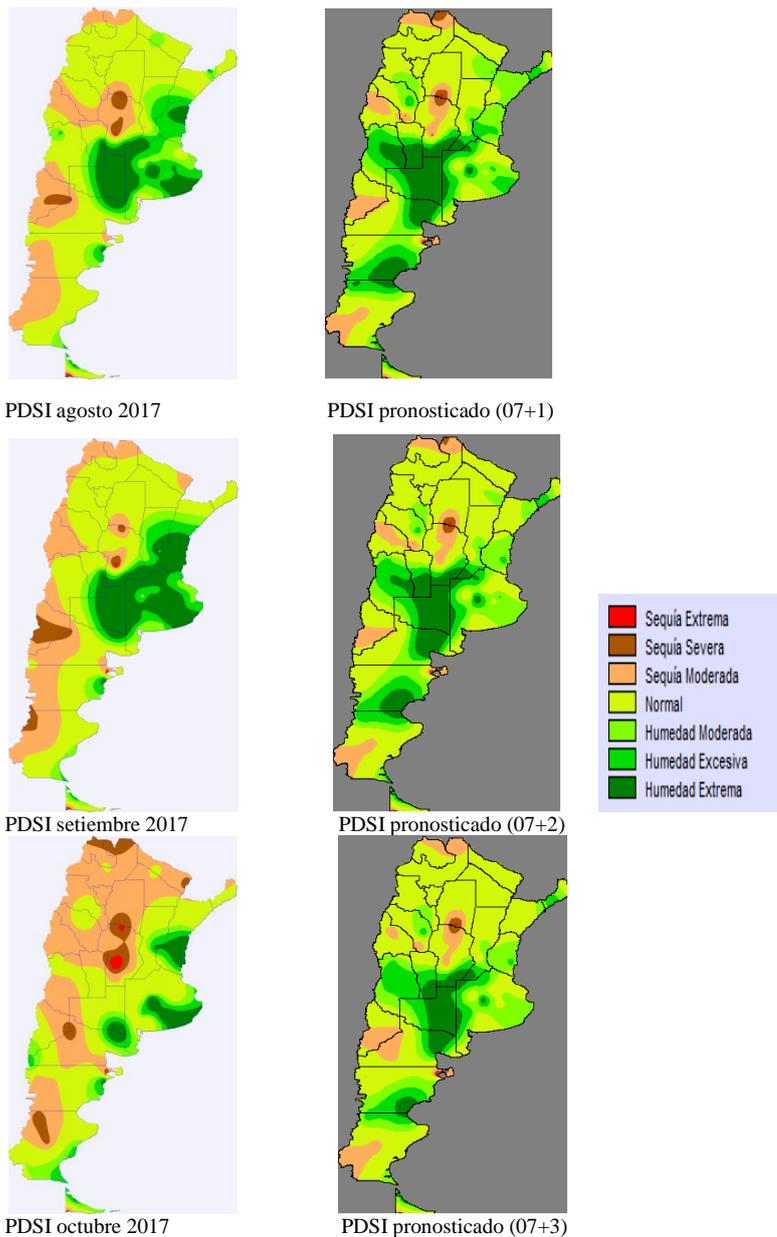
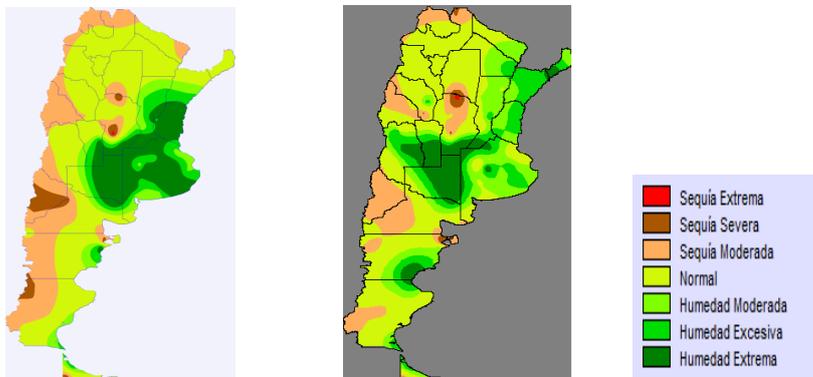


Figura A 4.3. Mapas de PDSI observados vs. pronosticados para agosto, setiembre y octubre a partir de PDSI de julio 2017.

Los mapas de PDSI presentaron condiciones similares de excesos al mes anterior en centro del país, S y SE de Córdoba humedad excesiva, S San Luis, S de Santa Fe y casi toda La Pampa, con incremento de humedad en provincia de Buenos Aires en general.

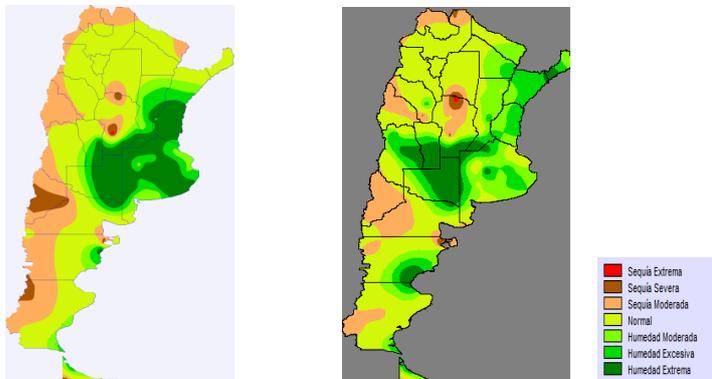
Pronóstico PDSI para setiembre, octubre y noviembre 2017.

Se observan en la región centro y norte de Córdoba sequías severas y extremas, abarcando también a la provincial de Santiago del Estero, con sequía moderada en toda región NO y N de Argentina.



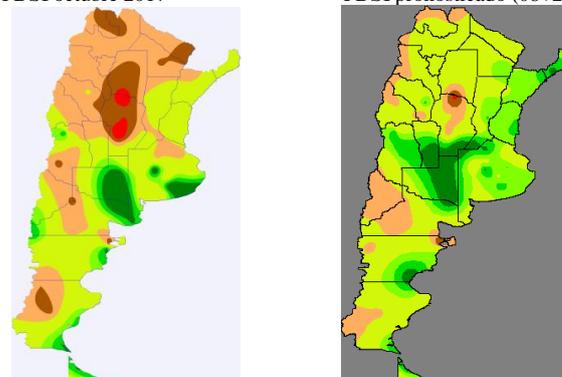
PDSI setiembre 2017

PDSI pronosticado (08+1)



PDSI octubre 2017

PDSI pronosticado (08+2)



PDSI noviembre 2017

PDSI pronosticado (08+3)

Figura A4.4. Mapas de PDSI observados vs. pronosticados para setiembre, octubre y noviembre a partir de PDSI de agosto 2017.

Pronóstico PDSI para octubre, noviembre y diciembre 2017

Los mapas de PDSI presentaron condiciones similares de excesos al mes anterior en centro del país, S y SE de Córdoba humedad excesiva, S San Luis, S de Santa Fe y casi toda La Pampa, con incremento de humedad en provincia de Buenos Aires en general. También persisten sequías severas y extremas en áreas de la región centro y N de Córdoba, moderadas en gran parte región NO y N de Argentina.

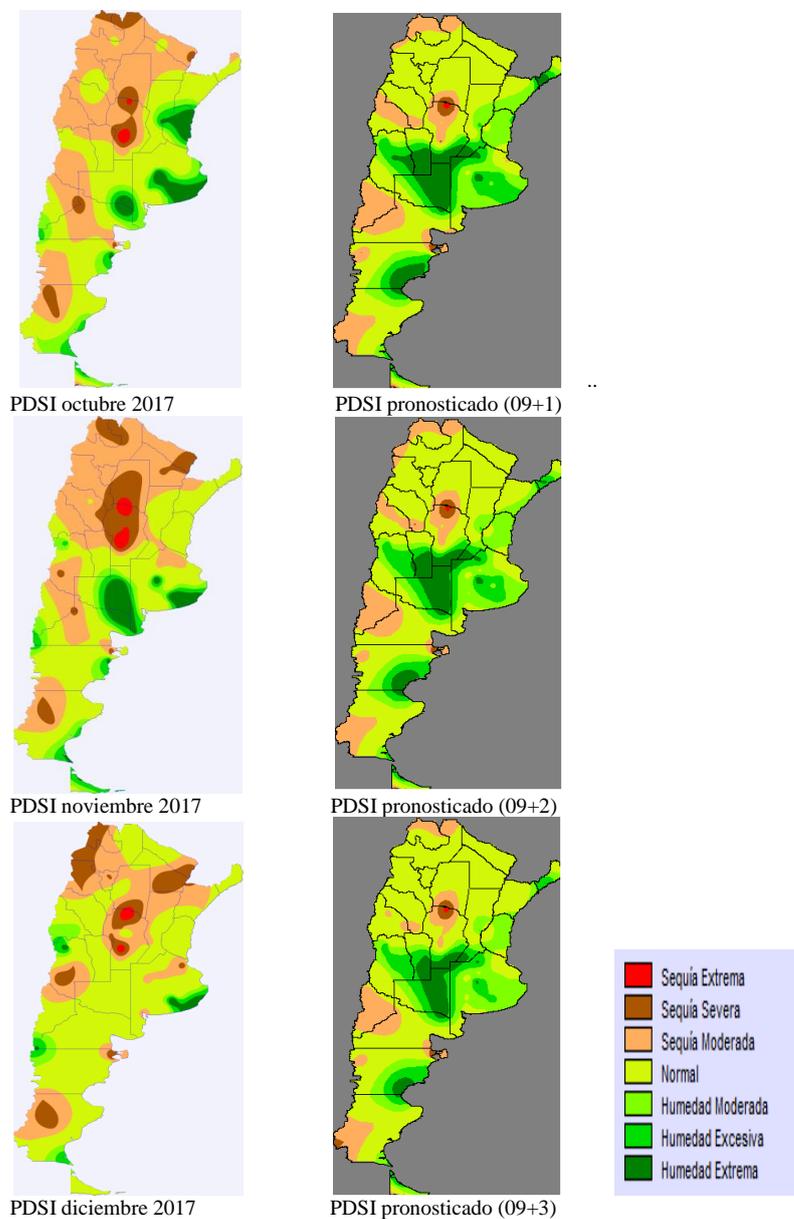
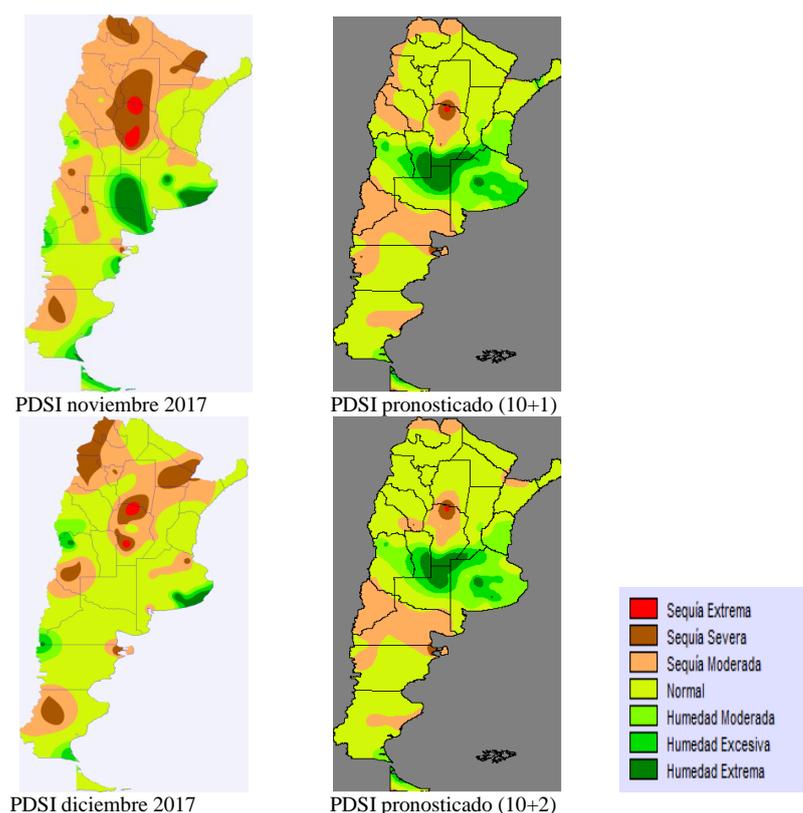


Figura A4.5. Mapas de PDSI observados vs. pronosticados para octubre, noviembre y diciembre a partir de PDSI de setiembre 2017.

Pronóstico PDSI para noviembre y diciembre 2017 y enero 2018

El pronóstico realizado en octubre, se observó que continua las condiciones de excesiva y extrema humedad en la región central abarcando, S y SE de Córdoba, Santa Fe y San Luis; Noreste de La Pampa, NO y centro de Buenos Aires; condiciones de sequías severas y extremas en parte norte y centro de la provincia de Córdoba. La zona cuyana condiciones normales y moderados excesos en Mendoza. La región N, NE y litoral muestran condiciones normales y moderados excesos solo en la provincia de Entre Ríos. En Patagonia O sobre la cordillera, condiciones secas moderadas en Neuquén y Río Negro principalmente, mientras que en zona costera y sur hay condiciones normales.



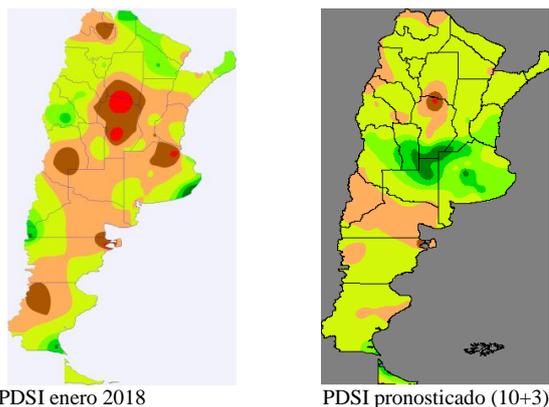
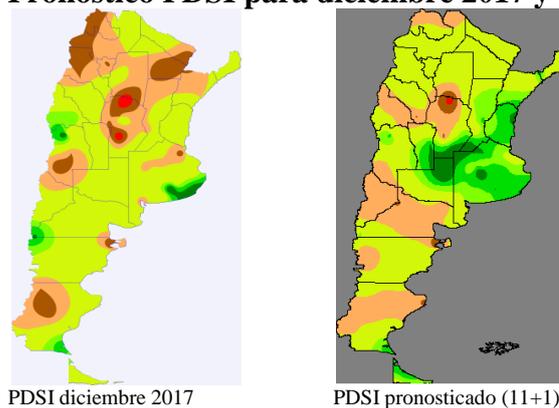


Figura A4.6. Mapas de PDSI observados vs. pronosticados para noviembre, diciembre y enero a partir de PDSI de octubre 2017.

El pronóstico indica para diciembre, enero y febrero que continúan pero en retroceso las condiciones de excesiva y extrema humedad en la región central abarcando, S y SE de Córdoba, Santa Fe y San Luis; Noreste de La Pampa, NO y centro de Buenos Aires; condiciones de sequías severas y extremas incrementándose en parte norte y centro de la provincia de Córdoba. La zona cuyana condiciones normales y moderados excesos en Mendoza. La región N, NE y litoral muestran condiciones normales y moderados excesos solo en la provincia de Entre Ríos. En Patagonia O sobre la cordillera, condiciones sequías moderadas en Neuquén y Río Negro principalmente, mientras que en zona costera y sur hay condiciones normales.

Pronóstico PDSI para diciembre 2017 y enero y febrero 2018



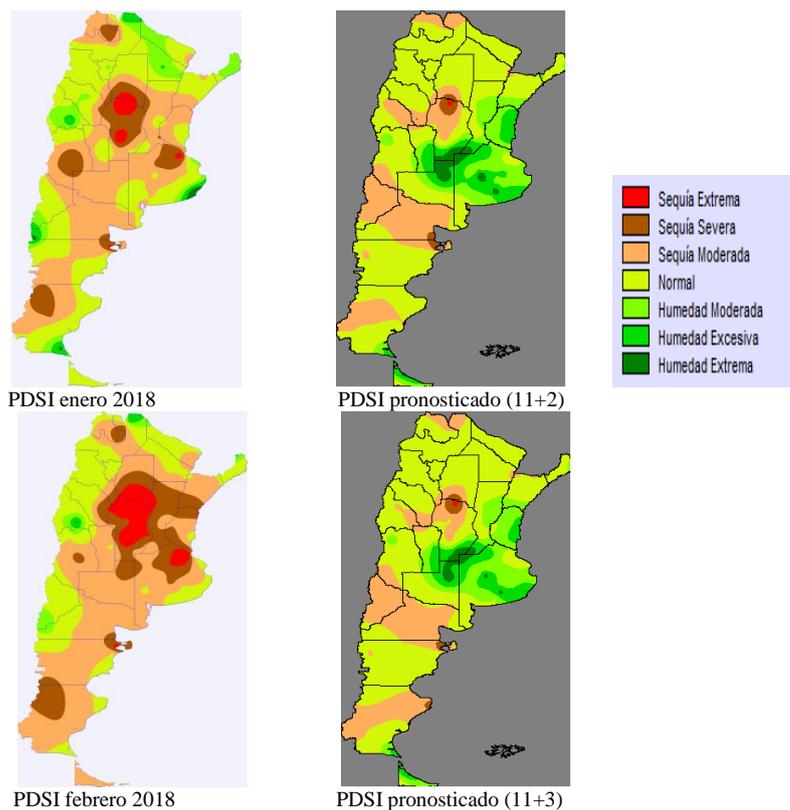


Figura A4.7. Mapas de PDSI observados vs. pronosticados para diciembre, enero y febrero a partir de PDSI de noviembre 2018.

Pronóstico PDSI para enero, febrero y marzo 2018

El pronóstico del PDSI indicaría sequías moderadas y severas para el centro y N de Córdoba; San Juan, parte de Catamarca; en Patagonia se extiende a las provincias de Neuquén, Río Negro, parte de Chubut y porción O de Santa Cruz. Para la región NOA y NEA norte, Patagonia E y las localidades de Bariloche y El Bolsón se mantiene las condiciones de, humedad normal. En la región NEA sur prevalecen condiciones de humedad excesiva y extrema para las localidades Concordia y Gualeguaychú, Entre Ríos; Santa Rosa, La Pampa; SE San Luis, S y SE Córdoba, S de Santa Fe y parte NO de la provincia de Buenos Aires y las localidades de Azul, Olavarría, Benito Juárez y Mar del Plata.

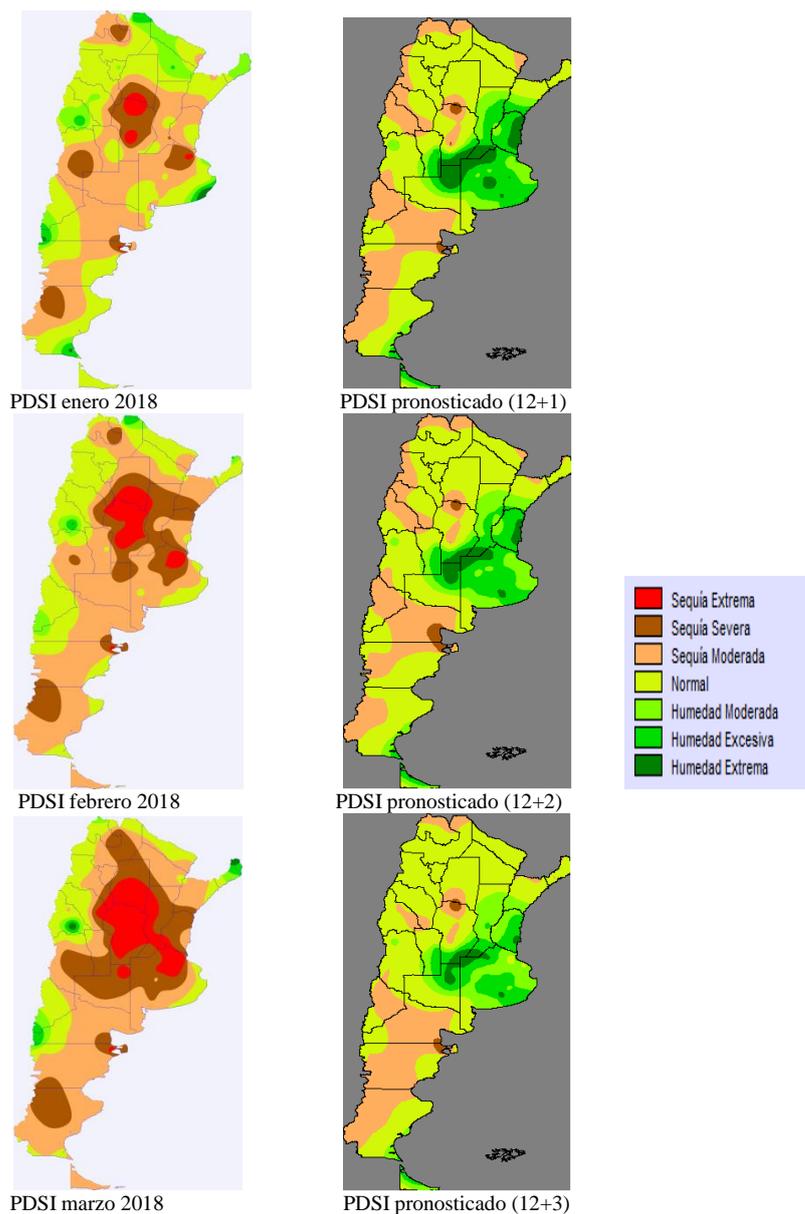


Figura A4.8. Mapas de PDSI observados vs. pronosticados para enero, febrero y marzo a partir de PDSI de diciembre 2017.

Pronóstico PDSI para febrero, marzo y abril 2018

El pronóstico del PDSI para los meses de febrero, marzo y abril 2018 indica sequías moderadas para la región central de Argentina, desde San Juan hasta el extremo NO de la provincia de Buenos Aires, extendiéndose hacia el N abarcando a las provincias del NOA, con sequías severas hacia el N, SE y S de Córdoba. En la region del NEA se mantendrá las condiciones normales, con humedad excesiva para las localidades Concordia y

Gualeguaychú, Entre Ríos; Santa Rosa, La Pampa; Bolivar, Olavarría, Benito Juárez y Mar del Plata, Buenos Aires. Las condiciones pronosticadas en Patagonia son; normales con sequías moderadas en general, sequías severas para Puerto Madryn, Chubut; condiciones humedad moderada en Bariloche-El Bolson, Río Negro y humedad excesiva en Río Gallegos, Santa Cruz.

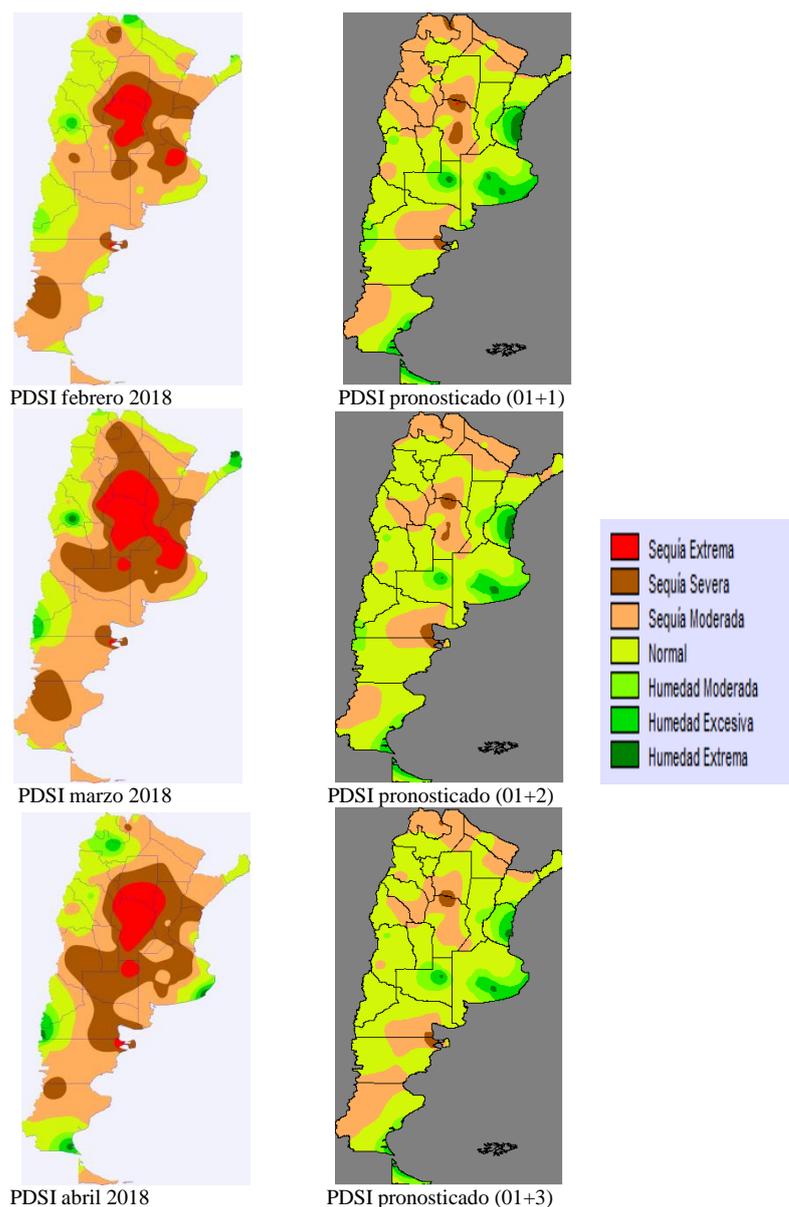


Figura A4.9. Mapas de PDSI observados vs. pronosticados para febrero, marzo y abril a partir de PDSI de enero 2018.

Pronóstico PDSI para marzo, abril y mayo 2018

El PDSI indicaría sequías moderadas para la región central, extendiéndose hacia el N abarcando a las provincias del NOA y zona de Cuyo, con sequías extremas y severas en Villa María del Río Seco, al Norte y centro de la provincia de Córdoba. En la región del NEA se mantiene las condiciones de humedad normales, con humedad excesiva en Santa Rosa, La Pampa y en áreas del sudeste de Buenos Aires; en Patagonia N sequias moderadas en general con severas para Puerto Madryn, Chubut, hacia el S humedad moderada.

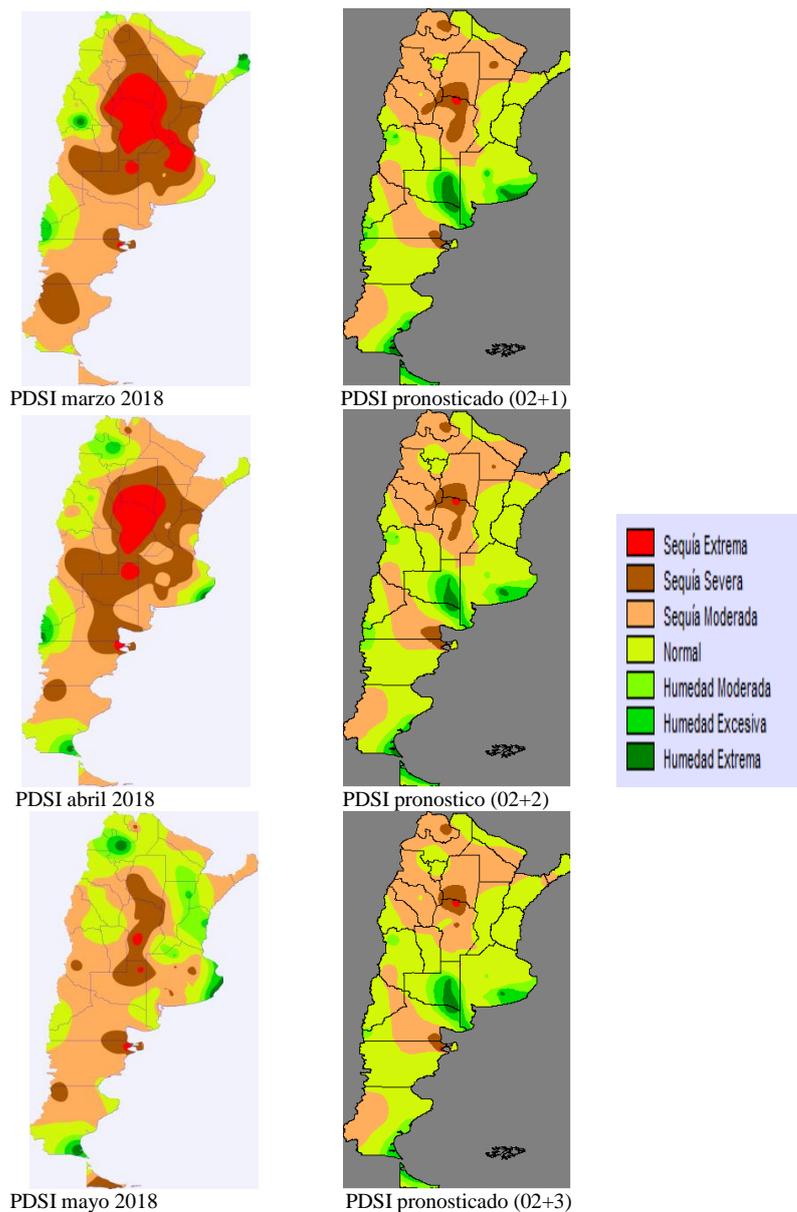


Figura A4.10. Mapas de PDSI observados vs. pronosticados para marzo, abril y mayo a partir de PDSI de febrero 2018.

Pronóstico PDSI para abril, mayo y junio 2018

El pronóstico indicaría sequías moderadas y severas para la región central, extendiéndose hacia el N abarcando a las provincias del NOA y NEA, Noroeste y Norte de Buenos Aires; norte y suroeste de Patagonia. Sequías extremas en Villa María del Río Seco, y severas desde el suroeste hasta el norte de la provincia de Córdoba y sur de Santiago del Estero y Puerto Madryn, Chubut. Para Santa Fe, Entre Ríos, San Luis y zona cuyana, centro y sur de Buenos Aires, Neuquén y gran parte de Chubut se mantiene las condiciones de humedad normales.

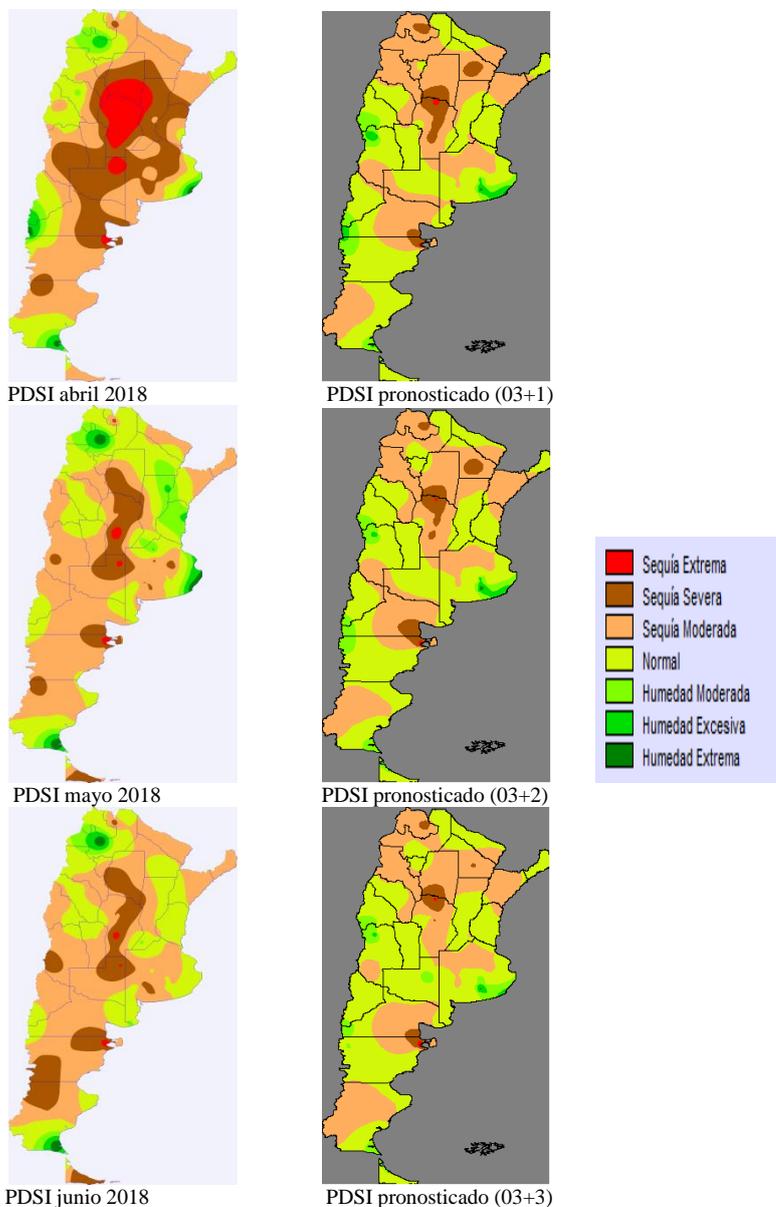


Figura A4.11. Mapas de PDSI observados vs. pronosticados para abril, mayo y junio a partir de PDSI de marzo 2018.

Pronóstico PDSI para mayo, junio y julio 2018 cuerpo de tesis, (Fig. 3.42, Pág. 81)

Pronóstico PDSI para junio, julio y agosto 2018

El pronóstico del PDSI junio en la región central indicaría un predominio de sequías severas en centro norte de Buenos Aires, noroeste de Santa Fe, Córdoba, sur de Santiago del Estero y extrema al norte de Córdoba; sequías moderadas en NEA , RP y RPA. Las provincias de las zona cuyo, sureste de Bueno Aires, provincial de Neuquén, oeste de Río Negro, se mantiene con condiciones humedad normales.

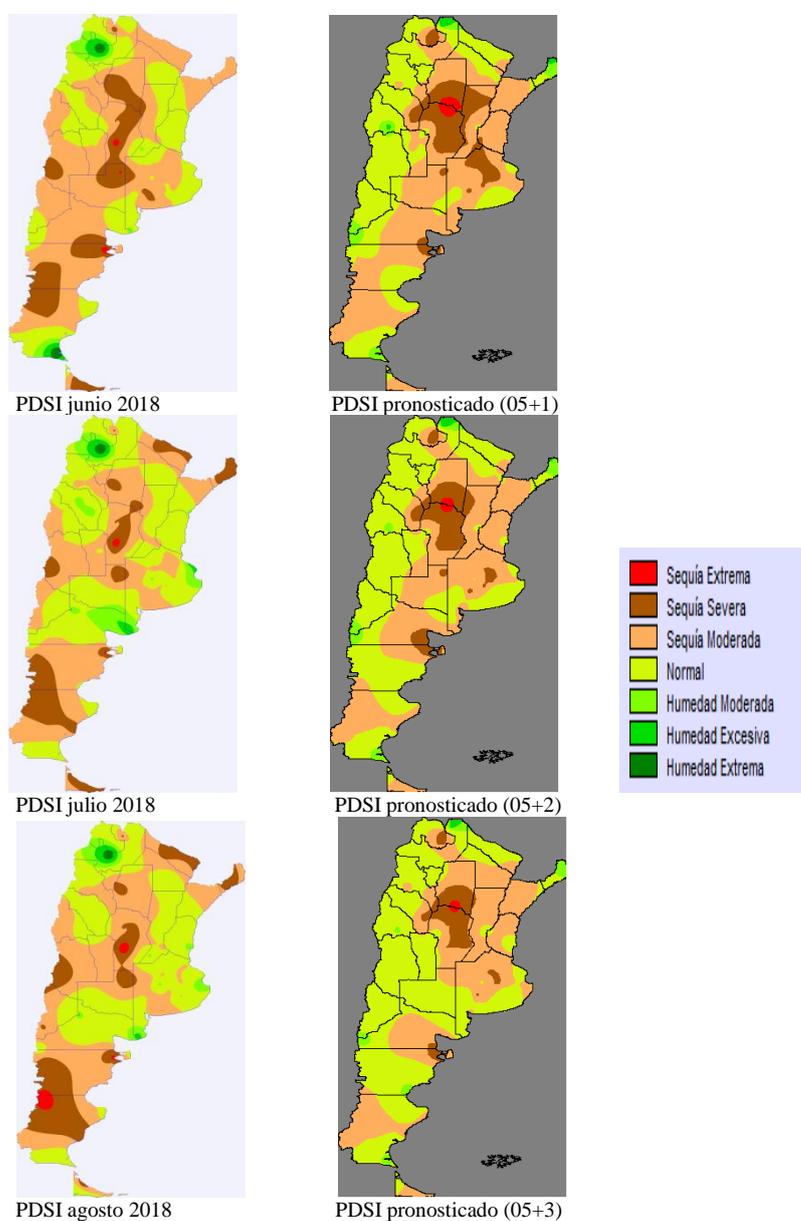


Figura A4.12. Mapas de PDSI observados vs. pronosticados para junio, julio y agosto a partir de PDSI de mayo 2018.

Pronóstico PDSI para julio, agosto y setiembre 2018

El pronóstico del PDSI Julio en la región central indicaría un predominio de sequías severas en toda la provincia con extrema al norte de Córdoba; el resto condiciones moderadas y normales. Las provincias del NOA y NEA, zona cuyana, sureste de Bueno Aires, provincial de Neuquén, oeste de Río Negro, se mantiene con condiciones humedad normales y moderadas.

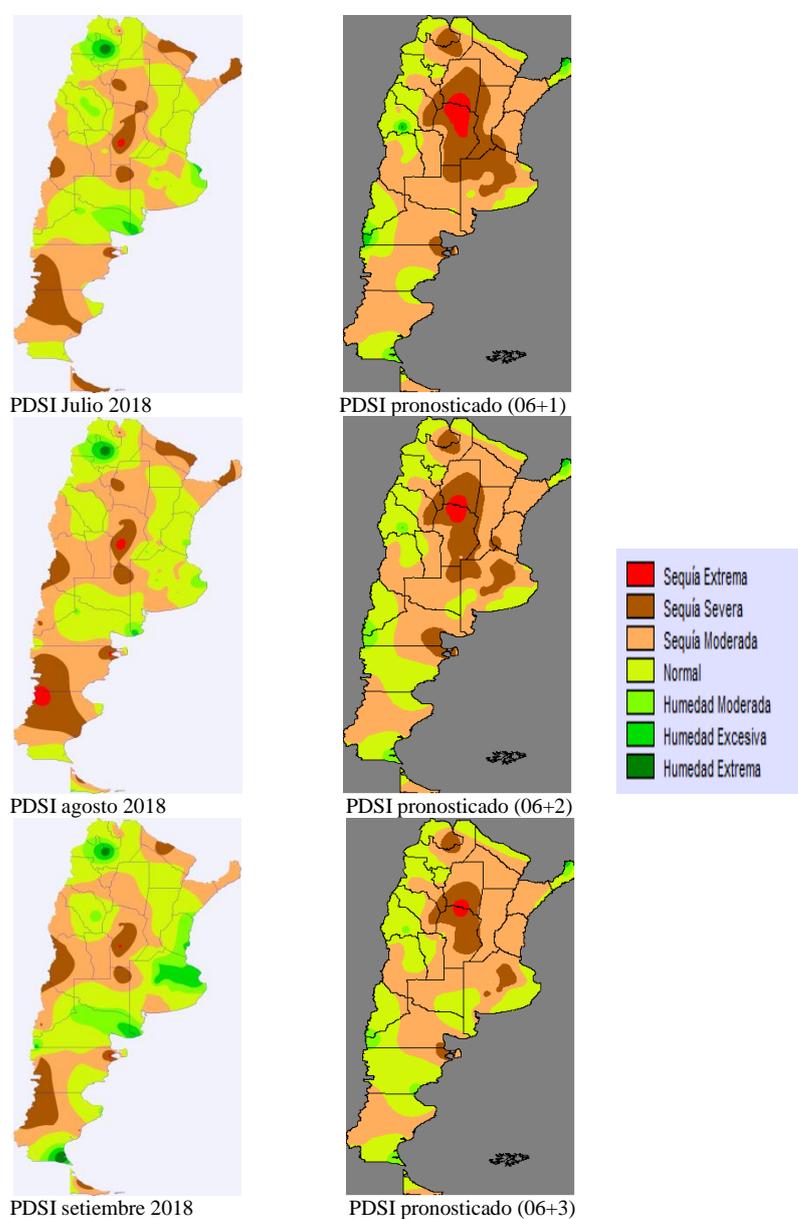


Figura A4.13. Mapas de PDSI observados vs. pronosticados para julio, agosto y setiembre a partir de PDSI de junio 2018.

Pronóstico PDSI para agosto, setiembre y octubre 2018

El pronóstico del PDSI para agosto en la región central indicó sequías severas en las provincias de Córdoba, noreste de La Pampa, Santiago del Estero y noroeste de Santa Fe el resto condiciones moderadas y normales. Las provincias del NOA humedad moderada y NEA normal, parte norte de zona cuyana, sureste de Bueno Aires, provincial de Neuquén, oeste de Río Negro, se mantiene con condiciones humedad moderadas.

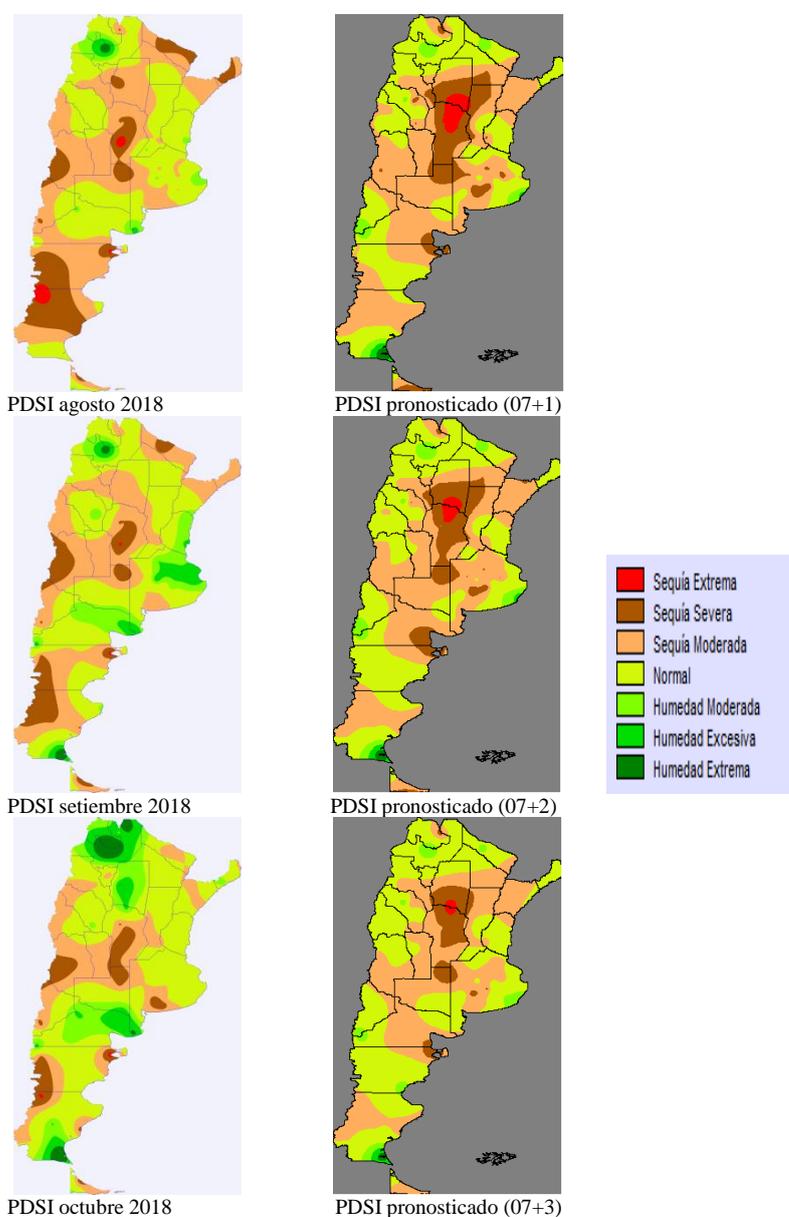


Figura A4.14. Mapas de PDSI observados vs. pronosticados para agosto, setiembre y octubre a partir de PDSI de julio 2018.

Pronóstico PDSI para setiembre, octubre y noviembre 2018

El PDSI pronosticado para los meses de primavera indicó región central provincias de Córdoba sequías severas en disminución; Santa Fe y Entre Ríos normal y humedad moderada; NEA condiciones de humedad moderadas y normal. Las provincias del NOA humedad normal y moderada en Salta; zona cuyana, sureste de Bueno Aires, provincia de Neuquén, sur de La Pampa y oeste de Río Negro, se mantiene con condiciones humedad moderadas.

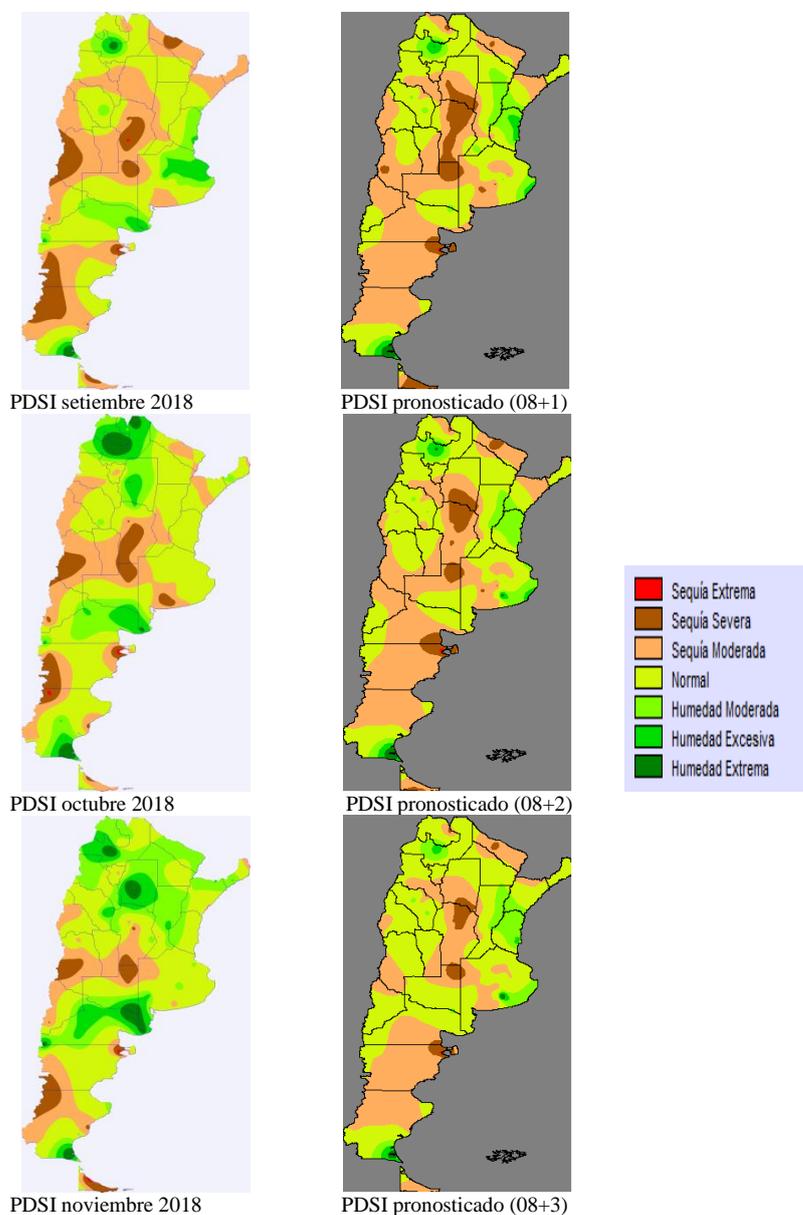
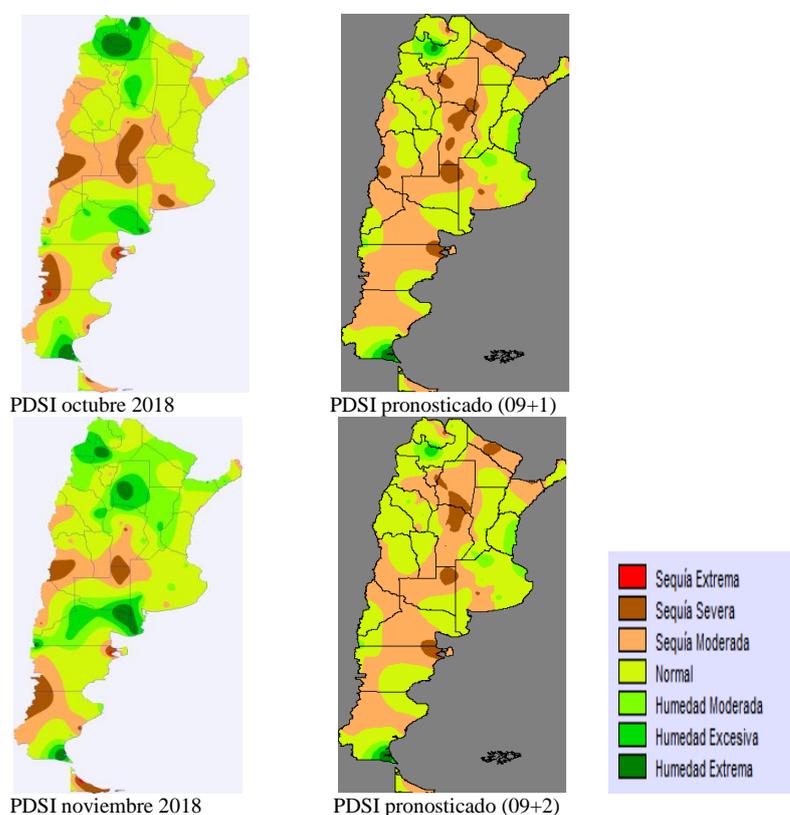


Figura A4.15. Mapas de PDSI observados vs. pronosticados para setiembre, octubre y noviembre a partir de PDSI de agosto 2018.

Pronóstico PDSI para octubre, noviembre y diciembre 2018

El PDSI pronosticado para los meses de octubre indica región central provincias de Córdoba sequías moderadas y con algunos focos de severas disminuyendo las mismas hacia diciembre; Santa Fe y Entre Ríos normal y humedad moderada; NEA condiciones de humedad moderadas y normal. Las provincias del NOA humedad normal y moderada en Salta; zona cuyana, Bueno Aires, provincia de Neuquén, sur de La Pampa y oeste de Río Negro, Chubut se mantiene con condiciones humedad normal.



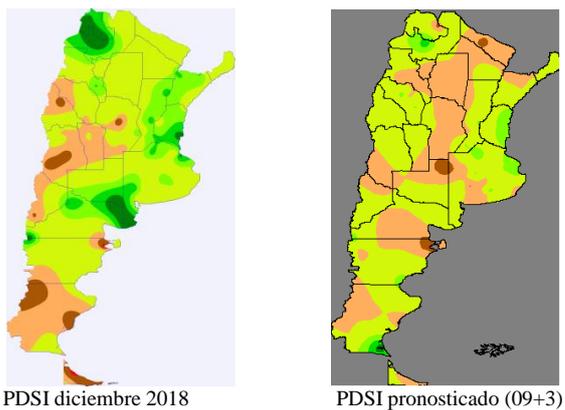
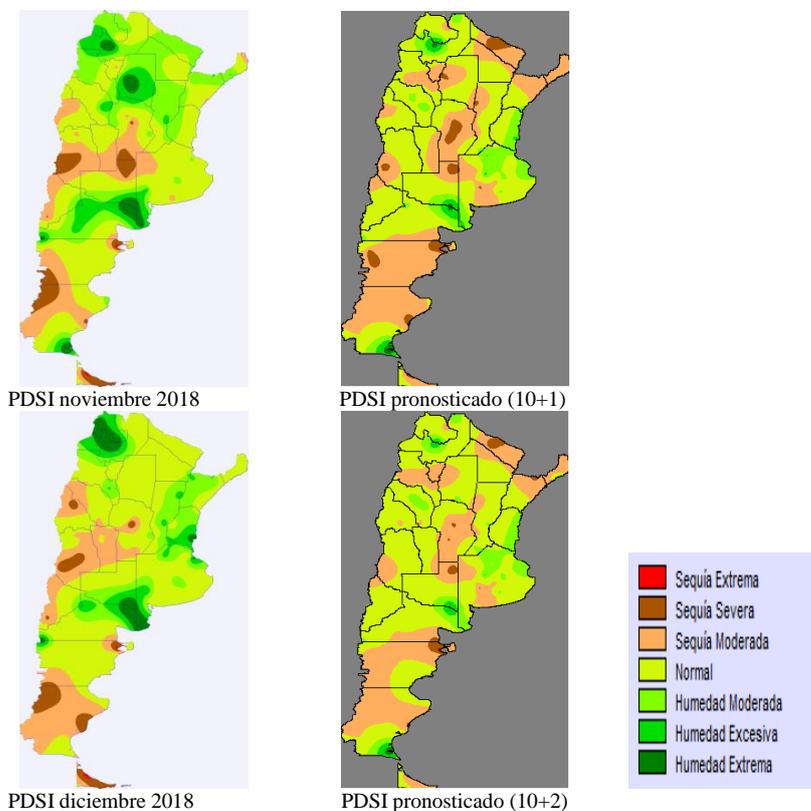


Figura A4.16. Mapas de PDSI observados vs. pronosticados para octubre, noviembre y diciembre a partir de PDSI de setiembre 2018.

Pronóstico PDSI para noviembre y diciembre 2018 y enero 2019

El pronóstico del PDSI indicó; en la region central condición normal en general, con areas de la provincia de Córdoba recuperandose de sequías moderadas y severas de los meses anteriores debido la gran precipitación ocurrida durante la primer quincena de noviembre; Cuyo, NEA, NOA y norte de Patagonia se mantiene con condiciones humedad normal y moderada.



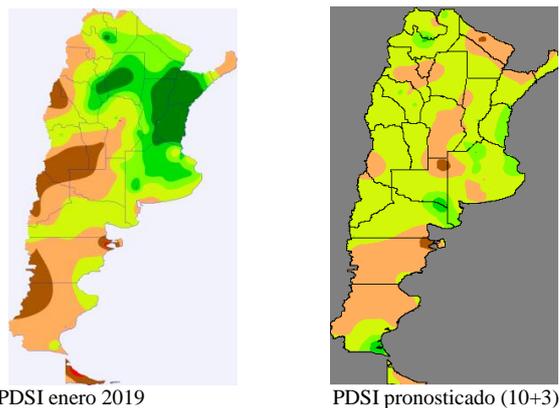
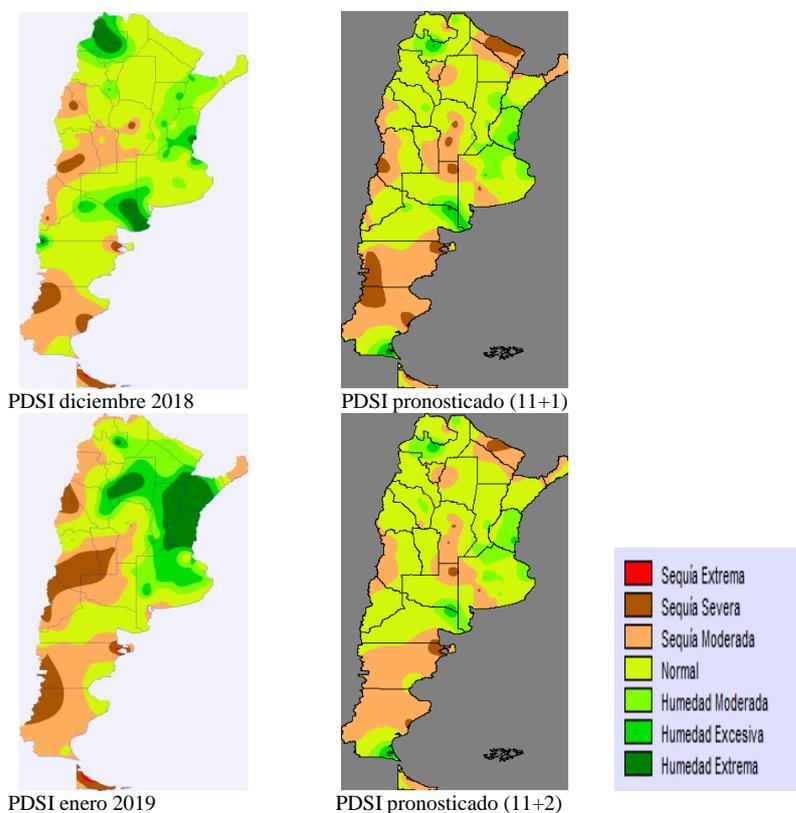


Figura A4.17. Mapas de PDSI observados vs. pronosticados para noviembre, diciembre y enero a partir de PDSI de octubre 2018.

Pronóstico PDSI para diciembre 2018 y enero y febrero 2019

El pronóstico del PDSI para los meses de verano, diciembre, enero, febrero indicaría; condiciones humedad normales en general para la mayoría de las regiones; Pampeana, Cuyo, NEA, NOA y norte de Patagonia, con precipitaciones mayores a la media normal.



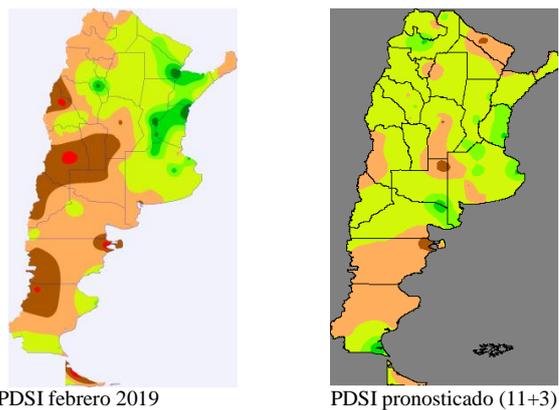
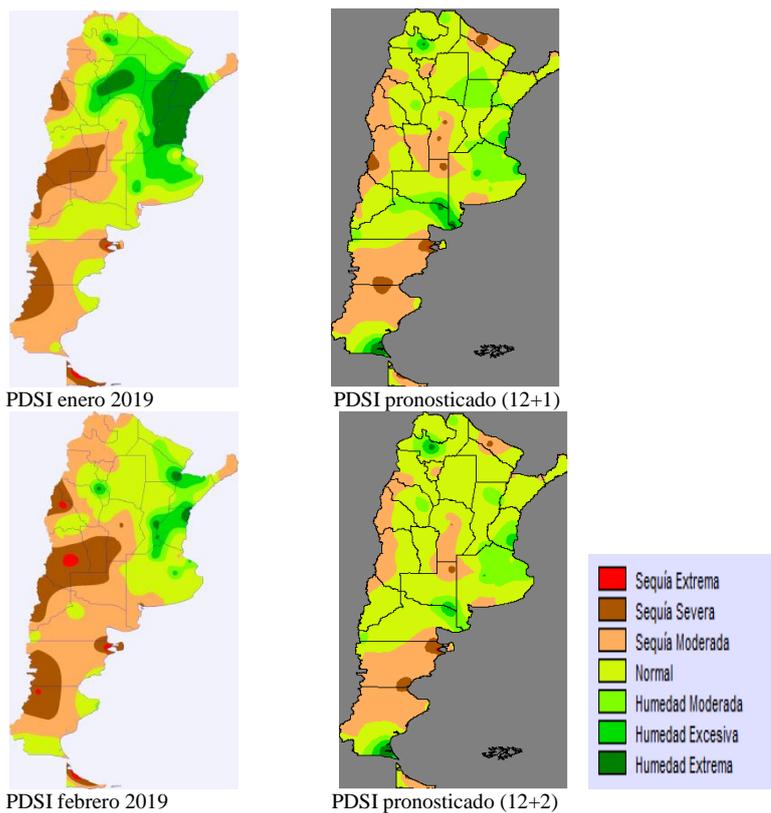


Figura A4.18. Mapas de PDSI observados vs. pronosticados para diciembre, enero y febrero a partir de PDSI de noviembre 2018.

Pronóstico PDSI para enero, febrero y marzo 2019



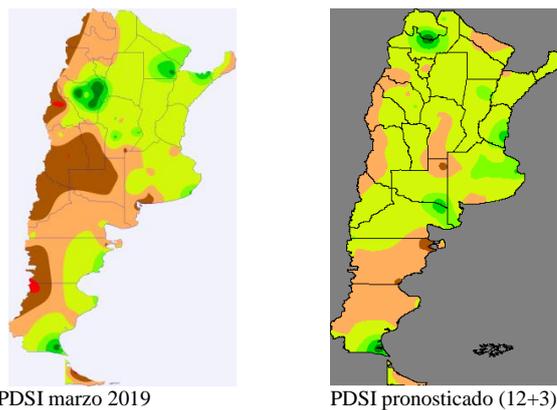
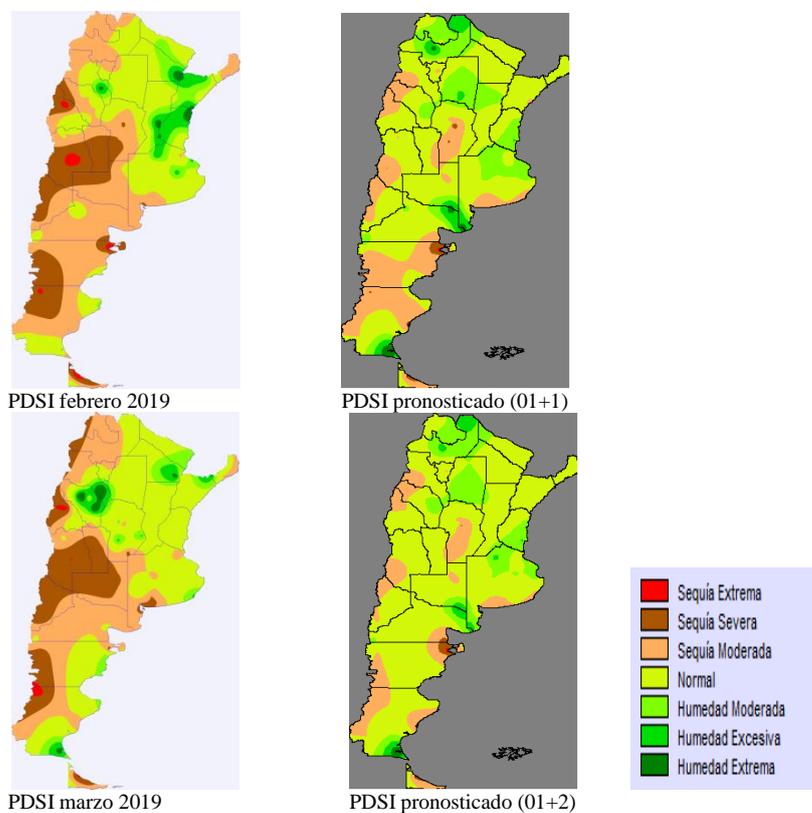
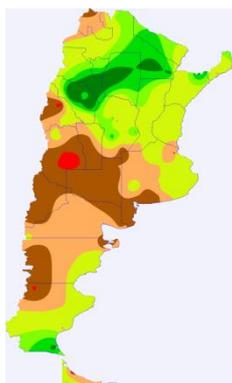


Figura A4.19. Mapas de PDSI observados vs. pronosticados para enero, febrero y marzo a partir de PDSI de diciembre 2018.

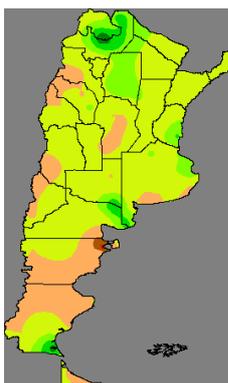
Pronóstico PDSI para febrero, marzo y abril 2019

El pronóstico indica condiciones humedad normal en general para gran parte del país; humedad moderada a excesiva en las provincias de Entre Ríos, Corrientes (NEA) con precipitaciones mayores a la media normal; parte N de Buenos Aires, Santa Fe y Este de La Pampa (RP); Santiago del Estero y NE de la Rioja, Jujuy y Salta de la región NOA.





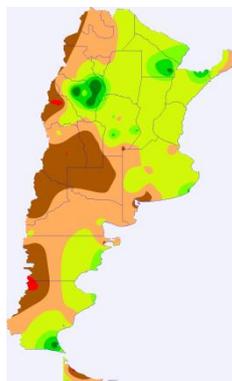
PDSI abril 2019



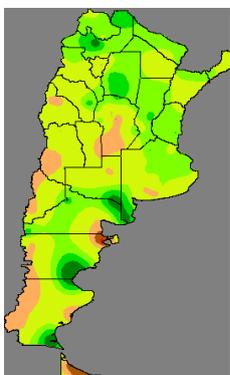
PDSI pronosticado (01+3)

Figura A4.20. Mapas de PDSI observados vs. pronosticados para febrero, marzo y abril a partir de PDSI de enero 2019.

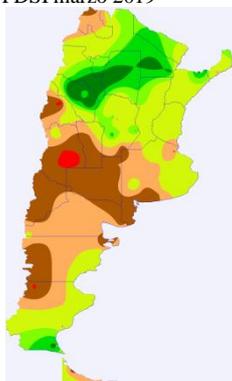
Pronóstico PDSI para marzo, abril y mayo 2019



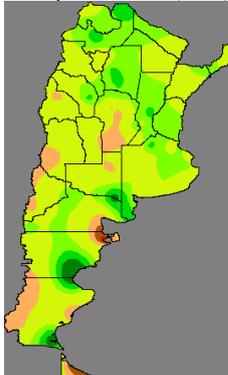
PDSI marzo 2019



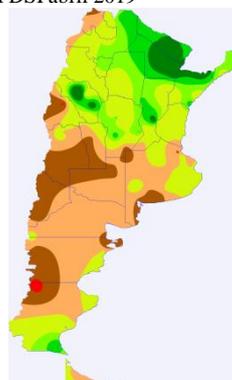
PDSI pronosticado (02+1)



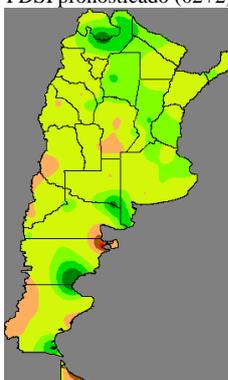
PDSI abril 2019



PDSI pronosticado (02+2)



PDSI mayo 2019



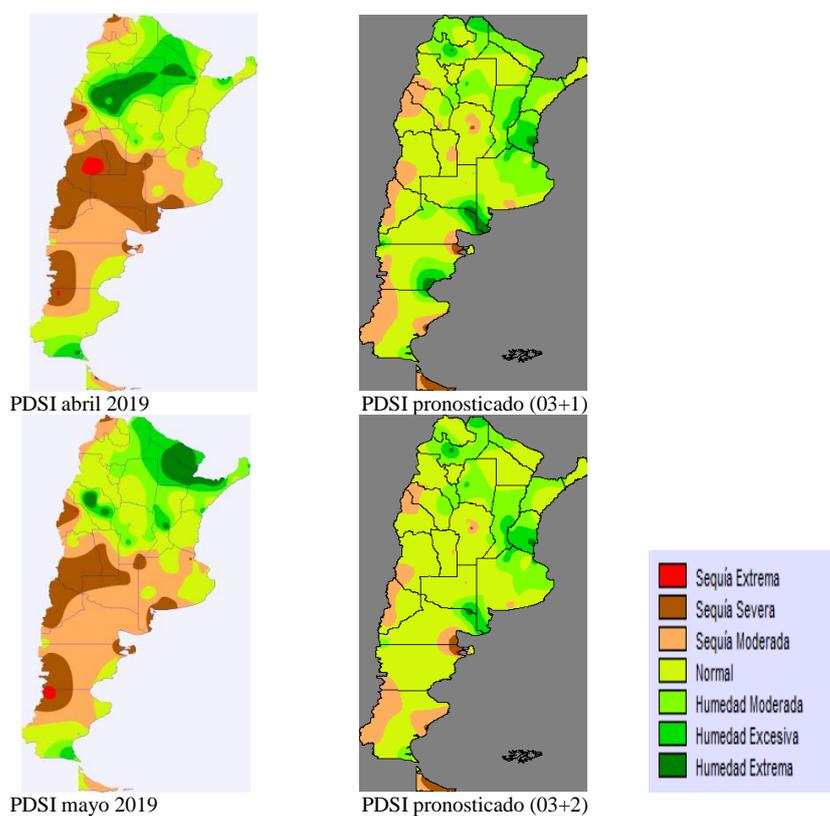
PDSI pronosticado (02+3)



Figura A4.21. Mapas de PDSI observados vs. pronosticados para marzo, abril y mayo a partir de PDSI de febrero de 2019.

El pronóstico del PDSI para los meses de, marzo-abril a junio indicaría; condiciones humedad normal en general para gran parte del país; humedad moderada a excesiva en las provincias de Entre Ríos y Corrientes (NEA) con precipitaciones por encima de la media normal; parte norte de Buenos Aires, Santa Fe y sureste de La Pampa (RP); Santiago del Estero y noreste de la Rioja, sureste de Catamarca, sur de Jujuy y Salta en la región NOA. Solo se observa sequías en Puerto Madryn, Chubut

Pronóstico PDSI para abril, mayo y junio 2019



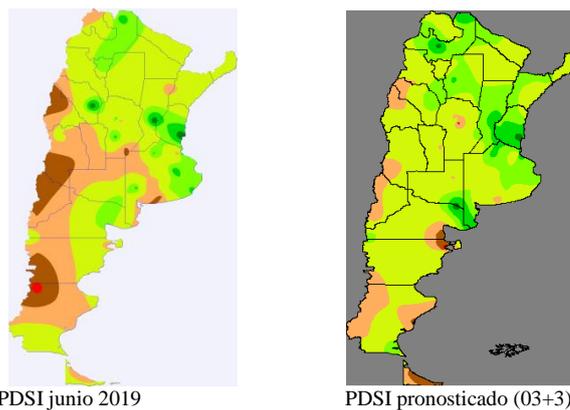
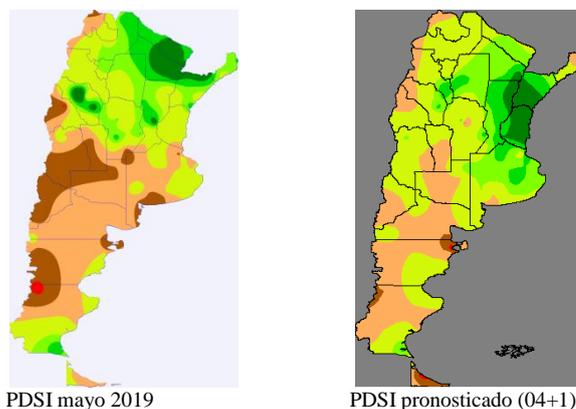


Figura A4.22. Mapas de PDSI observados vs. pronosticados para abril, mayo y junio a partir de PDSI de marzo 2019.

Pronóstico PDSI para mayo, junio y julio 2019

El pronóstico trimestral del PDSI, período mayo-julio: predominan condiciones de humedad excesiva y extrema en las regiones NEA y NOA del país abarcando a las provincias de, centro norte de Santa Fe, Entre Ríos y Corrientes; Santiago del Estero, sureste de Catamarca, noreste de La Rioja, Salta y Jujuy, oeste de Chaco y centro norte de Buenos Aires; Normal para la región pampeana central y Cuyo con sequías moderadas en la región Patagónica.



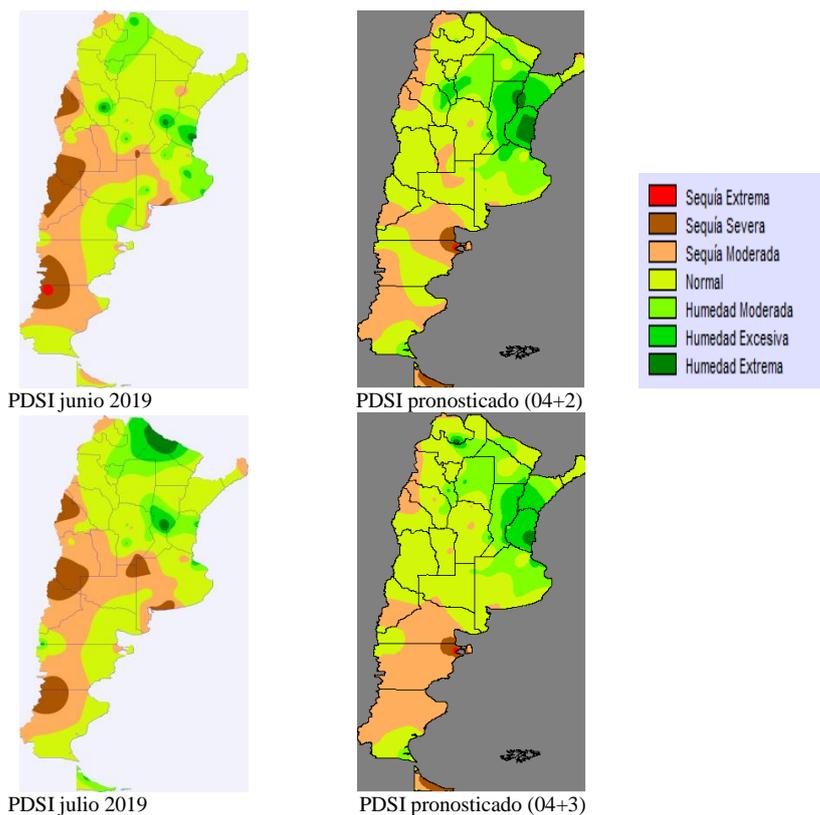
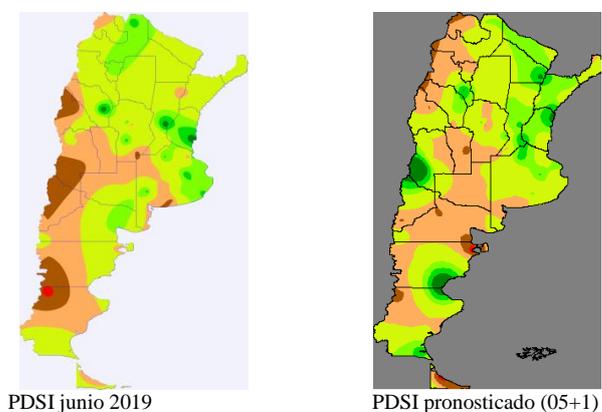


Figura A4.23. Mapas de PDSI observados vs. pronosticados para mayo, junio y julio a partir de PDSI de abril 2019.

Pronóstico PDSI para junio, julio y agosto 2019

El pronóstico trimestral del PDSI, período junio-agosto: predominan condiciones de humedad excesiva y normales en las regiones NEA, NOA, Pampeana, Cuyo y este de la Patagonia; con sequías moderadas en la región Patagónica norte y oeste.



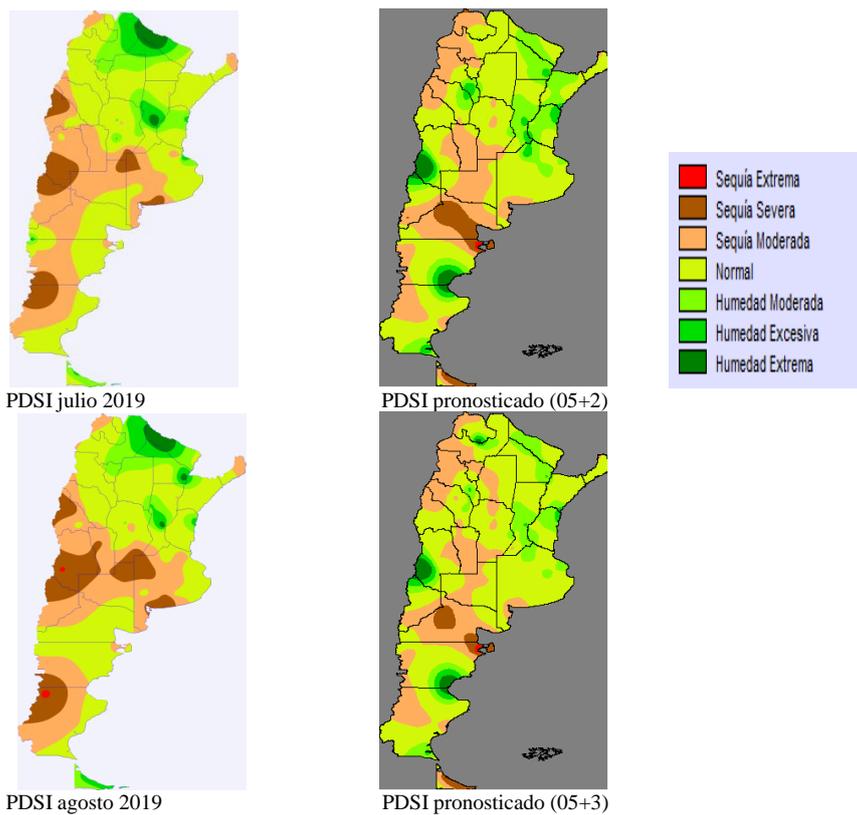
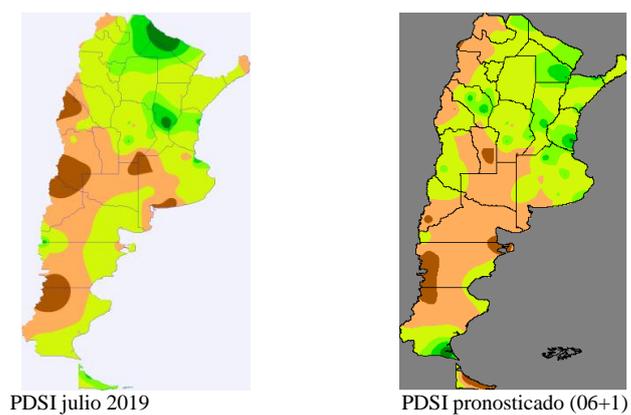


Figura A4.24. Mapas de PDSI observados vs. pronosticados para junio, julio y agosto a partir de PDSI de mayo 2019.

Pronóstico PDSI para julio, agosto y setiembre 2019



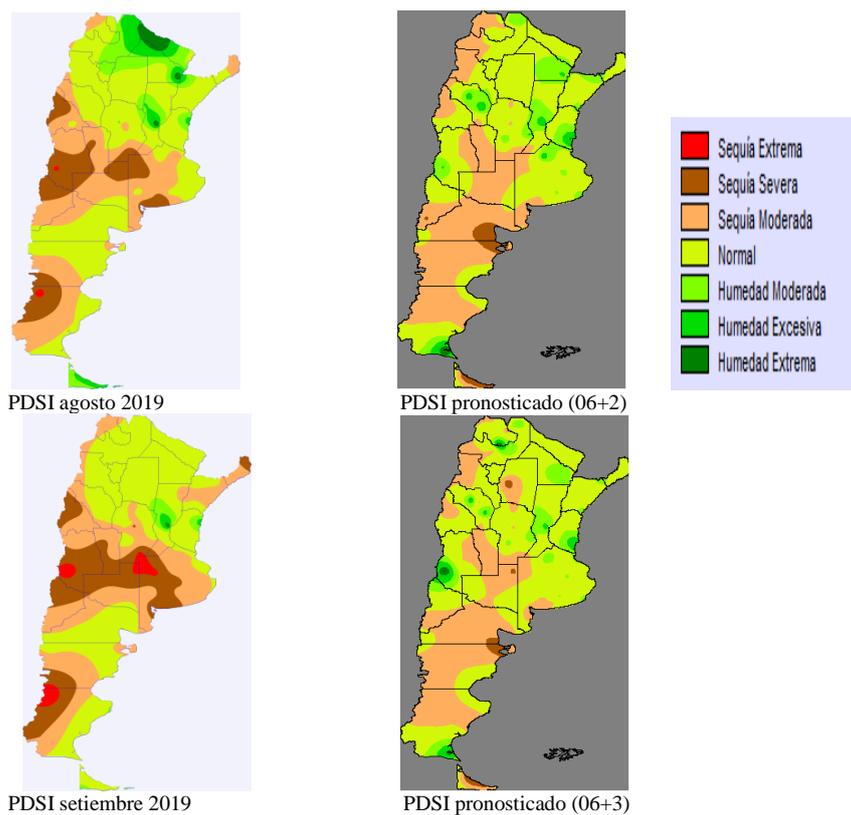
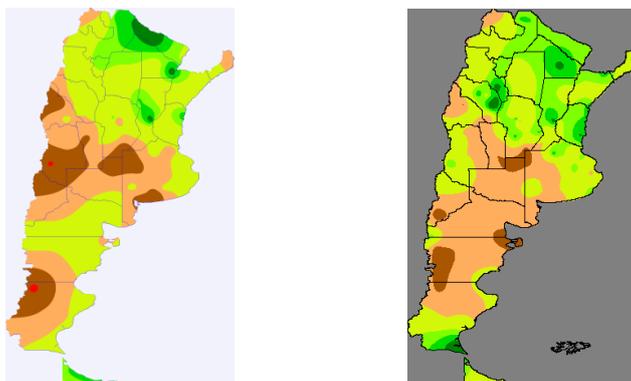


Figura A4.25. Mapas de PDSI observados vs. pronosticados para julio, agosto y setiembre a partir de PDSI de junio 2019.

Pronóstico PDSI para agosto, setiembre y octubre 2019

El pronóstico trimestral del PDSI, período agosto-octubre: predominan condiciones de humedad moderada a excesiva en parte de las regiones NEA, NOA, Pampeana hacia el noreste de Córdoba, centro-norte de Santa Fe y este de Entre Ríos; norte de La Pampa sequía severa con tendencia a moderada-normal; Cuyo, normal; en la región Patagónica norte y oeste sequías moderadas.



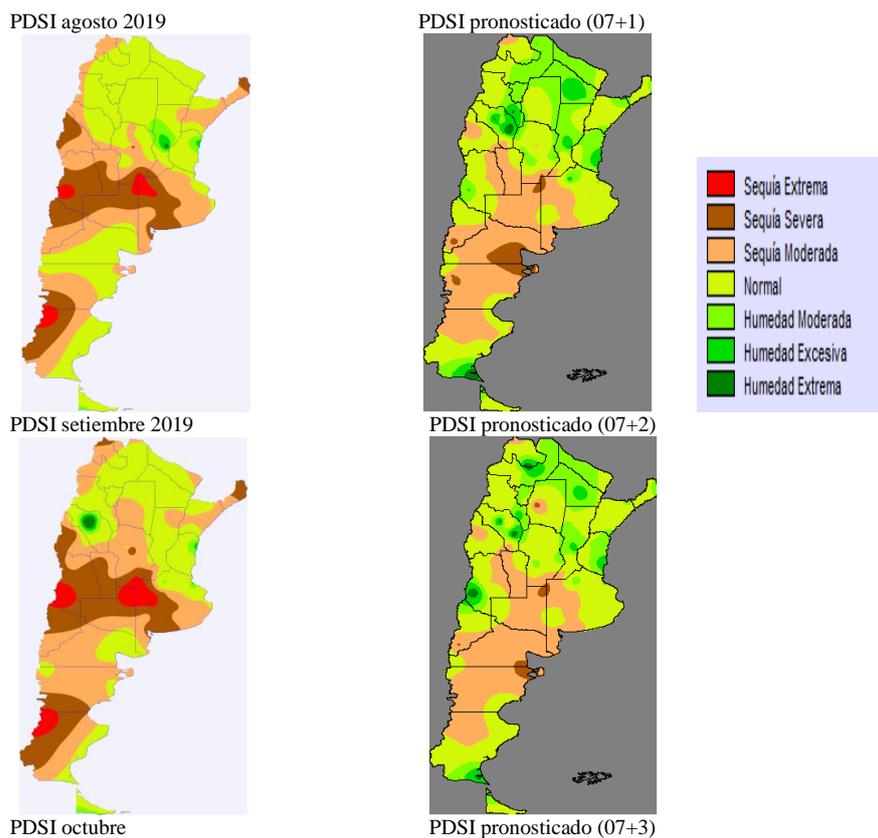


Figura A4.26. Mapas de PDSI observados vs. pronosticados para agosto, setiembre y octubre a partir de PDSI de julio 2019.

Pronóstico PDSI para setiembre, octubre y noviembre 2019

El pronóstico del PDSI para el trimestre setiembre-noviembre: se pronostican condiciones de humedad normales desde Río Colorado hacia el norte del país. En la región del NEA se presentan condiciones de humedad moderada y excesivas en Chaco, Formosa y oeste de Salta; este de La Rioja, centro de Santa Fe y este de Entre Ríos. Se pronosticas condiciones de sequías moderadas y severas en el noroeste y sudoeste de Buenos Aires, centro norte de La Pampa, San Luis y Patagonia: Puerto Madryn, Esquel.

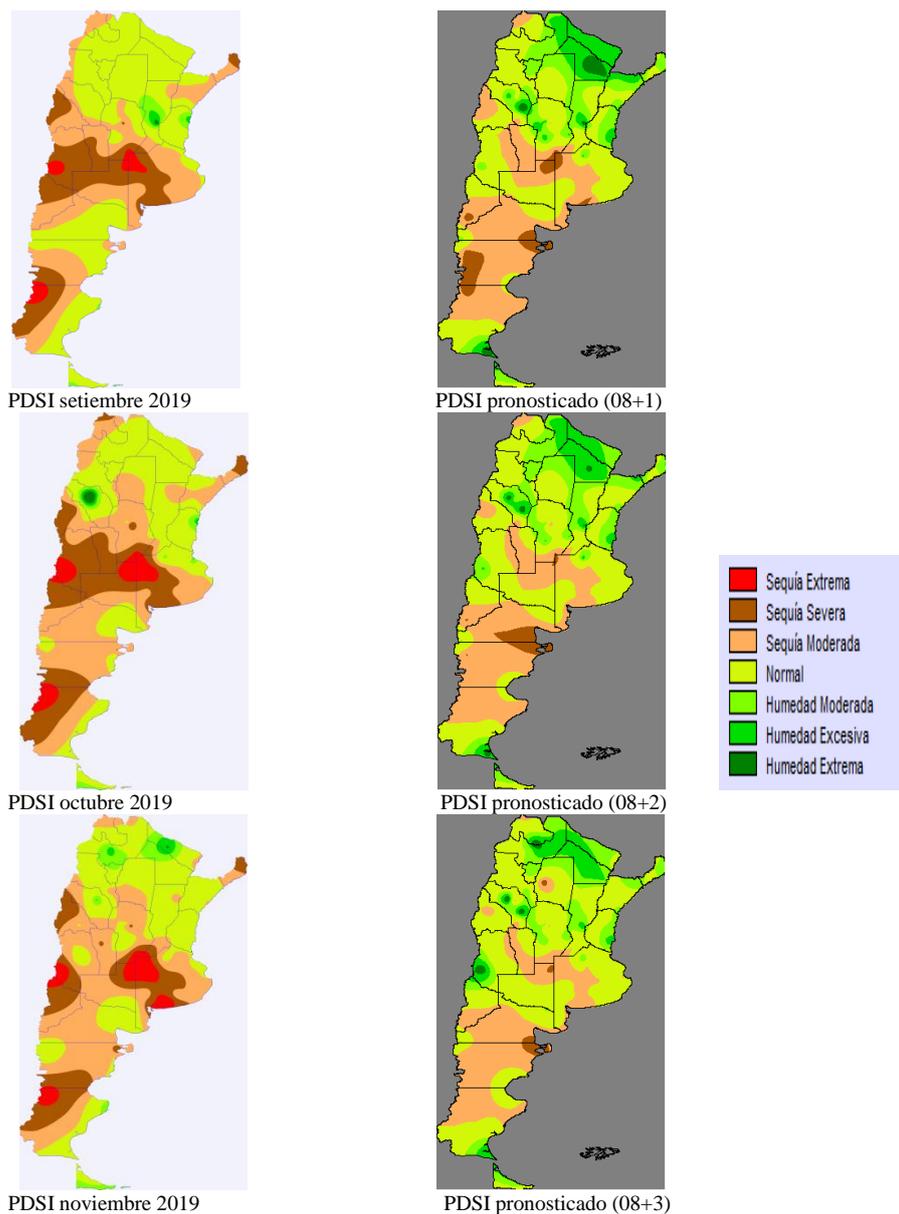


Figura A4.27. Mapas de PDSI observados vs. pronosticados para setiembre, octubre y noviembre a partir de PDSI de agosto 2019.

ANEXO 5

Pronósticos de SPI3

Se presentan mapas de SPI3 observados y pronosticados a 1(+1); 2(+2) y 3(+3) meses desde febrero 2017 a agosto 2019. |

Se realizó una comparación entre los mapas observados y pronosticados para la serie completa de mapas del SPI3 pronosticados obtenidos mensualmente sin comentario sobre las condiciones de humedad o sequedad ocurridas. La interrupción de la secuencia de figura se debe a que estas fueron incorporadas al cuerpo de tesis.

Pronóstico SPI3 para enero, febrero y marzo 2017 cuerpo de tesis, (Fig. 3.43, Pág. 83)

Pronóstico SPI3 para febrero, marzo y abril 2017

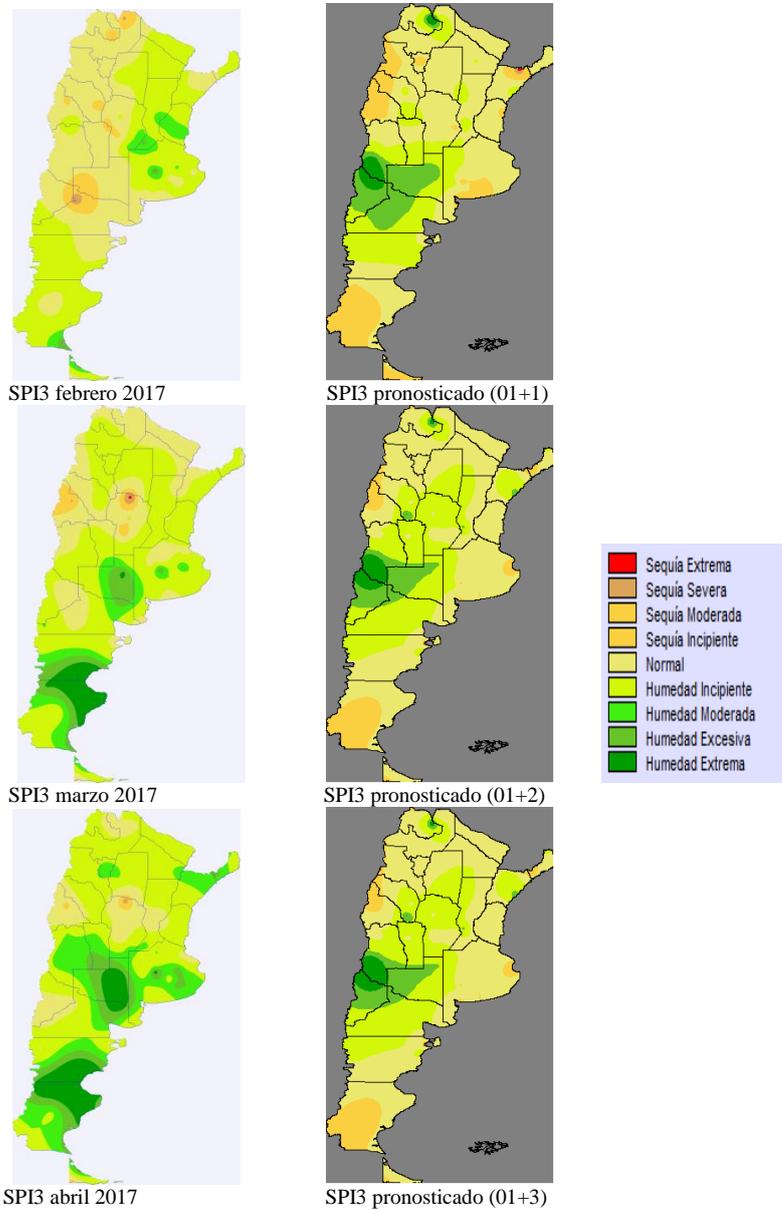


Figura A5.1. Mapas de SPI3 observados vs. pronosticados para febrero, marzo y abril a partir de SPI3 de enero 2017.

Pronóstico SPI3 para marzo, abril y mayo 2017

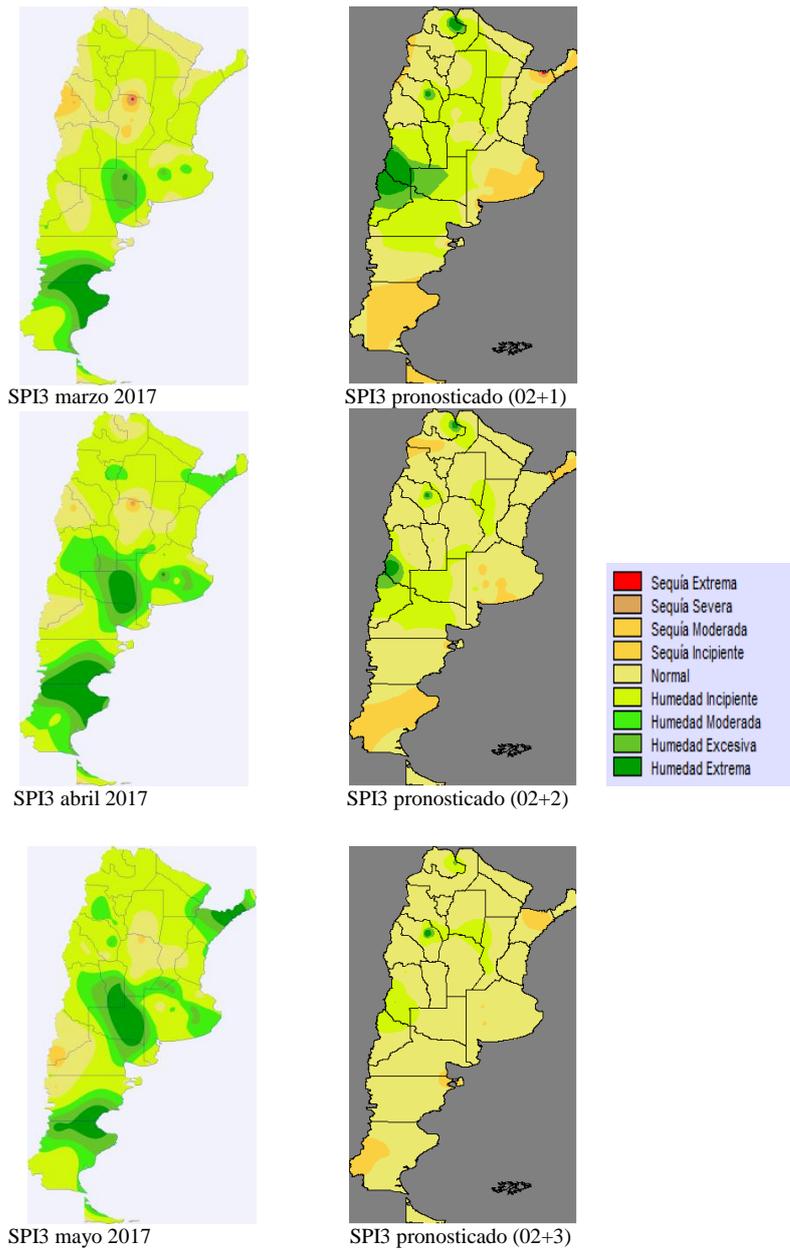


Figura A5.2. Mapas de SPI3 observados vs. pronosticados para marzo, abril y mayo a partir de SPI3 de febrero 2017.

Pronóstico SPI3 para abril, mayo y junio 2017

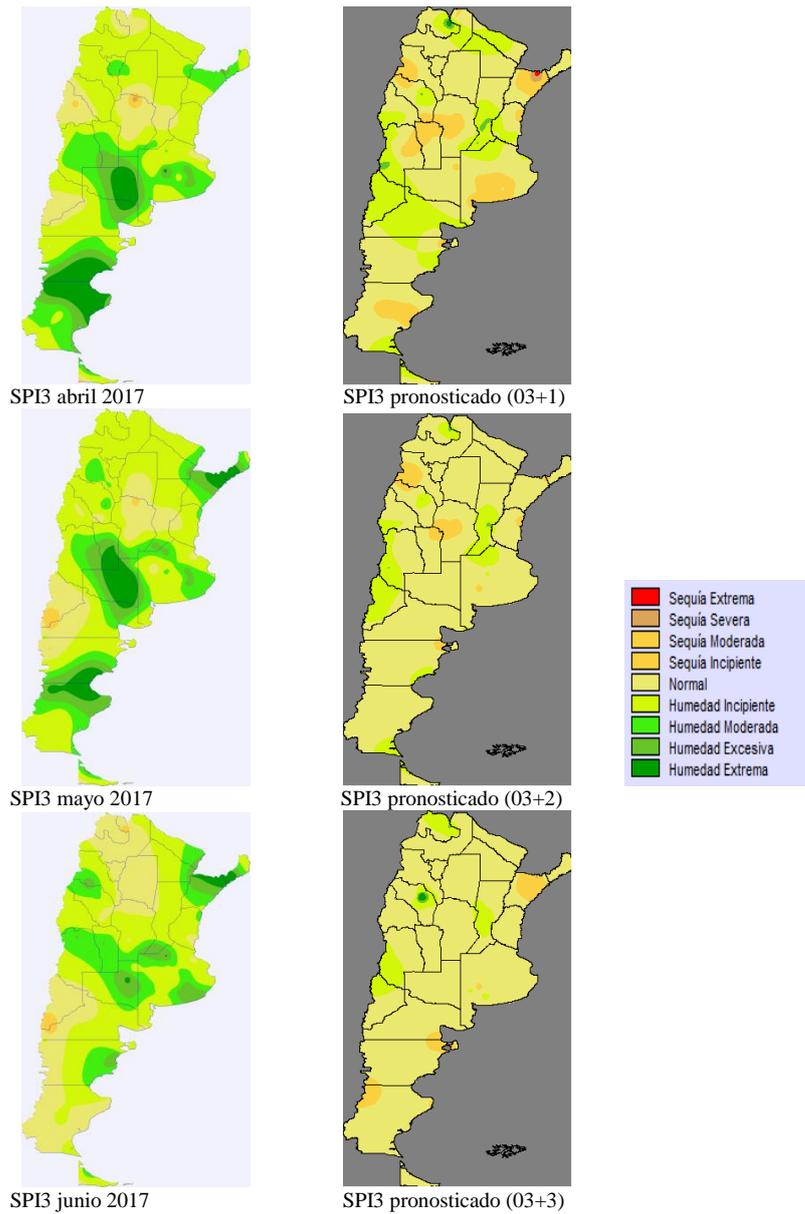


Figura A5.3. Mapas de SPI3 observados vs. pronosticados para abril, mayo y junio a partir de SPI3 de marzo 2017.

Pronóstico SPI3 para mayo, junio y julio 2017

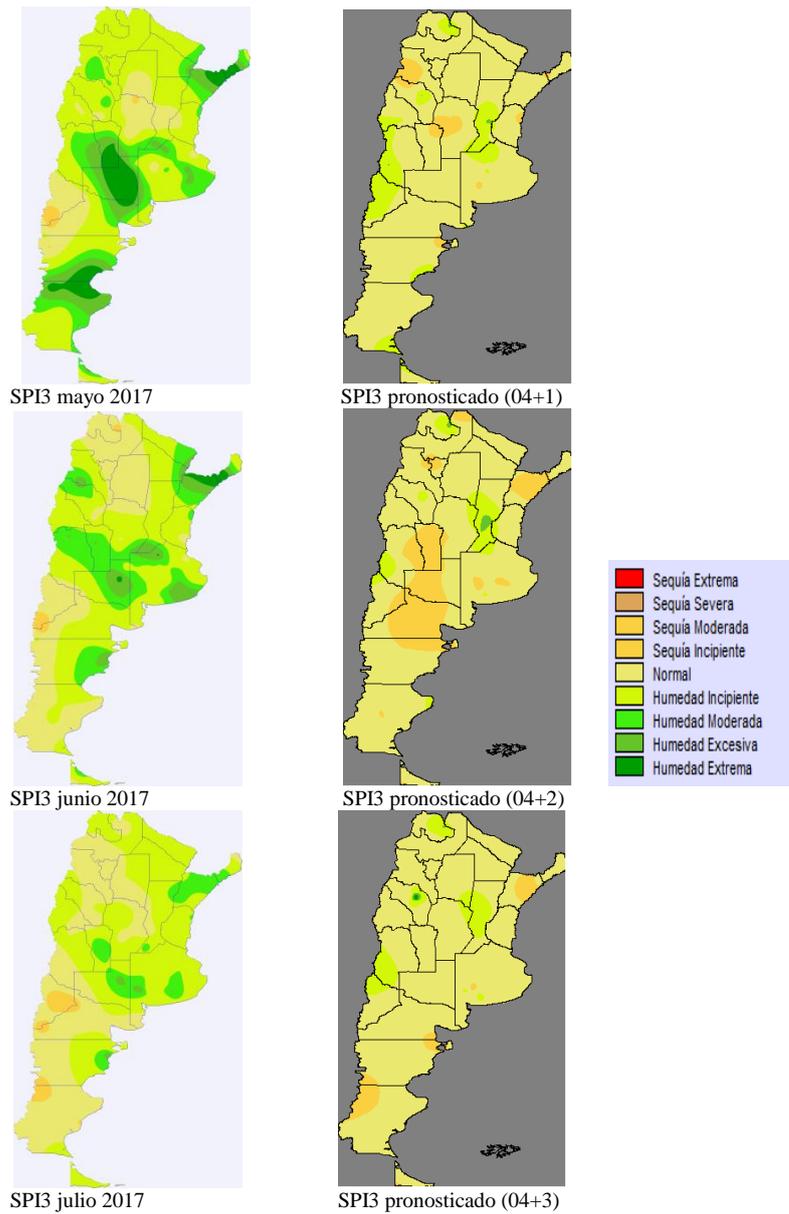


Figura A5.4. Mapas de SPI3 observados vs. pronosticados para mayo, junio y julio a partir de SPI3 de abril 2017.

Pronóstico SPI3 para junio, julio y agosto 2017

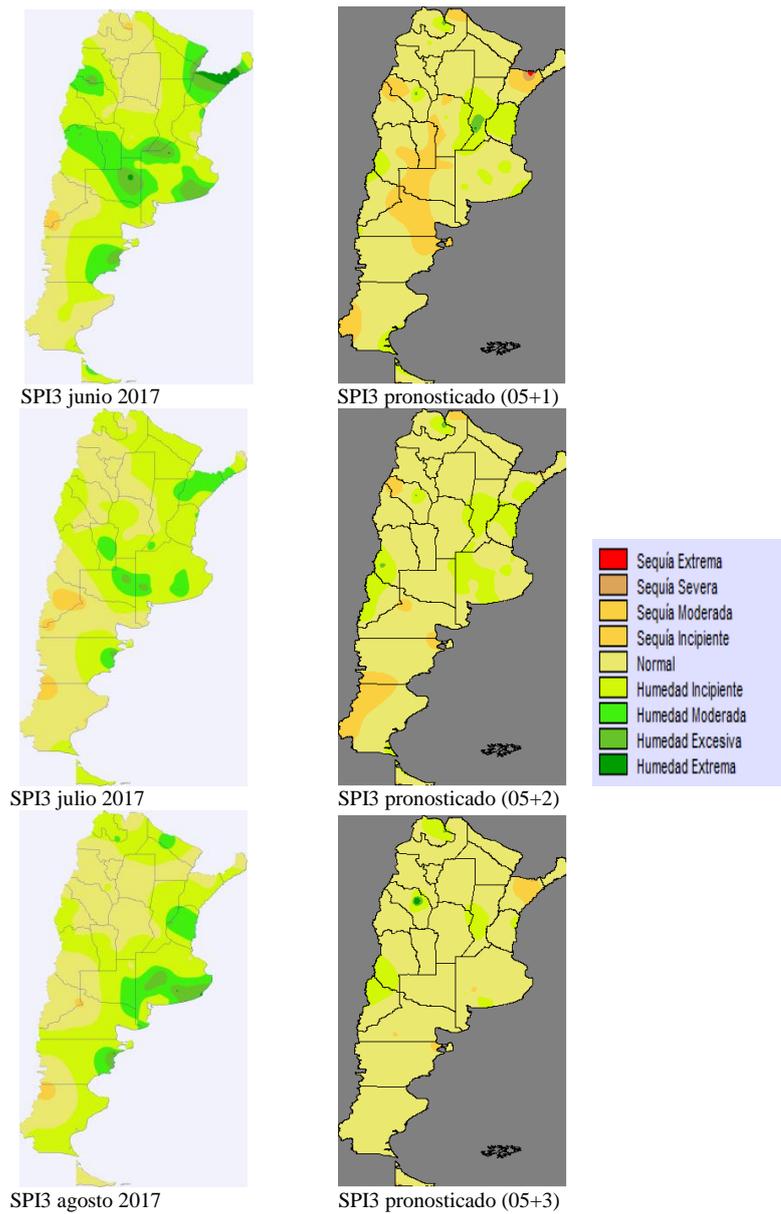


Figura A5.5. Mapas de SPI3 observados vs. pronosticados para junio, julio y agosto a partir de SPI3 de mayo 2017.

Pronóstico SPI3 para julio, agosto y setiembre 2017

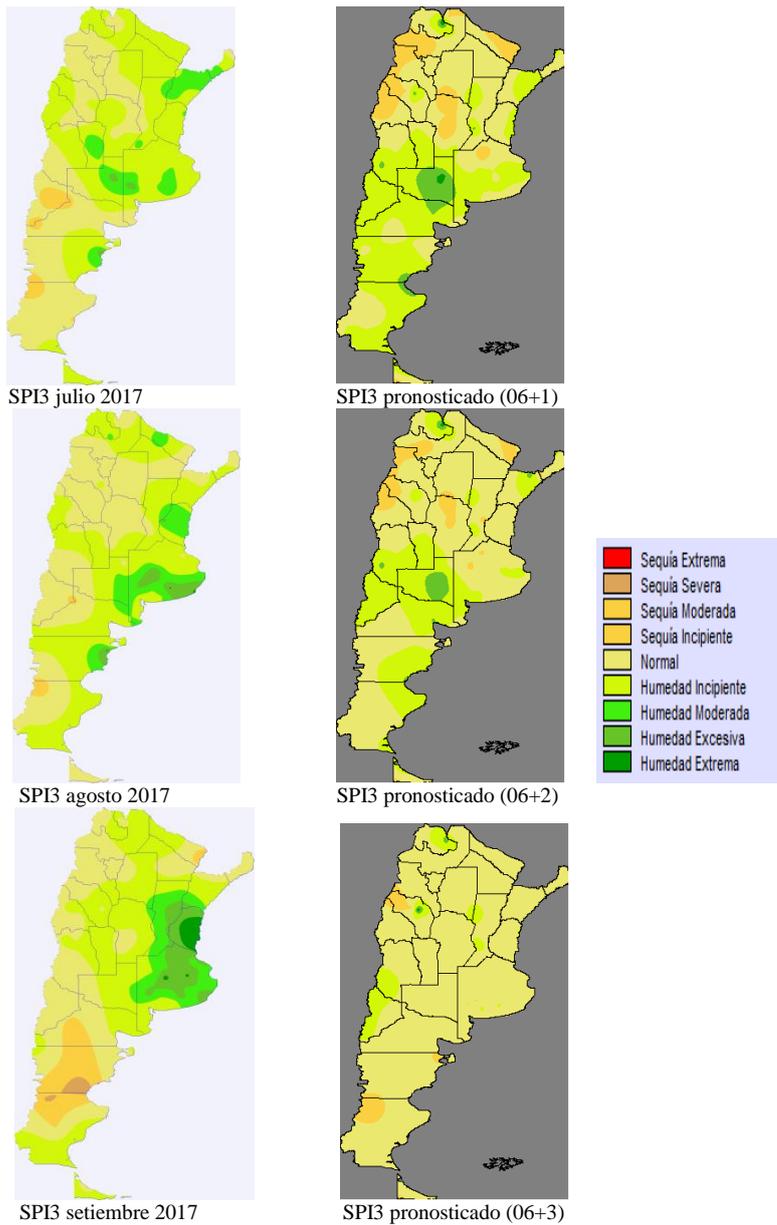


Figura A5.6. Mapas de SPI3 observados vs. pronosticados para julio, agosto y setiembre a partir de SPI3 de junio 2017.

Pronóstico SPI3 para agosto, setiembre y octubre 2017

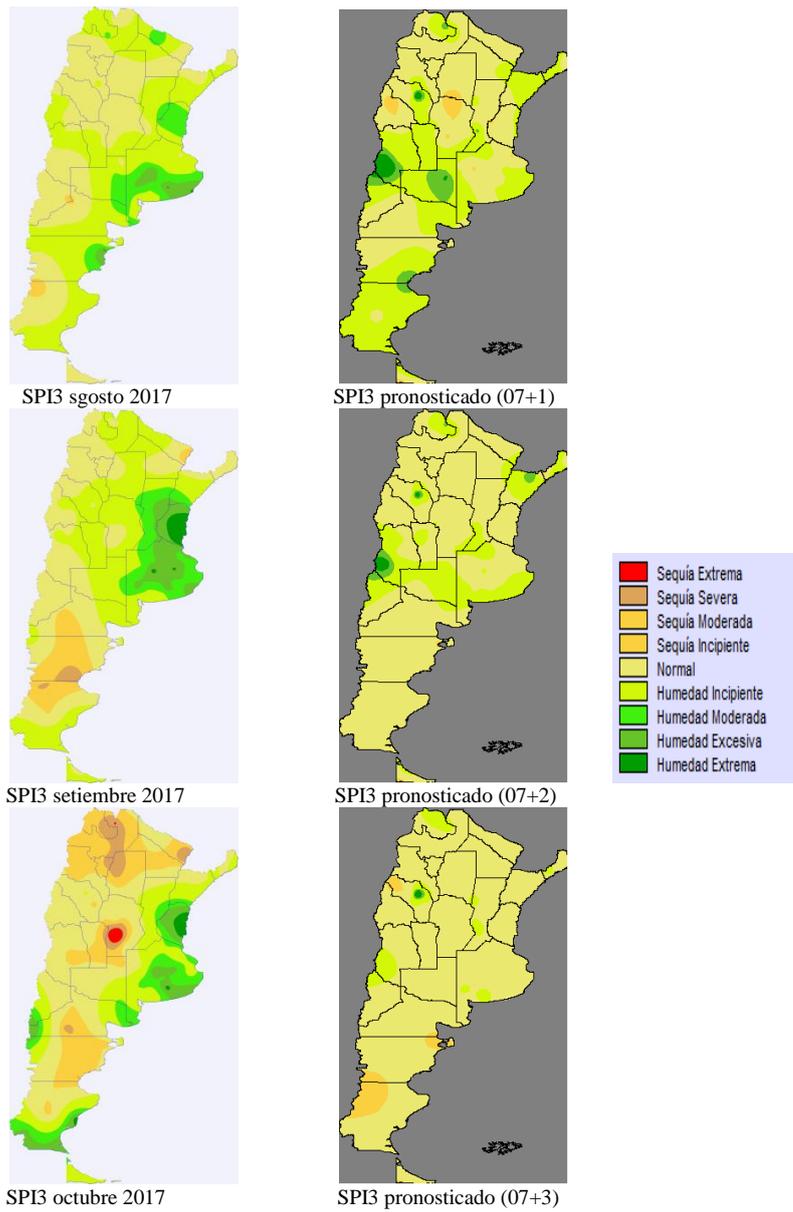


Figura A5.7. Mapas de SPI3 observados vs. pronosticados para agosto, setiembre y octubre a partir de SPI3 de julio 2017.

Pronóstico SPI3 para setiembre, octubre y noviembre 2017

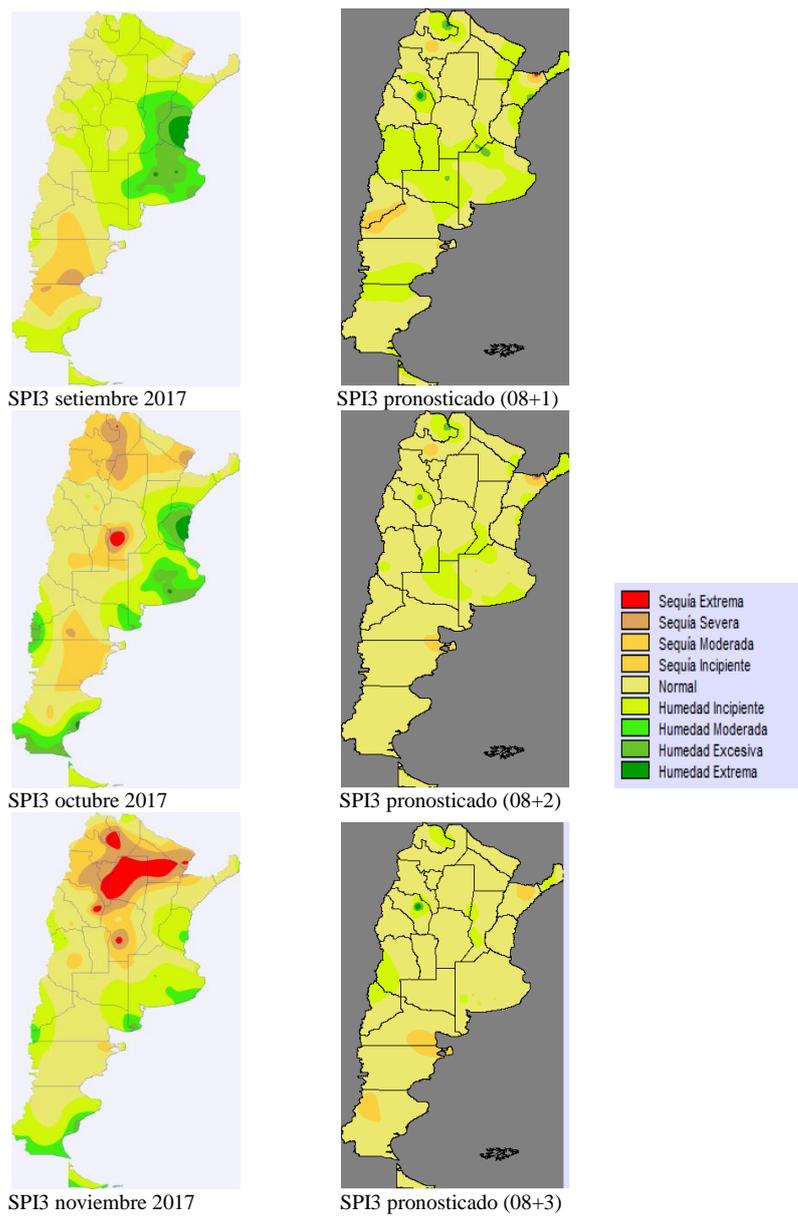


Figura A5.8. Mapas de SPI3 observados vs. pronosticados para setiembre, octubre y noviembre a partir de SPI3 de agosto 2017.

Pronóstico SPI3 para octubre, noviembre y diciembre 2017

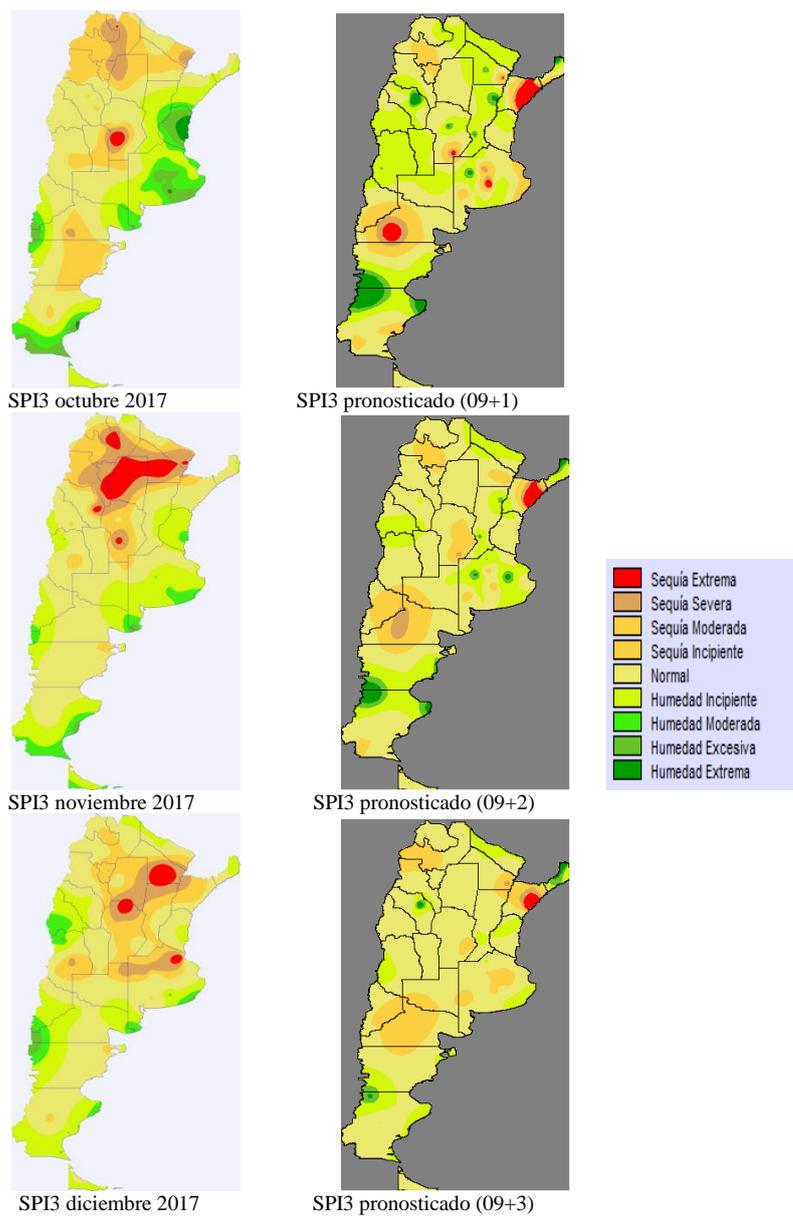


Figura A5.9. Mapas de SPI3 observados vs. pronosticados para octubre, noviembre y diciembre a partir de SPI3 de setiembre 2017.

Pronóstico SPI3 para noviembre y diciembre 2017 y enero 2018

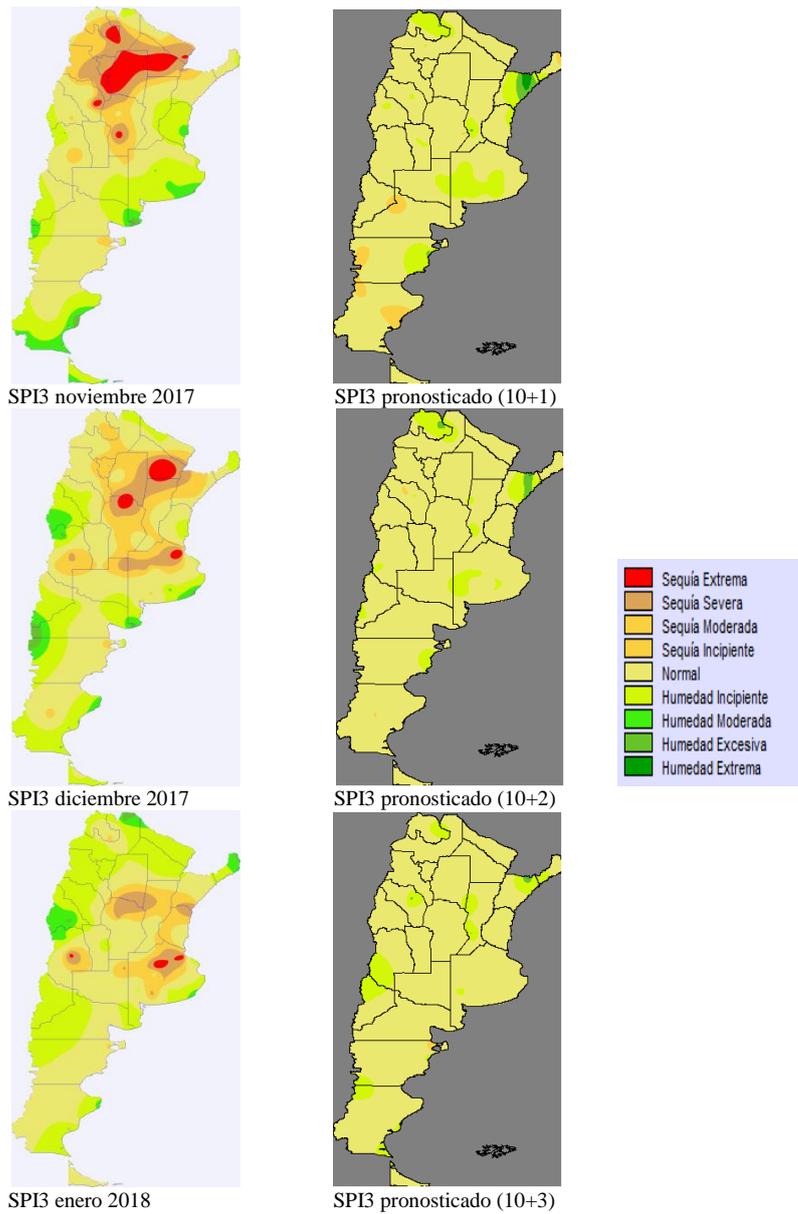


Figura A5.10. Mapas de SPI3 observados vs. pronosticados para noviembre, diciembre y enero a partir de SPI3 de octubre 2017.

Pronóstico SPI3 para diciembre 2017, enero y febrero 2018

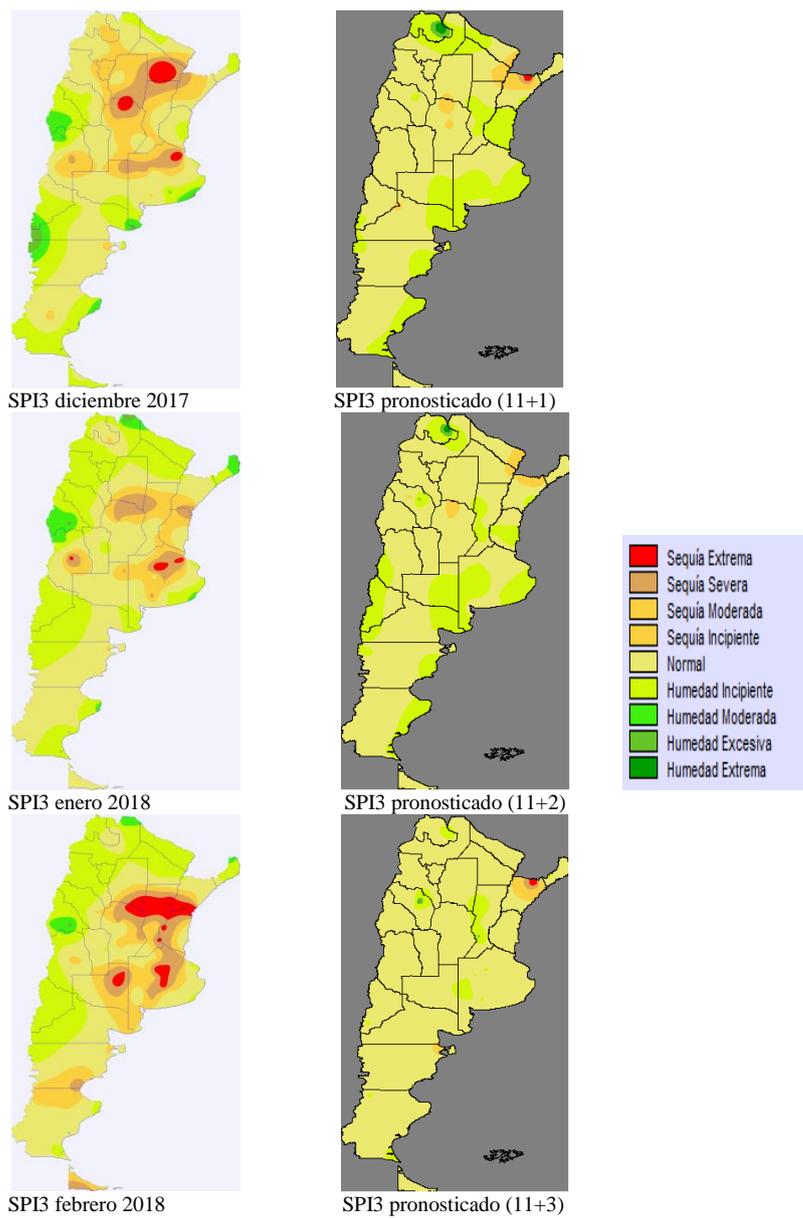


Figura A5.11. Mapas de SPI3 observados vs. pronosticados para diciembre, enero y febrero a partir de SPI3 de noviembre 2017.

Pronóstico SPI3 para enero, febrero y marzo 2018

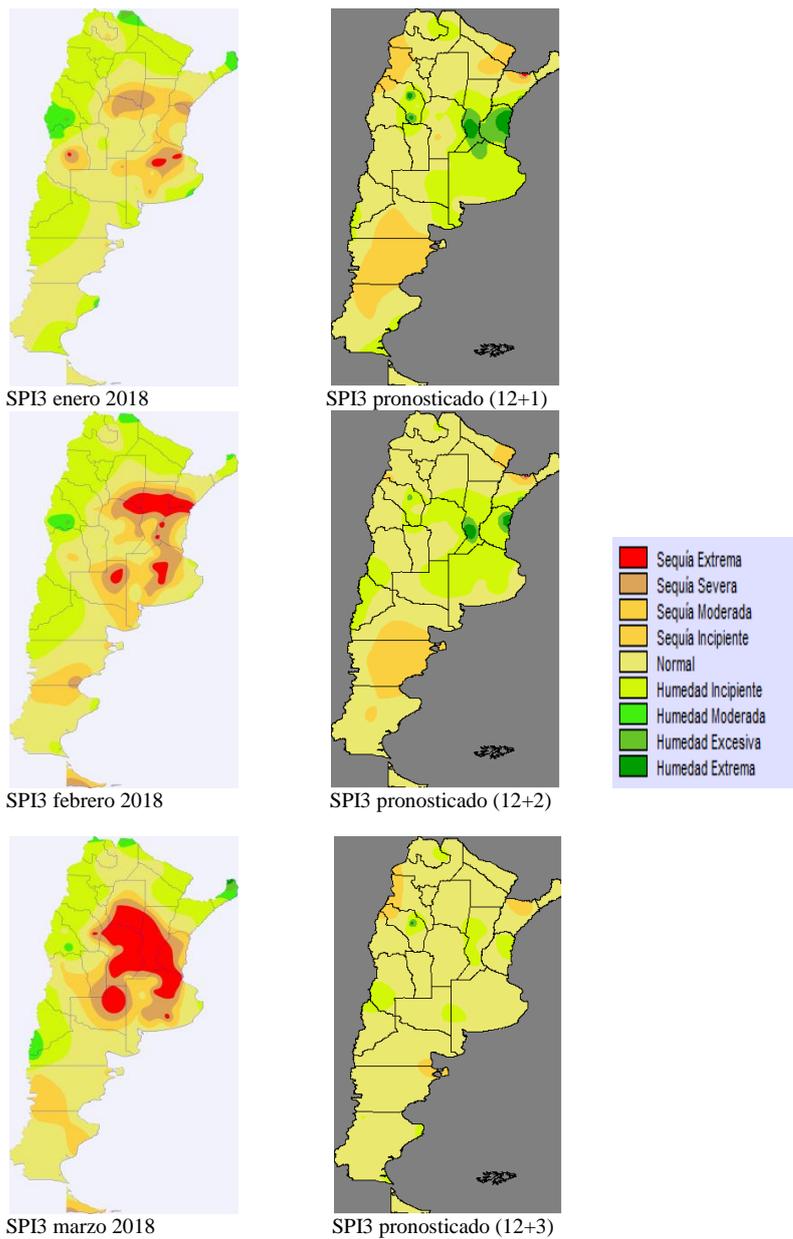
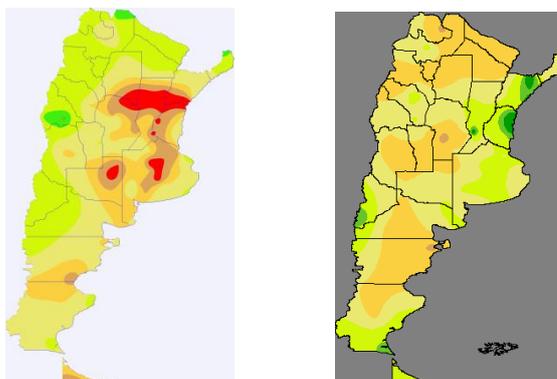


Figura A5.12. Mapas de SPI3 observados vs. pronosticados para enero, febrero y marzo a partir de SPI3 de diciembre 2017.

Pronóstico SPI3 para febrero, marzo y abril 2018



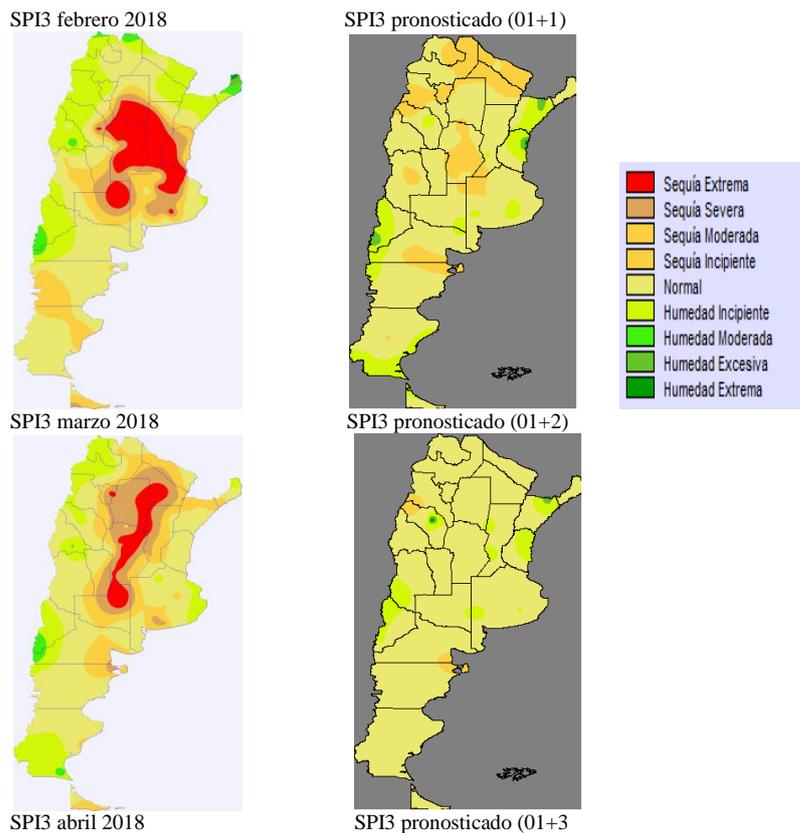
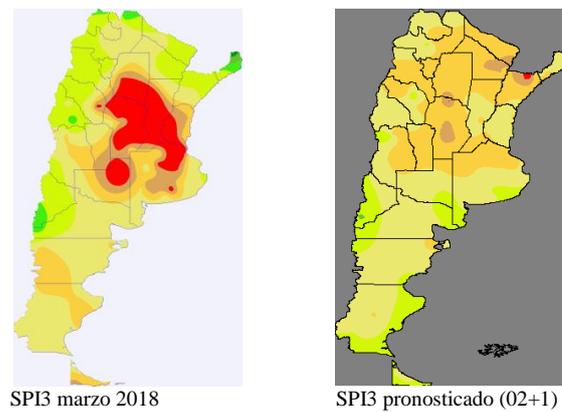


Figura A5.13. Mapas de SPI3 observados vs. pronosticados para febrero, marzo y abril a partir de SPI3 de enero 2018.

Pronóstico SPI3 para marzo, abril y mayo 2018



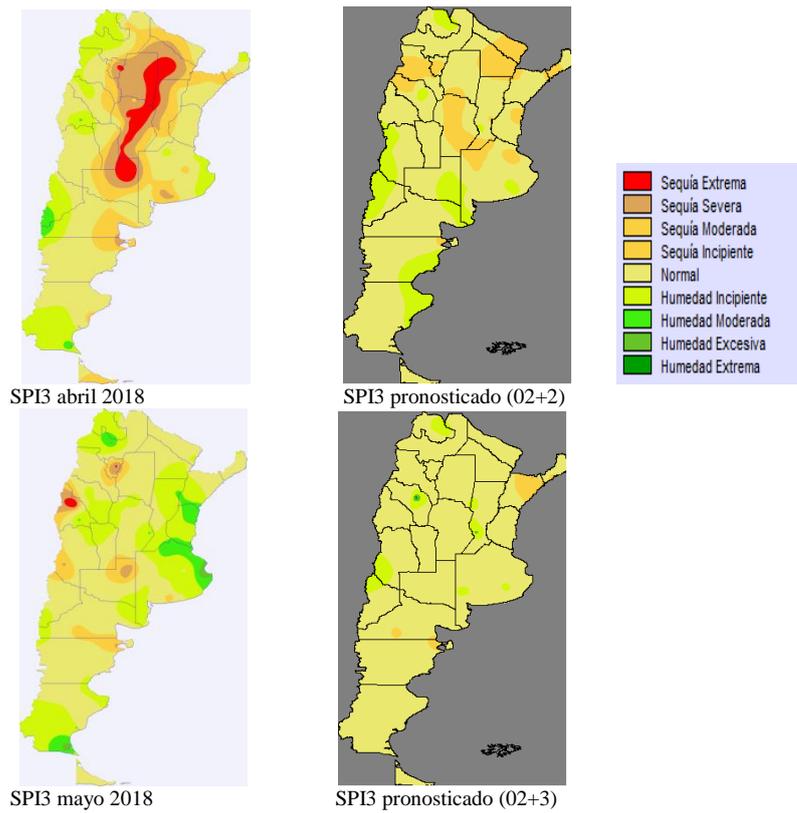


Figura A5.14. Mapas de SPI3 observados vs. pronosticados para marzo, abril y mayo a partir de SPI3 de febrero 2018.

Pronóstico SPI3 para abril, mayo y junio 2018 cuerpo de tesis, (Fig. 3.44, Pág. 84)

Pronóstico SPI3 para mayo, junio y Julio 2018

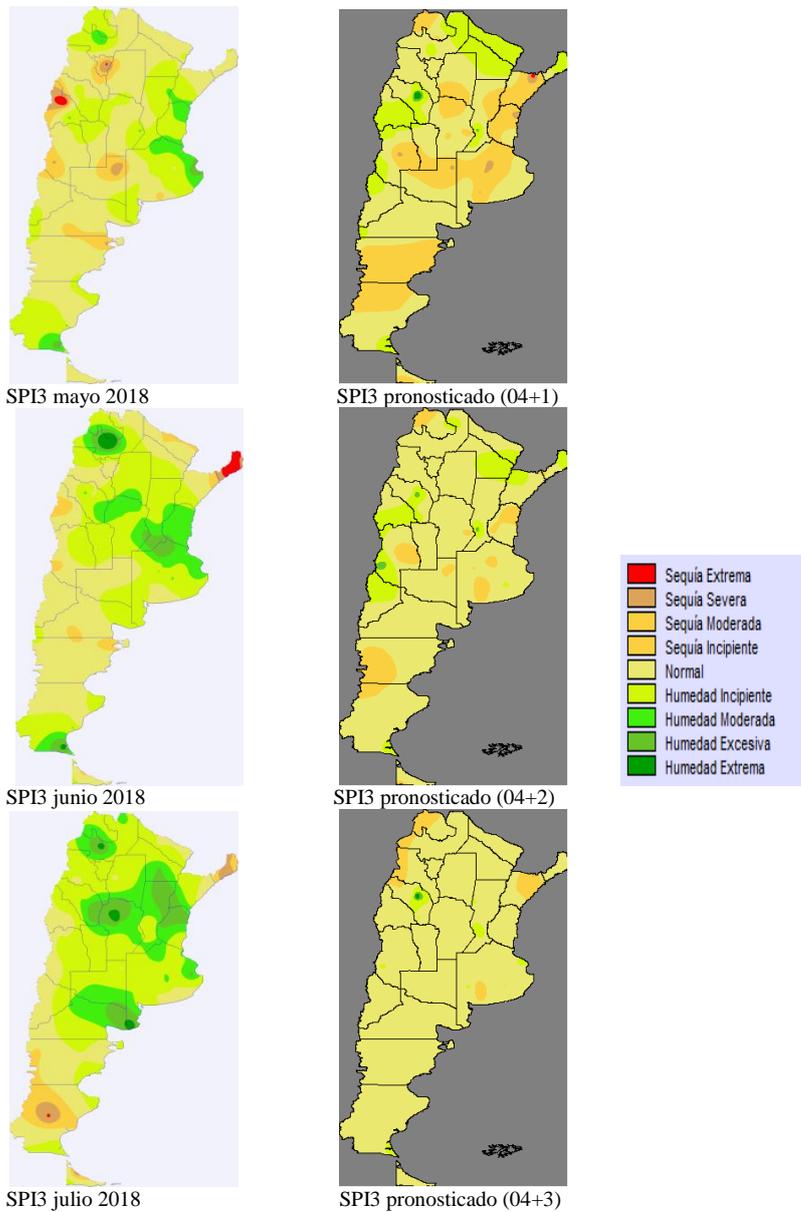


Figura A5.15. Mapas de SPI3 observados vs. pronosticados para mayo, junio y julio a partir de SPI3 de abril 2018.

Pronóstico SPI3 para junio, julio y agosto 2018

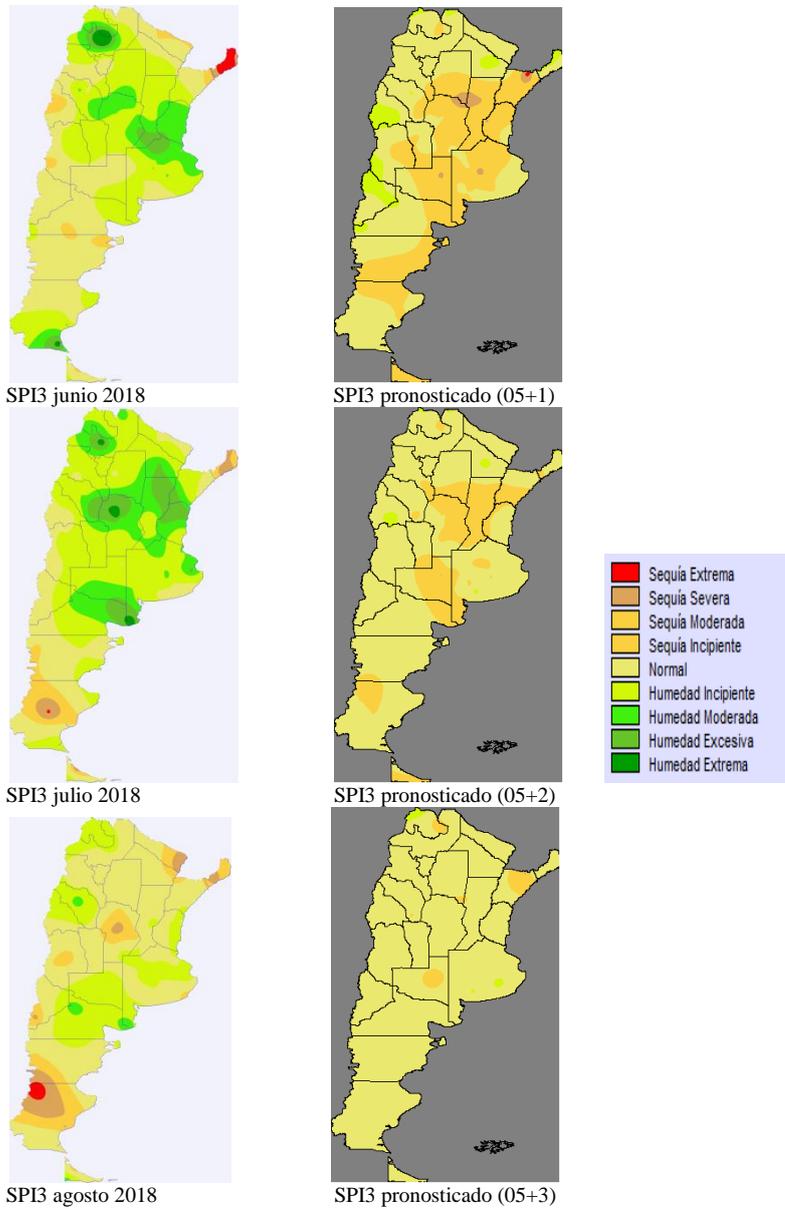


Figura A5.16. Mapas de SPI3 observados vs. pronosticados para junio, julio y agosto a partir de SPI3 de mayo 2018.

Pronóstico SPI3 para julio, agosto y setiembre 2018

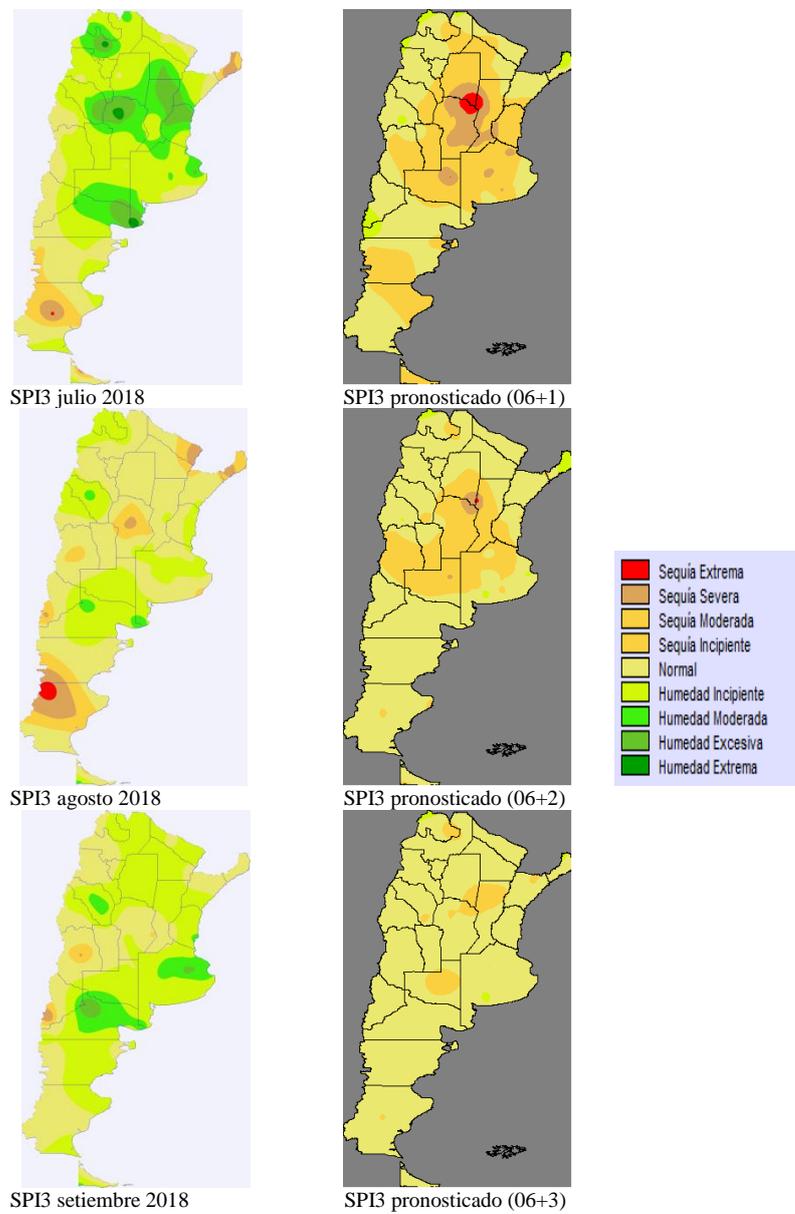


Figura A5.17. Mapas de SPI3 observados vs. pronosticados para julio, agosto y setiembre a partir de SPI3 de junio 2018.

Pronóstico SPI3 para setiembre, octubre y noviembre 2018

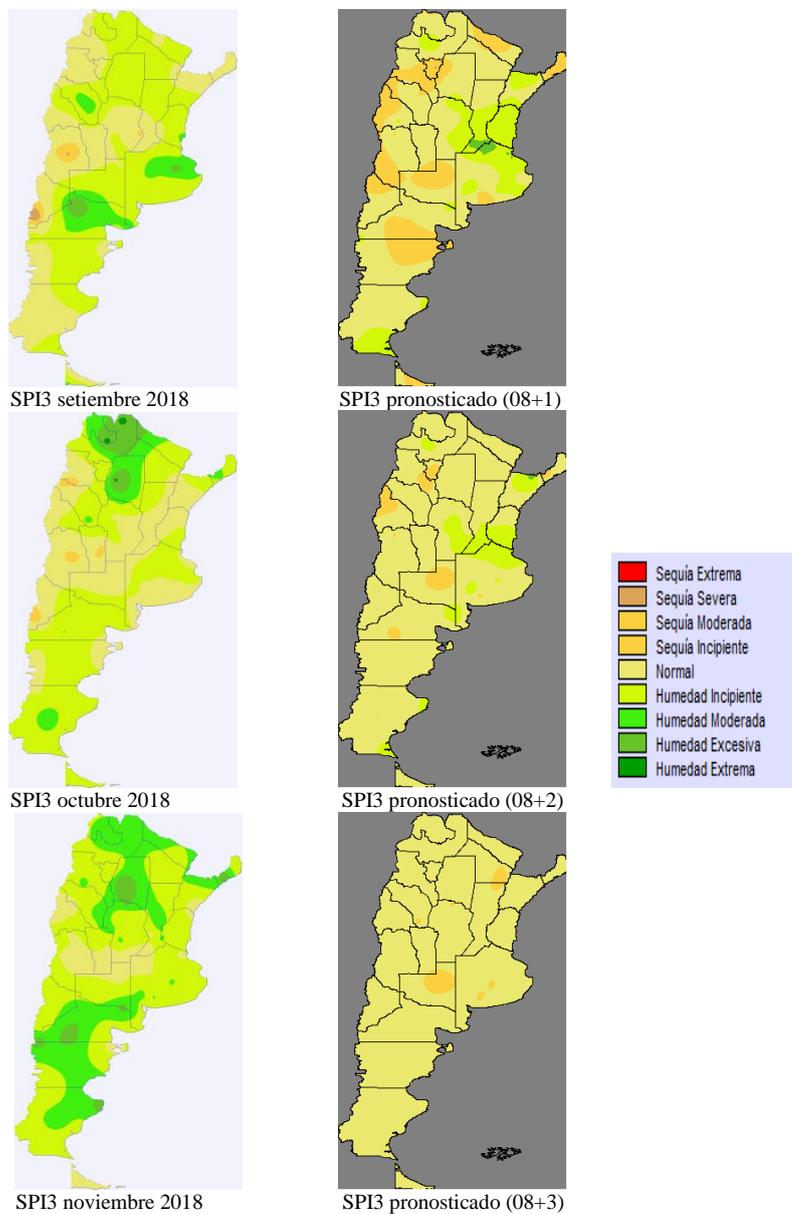


Figura A5.18. Mapas del SPI3 observados vs. pronosticados para setiembre, octubre y noviembre a partir de SPI3 de agosto 2018.

Pronóstico SPI3 para octubre, noviembre y diciembre 2018

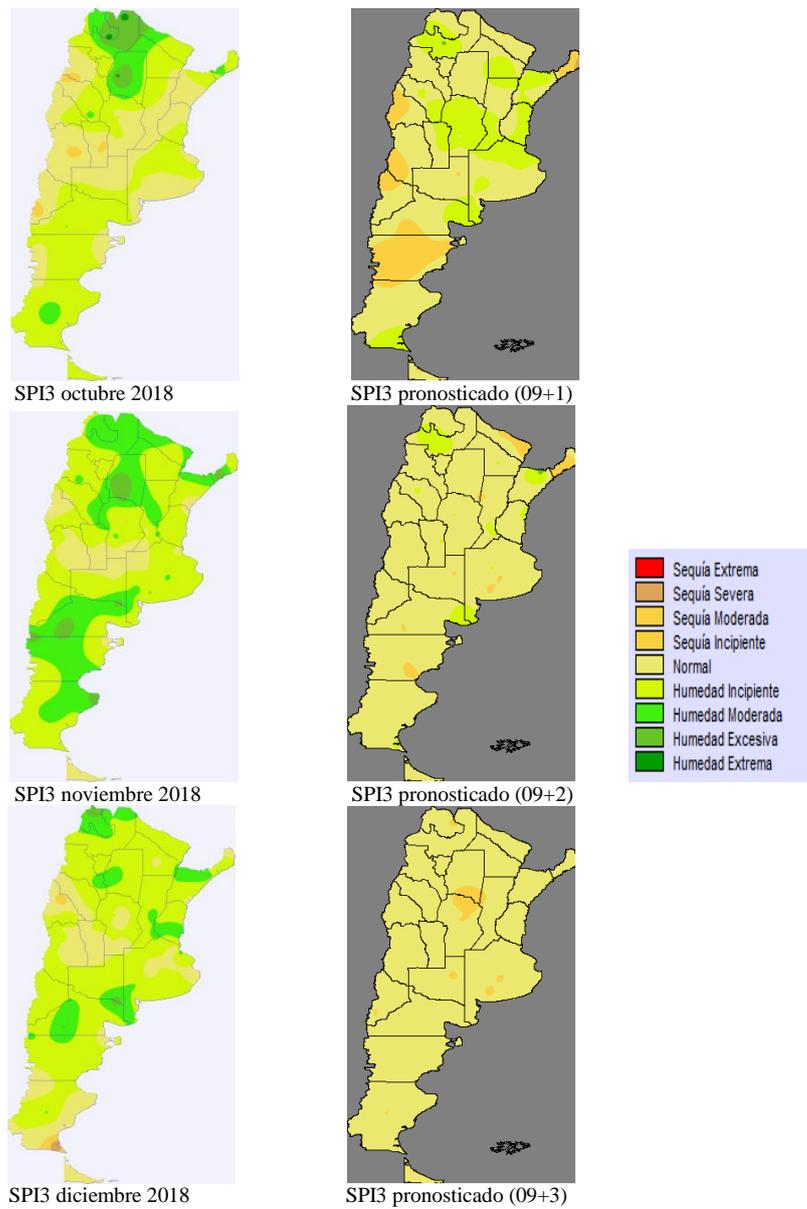


Figura A5.19. Mapas del SPI3 observados vs. pronosticados para octubre, noviembre y diciembre a partir de SPI3 de setiembre 2018.

Pronóstico SPI3 para noviembre y diciembre 2018 y enero 2019

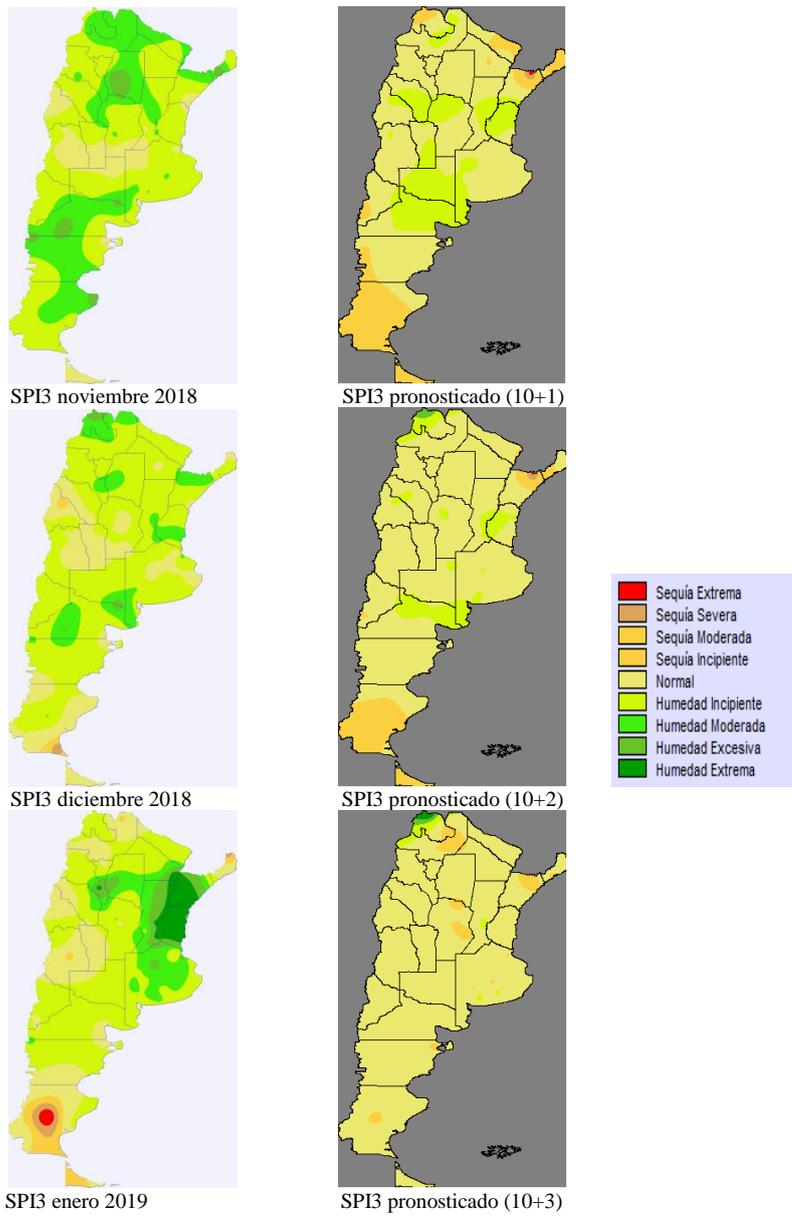


Figura A5.20. Mapas del SPI3 observados vs. pronosticados para noviembre, diciembre y enero a partir de SPI3 de octubre 2018.

Pronóstico SPI3 para diciembre 2018 y enero y febrero 2019

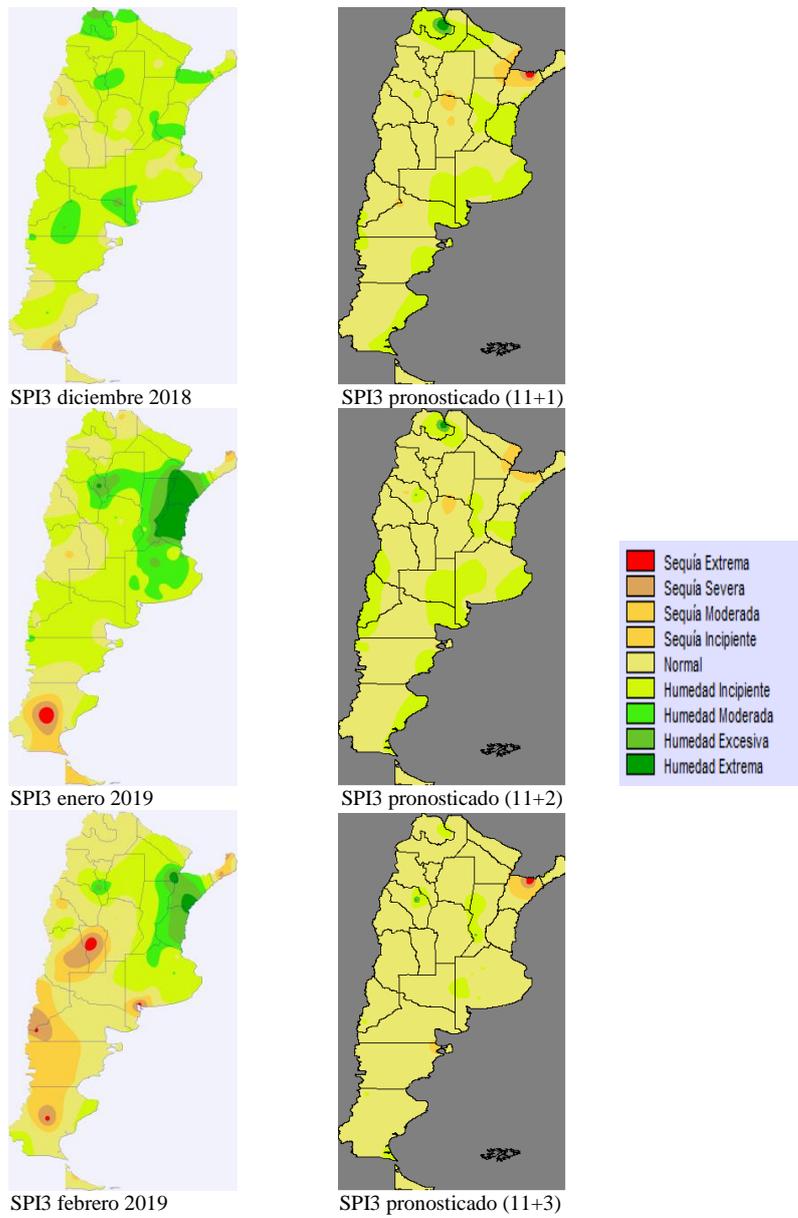


Figura A5.21. Mapas del SPI3 observados vs. pronosticados para diciembre, enero y febrero a partir de SPI3 de noviembre 2018.

Pronóstico SPI3 para enero, febrero y marzo 2019

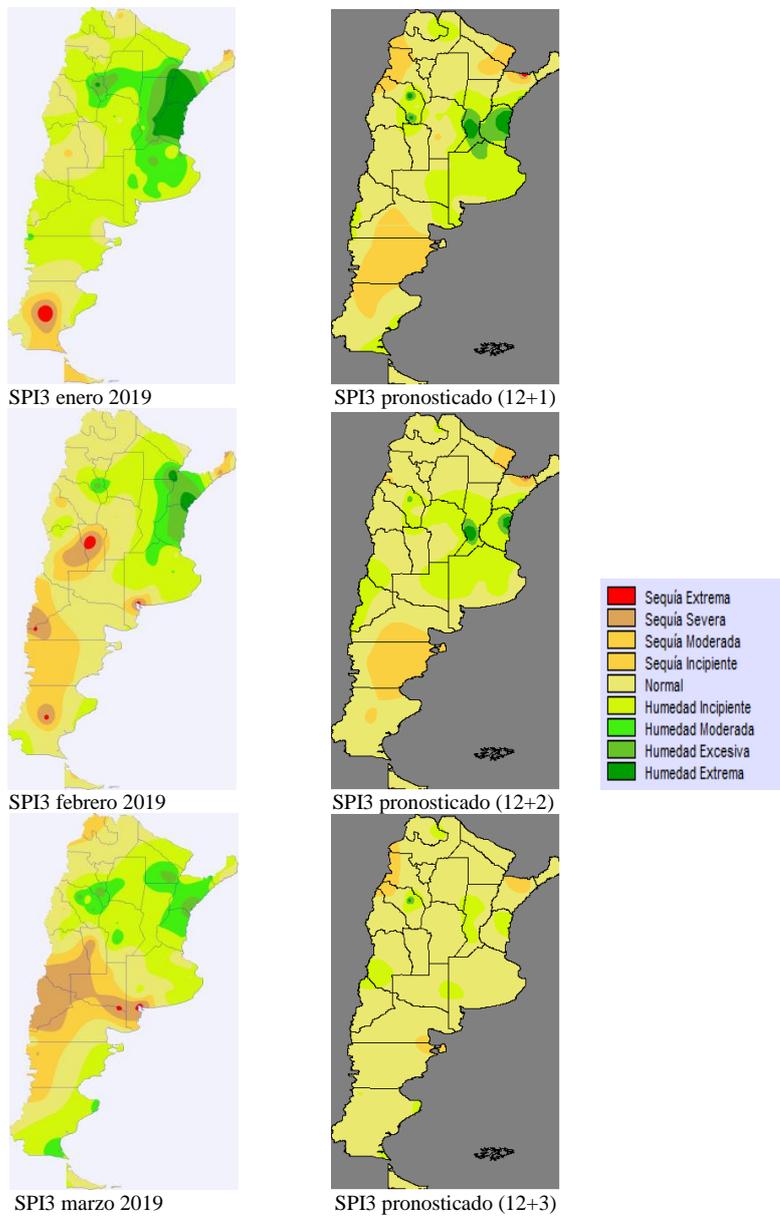


Figura A5.22. Mapas del SPI3 observados vs. pronosticados para enero, febrero y marzo a partir de SPI3 de diciembre 2018.

Pronóstico SPI3 para febrero, marzo y abril 2019

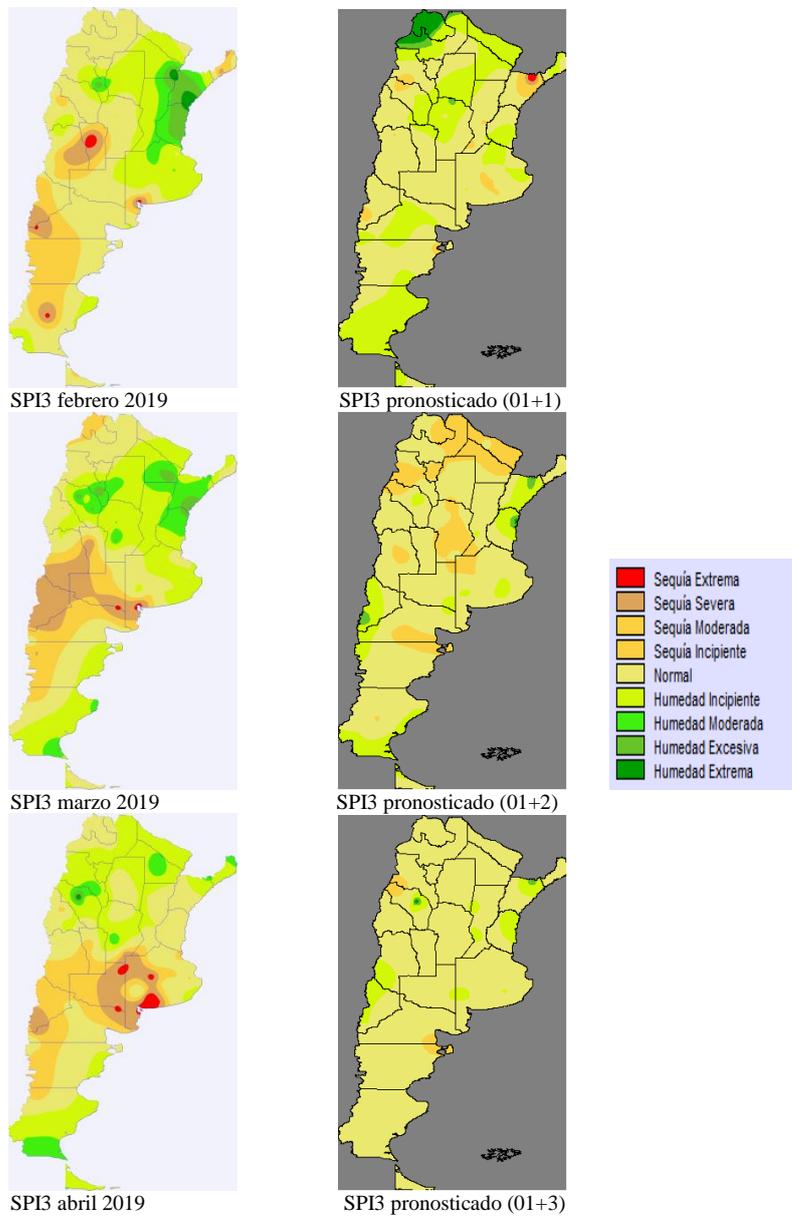


Figura A5.23. Mapas del SPI3 observados vs. pronosticados para febrero, marzo y abril a partir de SPI3 de enero 2019.

Pronóstico SPI3 para marzo, abril y mayo 2019

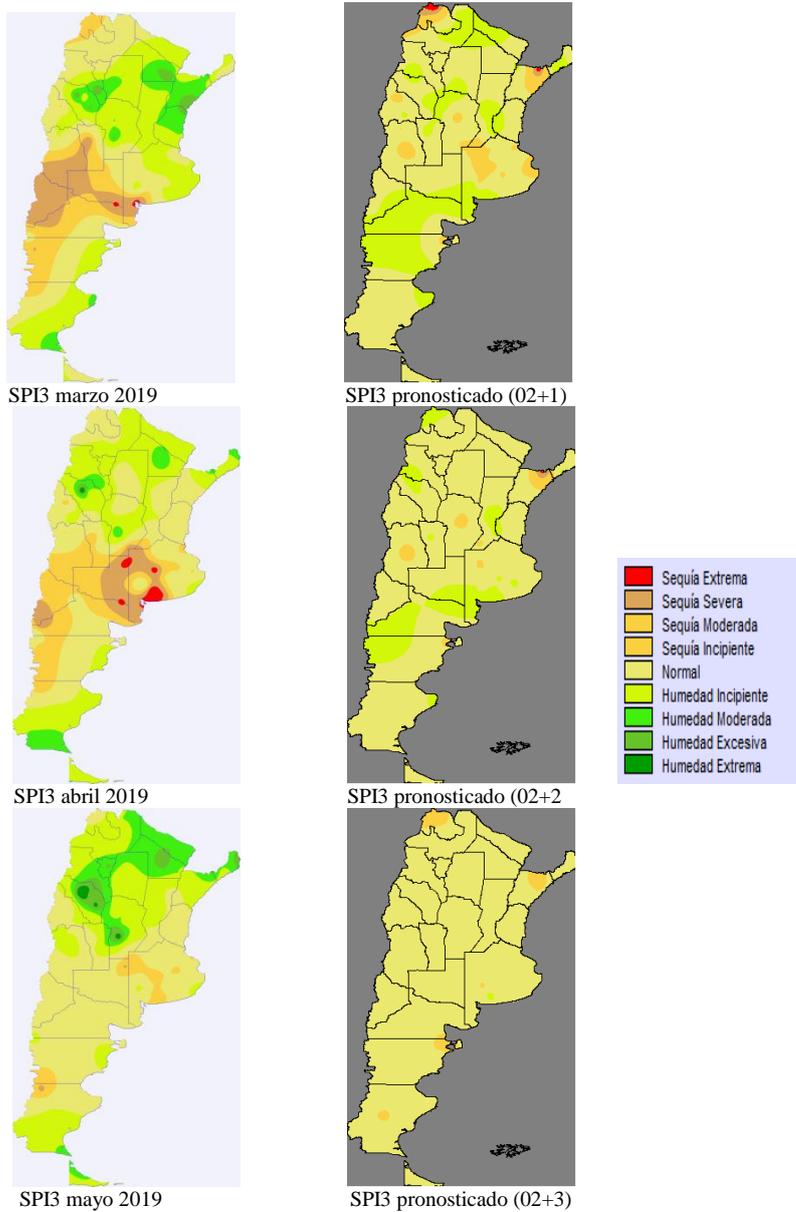


Figura A5.24. Mapas del SPI3 observados vs. pronosticados para marzo, abril y mayo a partir de SPI3 de mayo 2019.

Pronóstico SPI3 para abril, mayo y junio 2019

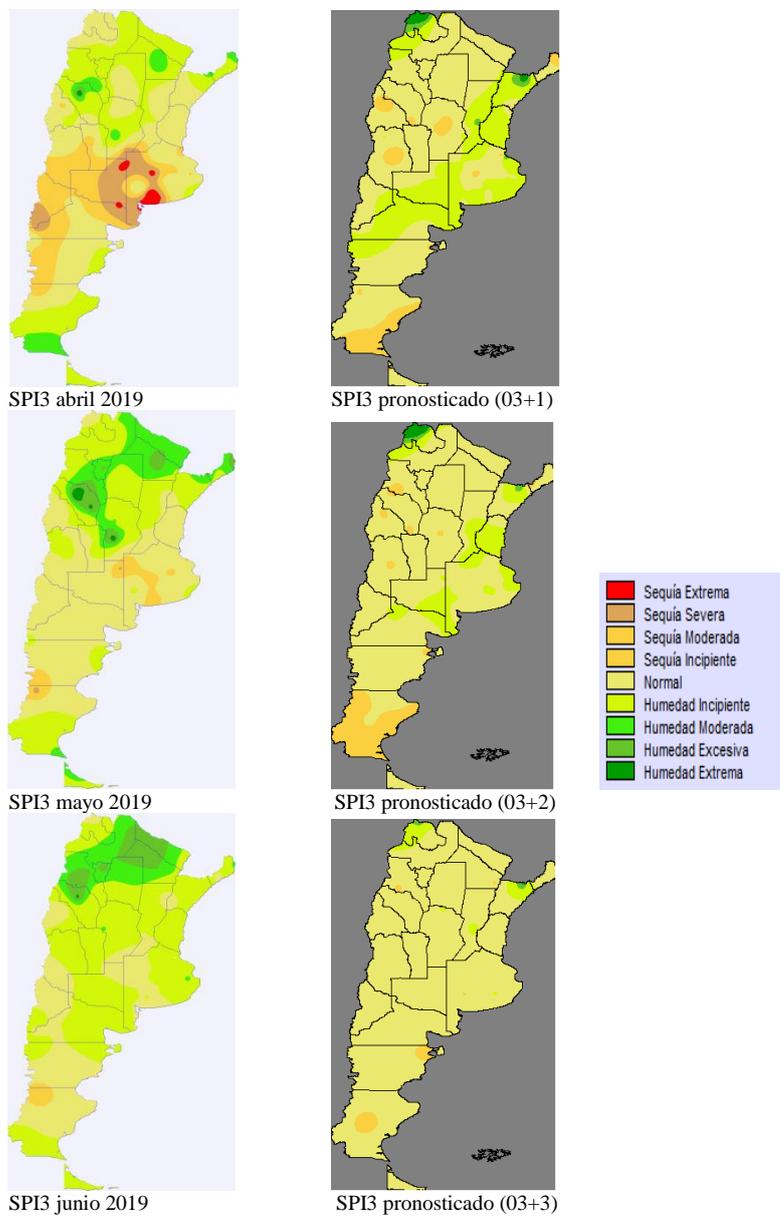


Figura A5.25. Mapas del SPI3 observados vs. pronosticados para abril, mayo y junio a partir de SPI3 de marzo 2019.

Pronóstico SPI3 para mayo, junio, julio 2019

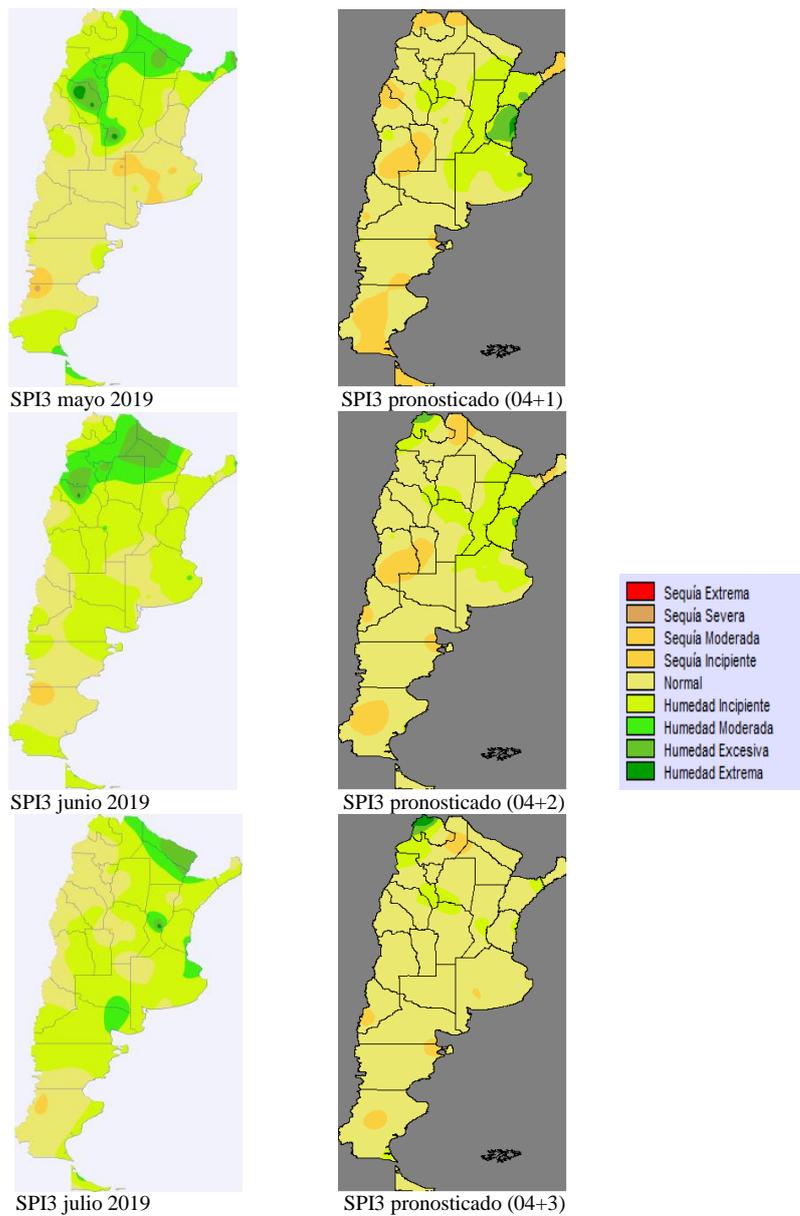


Figura A5.26. Mapas del SPI3 observados vs. pronosticados para mayo, junio y julio a partir del SPI3 de abril de 2019.

Pronóstico SPI3 para junio, julio, agosto 2019

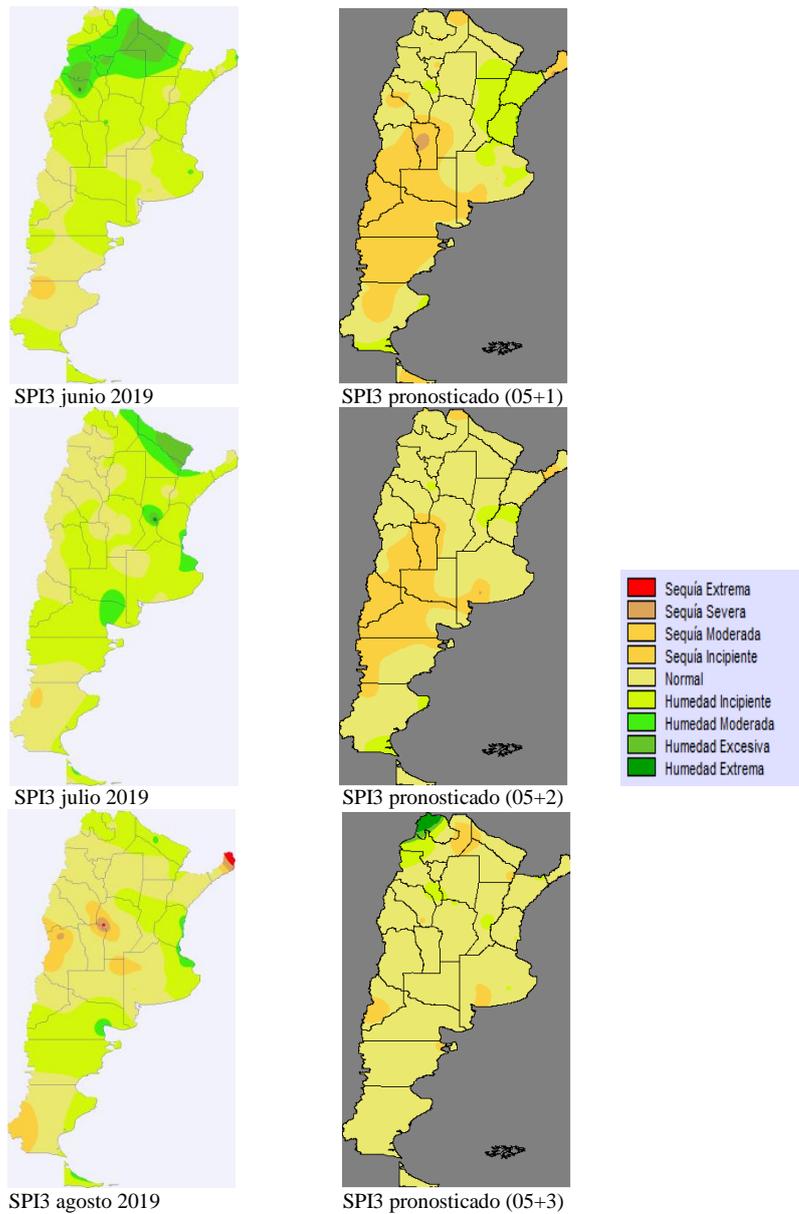


Figura A5.27. Mapas del SPI3 observados vs. pronosticados para junio, julio y agosto a partir de SPI3 de mayo de 2019.

ANEXO 6

Pronósticos de SPI12

Se presentan mapas de SPI12 observados y pronosticados a 1(+1); 2(+2) y 3(+3) meses desde mayo 2017 a noviembre 2019.

Se realizó una comparación entre los mapas observados y pronosticados para la serie completa de mapas del SPI12 pronosticados obtenidos mensualmente con un breve

comentario sobre las condiciones de humedad o sequedad ocurridas. La interrupción de la secuencia mensual de figuras pronosticadas y observadas se debe a que las mismas fueron incorporadas como figuras en el cuerpo de la tesis.

Pronóstico SPI12 para mayo, junio y julio 2017

Los pronósticos del SPI12, para los meses de mayo a julio nos indican, condiciones normales y humedad moderada para la region central, Cuyo, NEA y norte de Patagonía con marcadas diferencias entre los mapas observados y pronosticados.

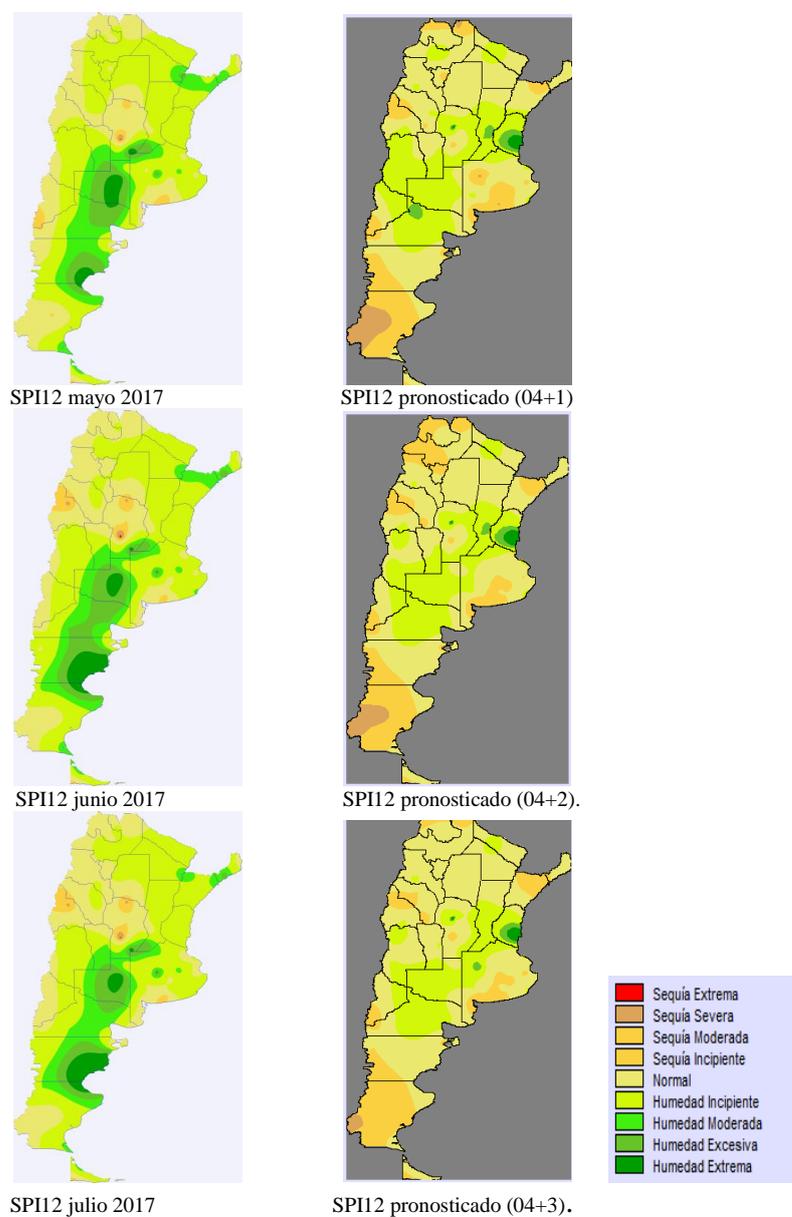


Figura A6.1. Mapas del SPI12 observados vs. pronosticados para mayo, junio y julio a partir de abril de 2017

Pronóstico SPI12 para junio, julio y agosto 2017

Los pronósticos del SPI12, para los meses de junio, julio y agosto nos esta indicando, condiciones secas con precipitaciones por debajo de lo normal para la region central,NOA, NEA y Patagonía con un marcado contraste entre los mapas observados y pronosticados que marcan humedad extrema y excesiva para Patagonia humedad excesiva y moderada en centro y sur de Entre Ríos

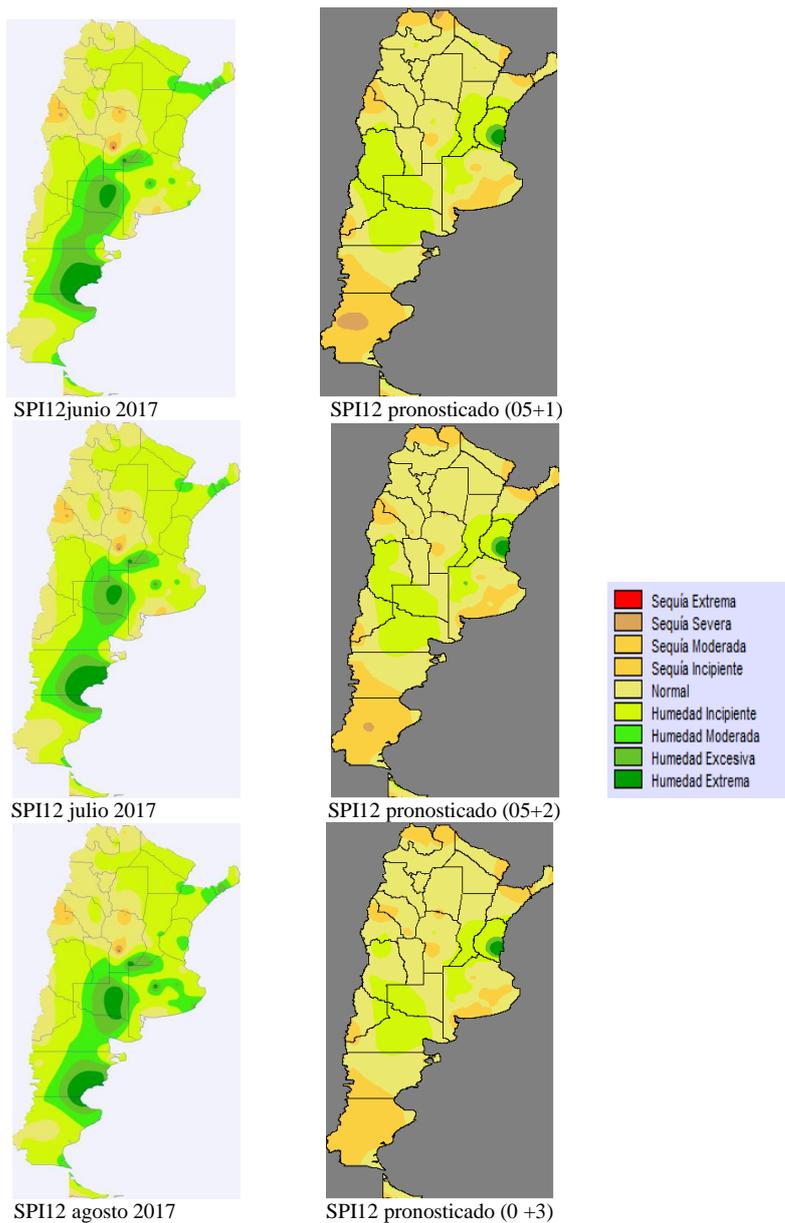


Figura A6.2. Mapas del SPI12 observados vs. pronosticados para junio, julio y agosto a partir de SPI12 de mayo 2017.

Pronóstico SPI12 para julio, agosto y setiembre 2017

Los pronósticos del SPI12, para el trimestre julio setiembre nos indica condiciones normales y humedad incipiente en general para NOA, NEA, Cuyo, RP y RPA con focos de humedad excesiva en Entre Ríos y La Pampa en los tres meses de pronosticados.

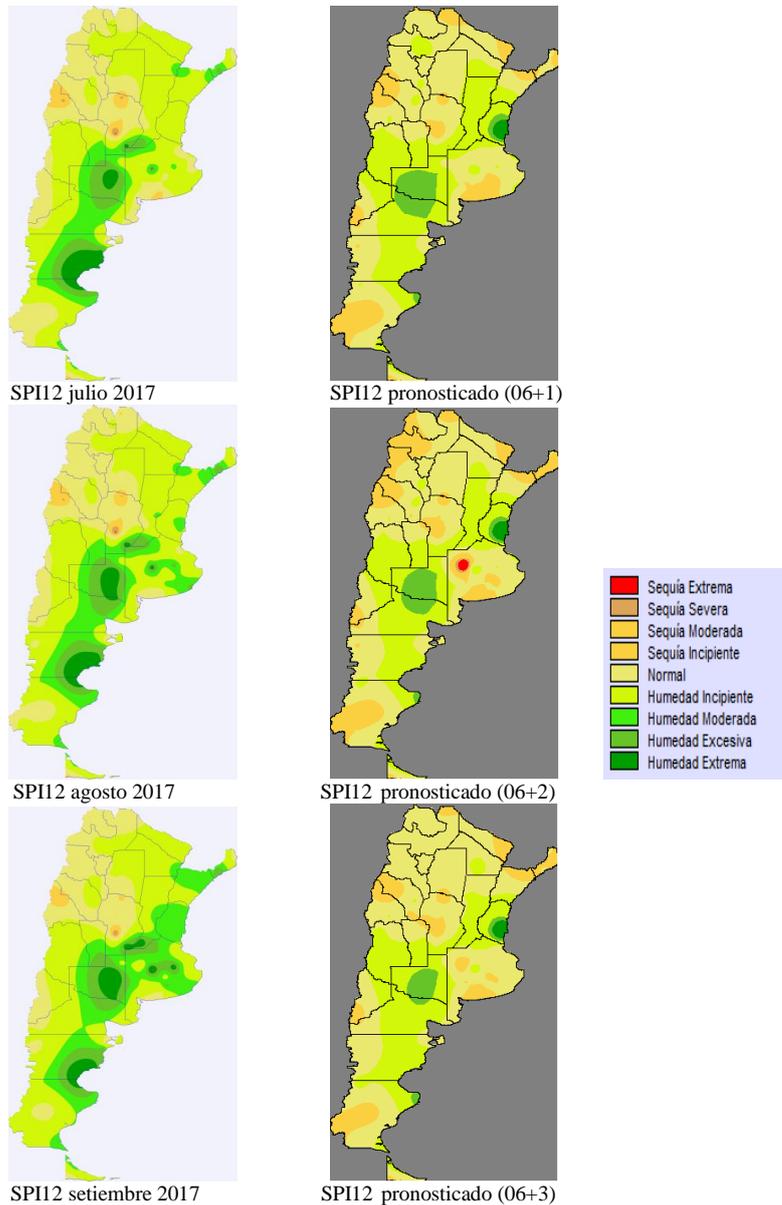


Figura A6.3. Mapas del SPI12 observados vs. pronosticados para julio, agosto y setiembre a partir de SPI12 de junio 2017.

Pronóstico SPI12 para agosto, setiembre y octubre 2017

Los pronósticos del SPI12, para el trimestre agosto octubre nos esta indicando, condiciones normales en general para NOA, NEA y RP humedad extrema y excesiva en La Pampa y centro y este de Patagonía con relativa coincidencia entre mapas observados y pronosticados.

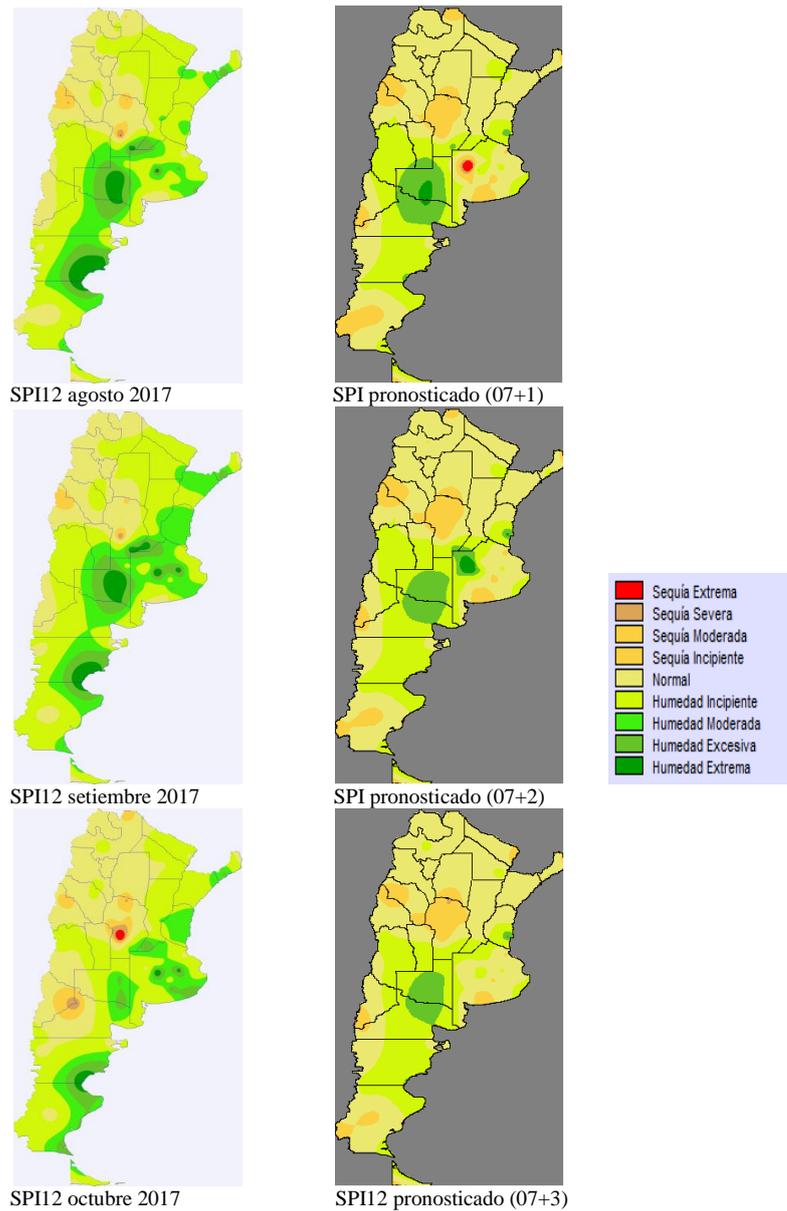


Figura A6.4. Mapas del SPI12 observados vs. pronosticados para agosto, setiembre y octubre a partir de SPI12 de julio 2017.

Pronóstico SPI12 para setiembre, octubre y noviembre 2017

Los pronósticos del SPI12, para el trimestre setiembre a noviembre nos esta indicando, que se mantienen las condiciones normales a húmedas, con humedad incipiente en general para, NEA, RP y norte de Patagonía; humedad excesiva en La Pampa, sudeste de Córdoba, noroeste de Buenos Aires y Entre Ríos.

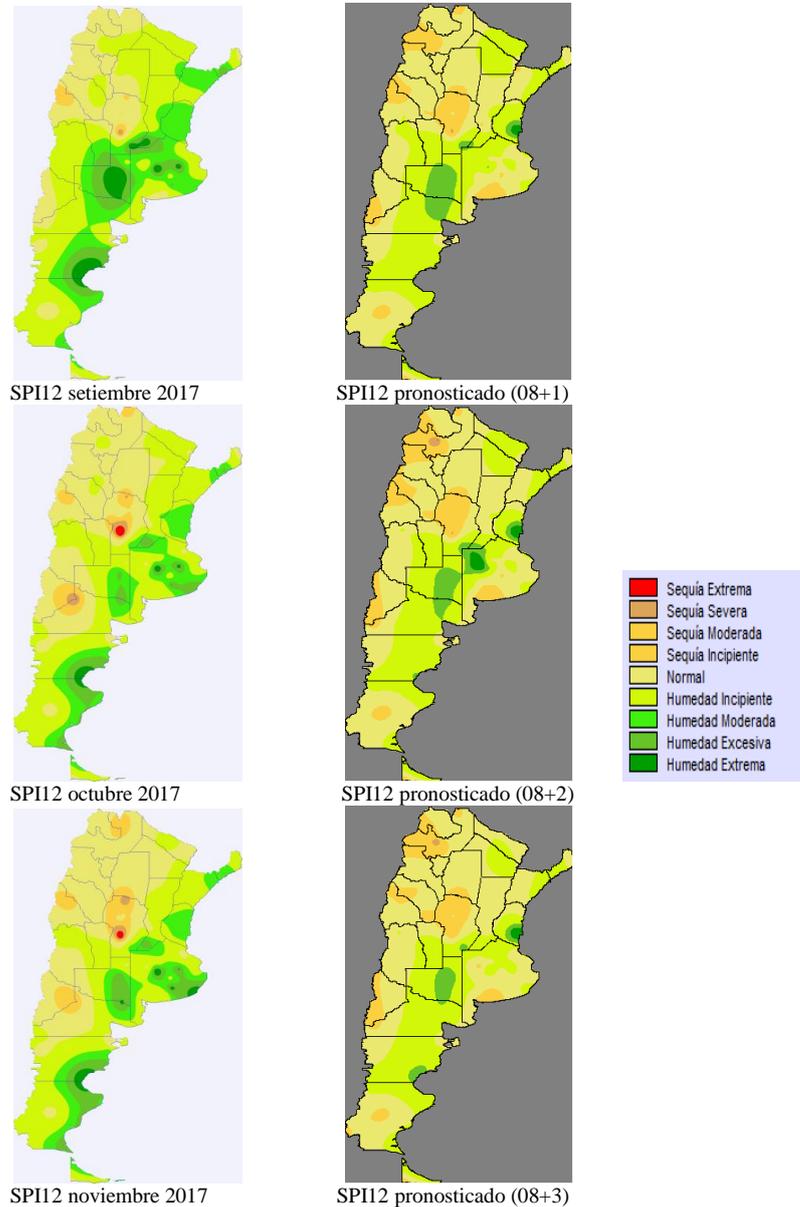


Figura A6.5. Mapas del SPI12 observados vs. pronosticados para setiembre, octubre y noviembre a partir de SPI12 de agosto 2017.

Pronóstico SPI12 para octubre, noviembre y diciembre 2017 cuerpo de tesis, (Fig.3.45, Pág. 86)

Pronóstico SPI12 para noviembre y diciembre 2017 y enero 2018

Los pronósticos del SPI 12, para el trimestre.noviembre-enero nos esta indicando, condiciones normales semejantes en los mapas observados y pronosticados para los tres meses, con una persistente condición de humedad excesiva en la provincia de La Pampa, zona este de Patagonía. En el centro y norte de Córdoba sequía moderada y normal para el NOA y parte oeste de Patagonia.

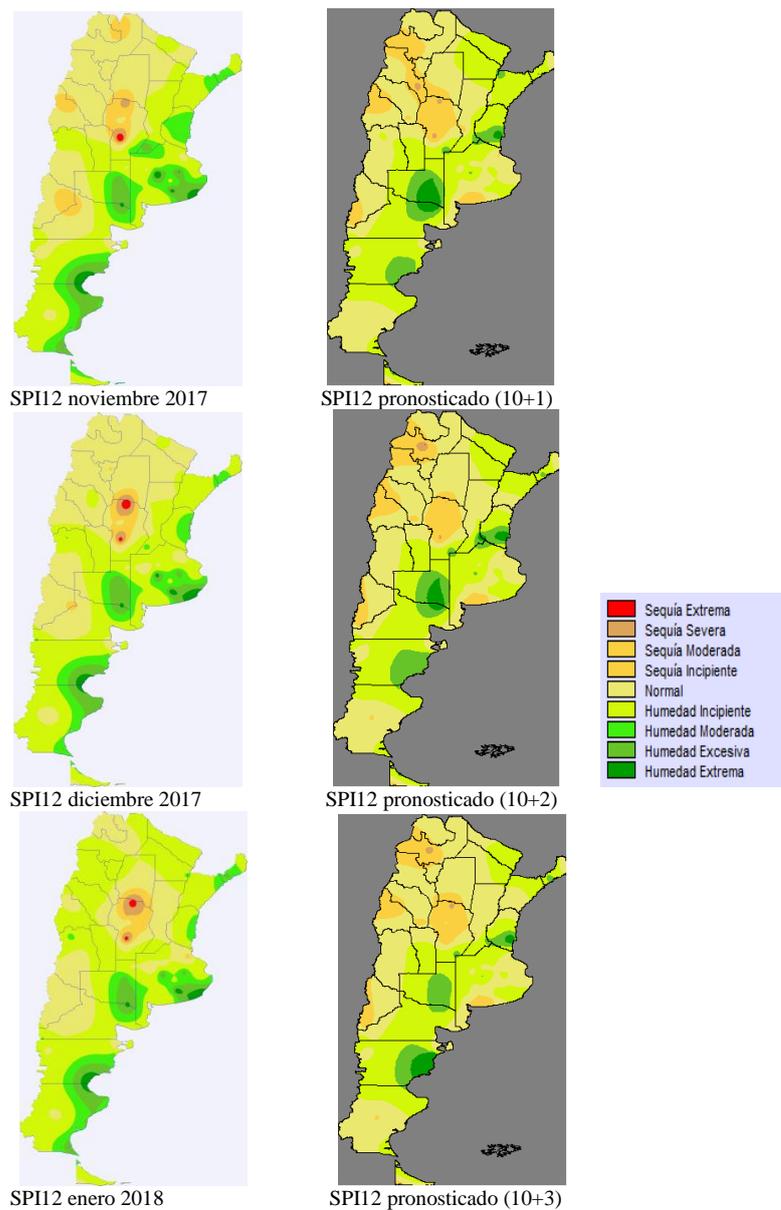
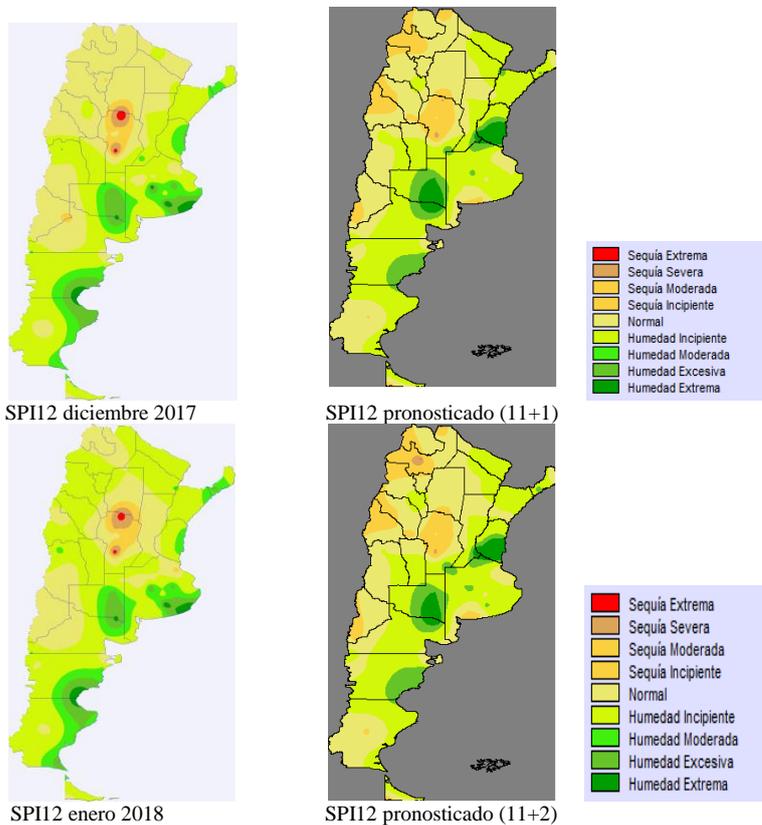


Figura A6.6. Mapas del SPI12 observados vs. pronosticados para noviembre, diciembre y enero a partir de SPI12 de octubre 2017.

Pronóstico SPI12 para diciembre 2017 y enero y febrero 2018

Durante los meses de diciembre, enero y febrero 2018, los pronósticos del SPI 12 muestran condiciones secas con precipitaciones por debajo de lo normal para las regiones central, Cuyo, oeste de Patagonía y NOA, sequías moderadas y severa en general, particularmente en Río Cuarto y Villa María del Río Seco, sur y norte de Córdoba, condiciones de sequías severas–extremas. Disminuyen las áreas del sudeste Cordobes y provincias limítrofes los suelos anegados, no así en la provincia de la La Pampa. Desde Santa Rosa, La Pampa hasta Río Colorado, Río Negro, centro-sur de la provincia de Entre Ríos y en la región este Patagónica, Puerto Deseado, se pronostican, condiciones de humedad moderada a excesiva.



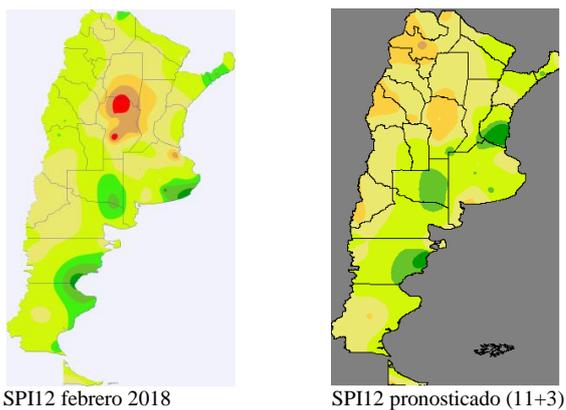
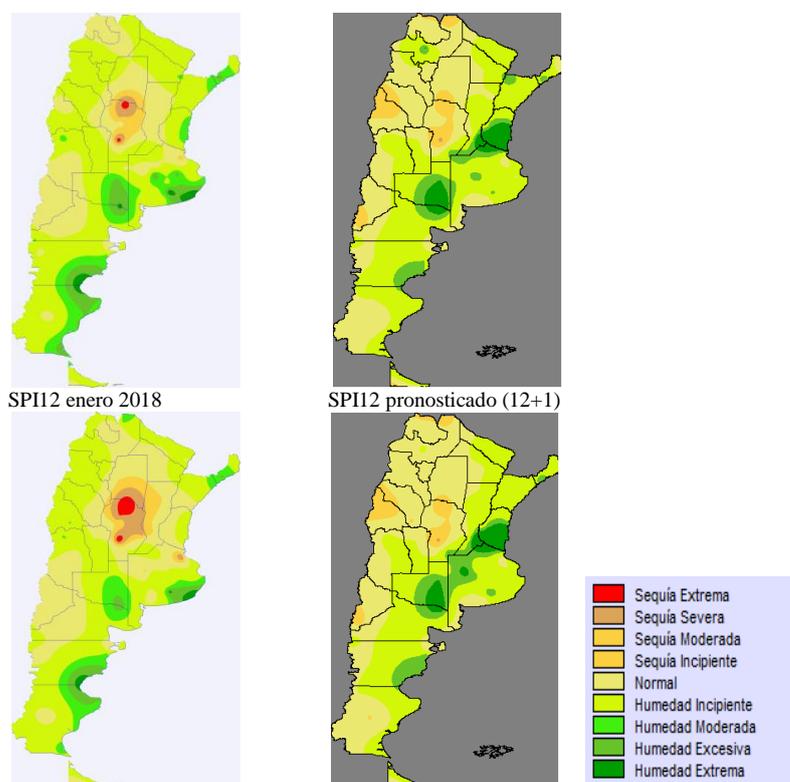


Figura A6.7. Mapas del SPI12 observados vs. pronosticados para diciembre, enero y febrero a partir de SPI12 de noviembre 2017.

Pronóstico SPI12 para enero, febrero y marzo 2018

El pronóstico del SPI12 para los meses de enero, febrero y marzo indicaría; condiciones humedad normal en general para gran parte del país; humedad moderada a excesiva en las provincias de Entre Ríos, sur de Santa Fe, noreste de Buenos Aires La Pampa y Patagonía. Corrientes (NEA) con precipitaciones mayores a la media normal; condiciones de sequías severa en el centro y norte de Córdoba Santiago del Estero y noreste de la Rioja, Jujuy y Salta de la región NOA.



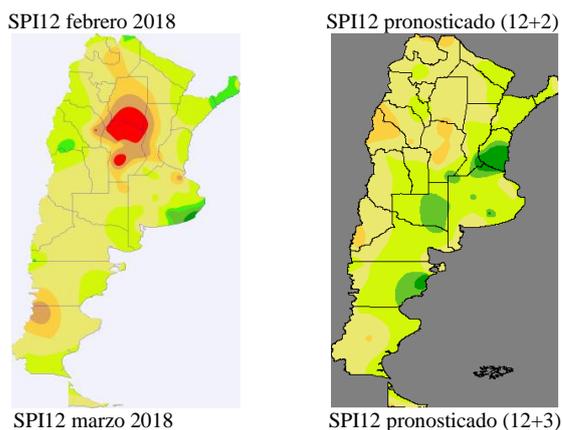
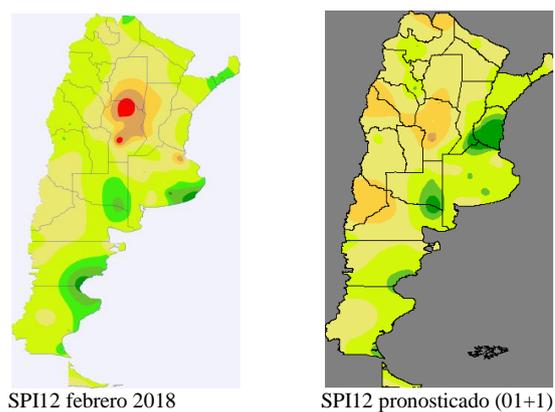


Figura A6.8. Mapas del SPI12 observados vs. pronosticados para enero, febrero y marzo a partir de SPI12 de diciembre de 2018.

Pronóstico SPI12 para febrero, marzo y abril 2018

Durante los meses de febrero, marzo y abril 2018, los pronósticos del SPI 12 muestran condiciones secas con precipitaciones por debajo de lo normal para la region central, Cuyo, Patagonia Oeste y NOA del país, sequías moderadas y severa en general, particularmente en Rio Cuarto y Villa María del Río Seco, sur y norte de Córdoba, condiciones de sequías severas, en la región patagónica este, Puerto Deseado, se pronostican, condiciones de humedad moderada a excesiva.



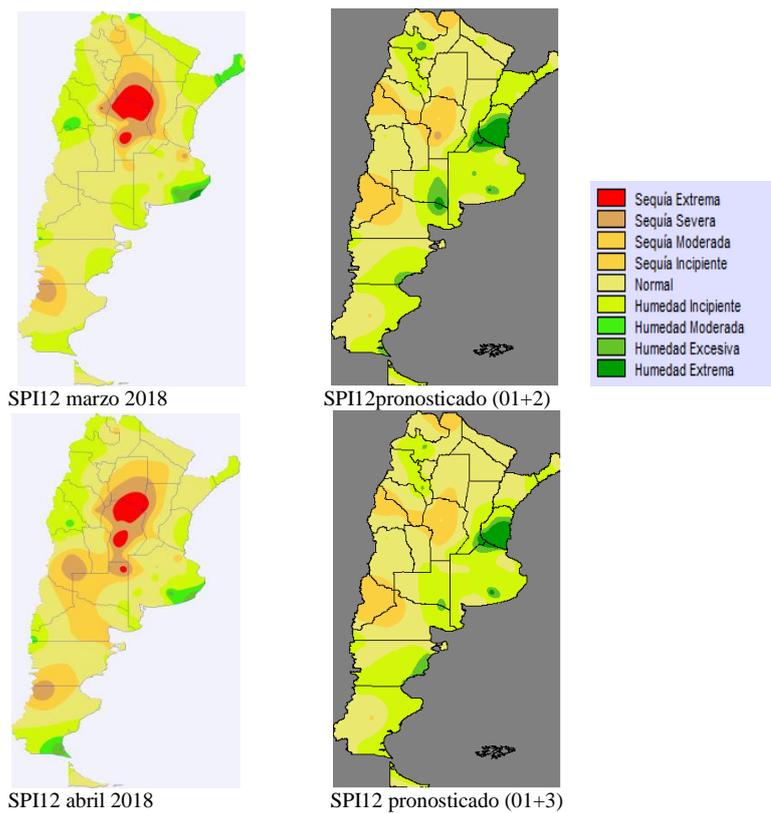


Figura A6.9. Mapas del SPI12 observados vs. pronosticados para febrero, marzo y abril a partir de SPI12 de enero 2018.

Pronóstico SPI12 para marzo, abril y mayo 2018

Durante los meses de marzo, abril y mayo 2018, los pronósticos del SPI 12 muestran condiciones secas normales para la región central del país con precipitaciones por debajo de lo normal pero no señala la sequía extrema y severa que esta marcando los mapas observados del trimestre. En el NOA y Patagonia sequías moderadas. En la región pampeana y NEA; condiciones humedad moderada con humedad excesiva en centro y sur de Entre Ríos y centro sur de La Pampa.

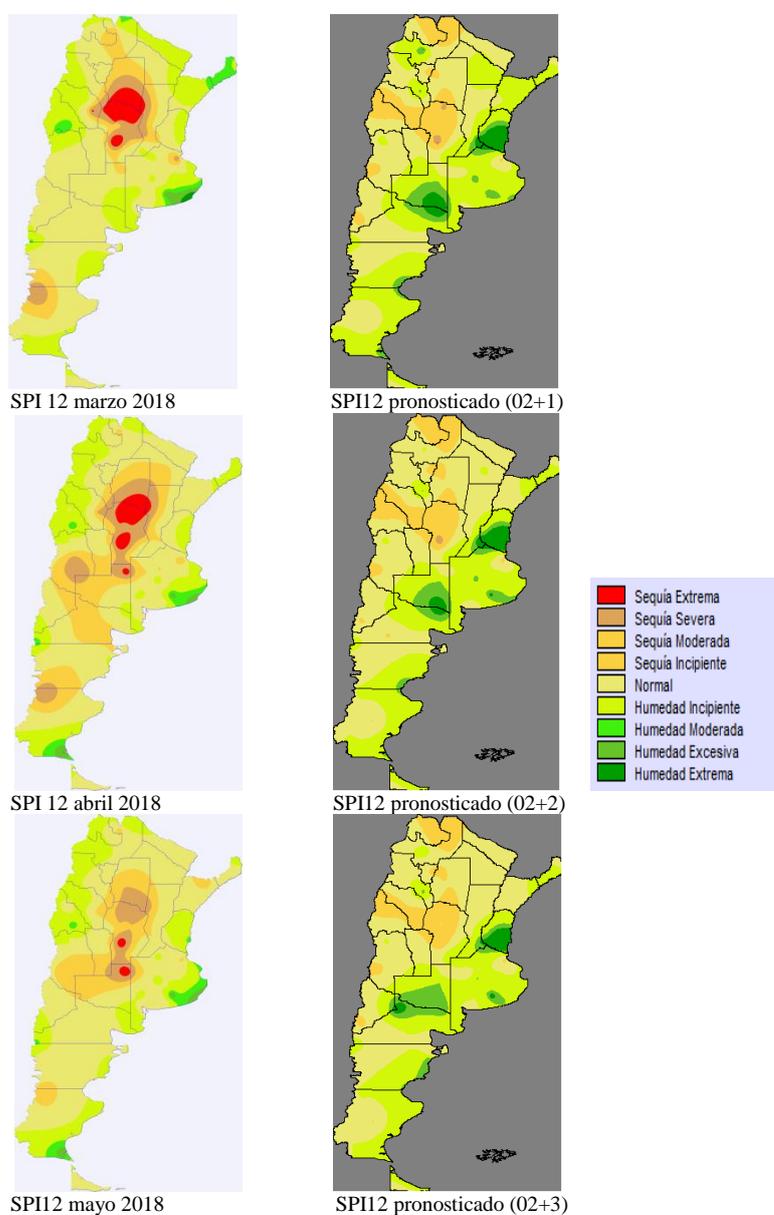


Figura A6.10. Mapas del SPI12 observados vs. pronosticados para marzo, abril y mayo a partir de SPI12 de febrero 2018.

Pronóstico SPI12 para abril, mayo y junio 2018

El pronóstico para los meses de abril, mayo y junio para el SPI12 indica sequías moderadas y severas para gran parte del territorio Argentino, sequías severas y extremas en Villa María del Río Seco, Norte de Córdoba y sur de Santiago del Estero. Se presenta condiciones normales y humedad excesivas en Entre Ríos sudeste de Buenos Aires, La Pampa y costa este de Patagonia. En los mapas observados son más marcadas y extensas las sequías extremas y severas en el centro del país.

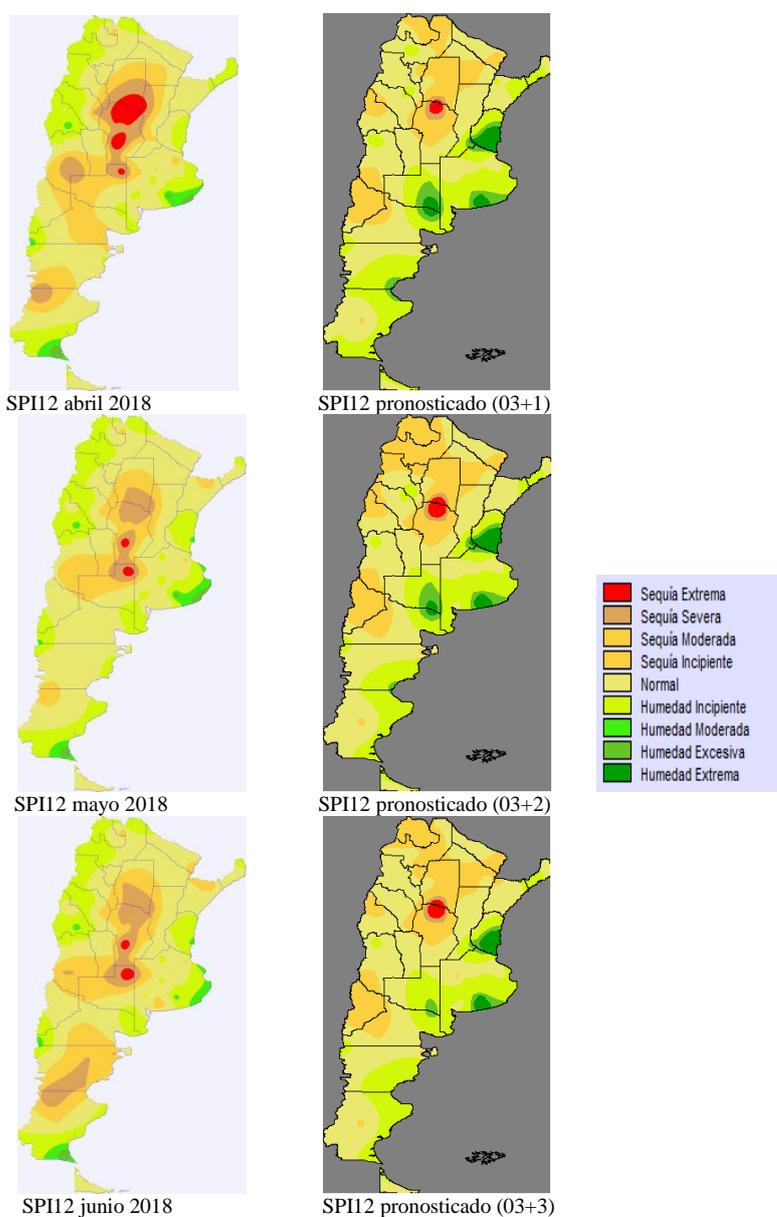


Figura A6.11. Mapas del SPI12 observados vs. pronosticados para abril, mayo y junio a partir de SPI12 de marzo 2018.

Pronóstico SPI12 para mayo, junio y julio 2018

El pronóstico del índice SPI12 indicaría condiciones de sequías moderadas y normales para las regiones central, NOA, NEA, Cuyana, Patagonía oeste del territorio Argentino. Solo se daría condiciones de sequías severas-extrema para la provincia de Formosa. Se pronóstican condiciones normales a moderadas de humedad en Entre Ríos, sudeste de Buenos Aires, sudeste de La Pampa y parte de Patagonía este. El SPI12 observado presenta diferencias en las categorías de sequedad respecto a los mapas pronosticados.

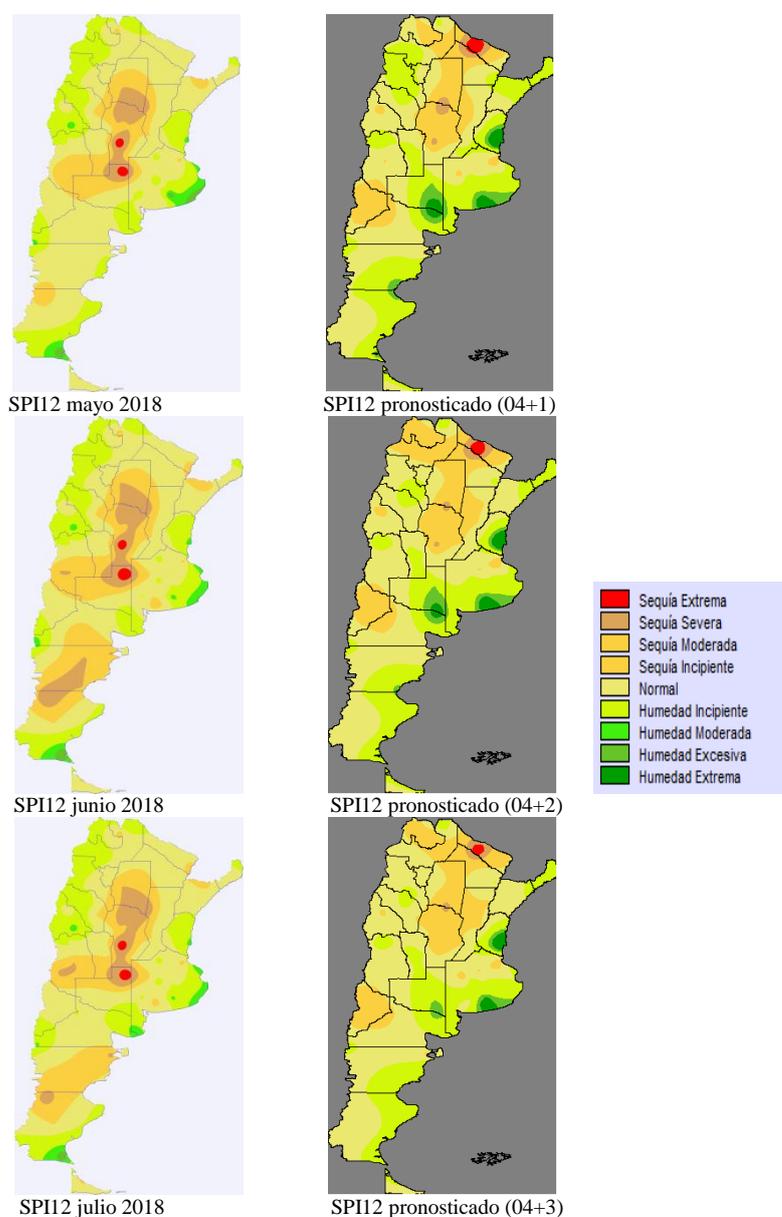


Figura A6.12. Mapas del SPI12 observados vs. pronosticados para mayo, junio y julio a partir de SP12 de abril 2018.

Pronóstico SPI12 para junio, julio y agosto 2018

El pronóstico del índice SPI12 para los meses de junio, julio y agosto indicaría: condiciones de sequías incipientes y moderadas para las provincias de Córdoba, Santa Fe, Santiago del Estero, Norte de Buenos Aires y Neuquén. Sequías severas para zona noreste de la provincia de Córdoba. Humedad incipientes y moderadas hacia el sur de La Pampa y sureste de la provincia de Buenos Aires, Catamarca, Salta y Misiones, el resto de país presenta condiciones normales. Existen diferencias entre los mapas observados y pronosticados ya que los primeros señalan sequías de mayor intensidad en gran parte de la región pampeana, NEA, Cuyo y Patagonía

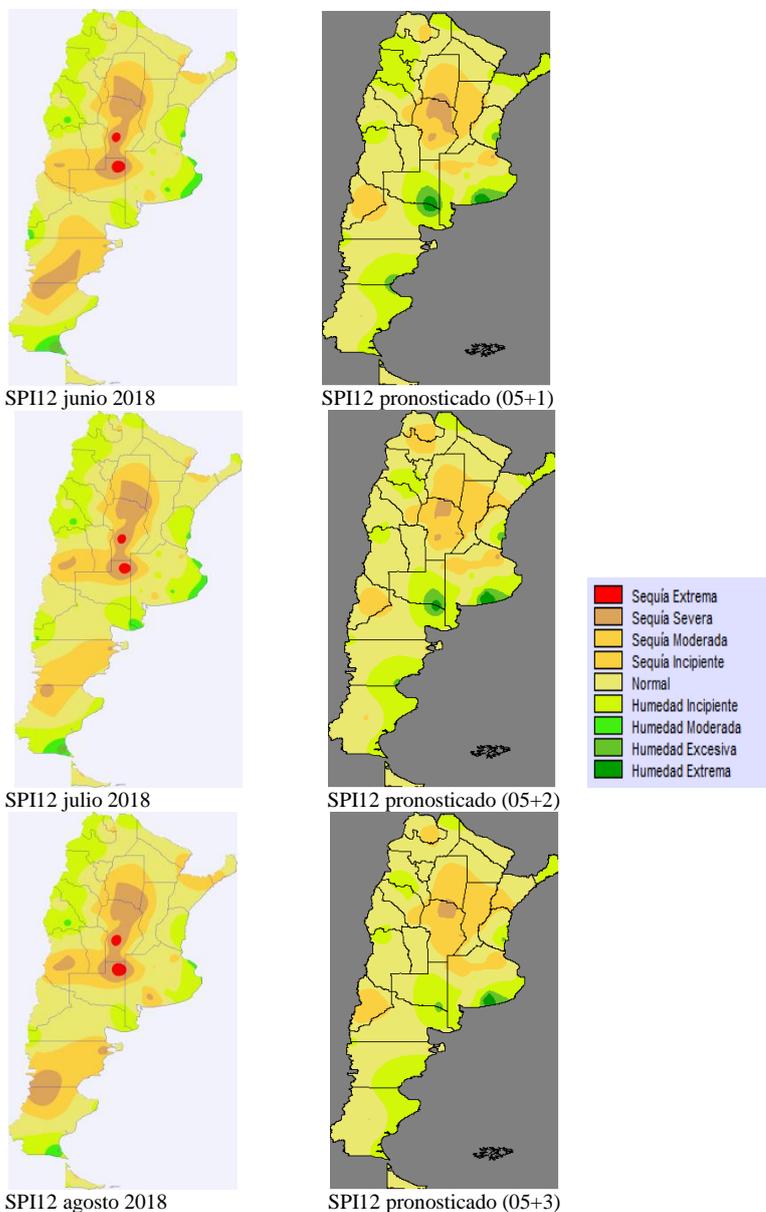


Figura A6.13. Mapas del SPI12 observados vs. pronosticados para junio, julio y agosto a partir de SPI12 de mayo 2018.

Pronóstico SPI12 para julio, agosto y setiembre 2018 cuerpo de tesis, (Fig. 3.46, Pág. 87)

Pronóstico SPI12 para agosto, setiembre y octubre 2018

El pronóstico del índice SPI12 para los meses de agosto, setiembre y octubre indicaría condiciones de sequías entre moderadas a severas hacia la parte centro-norte y en lugares puntuales como las localidades de Pilar, Río Cuarto y Villa de María de Río Seco sequías extremas, en la provincia de Córdoba. Condiciones normales hacia el NO, Cuyo y parte Sudeste de Buenos Aires, el resto de país presenta condiciones sequías incipientes.

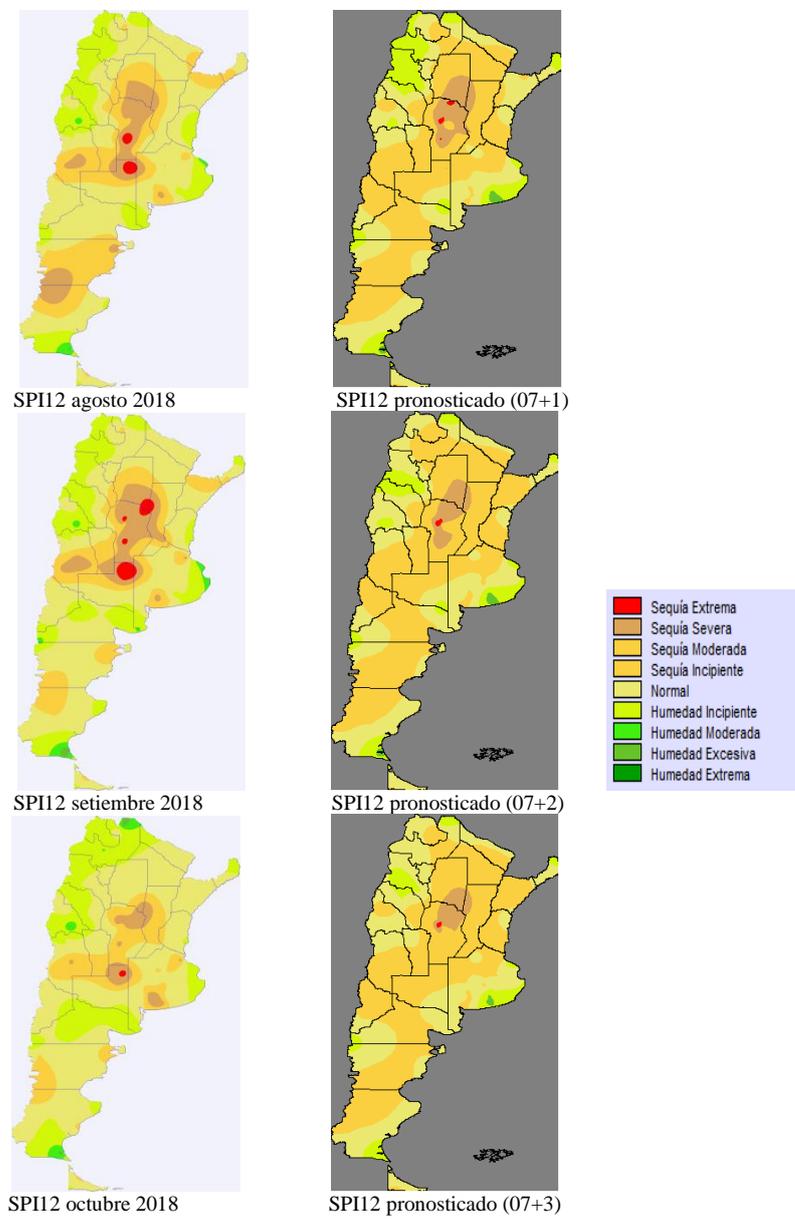
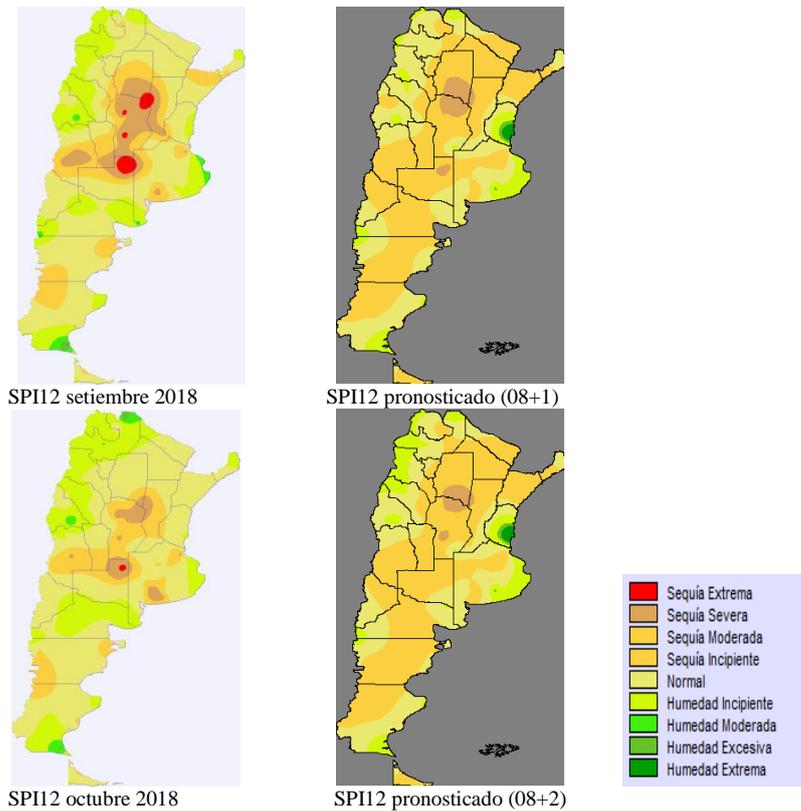


Figura A6.14. Mapas del SPI12 observados vs. pronosticados para agosto, setiembre y octubre a partir de SPI12 de julio 2018.

Pronóstico SPI12 para setiembre, octubre y noviembre 2018

El índice SPI12 pronosticado para los meses de primavera indicaría condiciones de sequías entre normales y moderadas en casi todo el país, severas hacia el norte de Córdoba, puntualmente en Villa de María de Río Seco. Condiciones humedad normales a moderadas en el NOA, Cuyo y parte Sudeste de Buenos Aires y Entre Ríos. Existen diferencias entre mapas observados y pronosticados en las categorías de sequías severas y extremas, que están mucho más marcadas prevaleciendo en la región central, parte del NOA y Cuyo del grado de sequedad observado.



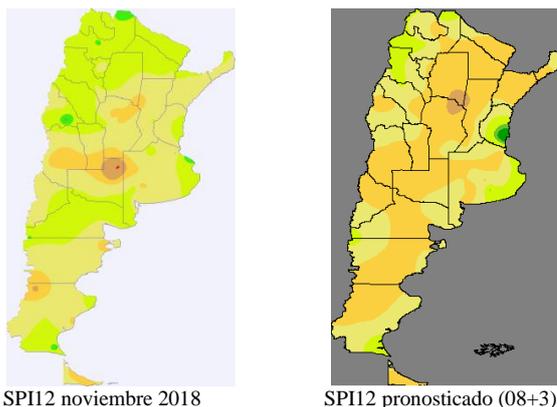
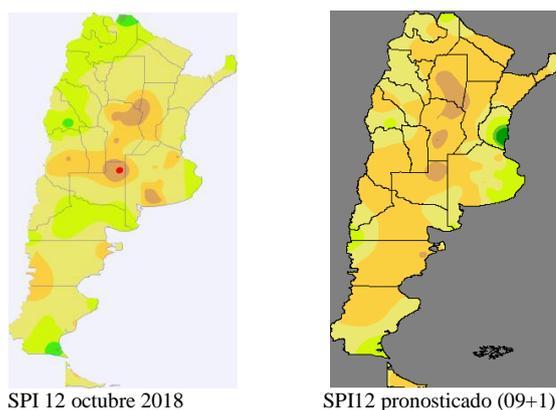


Figura A6.15. Mapas del SPI12 observados vs. pronosticados para setiembre, octubre y noviembre a partir de SPI12 de agosto 2018.

Pronóstico SPI12 para octubre, noviembre y diciembre 2018

El índice SPI12 indicaría condiciones de sequías incipientes y moderadas en casi todo el país, particularmente en octubre se presentan áreas reducidas de sequía severas en el centro-norte de la provincia de Córdoba que pasan a condiciones normales en los meses siguientes. Para Entre Ríos, se observa humedad normal a moderadas y este de Buenos Aires. Entre las diferencias que existen entre los mapas observados y pronosticados es que los primeros presentan condiciones de humedad moderada para NOA, Cuyo y norte de Patagonia que no se observa en los pronosticados.



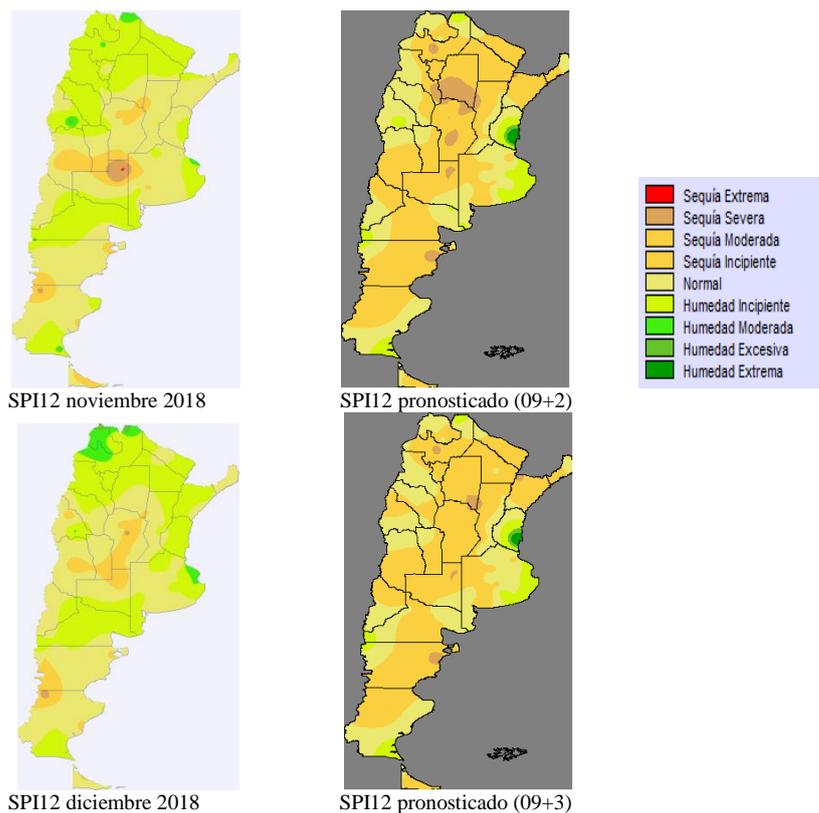


Figura A6.16. Mapas del SPI12 observados vs. pronosticados para octubre, noviembre y diciembre a partir de SPI12 de setiembre 2018.

Pronóstico SPI12 para noviembre y diciembre 2018 y enero 2019

El índice SPI12 pronosticado indicaría: condiciones de sequías incipientes y moderadas en casi todo el país, particularmente en octubre se presentan áreas reducidas de sequía severas en el centro-norte de la provincia de Córdoba que pasan a condiciones normales en los meses siguientes. Para Entre Ríos, se observa humedad normal a moderadas y este de Buenos Aires. A modo comparativo podemos decir que a tres meses se diferencia sustancialmente dado que indica sequía donde hay excesos incipientes y moderados.

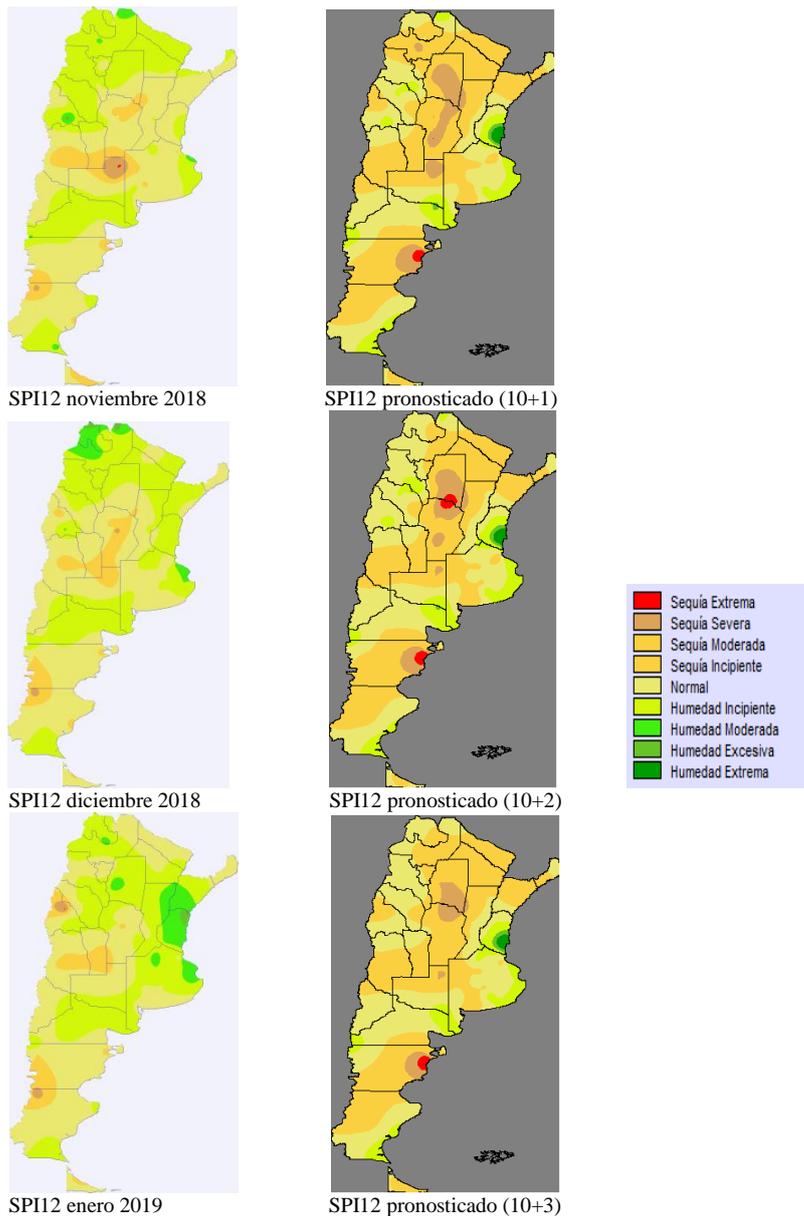


Figura A6.17. Mapas del SPI12 observados vs. pronosticados para noviembre, diciembre y enero de a partir de SPI12 de octubre 2018.

Pronóstico SPI12 para diciembre y enero 2018 y febrero 2019

El índice SPI12 pronosticado para los meses de verano indicaría: condiciones de sequías incipientes y normales en casi todo el país, durante diciembre se presentan áreas reducidas de sequía severas en retroceso en el centro-norte de la provincia de Córdoba que pasan a condiciones normales en los meses siguientes. Sequías severas-extremas en Trelew, Chubut. A tres meses se diferencia sustancialmente los observados y pronosticados, dado que indica sequía donde hay humedad moderadas y excesivas en el NOA, NEA, RP,

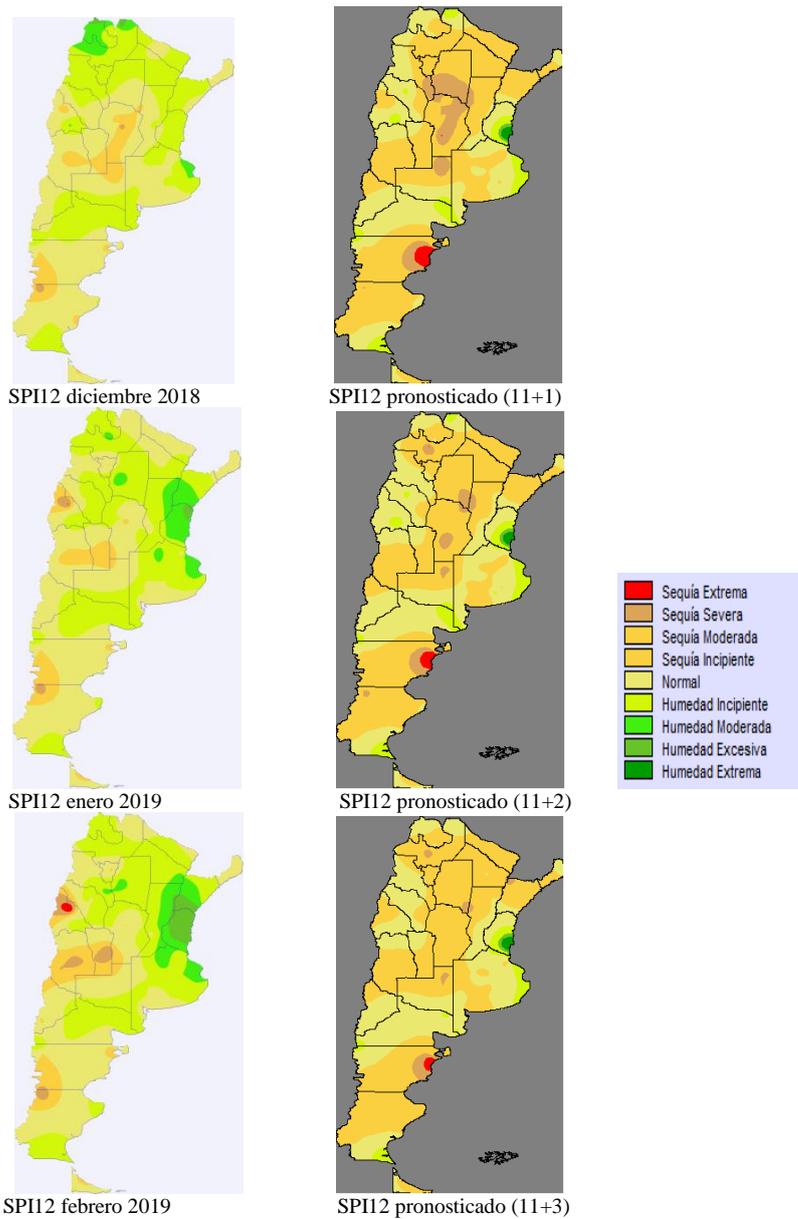


Figura A6.18. Mapas del SPI12 observados vs. pronosticados para diciembre, enero y febrero a partir de SPI12 de noviembre 2018.

Pronóstico SPI12 para enero, febrero y marzo 2019

El índice SPI12 pronosticado para los meses de verano indicaría: condiciones de sequías moderadas e incipientes en casi todo el país, sequías severas-extremas en Trelew, Chubut. A tres meses se diferencia sustancialmente los observados y pronosticados, dado que indica sequía donde hay humedad incipiente, moderadas y excesivas en el NOA, NEA, RP.

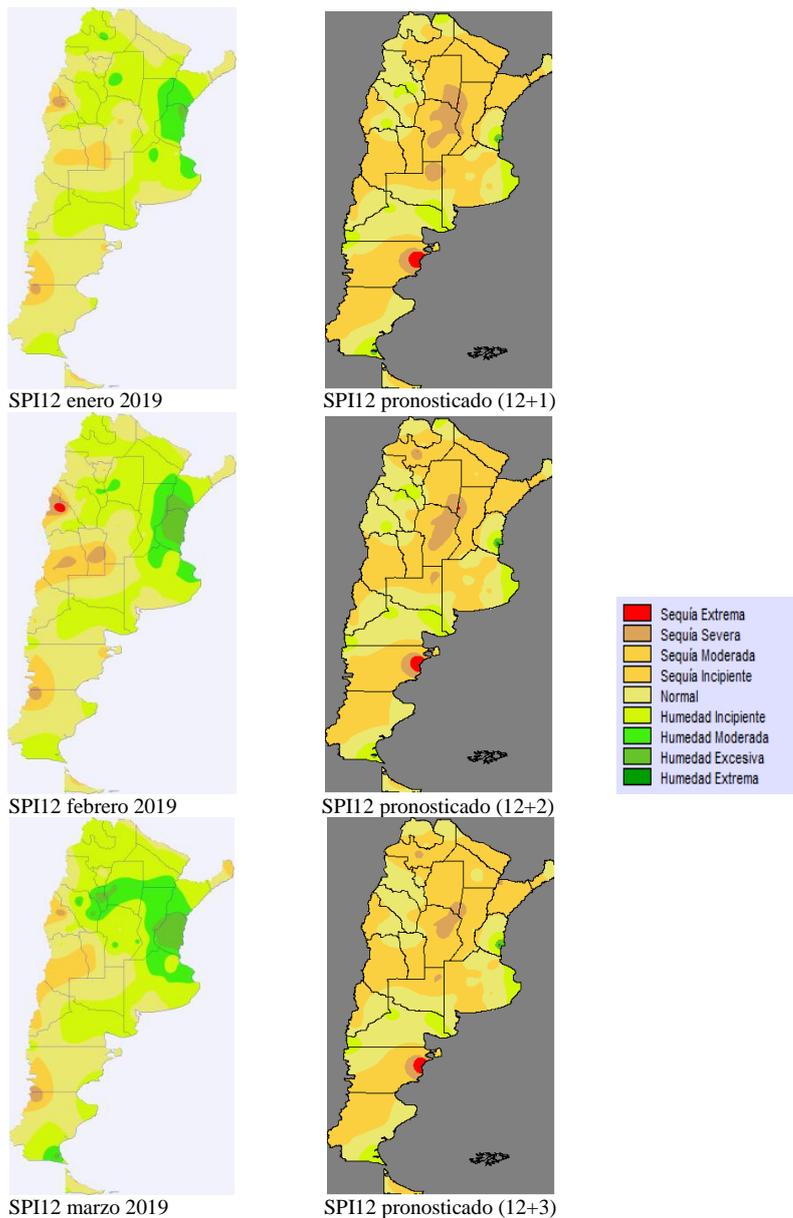


Figura A6.19. Mapas del SPI12 observados vs. pronosticados para enero, febrero y marzo a partir de SPI12 de diciembre 2018.

Pronóstico SPI12 para febrero, marzo y abril 2019

El índice SPI12 pronosticado para los meses de verano indicaría: condiciones Normales con sequías incipientes a moderadas en casi todo el país, con áreas muy reducidas de humedad moderada en Neuquén, Río Negro y porción Oeste de Salta y Jujuy. El SPI12 observado muestra un mayor contenido de humedad en el NEA y NOA respecto a los mapas pronosticados.

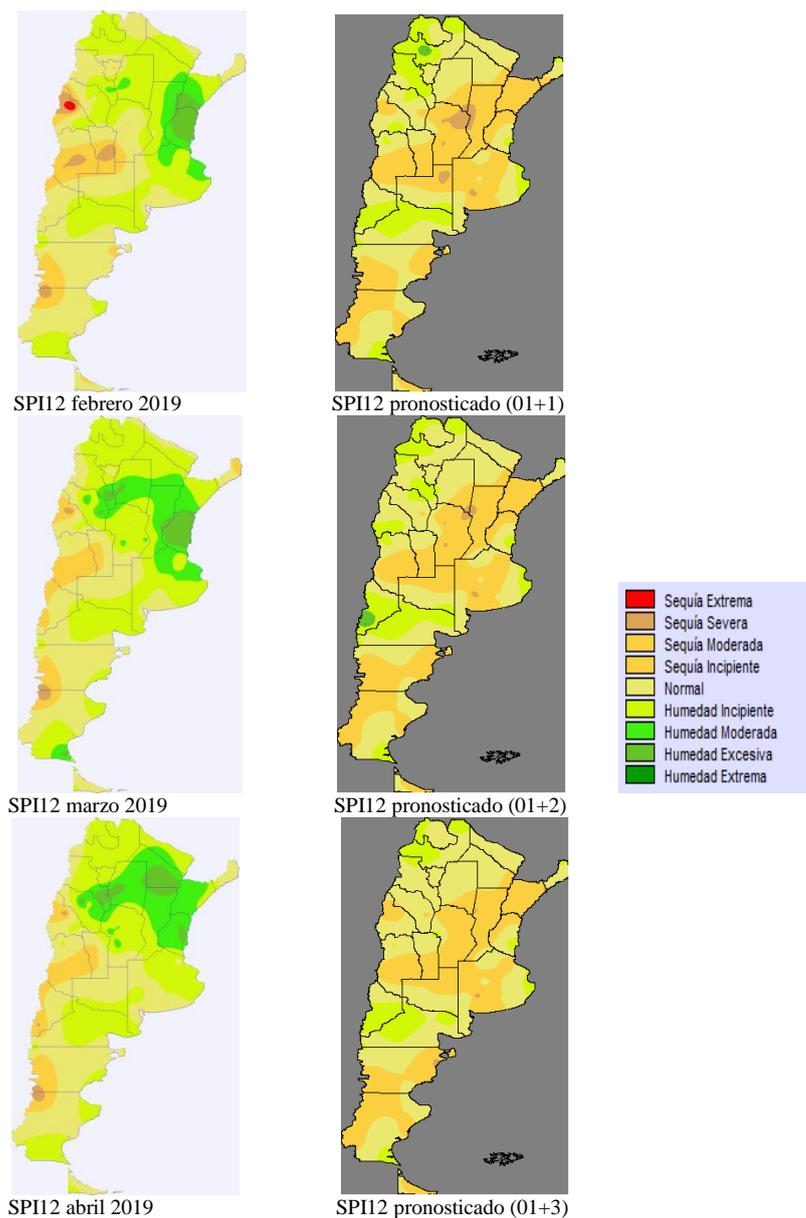


Figura A6.20. Mapas del SPI12 observados vs. pronosticados para febrero, marzo y abril a partir de SPI12 de enero 2019.

Pronóstico SPI12 para marzo, abril y mayo 2019

El índice SPI12 pronosticado para los meses de otoño indicaría: condiciones Normales con sequías incipientes a moderadas en casi todo el país, con áreas reducidas de humedad incipiente y moderada en la región del NOA, Salta, Jujuy y Catamarca; NEA, sur de Entre Ríos y RPA, norte de Río Negro. El mapa observado muestra un mayor contenido de humedad en el NEA y RP respecto a los mapas pronosticados.

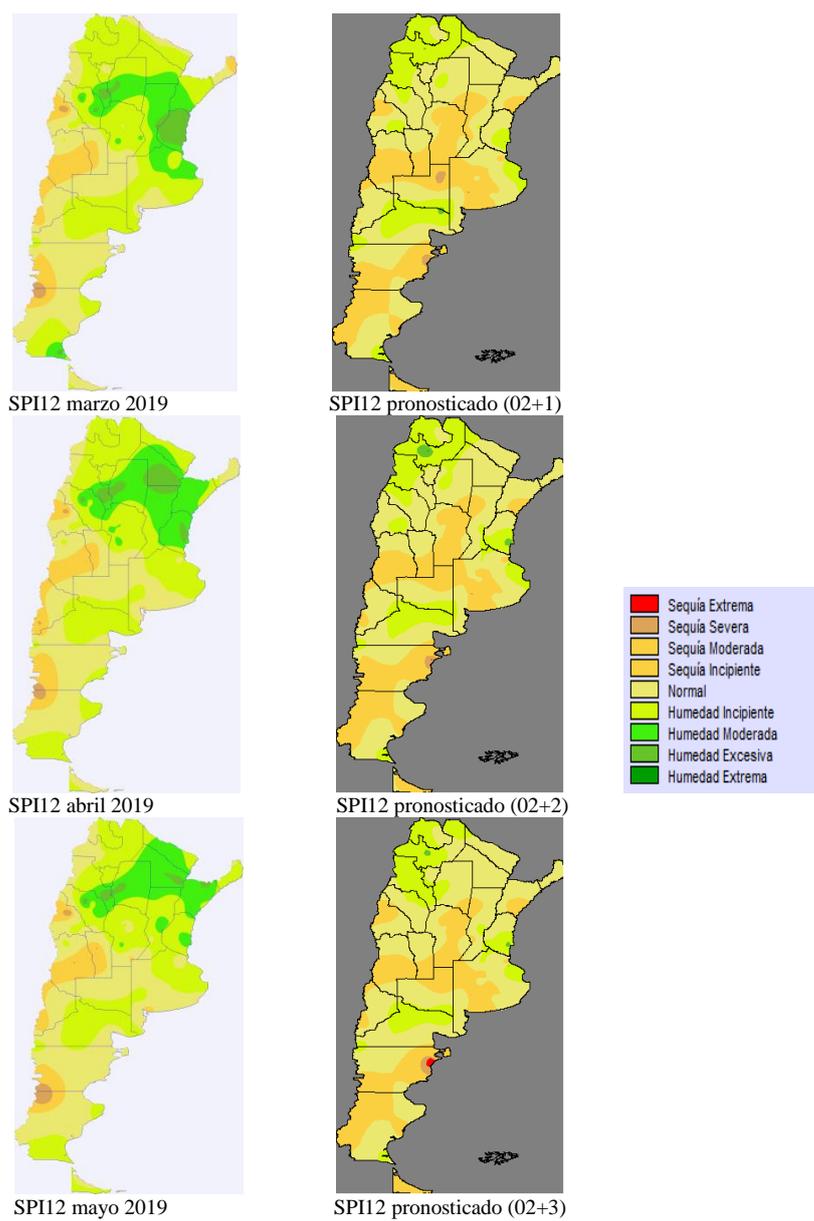


Figura A6.21. Mapas del SPI12 observados vs. pronosticados para marzo, abril y mayo a partir de SPI12 de febrero 2019.

Pronóstico SPI12 para abril, mayo y junio 2019

El índice SPI12 pronosticado para los meses de otoño indicaría: condiciones Normales con sequías incipientes a moderadas en casi todo el país, con áreas reducidas de humedad incipiente y moderada en la región del NOA, Salta, Jujuy y Catamarca; sureste de Entre Rios y norte de Río Negro. Con respecto a las diferencias entre los mapas observados y pronosticados vemos que estos presentan humedad moderada y excesiva en la región NEA y gran parte del NOA.

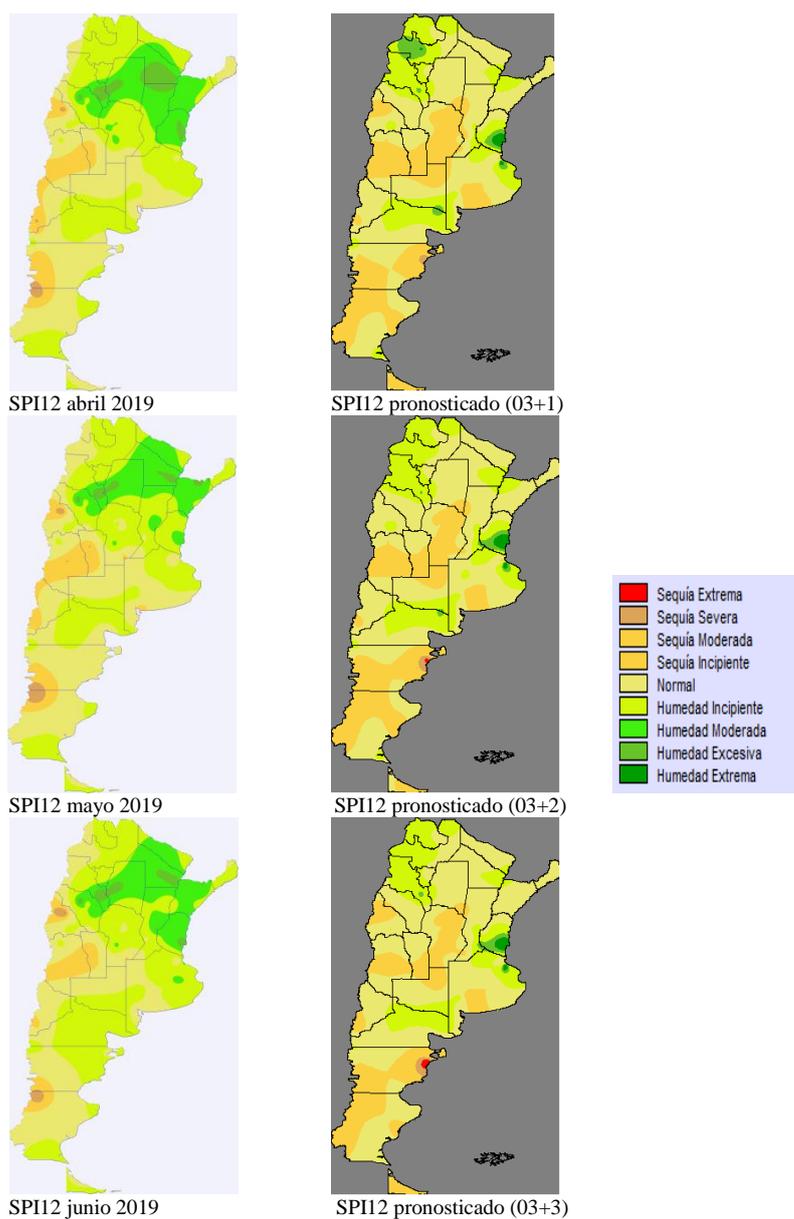


Figura A6.22. Mapas del SPI12 observados vs. pronosticados para abril, mayo y junio a partir de SPI12 de marzo 2019.

Pronóstico SPI12 para mayo, junio y julio 2019

El pronóstico trimestral del SPI12, período mayo-julio: predominan condiciones de humedad extrema para Entre Ríos, humedad moderada en Corrientes, Santa Fe, centro y norte de Buenos Aires, centro de Santiago del Estero, sureste de Catamarca y Jujuy; con humedad normal regiones centro y cuyo; sequías incipientes a moderadas en región de la Patagonía.

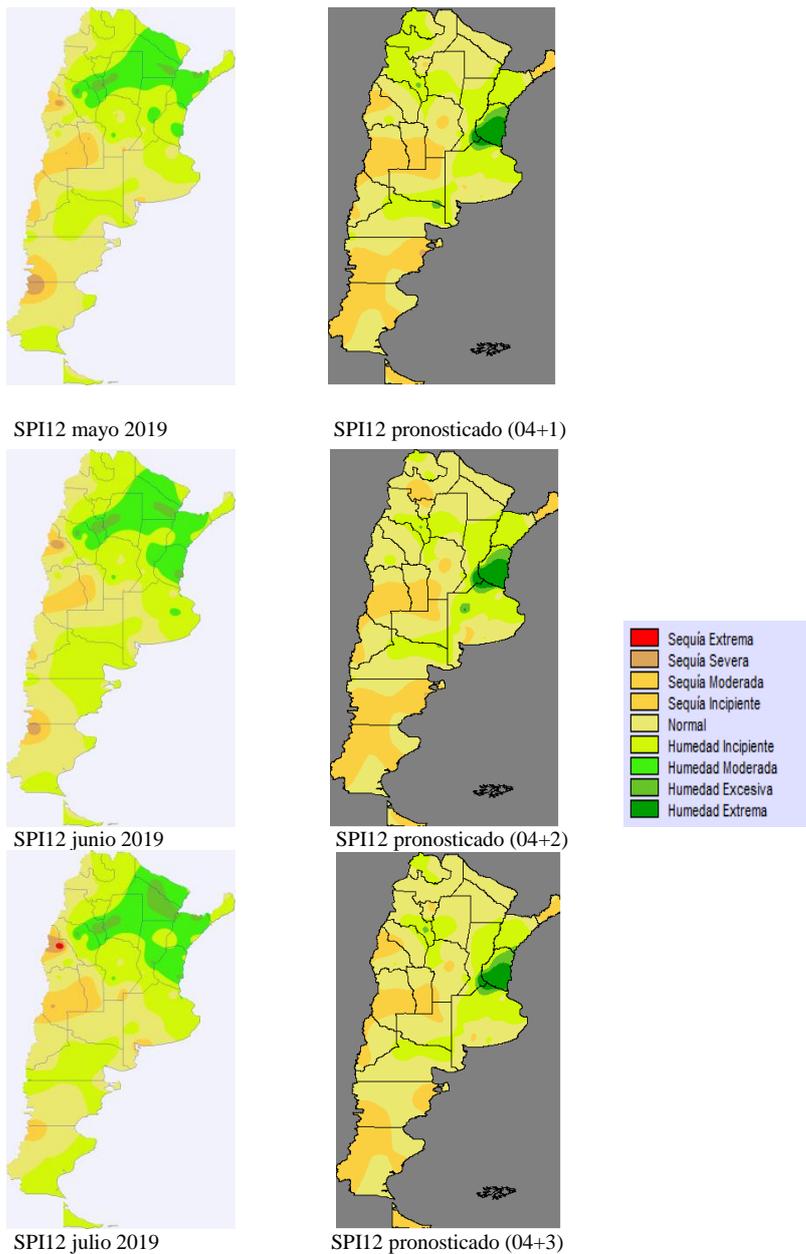


Figura A6.23. Mapas del SPI12 observados vs. pronosticados para mayo, junio y julio a partir de SPI12 de abril 2019.

Pronóstico SPI12 para junio, julio y agosto 2019

El pronóstico trimestral del SPI12, período junio-agosto: continua las condiciones de humedad extrema en Entre Ríos, sudeste de Santa Fe y límite norte de Buenos Aires; humedad moderada e incipiente en el sur de Corrientes, centro-norte de Buenos Aires,

Santa Fe, centro-sur de Santiago del Estero, Catamarca, Salta y Jujuy, sureste de La Pampa y norte de Río Negro; sequías incipientes en región de cuyo, oeste de Patagonía; humedad normal resto del país. Con respecto a las diferencias entre los mapas observados y pronosticados vemos que estos presentan humedad moderada y excesiva en la región NEA, gran parte del NOA y norte de la Patagonia.

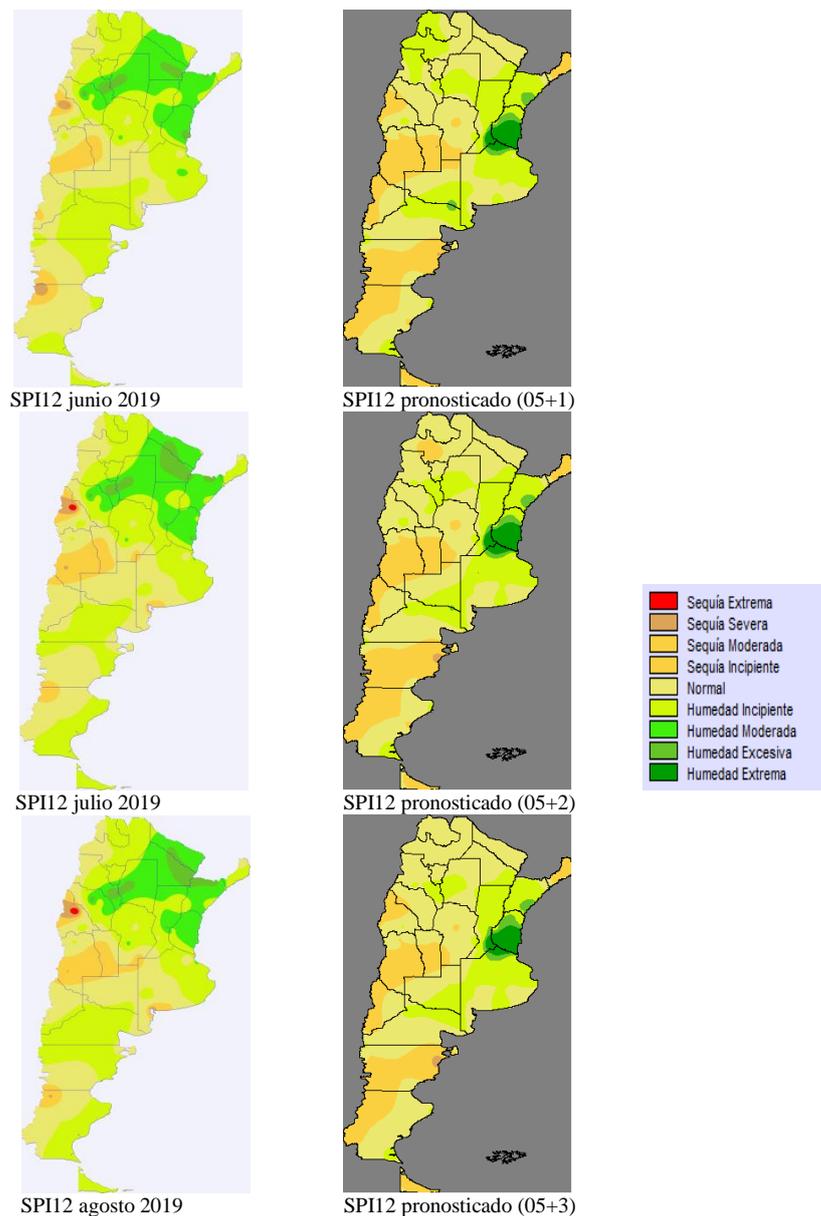


Figura A6.24. Mapas del SPI12 observados vs. pronosticados para junio, julio y agosto a partir de SPI12 de mayo 2019.

Pronóstico SPI12 para julio, agosto y setiembre 2019

El pronóstico trimestral del SPI12, período julio-setiembre: continua bajo condiciones de humedad extrema en Entre Ríos y humedad moderada en regiones NEA, NOA, RP y noreste de Patagonía. Se diferencia con los mapas observados en que estos presentan una categoría de humedad mayor a la señalada en las mismas regiones de los mapas pronosticados y con una persistente sequía en San Juan.

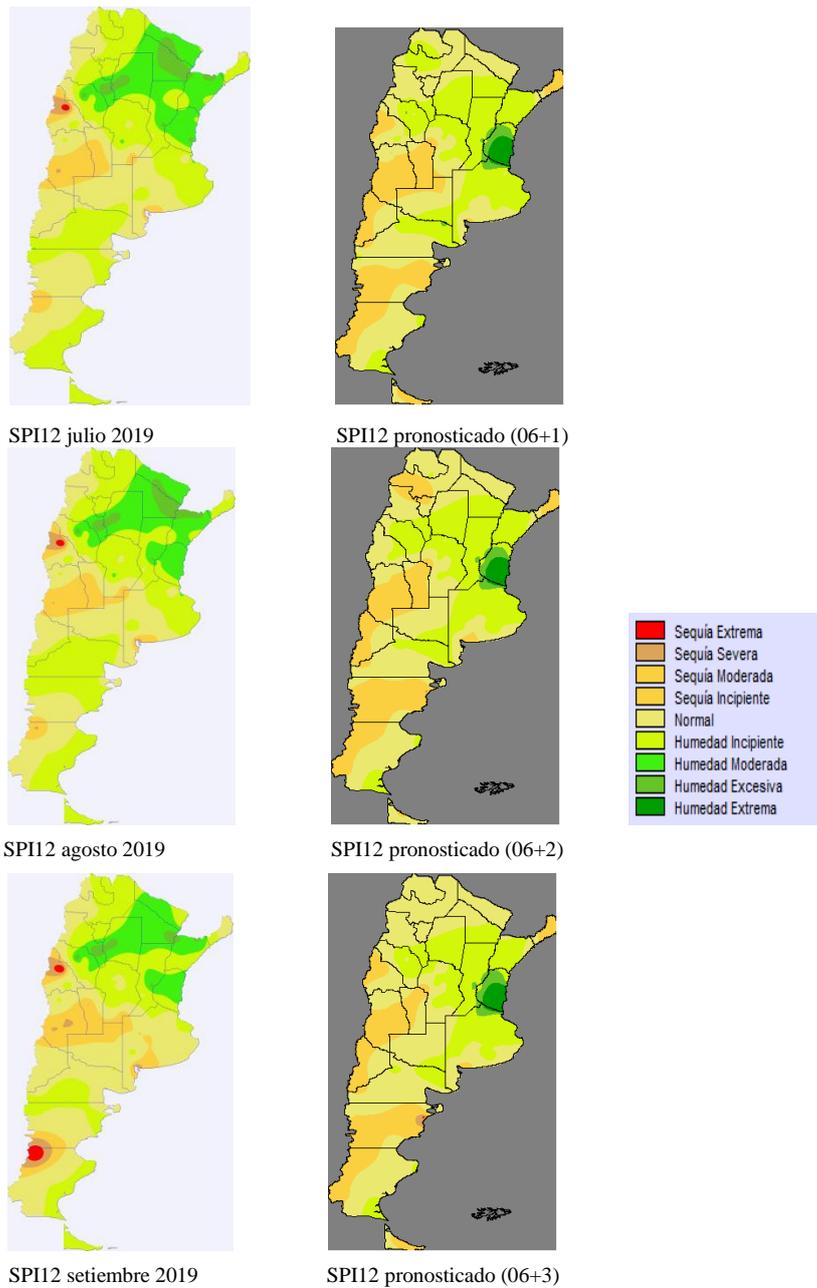


Figura A6.25. Mapas del SPI12 observados vs. pronosticados para julio, agosto y setiembre a partir de de SP12 de junio 2019

Pronóstico SPI12 para agosto, setiembre y octubre 2019

El pronóstico del índice SPI12, período agosto-octubre indicaría: condiciones de humedad excesiva-severa en el centro-sur de Entre Ríos; regiones NEA, NOA, Pampeana, humedad moderada-normal; Cuyo normal y Patagonia sequías incipientes a moderadas. Las diferencias que presentan los mapas observados y pronosticados es en la franja oeste del país de norte a sur con sequías extremas y severas en las provincias de San Juan y límite ente Chubut y Santa Cruz abarcando a casi toda la Patagonía.

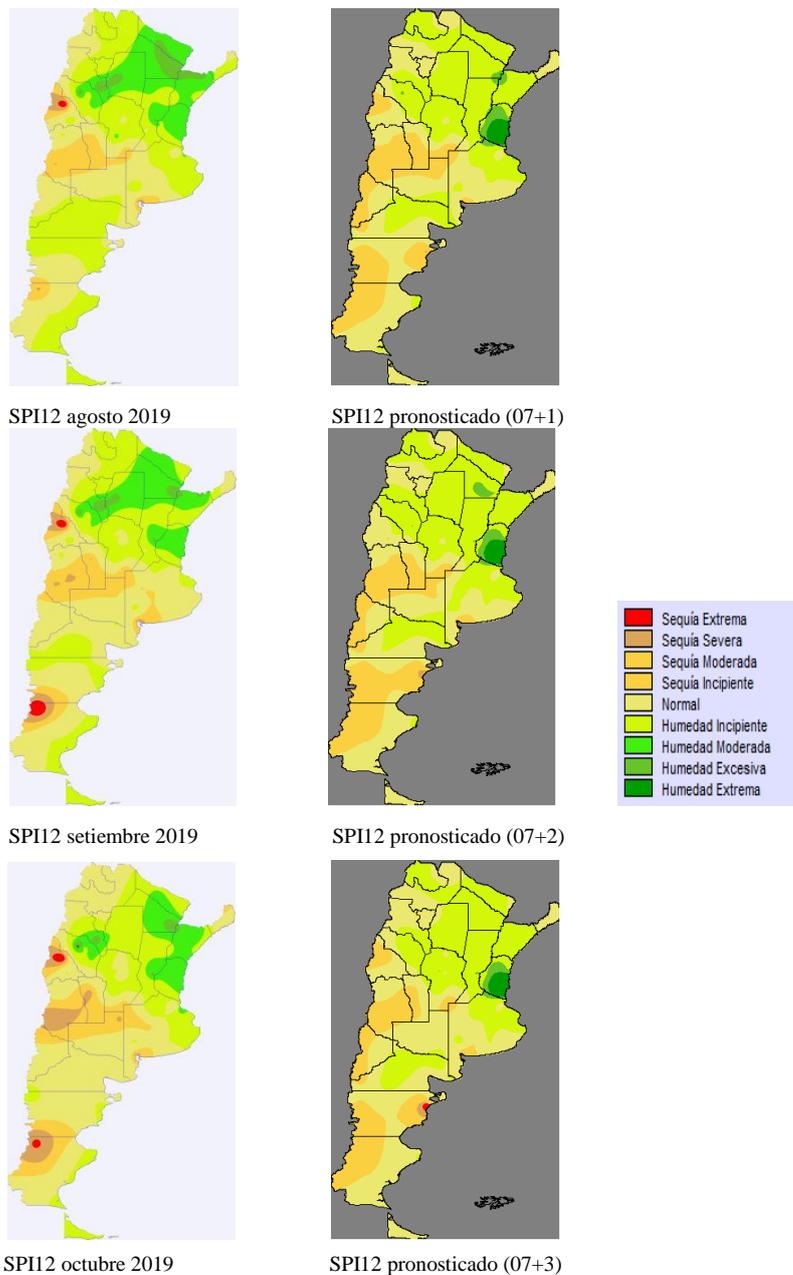
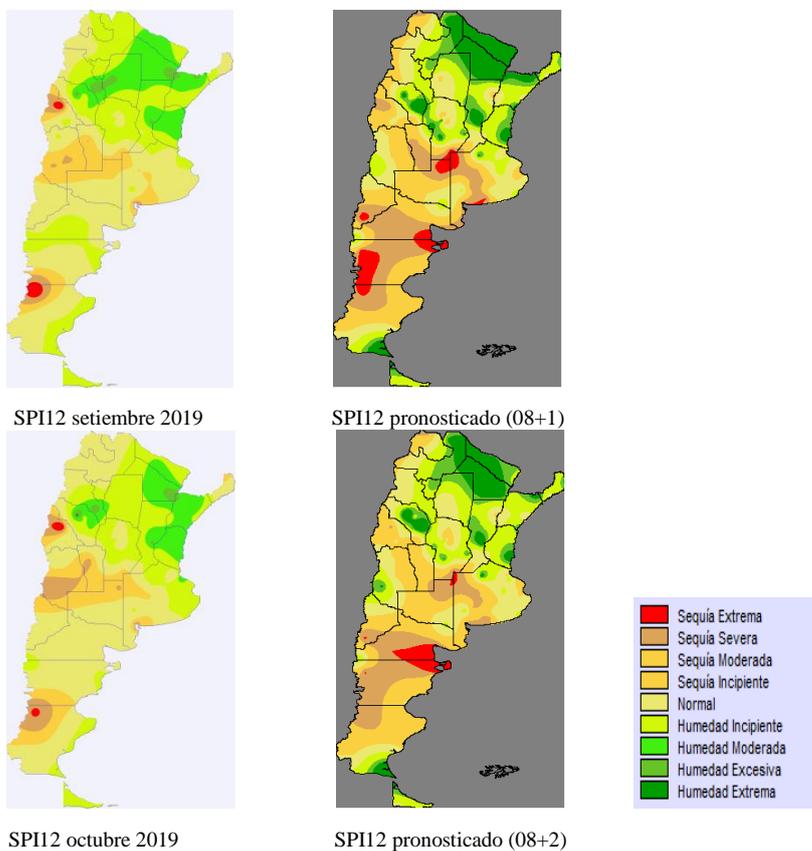
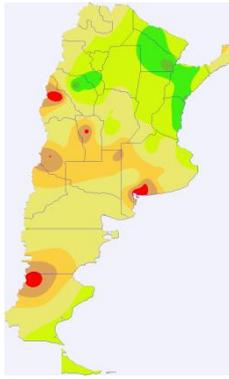


Figura A6.26. Mapas del SPI12 observados vs. pronosticados para agosto, setiembre y octubre a partir de SPI12 de julio 2019.

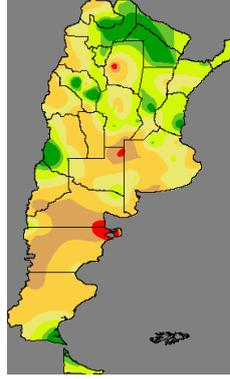
Pronóstico SPI12 para setiembre, octubre y noviembre 2019

El pronóstico del SPI12 para el trimestre setiembre-noviembre: se pronostican condiciones humedad normal en la RP, NOA y NEA en general, con sequías moderadas y severas en el noroeste y sudoeste de Buenos Aires, norte de La Pampa y sequías severas en Puerto Madryn y Esquel. Hacia el norte de la región NEA, se presentan condiciones de humedad excesivas a extremas en Salta, Chaco, Formosa, centro de Santa Fe, este de La Rioja y este de Entre Ríos. Las diferencia con los mapas observados esta en las diferentes categorías de humedad que presentan en las mismas regiones del NEA y NOA, siendo de mayor intensidad en los mapas pronosticados. En Patagonía tambien son de una mayor intensidad las sequías en los mapas pronosticados respecto a los observados.





SPI12 noviembre 2019



SPI12 pronosticado (08+3)

Figura A6.27. Mapas del SPI12 observados vs. pronosticados para setiembre, octubre y noviembre a partir de SPI12 de agosto 2019.