



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL**

Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas

**VARIABILIDAD Y CAMBIOS ESPACIO-TEMPORALES  
DE LOS EVENTOS EXTREMOS DE PRECIPITACIÓN Y  
SUS EFECTOS EN LOS SUBSISTEMAS ACOPLADOS  
ZONA NO SATURADA-ACUÍFERO LIBRE EN LA  
PROVINCIA DE SANTA FE**

**Anelim C. Bernal M.**

Tesis remitida al Comité Académico de Maestría  
como parte de los requisitos para la obtención  
del grado de  
MAGISTER EN INGENIERÍA  
DE LOS RECURSOS HÍDRICOS  
de la  
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL

**2021**

Comisión de Posgrado, Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Ciudad Universitaria, Paraje "El Pozo",  
S3000, Santa Fe, Argentina.



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL**

Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas

**VARIABILIDAD Y CAMBIOS ESPACIO-TEMPORALES  
DE LOS EVENTOS EXTREMOS DE PRECIPITACIÓN Y  
SUS EFECTOS EN LOS SUBSISTEMAS ACOPLADOS  
ZONA NO SATURADA - ACUÍFERO LIBRE EN LA  
PROVINCIA DE SANTA FE**

**Anelim C. Bernal M.**

**Lugar de Trabajo:**

CEVARCAM

Centro de Estudios de Variabilidad y Cambio Climático

Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas

Universidad Nacional Del Litoral

**Director**

Miguel A. Lovino

Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas

Universidad Nacional del Litoral

**Co-director**

Gabriela V. Müller

Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas

Universidad Nacional del Litoral

**2021**



## ACTA DE EVALUACIÓN DE TESIS DE MAESTRÍA

En la sede de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la Universidad Nacional del Litoral, en la ciudad de Santa Fe, a los dieciséis días del mes de marzo del año 2021 se reúnen en forma virtual los miembros del Jurado designado para la evaluación de la Tesis de Maestría en Ingeniería de los Recursos Hídricos titulada *“Variabilidad y cambios espacio-temporales de los eventos extremos de precipitación y sus efectos en los subsistemas acoplados zona no saturada-acuífero libre en la provincia de Santa Fe”*, desarrollada por la Ing. Anelím Carolina BERNAL MUJICA, Pasaporte N.º 112371694, bajo la dirección del Dr. Miguel Lovino y la codirección de la Dra. Gabriela Müller. Ellos son: el Dr. Juan Rivera, Dra. Marcela Pérez y Dr. Federico Ariel Robledo.-----

La presentación oral y defensa de la Tesis se efectúa bajo la modalidad virtual según lo establecido por Resolución de Rector N° 529/20 y Resolución de Consejo Directivo N° 015/20. -----

Escuchada la Defensa Pública y evaluada la Tesis, el Jurado resuelve:

La investigación realizada es original y aporta resultados significativos en zonas de llanura que permiten avanzar en el entendimiento de eventos extremos de precipitación y su relación con la humedad del suelo en diferentes niveles. Este trabajo proporciona información relevante para explorar posibles impactos en el sector agropecuario y en situaciones de riesgo hídrico urbano. La presentación oral del trabajo ha sido clara y concisa, resaltando los aspectos principales de la investigación y ajustándose a los tiempos establecidos. Por tal motivo este jurado aprueba la Tesis con calificación Diez (Sobresaliente).

Sin más, se da por finalizado el Acto Académico con la firma de los miembros del Jurado al pie de la presente -----

-----  
Dr. Juan Rivera

-----  
Dra. Marcela Pérez

-----  
Dr. Federico Robledo



Dr. JOSÉ LUIS MACOR  
SECRETARIO DE POSGRADO  
Facultad de Ingeniería y Cs. Hídricas

Universidad Nacional del Litoral  
Facultad de Ingeniería y  
Ciencias Hídricas  
  
Secretaría de Posgrado

Ciudad Universitaria  
C.C. 217  
Ruta Nacional N° 168 – Km. 472,4  
(3000) Santa Fe  
Tel: (54) (0342) 4575 229  
Fax: (54) (0342) 4575 224  
E-mail: posgrado@fich.unl.edu.ar



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL**  
**Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas**

Santa Fe, 16 de marzo de 2021.

Como miembros del Jurado Evaluador de la Tesis de Maestría titulada "*Variabilidad y cambios espacio-temporales de los eventos extremos de precipitación y sus efectos en los subsistemas acoplados zona no saturada-acuífero libre en la provincia de Santa Fe*", desarrollada por la Ing. Anelim Carolina BERNAL MUJICA, certificamos que hemos evaluado la Tesis y recomendamos que sea aceptada como parte de los requisitos para la obtención del título de Magister en Ingeniería de los Recursos Hídricos. La aprobación final de esta disertación está condicionada a la presentación de dos copias encuadernadas de la versión final de la Tesis ante el Comité Académico de la Maestría en Ingeniería de los Recursos Hídricos.

-----  
Dr. Juan Rivera

-----  
Dra. Marcela Pérez

-----  
Dr. Federico Robledo

Santa Fe, 16 de marzo de 2021

Certifico haber leído esta Tesis preparada bajo mi dirección y recomiendo que sea aceptada como parte de los requisitos para la obtención del título de Magister en Ingeniería de los Recursos Hídricos.

-----  
Dra. Gabriela Müller

-----  
Dr. Miguel Lovino



Dr. JOSÉ LUIS MACOR  
SECRETARIO DE POSGRADO  
Facultad de Ingeniería y Cs. Hídricas

**Universidad Nacional del Litoral**  
Facultad de Ingeniería y  
Ciencias Hídricas  
  
Secretaría de Posgrado

Ciudad Universitaria  
C.C. 217  
Ruta Nacional Nº 168 - Km. 472,4  
(3000) Santa Fe  
Tel: (54) (0342) 4575 229  
Fax: (54) (0342) 4575 224  
E-mail: posgrado@fich.unl.edu.ar

## **DECLARACION DEL AUTOR**

Esta Tesis ha sido remitida como parte de los requisitos para la obtención del grado académico Maestría en Gestión Ambiental ante la Universidad Nacional del Litoral y ha sido depositada en la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas para que esté a disposición de sus lectores bajo las condiciones estipuladas por el reglamento de la mencionada Biblioteca.

Citaciones breves de esta Tesis son permitidas sin la necesidad de un permiso especial, en la suposición de que la fuente sea correctamente citada. Solicitudes de permiso para la citación extendida o para la reproducción parcial o total de ese manuscrito serán concebidos por el portador legal del derecho de propiedad intelectual de la obra.



---

Anelim Bernal

## AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi gratitud a la Organización Meteorológica Mundial quien ha financiado mi formación académica en la Maestría de Ingeniería de los Recursos Hídricos.

Al Centro de Estudios de Variabilidad y Cambio Climático (CEVARCAM), Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH) de la Universidad Nacional del Litoral (UNL) por haberme brindado durante este tiempo las herramientas necesarias para desarrollar y culminar esta tesis.

A mi director, Miguel Lovino, por su paciencia, enseñanza, dedicación y seguimiento a través de este año de aprendizaje y trabajo conjunto. A Gabriela Müller, co-directora del trabajo, por permitirme enriquecer esta tesis, a través de sus sugerencias, correcciones y consejos.

A mi madre Ana Milena, mi tía Blanca María y a mi abuela Miloslava (†) quienes me enseñaron cómo alcanzar las metas con su constancia, ejemplo y quienes simplemente fueron mi apoyo en todo momento de forma incondicional. Sin dejar a un lado mi hermano Anthony, por ser mi apoyo en el camino de la vida.

A quienes estuvieron dispuestos a ayudarme en las distintas instancias de la Maestría. En especial a Ninoska y Martin por su amistad y ayuda incondicional que nunca dejaron de aconsejarme y alentarme en esta etapa de mi carrera. A Gregory, Soorel, Gabriela y Daniel por su paciencia, por apoyarme y acompañarme a la distancia. A Marilia por compartir su experiencia y por su compañerismo. A Cintia por abrirme las puertas de su casa para mi estadía en Santa Fe y mostrarme un poco de la cultura argentina.

Finalmente, a aquellos que hicieron todo esto posible y que influyeron en mí, para hoy lograr la meta trazada la cual es un punto de llegada y de partida a la vez.

## ÍNDICE GENERAL

|  |    |
|--|----|
| Capítulo 1: Introducción general y objetivos.....  | 1  |
| 1.1 Antecedentes.....  | 1  |
| 1.2 Motivación y Justificación.....  | 3  |
| 1.3 Objetivos.....   | 4  |
| 1.3.1 Objetivo General.....  | 4  |
| 1.3.2 Objetivos Específicos.....   | 4  |
| 1.4 Breve descripción de los capítulos.....  | 4  |
| 1.5 Referencias Bibliográficas.....  | 6  |
| Capítulo 2: Variabilidad espacio-temporal de los eventos extremos e interacción<br>entre los subsistemas zona no saturada y zona saturada..... | 9  |
| 2.1 Introducción.....  | 9  |
| 2.2 Datos y análisis de variables.....   | 11 |
| 2.2.1 Análisis de la precipitación.....  | 11 |
| 2.2.2 Análisis de la humedad del suelo.....  | 16 |
| 2.2.3 Análisis del nivel freático.....   | 17 |
| 2.3 Metodología.....   | 19 |
| 2.3.1 Índices Estandarizados no Paramétricos.....  | 19 |
| 2.3.2 Análisis de Componentes Principales.....   | 20 |
| 2.3.1 Análisis Espectral Singular.....   | 21 |
| 2.4 Resultados.....  | 22 |
| 2.4.1 Identificación de los eventos extremos.....  | 22 |
| 2.4.1.1 Promedio espacial.....   | 22 |

|  |    |
|--|----|
| 2.4.1.2 Estaciones .....   | 27 |
| 2.4.2 Distribución espacio temporal de los eventos extremos.....                               | 32 |
| 2.4.3 Respuesta de la zona saturada .....  | 38 |
| 2.5 Conclusiones.....  | 40 |
| 2.6 Referencias Bibliográficas .....   | 43 |
|  |    |
| Capítulo 3: Intensidad y frecuencia de eventos extremos de precipitación y<br>humedad de suelo | 47 |
| 3.1 Introducción.....  | 47 |
| 3.2 Datos y metodología .....  | 49 |
| 3.2.1 Características edáficas de la región de estudio .....                                   | 49 |
| 3.2.2 Extremos de precipitación.....   | 50 |
| 3.2.3 Zona no saturada .....   | 51 |
| 3.3 Resultados.....  | 52 |
| 3.3.1 Extremos de precipitación.....   | 52 |
| 3.3.1.1 Estación Ceres.....  | 52 |
| 3.3.1.2 Estación Reconquista.....  | 53 |
| 3.3.1.3 Estación Rafaela .....   | 54 |
| 3.3.1.4 Estación Paraná.....   | 55 |
| 3.3.1.5 Estación Marcos Juárez.....  | 56 |
| 3.3.1.6 Estación Rosario .....   | 57 |
| 3.3.1.7 Estación Laboulaye.....  | 58 |
| 3.3.1.8 Estación Pergamino .....   | 59 |
| 3.3.2 Respuesta de la zona no saturada .....   | 60 |
| 3.3.2.1 Ceres .....  | 60 |



|             |   |    |
|-------------|---|----|
| 3.3.2.2     | Reconquista.....  | 61 |
| 3.3.2.3     | Rafaela .....   | 62 |
| 3.3.2.4     | Paraná .....  | 63 |
| 3.3.2.5     | Marcos Juárez .....   | 64 |
| 3.3.2.6     | Rosario .....   | 65 |
| 3.3.2.7     | Laboulaye .....   | 66 |
| 3.3.2.8     | Pergamino .....   | 67 |
| 3.4         | Conclusiones.....   | 68 |
| 3.5         | Referencias Bibliográficas .....                                      | 70 |
| Capítulo 4: | Simulaciones de eventos extremos de precipitación .....               | 72 |
| 4.1         | Introducción.....   | 72 |
| 4.2         | Datos y metodología .....   | 73 |
| 4.2.1       | Modelos de Circulación General (MCG) y escenarios.....                | 73 |
| 4.2.2       | Caracterización de eventos extremos de precipitación en los MCG ..... | 74 |
| 4.3         | Resultados.....   | 75 |
| 4.3.1       | Modelo CanESM2.....   | 75 |
| 4.3.2       | Modelo CCSM4 .....  | 79 |
| 4.3.3       | Modelo NorESM1 .....  | 82 |
| 4.3.4       | Modelo INM-CM4.....   | 85 |
| 4.3.5       | Modelo CESM1 .....  | 88 |
| 4.3.6       | Ensamble.....   | 91 |
| 4.4         | Conclusiones.....   | 97 |
| 4.5         | Referencias Bibliográficas .....                                      | 98 |
| Capítulo 5: | Conclusiones generales .....  | 99 |

|   |     |
|---|-----|
| Anexos.....   | 102 |
| Anexo I: Correlación de las series temporales areales de SPI y SSI.....       | 102 |
| Anexo II: Series temporales SPI y SSI estaciones de la provincia de Santa Fe. | 103 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 2.1 Región de estudio y estaciones pluviométricas utilizadas (puntos rojos)  | 12 |
| Figura 2.2 Serie temporal de la precipitación total anual promediada en la región de estudio para las observaciones, GPCC v2018 y CRU TS 4.01 en el periodo (1911-2016).<br>.....   | 12 |
| Figura 2.3 Ciclo anual de la precipitación media espacial en el período 1986-2015 del área en estudio representado por las observaciones, CRU TS 4.01 y GPCC v2018. ....  | 13 |
| Figura 2.4 Distribución espacial de la precipitación media anual (mm) en el período normal 1986-2015: a) Observado, b) GPCC v2018, c) CRU TS 4.01 .....   | 14 |
| Figura 2.5 Diagramas de dispersión de datos de precipitación en puntos de grilla (CRU TS 4.01 y GPCC v2018) vs observados en las estaciones: a-b Ceres (1901-2016), c-d Laboulaye (1903-2016), e-f Reconquista (1911-2016), g-h Parana (1917-2016), i-j Marcos Juárez (1910-2016), k-l Pergamino (1901-2016), m-n Rosario (1911-2016), o-p Rafaela (1901-2016). ....  | 15 |
| Figura 2.6 Distribución espacial de la humedad del suelo mensual (en mm) en el período normal 1986-2016: a) 0-10 cm, b) 10-40 cm, c) 40-100 cm, y d) 100-200 cm   | 17 |
| Figura 2.7 Regiones hidrogeológicas de la provincia de Santa Fe (Auge, 2004) .....  | 18 |
| Figura 2.8 Serie temporal del nivel freático medio mensual en el periodo 1970-2017, estación Rafaela. ....  | 18 |
| Figura 2.9 Síntesis gráfica de los valores mensuales promedios espaciales del SPI y del SSI (0-10 cm, 10-40 cm, 40-100 cm, 100-200 cm) para el nordeste de Argentina en las escalas temporales de 1, 3, 6, 12 y 24 meses, en el período 1979-2016. Tonos en la gama del rojo (azul) representan la intensidad de los eventos secos (húmedos) según la Tabla 2.1 ..... | 25 |
| Figura 2.10 Síntesis gráfica de los valores mensuales promedios espaciales del SPI, del SSI (0-10 cm, 10-40 cm, 40-100 cm, 100-200 cm) y el SGI para Rafaela en las escalas temporales de 1, 3, 6, 12 y 24 meses, en el período 1979-2016. Tonos en la gama del rojo (azul) representan la intensidad de los eventos secos (húmedos) según la Tabla 2.1.....          | 26 |
| Figura 2.11 Series temporales para SPI12 en el periodo 1901-2016 y SSI12 (0-10 cm, 10-40 cm, 40-100 cm, 100-200 cm) en el periodo 1979-2016. Estación Ceres .....   | 28 |
| Figura 2.12 Series temporales para SPI12 en el periodo 1911-2016 y SSI12 (0-10 cm, 10-40 cm, 40-100 cm, 100-200 cm) en el periodo 1979-2016. Estación Reconquista...  | 29 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 2.13 Series temporales para SPI12 en el periodo 1910-2016 y SSI12 (0-10 cm, 10-40 cm, 40-100 cm, 100-200 cm) en el periodo 1979-2016. Estación Marcos Juárez 30   |    |
| Figura 2.14 Series temporales para SPI12 en el periodo 1911-2016 y SSI12 (0-10 cm, 10-40 cm, 40-100 cm, 100-200 cm) en el periodo 1979-2016. Estación Rosario .....  | 31 |
| Figura 2.15 Distribución espacial de la correlación (mapas izquierdos) entre cada PC1 (paneles derechos) y cada serie temporal de los índices (a) SPI3, (b) SPI12, y (c) SPI24 en cada punto de grilla. Periodo 1901-2016.....   | 33 |
| Figura 2.16 Distribución espacial de la correlación (mapas izquierdos) entre cada PC1 (paneles derechos) y cada serie temporal de los índices SSI6 a) 0-10 cm, b) 10-40 cm, c) 40-100 cm, d) 100-200 cm en cada punto de grilla. Periodo 1979-2017 .....   | 34 |
| Figura 2.17 Variabilidad temporal del promedio areal del SPI12 y SSI12. En línea fucsia se presenta la reconstrucción de la serie filtrada y en verde el ciclo oscilatorio filtrado. Periodo 1979-2016.....  | 37 |
| Figura 2.18 Reconstrucción de la serie filtrada hallada con SSA para la estación Rafaela en los índices SPI12, SSI6 10-40cm y SGI3. La línea fucsia representa la reconstrucción de la serie filtrada.....   | 39 |
| Figura 3.1 Textura de suelo en el área de estudio. Fuente: INTA .....  | 49 |
| Figura 3.2 Series temporales de extremos de precipitación (1931-2017): (a) precipitación diaria máxima anual (Rx1), (b) precipitación máxima anual en 5 días consecutivos (Rx5) y (c) días secos consecutivos (CDD). Se resaltan las tendencias no lineales que indican los cambios de largo período en cada serie. Estación Ceres .....   | 52 |
| Figura 3.3 Series temporales de extremos de precipitación (1948-2017): (a) precipitación diaria máxima anual (Rx1), (b) precipitación máxima anual en 5 días consecutivos (Rx5) y (c) días secos consecutivos (CDD). Se resaltan las tendencias no lineales que indican los cambios de largo período en cada serie. Estación Reconquista   | 53 |
| Figura 3.4 Series temporales de extremos de precipitación (1961-2017): (a) precipitación diaria máxima anual (Rx1), (b) precipitación máxima anual en 5 días consecutivos (Rx5) y (c) días secos consecutivos (CDD). Se resaltan las tendencias no lineales que indican los cambios de largo período en cada serie. Estación Rafaela ..... | 54 |
| Figura 3.5 Series temporales de extremos de precipitación (1931-2017): (a) precipitación diaria máxima anual (Rx1), (b) precipitación máxima anual en 5 días consecutivos (Rx5) y (c) días secos consecutivos (CDD). Se resaltan las tendencias no lineales que indican los cambios de largo período en cada serie. Estación Paraná .....  | 55 |

Figura 3.6 Series temporales de extremos de precipitación (1961-2017): (a) precipitación diaria máxima anual (Rx1), (b) precipitación máxima anual en 5 días consecutivos (Rx5) y (c) días secos consecutivos (CDD). Se resaltan las tendencias no lineales que indican los cambios de largo período en cada serie. Estación Marcos Juárez ..... 56

Figura 3.7 Series temporales de extremos de precipitación (1936-2017): (a) precipitación diaria máxima anual (Rx1), (b) precipitación máxima anual en 5 días consecutivos (Rx5) y (c) días secos consecutivos (CDD). Se resaltan las tendencias no lineales que indican l los cambios de largo período en cada serie. Estación Rosario .... 57

Figura 3.8 Series temporales de extremos de precipitación (1940-2017): (a) precipitación diaria máxima anual (Rx1), (b) precipitación máxima anual en 5 días consecutivos (Rx5) y (c) días secos consecutivos (CDD). Se resaltan las tendencias no lineales que indican los cambios de largo período en cada serie. Estación Laboulaye .. 58

Figura 3.9 Series temporales de extremos de precipitación (1932-2017): (a) precipitación diaria máxima anual (Rx1), (b) precipitación máxima anual en 5 días consecutivos (Rx5) y (c) días secos consecutivos (CDD). Se resaltan las tendencias no lineales que indican los cambios de largo período en cada serie. Estación Pergamino.. 59

Figura 3.10 Series temporales de máximos absolutos de precipitación (azul) y perfil de humedad del suelo (HS, naranja): (a) precipitación diaria máxima anual (Rx1,abr - jun 1994). (b) precipitación máxima anual en 5 días consecutivos (Rx5, feb - abr 2007) y (c) días secos consecutivos (CDD, may - sep 2007). Estación Ceres..... 60

Figura 3.11 Series temporales de máximos absolutos de precipitación (azul) y perfil de humedad del suelo (HS, naranja): (a) precipitación diaria máxima anual (Rx1, feb - abr 1961). (b) precipitación máxima anual en 5 días consecutivos (Rx5, feb - abr 1985) y (c) días secos consecutivos (CDD, abr - ago 1996). Estación Recoquista. .... 61

Figura 3.12 Series temporales de máximos absolutos de precipitación (azul) y perfil de humedad del suelo (HS, naranja): (a) precipitación diaria máxima anual (Rx1, mar - may 1999). (b) precipitación máxima anual en 5 días consecutivos (Rx5, feb - abr 2007) y (c) días seco consecutivos (CDD, may - sep 1995). Estación Rafaela. .... 62

Figura 3.13 Series temporales de máximos absolutos de precipitación (azul) y perfil de humedad del suelo (HS, naranja): (a) precipitación diaria máxima anual (Rx1, feb - abr 2009). (b) precipitación máxima anual en 5 días consecutivos (Rx5, sep - nov 1993) y (c) días seco consecutivos (CDD, jun - oct 1955). Estación Paraná. .... 63

Figura 3.14 Series temporales de máximos absolutos de precipitación (azul) y perfil de humedad del suelo (HS, naranja): (a) precipitación diaria máxima anual (Rx1, ene - mar 1977). (b) precipitación máxima anual en 5 días consecutivos (Rx5, ene - mar 1977) y (c) días seco consecutivos (CDD, may - sep 2008). Estación Marcos Juárez..... 64

Figura 3.15 Series temporales de máximos absolutos de precipitación (azul) y perfil de humedad del suelo (HS, naranja): (a) precipitación diaria máxima anual (Rx1, mar - may 1999). (b) precipitación máxima anual en 5 días consecutivos (Rx5, feb - abr 2007) y (c) días secos consecutivos (CDD, jul - sep 1995). Estación Rosario..... 65

Figura 3.16 Series temporales de máximos absolutos de precipitación (azul) y perfil de humedad del suelo (HS, naranja): (a) precipitación diaria máxima anual (Rx1, ene - mar 1999). (b) precipitación máxima anual en 5 días consecutivos (Rx5, ene - mar 1999) y (c) días secos consecutivos (CDD, may - sep 1970). Estación Laboulaye..... 66

Figura 3.17 Series temporales de máximos absolutos de precipitación (azul) y perfil de humedad del suelo (HS, naranja): (a) precipitación diaria máxima anual (Rx1, mar - may 1995). (b) precipitación máxima anual en 5 días consecutivos (Rx5, mar - may 1995) y (c) días secos consecutivos (CDD, jun - oct 1973). Estación Pergamino..... 67

Figura 4.1 Series temporales de los SPI observados ( $SPI_o$ ), simulados en el período histórico ( $SPI_m$ ) y en los 3 escenarios RCP estudiados ( $SPI_s$ ) para el modelo CanESM2 (1980-2035). Escala temporal: (a) 3 meses, (b) 12 meses y (c) 24 meses..... 76

Figura 4.2 Comparación entre el  $SPI_m$  del modelo CanESM2 y el  $SPI_o$  para las escalas temporales de 3, 12 y 24 meses, en el periodo 1980-2005..... 78

Figura 4.3  $SPI_s$  del modelo CanESM2 en los escenarios de emisión RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 para las escalas temporales de 3, 12 y 24 meses, en el periodo 2006-2035..... 79

Figura 4.4 Series temporales de los SPI observados ( $SPI_o$ ), simulados en el período histórico ( $SPI_m$ ) y en los 3 escenarios RCP estudiados ( $SPI_s$ ) para el modelo CCCSM4 (1980-2035). Escala temporal: (a) 3 meses, (b) 12 meses y (c) 24 meses..... 80

Figura 4.5 Comparación entre el  $SPI_m$  del modelo CCSM4 y el  $SPI_o$  para las escalas temporales de 3, 12 y 24 meses, en el periodo 1980-2005..... 81

Figura 4.6  $SPI_s$  del modelo CCSM4 en los escenarios de emisión RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 para las escalas temporales de 3, 12 y 24 meses, en el periodo 2006-2035..... 82

Figura 4.7 Series temporales de los SPI observados ( $SPI_o$ ), simulados en el período histórico ( $SPI_m$ ) y en los 3 escenarios RCP estudiados ( $SPI_s$ ) para el modelo NorESM1 (1980-2035). Escala temporal: (a) 3 meses, (b) 12 meses y (c) 24 meses..... 83

|  |    |
|--|----|
| Figura 4.8 Comparación entre el SPI <sub>m</sub> del modelo NorESM1 y el SPI <sub>o</sub> para las escalas temporales de 3, 12 y 24 meses, en el periodo 1980-2005.....  | 84 |
| Figura 4.9 SPI <sub>s</sub> del modelo NorESM1 en los escenarios de emisión RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 para las escalas temporales de 3, 12 y 24 meses, en el periodo 2006-2035.....   | 85 |
| Figura 4.10 Series temporales de los SPI observados (SPI <sub>o</sub> ), simulados en el período histórico (SPI <sub>m</sub> ) y en los 3 escenarios RCP estudiados (SPI <sub>s</sub> ) para el modelo INM-CM4 (1980-2035). Escala temporal: (a) 3 meses, (b) 12 meses y (c) 24 meses..... | 86 |
| Figura 4.11 Comparación entre el SPI <sub>m</sub> del modelo INM-CM4 y el SPI <sub>o</sub> para las escalas temporales de 3, 12 y 24 meses, en el periodo 1980-2005.....   | 87 |
| Figura 4.12 SPI <sub>s</sub> del modelo INM-CM4 en los escenarios de emisiones RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 para las escalas temporales de 3, 12 y 24 meses, en el periodo 2006-2035. ....   | 88 |
| Figura 4.13 Series temporales de los SPI observados (SPI <sub>o</sub> ), simulados en el período histórico (SPI <sub>m</sub> ) y en los 3 escenarios RCP estudiados (SPI <sub>s</sub> ) para el modelo CESM1 (1980-2035). Escala temporal: (a) 3 meses, (b) 12 meses y (c) 24 meses.....   | 89 |
| Figura 4.14 Comparación entre el SPI <sub>m</sub> del modelo CESM1 y el SPI <sub>o</sub> para las escalas temporales de 3, 12 y 24 meses, en el periodo 1980-2005.....   | 90 |
| Figura 4.15 SPI <sub>s</sub> del modelo CESM1 en los escenarios de emisión RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 para las escalas temporales de 3, 12 y 24 meses, en el periodo 2006-2035.....  | 91 |
| Figura 4.16 Series temporales de SPI3 en el periodo 1980-2035. Línea azul: SPI <sub>o</sub> (1980-2005). Línea verde: SPI <sub>e</sub> (1980-2005). Línea roja: SPI <sub>s</sub> (2006-2035) para los escenarios de emisión: (a) RCP 2.6. (b) RCP 4.5 y (c) RCP 8.5.....                   | 92 |
| Figura 4.17 Series temporales de SPI12 en el periodo 1980-2035. Línea azul: SPI <sub>o</sub> (1980-2005). Línea verde: SPI <sub>e</sub> (1980-2005). Línea roja: SPI <sub>s</sub> (2006-2035) para los escenarios de emisión: (a) RCP 2.6. (b) RCP 4.5 y (c) RCP 8.5.....                  | 93 |
| Figura 4.18 Series temporales de SPI24 en el periodo 1980-2035. Línea azul: SPI <sub>o</sub> (1980-2005). Línea verde: SPI <sub>e</sub> (1980-2005). Línea roja: SPI <sub>s</sub> (2006-2035) para los escenarios de emisión: (a) RCP 2.6. (b) RCP 4.5 y (c) RCP 8.5.....                  | 94 |
| Figura 4.19 Comparación entre el SPI <sub>m</sub> del ensamble multimodelo y el SPI <sub>o</sub> para las escalas temporales de 3, 12 y 24 meses, en el periodo 1980-2005.....   | 95 |
| Figura 4.20 SPI <sub>s</sub> del ensamble multimodelo en los escenarios de emisión RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 para las escalas temporales de 3, 12 y 24 meses, en el periodo 2006-2035. ....   | 96 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla 2.1 Escala de clasificación de eventos extremos según Hao et al. (2014) .....   | 20 |
| Tabla 2.2 Modos oscilatorios significativos obtenidos al aplicar SSA a los índices estandarizados y su correspondiente porcentaje de varianza.....  | 35 |
| Tabla 4.1 Modelos del CMIP5 con mejores métricas estadísticas de evaluación para la precipitación en el periodo 1901-2005 para el nordeste de Argentina y sus atributos (adaptado de Lovino et al., 2018b)..... | 74 |



## RESUMEN

El nordeste de Argentina es altamente vulnerable a los impactos de los eventos extremos debido a que concentra la mayor parte de la población del país y de la producción agrícola-ganadera y agroindustrial. En la provincia de Santa Fe se registra un gran porcentaje de dicha producción, por lo que adquiere una gran importancia en la economía regional y nacional. El objetivo de este trabajo es investigar la variabilidad espacio-temporal además de evaluar los cambios históricos, presentes y en diferentes escenarios de proyecciones futuras de los eventos extremos de precipitación y sus efectos en los subsistemas zona no saturada y acuífero libre en la provincia de Santa Fe.

Para ello, en primer lugar, se analizan los eventos extremos a escala mensual en el periodo 1979-2016 mediante la construcción de índices estandarizados no paramétricos (SI) aplicados a la precipitación (SPI), contenido de humedad de suelo (SSI) y niveles freáticos (SGI). Se examina la respuesta de los subsistemas zonas no saturada y saturada ante eventos extremos de precipitación. Se determina la variabilidad espacio-temporal de los eventos extremos en diferentes escalas temporales a través de un Análisis por Componentes Principales (ACP) y un Análisis Espectral Singular (SSA). En segundo lugar, se analizan los extremos de precipitación diarios a partir de los índices de cantidad máxima de precipitación en 1 día (Rx1), cantidad máxima de precipitación en 5 días (Rx5), y el número de días secos consecutivos (CDD). Se identifican los máximos absolutos para cada uno de estos índices y se evalúa la variación de la humedad del suelo (HS) en relación a dichos máximos absolutos. Finalmente, se utiliza un conjunto de Modelos de Circulación General (MCG) del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados fase 5 (CMIP5) que mejor simulan las características climáticas de la región de estudio para estudiar los eventos extremos de precipitación identificados mediante el SPI en el periodo histórico 1980-2005 y en diferentes escenarios de proyecciones (2006-2035). Se analiza la duración e intensidad de los eventos extremos de precipitación durante el presente y en las proyecciones futuras de los mejores MCG y su ensamble para la región.

Los resultados de los SI categorizan 9 eventos húmedos y 5 eventos secos en el periodo 1979-2016 en la región de estudio. Se encuentra interacción entre los eventos extremos de precipitación con la zona no saturada y saturada. La respuesta de la zona no saturada

se expresa con una correlación máxima ( $r = 0.81$ ) entre la serie de SPI de 12 meses y la serie de SSI de 6 meses a 40 cm de profundidad. La interacción de la zona saturada en Rafaela indica que el SGI en promedio se retrasa en 10 meses con respecto al SPI.

Los resultados del ACP y el SSA permiten determinar que los eventos extremos presentan las mismas periodicidades dominantes tanto en extensión espacial como en intensidad. Existe una gran variabilidad en escalas interanuales ( $T \approx 2.5 - 4$  años) y decadales ( $T \approx 10$  años). Asimismo, existe una marcada tendencia no lineal en el período más prolongado del SPI comprendido entre 1901 y 2016. Se manifiestan dos períodos: entre 1901-1970 predominan los eventos extremos secos y entre 1970-2016 predominan los eventos extremos húmedos. Los resultados muestran que, en el período común de datos de precipitación, humedad de suelo y niveles freáticos (1979-2016), no se detectan tendencias no lineales en los índices estandarizados que caracterizan los eventos extremos.

Los índices Rx1 y Rx5 en el norte y centro del área de estudio presentan una tendencia de aumento a partir de 1960 mientras que al sur permanecen sin variaciones significativas. El CDD ha ido en ascenso para el centro y norte de la provincia de Santa Fe mientras que al sur no tiene una tendencia definida. Los eventos máximos absolutos de Rx1, Rx5 y CDD se vieron reflejados en la HS. Ante los eventos máximos absolutos del índice Rx1 se evidencia un aumento de entre 2.5% y 4% de HS entre 3 y 10 días después. Como respuesta a condiciones secas o eventos aislados previos al máximo absoluto del índice Rx5, la HS tiende a un aumento gradual de 7 a 14 días después del inicio del evento, alcanzando hasta un 18.6%. Por el contrario, ante precipitaciones consecutivas mayores a 20 mm previos al evento máximo absoluto, la HS alcanza su pico máximo antes de la ocurrencia de evento analizado. Para CDD se observó que la HS disminuye entre 1 y 5%.

Los MCG utilizados son capaces de reconocer adecuadamente la mayor parte de los eventos húmedos observados en el periodo histórico, aunque subestiman su intensidad y duración. También, presentan dificultad para identificar eventos de sequías. Los modelos con mayor habilidad para reconocer los eventos extremos históricos observados han sido el CanESM2, el CCSM4 y el INM-CM4. El ensamble de los modelos reduce la variabilidad de las series temporales dificultando la representación de eventos extremos de precipitación. Las proyecciones no son reproducidas adecuadamente por los modelos.

Se asume que, si las simulaciones históricas subestiman la intensidad y duración de los eventos extremos, lo mismo ocurrirá con las simulaciones futuras.

***Palabras clave:*** Variabilidad climática, Eventos extremos, Cambio Climático, Escenarios de Proyecciones

## ABSTRACT

Northeastern Argentina is highly vulnerable to the impacts of extreme events because it concentrates the majority of the country's population and most of its production in the agricultural, livestock and agro-industrial sectors. A large percentage of this production is found in the province of Santa Fe, which is therefore of great importance to the regional and national economy. The objective of this work is to investigate the spatial-temporal variability as well as to evaluate the historical and current changes as well as in different scenarios of future projections of extreme precipitation events and their effects on the unsaturated zone and unconfined aquifer subsystems in the Argentinean province of Santa Fe.

To fulfill this objective, first, extreme events are analyzed on monthly timescales in the 1979-2016 period through the construction of non-parametric standardized indexes (SI) applied to precipitation (SPI), soil moisture content (SSI) and groundwater levels (SGI). Then, the response of the subsystems unsaturated and saturated zones is examined in the face of extreme precipitation events. Next, the spatiotemporal variability of extreme events on different time scales is determined through a Principal Component Analysis (PCA) and a Singular Spectral Analysis (SSA). Second, the daily precipitation extremes are analyzed based on the indices of maximum precipitation amount in 1 day (Rx1), maximum precipitation amount in 5 days (Rx5), and the number of consecutive dry days (CDD). Subsequently, the absolute maximums are identified for each of these indexes and the variation of soil moisture (SM) is assessed in relation to these absolute maximums. Lastly, a subset of General Circulation Models (GCMs) from the Coupled Model Intercomparison Project phase 5 (CMIP5) that best simulate the climatic characteristics of the region under study is used in order to analyze extreme precipitation events identified through the SPI in the historical period 1980-2005 and in different projection scenarios (2006-2035). The duration and intensity of extreme precipitation events in the present climate and in future projections of the best GCMs and their ensemble for the region are analyzed.

The results of the SI categorize 9 wet events and 5 dry events in the 1979-2016 period for the study region. There is interaction between extreme precipitation events and the unsaturated and saturated zones. The response of the unsaturated zone is expressed with

a maximum correlation ( $r = 0.81$ ) between the 12-month SPI series and the 6-month SSI series at 40 cm in depth. The interaction of the saturated zone in Rafaela indicates that the SGI on average lags behind the SPI by 10 months.

The PCA and SSA results show that extreme events have the same dominant periodicities in both spatial extent and intensity. There is great variability in interannual ( $T \approx 2.5 - 4$  years) and in decadal scales ( $T \approx 10$  years). There is also a marked non-linear trend in the longer period of the SPI between 1901 and 2016. There are two distinct periods: between 1901-1970, extreme dry events predominate; and between 1970-2016, extreme wet events predominate. The results show that in the common period of precipitation data, soil moisture and groundwater levels (1979-2016), no non-linear trends are detected in the standardized indices that characterize extreme events.

The Rx1 and Rx5 indices in the north and center of the study area show an increasing trend that starts in 1960, while in the south they remain without significant variations. The CDD has been risen for the center and north of the Santa Fe province, while in the south it has no noticeable trend. The absolute maximum events of Rx1, Rx5 and CDD were reflected in the SM. The absolute maximum events of the Rx1 index showed an increase ranging from 2.5% to 4% in SM, between 3 and 10 days later. In response to dry conditions or isolated events prior to the absolute maximum of the Rx5 index, SM tends to gradually increase from 7 to 14 days after the beginning of the event, reaching up to 18.6%. On the other hand, when consecutive precipitations are greater than 20 mm before the absolute maximum event, the SM reaches its peak before the occurrence of the analyzed event. For CDD, it was observed that the SM decreases between 1 and 5%.

The GCMs used are capable of adequately recognizing most of the wet events observed in the historical period, although they underestimate their intensity and duration. Also, they present difficulty in identifying drought events. The models with the greatest ability to recognize extreme historical events have been CanESM2, CCSM4 and INM-CM4. The multimodel ensemble reduces the variability of the time series, making the representation of extreme precipitation events difficult. The projections are not adequately reproduced by the models. It is assumed that if historical simulations underestimate the intensity and duration of extreme events, the same will happen with

future

simulations.

**Keywords:** Climate variability, Extreme events, Climate change, Projection scenarios

# Capítulo 1: Introducción general y objetivos

## 1.1 Antecedentes

Los eventos extremos causan diversos impactos, alterando los ecosistemas, afectando la producción de alimentos y el suministro de agua, dañando los asentamientos humanos, y causando morbilidad y mortalidad en todo el mundo (Field et al., 2013). Existe abundante evidencia que demuestra que los cambios en la frecuencia, intensidad, duración y extensión espacial de tales eventos aumentarán la vulnerabilidad y la exposición de los sistemas socio-ecológicos, ocasionando desastres. Por lo tanto, la sostenibilidad del desarrollo económico y las condiciones de vida de la población mundial dependen de la capacidad para manejar los riesgos asociados con eventos extremos, lo cual se logra mejorando el conocimiento y la comprensión ante el cambio climático (Klein Tank et al., 2009).

El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, por su sigla en inglés) sostiene que los impactos de los eventos extremos y el potencial de desastres se acrecientan en las regiones con alta exposición y vulnerabilidad. Los efectos de los mismos pueden exacerbarse aún más ante un contexto complejo de variabilidad y cambio climático (IPCC, 2012). En los últimos años, se ha intensificado el estudio de las características (intensidad, frecuencia y duración) de eventos extremos, principalmente en lo referente a precipitación (e.g., Cavalcanti et al., 2015; Lovino et al., 2018a, b). En el sudeste de Sudamérica, consistentemente con los cambios globales, los estudios muestran que los eventos extremos tienden hacia condiciones más cálidas y húmedas. Se ha evidenciado un aumento en la magnitud y la frecuencia de extremos de temperatura y de precipitaciones intensas (Skansi et al., 2013, Carril et al., 2016; Lovino et al. 2018b). En esta región, los incrementos de la precipitación (especialmente lluvias intensas) y los caudales, aumentaron la frecuencia de crecidas e inundaciones que afectaron la productividad agrícola-ganadera e impactaron los asentamientos urbanos y rurales (Magrin et al., 2014). En la cuenca del Plata, Calvanti et al. (2015) indican que los eventos de sequía fueron más frecuentes durante el período de 1962-2008 en el sector occidental, y los extremos húmedos mensuales fueron más frecuentes que los extremos secos en los sectores norte y sur durante el período 1979-2001.

Particularmente, el nordeste de Argentina es altamente vulnerable a eventos extremos de precipitación como las sequías e inundaciones en escalas temporales relevantes para la agricultura (Krepper y Zucarelli, 2010; Lovino et al., 2014). Por otro lado, la gran variabilidad hidroclimática de la región se ha reflejado en la ocurrencia de sequías agrícolas e hidrológicas que afectaron los recursos hídricos superficiales e impactaron en las actividades agrícolas y ganaderas (Rivera y Penalba, 2014; Lovino et al., 2018b). El efecto de la variabilidad climática también se ha reflejado en la respuesta del acuífero libre en la provincia de Santa Fe, donde las variaciones en los niveles freáticos, tanto en escenarios de déficits (profundización) como de excesos (ascensos), han impactado en áreas urbanas y rurales (Fili et al., 2000).

En la región del nordeste de Argentina se concentra la mayor parte de la producción agroindustrial del país. Esta región tiene una gran importancia económica y demográfica en Sudamérica y es clave para la seguridad alimentaria de la región y del mundo (CEPAL, 2015). Las actividades agroindustriales de esta región están influenciadas por el complejo sistema de recursos hídricos superficiales de la cuenca inferior del río Paraná, donde se concentran los mayores centros urbanos del país. La conjunción de estos factores hace que la región tenga una alta exposición y vulnerabilidad a los eventos extremos. Para citar ejemplos relativamente recientes, la crecida extraordinaria del río Salado ocasionada por las abundantes lluvias durante abril de 2003 afectó un tercio de la población de la ciudad de Santa Fe causando 23 muertes y, además, pérdidas económicas mayores a U\$S 1500 millones (CEPAL, 2003). Las lluvias intensas de enero de 2017 anegaron los suelos del centro-sur de Santa Fe y zonas del norte y oeste de Buenos Aires y Córdoba, ocasionando pérdidas al sector agrícola ganadero por U\$S 1.750 millones (La Nación, 2017). Por otra parte, extensas sequías ocasionaron importantes pérdidas económicas y complicaron severamente la gestión del agua. La sequía extensa y persistente durante 2008/2009 que afectó a toda la provincia de Santa Fe, principalmente a la región norte, registro pérdidas económicas por \$347 M de pesos, contabilizando cultivos de soja, girasol, maíz, sorgo, caña de azúcar y trigo (Corti y Mendoza Gallo, 2012). También perjudicó la navegabilidad del río Paraná en su tramo medio, donde se vieron afectados la exportación de granos y el suministro de combustible en ciudades del litoral, y se perturbó el suministro de agua en varias ciudades costeras, situación que repitió en el año 2018 (La Nación, 2018). En lo que se refiere a producción agrícola, la sequía registrada entre



noviembre de 2017 y abril de 2018 produjo una disminución del 18% de la producción de soja, y del 29% en la producción de maíz (Ministerio de Agroindustria, 2018).

Los modelos de circulación general de la atmósfera (MCG) son la mejor herramienta con la que se cuenta en la actualidad para realizar proyecciones climáticas. Los análisis evaluativos de las simulaciones retrospectivas de los MCGs muestran que estos modelos tienen ciertas limitaciones para representar la precipitación sobre el sudeste de Sudamérica (SESA), es decir, el sur de Brasil, Uruguay, Paraguay y el este de Argentina (Barros y Doyle, 2018.). De acuerdo a Doyle (2019), los MCG representan la estacionalidad y cambios de las precipitaciones en Argentina con ciertos sesgos. Por su parte, Lovino et al. (2018c), muestran que los MCG pueden reproducir el ciclo de precipitación anual, aunque subestiman las cantidades de precipitación durante la estación cálida austral (septiembre a abril), y sobrestiman ligeramente las cantidades de lluvia de la temporada fría (mayo a agosto) en el noreste de Argentina. Teniendo en cuenta las propias incertidumbres de los MCGs, las simulaciones futuras del clima en el sudeste de Sudamérica proyectan incrementos en la precipitación media anual y cambios significativos en las precipitaciones extremas y en los períodos secos (Marengo et al, 2009; Magrin et al., 2014).

## **1.2 Motivación y Justificación**

La principal actividad que se desarrolla en la región de estudio es la producción agroindustrial, casi en su totalidad de secano. La disponibilidad de agua para los cultivos está determinada en gran medida por la retención de agua que experimentan los suelos. Esta disponibilidad está muy influenciada por la variabilidad espacio-temporal de la precipitación. El déficit de humedad del suelo puede ser impulsado por el déficit de precipitación y/o aumento de la evapotranspiración en un periodo relativamente extenso. En cambio, el exceso de humedad surge cuando los eventos de precipitación sobrepasan la capacidad de almacenamiento del suelo. Las variaciones cíclicas de la precipitación y el comportamiento de la humedad del suelo ante tormentas intensas y la escasez de agua influyen en los rendimientos de los principales cultivos: trigo, maíz, girasol y soja (Grondona et al., 1997). La evaluación de la variabilidad hidroclimática y los eventos extremos a partir de variables como precipitación, humedad del suelo, nivel freático, así como también analizar las proyecciones en escenarios futuros de eventos extremos de

precipitación, podrán aportar valiosa información para la región del noreste de Argentina, y en particular la provincia de Santa Fe. Cabe señalar que la literatura científica presenta muy pocos trabajos enfocando algunos de estos aspectos para la provincia (Venencio y García, 2011; Lovino et al., 2018c, Sgroi et al. 2020), lo cual hace de este trabajo un aporte novedoso y necesario.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo General**

Diagnosticar la variabilidad espacio-temporal y evaluar los cambios en el pasado reciente y en el futuro cercano de los eventos extremos de precipitación y sus efectos en los subsistemas zona no saturada y acuífero libre en la provincia de Santa Fe.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Calcular índices para identificar eventos extremos en diferentes escalas de tiempo (mensuales y diarias).
- Caracterizar la variabilidad espacio-temporal y los cambios en los eventos extremos de precipitación.
- Analizar la respuesta de los subsistemas zonas no saturada y saturada ante eventos extremos de precipitación e investigar su variabilidad espacio-temporal en diferentes escalas temporales.
- Evaluar los eventos extremos de precipitación simulados por MCGs en escenarios históricos y futuros.

## **1.4 Breve descripción de los capítulos**

Para alcanzar los objetivos planteados, la presente investigación se divide en capítulos. En el Capítulo 1 se presentan los antecedentes, la motivación y los objetivos que se plantean en la investigación. El Capítulo 2 contiene la recopilación de los datos utilizados para las variables: precipitación, humedad de suelo y nivel freático. En primer lugar, se identifican los eventos extremos a partir de índices estandarizados (SI) para las variables mencionadas en toda la región de estudio y en 8 estaciones distribuidas en el área de estudio. Luego, se analiza la variabilidad espacio-temporal de los eventos hidroclimáticos extremos en distintas escalas temporales a través de un Análisis por Componentes Principales para obtener los patrones de correlación entre las componentes principales y

las series originales para los índices estandarizados de precipitación y de humedad de suelo. Finalmente, se emplea un Análisis Espectral Singular con el fin de determinar las tendencias y modos oscilatorios de las series de los índices estandarizados. En el Capítulo 3 se estudia el comportamiento histórico de los eventos extremos diarios de precipitación y se identifican los máximos absolutos a través de 3 índices: cantidad máxima de precipitación en 1 día (Rx1), cantidad máxima de precipitación en 5 días (Rx5), y número de días secos consecutivos (CDD) en 8 estaciones en la región estudiada. Se evalúan las variaciones de la humedad del suelo (HS) antes, durante y después de eventos extremos de precipitación máximos absolutos. En el Capítulo 4 se evalúan los eventos extremos de precipitación identificados mediante el SPI en el periodo histórico (1980-2005) y en diferentes escenarios de proyecciones (2006-2035) a partir de los MCGs que demostraron mejor capacidad para simular el clima histórico medio y su variabilidad para la región del nordeste de Argentina. Por último, en el Capítulo 5 se expone una discusión y las principales conclusiones.

## 1.5 Referencias Bibliográficas

- Barros, V. R., & Doyle, M. E. (2018). Low-level circulation and precipitation simulated by CMIP5 GCMS over southeastern South America. *International Journal of Climatology*, 38(15), 5476-5490. <https://doi.org/10.1002/joc.5740>.
- Carril, A. F., Cavalcanti, I. F., Menendez, C. G., Sörensson, A., López-Franca, N., Rivera, J. A., Robledo, F., Zaninelli, P., Ambrizzi, T., Penalba, O., Sánchez, E., Bettolli, M., Pessacg, N., Renom, M., Ruscica, R., Solman, S., Tencer, B., Grimm, A., Rusticucci, M., Cherchi, A., Tedeschi, R., Zamboni, L., & Da Rocha, R. P. (2016). Extreme events in the La Plata basin: a retrospective analysis of what we have learned during CLARIS-LPB project. *Climate Research*, 68(2-3), 95-116. <http://dx.doi.org/10.3354/cr01374>
- Cavalcanti I.F.A., Carril A.F., Penalba O.C., Grimm A.M., Menéndez C.G., Sanchez E., Cherchi A., Sörensson A., Robledo F., Rivera J., Pántano V., Bettolli L.M., Zaninelli P., Zamboni L., Tedeschi R.G., Dominguez M., Ruscica R., & Flach R. (2015). Precipitation extremes over La Plata Basin-Review and new results from observations and climate simulations. *Journal of hydrology*, 523, 211-230. <doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.028>
- CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe). (2003). Las inundaciones de 2003 en Santa Fe. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/28461-evaluacion-impacto-inundaciones-desbordamiento-rio-salado-la-provincia-santa-fe>.
- CEPAL (Economic Commission for Latin America and the Caribbean). (2015). The Economics of Climate Change in Latin America and the Caribbean Paradoxes and Challenges of Sustainable Development. United Nations, Santiago, Chile. [http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/37311/S1420655\\_en.pdf](http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/37311/S1420655_en.pdf).
- Corti, A. F., y Mendoza Gallo, L. (2012). Informe Impacto de la Sequía en el norte de Santa Fe – Abril de 2009, EEA INTA Reconquista, 41 pp.
- Doyle, M.E. (2019). Observed and simulated changes in precipitation seasonality in Argentina. *Internacional Journal of Climatology*, 40(3), 1716-1737. <https://doi.org/10.1002/joc.6297>.
- Grondona, M. O., Magrin, G. O., Travasso, M. I., Moschini, R. C., Rodriguez, G. R., Messina, C., ... & Jones, J. (1997, December). Impacto del fenomeno " El Niño " sobre la produccion de trigo y maiz en la region Pampeana Argentina. In Workshop and Conference on the 1997-98 El Niño: Impacts and Potential Applications of Climate Prediction in Southeast South America.
- IPCC. (2012). Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA.

- Field, C. B., Barros, V., Mach, K., Mastrandrea, M., Aalst, M., Adger, N., Arent, D., Barnet, J., Betts, R., Bilir, E., Birkmann, J., Carmin, J., Chadee, D., Challinor, A., Chatterjee, M., Cramer, W., Davidson, D., Estrada, Y., Gatusso, J., Hijioaka, Y., Yohe, G., Hiza, M., Hoegh-Guldberg, O., Huang, H., Insarov, G., Jones, R., Kovats, S., Romero, P., Nymand, J., Losada, I., Marengo, J., McLean, R., Mearns, L., Mechler, R., Morton, J., Niang, I., Oki, T., Olwoch, J., Opondo, M., Poloczanska, E., Pörtner, H., Reisinger, A., Revi, A., Schmidt, A., Shaw, R., Solecki, W., Stone, D., Stone, J., Strzepek, K., Suarez, A., Tschakert, P., Valentini, R., Vicuna, S., Villamizar, A., Vincent, K., Warren, R., White, L., Wilbanks, T. & Wong, P. (2014). Technical summary. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the IPCC* [Field, C.B et al. (eds.)]. Cambridge University Press, NY, USA, 35-94.
- Fili, M., Tujchneider, O., D'Elia, M., Paris, M., & Pérez, M. (2000). LA INFLUENCIA DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS EN EL ANEGAMIENTO DE UN SECTOR DE LA LLANURA PAMPENA EN LA REPUBLICA ARGENTINA. *Águas Subterrâneas*.
- Klein Tank, A.M.G., Zwiers, F.W., & Zhang, X., (2009). Guidelines on Analysis of Extremes in a Changing Climate in Support of Informed Decisions for Adaptation, WMO-TD No. 1500/WCDMP-No. 72, Geneva.
- Krepper, C. M., & Zucarelli, G. V. (2010). Climatology of water excesses and shortages in the La Plata Basin. *Theoretical and Applied Climatology*, 102(1-2), 13-27. <https://doi.org/10.1007/s00704-009-0234-6>.
- La Nación. (17 de enero de 2017). Inundaciones: pronostican pérdidas para el campo de hasta US\$ 1750 millones. *La Nación*. Recuperado de: <http://www.lanacion.com.ar/1976462-inundaciones-pronostican-perdidas-para-el-campo-de-hasta-us-1750-millones>.
- La Nación. (27 de agosto de 2018). Se agrava la crisis por la bajante del río Paraná. *La Nación*. Recuperado de: <https://www.lanacion.com.ar/economia/campo/se-agrava-crisis-bajante-del-rio-parana-nid2165962>.
- Lovino, M., García, N. O., & Baethgen, W. (2014). Spatiotemporal analysis of extreme precipitation events in the Northeast region of Argentina (NEA). *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2, 140-158. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2014.09.001>.
- Lovino, M. A., Müller, O. V., Müller, G. V., Sgroi, L. C., & Baethgen, W. E. (2018a). Interannual-to-multidecadal hydroclimate variability and its sectoral impacts in northeastern Argentina. *Hydrology & Earth System Sciences*, 22(6), 3155-3174. <https://doi.org/10.5194/hess-2018-3>.
- Lovino, M. A., Müller, O. V., Berbery, E. H., & Müller, G. V. (2018b). How have daily climate extremes changed in the recent past over northeastern Argentina?. *Global and Planetary Change*, 168, 78-97. doi: <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.06.008>.

- Lovino, M. A., Müller, O. V., Berbery, E. H., & Müller, G. V., (2018c): Evaluation of CMIP5 retrospective simulations of temperature and precipitation in northeastern Argentina. *Int. J. Climatol*, 38: e1158-e1175. doi:10.1002/joc.5441
- Ministerio de Agroindustria. (2018): Campaña 17/18, Informe Especial Sequía. [https://www.agroindustria.gob.ar/sitio/\\_pdf/Informe\\_especial\\_Sequia\\_Agroindustria\\_Mayo18.pdf](https://www.agroindustria.gob.ar/sitio/_pdf/Informe_especial_Sequia_Agroindustria_Mayo18.pdf)
- Magrin, G. and coauthors. (2014). Central and South America. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the AR5 of the IPCC* [Barros, V. et al (Eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Marengo, J. A., Jones, R., Alves, L. M., & Valverde, M. C. (2009). Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 29(15), 2241-2255. <https://doi.org/10.1002/joc.1863>.
- Rivera, J. A., & Penalba, O. C. (2014). Trends and spatial patterns of drought affected area in Southern South America. *Climate*, 2(4), 264-278. <https://doi.org/10.3390/cli2040264>
- Skansi, M.M., Brunet, M., Sigró, J., Aguilar, E., Arevalo Groening, J.A., Betancour, O.J., Castellón Geier, Y.R., Correa Amaya, R.L., Jácome, H., Malherios Ramos, A., Oria Rojas, C., Pasten, A., Sallons Mitro, S., Villaroel, C., Martínez, R., Alexander, L.V., & Jones, P.D. (2013). Warming and wetting signals emerging from analysis of changes in climate extreme indices over South America. *Global and Planetary Change*, 100, 295-307. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.11.004>.
- Sgroi, L. C., Lovino, M. A., Berbery, E. H., & Müller, G. V. (2020). Characteristics of droughts in Argentina's Core Crop Region. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 1-29. <https://doi.org/10.5194/hess-2020-236>.
- Venencio, M. V., & García, N. O. (2011). Interannual variability and predictability of water table levels at Santa Fe Province (Argentina) within the climatic change context. *Journal of hydrology*, 409(1-2), 62-70. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.07.039>.

## **Capítulo 2: Variabilidad espacio-temporal de los eventos extremos e interacción entre los subsistemas zona no saturada y zona saturada.**

### **2.1 Introducción**

Los eventos extremos son parte de la variabilidad natural del sistema tierra- atmósfera. Se entiende por eventos extremos a la ocurrencia de una variable por encima o por debajo de un valor umbral que está cerca de los extremos superior o inferior del rango de los valores observados de la variable (Seneviratne et al., 2012). Los déficits o excesos de precipitación, cuando se prolongan durante una estación o durante períodos más largos, desarrollan efectos progresivos en el ciclo hidrológico, incluso después de finalizar. Estos eventos habitualmente son de carácter lento. Para evaluar adecuadamente el impacto de estos eventos extremos en los recursos hídricos, es preciso considerar los distintos tipos de almacenamiento de agua, como la humedad del suelo y los niveles de agua subterránea. Es decir, es esperable que la frecuencia, intensidad y/o duración de los eventos extremos ocasionen repercusiones hídricas.

Diversos estudios han reconocido que el análisis de una sola variable hidrometeorológica es insuficiente para definir el inicio, la persistencia y la finalización de un evento extremo en forma precisa (e.g., Dracup et al., 1980; Hao y AghaKouchak, 2014; AghaKouchak, 2015). Cada variable responde de forma distinta ante las anomalías de precipitación; es decir, el contenido de humedad del suelo responde a escalas de tiempo relativamente cortas, mientras que el agua subterránea, la escorrentía y los almacenamientos en reservorios reflejan las anomalías de precipitación de largo período (Lloyd-Huges y Saunders, 2002). En la práctica, las duraciones de corto período (semanas o meses) son importantes para las actividades agrícolas, mientras que las duraciones de largo período (estaciones, años) son significativas en la gestión de reservas hídricas (Sirdaş y Şen, 2003).

En consecuencia, se han desarrollado múltiples índices para caracterizar el comportamiento de las variables en múltiples escalas de tiempo y reflejar el impacto de los eventos extremos. Uno de los índices más aceptados, por su simplicidad y robustez, es el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI por sus siglas en inglés, McKee et al., 1993). La metodología de cálculo del SPI ha sido estandarizada por Hao y AghaKouchak

(2013, 2014) y Farahmand y AghaKouchak (2015), permitiendo ser aplicada a diversas variables como la humedad del suelo (SSI, Standardized Soil Moisture Index) y los niveles freáticos (SGI, Standardised Groundwater level Index).

El SPI se ha utilizado para investigar las tendencias y variabilidad a diferentes escalas temporales en los eventos extremos de precipitación. Varios estudios de eventos extremos de precipitación representados por el SPI muestran una tendencia creciente desde la segunda mitad del siglo XX en el sudeste de Sudamérica (Krepper y Zucarelli, 2010; Lovino et al., 2014; Rivera y Penalba, 2018), demostrando que en las últimas décadas hubo preponderancia de los excesos por sobre los déficits. Además, existen estudios que utilizan índices de humedad de suelo. Por ejemplo, Sheffield y Wood (2008), en un trabajo realizado para todo el planeta que evalúa índices de humedad del suelo derivados de simulaciones hidrológicas, demostraron que durante el periodo 1950-2000 existe una tendencia creciente positiva en la humedad del suelo (humectación) para gran parte del centro de Argentina. Esto autores demostraron que esta tendencia varía según la temporada. La mayor tendencia de humectación ocurre durante el verano austral (diciembre-febrero) y el otoño (marzo-mayo). Dentro de las tendencias a largo plazo identificadas, existe una considerable variabilidad en las escalas de tiempo de interanual a decadal.

En las últimas décadas, se ha avanzado en la comprensión del impacto de los extremos de precipitación en las aguas subterráneas y, en particular, cómo se propagan las sequías a través de los sistemas hidrológicos. En Argentina, Venecio y Varni (2003) y Ferreira et al. (2009) estimaron la recarga por precipitación con registros a paso de tiempo diario de precipitación y nivel freático en dos localidades de la provincia de Santa Fe: Rafaela y Oliveros. Estos autores hallaron que la recarga promedio del acuífero responde a los excesos o déficits de precipitación. Venencio y García (2011) estudiaron la variabilidad y previsibilidad interanuales de las profundidades del nivel freático en la provincia de Santa Fe entre 1970-2008. Estos autores hallaron una tendencia positiva en la precipitación y los niveles freáticos, con periodicidades entre 3 y 8 años que se pueden vincular con el fenómeno El Niño- Oscilación del Sur (ENOS).

En el centro-noreste del país existe una importante variabilidad climática influenciada fundamentalmente por el ENOS (e.g., Berri et al. 2002; Boulanger et al., 2005). Esta



variabilidad favorece prolongados periodos de precipitaciones intensas que desencadenan inundaciones (Krepper y García, 2004; Lovino et al., 2018), alternándose con largos periodos con precipitaciones deficitarias que, por el contrario, dan lugar a intensas sequías (Penalba y Vargas 2004; Llano y Penalba 2011). Reconociendo a esos periodos de excesos de precipitación y sequías como eventos extremos, este capítulo profundizará en el conocimiento de los mismos. Por consiguiente, el objetivo del capítulo es identificar los eventos extremos de precipitación y su variabilidad espacio-temporal así como su respuesta en la humedad del suelo y la influencia en el nivel freático (subsistemas zona no saturada-acuífero libre) en el nordeste de Argentina. El análisis se basa en el estudio de los eventos extremos históricos en distintas escalas temporales, su distribución espacial, las direcciones de sus tendencias y los ciclos oscilatorios que caracterizan su variabilidad temporal.

## **2.2 Datos y análisis de variables**

### **2.2.1 Análisis de la precipitación**

Se utilizan datos de precipitación observados y datos grillados en la región 58.5°W-63.5°W y 27.5°S-34.5°S (Figura 2.1). Los datos de precipitación observados utilizados corresponden a 8 estaciones meteorológicas localizadas en la provincia de Santa Fe o en las proximidades (puntos rojos en la Figura 2.1). Además, para establecer la distribución espacial de la precipitación y compararla con los datos de CRU TS 4.01 y GPCC v2018, se utilizaron otras 8 estaciones distribuidas en el nordeste de Argentina (ver puntos azules en la Figura 2.1). Los datos de las estaciones provienen del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). En la selección de las estaciones se consideró la calidad de los datos y la extensión de los registros, siendo utilizado el periodo 1911-2016.

Por otra parte, se utilizan dos bases de datos grillados: CRU TS 4.01 (Climatic Research Unit Time Series; Harris et al., 2014), con una resolución espacial de 0.5° x 0.5°, a paso mensual en el periodo 1901-2016 y GPCCv2018 (Global Precipitation Climatology Center Versión 2018; Schneider et al., 2018), con una resolución espacial de 0.25° x 0.25°, a paso mensual, en el período 1891-2016. Se evaluó cuál de las dos bases de datos es capaz de representar mejor la precipitación observada en las estaciones meteorológicas en el área de estudio.

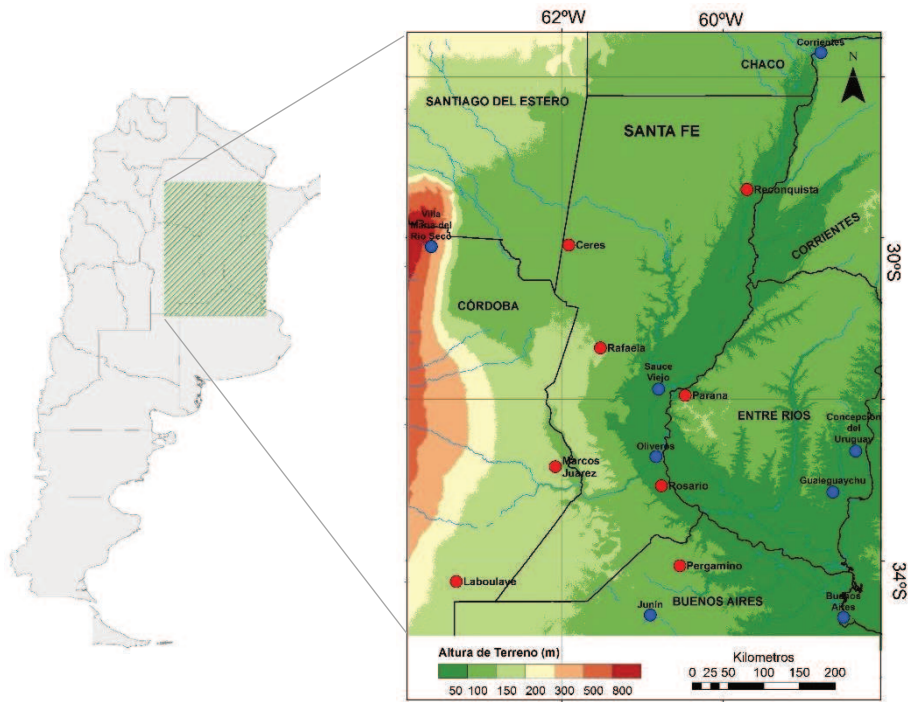


Figura 2.1 Región de estudio y estaciones pluviométricas utilizadas (puntos rojos)

La Figura 2.2 muestra la serie temporal de la precipitación total anual promediada en la región de estudio en el periodo común (1911-2015) entre las dos bases de datos y las observaciones puntuales. La figura muestra que el ajuste de las bases de datos con respecto a las observaciones puntuales es muy bueno, reconociendo correctamente la variabilidad temporal. El valor promedio para los datos observados es de 956 mm, mientras que para GPCC es de 982 mm y para CRU de 941mm. Por otro lado, se hicieron correlaciones de Pearson entre cada una de las series grilladas con respecto a los datos observados, lo que resultó en valores estadísticamente significativos mayores a 0.90 en ambas bases grilladas.

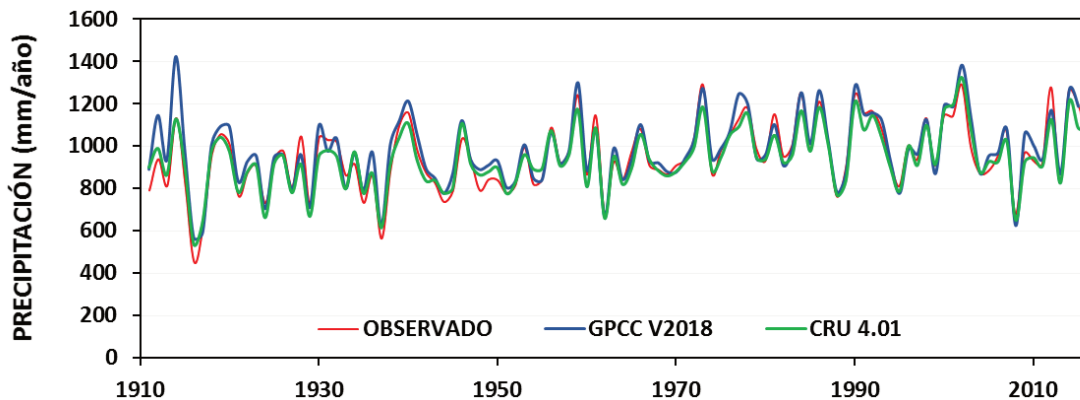


Figura 2.2 Serie temporal de la precipitación total anual promediada en la región de estudio para las observaciones, GPCC v2018 y CRU TS 4.01 en el periodo (1911-2016).

La Figura 2.3 presenta el ciclo anual de la precipitación promediada espacialmente en el período climatológico 1986-2015, para las dos bases de datos y las observaciones en las estaciones. En la figura se observa que los máximos de precipitación acumulada se dan en marzo y diciembre, con una disminución en los meses de invierno, alcanzando el mínimo en julio. Los datos de GPCC y CRU sobreestiman muy levemente los valores de la precipitación con respecto a los observados entre los meses de mayo a septiembre. En los meses de octubre a marzo, el GPCC estima mejor la precipitación respecto a CRU. En base a los resultados expuestos, se elige la precipitación de GPCC dado que estima los valores medios observados con mayor eficiencia que la base de datos del CRU.

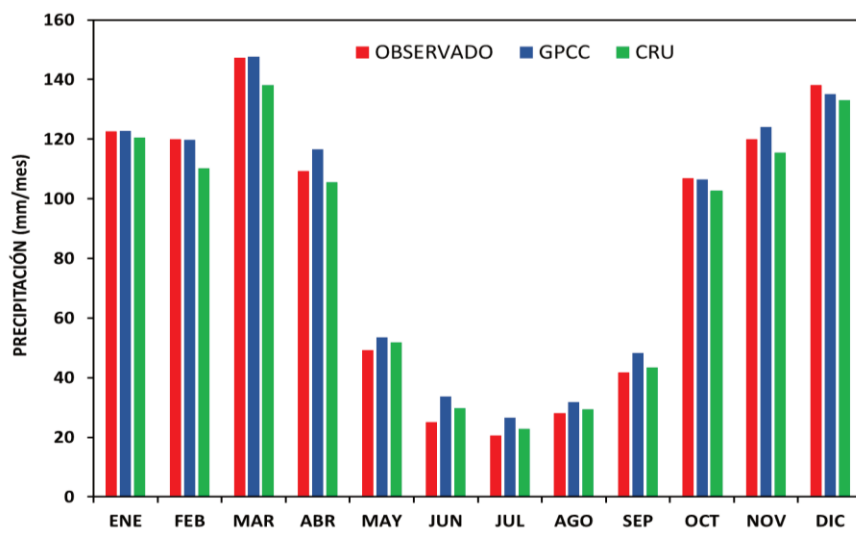


Figura 2.3 Ciclo anual de la precipitación media espacial en el período 1986-2015 del área en estudio representado por las observaciones, CRU TS 4.01 y GPCC v2018.

La Figura 2.4 presenta la distribución espacial del promedio de la precipitación anual en el período normal 1986-2015, para las observaciones (Fig. 2.4a) y las dos bases de datos grilladas (Fig. 2.4b, c). En la misma se observa que las isohietas se incrementan de oeste a este. Los valores máximos se dan en el extremo NE alcanzando valores mayores a los 1200 mm, mientras que los mínimos, inferiores a 700 mm, se observan en el NO de la región analizada. En particular CRU presenta una mayor área con precipitaciones superiores a los 1200 mm (Fig. 2.4c) con respecto a la observada (Figura 2.4a), mientras que GPCC (Fig. 2.4b) presenta mejor definición espacial debido a su mayor resolución. Las isohietas de ambas bases de datos grilladas presentan un corrimiento hacia el oeste respecto a la observada.

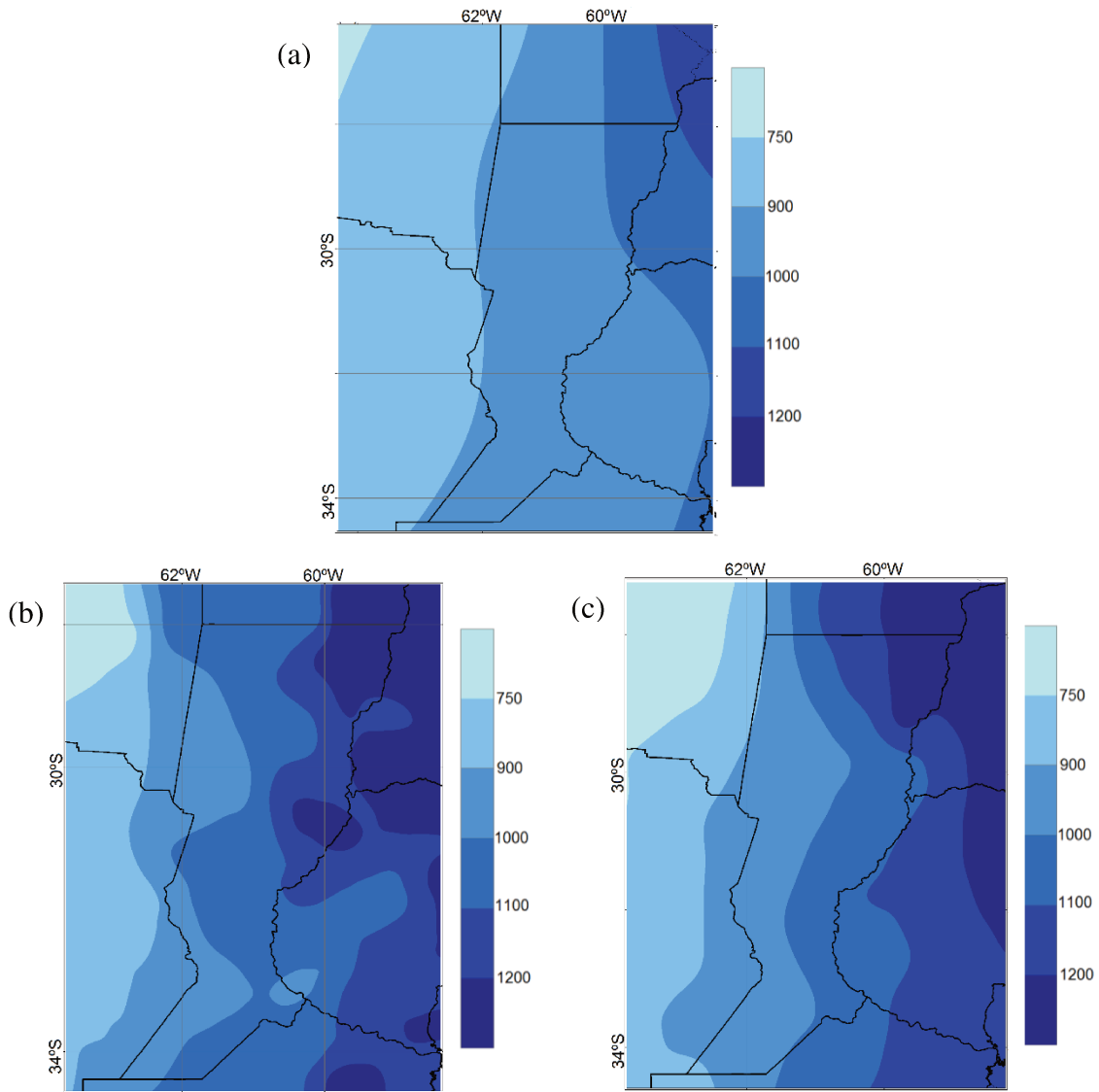


Figura 2.4 Distribución espacial de la precipitación media anual (mm) en el período normal 1986-2015: a) Observado, b) GPCC v2018, c) CRU TS 4.01

La Figura 2.5 presenta los diagramas de dispersión para los datos de precipitación grillados con las series de datos observados para las 8 estaciones. Se aprecia que los datos del GPCC ajustan mejor la precipitación observada, ya que sus coeficientes resultaron superiores a 0.9; en cambio, CRU presentan valores de  $R^2$  inferiores a 0.7 en 3 estaciones analizadas. Asimismo, se puede observar como la base de datos del GPCC representa adecuadamente las fluctuaciones extremas debido a que los valores máximos de precipitación se ajustan a la pendiente media de los datos.

En síntesis, para alcanzar los objetivos propuestos en este capítulo, se utiliza la base de datos de precipitación del GPCC (1901-2016) para análisis areales y los datos de las estaciones observadas (períodos temporales diversos) para análisis locales.

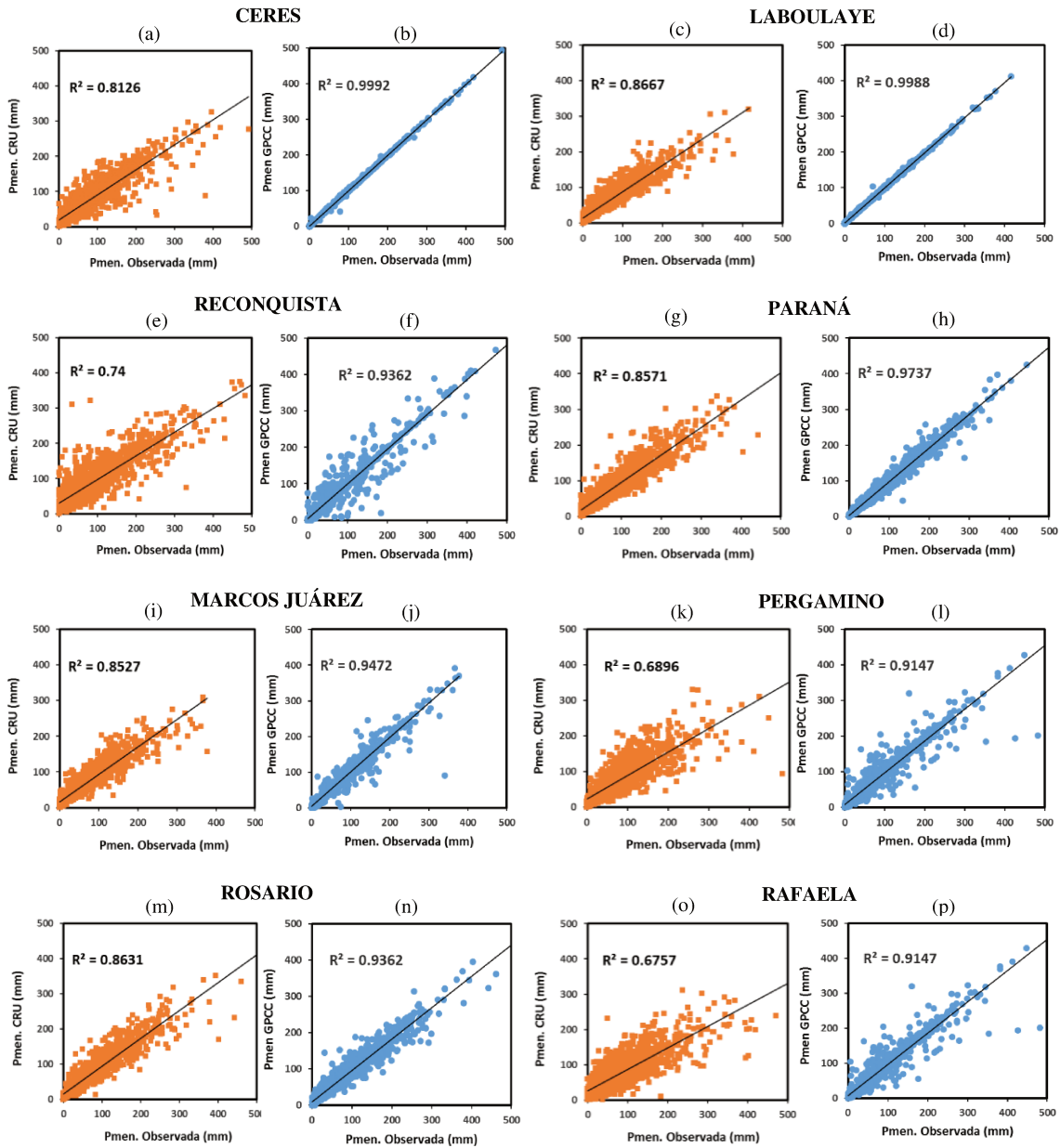


Figura 2.5 Diagramas de dispersión de datos de precipitación en puntos de grilla (CRU TS 4.01 y GPCC v2018) vs observados en las estaciones: a-b Ceres (1901-2016), c-d Laboulaye (1903-2016), e-f Reconquista (1911-2016), g-h Parana (1917-2016), i-j Marcos Juárez (1910-2016), k-l Pergamino (1901-2016), m-n Rosario (1911-2016), o-p Rafaela (1901-2016).

### **2.2.2 Análisis de la humedad del suelo**

La zona no saturada se analiza a partir del contenido de humedad de suelo obtenida del Global Land Data Assimilation System (GLDAS; Rodell et al., 2004; Meng et al., 2012). Los datos utilizados en este capítulo tienen un paso de tiempo mensual y una resolución espacial de  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  para el período 1979-2016. La humedad del suelo no es una medición directa, pero es producida por el modelo de superficie Noah forzado por observaciones. El modelo Noah considera cuatro capas de suelo (0-10 cm, 10-40 cm, 40-100 cm, y 100-200 cm) totalizando los 2 metros de profundidad (Rodell et al., 2004)

En la Figura 2.6 se representa la distribución espacial mensual promedio de la humedad de suelo. En la capa superior (Fig. 2.6a) se observa al noroeste de la región un menor contenido de humedad, mientras que en el este predominan los valores máximos. En las capas de 10-40cm y 40-100cm (Fig. 2.6b y 2.6c) se observan áreas con menor contenido de humedad al suroeste y en el sureste los valores máximos. En la capa inferior (Fig. 2.6d) predomina un menor contenido de humedad en el norte de la región y en el centro/sur los valores máximos.

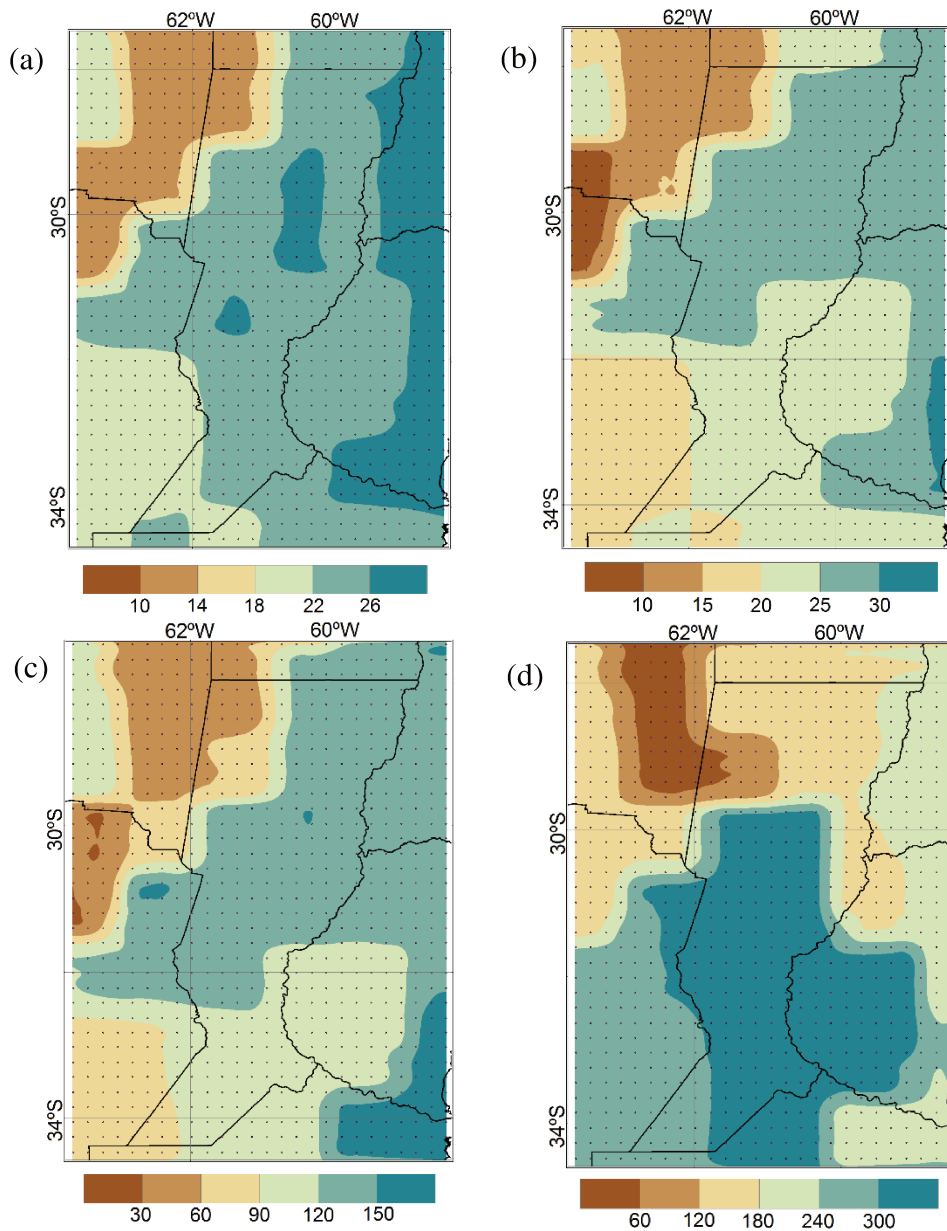


Figura 2.6 Distribución espacial de la humedad del suelo mensual (en mm) en el período normal 1986-2016: a) 0-10 cm, b) 10-40 cm, c) 40-100 cm, y d) 100-200 cm

### 2.2.3 Análisis del nivel freático

La zona saturada se estudia a partir del nivel freático mensual correspondiente a la estación Rafaela, con datos provenientes del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) en el periodo 1970-2017. Esta estación fue seleccionada considerando la extensión de los registros y la calidad de los datos. Rafaela se encuentra ubicada en la región hidrogeológica Occidental (ver punto rojo en Figura 2.7), aunque su análisis refiera solo al comportamiento local de dicha estación. La región hidrogeológica

Occidental (definida por Auge, 2004) abarca la faja occidental de la provincia de Santa Fe, extendiéndose entre el extremo norte y casi el extremo sur de la misma (ver Figura 2.7).



Figura 2.7 Regiones hidrogeológicas de la provincia de Santa Fe (Auge, 2004)

En la Figura 2.8 se presenta la serie temporal del nivel freático medio mensual en el periodo 1970-2017, donde se observa una marcada variabilidad interanual y un ascenso del nivel freático en los últimos 40 años. El nivel freático mínimo se registró en julio y agosto de 1972 con una profundidad de 12,29 m, mientras que el valor máximo ocurrió en el mes de abril de 2016 con un valor de 0,05 m.

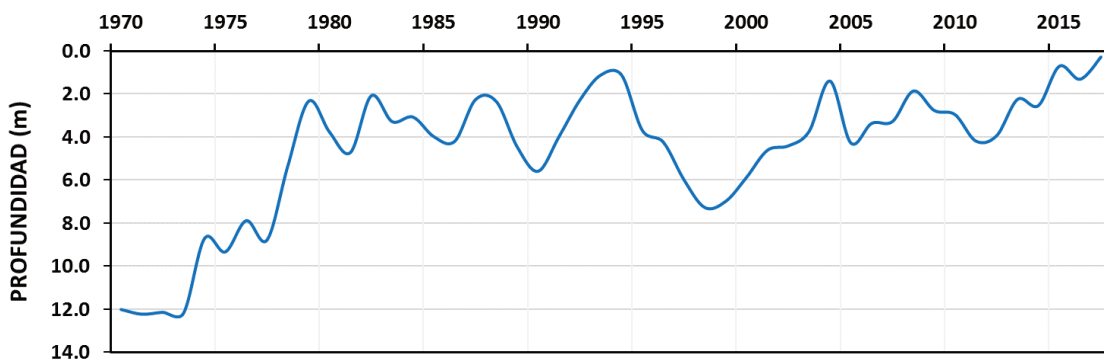


Figura 2.8 Serie temporal del nivel freático medio mensual en el periodo 1970-2017, estación Rafaela.



## 2.3 Metodología

### 2.3.1 Índices Estandarizados no Paramétricos

Los eventos extremos se caracterizan mediante la construcción de índices estandarizados (SI) no paramétricos (Hao y AghaKouchak, 2014; Farahmand y AghaKouchak, 2015). Los SI se aplican a la precipitación (SPI: Standardized precipitation index), la humedad del suelo (SSI: Standardized Soil Moisture Index) y el nivel freático (SGI: Standardised Groundwater level Index).

Los índices estandarizados no paramétricos se estiman a partir de una función empírica basada en Gringorten (1963) determinada en función de la probabilidad de ocurrencia de cada variable según la expresión:

$$P(x_i) = \frac{i - 0.44}{N + 0.12} \quad (2.1)$$

donde N es el tamaño de la muestra, i es la posición del dato en orden ascendente, y  $p(x_i)$  es la probabilidad empírica correspondiente.

Una vez obtenido el valor de la probabilidad, el índice estandarizado (SI) se determina como sigue:

$$SI = \varphi^{-1}(p) \quad (2.2)$$

donde  $\varphi$  es la función de distribución normal estándar y p es la probabilidad derivada de la ecuación 2.1.

Estos índices permiten cuantificar los déficits/excesos hídricos y su incidencia en la zona no saturada y saturada del suelo, así como también sus interrelaciones. Cuando el SI excede un cierto umbral, se clasifica como un evento extremo. Para este estudio, se considera la escala de clasificación que proponen Hao et al. (2014), presentada en la Tabla 1. Esta escala define a los eventos de déficit con un valor de índice menor o igual a -0.5 y los excesos un valor de índice iguales o mayores a 0.5. Entre -0.5 y 0.5 se consideran condiciones normales. Para este estudio, la duración de los eventos extremos se considera como la cantidad de meses sobre o por debajo de los umbrales de normalidad (0.5 y -0.5, respectivamente).

Tabla 2.1 Escala de clasificación de eventos extremos según Hao et al. (2014)

| <b>INDICE ESTANDARIZADO</b> | <b>INTENSIDAD</b>       |
|-----------------------------|-------------------------|
| > 2.0                       | Excepcionalmente húmedo |
| 1.60 a 1.99                 | Extremadamente húmedo   |
| 1.30 a 1.59                 | Severamente húmedo      |
| 0.80 a 1.29                 | Moderadamente húmedo    |
| 0.50 a 0.79                 | Anormalmente húmedo     |
| -0.50 a 0.50                | Normal                  |
| -0.50 a -0.79               | Anormalmente seco       |
| -0.80 a -1.29               | Moderadamente Seco      |
| -1.30 a -1.59               | Severamente seco        |
| -1.60 a -1.99               | Extremadamente seco     |
| < -2.0                      | Excepcionalmente seco   |

En este estudio, se calculan las series de tiempo promediadas arealmente para los índices SPI (precipitación) y SSI (humedad del suelo) y puntualmente para el SGI (nivel freático) en el período 1979-2016 en las escalas temporales de 1, 3, 6, 9, 12 y 24 meses. La vinculación entre los subsistemas zona no saturada y zona saturada se realizó a través de la comparación de los campos espaciales y temporales de SPI, SSI y SGI y el número de eventos, incluyendo su duración, evaluados en distintas escalas temporales. Se evalúa la correlación de las series entre los índices SPI y SSI para las distintas escalas temporales y los cuatro niveles en los que se estudia la humedad del suelo.

### **2.3.2 Análisis de Componentes Principales**

Se examina la variabilidad espacial y temporal de los eventos extremos aplicando un Análisis por Componentes Principales (PCA, por sus siglas en inglés; Von Storch y Zwiers 1999; Wilks 2006) a los campos de SI de precipitación y humedad del suelo. El PCA reduce el conjunto de datos analizados a uno de menor tamaño a través de combinaciones lineales de los patrones. Este método agrupa los patrones espaciales de tal forma que las primeras componentes retienen la mayor proporción de la variabilidad original. Las componentes resultantes se suelen denominar funciones ortogonales empíricas (EOF, por sus siglas en inglés) y desde el punto de vista físico, pueden considerarse como los patrones dominantes (Wilks, 2006).

El PCA se realiza mediante el método S (Wilks, 2006), considerando el índice estandarizado en puntos de cuadrícula individuales como variables ( $X_i$ ) y los períodos de

tiempo como individuos. Adicionalmente, se utiliza la matriz de correlación en el PCA para determinar las relaciones espaciales entre las variables. Finalmente, con la primera PC (que explica el mayor porcentaje de la varianza total), se evalúa la distribución espacial de la correlación para cada variable. La matriz de correlación, definida por

$$A = [a_{ij}] \text{ donde } a_{ij} = \text{Corr}(X_i, PC_j) \quad (2.3)$$

permite el cálculo de la proporción de la varianza de la variable  $X_i$  contabilizadas por las  $k$  primeros PC a través de la adición  $a_{i1}^2 + a_{i2}^2 + \dots + a_{ik}^2$ .

El PCA se aplicó a los índices estandarizados de precipitación en las escalas temporales de 3, 12 y 24 meses y a los índices estandarizados de contenido de humedad de suelo en escala temporal 6 meses para 10 cm, 40 cm, 100 cm y 200 cm. Las componentes principales se eligieron en función de la gráfica de los autovalores versus los autovectores, conocido como diagrama de Lev (Craddock y Flood, 1969).

### 2.3.1 Análisis Espectral Singular

Se empleó un Análisis Espectral Singular (SSA, por su sigla en inglés; Ghil et al. 2002; Wilks 2006) con el fin de determinar las estructuras espacio-temporales de tendencias y modos oscilatorios de las series de los índices estandarizados. Las tendencias no lineales permiten evaluar la evolución temporal de los cambios a largo plazo en los eventos extremos mientras que los modos oscilatorios proporcionan información sobre su variabilidad temporal.

El método SSA describe la variabilidad de una serie de tiempo por su descomposición de valores propios en funciones ortogonales empíricas temporales (T-EOFs, por sus siglas en inglés) y componentes principales temporales (T-PC, por sus siglas en inglés). Cada T-PC representará una versión filtrada de la serie de tiempo original con una parte de la varianza asociada con su valor propio correspondiente. Se puede encontrar una estructura oscilatoria cuando dos valores propios consecutivos son casi iguales y sus T-PCs asociados están en cuadratura. Se obtiene una tendencia no lineal cuando el error de estimación de un valor propio inicial, aquí calculado según Ghil y Vautard (1991), no se superpone con otros valores propios y su T-PC correspondiente está variando lentamente y no está correlacionada con otros T-PC (Vautard, 1995; Wilks, 2006).

El ancho de ventana de trabajo ( $M$ ) determina el máximo periodo que captura el SSA. La longitud de la ventana no debe exceder un tercio de la longitud de la serie de tiempo para representar adecuadamente los ciclos entre  $M/5$  y  $M$  (Vautard, 1995). La serie se puede reconstruir en su totalidad o parte de ella usando una combinación lineal de las T-PC y T-EOF (Ghil et al., 2002).

Considerando que el período común de datos disponible de las variables precipitación, humedad de suelo y nivel freático es de 37 años, se seleccionó una longitud de ventana  $M = 10$  años. Por consiguiente, la variabilidad interanual representa el espectro entre 2 y 10 años.

## **2.4 Resultados**

### **2.4.1 Identificación de los eventos extremos**

Los índices estandarizados SPI y SSI permiten identificar los eventos extremos en distintas escalas temporales, de corto período o en escalas estacionales (1, 3 y 6 meses), y de largo periodo o en escalas de baja frecuencia (12 y 24 meses). Por otra parte, se evalúa el efecto de los eventos extremos de precipitación en la zona no saturada (SSI) y saturada (SGI) en Rafaela, siendo el periodo común de registro de datos entre precipitación, humedad del suelo y nivel freático el comprendido entre 1979-2016.

#### **2.4.1.1 Promedio espacial**

La Figura 2.9 presenta una síntesis gráfica de los valores mensuales promedios espaciales del SPI y del SSI (en diferentes profundidades) para el nordeste de Argentina en las diferentes escalas temporales. Para el periodo analizado se categorizan 9 eventos húmedos (gammas de azul) y 5 eventos secos (gammas de rojo) de acuerdo a su intensidad según la Tabla 2.1. De manera general, la figura muestra que a medida que la escala temporal analizada crece, se produce un desfase en el inicio y la finalización de los eventos. Este desfase aparece como un desplazamiento hacia la derecha en cada evento a medida que crece la escala temporal, así como la profundidad del suelo de la zona no saturada. Este resultado muestra la consistencia física del modelado de superficie, ya que cuando se incrementa la profundidad, la humedad del suelo (SSI) tiene mayor tiempo de respuesta ante la precipitación (SPI).

En la Figura 2.9 se identifican dos eventos categorizados como excepcionales en todas las escalas temporales analizadas en ambos índices. El primero de ellos es un evento húmedo excepcional registrado en los años 2000-2003, con una duración promedio de 40 meses; el segundo, un evento seco excepcional ocurrido entre los años 2008-2009 que se prolongó por 12 meses. Durante los años 1988-1989 se observa un evento seco excepcional de una duración de 10 meses, que en baja frecuencia persiste como evento seco extremo. En los años 1995-1997 se presentan 2 eventos secos extremos consecutivos de duración promedio de 9 meses. Estos eventos en la escala temporal de 24 meses se aprecian como un único evento. Finalmente, en el año 2006 se muestra un evento de sequía severa reflejada en 4 escalas temporales con una duración promedio de 12 meses. Los eventos húmedos severos se identifican en los años 1981-1982, 1984-85, 1986-1987, 1991-1993, 1998-1999, 2007, 2010, 2014-2015. Se destaca que los SPI muestran eventos consecutivos de corta duración, es decir, entre uno y seis meses, mientras que los SSI reflejan dichos eventos como continuos a medida que se profundiza en las capas de suelo analizadas.

Las correlaciones entre los índices SPI y SSI para las distintas escalas temporales y en los diferentes niveles de humedad de suelo indican que la mejor correlación se da entre la serie de SPI de 12 meses y SSI de 6 meses, siendo la mayor a 40 cm de profundidad ( $r=0.81$ ). Los resultados de las correlaciones se encuentran en el Anexo I, Figura A.I.1.

La Figura 2.10 presenta una síntesis gráfica de los valores del SPI y del SSI (en diferentes profundidades) para la estación Rafaela en las diferentes escalas temporales en el periodo 1979-2016. Esta evaluación se realizó para determinar el comportamiento de la zona saturada (a través del SGI) en respuesta de los extremos de precipitación (SPI) y su paso por la zona no saturada (SSI). Los resultados son similares que para el promedio areal mostrado en la Figura 2.9. Los índices estandarizados reconocen 9 eventos húmedos (gamas de azul) y 4 eventos secos (gamas de rojo) de acuerdo a su intensidad según la Tabla 2.1. Los eventos húmedos alcanzan magnitudes excepcionales, donde destacan dos eventos por su extensa duración. El primero, se identifica en los años 2000-2003 con una duración promedio de 50 meses. El segundo, en los años 1981-1984 se presenta como dos eventos consecutivos. Este evento en SSI para la capa de 100-200 cm y SGI se aprecian como un único evento con una duración promedio de 45 meses. El resto de los eventos húmedos se encuentran en los años 1986-1987, 1991-1993, 1998-1999, 2007, 2010, 2014-

2015. Los eventos secos excepcionales se identifican en los años 1988-1989, 1995-1997 y 2008. Los eventos secos excepcionales se encuentran en los años 2006 y 2013 con duraciones menores a 6 meses. Cabe resaltar que, en el año 2008 a pesar de las magnitudes de los SPI /SSI, no se identificó el evento de déficit en los niveles freáticos. Asimismo, se evidencia como los eventos de precipitación durante el periodo de estudio se manifiestan de manera retardada a través de los niveles inferiores, alcanzando un retardo en promedio de 10 meses en los niveles freáticos (SGI).

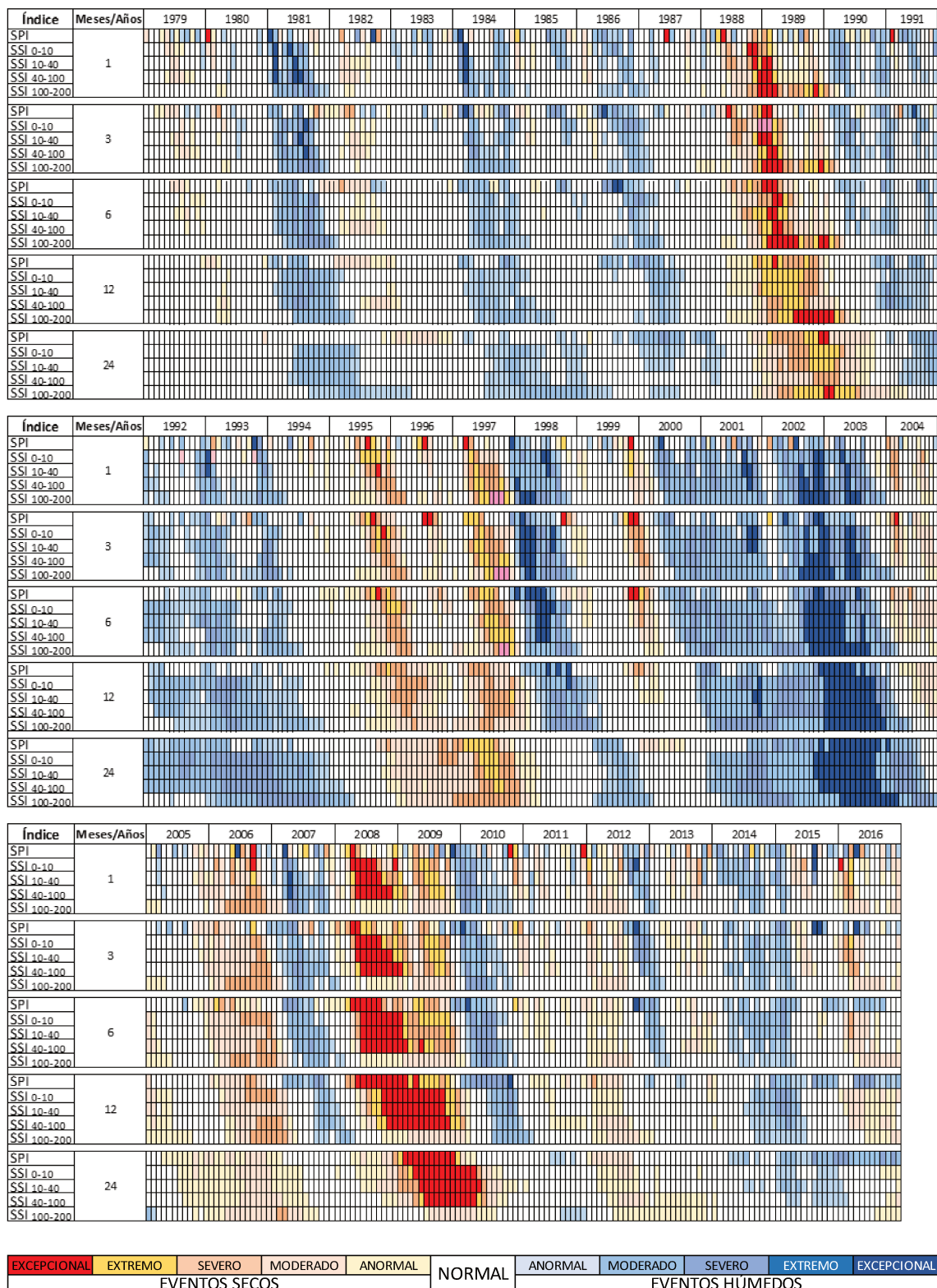


Figura 2.9 Síntesis gráfica de los valores mensuales promedios espaciales del SPI y del SSI (0-10 cm, 10-40 cm, 40-100 cm, 100-200 cm) para el nordeste de Argentina en las escalas temporales de 1, 3, 6, 12 y 24 meses, en el período 1979-2016. Tonos en la gama del rojo (azul) representan la intensidad de los eventos secos (húmedos) según la

Tabla 2.1

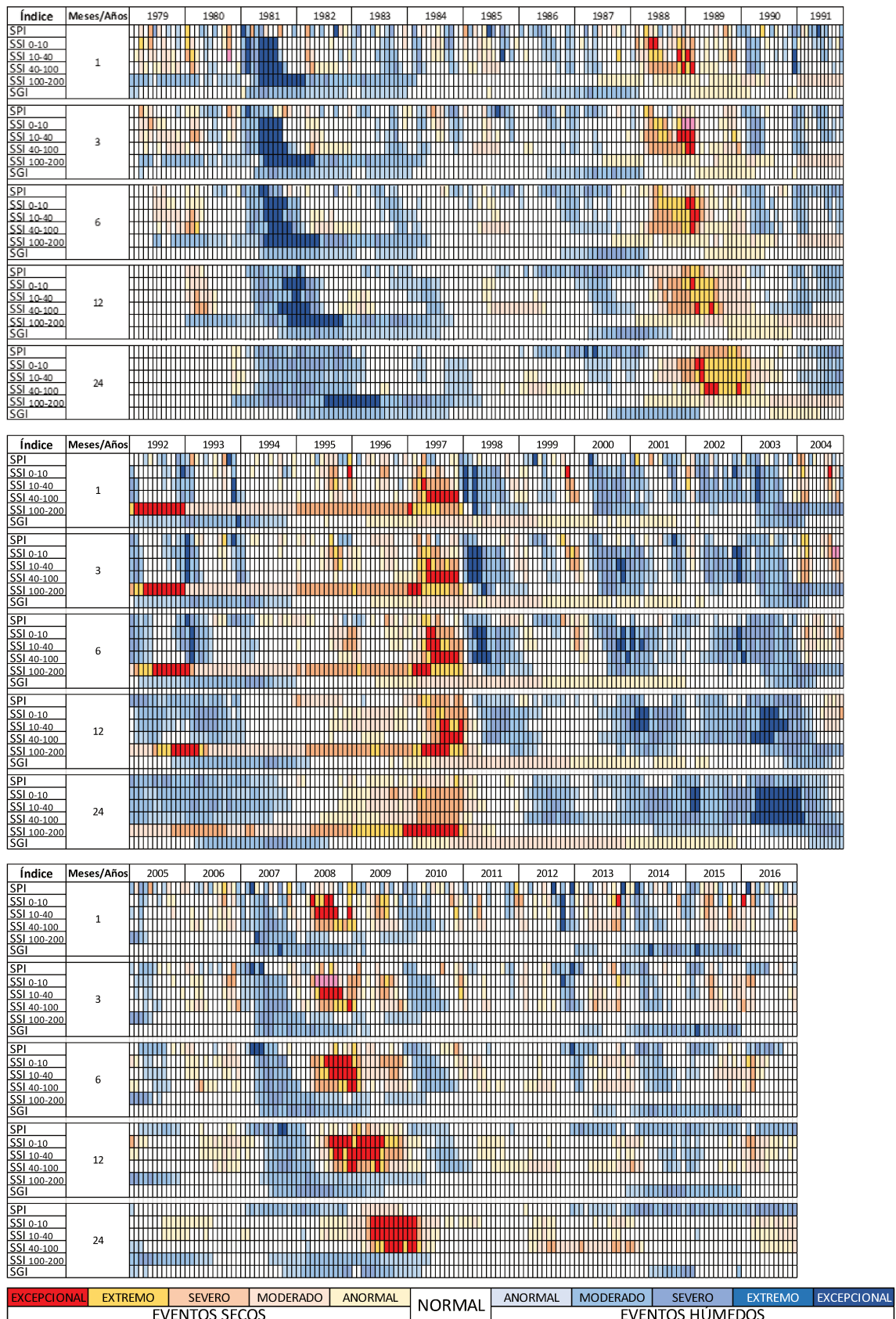


Figura 2.10 Síntesis gráfica de los valores mensuales promedios espaciales del SPI, del SSI (0-10 cm, 10-40 cm, 40-100 cm, 100-200 cm) y el SGI para Rafaela en las escalas temporales de 1, 3, 6, 12 y 24 meses, en el período 1979-2016. Tonos en la gama del rojo (azul) representan la intensidad de los eventos secos (húmedos) según la Tabla 2.1



### 2.4.1.2 Estaciones

Se analizan a continuación las series temporales del SPI y SSI para las estaciones: Ceres (Figura 2.11), Reconquista (Figura 2.12), Marcos Juárez (Figura 2.13) y Rosario (Figura 2.14), las cuales se encuentran distribuidas en la región estudiada. El análisis a nivel de estaciones permite evaluar períodos más extensos de eventos extremos de precipitación y se centra en escala temporal de 12 meses para enfatizar en el comportamiento de los períodos extremos húmedos y secos. Las figuras correspondientes a las escalas temporales de 1, 3, 6, 24 para cada una de estas estaciones se muestran en el Anexo II (Figuras A.II 1-36). En dicho Anexo también se muestran las figuras correspondientes a las restantes estaciones consideradas en este estudio (Rafaela, Paraná, Laboulaye y Pergamino) para todas las escalas temporales.

En la Figura 2.11 se presenta los índices SPI12 para período 1901-2016 y SSI12 para el periodo 1979-2016 en la estación Ceres, ubicada en el noroeste de la provincia. Los valores de baja frecuencia de SPI12 muestran 5 eventos secos y 7 eventos húmedos que alcanzan intensidades excepcionales. Se destacan los eventos secos entre los años 1916-1918 y 1935-1938 por presentar una duración de 37 meses. Mientras que los eventos húmedos más extensos se encuentran en los años 2000-2003 con una duración de 40 meses y 1991-1993 con una duración de 30 meses. En cuanto al SSI12, los eventos extremos se ven reflejados en los niveles inferiores con igual magnitud que los SPI y con cierto desfasaje con la profundidad. De manera general se observa en la figura que en el periodo 1920-1950 predominan los eventos secos mientras que entre los años 1970-2005 se destaca la ocurrencia de eventos húmedos.

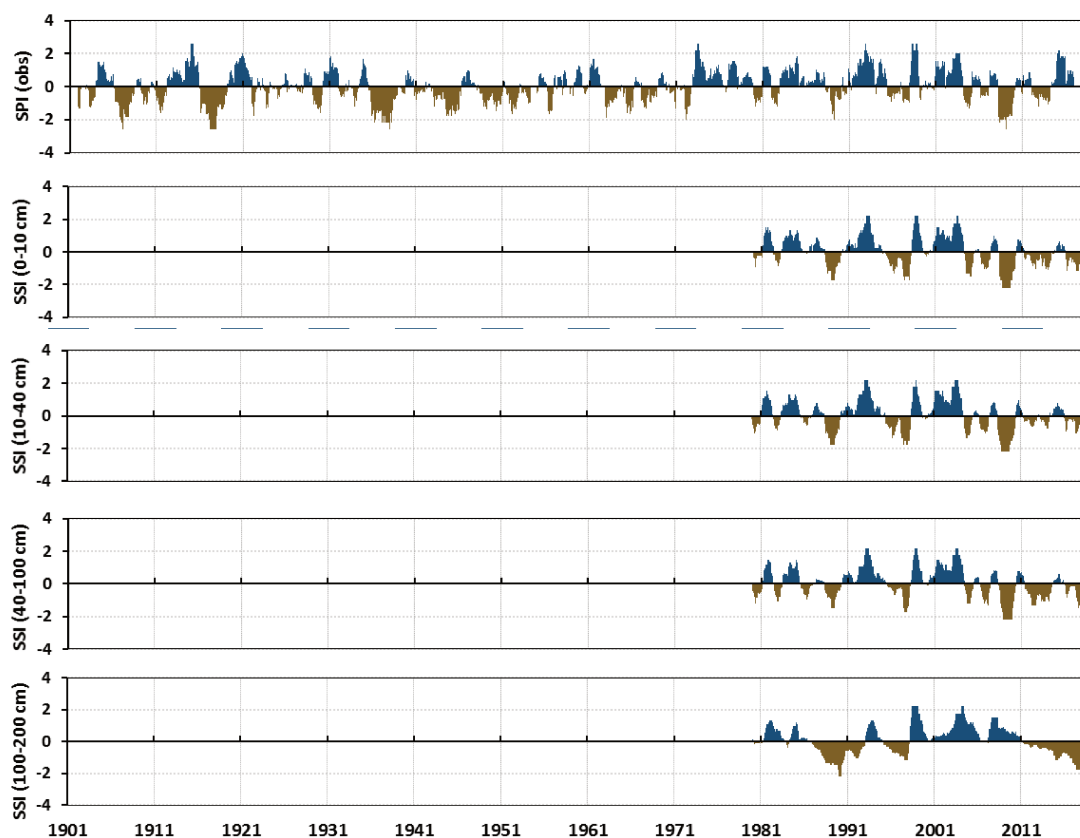


Figura 2.11 Series temporales para SPI12 en el periodo 1901-2016 y SSI12 (0-10 cm, 10-40 cm, 40-100 cm, 100-200 cm) en el periodo 1979-2016. Estación Ceres

En la Figura 2.12 se presenta la serie temporal del SPI12 en la estación Reconquista, situada en el noreste del área de estudio para el periodo 1901-2016 y el SSI12 para el periodo 1979-2016. Los SPI12 registran 13 eventos secos significativos y 15 eventos húmedos. Resaltan 2 eventos secos consecutivos de intensidad excepcional entre los años 1943-1946 y 1947-1957 con una duración de 38 meses. En el periodo 1983-1987 se registró el evento húmedo más extenso del periodo de análisis, con una duración de 56 meses reflejándose en los distintos estratos analizados. Se observa que los eventos de sequía a partir de 1960 disminuyeron tanto en intensidad, duración y frecuencia, mientras que los eventos húmedos tomaron relevancia.

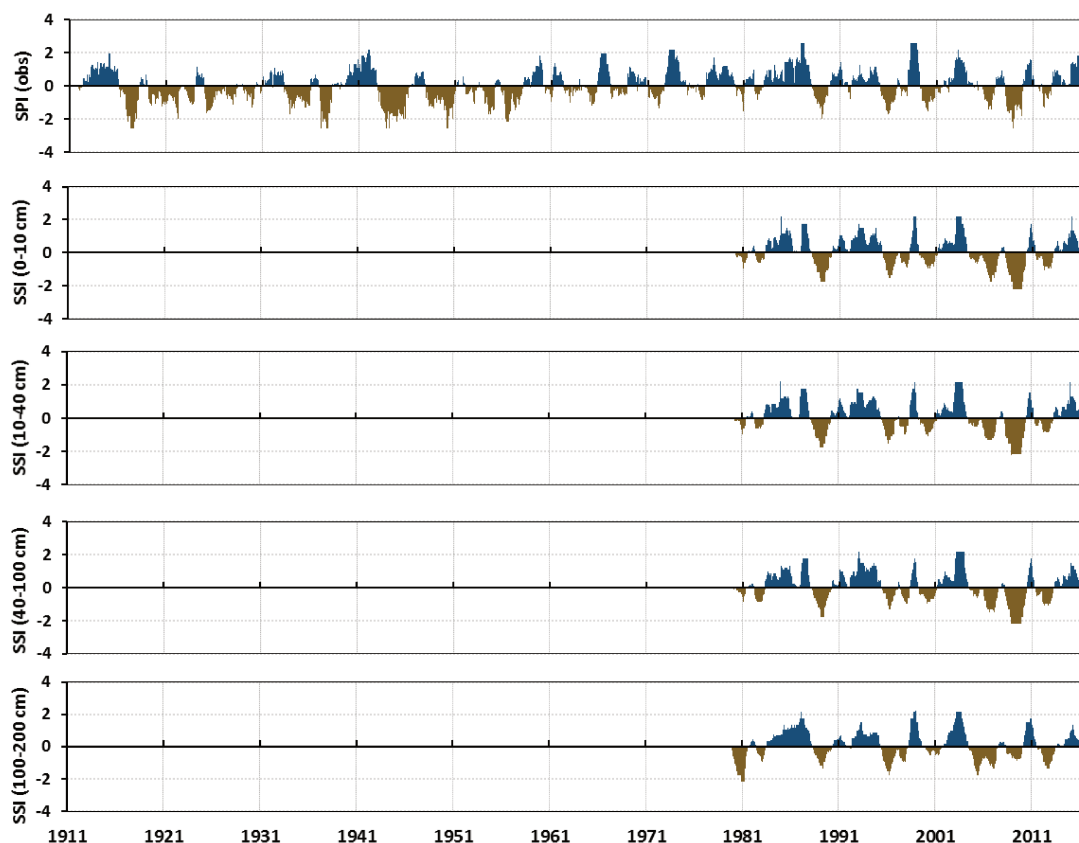


Figura 2.12 Series temporales para SPI12 en el periodo 1911-2016 y SSI12 (0-10 cm, 10-40 cm, 40-100 cm, 100-200 cm) en el periodo 1979-2016. Estación Reconquista

La Figura 2.13 presenta el análisis de la estación Marcos Juárez, limitando con el suroeste de la provincia. Los valores de SPI12 identifican 7 eventos húmedos y 7 eventos secos que alcanzan intensidad excepcional. De los eventos húmedos se resaltan 2, el primero entre los años 1975-1979 con una duración de 53 meses y entre 1990-1994 con una duración de 48 meses. Por otro lado, para los eventos secos predomina el evento excepcional entre los años 1916-1919 con 39 meses de duración. En las figuras del SSI12 se muestra menor coincidencia entre la severidad de las principales sequías o excesos de precipitación identificadas a partir de 1979 en las distintas profundidades analizadas. Principalmente en 100-200 cm donde se identifica un periodo húmedo hasta el año 2000, y posteriormente un periodo de déficit. Como el patrón común hallado en las demás estaciones, a principios del siglo XX predominó un déficit de precipitación en la región

en estudio, mientras que a mediados de siglo XX toman relevancia los eventos de excesos de precipitación de mayor frecuencia y duración.

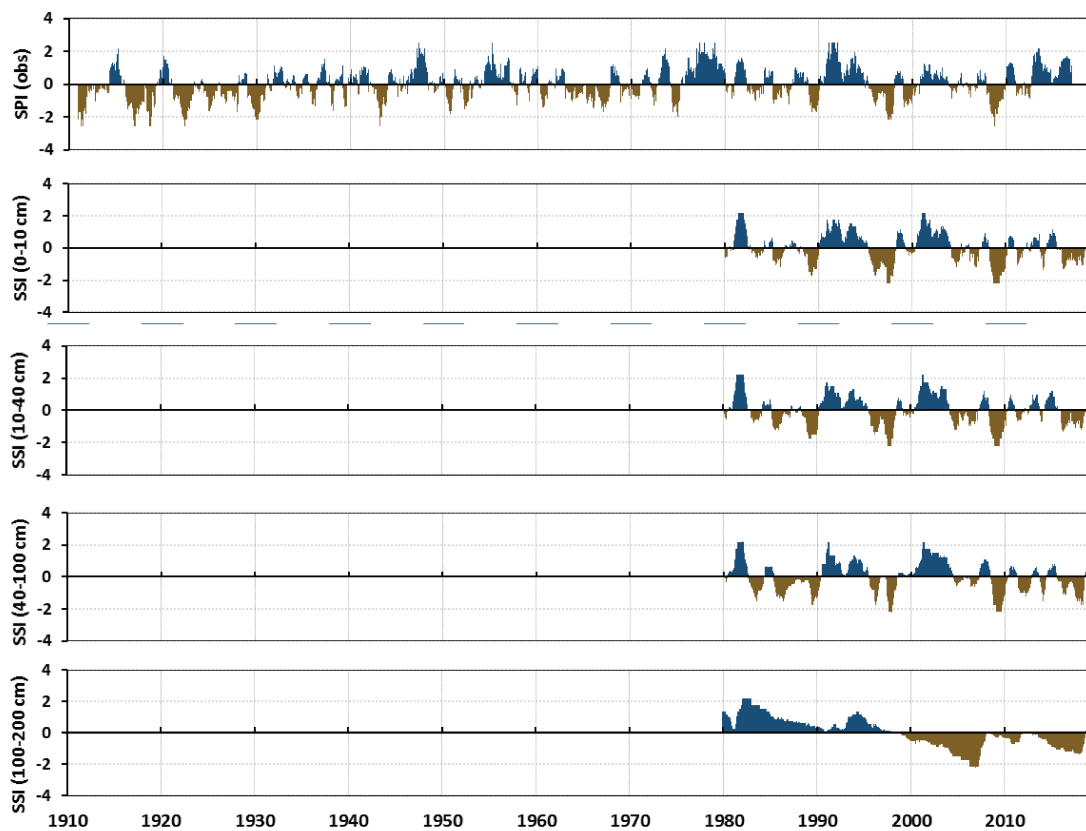


Figura 2.13 Series temporales para SPI12 en el periodo 1910-2016 y SSI12 (0-10 cm, 10-40 cm, 40-100 cm, 100-200 cm) en el periodo 1979-2016. Estación Marcos Juárez

La Figura 2.14 representa el SPI12 y SSI12 de la estación Rosario, al sudeste del área de estudio. En esta estación predominan 12 eventos de sequías de acuerdo al SPI12. Se destaca por su duración de 40 meses el evento que alcanza intensidad excepcional durante 1915-1919. Por otra parte, el SPI12 presenta 13 eventos húmedos, de los cuales 6 eventos se clasifican como excepcional, teniendo una duración de 41 meses el reconocido durante los años 2000-2003. El análisis del SSI12 para la profundidad de 100-200 cm no responde a la precipitación como en los niveles superiores.

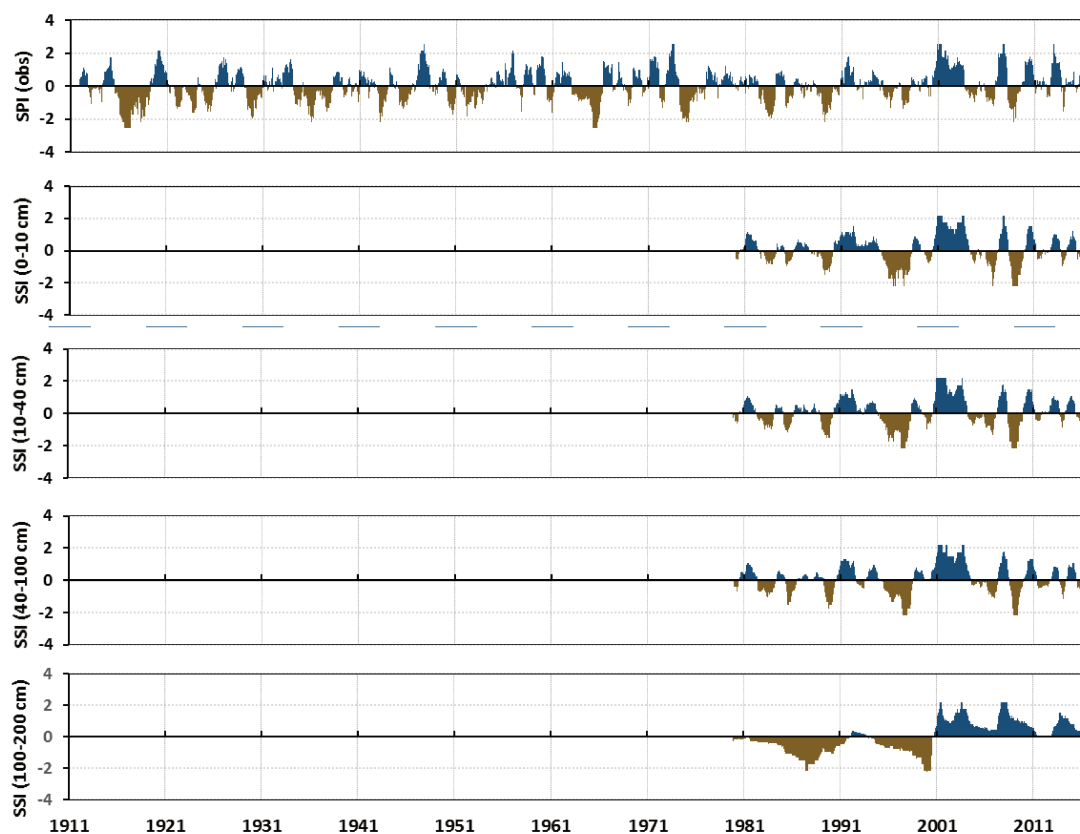


Figura 2.14 Series temporales para SPI12 en el periodo 1911-2016 y SSI12 (0-10 cm, 10-40 cm, 40-100 cm, 100-200 cm) en el periodo 1979-2016. Estación Rosario

Las series temporales de las estaciones presentadas anteriormente en conjunto con las expuestas en el Anexo II, de manera general definen 2 períodos demarcados en la región de estudio. Entre los años 1901-1970 predominan eventos extremos secos. En este periodo se destaca un evento de sequía excepcional registrado desde 1916 hasta 1918 con una duración promedio de 40 meses. En cambio, entre los años 1970-2016 prevalecen los eventos extremos húmedos. Entre ellos, resalta el evento húmedo que alcanza valores excepcionales de SPI entre los años 2000-2003. Además, favorecido por la gran variabilidad espacio-temporal de la región en escalas interanuales (Lovino et al., 2018), en los años 2008-2009 se presenta un evento seco excepcional con una duración promedio de 20 meses.

En general, se encontró coincidencia de los eventos extremos en intensidad, duración y frecuencia representados por el SPI y el SSI. Estos resultados sugieren que los eventos

extremos de precipitación de larga duración tuvieron un impacto considerable e identificable en los flujos de la zona no saturada del suelo en el nordeste de Argentina.

#### **2.4.2 Distribución espacio temporal de los eventos extremos**

Para definir la distribución espacio-temporal de los eventos extremos en la región de estudio se aplicó el ACP a los índices de SPI en las escalas temporales de 3, 12 y 24 meses y al SSI en la escala temporal de 6 meses, considerado este último por ser el de mayor correlación con la precipitación (ver Anexo I, Tabla 1).

En la Figura 2.15 se presentan los patrones de correlación entre las PCs y las series originales para los SPIs en las tres escalas temporales analizadas. La PC1 representa el 60% de la varianza total, en las tres escalas temporales. Se encontró similitud en los patrones de las correlaciones. Se observan correlaciones positivas superiores a 0.70 en la mayor parte del área de estudio, exceptuado en el suroeste donde presenta valores entre 0.60 y 0.50. La correlación máxima (0.90) se encuentra en el centro de la provincia de Santa Fe y se extiende hacia el este, abarcando gran parte de la provincia de Entre Ríos a medida que aumenta la escala temporal del SPI.

La evolución temporal de las series se define de manera general en 2 periodos; el primero 1901-1975 predominan eventos secos (Fig. 2.15c) que posteriormente disminuyeron tanto en intensidad, duración y frecuencia, y el segundo periodo 1976-2016 predominan los eventos húmedos. Durante el primer periodo mencionado se destacan 2 eventos secos extensos, interrumpido solo por valores positivos anómalos de corta duración. El primero a inicios del siglo XX (SPI promedio = -2.40), y entre los años 1922-1930 (SPI promedio = -1.20). Asimismo, el evento más severo se observa entre los años 1916-1919 con una SPI promedio = -3.11 con 39 meses consecutivos de duración. Por otro lado, los eventos húmedos más extensos e intensos se registraron a finales del siglo XX alcanzando picos excepcionales en los años en 1973 y en el siglo XXI el evento ocurrido en el año 2003.

La Figura 2.16 muestra el patrón de correlación de las PC1 para el SSI6 a distintos niveles de profundidad. La PC1 de SSI6 a 0-10 cm y 10-40 cm representa el 71.3%, a 40-100 cm el 68.3% y a 100-200 cm el 40%. Desde las capas 0 cm hasta 100 cm se aprecian valores positivos de correlación con un valor máximo de 0.95 en centro de la región, concordando con el patrón obtenido en la precipitación, sin embargo, el SSI cubre un área

más extensa. En cuanto a los 100-200 cm, difiere del patrón observado en los niveles superiores, y se observan que la correlación máxima se presenta junto al río Paraná y al noroeste de la región.

Finalmente, las anomalías del SSI6 en las primeras 3 profundidades del suelo coincide en intensidad, duración y frecuencia con las anomalías encontradas en la serie SPI12. Se resalta que, en los 200 cm (Fig. 2.16d) es similar el patrón de la serie y solo se ve atenuado en intensidad de los eventos, especialmente los eventos secos.

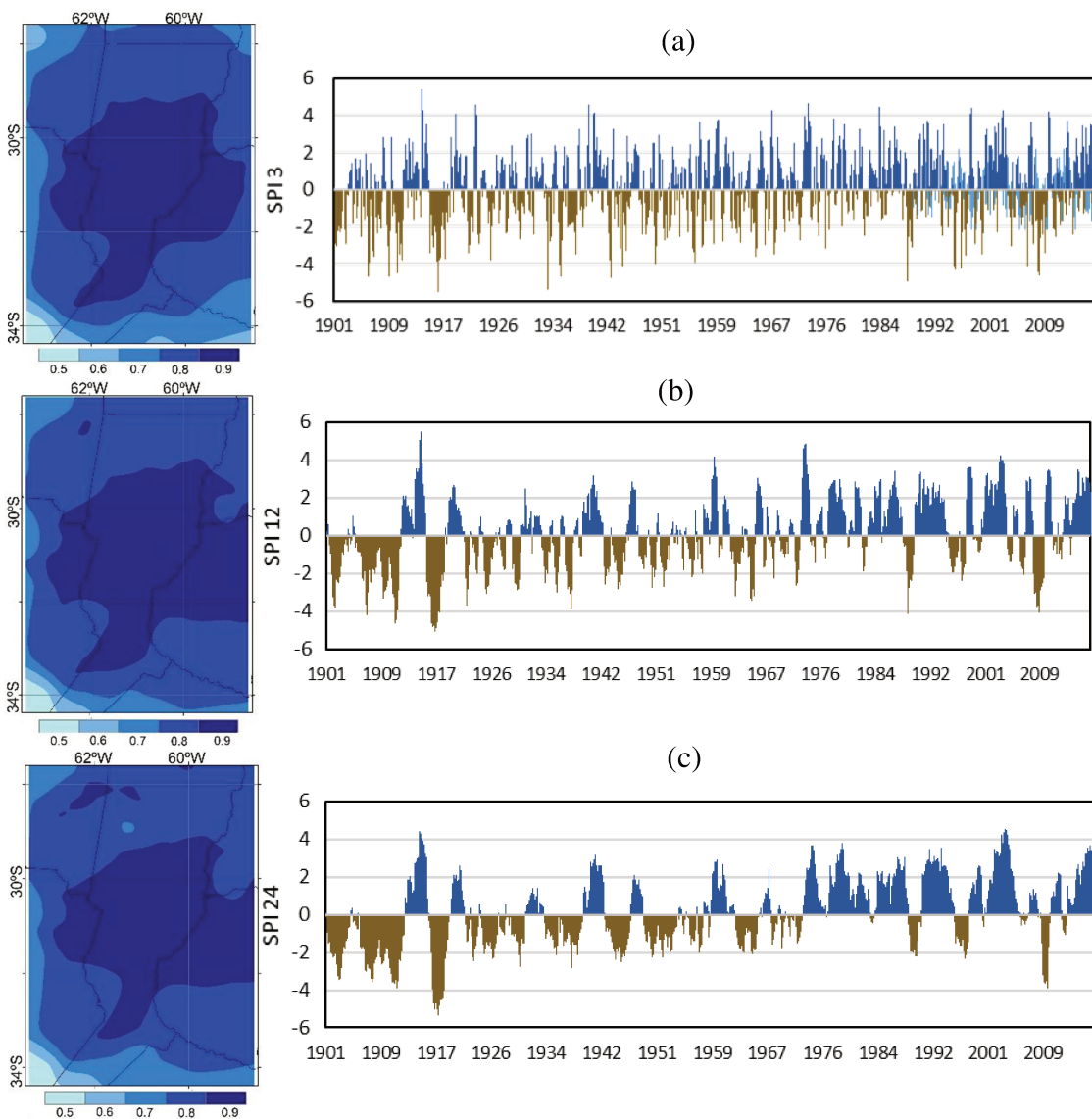


Figura 2.15 Distribución espacial de la correlación (mapas izquierdos) entre cada PC1 (paneles derechos) y cada serie temporal de los índices (a) SPI3, (b) SPI12, y (c) SPI24 en cada punto de grilla. Periodo 1901-2016.

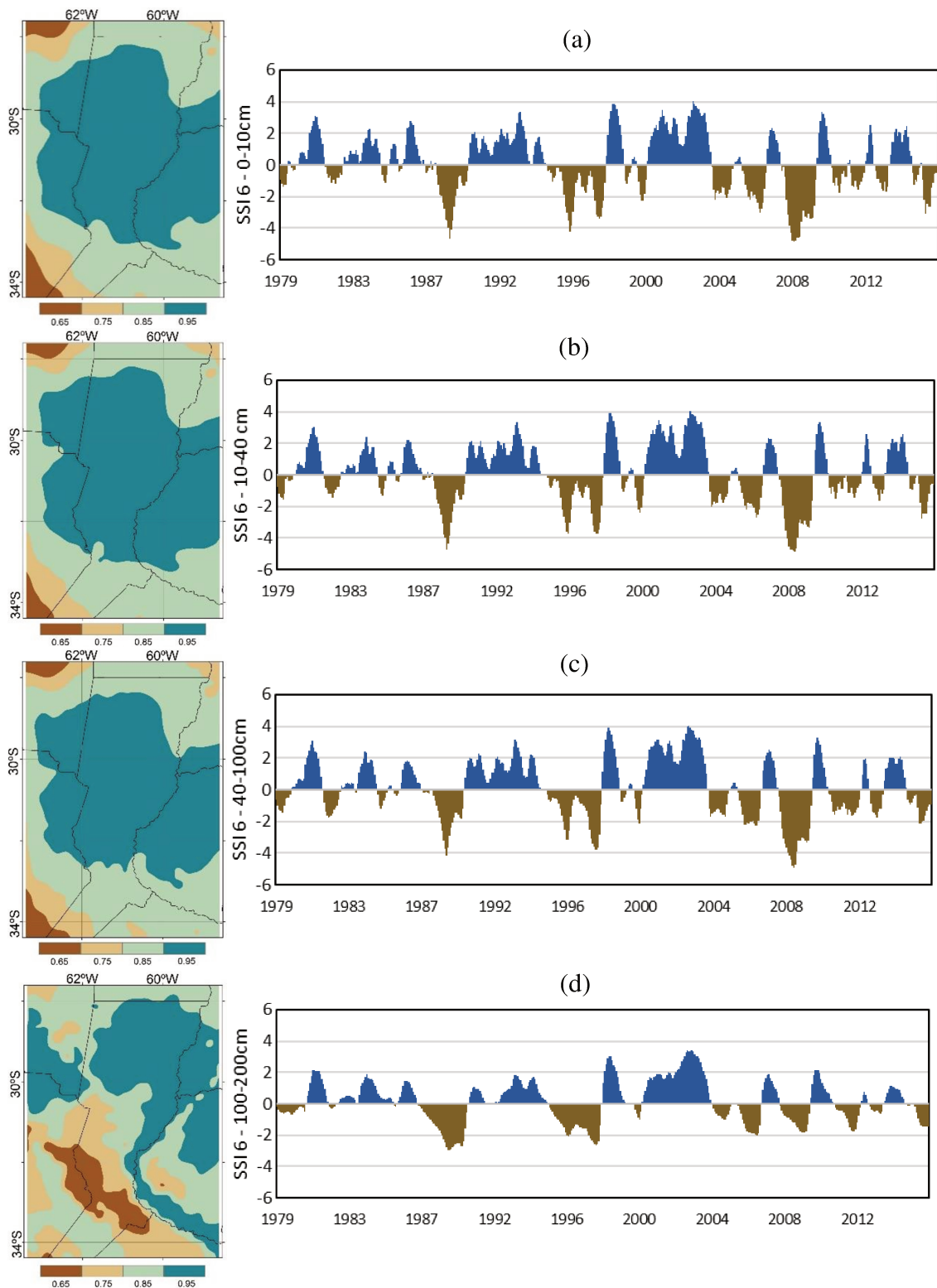


Figura 2.16 Distribución espacial de la correlación (mapas izquierdos) entre cada PC1 (paneles derechos) y cada serie temporal de los índices SSI6 a) 0-10 cm, b) 10-40 cm, c) 40-100 cm, d) 100-200 cm en cada punto de grilla. Periodo 1979-2017



Se determinó la variabilidad de las series temporales de los índices estandarizados promedio areal entre 1979 y 2016. La Tabla 2.2 resume los modos oscilatorios detectados mediante la aplicación del SSA. En las series de los índices estandarizados de 3, 6 y 12 meses existen dos bandas de variabilidad, una con períodos dominantes de  $T \approx 10$  años y otros de alta frecuencia de  $T \approx 2.5 - 4$  años. En cambio, las series de índices estandarizados a 24 meses solo presentan variabilidad temporal en escalas decadal ( $T \approx 10$  años). Es decir, hay dos bandas de variabilidad dominantes en todos los índices, con ciclos oscilatorios de período dominante  $T \approx 10$  años y otros de alta frecuencia de entre  $T \approx 2.5 - 4$  años. Cabe resaltar que no se hallaron tendencias no lineales durante este período, pero, tal como se discutió anteriormente, existe una marcada tendencia no lineal que se ha manifestado en períodos más prolongados. Esta tendencia se observa en dos períodos, antes de 1970 con predominancia de eventos extremos secos y luego de 1970 con mayor preponderancia de eventos extremos húmedos (Lovino et al., 2018a).

Tabla 2.2 Modos oscilatorios significativos obtenidos al aplicar SSA a los índices estandarizados y su correspondiente porcentaje de varianza.

| Índice        | 3                             |                        | 6                             |                        | 12                            |                        | 24                            |                        |
|---------------|-------------------------------|------------------------|-------------------------------|------------------------|-------------------------------|------------------------|-------------------------------|------------------------|
|               | Tendencia o Período Dominante | Varianza Explicada (%) | Tendencia o Período Dominante | Varianza Explicada (%) | Tendencia o Período Dominante | Varianza Explicada (%) | Tendencia o Período Dominante | Varianza Explicada (%) |
| SPI           | 9.3                           | 12.07                  | 4.0                           | 14.22                  | 9.1                           | 20.67                  | 8.7                           | 44.98                  |
|               | 4.0                           | 8.99                   |                               |                        | 3.9                           | 24.84                  |                               |                        |
|               | 2.3                           | 9.90                   | 2.3                           | 16.89                  | 2.3                           | 18.39                  | 4.4                           | 26.44                  |
| SSI 0-10cm    | 9.9                           | 22.95                  | 9.9                           | 28.37                  | 9.7                           | 39.59                  | 9.4                           | 59.05                  |
|               | 4.3                           | 6.36                   | 4.2                           | 14.43                  | 4.2                           | 17.39                  |                               |                        |
|               | 2.3                           | 16.42                  | 2.3                           | 19.44                  | 2.3                           | 15.24                  |                               |                        |
| SSI 10-40cm   | 9.9                           | 24.24                  | 9.9                           | 30.15                  | 9.7                           | 30.15                  | 9.4                           | 61.76                  |
|               | 4.3                           | 11.77                  | 4.2                           | 13.31                  | 4.2                           | 19.53                  |                               |                        |
|               | 2.3                           | 17.56                  | 2.3                           | 19.53                  | 2.3                           | 13.31                  |                               |                        |
| SSI 40-100cm  | 9.9                           | 25.21                  | 9.9                           | 28.73                  | 9.7                           | 38.77                  | 9.4                           | 57.86                  |
|               | 4.3                           | 12.63                  | 4.2                           | 14.17                  | 4.2                           | 18.00                  |                               |                        |
|               | 2.3                           | 18.05                  | 2.3                           | 19.45                  | 2.3                           | 14.66                  |                               |                        |
| SSI 100-200cm | 9.9                           | 35.86                  | 9.7                           | 37.68                  | 9.7                           | 43.67                  | 9.4                           | 58.83                  |
|               | 4.96                          | 15.56                  | 4.2                           | 17.77                  |                               |                        |                               |                        |
|               | 2.3                           | 12.65                  | 2.3                           | 12.58                  |                               |                        |                               |                        |

Si bien los periodos dominantes en las escalas temporales analizadas fueron similares (ver Tabla 2.2), se presentan los resultados completos de las series de SII12 (es decir, incluyendo SPI12 y SSI12 a diferentes profundidades) en la Figura 2.17. Esta escala temporal de 12 meses fue seleccionada por la representatividad de los resultados y para

enfatar en el comportamiento de los períodos extremos húmedos y secos de baja frecuencia.

La Tabla 2.2 muestra que para los SI12 la variabilidad decadal tiene una gran relevancia en la región, explicando el 20.7% de la variabilidad de la serie del SPI12, el 39.6% del SSI12 0-10 cm, el 30.1% del SSI12 10-40 cm, el 38.8% del SSI12 40-100 cm y el 43.7% del SSI12 100-200 cm. Por su parte, la variabilidad interanual de alta frecuencia muestra ser la más importante, representando el 43.2% de la variabilidad de la serie total de SPI12, el 32.6% de SSI12 0-10 cm, el 32.8% de SSI12 10-40 cm y el 32.7% de SSI12 40-100 cm. La reconstrucción parcial de los modos oscilatorios hallados para las series temporales de SPI12 y SSI12 se presentan en la Figura 2.17.

Los valores de los índices estandarizados en la Figura 2.17 muestra una coherencia entre la magnitud, la cantidad y duración de los eventos secos/húmedos en todos los niveles analizados. Consistentemente con el análisis realizado en la sección 2.4.1, se observan 5 eventos de sequía significativos, destacándose la sequía excepcional de 20 meses ocurrida entre los años 2008-2009. Con respecto a excesos húmedos, de los 9 eventos identificados, el periodo 2000-2003 se caracterizó como excepcionalmente húmedo ( $SPI12=SSI12=2.189$ ) y como el más extenso con una duración de 38 meses.

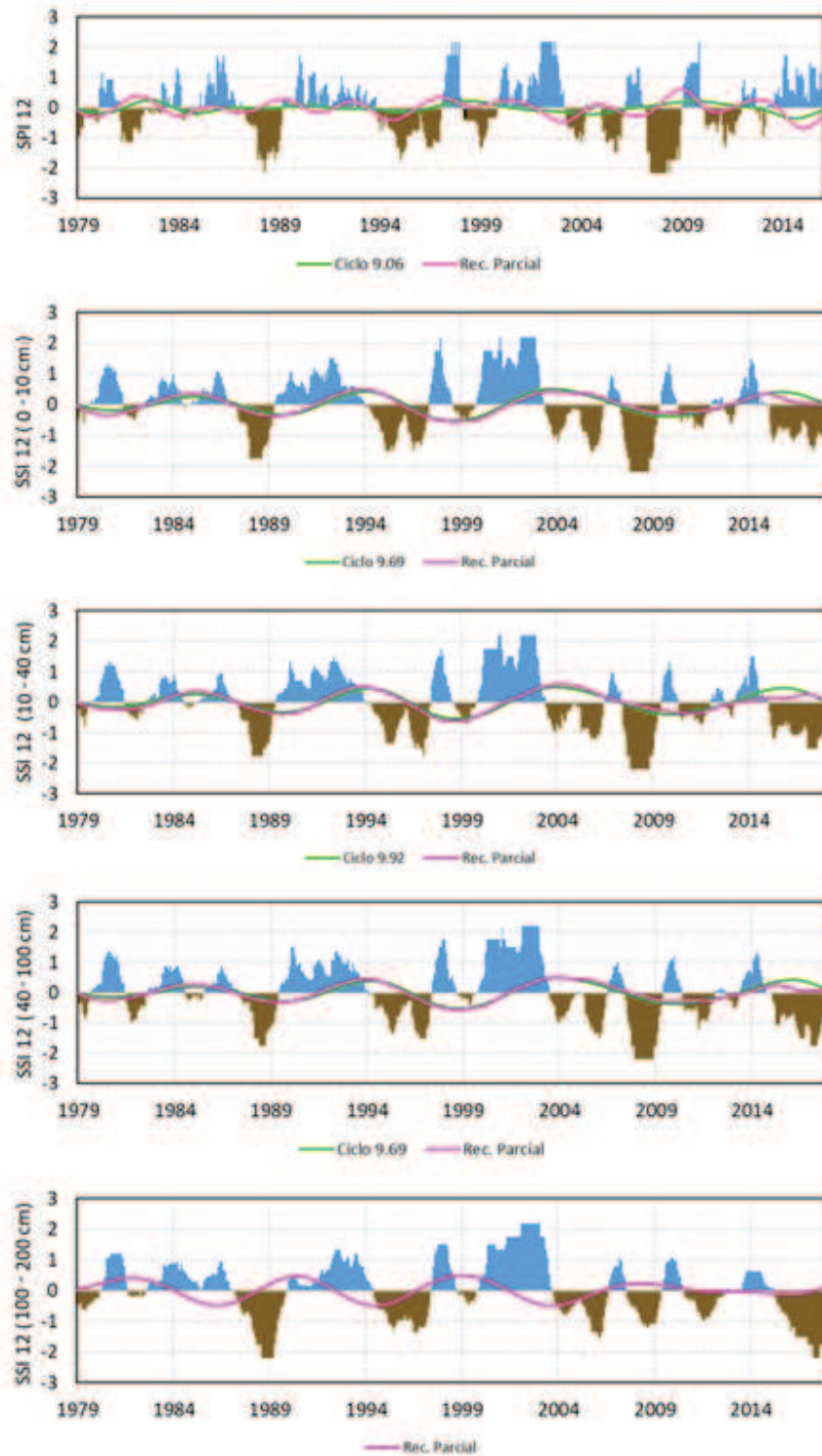


Figura 2.17 Variabilidad temporal del promedio areal del SPI12 y SSI12. En línea fucsia se presenta la reconstrucción de la serie filtrada y en verde el ciclo oscilatorio filtrado. Periodo 1979-2016

### 2.4.3 Respuesta de la zona saturada

El análisis de la correlación entre la precipitación promedio de la provincia y el contenido de humedad del suelo en las diferentes profundidades analizadas arrojaron valores significativos, tal como se mostró en el ítem 2.4.1.1. Las correlaciones más significativas ( $r = 0.81$ ) se asociaron al SSI6 en todas las profundidades y SPI a una escala temporal de 12 meses. Es por ello que se aplica el análisis de SSA a los índices: SPI12 (período 1901-2016), SSI6 (período 1979-2016), y SGI3 (período 1970-2017) en Rafaela. En la Figura 2.18 se presentan las reconstrucciones de los modos oscilatorios SPI12, SSI6 a 10-40 cm y SGI3. Los resultados obtenidos en las restantes profundidades fueron similares y el índice más representativo del nivel freático fue de 3 meses, considerando la respuesta más lenta de esta variable.

En la Figura 2.18 se puede observar la evolución en el tiempo de las reconstrucciones de los modos oscilatorios. La serie temporal de SPI12 muestra un periodo dominante de 6.51 años representado el 27.5% de la varianza total, la serie temporal de SSI6 a 10-40 cm presenta un ciclo oscilatorio de alta frecuencia de 2.28 años que explica el 22.7% de la varianza, mientras que la serie temporal de SGI3 presenta una tendencia con influencia de la variabilidad decadal.

Por otro lado, consistentemente con lo discutido anteriormente, la serie temporal de SPI12 indica que a principios del siglo XX predominó el déficit de precipitación en la región en estudio, mientras que a partir de mediados de siglo y hasta la actualidad se destaca la duración y la frecuencia de excesos. Entre los eventos de déficit resaltan como secos excepcionales el ocurrido entre agosto de 1908 y marzo del 1912 con 44 meses consecutivos de duración. El comprendido entre enero 1916 y septiembre 1918 con 33 meses de duración. Seguidamente los ocurridos en los años 1989, 1995 y 2004. Por otro lado, los eventos húmedos más intensos se registraron con picos extraordinarios en 1915, 1973, 1978 y 2007. La serie temporal del SSI6 identifica en mayor intensidad en los principales eventos de sequías o excesos de precipitación registrados a partir del año 1979. Por su parte, la serie de SGI3 se muestra en la década de los 70 un extenso periodo de valores negativos como consecuencia de eventos secos consecutivos en SPI12 y SSI6. Posteriormente, como respuesta a eventos húmedos en los niveles superiores en el periodo 1980-1987 se observan valores positivos de SGI3. Se interrumpe este comportamiento con valores negativos debido a las sequías en registradas en los años 1989 y 1995.

Mientras que, a partir del año 2002, permanecen valores positivos de SGI3 a pesar de registrarse déficits importantes en los años 2004 y 2008 en SSI6 y SPI12.

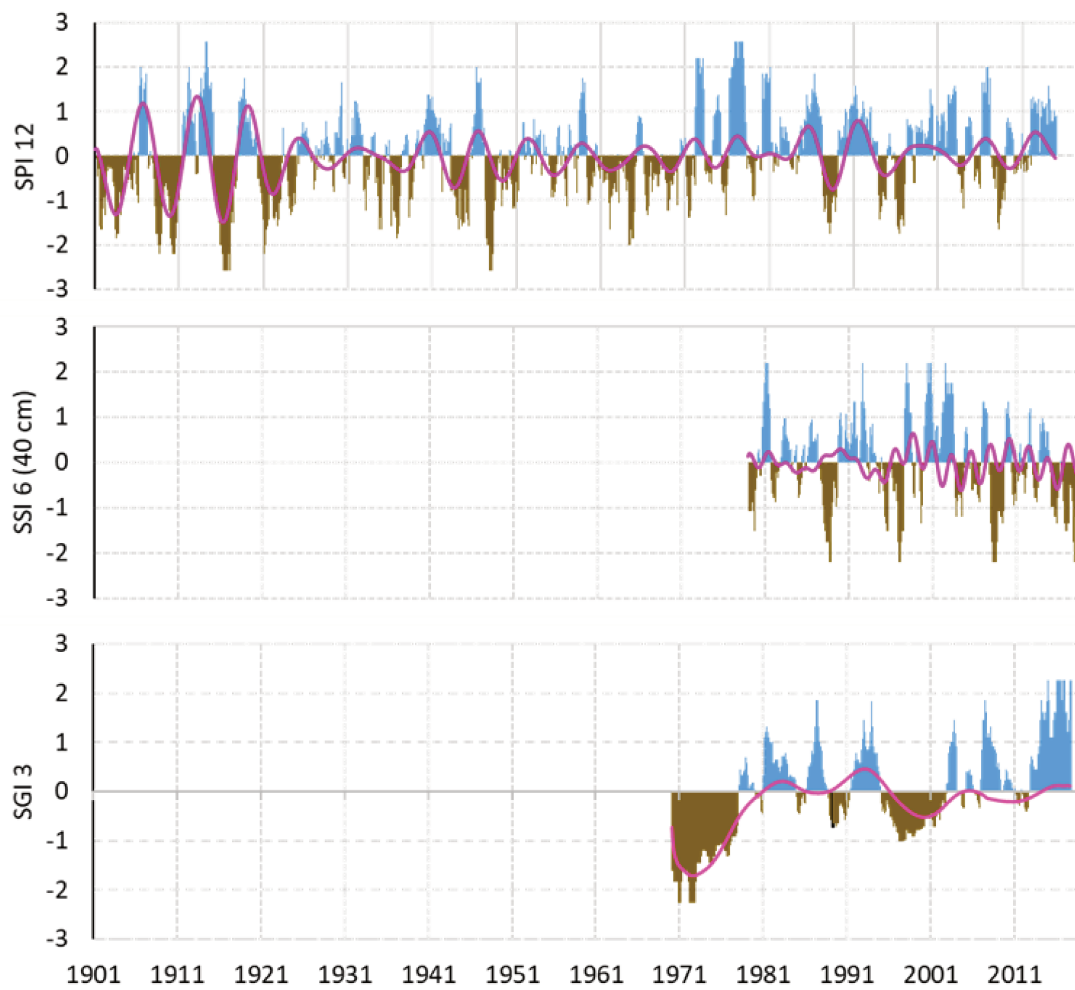


Figura 2.18 Reconstrucción de la serie filtrada hallada con SSA para la estación Rafaela en los índices SPI12, SSI6 10-40cm y SGI3. La línea fucsia representa la reconstrucción de la serie filtrada.

## 2.5 Conclusiones

En este capítulo se analizó la variabilidad de los eventos extremos de precipitación desde principios del siglo XX y su interacción con los subsistemas zona no saturada - acuífero libre en el nordeste de Argentina en el periodo 1979-2016. Para representar la precipitación del área de estudio se consideró la base de datos de alta resolución GPCC v2018 ya que mostró un mejor ajuste en la precipitación observada con respecto a la base de datos CRU TS4.01. Los eventos extremos se estimaron a través de índices estandarizados no paramétricos de precipitación, contenido de humedad de suelo y niveles freáticos en las escalas temporales de 1, 3, 6, 12, y 24 meses. Se examinó la variabilidad espacial y temporal de dichos eventos aplicando un Análisis por Componentes Principales y también se identificaron los modos dominantes de variabilidad temporal (tendencias y ciclos oscilatorios) mediante el Análisis Espectral Singular.

El promedio areal del SPI y del SSI en el periodo 1976-2016 en la región de estudio permitió categorizar 9 eventos húmedos y 5 eventos secos. Entre los eventos más relevantes se encuentra el evento húmedo excepcional entre los años 2000-2003, con una duración promedio de 40 meses y el evento seco excepcional que se prolongó por 12 meses en el periodo 2008-2009. La duración e intensidad de eventos húmedos repercuten en los niveles inferiores del suelo de la zona no saturada, aunque se observa que los eventos secos tienen menor efecto que los húmedos en la zona no saturada. El contenido de humedad del suelo responde a anomalías de precipitación en una escala relativamente corta de tiempo, resaltando que las correlaciones máximas ( $r = 0.81$ ) se encuentran entre SPI12 y SSI6.

La distribución de la correlación espacial se define aplicando un ACP a los índices SPI en las escalas temporales de 3, 12 y 24 meses. Además, se aplica un ACP al SSI en la escala temporal de 6 meses, considerado este por ser el de mayor correlación con la precipitación. En todos los casos, la PC1 fue capaz de sintetizar los resultados medios areales de cada índice, agrupando la información correspondiente a la variabilidad espacial y temporal de los eventos extremos. Los patrones espacio-temporales se representaron a través de la correlación entre cada PC1 y los valores de los índices SPI y SSI en cada punto de grilla. Se encuentra similitud en los patrones de las correlaciones de

las PC1 a diferentes escalas temporales, representadas por el 60% de la varianza total para 3, 12 y 24 meses. Se observan correlaciones positivas superiores a 0.70 en la mayor parte del área de estudio. La correlación máxima (0.90) se encuentra en el centro de la provincia de Santa Fe. Por otro lado, para el SSI desde las profundidades de 0-10 cm hasta 40-100 cm se aprecian valores positivos de correlación de la PC1 con las series en cada punto de grilla con un valor máximo de 0.95 en centro de la región, concordando con el patrón obtenido en la precipitación. En cuanto a la profundidad de 100-200 cm, difiere del patrón observado en los niveles superiores. Se encuentra que la correlación máxima se presenta en zonas aledañas al cauce del río Paraná y en el noroeste de la región.

En la aplicación del SSA en el periodo 1979-2016 a las series de los índices estandarizados de 3, 6 y 12 meses se encontró que existen dos bandas de variabilidad, una con períodos dominantes de  $T \approx 10$  años y otros de alta frecuencia de  $T \approx 2.5 - 4$  años. En cambio, las series de índices estandarizados a 24 meses solo presentan variabilidad temporal en escalas decadal ( $T \approx 10$  años). Estos resultados permiten determinar que los eventos extremos, en extensión espacial e intensidad, presentan las mismas periodicidades dominantes. Asimismo, existe una marcada tendencia no lineal en el período más prolongado del SPI comprendido entre 1901 y 2016. Se manifestaron dos períodos demarcados: entre 1901-1970 predominan los eventos extremos secos y entre 1970-2016 predominan los eventos extremos húmedos. Los resultados muestran que, en el período común de datos de precipitación, humedad de suelo y niveles freáticos (1979-2016), no se detectan tendencias no lineales en los índices estandarizados que caracterizan los eventos extremos. Es decir, a partir de 1970 han predominado los extremos húmedos en relación a las décadas anteriores del siglo XX; aunque a partir de 1979 y hasta la actualidad no se observó una tendencia significativa de cambio.

En particular en Rafaela, la incidencia de la zona saturada mostró una respuesta clara ante la comparación del SGI3 con SPI12 y SSI6. Esta respuesta se evidencia en la década de 1970 con un extenso periodo de valores negativos como consecuencia de eventos secos consecutivos durante la década de 1960. A partir de 1980 el nivel freático responde a la intensificación del período húmedo, tras la presencia de eventos extremos húmedos en los niveles superiores. Este período húmedo de SGI positivos solo se ve interrumpido debido a las sequías en los años 1989 y 1995. A partir de la década de 2000 se reflejan

valores positivos constantes de SGI, con una respuesta muy amortiguada ante sequías como la de 2008-2009 que se registra en valores extremos de SSI6 y SPI12.

La vinculación entre los subsistemas precipitación – zona no saturada del suelo simulada con el modelo Noah es muy notoria en el nordeste de Argentina. La humedad del suelo responde ante los extremos de precipitación, variando en escalas temporales y en la profundidad de las capas analizadas. Se encontró una gran consistencia entre los eventos individuales analizados con SPI y SSI. En Rafaela, el SGI, considerando la respuesta más lenta de esta variable, mostró coincidencia ante la comparación con SPI y SSI. Por ende, se observó una importante influencia de la variabilidad interanual con períodos en el rango de oscilación del ENOS (entre 2-4 años) que se manifiesta claramente en los diferentes estratos del suelo.



## 2.6 Referencias Bibliográficas

- AghaKouchak, A. (2015). A multivariate approach for persistence-based drought prediction: Application to the 2010-2011 East Africa drought. *Journal of Hydrology* 526, 127-135. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.09.063>
- Auge, M. (2004). *Regiones Hidrogeológicas. República Argentina y Provincias de Buenos Aires, Mendoza y Santa Fe*. E-book: 1-138. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/15909>. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires
- Berri, G., Flamenco, E., Spescha, L., Tanco, R., & Hurtado, R. (2002). Some effects of La Niña on summer rainfall, water resources, and crops in Argentina. United Nations University. 127-133.
- Boulangier, J. P., Leloup, J., Penalba, O., Rusticucci, M., Lafon, F., & Vargas, W. (2005). Observed precipitation in the Paraná-Plata hydrological basin: long-term trends, extreme conditions and ENSO teleconnections. *Climate dynamics*, 24(4), 393-413. <https://doi.org/10.1007/s00382-004-0514-x>.
- Craddock, J. M., & Flood, C. R. (1969). Eigenvectors for representing the 500 mb geopotential surface over the Northern Hemisphere. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 95(405), 576-593. . <https://doi.org/10.1002/qj.49709540510>.
- Dracup, J. A., Lee, K. S., & Paulson Jr, E. G. (1980). On the definition of droughts. *Water resources research*, 16(2), 297-302. <https://doi.org/10.1029/WR016i002p00297>.
- Farahmand, A., & AghaKouchak, A. (2015). A generalized framework for deriving nonparametric standardized drought indicators. *Advances in Water Resources*, 76, 140-145. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2014.11.012>
- Ferreira, G., Rodríguez, L., Vionnet, C., Choque, J., & Marano, P. (2009). Avances en el conocimiento del acuífero libre de la cuenca del arroyo Cululú (provincia de Santa Fe). En: VI Congreso Nacional de Hidrogeología y IV Seminario Hispanoamericano de Temas Actuales de la Hidrogeología Subterránea, Santa Rosa, La Pampa, Argentina. 1 (1): 147-157
- Ghil, M., & Vautard, R. (1991). Interdecadal oscillations and the warming trend in global temperature time series. *Nature*, 350(6316), 324-327. <https://doi.org/10.1038/350324a0>.
- Ghil, M., Allen, M., Dettinger, M., Ide, K., Kondrashov, D., Mann, M., Robertson, A., Saunders, A., Tian, Y., Varadi, F., & Yiou, P. (2002). Advanced Spectral Method for Climatic Time Series. *Review of geophysics*, 40 (1), 1-41. <https://doi.org/10.1029/2000RG000092>.
- Gringorten, I. I. (1963). A plotting rule for extreme probability paper. *Journal of Geophysical Research*, 68(3), 813-814. <https://doi.org/10.1029/JZ068i003p00813>

- Harris, I. P. D. J., Jones, P. D., Osborn, T. J., & Lister, D. H. (2014). Updated high-resolution grids of monthly climatic observations—the CRU TS3. 10 Dataset. *International journal of climatology*, 34(3), 623-642. doi: 10.1002/joc.3711
- Hao, Z., & AghaKouchak, A. (2013). Multivariate standardized drought index: a parametric multi-index model. *Advances in Water Resources*, 57, 12-18. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2013.03.009>.
- Hao, Z., & AghaKouchak, A. (2014). A nonparametric multivariate multi-index drought monitoring framework. *Journal of Hydrometeorology*, 15(1), 89-101. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-12-0160.1>
- Hao, Z., AghaKouchak, A., Nakhjiri, N., & Farahmand, A. (2014). Global integrated drought monitoring and prediction system. *Scientific data*, 1(1), 1-10. <https://doi.org/10.1038/sdata.2014.1>.
- Krepper, C. M., & Garcia, N. O. (2004). Spatial and temporal structures of trends and interannual variability of precipitation over the La Plata Basin. *Quaternary International*, 114(1), 11-21. [https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(03\)00038-7](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(03)00038-7)
- Krepper, C. M., & Zucarelli, G. V. (2010). Climatology of water excesses and shortages in the La Plata Basin. *Theoretical and Applied Climatology*, 102(1-2), 13-27. <https://doi.org/10.1007/s00704-009-0234-6>
- Llano, M. P., & Penalba, O. C. (2011). A climatic analysis of dry sequences in Argentina. *International journal of climatology*, 31(4), 504-513. <https://doi.org/10.1002/joc.2092>.
- Lovino, M., García, N. O., & Baethgen, W. (2014). Spatiotemporal analysis of extreme precipitation events in the Northeast region of Argentina (NEA). *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2, 140-158. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2014.09.001>.
- Lovino, M. A., Müller, O. V., Müller, G. V., Sgroi, L. C., & Baethgen, W. E. (2018). Interannual-to-multidecadal hydroclimate variability and its sectoral impacts in northeastern Argentina. *Hydrology & Earth System Sciences*, 22(6), 3155-3174. <https://doi.org/10.5194/hess-2018-3>.
- Lloyd-Hughes, B., & Saunders, M. A. (2002). A drought climatology for Europe. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 22(13), 1571-1592. <https://doi.org/10.1002/joc.846>.
- McKee, T. B., Doesken, N., y Kleist, J. (1993), The relationship of drought frequency and duration to time scales. Preprints, Eighth Conf. on Applied Climatology, Anaheim, CA, Amer. Meteor. Soc., 179-184.
- Meng, J., Yang, R., Wei, H., Ek, M., Gayno, G., Xie, P., & Mitchell, K. (2012). The land surface analysis in the NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Journal of Hydrometeorology*, 13(5), 1621-1630. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-11-090.1>.
- Penalba, O. C., & Vargas, W. M. (2004). Interdecadal and interannual variations of annual and extreme precipitation over central-northeastern Argentina. *International Journal of*

Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society, 24(12), 1565-1580.  
<https://doi.org/10.1002/joc.1069>

Rivera, J. A., & Penalba, O. C. (2018). Spatio-temporal assessment of streamflow droughts over Southern South America: 1961–2006. *Theoretical and Applied Climatology*, 133(3-4), 1021-1033. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2243-1>.

Rodell, M., Houser, P. R., Jambor, U., Gottschalck, J., Mitchell, K., Meng, C., Arsenault, K., Cosgrove, B., Radakovich, J., Bosilovich, M., Entin, J. K., Walker, J. P., Lohmann, D., & Toll, D. (2004). The global land data assimilation system. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85(3), 381-394. <https://doi.org/10.1175/BAMS-85-3-381>.

Seneviratne SI, Nicholls N, Easterling D, Goodess CM, Kanae S, Kossin J, Luo Y, Marengo J, McInnes K, Rahimi M, Reichstein M, Sorteberg A, Vera C, Zhang X. (2012). Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. In *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*, Field CB, Barros V, Stocker TF, Qin D, Dokken DJ, Ebi KL, Mastrandrea MD, Mach KJ, Plattner G, Allen SK, Tignor M, Midgley PM, A Special Report of Working Groups I and II of the IPCC, Field CB, Barros V, Stocker TF, Qin D, Dokken DJ, Ebi KL, Mastrandrea MD, Mach KJ, Plattner G-K, Allen SK, Tignor M, Midgley PM (eds). Cambridge University Press: Cambridge, UK/New York, NY, 109–230.

Schneider, U., Becker, A., Finger, P., Meyer-Christoffer, A., Ziese, M. (2018). GPCP Full Data Monthly Product Version 2018 at 0.25°: Monthly Land-Surface Precipitation from Rain-Gauges built on GTS-based and Historical Data. DOI: 10.5676/DWD\_GPCC/FD\_M\_V2018\_025

Sheffield, J., & Wood, E. F. (2008). Global trends and variability in soil moisture and drought characteristics, 1950–2000, from observation-driven simulations of the terrestrial hydrologic cycle. *Journal of Climate*, 21(3), 432-458. <https://doi.org/10.1175/2007JCLI1822.1>

SIRDAŞ, S., & Sen, Z. (2003). Spatio-temporal drought analysis in the Trakya region, Turkey. *Hydrological Sciences Journal*, 48(5), 809-820. <https://doi.org/10.1623/hysj.48.5.809.51458>.

Vautard, R. (1995). Patterns in time: SSA and MSSA. In: von Storch, H., Navarra, A. (Eds.), Chapter 14 of *Analysis of Climate Variability: Applications of Statistical Techniques*. Springer Verlag. 327.

Venecio, M. y Varni, M. (2003). Estimación de la recarga y del almacenamiento específico a través de análisis de registros de nivel freático. En: III Congreso Argentino de Hidrogeología y I Seminario Hispano Latinoamericano sobre Temas Actuales de la Hidrología Subterránea, Rosario, Argentina. 153-160.

Venencio, M. V., & García, N. O. (2011). Interannual variability and predictability of water table levels at Santa Fe Province (Argentina) within the climatic change context. *Journal of hydrology*, 409(1-2), 62-70. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.07.039>.

Von Storch, H. and Zwiers, W. (1999). *Statistical Analysis in Climate Research*, Cambridge University Press, 484 pp.

Wilks, D.S. (2006). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Elsevier Inc, UK (627 pp).

## **Capítulo 3: Intensidad y frecuencia de eventos extremos de precipitación y humedad de suelo**

### **3.1 Introducción**

Los eventos extremos de precipitación pueden generar un impacto en la economía y en la sociedad a nivel mundial, ya que afectan la producción agrícola, una de las actividades primarias más importantes y fundamentales para el desarrollo de un país. En este sentido, la variabilidad de la precipitación tanto en tiempo y espacio condiciona la retención de agua que experimentan los suelos y al mismo tiempo la disponibilidad de agua para las distintas especies vegetales. Periodos extensos de excesos de precipitación aumentan el contenido de humedad en la zona no saturada, excediendo la capacidad de campo del suelo. Esta saturación genera anegamientos e inundaciones de gran magnitud, afectando la correcta ejecución de las campañas agrícolas debido a la alta humedad en los cultivos y la falta condiciones en la humedad del suelo para avanzar con la cosecha. Por el contrario, periodos extensos sin precipitación disminuyen gradualmente el contenido de humedad, afectando negativamente el rendimiento de las cosechas y en algunos casos alcanzando el punto de marchitez permanente. Por lo tanto, el comportamiento de la humedad del suelo ante precipitaciones intensas o la escasez de agua impacta sustancialmente en el rendimiento de los cultivos (Pascale y Damario, 2004).

La productividad agrícola en Argentina depende directamente de la alternancia de eventos secos y húmedos, principalmente en aquellos lugares en que se realizan cultivos de secano. Brendel et al. (2017) indican que el área sembrada disminuyó significativamente durante el período seco entre 2008 y 2009 en la llanura Pampeana, mientras que entre 2001 y 2002, reconocido como un periodo húmedo, se presentaron las condiciones óptimas para el crecimiento de trigo y su rendimiento fue uno de los mayores del período que va del 2000 al 2012. Sin embargo, eventos extremos de precipitación en la llanura agrícola argentina pueden conducir a un extenso anegamiento, como fue el caso en enero de 2017, cuando los impactos económicos al sector agrícola-ganadero alcanzaron U\$S 1.750 millones en pérdidas (Bertello, 2017).

Los cambios en las frecuencias y magnitudes de los eventos extremos de precipitación impactan los sistemas hidrológicos existentes y las actividades dependientes de los recursos hídricos. Para obtener una perspectiva uniforme de los cambios observados en

los extremos climáticos, el Equipo de Expertos en Detección e Índices de Cambio Climático (ETCCDI, por su sigla en inglés) definió un conjunto de 27 índices climáticos derivados de datos diarios basados en temperatura y precipitación que caracterizan la intensidad, duración y frecuencia de los extremos climáticos (Klein Tank et al., 2009).

En el nordeste de Argentina, Lovino et al. (2018) analizaron los eventos extremos de precipitación a través de los índices ETCCDI para el periodo 1963-2013, mostrando que los eventos secos estacionales en las últimas décadas del periodo por ellos estudiado han tendido a durar más. Adicionalmente, observaron que los eventos de precipitación intensa están altamente influenciados por la variabilidad interanual y que se produjo un aumento sostenido de la intensidad media desde el año 1970.

Por otro lado, la variabilidad espacial de la humedad se atribuye a una combinación de factores, tales como las variaciones en las propiedades del suelo (la textura, la topografía, el tipo y la densidad de la cubierta vegetal) o la propia heterogeneidad espacial de las condiciones meteorológicas (Malik et al., 1987; Merz y Piate, 1997; Famiglietti et al., 1998). Asimismo, la pendiente del terreno influye en el contenido de humedad del suelo: a mayor pendiente, menor infiltración. También, distintos autores han concluido que no existe relación entre la humedad y factores como la elevación (Whitaker, 1993).

Por lo antes expuesto, el objetivo en este capítulo es identificar los extremos de precipitación en cortas escalas temporales, incluyendo tormentas intensas en 1 y 5 días y la cantidad de días secos consecutivos, analizando sus cambios históricos y su variabilidad. Además, se propone evaluar las variaciones de la humedad del suelo (HS) antes, durante y después de los eventos extremos de precipitación máximos absolutos. El análisis se basa en el estudio del comportamiento histórico e identificación de los máximos absolutos en 3 índices ETCCDI: cantidad máxima de precipitación en 1 día (Rx1), cantidad máxima de precipitación en 5 días (Rx5), y número de días secos consecutivos (CDD) en 8 estaciones en la provincia de Santa Fe y proximidades.

## 3.2 Datos y metodología

### 3.2.1 Características edáficas de la región de estudio

En el centro-nordeste de Argentina se encuentran grandes llanuras de muy bajas pendientes topográficas. Estos ambientes se caracterizan por presentar un predominio de los movimientos verticales del agua (evapotranspiración – infiltración).

Algunos autores señalan que la variabilidad espacial de la humedad del suelo está directamente relacionada con variaciones en la textura (Vachaud et al., 1985; Crave y Gascuel-Odoux, 1997). En el área de estudio, la textura del suelo es diversa, como lo muestra la Figura 3.1. En la misma también aparecen las estaciones utilizadas, las que corresponden a las 8 analizadas en el Capítulo 2. En la figura se observa que la estación Marcos Juárez se encuentra emplazada en un suelo franco, Laboulaye en suelo franco-arenoso y el resto de las estaciones en suelo franco-limoso. Estos suelos, de acuerdo con la clasificación hidrológica son tipo B (NRCS, 2007) con moderada capacidad de infiltración cuando se encuentran saturados. Se estima una tasa mínima de infiltración entre 3,8 y 7,6 mm/h (Musgrave, 1955).

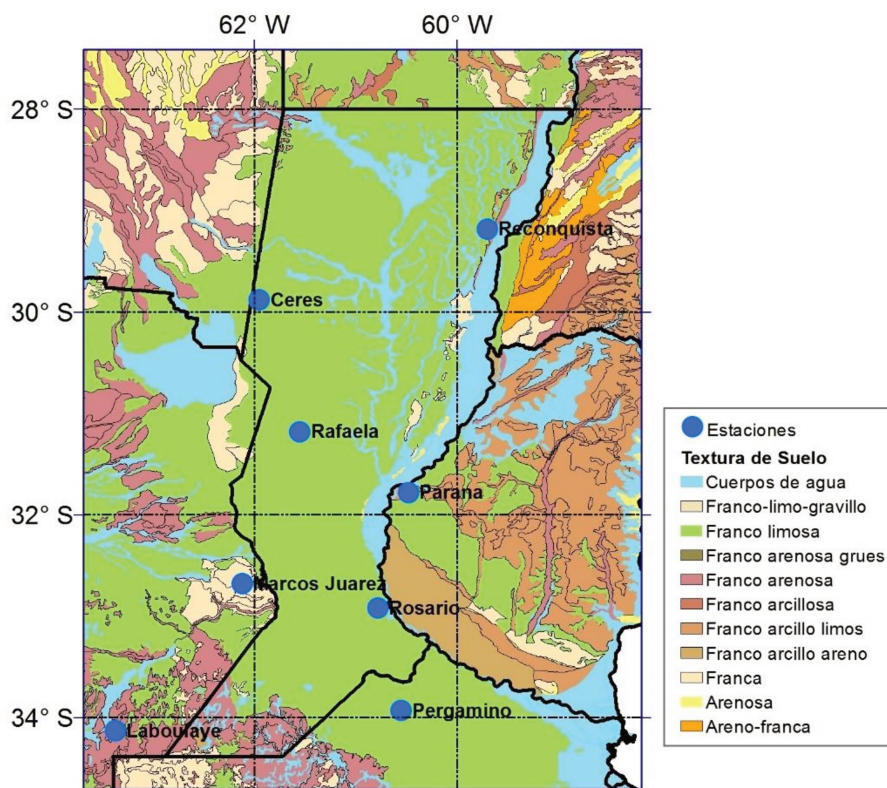


Figura 3.1 Textura de suelo en el área de estudio. Fuente: INTA

### 3.2.2 Extremos de precipitación

Los índices ETCCDI permiten caracterizar la variabilidad de la frecuencia e intensidad de los extremos de precipitación (Zhang et al., 2011). Son estadísticamente robustos y pueden cubrir una amplia gama de climas (Alexander et al., 2019). Se clasifican en cuatro grupos (Sillman et al., 2013): (i) índices basados en umbrales, permiten identificar la cantidad de días o el valor de precipitación que supera un umbral; (ii) índices de valor absoluto, define la máxima cantidad de precipitación que ocurre por año calendario, por ejemplo, en un día; (iii) índices de duración, describen la longitud de períodos secos o húmedos; (iv) ) índices de umbral basados en percentiles, describen las tasas de exceso debajo o sobre un umbral definido como el 10th o 90th percentil.

En este estudio se analizaron 3 índices descriptivos de los eventos extremos de precipitación en cortas escalas temporales y que permiten establecer la vinculación con la respuesta de la humedad del suelo en cortos períodos de tiempo (del orden de días). Los índices estudiados son la cantidad máxima de precipitación de 1 día ( $Rx1$ ), la cantidad máxima de precipitación en 5 días ( $Rx5$ ) y el número de días secos consecutivos (CDD).

El máximo anual de precipitación diaria se considera como  $RR_{ij}$ , siendo el día  $i$  en el periodo  $j$ . Entonces los valores máximos de 1 día para el periodo  $j$  se calcula:

$$Rx1dayj = \max(RR_{ij}) \quad (3.1)$$

El máximo anual de precipitación para el intervalo de cinco días consecutivos se define como  $RR_{kj}$ , siendo el total de precipitación en el día en  $k$  para el periodo  $j$  entonces:

$$Rx5dayj = \max(RR_{kj}) \quad (3.2)$$

Para determinar el mayor número de días secos consecutivos en un año se contabilizó a partir de  $RR_{ij}$  donde la cantidad diaria de precipitación en el día  $i$  en el periodo  $j$ .

$$RR_{ij} < 1 \text{ mm} \quad (3.3)$$

Los índices  $Rx1$ ,  $Rx5$  y CDD fueron calculados para cada una de las 8 estaciones referidas en el Capítulo 2. Las series diarias de precipitación fueron consideradas en los periodos con un mínimo de datos faltantes: Ceres (1931-2017), Reconquista (1948-2017), Rafaela (1961-2017), Paraná (1931-2017), Marcos Juárez (1961-2017), Rosario (1936-2017), Laboulaye (1940-2017), Pergamino (1932-2017).



### **3.2.3 Zona no saturada**

La zona no saturada se analizó a partir de datos diarios del contenido de humedad de suelo obtenida a través de simulaciones con el Modelo de Superficie Terrestre de Captación (CLSM, por sus siglas en inglés; Koster et al., 2000) disponibles en <https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets?keywords=GLDAS&page=1>, usando como forzantes los datos de globales de la Universidad de Princeton (Sheffield et al., 2006). Los datos diarios de humedad de suelo analizados corresponden al período 1948-2014 con una resolución espacial de 0.25 x 0. 25°.

El perfil vertical de la humedad del suelo en el CLMS, a diferencia de otros modelos, no tiene capas de suelo verticales explícitos. El perfil promedia la humedad desde la superficie hasta la capa freática, incluyendo la capa de superficie (0-2cm) y la capa de la zona de raíz (0-100cm).

En este estudio, se analizó la variación diaria del contenido de humedad ante el evento máximo absoluto de precipitación determinada por los índices Rx1, Rx5 y CDD en los puntos de grilla más cercanos a las 8 estaciones estudiadas en la provincia. Se realiza la comparación de las series temporales para Rx1 y Rx5 30 días antes y 30 días después, mientras que para CDD 15 días antes y 15 después del evento.

### 3.3 Resultados

#### 3.3.1 Extremos de precipitación

##### 3.3.1.1 Estación Ceres

La Figura 3.2 presenta las series temporales de extremos de precipitación para Ceres en el periodo 1931-2017. En la Figura 3.2a el índice Rx1 muestra un incremento a partir de 1990, año a partir del cual se incrementa la frecuencia de las tormentas intensas que exceden los 150 mm. Destaca el año 1994 donde se alcanzó el máximo absoluto de 218.8 mm en un día. Por otro lado, el índice Rx5 (Figura 3.2b) indica que a partir de 1970 aumenta la frecuencia de los eventos con valores mayores a 200 mm. El máximo absoluto se obtuvo en marzo del 2007 con 250.3 mm.

Los CDD han sido variables en esta zona en el período estudiado. La Figura 3.2c muestra que en la década de 1930 se presentaron condiciones secas con picos de más de 100 días. Entre los años 1940 a 1990 la tendencia es de disminuir hasta alcanzar no más de 70 días secos consecutivos. A partir de 1990 aumentan la magnitud del índice CDD, donde en el año 2008 se registró el pico con 115 días consecutivos sin precipitación.

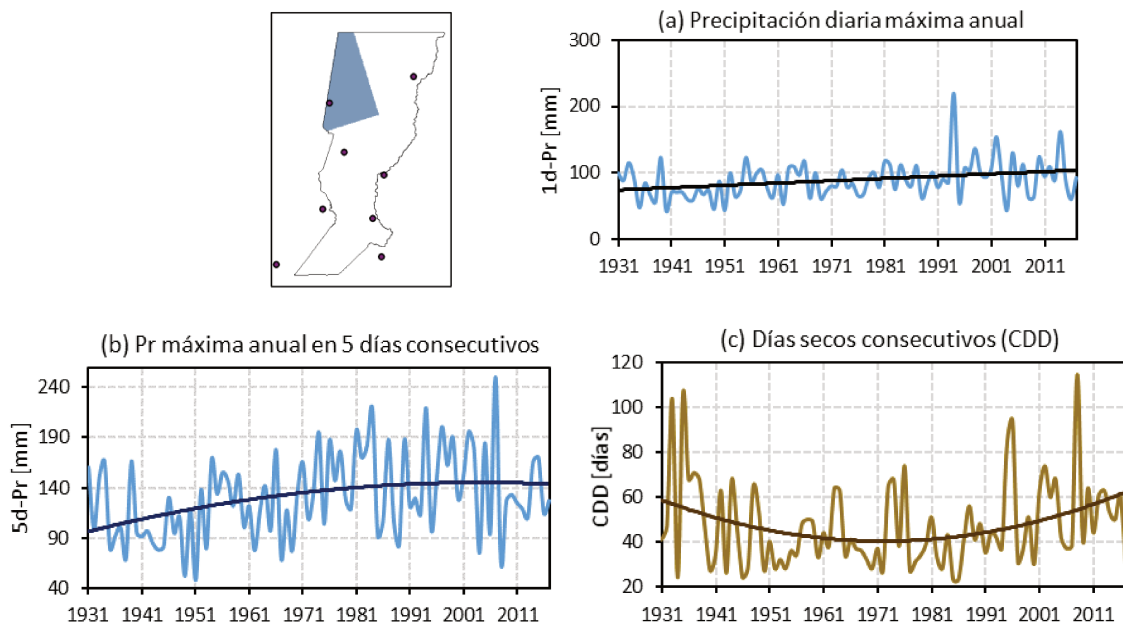


Figura 3.2 Series temporales de extremos de precipitación (1931-2017): (a) precipitación diaria máxima anual (Rx1), (b) precipitación máxima anual en 5 días consecutivos (Rx5) y (c) días secos consecutivos (CDD). Se resaltan las tendencias no lineales que indican los cambios de largo período en cada serie. Estación Ceres

### 3.3.1.2 Estación Reconquista

En la Figura 3.3 se muestran las series temporales de extremos de precipitación para la estación Reconquista en el periodo 1948-2017. Los valores de Rx1 indican fluctuaciones a lo largo periodo analizado (Figura 3.3a). Destacan valores por encima de 150 mm con alta frecuencia entre 1960- 1980, para luego disminuir. El máximo absoluto se da en 1961 con 195.7 mm. La Figura 3.3b muestra que el índice Rx5 a partir de 1960 presenta valores mayores a 200 mm, el máximo absoluto se presenta en 1985 con 399.5 mm. Por otro lado, se aprecia un incremento de CDD (Figura 3.3c) a partir de 1990. Para el año 1996 se registró un máximo de 94 días consecutivos sin precipitaciones.

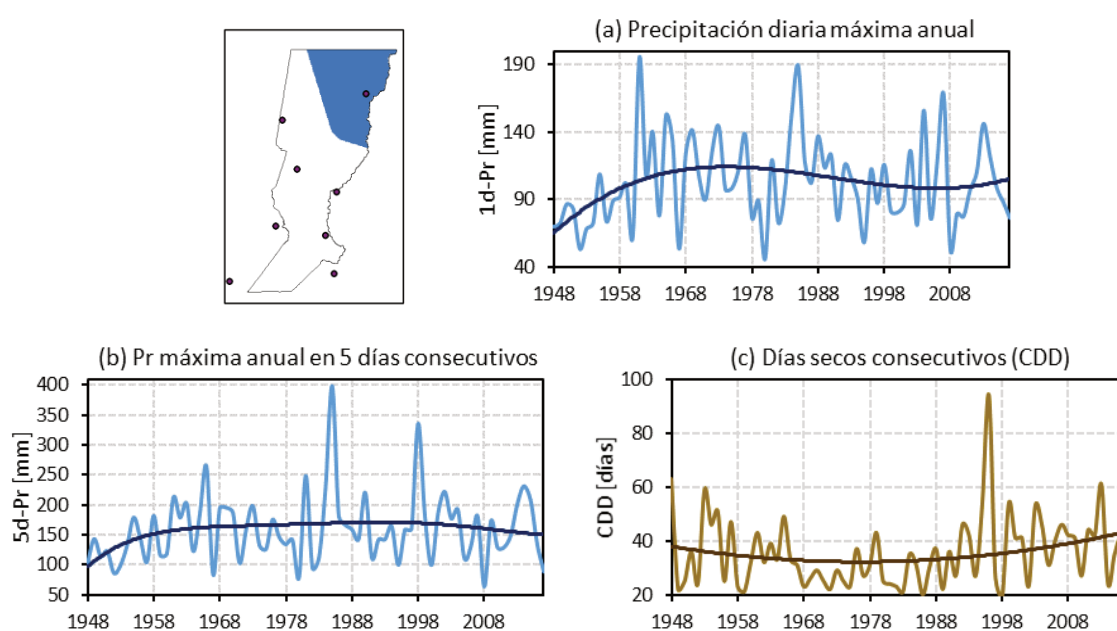


Figura 3.3 Series temporales de extremos de precipitación (1948-2017): (a) precipitación diaria máxima anual (Rx1), (b) precipitación máxima anual en 5 días consecutivos (Rx5) y (c) días secos consecutivos (CDD). Se resaltan las tendencias no lineales que indican los cambios de largo período en cada serie. Estación Reconquista

### 3.3.1.3 Estación Rafaela

Se observó un incremento en los eventos de precipitación intensa de 1 y 5 días en Rafaela (Figuras 3.4a y 3.4b). Se han registrado eventos consecutivos cercanos a 200 mm en un día a partir de 1990, siendo el máximo absoluto el 25 de abril de 1999 con 194.7 mm. En el mismo período, se registraron eventos extremos en 5 días mayores a 250 mm, con un máximo de 341.1 mm en marzo de 2007. También se registra un leve incremento de los días secos consecutivos (Figura 3.4c) con máximos de 87 días consecutivos sin precipitaciones en los años 1995 y 1969.

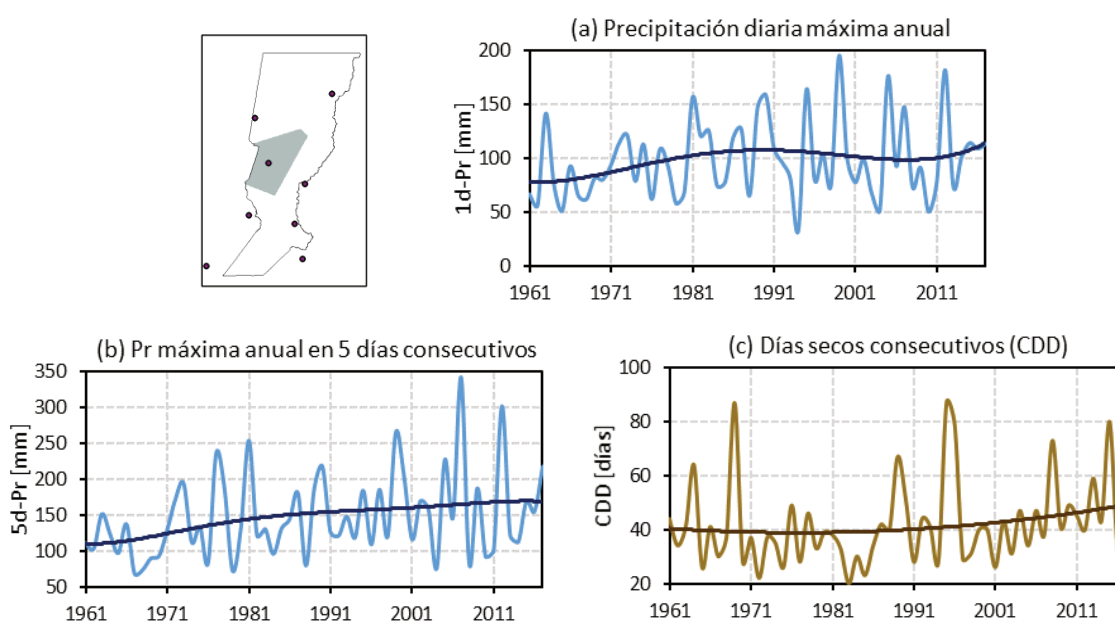


Figura 3.4 Series temporales de extremos de precipitación (1961-2017): (a) precipitación diaria máxima anual ( $Rx1$ ), (b) precipitación máxima anual en 5 días consecutivos ( $Rx5$ ) y (c) días secos consecutivos (CDD). Se resaltan las tendencias no lineales que indican los cambios de largo período en cada serie. Estación Rafaela

### 3.3.1.4 Estación Paraná

Los extremos de precipitación presentan un aumento en la magnitud de los eventos de lluvia máxima anual de 1 y 5 días en Paraná (Figuras 3.5a y 3.5b). Principalmente se observa un incremento en las décadas de 1990 y 2000 con picos frecuentes de aproximadamente 200 mm/día, con un máximo de 235 mm en el 2009 y mayores a 250 mm en 5 días con un máximo de 348.9 en 1993. Por el contrario, los días secos consecutivos han disminuido levemente a partir de 1970 (Figura 3.5c), siendo 105 el máximo de días consecutivos sin precipitación en el año 1955.

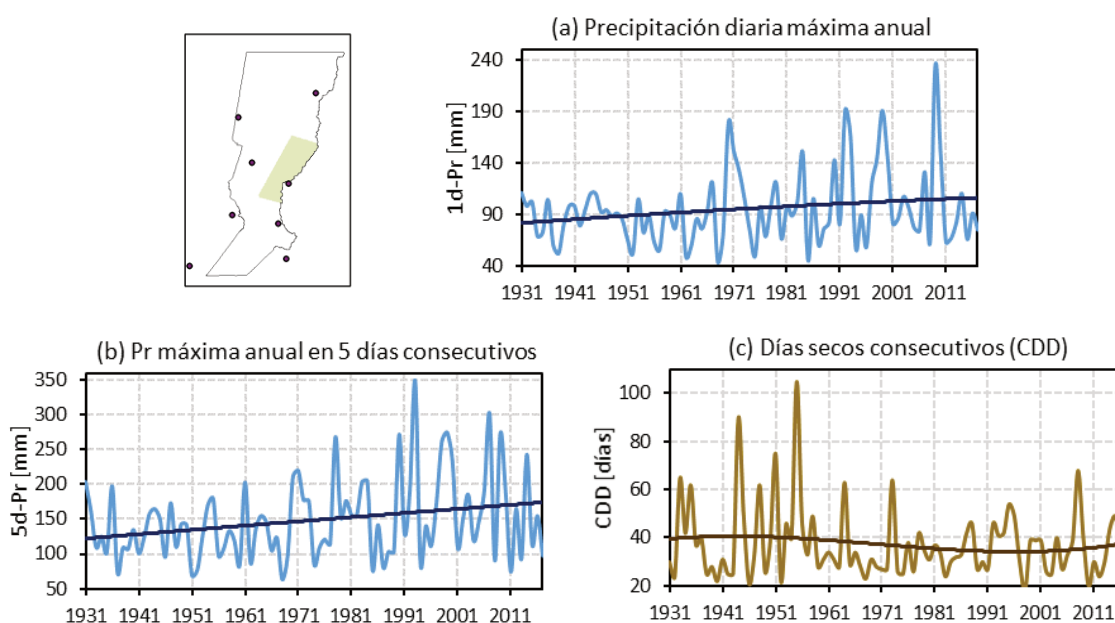


Figura 3.5 Series temporales de extremos de precipitación (1931-2017): (a) precipitación diaria máxima anual (Rx1), (b) precipitación máxima anual en 5 días consecutivos (Rx5) y (c) días secos consecutivos (CDD). Se resaltan las tendencias no lineales que indican los cambios de largo período en cada serie. Estación Paraná

### 3.3.1.5 Estación Marcos Juárez

A partir de 1970 los eventos extremos de precipitaciones intensas se han incrementado. En la figura 3.6a se muestra que los eventos máximos registrados en 1 día con más frecuencia son cercanos a 120 mm. Los máximos para 1 día y en 5 días (figura 3.6a y b) se encontraron en febrero de 1977 con 161.8 mm y 323.4 mm respectivamente. Asimismo, a partir de la década del 2000 se aprecia un leve incremento de los días secos consecutivos, con un pico durante la sequía del año 2008 de 110 días consecutivos sin precipitaciones.

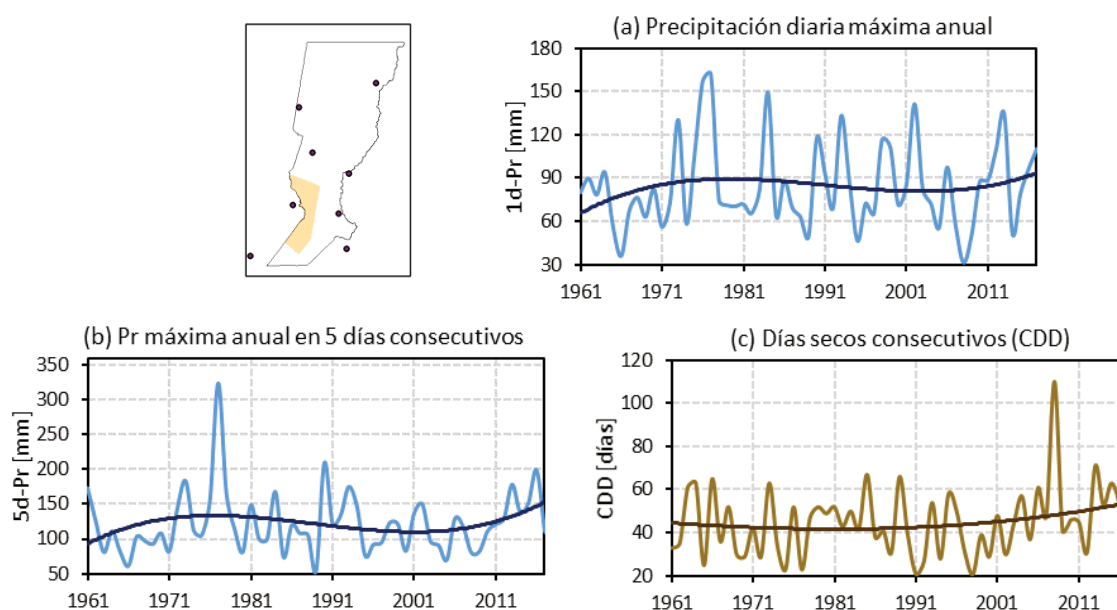


Figura 3.6 Series temporales de extremos de precipitación (1961-2017): (a) precipitación diaria máxima anual ( $Rx1$ ), (b) precipitación máxima anual en 5 días consecutivos ( $Rx5$ ) y (c) días secos consecutivos (CDD). Se resaltan las tendencias no lineales que indican los cambios de largo período en cada serie. Estación Marcos Juárez

### 3.3.1.6 Estación Rosario

Los eventos extremos de precipitación muestran tendencia a un aumento en magnitud a partir de 1980. En la figura 3.7a se observa en la década de 1960 y 1990 eventos frecuentes cercanos a los 120 mm, con un máximo absoluto de 178 mm en 2012. Para 5 días consecutivos alcanzan un pico de 365 mm en 2007 (Figura 3.7b). Los días secos consecutivos presentan una tendencia positiva a partir de 1970 (Figura 3.7c). Sin embargo, los máximos se encuentran próximos a los 60 días.

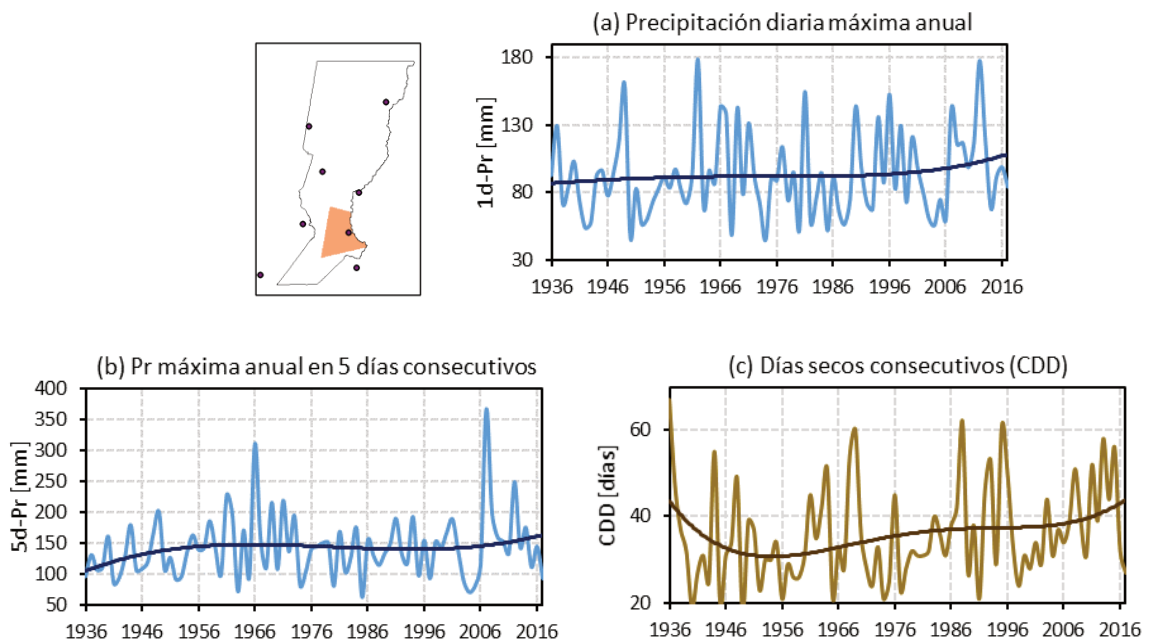


Figura 3.7 Series temporales de extremos de precipitación (1936-2017): (a) precipitación diaria máxima anual ( $Rx1$ ), (b) precipitación máxima anual en 5 días consecutivos ( $Rx5$ ) y (c) días secos consecutivos (CDD). Se resaltan las tendencias no lineales que indican los cambios de largo período en cada serie. Estación Rosario

### 3.3.1.7 Estación Laboulaye

Los extremos de precipitación no registran un incremento tan notorio en magnitud y frecuencia como en el resto del área de estudio. Los máximos diarios se encuentran en 120 mm con un pico de 203.8 mm en el año 1999 (Figura 3.8a). Para este mismo año, también se destaca un evento en 5 días con 304.5 mm (Figura 3.8b). Los días secos consecutivos no tienen una tendencia creciente diferenciada, con valores picos normales de aproximadamente 70 días y un máximo de 108 días en el año 1970 (Figura 3.8c).

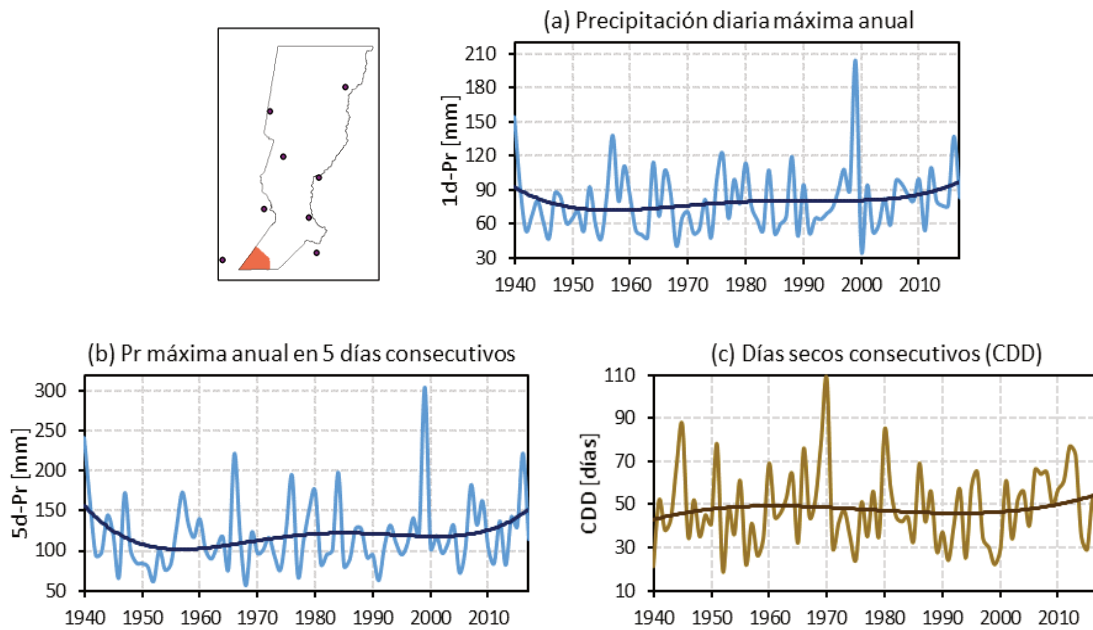


Figura 3.8 Series temporales de extremos de precipitación (1940-2017): (a) precipitación diaria máxima anual (Rx1), (b) precipitación máxima anual en 5 días consecutivos (Rx5) y (c) días secos consecutivos (CDD). Se resaltan las tendencias no lineales que indican los cambios de largo período en cada serie. Estación Laboulaye



### 3.3.1.8 Estación Pergamino

Los extremos de precipitación no muestran una tendencia de incremento en magnitud y frecuencia. Sin embargo, presenta el máximo diario del área de estudio con 315 mm/día (Figura 3.9b) y máximo en 5 días de 391mm (Figura 3.9b) ambos en abril de 1995. Por otro lado, los días secos consecutivos presentan una leve tendencia negativa a partir de 2000, con valores extremos de aproximadamente 60 días en todo el período analizado.

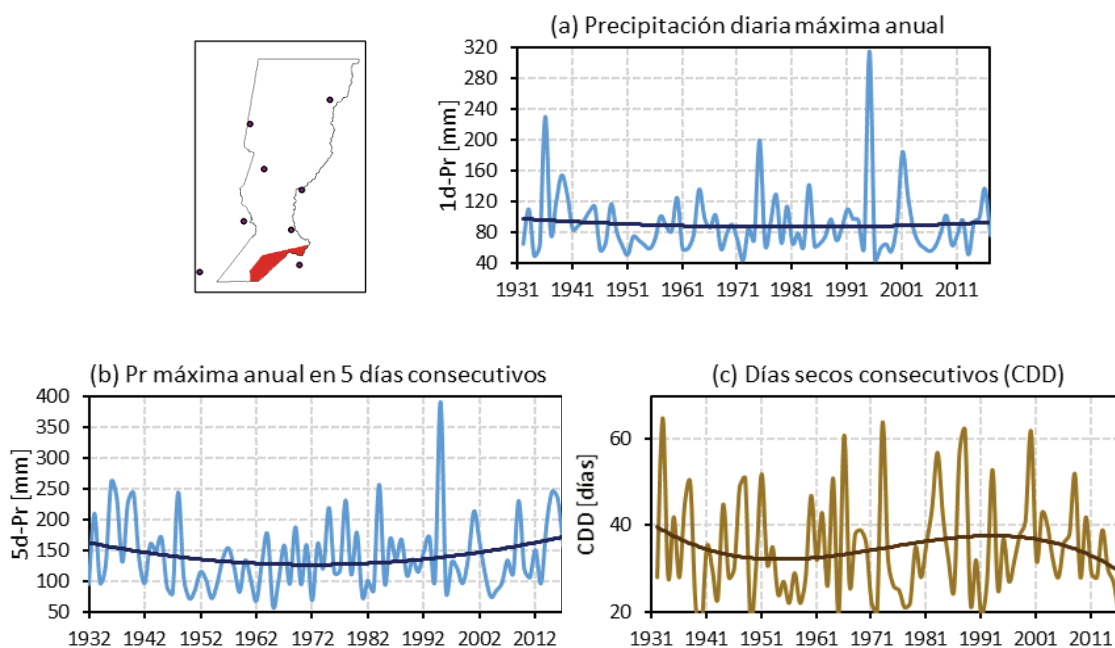


Figura 3.9 Series temporales de extremos de precipitación (1932-2017): (a) precipitación diaria máxima anual (Rx1), (b) precipitación máxima anual en 5 días consecutivos (Rx5) y (c) días secos consecutivos (CDD). Se resaltan las tendencias no lineales que indican los cambios de largo período en cada serie. Estación Pergamino

### 3.3.2 Respuesta de la zona no saturada

Los índices de precipitación diaria máxima anual (Rx1), precipitación máxima anual en 5 días consecutivos (Rx5), días secos consecutivos (CDD) obtenidos en el ítem 3.3.1, permitieron determinar los máximos absolutos para cada una de las 8 estaciones. En base a estos resultados, se estudian las variaciones diarias de la humedad del suelo (HS) antes, durante y después de esos eventos identificados como máximos absolutos.

#### 3.3.2.1 Ceres

En la Figura 3.10 se presentan las series temporales de máximos absolutos de precipitación y el perfil de HS en Ceres. En la Figura 3.10a se muestra el índice Rx1 con un máximo absoluto de 218.8 mm el 1 de mayo de 1994. La respuesta a este evento fue un ascenso repentino de la HS que alcanzó hasta un 2.5% en 5 días. En la Figura 3.10b, el máximo absoluto del índice Rx5 fue de 250.3 mm entre el 3 y el 7 de marzo de 2007. Como respuesta a partir del día 3 de marzo la HS asciende gradualmente por 14 días, aumentando 18.6%. En la Figura 3.10c se aprecia el máximo absoluto del índice CDD consecuencia de 115 días secos consecutivos, que inició en el mes de mayo de 2008. Se observa claramente en la figura la disminución constante de la HS hasta un 3.5%.

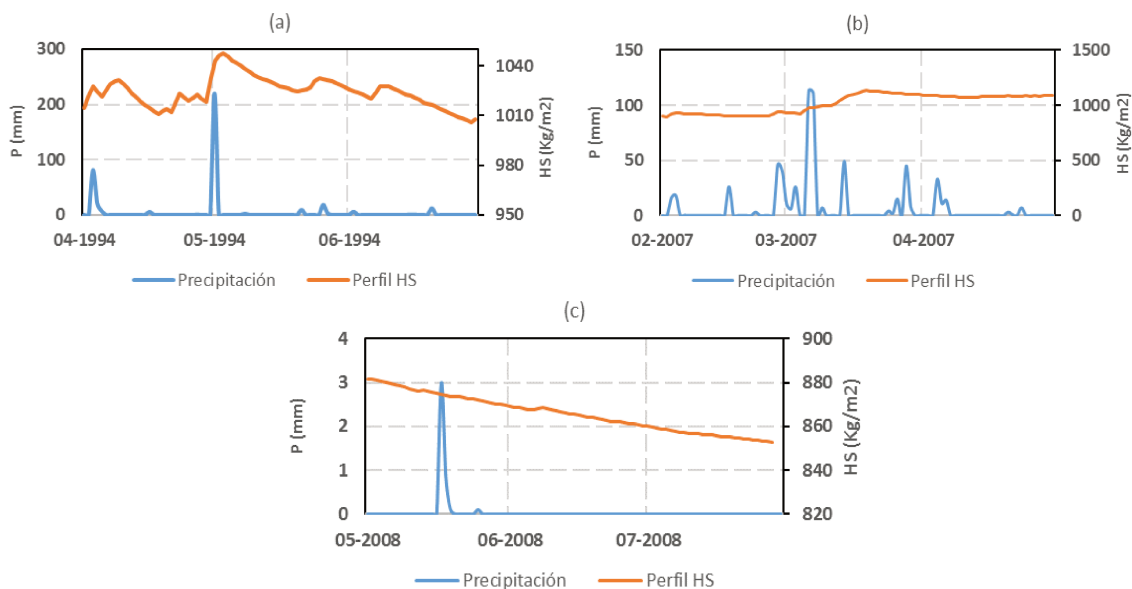


Figura 3.10 Series temporales de máximos absolutos de precipitación (azul) y perfil de humedad del suelo (HS, naranja): (a) precipitación diaria máxima anual (Rx1, abr - jun 1994). (b) precipitación máxima anual en 5 días consecutivos (Rx5, feb - abr 2007) y (c) días secos consecutivos (CDD, may - sep 2007). Estación Ceres.

### 3.3.2.2 Reconquista

En la Figura 3.11 se observan las series temporales de máximos absolutos de precipitación y el perfil de HS en Reconquista. En la Figura 3.11a se muestra el índice Rx1 con un máximo absoluto de 195.7 mm el 24 de marzo de 1961, no se registraron precipitaciones 7 días previos al evento. La respuesta a este evento se evidenció el 25 de marzo con un incremento de la HS que alcanzó hasta un 3.1%. En la Figura 3.11b, el máximo absoluto del índice Rx5 fue de 399.5 mm entre el 22 y el 26 de marzo de 1985. Como respuesta a partir del día 27 de marzo la HS asciende gradualmente por 5 días, aumentando un 3.5%. En la Figura 3.11c se aprecia el máximo absoluto del índice CDD como consecuencia de 94 días secos consecutivos, que inició en el mes de mayo de 1996. Se observa una disminución constante de la HS hasta un 9%.

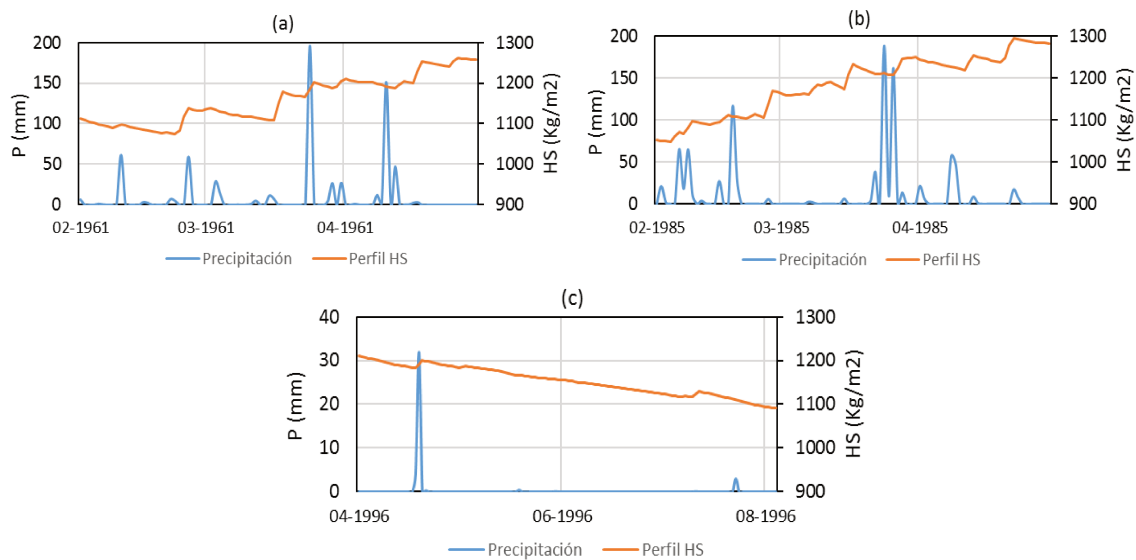


Figura 3.11 Series temporales de máximos absolutos de precipitación (azul) y perfil de humedad del suelo (HS, naranja): (a) precipitación diaria máxima anual (Rx1, feb - abr 1961). (b) precipitación máxima anual en 5 días consecutivos (Rx5, feb - abr 1985) y (c) días secos consecutivos (CDD, abr - ago 1996). Estación Recoquista.

### 3.3.2.3 Rafaela

En la Figura 3.12 se observan las series temporales de máximos absolutos de precipitación y perfil de HS en Rafaela. La Figura 3.12a muestra precipitaciones aisladas inferiores a los 10 mm entre febrero y marzo de 1999, observando un descenso constante en la HS. El índice Rx1 con un máximo absoluto 194.7 mm se registra el 25 de abril de 1999. Este evento inicia un ascenso de la HS por 10 días consecutivos aumentando un 3.8%. En contraste, en la Figura 3.12b se observa que el perfil de HS asciende de manera progresiva como respuesta a precipitaciones consecutivas mayores a 20 mm, generando un valor pico en la HS previo al evento máximo absoluto del índice Rx5 de 341.1 mm entre el 26 y 30 de marzo de 2007. En la figura 3.12c se aprecia el máximo absoluto del índice CDD, 87 días, que inicio en el mes de junio de 1995. La HS disminuye un 2%.

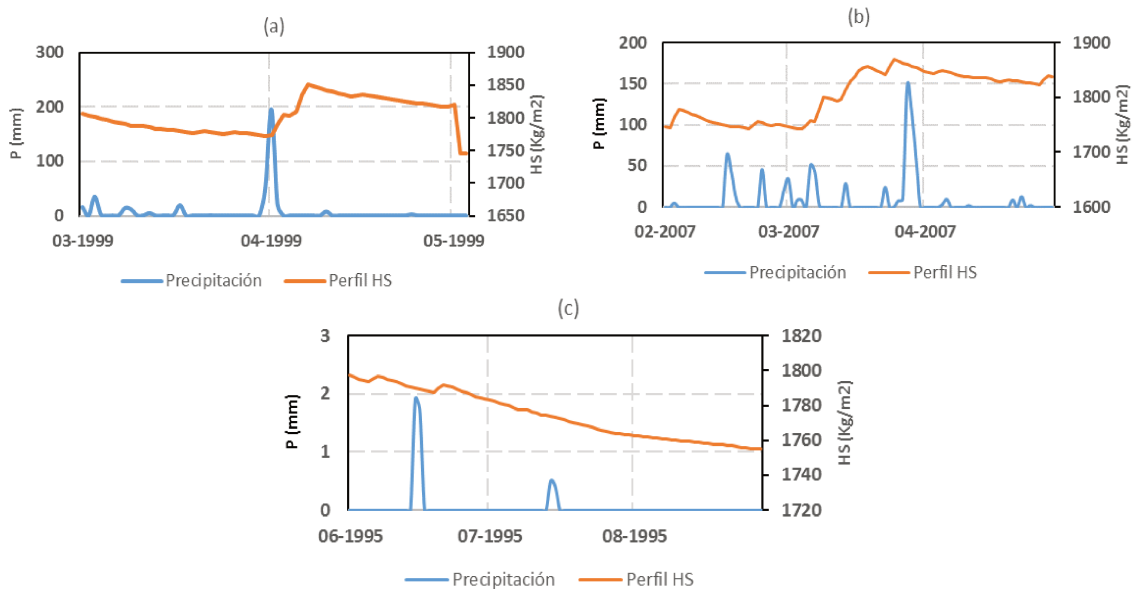


Figura 3.12 Series temporales de máximos absolutos de precipitación (azul) y perfil de humedad del suelo (HS, naranja): (a) precipitación diaria máxima anual (Rx1, mar - may 1999). (b) precipitación máxima anual en 5 días consecutivos (Rx5, feb - abr 2007) y (c) días seco consecutivos (CDD, may - sep 1995). Estación Rafaela.

### 3.3.2.4 Paraná

En la Figura 3.13 se presentan las series temporales de máximos absolutos de precipitación y el perfil de HS en Paraná. En la Figura 3.13a se muestra el índice Rx1 con un máximo absoluto de 235 mm el 3 de marzo de 2009. La respuesta a este evento fue un ascenso de la HS que alcanzó un 2.5% en 3 días. En la Figura 3.13b, el máximo absoluto del índice Rx5 fue de 348.9 mm entre el 27 y el 31 de octubre de 1993. Como respuesta a partir del día 28 de marzo la HS asciende por 7 días alcanzando un aumento del 2.1%. En la Figura 3.13c se aprecia el máximo absoluto del índice CDD consecuencia de 105 días secos consecutivos, con inicio en el mes de junio de 1955. Se observa una disminución constante de la HS hasta de un 1.2%.

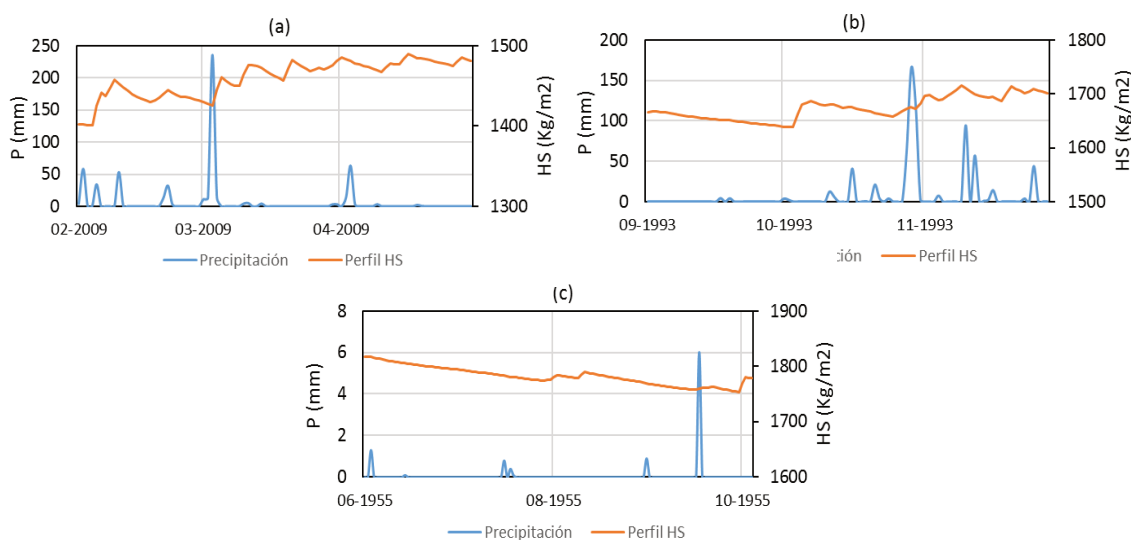


Figura 3.13 Series temporales de máximos absolutos de precipitación (azul) y perfil de humedad del suelo (HS, naranja): (a) precipitación diaria máxima anual (Rx1, feb - abr 2009). (b) precipitación máxima anual en 5 días consecutivos (Rx5, sep - nov 1993) y (c) días seco consecutivos (CDD, jun - oct 1955). Estación Paraná.

### 3.3.2.5 Marcos Juárez

En la Figura 3.14 se presentan las series temporales de máximos absolutos de precipitación y el perfil de HS en Marcos Juárez. Coincide el periodo de los máximos absolutos de los índices Rx1 (Figura 3.14a) y Rx5 (Figura 3.14b). El índice Rx1 con un máximo absoluto de 161.8 mm el 20 de febrero de 1977 mientras que el índice Rx5 fue de 348.9 mm entre el 20 y el 24 de febrero de 1977. La respuesta a este evento fue un ascenso de la HS de 2% en 10 días. En la Figura 3.14c se aprecia el máximo absoluto del índice CDD como consecuencia de 110 días secos consecutivos, que inició en junio de 2008. En la figura se aprecia la disminución constante de la HS en un 1.1% con respecto al perfil total del suelo.

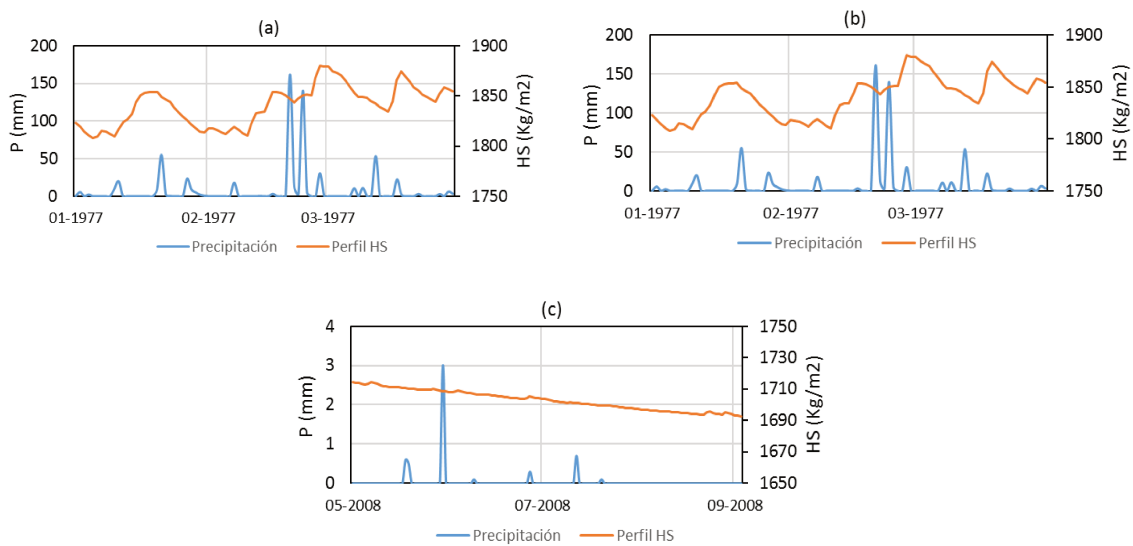


Figura 3.14 Series temporales de máximos absolutos de precipitación (azul) y perfil de humedad del suelo (HS, naranja): (a) precipitación diaria máxima anual (Rx1, ene - mar 1977). (b) precipitación máxima anual en 5 días consecutivos (Rx5, ene - mar 1977) y (c) días seco consecutivos (CDD, may - sep 2008). Estación Marcos Juárez.

### 3.3.2.6 Rosario

La Figura 3.15 presenta las series temporales de máximos absolutos de precipitación y el perfil HS en Rosario. La Figura 3.15a muestra que para finales del año 2012 se registraron precipitaciones inferiores a 40 mm en la región, sin embargo, la HS presenta un descenso. El índice Rx1 presenta un máximo absoluto de 178.0 mm el 19 de diciembre de 2012. Como respuesta, la HS asciende progresivamente por 6 días hasta alcanzar un 3.6% de incremento. La Figura 3.15b muestra que el índice máximo absoluto Rx5 es de 341.1 mm entre el 26 y 30 de marzo de 2007. Sin embargo, días previos debido a precipitaciones consecutivas mayores a 40 mm la HS aumenta un 6.5%, alcanzando su máximo. En la Figura 3.15c se muestra el máximo absoluto del índice CDD debido a 61 días secos consecutivos, que inicio en julio de 1995. Hay una disminución del 1.8% de la HS.

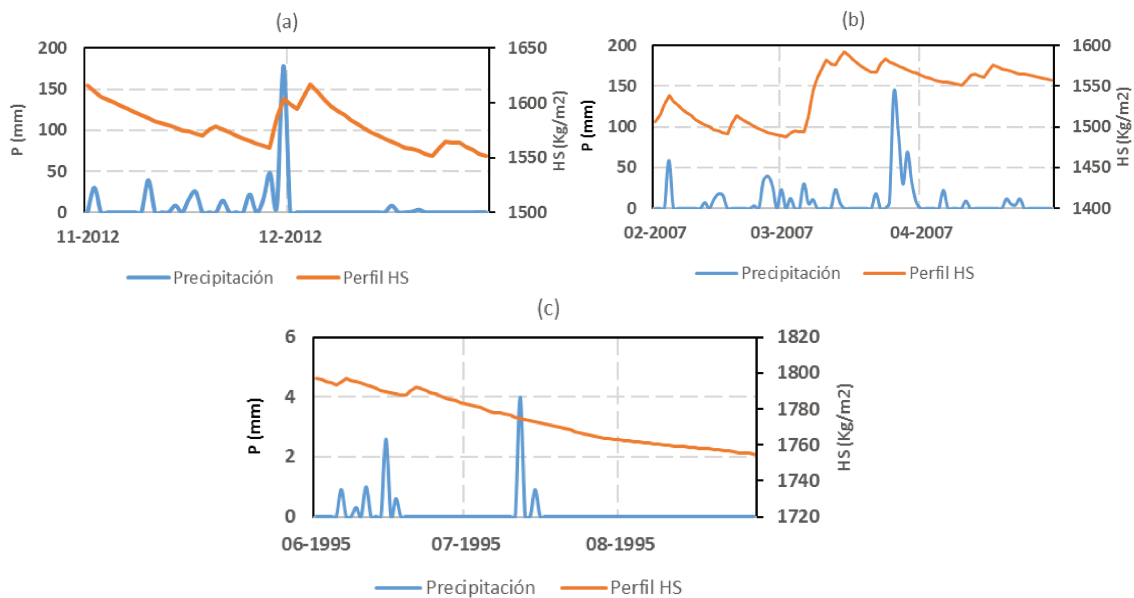


Figura 3.15 Series temporales de máximos absolutos de precipitación (azul) y perfil de humedad del suelo (HS, naranja): (a) precipitación diaria máxima anual (Rx1, mar - may 1999). (b) precipitación máxima anual en 5 días consecutivos (Rx5, feb - abr 2007) y (c) días secos consecutivos (CDD, jul - sep 1995). Estación Rosario.

### 3.3.2.7 Laboulaye

En la Figura 3.16 se presentan las series temporales de máximos absolutos de precipitación y el perfil de HS en Laboulaye. Coincide el periodo de los máximos absolutos de los índices Rx1 (Figura 3.16a) y Rx5 (Figura 3.16b). El índice Rx1 con un máximo absoluto de 203.8 mm el 3 de marzo de 1999 mientras que el índice Rx5 fue de 304.5 mm entre el 4 y 8 de marzo de 1999. La respuesta a este evento fue un ascenso de la HS de un 10% en 9 días. En la Figura 3.16c se aprecia el máximo absoluto del índice CDD consecuencia de 108 días secos consecutivos, que inició en mayo de 1970. En la figura se aprecia la disminución un 4.6% de la HS.

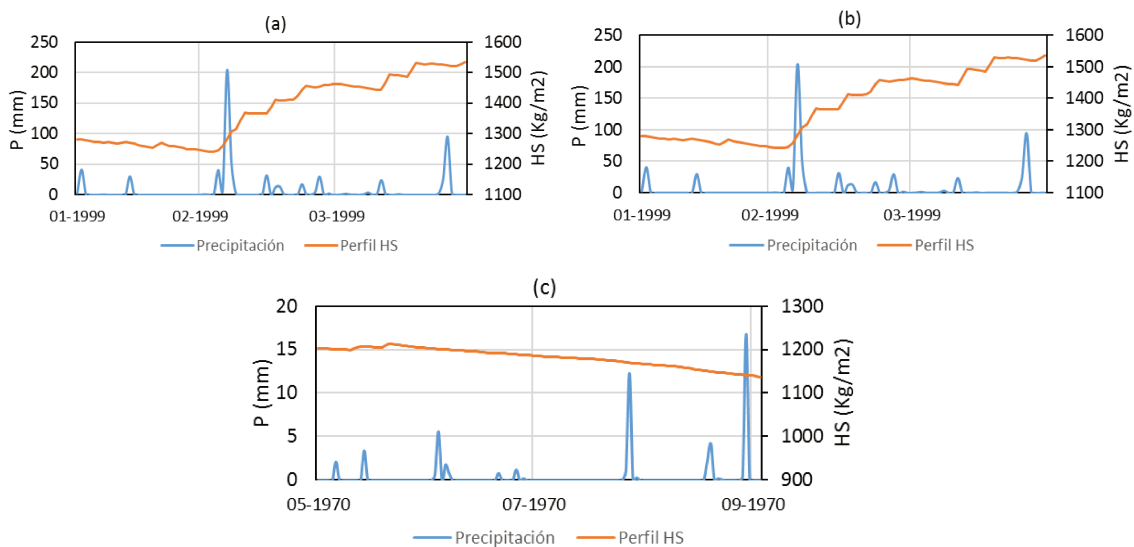


Figura 3.16 Series temporales de máximos absolutos de precipitación (azul) y perfil de humedad del suelo (HS, naranja): (a) precipitación diaria máxima anual (Rx1, ene - mar 1999). (b) precipitación máxima anual en 5 días consecutivos (Rx5, ene - mar 1999) y (c) días secos consecutivos (CDD, may - sep 1970). Estación Laboulaye.



### 3.3.2.8 Pergamino

En la Figura 3.17 se presentan las series temporales de máximos absolutos de precipitación y el perfil de HS en Pergamino. Los máximos absolutos de los índices Rx1 (Figura 3.17a) y Rx5 (Figura 3.17b) coinciden en el periodo ocurrencia. El índice Rx1 con un máximo absoluto de 315 mm se dio el 6 de abril de 1995 mientras que el índice Rx5 fue de 391.5 mm entre el 4 y 9 de abril de 1995. Se observa un ascenso de 1.4% de la HS en 8 días como respuesta a este evento. En la Figura 3.17c se aprecia el máximo absoluto del índice CDD consecuencia de 64 días secos consecutivos, que inicio en julio de 1973, donde la HS disminuye un 1.4%.

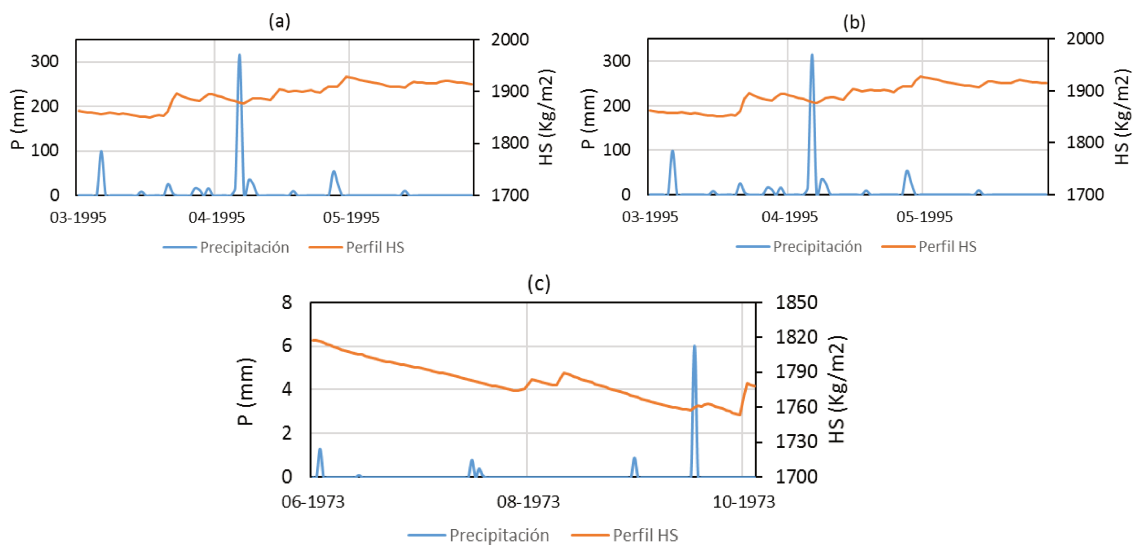


Figura 3.17 Series temporales de máximos absolutos de precipitación (azul) y perfil de humedad del suelo (HS, naranja): (a) precipitación diaria máxima anual (Rx1, mar - may 1995). (b) precipitación máxima anual en 5 días consecutivos (Rx5, mar - may 1995) y (c) días secos consecutivos (CDD, jun - oct 1973). Estación Pergamino.

### 3.4 Conclusiones

Se identificaron los eventos extremos de precipitación en cortas escalas temporales (de uno a 5 días) junto a la cantidad de días consecutivos sin precipitación; se estudiaron sus cambios y variabilidad y se analizó la respuesta en la zona no saturada ante los eventos extremos máximos absolutos de precipitación. Los extremos de precipitación se calcularon a partir de la precipitación diaria observada en 8 estaciones meteorológicas. Se analizaron los extremos de precipitación a través del máximo diario anual (Rx1), el valor máximo acumulado en 5 días consecutivos (Rx5) y los días secos consecutivos (CDD) y se identificaron los máximos absolutos para los periodos de registro. La variación diaria de la zona no saturada se analizó a partir del contenido de humedad de suelo (HS) obtenida a través de simulaciones con el Modelo de Superficie Terrestre de Captación (CLSM) en las 8 estaciones. Se realizan las comparaciones de las series temporales de precipitación que incluyen los máximos absolutos del registro estudiado en cada estación y el perfil de HS 30 días antes y 30 días después del pico máximo, mientras que para la comparación de la respuesta del perfil de HS ante los CDD se estudian 15 días antes y 15 después de la duración completa del evento.

Los eventos extremos de precipitación (Rx1 y Rx5) en el norte y centro del área de estudio presentan una tendencia de aumento a partir de 1960 mientras que al sur permanece sin variaciones significativas. Las series temporales de precipitaciones máximas diarias registran tormentas intensas que exceden los 150 mm en toda la provincia. Por otro lado, la precipitación máxima anual en 5 días consecutivos registra valores mayores a 300 mm, excepto en Ceres con 218 mm. La cantidad de días secos consecutivos para el centro y norte de la provincia de Santa Fe ha ido en ascenso mientras que al sur no tienen una tendencia definida. Las estaciones de Rosario y Pergamino han registrado un máximo de 60 días sin precipitaciones mientras que Ceres alcanza los 115 días. Además, los eventos extremos están fuertemente influenciados por la variabilidad interanual con ciclos de entre 2 y 6 años relacionados al fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur (Berri et al., 2002; Lovino et al., 2018).

La respuesta de la zona no saturada ante eventos extremos absolutos de precipitación se estudió mediante la variación del contenido de humedad en ocho estaciones representativas del área de estudio. Los eventos Rx1, Rx5 y CDD analizados se vieron

reflejados en la HS. Ante los eventos máximos absolutos del índice Rx1 se evidencia un aumento de entre 2.5% hasta 4% de HS entre 3 y 10 días después. Se diferencia de esta condición la estación Laboulaye donde se refleja un aumento de un 10% en el perfil total de HS.

Como respuesta a condiciones secas o eventos aislados previos al máximo absoluto del índice Rx5, la HS tiende a un aumento gradual de 7 a 14 días después del inicio del evento, alcanzando hasta un 18.6%. Por el contrario, ante precipitaciones consecutivas mayores a 20 mm previos al evento máximo absoluto, la HS alcanza su pico máximo antes de la ocurrencia de evento analizado. Finalmente, en caso del índice máximo CDD se observó que la pendiente es menos abrupta cuando ocurren precipitaciones previas al evento de estudio y en general la HS disminuye entre 1 y 5% luego de la consecución de días sin precipitación.

### 3.5 Referencias Bibliográficas

- Alexander, L.V., Fowler, H., Bador, M., Behrangi, A., Donat M., Dunn, R., Funk, C., Goldie, J., Lewis, E., Rogé, M., Seneviratne, S., & Venugopal, S. (2019). On the use of indices to study extreme precipitation on sub-daily and daily timescales. *Environmental Research Letters*, 14 (12), 125008. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab51b6>
- Bertello, F. (17 de enero de 2017). Inundaciones: pronostican pérdidas para el campo de hasta U\$S 1750 millones. *La Nación*. Recuperado de: <http://www.lanacion.com.ar/1976462-inundaciones-pronostican-perdidas-para-el-campo-de-hasta-us-1750-millones>
- Berri, G., Flamenco, E., Spescha, L., Tanco, R., & Hurtado, R. (2002). Some effects of La Niña on summer rainfall, water resources, and crops in Argentina. *United Nations University*. 127-133
- Brendel, A. S., Bohn, V. Y., & Piccolo, M. C. (2017). Variabilidad de la precipitación y su relación con los rendimientos agrícolas en una región semiárida de la llanura pampeana (Argentina). *Estudios Geográficos*, 78(282), 7-29. <https://doi.org/10.3989/estgeogr.20170>.
- Crave, A., & Gascuel-Oudou, C. (1997). The influence of topography on time and space distribution of soil surface water content. *Hydrological processes*, 11(2), 203-210. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(199702\)11:2%3C203::AID-HYP432%3E3.0.CO;2-K](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199702)11:2%3C203::AID-HYP432%3E3.0.CO;2-K).
- Famiglietti, J. S., Rudnicki, J. W., & Rodell, M. (1998). Variability in surface moisture content along a hillslope transect: Rattlesnake Hill, Texas. *Journal of hydrology*, 210(1-4), 259-281. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00187-5](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00187-5).
- Klein Tank, A. M. G., Zwiers, W., & Zhang, X. (2009). Guidelines on analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation, *Climate data and monitoring WCDMP-72*, WMO-TD No. 1500, 56.
- Koster, R. D., Suarez, M. J., Ducharne, A., Stieglitz, M., & Kumar, P. (2000). A catchment-based approach to modeling land surface processes in a general circulation model: 1. Model structure. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 105(D20), 24809-24822. <https://doi.org/10.1029/2000JD900327>.
- Lovino, M. A., Müller, O. V., Berbery, E. H., & Müller, G. V. (2018). How have daily climate extremes changed in the recent past over northeastern Argentina?. *Global and Planetary Change*, 168, 78-97. doi: <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.06.008>.
- Malik, R.S., Butter, B.S., Anlauf, R. & Richter, J. (1987). Water penetration into soils with different textures and initial soil contents. *Soil Science*, 144(6), 389-393.
- Malik, R. S., Butter, B. S., Anlauf, R., & Richter, J. (1987). Water penetration into soils with different textures and initial moisture contents. *Soil Science*, 144(6), 389-393.

- Merz, B., & Plate, E. J. (1997). An analysis of the effects of spatial variability of soil and soil moisture on runoff. *Water Resources Research*, 33(12), 2909-2922. <https://doi.org/10.1029/97WR02204>.
- Musgrave, G. W. (1955). How much of the rain enters the soil. *The yearbook of agriculture*, 151-159.
- NRCS, U. (2007). Chapter 10, part 630–hydrology. Estimation of direct runoff from storm rainfall. In ‘National engineering handbook’. (Eds V Mockus, AT Hjelmfelt, HF Moody) pp. 1–79. US Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service: Washington, DC.
- Pascale J.Y. y Damario E.A. (2004). Bioclimatología agrícola y agroclimatología. FAUBA. 327-360.
- Sheffield, J., Goteti, G., & Wood, E. F. (2006). Development of a 50-year high-resolution global dataset of meteorological forcings for land surface modeling. *Journal of climate*, 19(13), 3088-3111. <https://doi.org/10.1175/JCLI3790.1>.
- Sillmann, J., Kharin, V. V., Zhang, X., Zwiers, F. W., & Bronaugh, D. (2013). Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 1. Model evaluation in the present climate. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(4), 1716-1733. <http://dx.doi.org/10.1002/jgrd.50203>.
- Vachaud, G., Passerat de Silans, A., Balabanis, P., & Vauclin, M. (1985). Temporal stability of spatially measured soil water probability density function. *Soil Science Society of America Journal*, 49(4), 822-828. <https://doi.org/10.2136/sssaj1985.03615995004900040006x>.
- Whitaker, M.P.L., (1993). Small-scale spatial variability of soil moisture and hydraulic conductivity in a semi-arid rangeland soil in Arizona. Tesis Doctoral. Department of Hydrology and Water Resources. Universidad de Arizona.
- Zhang, X., Alexander, L., Hegerl, G.C., Jones, P., Klein Tank, A., Peterson, T.C., Trewin, B., & Zwiers, F.W. (2011). Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2(6), 851-870. <https://doi.org/10.1002/wcc.147>.

## **Capítulo 4: Simulaciones de eventos extremos de precipitación**

### **4.1 Introducción**

Las lluvias intensas, inundaciones, períodos secos, entre otros eventos extremos, han afectado a América del Sur históricamente. Los recientes cambios observados en el clima (Barros et al., 2008; Re y Barros, 2009; Lovino et al., 2018a) plantean interrogantes, entre ellos, como el clima presente y pasado provee bases más firmes para proyectar con menor incertidumbre el clima futuro, en especial los eventos extremos de precipitación.

Para reproducir los principales procesos que ocurren en el sistema climático, las investigaciones retrospectivas y futuras se fundamentan en los Modelos de Circulación General (MCG). Estos modelos reproducen los cambios en el sistema climático, principalmente en la temperatura y la precipitación, ante diferentes tipos de forzamientos. Los modelos que se utilizaran en este capítulo corresponden a la quinta fase del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP5, por sus siglas en inglés; Taylor et al., 2012). Los experimentos numéricos de los modelos del CMIP5 de largo plazo simulan la respuesta a forzamientos climáticos como la composición atmosférica (incluido el CO<sub>2</sub>) debida a la influencia volcánica y antropogénica, la radiación solar, las emisiones, los aerosoles naturales y antropogénicos, y el uso del suelo. Estas simulaciones retrospectivas de largo plazo permiten la evaluación de la habilidad de cada modelo para representar el clima histórico y presente observado (y sus cambios), y proveen las condiciones iniciales para las proyecciones climáticas con los escenarios de trayectorias de concentración representativas (Representative Concentration Pathways, RCP, Moss et al., 2010). Los RCP se caracterizan por el cálculo aproximado que hacen del forzamiento radiativo total para el año 2100 en relación con el año 1750. De esta manera, se definen 4 escenarios: RCP2.6 de mitigación conducente a un nivel de forzamiento muy bajo (2.6 W/m<sup>2</sup>), RCP 4.5 y RCP6.0 ambos denominados escenarios de estabilización con un nivel de forzamiento 4.5 W/m<sup>2</sup> y 6.0 W/m<sup>2</sup> respectivamente y RCP8.5 de altas emisiones de gases de efecto invernadero (IPCC, 2013).

Diversos estudios han analizado la capacidad de los MCGs para representar totales mensuales, estacionales o anuales de precipitación (Gulizia y Camilloni, 2015; Vera y Díaz, 2015; Barros y Doyle, 2018) en el sur de Sudamérica. En un trabajo reciente, Lovino

et al. (2018b) evalúan un conjunto de simulaciones en el periodo 1901-2005 de 25 MCGs del CMIP5 con el fin de analizar la habilidad de los MCGs para representar el clima medio histórico y actual y su variabilidad en el nordeste de Argentina. De los 25 modelos evaluados a partir de diferentes métricas, 7 de ellos son los que logran el mejor rendimiento y presentan mayor capacidad para reproducir el ciclo anual de precipitación. Sin embargo, la totalidad de los modelos subestiman la precipitación durante la estación cálida (de septiembre a abril) y sobreestiman ligeramente en estación fría. Por otro lado, el ensamble de los 25 modelos subestima la precipitación observada en un 12% en promedio, mientras que el ensamble de los 7 mejores modelos la reduce a solo el 1%. Los autores concluyen que ninguno de ambos ensambles (el de los 25 MCGs y el de los 7 mejores MCGs) es capaz de simular adecuadamente la tendencia positiva en la precipitación en el periodo 1901-2005, aunque reconocen débilmente el patrón de cambio observado.

Utilizando los MCGs que demostraron mejor capacidad para simular el clima histórico medio y su variabilidad (según Lovino et. al, 2018b), en este capítulo se analizan los eventos extremos de precipitación identificados mediante el SPI en el periodo histórico (1980-2005) y en diferentes escenarios de proyecciones (2006-2035). El objetivo es analizar la duración e intensidad de los eventos extremos de precipitación durante el presente y en las proyecciones futuras de los mejores MCG y su ensamble para la región del noreste de Argentina.

## **4.2 Datos y metodología**

### **4.2.1 Modelos de Circulación General (MCG) y escenarios**

La selección de los MCG realizada por Lovino et. al (2018b) está basada en aquellos que tuvieron mayor habilidad para representar la precipitación en el nordeste de Argentina. Los 7 modelos que logran las mejores métricas estadísticas de evaluación para la precipitación en el periodo 1901-2005 se presentan en la Tabla 4.1. El ensamble de estos 7 modelos mejora las métricas estadísticas en comparación a los resultados obtenidos con cada uno de los modelos individuales (Lovino et al., 2018b), por lo que también se utilizará el ensamble.

Tabla 4.1 Modelos del CMIP5 con mejores métricas estadísticas de evaluación para la precipitación en el periodo 1901-2005 para el nordeste de Argentina y sus atributos (adaptado de Lovino et al., 2018b)

| Modelo         | Institución, País           | Tipo    | Resolución    | Referencia            |
|----------------|-----------------------------|---------|---------------|-----------------------|
|                |                             |         | (°lon x °lat) |                       |
| CanESM2        | CCCMA, Canada               | ESM     | 2.81 x 2.81   | Arora et al., 2011    |
| CESM1-BGC      | NSF-DOE-NCAR, Estado Unidos | AOGCM   | 1.25 x 0.9424 | Long et al., 2013     |
| CESM1-FASTCHEM | NSF-DOE-NCAR, Estado Unidos | ChemESM | 1.25 x 0.9424 | Lamarque et al., 2014 |
| INM-CM4        | INM, Rusia                  | AOGCM   | 2 x 1.5       | Volodin et al., 2010  |
| NorESM1-M      | NCC, Noruega                | ESM     | 2.5 x 1.875   | Bentsen et al. 2012   |
| CCSM4          | NCAR, Estados Unidos        | AOGCM   | 1.25 x 0.9424 | Gent et al., 2011     |
| MIROC4h        | MIROC, Japon                | AOGCM   | 0.56 x 0.56   | Sakamoto et al., 2012 |

Las simulaciones climáticas futuras de los MCG dependen de la capacidad de los mismos para reproducir las características históricas y actuales del clima. Es por ello que las proyecciones 2006-2035 de este estudio se realizan a partir de los mejores MCGs, (mostrados en la Tabla 4.1). Sin embargo, de los 7 modelos, CESM1-FASTCHEM y MIROC4h no tienen proyecciones futuras disponibles. Es por ello que en este estudio se emplearán los 5 modelos resaltados en gris en la Tabla 4.1. Cada uno de esos modelos simula las condiciones impuestas por los diferentes escenarios. No obstante, no todos estos modelos tienen simulaciones disponibles para cada uno de los RCP. Tal es así que los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 serán simulados por los 5 MCGs destacados en la Tabla 4.1 (en gris), mientras que para el escenario RCP2.6 se utilizará solo 3 de ellos (CanESM2, NorESM1-M y CCSM4).

#### 4.2.2 Caracterización de eventos extremos de precipitación en los MCG

En la región nordeste de Argentina, definida entre 58.5°-63.5°W y 27.5°-34.5°S, se analizan las características de los eventos extremos de precipitación (duración e intensidad) mediante el SPI. Se calcula el SPI a partir de la precipitación mensual derivada de las simulaciones de cada uno de los MCG (Tabla 4.1) y el ensamble multimodelo de estos MCG en el periodo 1980-2035. Las escalas temporales del SPI corresponden a 3 meses (corto plazo), 12 y 24 meses (largo plazo). Se construyen las series temporales de los SPI separando las simulaciones de largo plazo en periodo histórico 1980-2005, y las de los escenarios RCP en periodo 2006-2035.



Se determina la capacidad de los MCGs para representar los eventos extremos de precipitación en el periodo 1980-2005 a partir de la comparación de los  $SPI_m$  (obtenidos a partir de la precipitación mensual de las simulaciones históricas) con los  $SPI_o$  (obtenidos a partir de la precipitación mensual de la base de datos del GPCCv2018, expuesto en el Capítulo 2.4.1). De igual manera, se contrastan los  $SPI_e$  (obtenidos a partir de la precipitación mensual del ensamble de los MCG) con los valores de  $SPI_o$ . Estos resultados permiten evaluar los eventos extremos de precipitación de los modelos en comparación con los eventos extremos observados en el periodo histórico. En base a dichos modelos y su ensamble, se calculan los  $SPI_s$  (obtenidos a partir de la precipitación mensual de los escenarios de emisiones RCP2.6, RCP4.5 y RCP8.5).

## 4.3 Resultados

### 4.3.1 Modelo CanESM2

La Figura 4.1 presenta las series temporales de  $SPI_o$  y  $SPI_m$  del modelo CanESM2 en el intervalo 1980-2005 y las series temporales de  $SPI_s$  del CanESM2 para los tres escenarios de emisiones del período 2006-2035. Las series de  $SPI_m$  a escala temporal de 3 meses (Fig. 4.1a) indican que los eventos húmedos se encuentran en el rango de  $SPI_o$  hasta el año 1995. No obstante, para las escalas de 12 y 24 meses (Fig. 4.1b y 4.1c), los máximos están desfasados y no se reconoce la magnitud de los eventos secos. Desde 1998 hasta el 2005, el  $SPI_m$  (Fig. 4.1b y 4.1c) tiende a mostrar eventos secos mientras que en el  $SPI_o$  prevalecen los eventos húmedos. Para las proyecciones, entre los años 2006-2020, el  $SPI_s$  en el escenario RCP2.6 (Fig. 4.1b) y el  $SPI_s$  en el escenario RCP4.5 (Fig. 4.1c) coinciden en la proyección de eventos húmedos con magnitudes de moderadas a severas. El  $SPI_s$  en el escenario RCP8.5 (Fig. 4.1b y 4.1c) presenta tendencia inversa con respecto al  $SPI_s$  en el escenario RCP2.6 y al  $SPI_s$  en el escenario RCP4.5 en los intervalos 2006-2011 y 2017-2021. A partir de año 2025, no se reconocen eventos de intensidad mayor a severos en ninguna de las proyecciones analizadas.

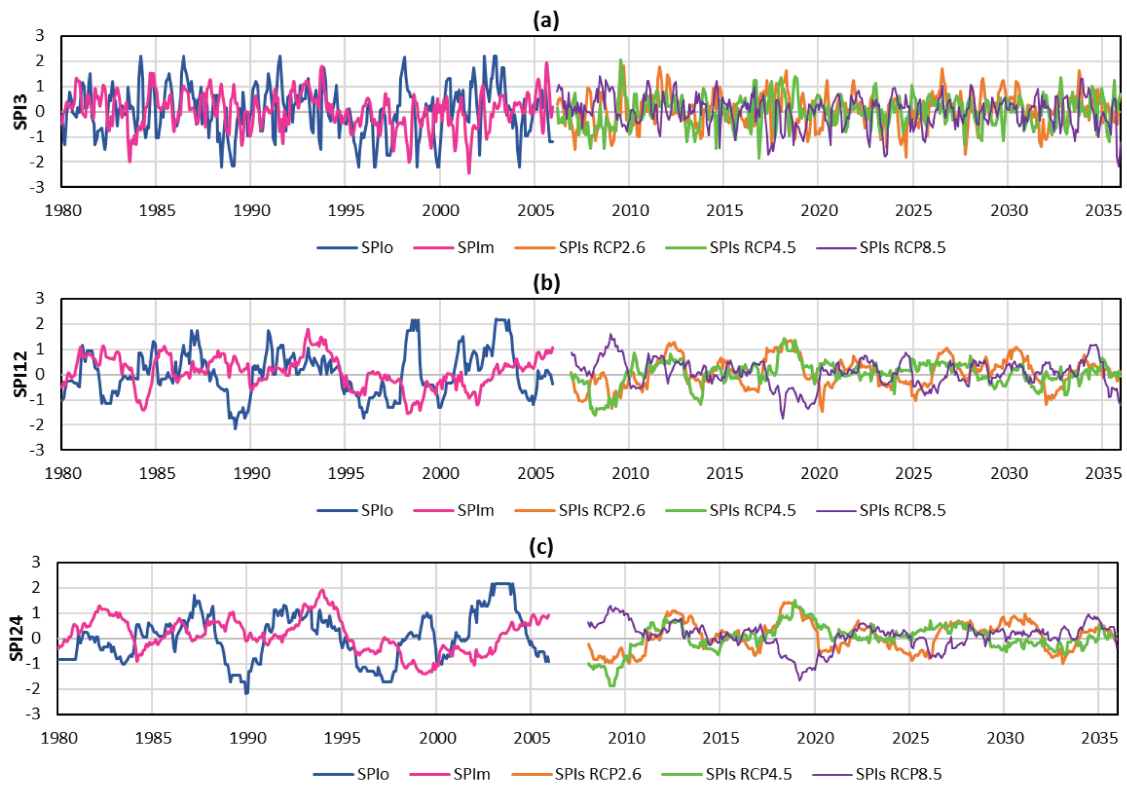


Figura 4.1 Series temporales de los SPI observados ( $SPI_o$ ), simulados en el período histórico ( $SPI_m$ ) y en los 3 escenarios RCP estudiados ( $SPI_s$ ) para el modelo CanESM2 (1980-2035). Escala temporal: (a) 3 meses, (b) 12 meses y (c) 24 meses.

En la Figura 4.2 se comparan los eventos identificados para los índices  $SPI_o$  y  $SPI_m$  del CanESM2 en el periodo histórico 1980-2005. En este período (notar que difiere del período analizado en la sección 2, que abarca de 1979 a 2016), las observaciones muestran 6 eventos húmedos (gamas de azul) y 4 eventos secos (gamas de rojo) (ver  $SPI_o$ ). El modelo categoriza 5 eventos húmedos y 4 eventos secos en el mismo periodo (ver  $SPI_m$ ). Entre 1980 y 1997, la duración de los eventos húmedos es sobreestimada por el modelo mientras que los eventos secos son subestimados. En el periodo 1998-2005, el  $SPI_m$  presenta un comportamiento que no es consistente con las observaciones. En la Figura 4.2 se observa que el  $SPI_m$  coincide en 4 eventos húmedos con el  $SPI_o$ , aunque no identifica adecuadamente su duración e intensidad. El primero de ellos fue el ocurrido en el año 1981. Este evento es categorizado como evento húmedo severo con una duración promedio de 8 meses en  $SPI3_o$  y  $SPI12_o$ . El modelo lo identifica en los  $SPI3_m$ ,  $SPI12_m$  y  $SPI24_m$  con magnitud moderada, aunque se prolonga hasta 1982 con una duración de 28 meses. El segundo evento ocurrido en 1984 es identificado en las 3 escalas temporales de

SPI<sub>o</sub> y se categoriza como excepcional a una escala de 3 meses, con una duración promedio de 6 meses. El SPI<sub>m</sub> a escala temporal 3 meses indica que es un evento severo con una duración de 6 meses. En la escala temporal de 12 meses su duración se extiende hasta 1985 mientras que en SPI<sub>m</sub> a escala de 24 meses no se identifica. El evento húmedo comprendido entre 1986-1987 tiene una duración observada promedio de 14 meses y alcanza una intensidad de excepcional a una escala de 3 meses, aunque a escalas mayores (SPI<sub>12<sub>o</sub></sub> y SPI<sub>24<sub>o</sub></sub>) es extremo. En cambio, el SPI<sub>m</sub> indica un evento moderado prolongándose hasta 1988 en las 3 escalas temporales. Durante los años 1991-1993 se presentan en SPI<sub>3<sub>o</sub></sub> y SPI<sub>12<sub>o</sub></sub> eventos consecutivos cortos que alcanzan intensidad excepcional. A una escala temporal de 24 meses, estos eventos se aprecian como un único evento, con una duración de 24 meses. En este caso, los SPI<sub>m</sub> son capaces de identificarlo como de intensidad extrema y a partir del año 1992 prolongándose hasta 1994. Por el contrario, los eventos húmedos ocurridos en 1998 y en el periodo 2000-2003 no son reconocidos adecuadamente por el modelo.

En relación a la caracterización de los eventos secos, el modelo reconoce solo un evento seco histórico observado entre los años 1995-1997 con una duración de 30 meses e intensidad de extremo a excepcional. El modelo lo identifica en el año 1995, pero de menor intensidad, categorizándolo como un evento moderado en las escalas de 3, 12 y 24 meses. El resto de los eventos secos observados no son adecuadamente reproducidos en duración e intensidad por el modelo.

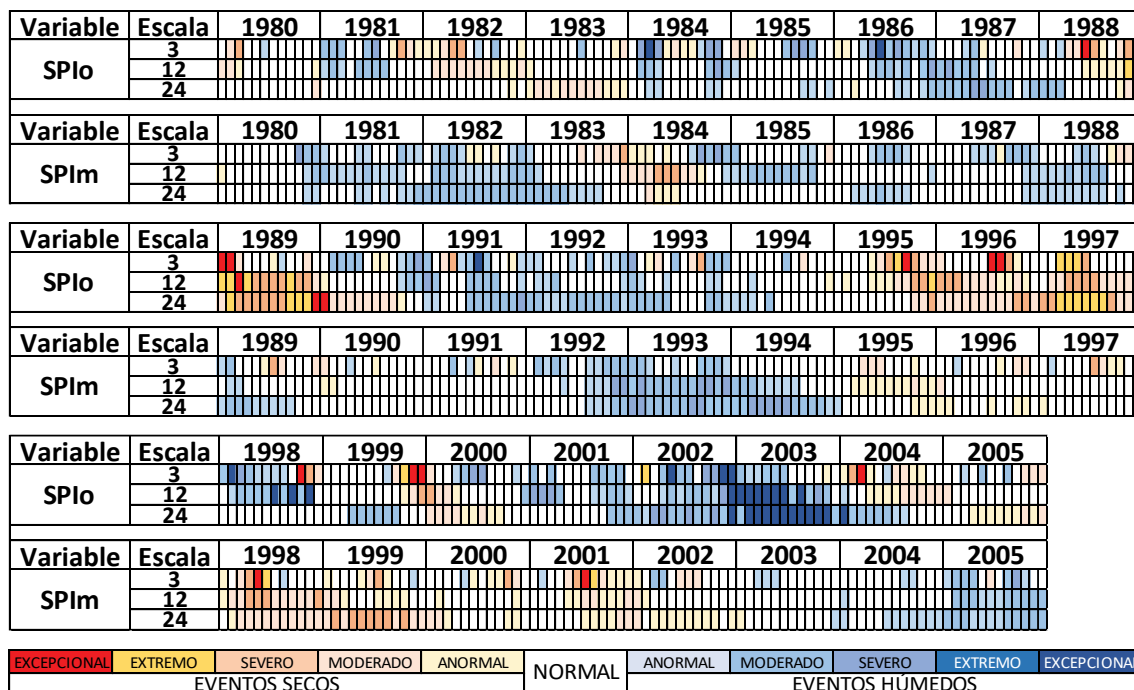


Figura 4.2 Comparación entre el SPI<sub>m</sub> del modelo CanESM2 y el SPI<sub>o</sub> para las escalas temporales de 3, 12 y 24 meses, en el periodo 1980-2005.

La Figura 4.3 muestra los SPI<sub>s</sub> de las proyecciones del modelo CanESM2 para el periodo 2006-2035. En el escenario RCP2.6 se presentan eventos de moderados a severos: 4 eventos húmedos y 4 eventos secos. Los periodos húmedos se identifican en los años 2011-2012, 2017-2018, 2026-2027 y 2029-2030. Asimismo, se evidencian eventos secos en los años 2008-2010, 2016, 2024-2025 y 2032. Para el escenario RCP 4.5 se muestra un evento seco de magnitud extrema en el año 2008 y 2 eventos húmedos de moderados a severos en los años 2012 y 2018. Mientras que para el escenario de RCP 8.5 se identifican 4 eventos húmedos de moderados a severos en los periodos 2008-2009, 2012, 2022, 2034 y 1 evento seco 2017-2019 alcanzando intensidad extrema.

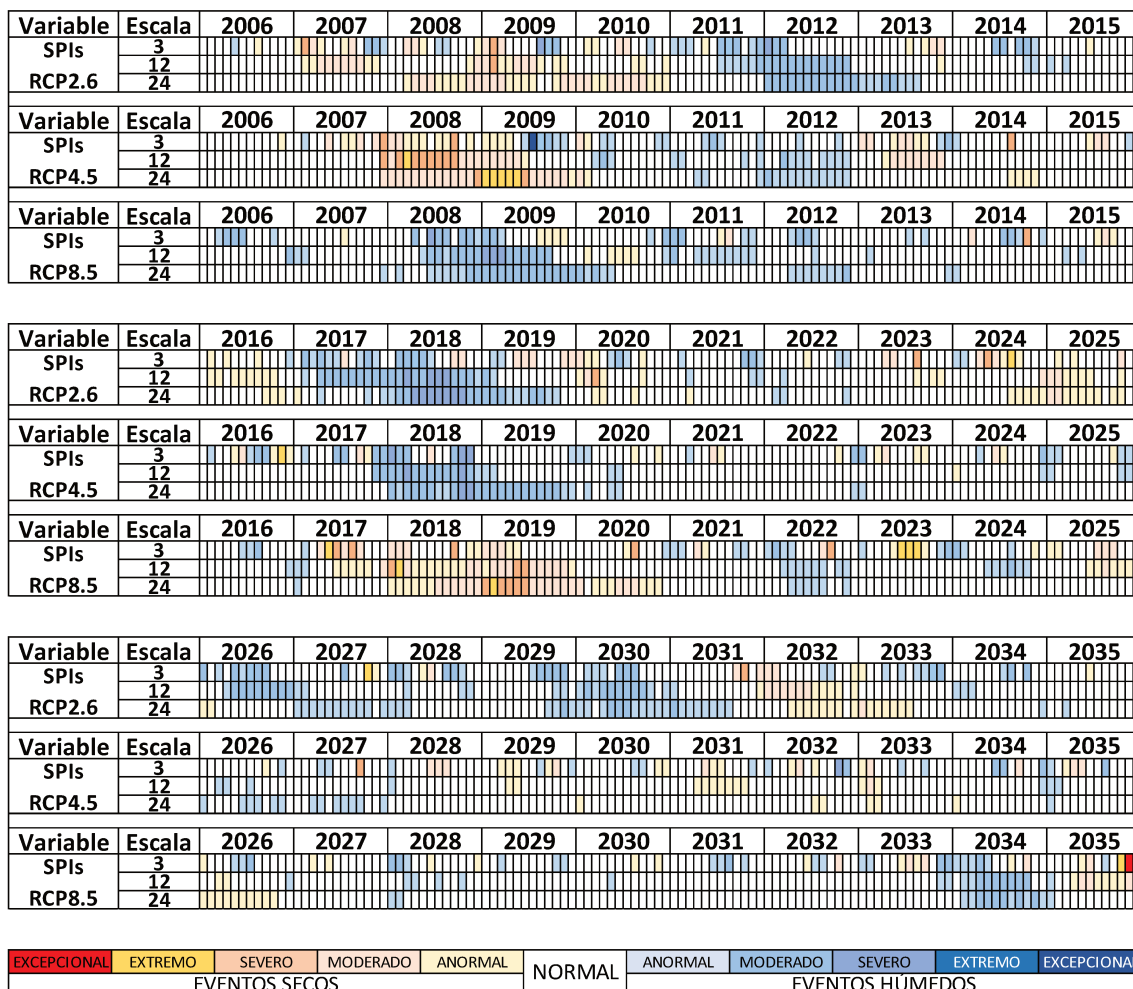


Figura 4.3 SPIs del modelo CanESM2 en los escenarios de emisión RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 para las escalas temporales de 3, 12 y 24 meses, en el periodo 2006-2035.

### 4.3.2 Modelo CCSM4

La Figura 4.4 presenta las series temporales de SPI<sub>o</sub> y SPI<sub>m</sub> del modelo CCSM4 en el intervalo 1980-2005 y el SPI<sub>s</sub> del CCSM4 para los tres escenarios de emisiones entre los años 2006-2035. En la figura se aprecia que entre los años 1986-2003 los eventos húmedos moderados se aproximan en magnitud y duración a los eventos observados mientras que los eventos secos tienden a ser atenuados en las 3 escalas temporales. Los SPI<sub>s</sub> de las simulaciones coinciden en la proyección de eventos secos alcanzando magnitudes de severas a extremas entre los años 2006-2010, 2015-2025 y 2032 en los escenarios RCP2.6 y RCP8.5 (Fig. 4.4b y 4.4c). El RCP4.5 (Fig. 4.4c) presenta tendencia a eventos cíclicos (húmedo-seco) de magnitudes moderadas a lo largo del periodo analizado.

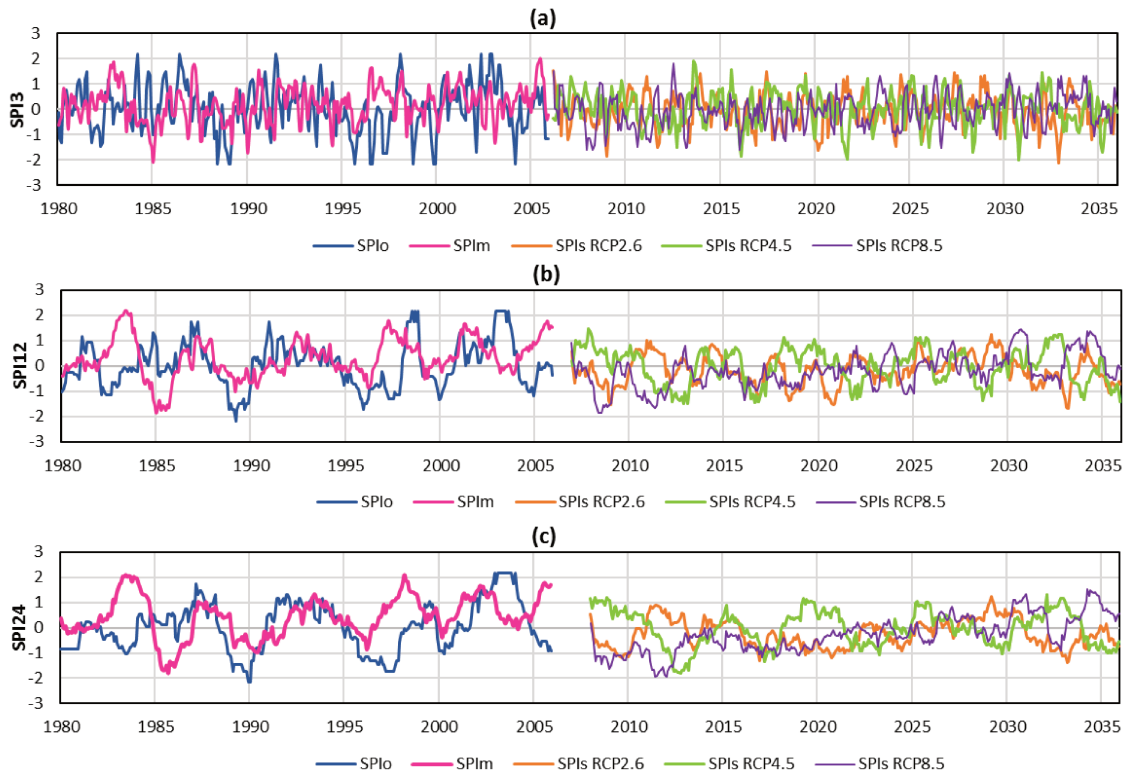


Figura 4.4 Series temporales de los SPI observados ( $SPI_o$ ), simulados en el período histórico ( $SPI_m$ ) y en los 3 escenarios RCP estudiados ( $SPI_s$ ) para el modelo CCSM4 (1980-2035). Escala temporal: (a) 3 meses, (b) 12 meses y (c) 24 meses

En la Figura 4.5 se muestra la duración e intensidad de los eventos extremos representados por  $SPI_o$  y  $SPI_m$  del modelo CCSM4 en el periodo 1980-2005. Se puede observar que los  $SPI_m$  reconocen 6 eventos húmedos y 2 eventos secos. Sin embargo, al comparar los  $SPI_m$  con los  $SPI_o$  se observa que coinciden 3 eventos húmedos y 1 evento seco, aunque  $SPI_m$  subestima la intensidad y duración de los  $SPI_o$ . En las 3 escalas temporales analizadas, los  $SPI_m$  identifican el primer evento húmedo en 1987 que se categoriza como extremo con una duración promedio de 12 meses. El segundo evento húmedo, entre los años 1992-1993, es correctamente simulado y se prolonga por 13 meses con intensidad máxima de evento severo. El evento húmedo simulado entre los años 2001-2002 alcanza magnitudes extremas por 18 meses, consistentemente con las observaciones, pero no reconoce la intensificación en el año 2003 donde adquiere intensidad de evento excepcional. El modelo es capaz de reconocer la sequía de 1989, categorizada como un evento seco excepcional de 18 meses de duración. Sin embargo, los valores de  $SPI_m$  adquieren intensidades moderadas en eventos de corta duración (2 meses).

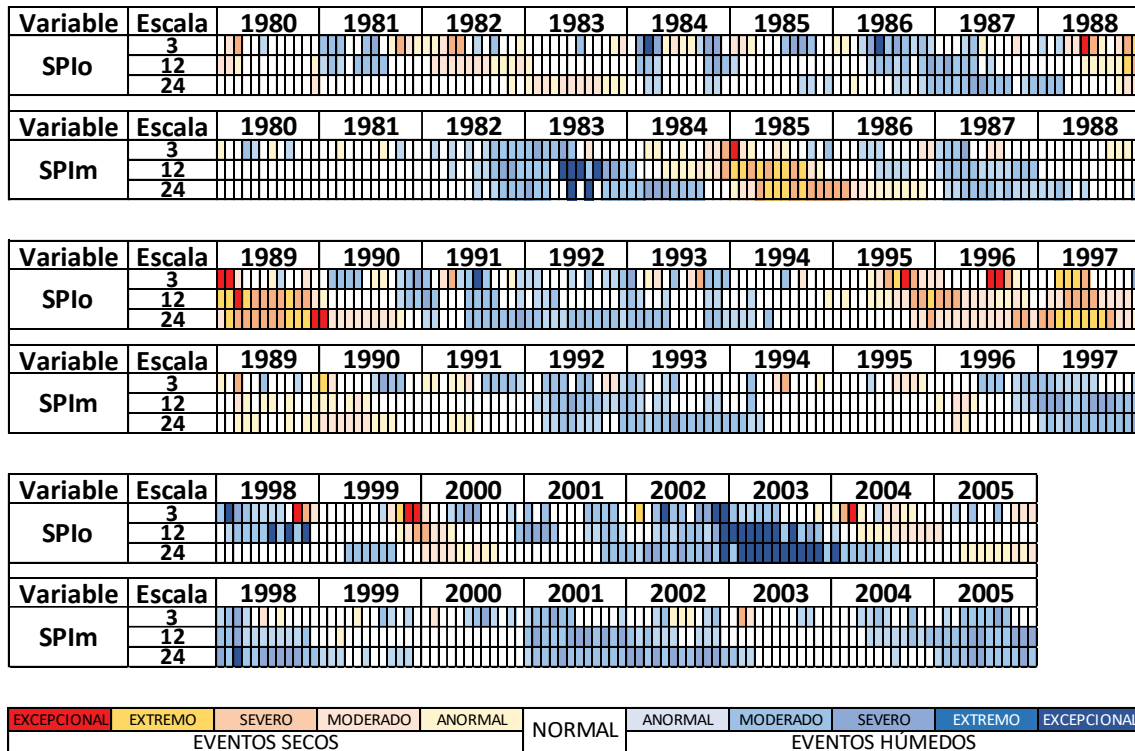


Figura 4.5 Comparación entre el SPI<sub>m</sub> del modelo CCSM4 y el SPI<sub>o</sub> para las escalas temporales de 3, 12 y 24 meses, en el periodo 1980-2005.

La Figura 4.6 muestra los SPI<sub>s</sub> del CCSM4 para los tres escenarios de emisiones en el periodo 2006-2035. En el escenario RCP2.6, se identifican 2 eventos húmedos de intensidad moderada con una duración promedio de 11 meses (2010-2011 y 2028-2029) y 6 eventos secos de moderados a extremos con duraciones superiores a los 12 meses. Para el escenario RCP4.5 con duraciones promedios de 12 meses, se muestran 5 eventos secos de intensidad extrema y 4 eventos húmedos de moderados a severos. Mientras que para el escenario de RCP8.5 presenta eventos secos de severos a extremos hasta el año 2025, que, en la escala temporal de 24 meses alcanzan duraciones mayores a 45 meses. A partir de 2025-2035 se reflejan 3 eventos húmedos consecutivos de moderados a severos.

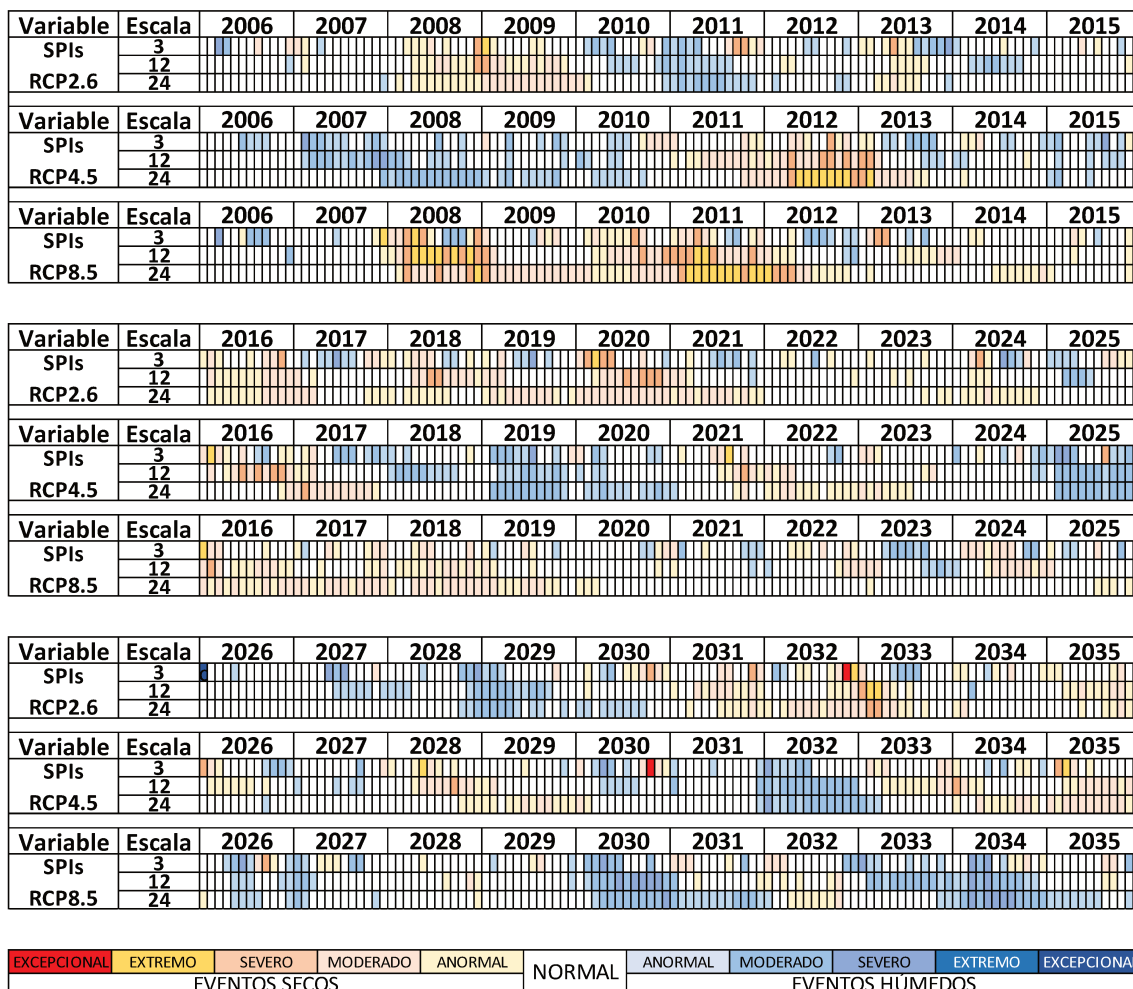


Figura 4.6 SPIs del modelo CCSM4 en los escenarios de emisión RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 para las escalas temporales de 3, 12 y 24 meses, en el periodo 2006-2035.

### 4.3.3 Modelo NorESM1

La Figura 4.7 presenta las series temporales de SPI<sub>o</sub> y SPI<sub>m</sub> del modelo NorESM1 en el periodo 1980-2005 y el SPI<sub>s</sub> del NorESM1 para los tres escenarios de emisión entre los años 2006-2035. En la figura se observa que en los años 1986, 1990 y 2002 los eventos húmedos se aproximan en intensidad a los eventos observados y difieren en la duración. Los eventos secos no son reconocidos adecuadamente por el modelo en el periodo observado. Los escenarios de emisión RCP2.6 y RCP8.5 en las 3 escalas temporales entre los años 2006-2026 proyectan eventos secos que alcanzan magnitud extrema y húmedos severos. El escenario RCP4.5 indica proyecciones de eventos secos entre los años 2006-2016 (Fig. 4.7b y 4.7c). A partir de 2030, las proyecciones de los SPI<sub>s</sub> no exceden las magnitudes moderadas.



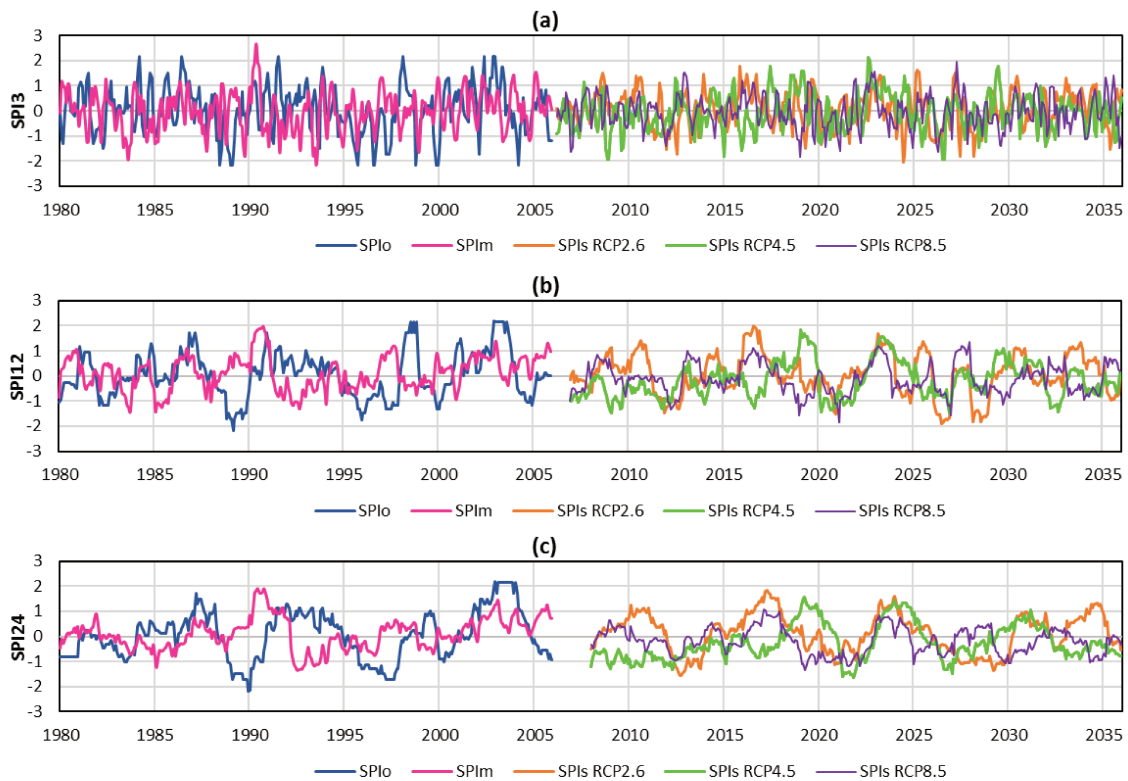


Figura 4.7 Series temporales de los SPI observados ( $SPI_o$ ), simulados en el período histórico ( $SPI_m$ ) y en los 3 escenarios RCP estudiados ( $SPI_s$ ) para el modelo NorESM1 (1980-2035). Escala temporal: (a) 3 meses, (b) 12 meses y (c) 24 meses.

En la Figura 4.8 se presentan los  $SPI_o$  y los  $SPI_m$  obtenidos del NorESM1 en el periodo 1980-2005. Se puede observar que los  $SPI_m$  caracterizan 6 eventos húmedos y 3 eventos secos. No obstante, al comparar los  $SPI_m$  con los  $SPI_o$  se establece que coinciden 2 eventos húmedos y ningún evento seco. El modelo identifica el primer evento húmedo moderado en 1986, con una duración promedio de 10 meses en los  $SPI_{3m}$  y  $SPI_{12m}$ . Entre los años 2001-2002 el modelo reconoce el evento húmedo moderado con una duración de 15 meses, aunque no identifica la intensidad que adquiere el evento en el año 2003.

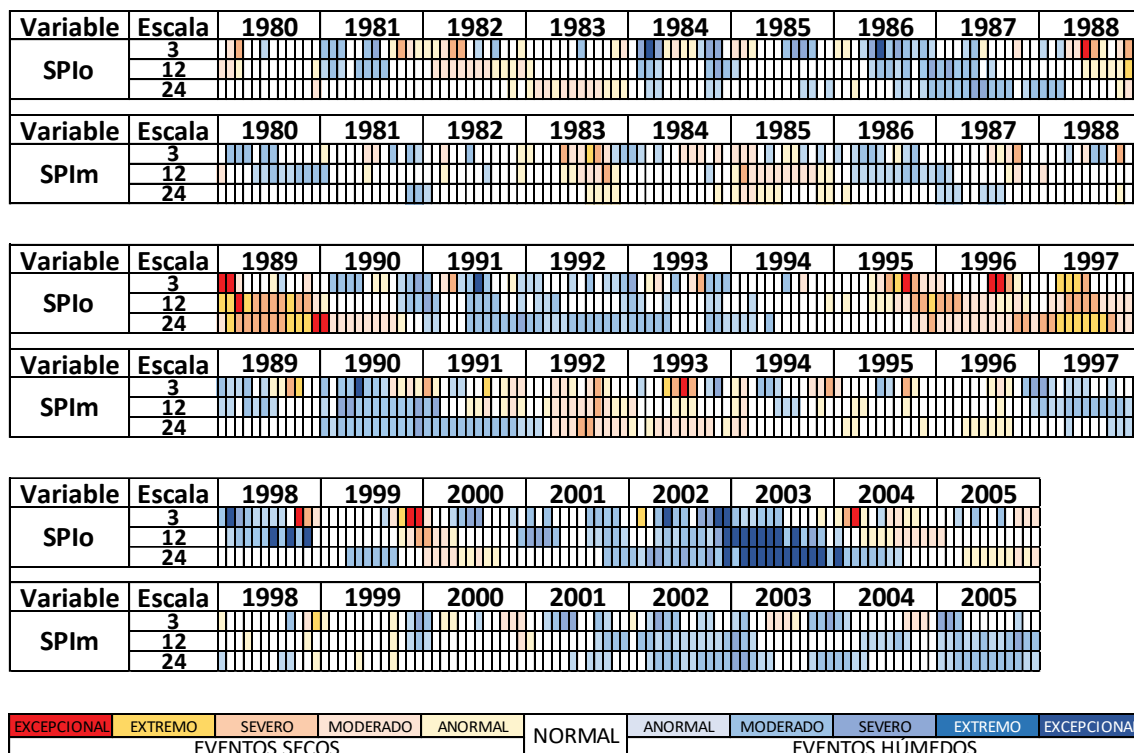


Figura 4.8 Comparación entre el SPI<sub>m</sub> del modelo NorESM1 y el SPI<sub>o</sub> para las escalas temporales de 3, 12 y 24 meses, en el periodo 1980-2005.

La Figura 4.9 muestra los SPI<sub>s</sub> del NorESM1 para los tres escenarios de emisión en el periodo 2006-2035. En el escenario RCP 2.6 se identifican 3 eventos húmedos severos con duraciones superiores a 15 meses y 3 eventos secos extremos con duraciones promedio a 12 meses. Para el escenario RCP 4.5 predominan eventos secos severos en el periodo 2006-2016 que en SPI<sub>24</sub>, la duración se puede prolongar por 60 meses. A partir de 2018 hasta el 2035 se identifican 3 eventos húmedos y 3 eventos secos, ambos de moderados a severos con duraciones promedio de 15 meses. Finalmente, para el escenario de RCP 8.5 se reflejan 5 eventos secos que consiguen a intensidades moderadas a severas de duración inferior a 10 meses, excepto entre los años 2018-2021. Los eventos húmedos principalmente se aprecian en las escalas temporales de 3 y 12 meses, totalizando 5 eventos moderados con duración promedio a 8 meses.

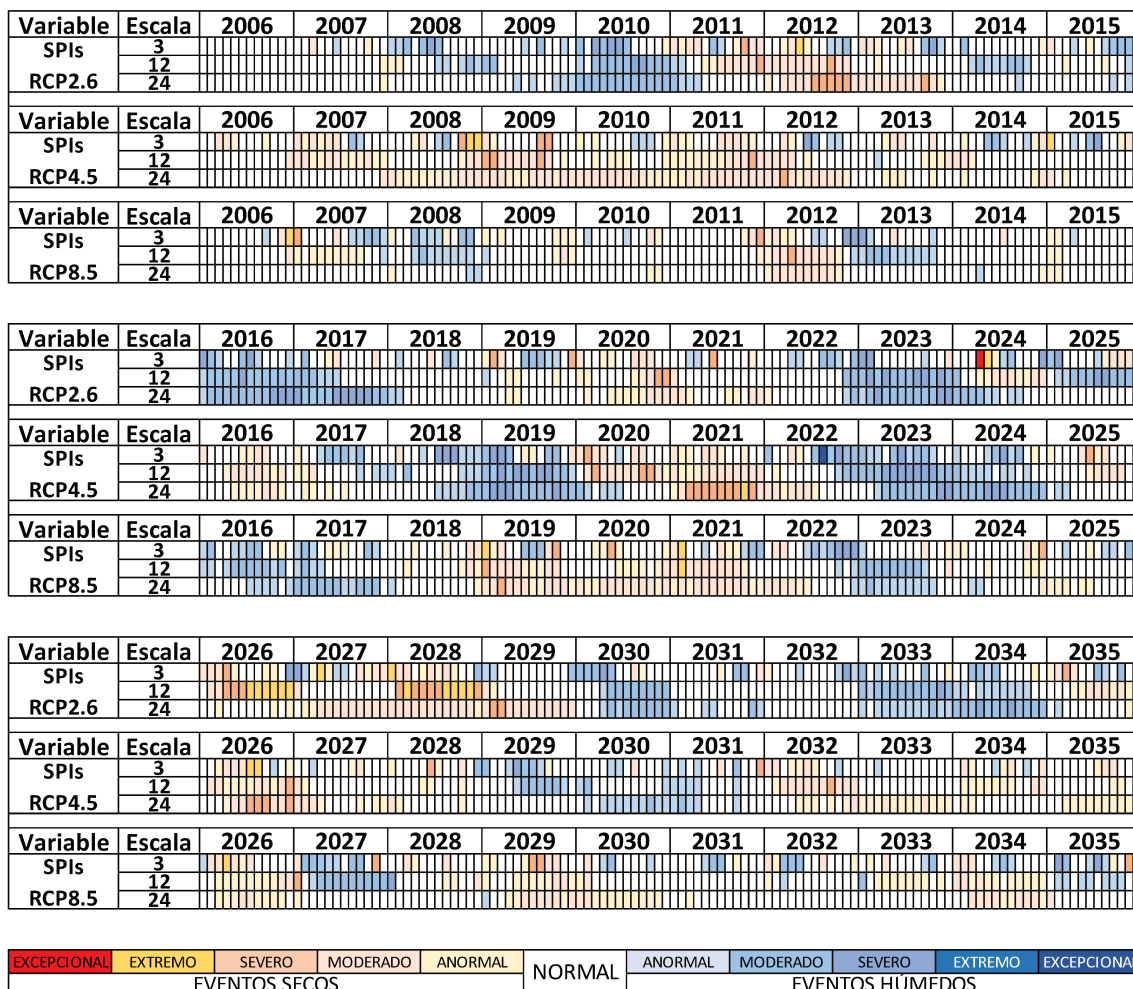


Figura 4.9 SPIs del modelo NorESM1 en los escenarios de emisión RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 para las escalas temporales de 3, 12 y 24 meses, en el periodo 2006-2035.

#### 4.3.4 Modelo INM-CM4

La Figura 4.10 presenta las series temporales de SPI<sub>o</sub> y SPI<sub>m</sub> del modelo INMCM4 el periodo 1980-2005 y el SPI<sub>s</sub> del INM-CM4 para los tres escenarios de emisión en el periodo 2006-2035. Las series temporales de SPI<sub>m</sub> logran un buen ajuste de los eventos extremos observados caracterizados por SPI<sub>o</sub> en las 3 escalas temporales entre los años 1984-1994. Para las proyecciones, los eventos presentan intensidades de severas a extremas para SPI<sub>3s</sub> (Fig. 4.10a). En contraste, para escalas temporales de 12 y 24 meses, se aprecia como en gran parte del periodo los eventos proyectados se muestran en condiciones normales para ambos escenarios.

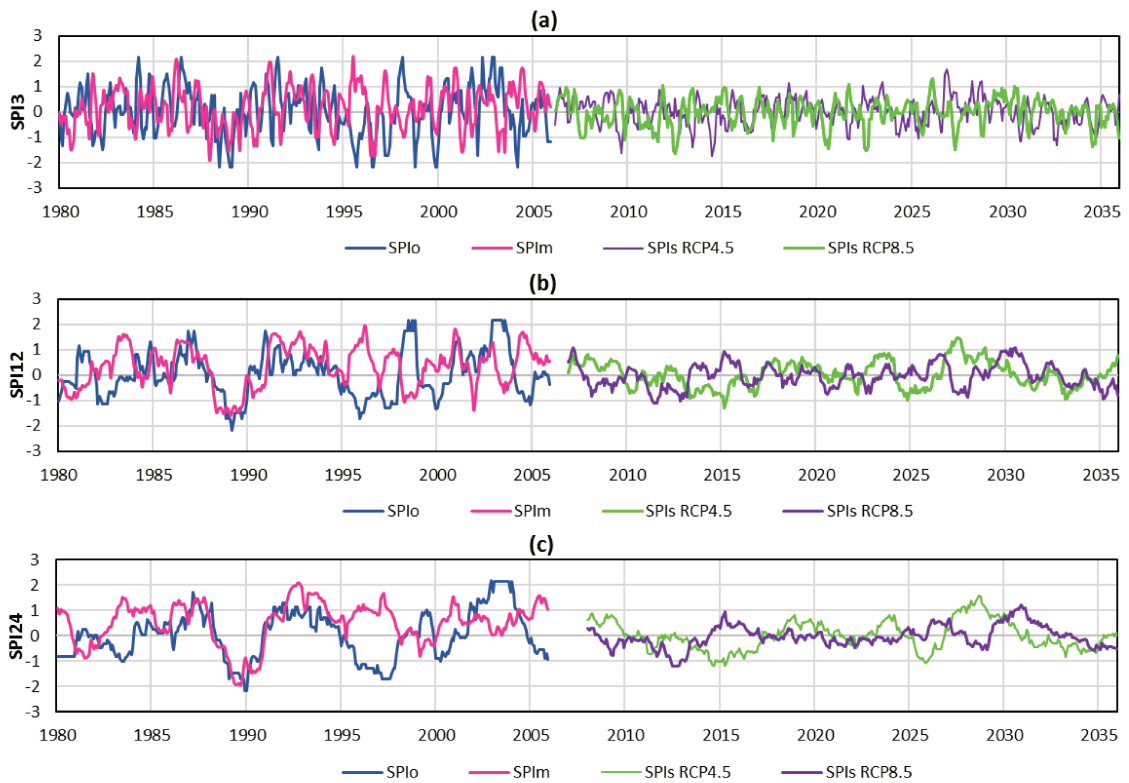


Figura 4.10 Series temporales de los SPI observados ( $SPI_o$ ), simulados en el período histórico ( $SPI_m$ ) y en los 3 escenarios RCP estudiados ( $SPI_s$ ) para el modelo INM-CM4 (1980-2035). Escala temporal: (a) 3 meses, (b) 12 meses y (c) 24 meses.

La Figura 4.11 presenta la duración e intensidad de los eventos extremos representados por los  $SPI_o$  y los  $SPI_m$  simulados por el modelo INM-CM4 en el periodo 1980-2005. Se puede observar que al comparar los  $SPI_m$  con  $SPI_o$  se ajustan 4 eventos húmedos y 1 evento seco, concentrándose principalmente en el periodo 1984-1994. En las 3 escalas temporales analizadas, los  $SPI_m$  identifican el primer evento húmedo en 1983 que se categoriza como extremo con una duración promedio de 20 meses. Entre los años 1986-1987 el modelo reconoce la intensidad del evento húmedo (excepcional) aunque se sobreestima la duración (se prolonga por 20 meses). El tercer evento húmedo se detecta en intervalo 1991-1993, con una duración promedio de 24 meses en las 3 escalas temporales adquiriendo una intensidad excepcional. En los años 2001-2002, los  $SPI_m$  en las escalas temporales analizadas definen este intervalo como 2 eventos húmedos consecutivos que alcanza magnitudes extremas con una duración promedio de 15 meses. Finalmente, el modelo no es capaz de reconocer el evento extremo húmedo excepcional

del año 2004. En cuanto al evento seco detectado, este se observa en los años 1988-1990 donde el  $SPI_o$  se categoriza un evento seco excepcional mientras que  $SPI_m$  predomina como extremo, sin embargo, se ajusta en la duración promedio de 18 meses.

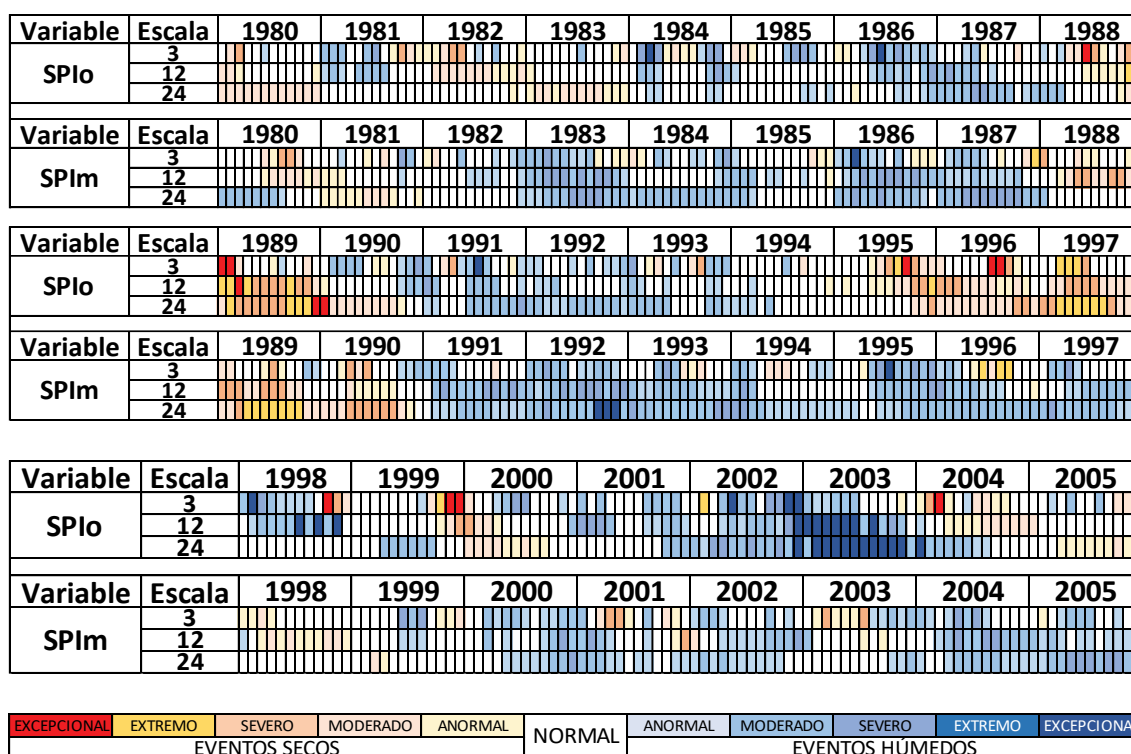


Figura 4.11 Comparación entre el  $SPI_m$  del modelo INM-CM4 y el  $SPI_o$  para las escalas temporales de 3, 12 y 24 meses, en el periodo 1980-2005.

La Figura 4.12 muestra los  $SPI_s$  del modelo INM-CM4 para los escenarios de emisión RCP 4.5 y RCP 8.5 en el nordeste de Argentina para el periodo 2006-2035. Se identifican que los  $SPI_s$  en los periodos 2006- 2025 y 2031-2035 proyectan eventos de corta duración, se categorizan como eventos de moderados a severos y no son apreciados en las 3 escalas temporales analizadas. En el intervalo 2026-2028 resalta para el escenario RCP 4.5 un evento húmedo severo que se extiende por 14 meses.

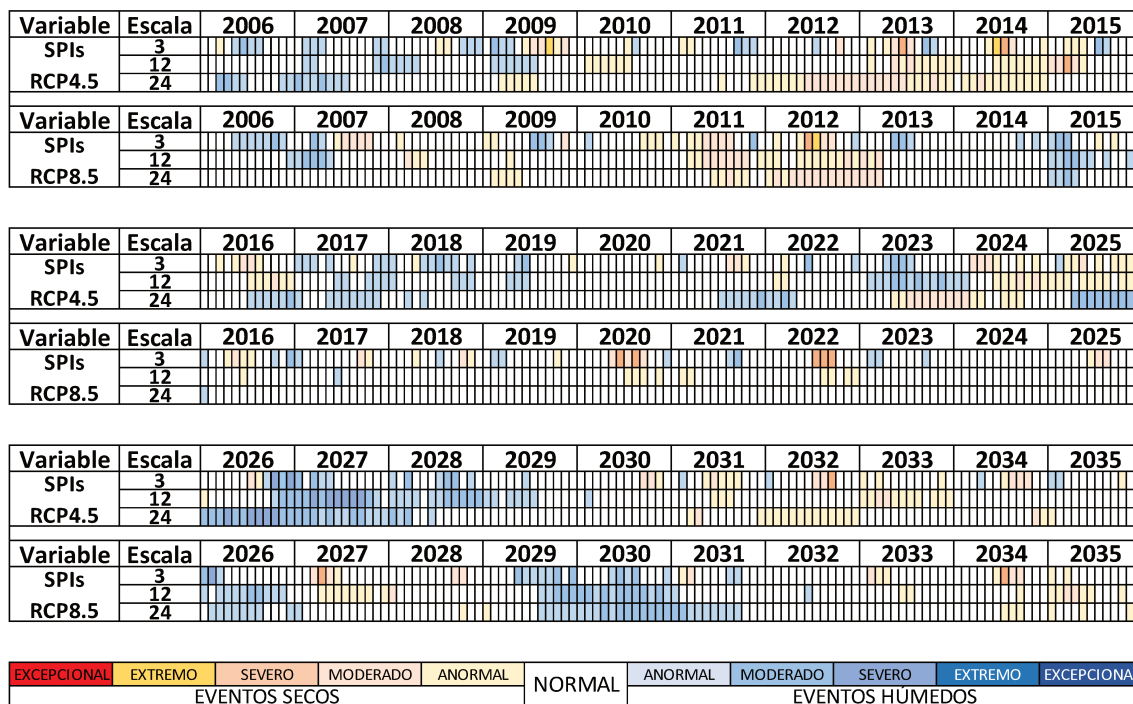


Figura 4.12 SPIs del modelo INM-CM4 en los escenarios de emisiones RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 para las escalas temporales de 3, 12 y 24 meses, en el periodo 2006-2035.

### 4.3.5 Modelo CESM1

La Figura 4.13 muestra las series temporales de SPI<sub>o</sub> y SPI<sub>m</sub> del modelo CESM1 en el periodo 1980-2005 y el SPI<sub>s</sub> del CESM1 para los tres escenarios de emisión entre los años 2006-2035. La comparación en el periodo histórico 1980-2005 indica que el modelo estudiado no es capaz de reconocer los eventos observados en las escalas de 12 y 24 meses (Fig. 4.13b y 4.13c). Desde el año 2006 hasta el 2015, en el escenario de emisión RCP4.5 predominan condiciones húmedas en las escalas temporal de 3 y 12 meses (Fig. 4.13a y 4.13b) y condiciones normales para 24 meses (Fig. 4.13c). Las tres escalas temporales de RCP8.5 en este periodo tienden a mostrar eventos secos de moderados a severos. En los años 2015-2017 y 2023-2026 los escenarios coinciden en las proyecciones de eventos, categorizados de severos a extremos.

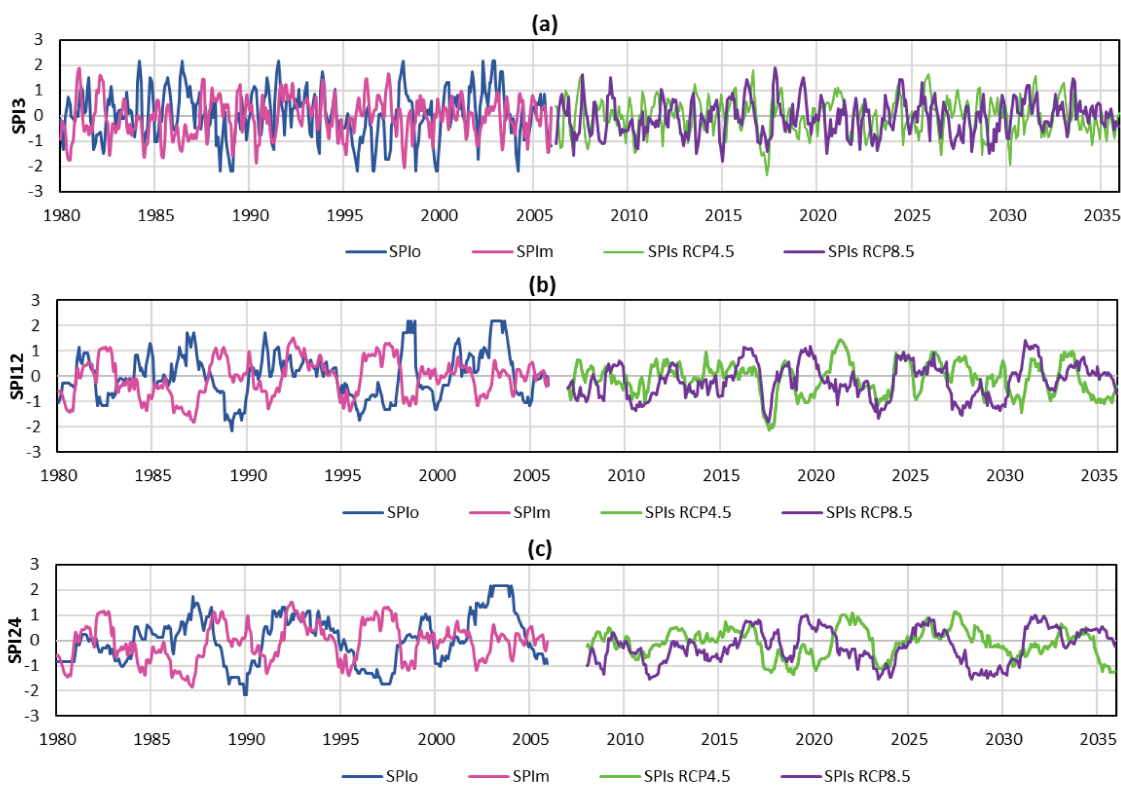


Figura 4.13 Series temporales de los SPI observados ( $SPI_o$ ), simulados en el período histórico ( $SPI_m$ ) y en los 3 escenarios RCP estudiados ( $SPI_s$ ) para el modelo CESM1 (1980-2035). Escala temporal: (a) 3 meses, (b) 12 meses y (c) 24 meses.

La Figura 4.14 presenta la duración e intensidad de los eventos extremos caracterizados por los  $SPI_o$  y los  $SPI_m$  obtenidos del CESM1 en el periodo 1980-2005. Se puede apreciar que los  $SPI_m$  reconocen solo 1 evento húmedo del  $SPI_o$  y no reconocen eventos secos. Este evento húmedo se detecta en el año 1992, y se categoriza como moderado, con una duración promedio de 12 meses, subestimando la duración de  $SPI_o$ .

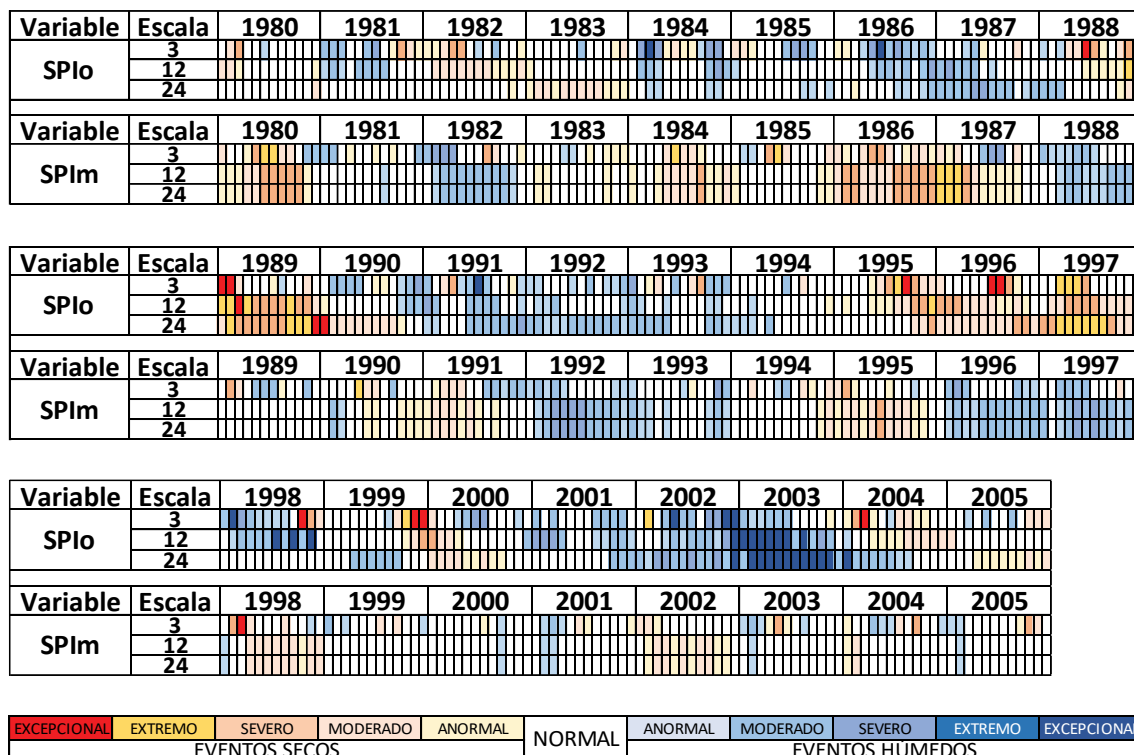


Figura 4.14 Comparación entre el  $SPI_m$  del modelo CESM1 y el  $SPI_o$  para las escalas temporales de 3, 12 y 24 meses, en el periodo 1980-2005.

La Figura 4.15 muestra el  $SPI_s$  del CESM1 para los escenarios de emisión RCP4.5 y RCP 8.5 en el periodo 2006-2035. En el escenario RCP4.5 se puede observar que en el periodo 2006-2016 el modelo representa eventos de corta duración en las escalas de 3 y 12 meses. Entre los años 2017-2035 los eventos proyectados se manifiestan en las 3 escalas temporales analizadas. Se contabilizan 3 eventos húmedos categorizados como severos con una duración promedio de 10 meses y 5 eventos secos, destacando el ocurrido en el año 2017 como un evento de extremo a excepcional de 9 meses. En el escenario RCP 8.5 entre los años 2006-2015 no se definen eventos húmedos. Desde el año 2016 hasta el 2031, se definen 4 eventos húmedos moderados (2016, 2019, 2024 y 2031) con duración promedio de 11 meses. Los  $SPI_s$  indican proyecciones eventos secos de moderados a severos en los años 2008, 2010, 2014, 2023 y 2027-2029, este último su duración supera los 30 meses.



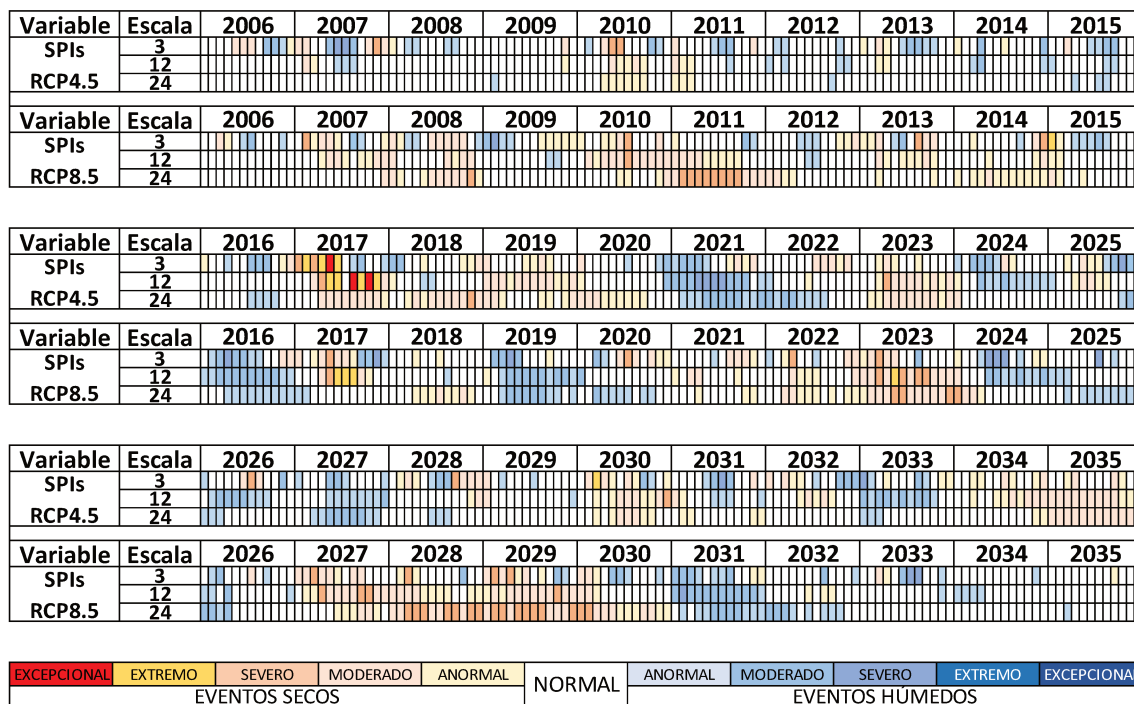


Figura 4.15 SPI<sub>s</sub> del modelo CESM1 en los escenarios de emisión RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 para las escalas temporales de 3, 12 y 24 meses, en el periodo 2006-2035.

#### 4.3.6 Ensamble

En las Figuras 4.16, 4.17 y 4.18 se presentan los SPI<sub>e</sub> para las escalas temporales de 3, 12 y 24 meses respectivamente en el periodo 1980-2035. De acuerdo a los resultados en el periodo 1980-2005, los rangos de SPI<sub>e</sub> se ajustan a los de SPI<sub>o</sub>. Entre los años 1981-1991 y 1998-2003 los SPI<sub>e</sub> indican que prevalecen condiciones normales (Fig.4.16) en la escala temporal de 3 meses. En las escalas temporales 12 y 24 meses (Fig. 4.17 y 4.18), los SPI<sub>e</sub> identifican el evento húmedo moderado entre 1992 -1993. Luego, no son capaces de reconocer los eventos secos de magnitud superior a anormal. En el periodo 2006-2035, los SPI<sub>s</sub> en los 3 escenarios de emisión muestran una baja variabilidad temporal, propia del ensamble multimodelo. Por ende, el ensamble no es capaz de identificar condiciones extremas. Las series temporales oscilan en categorías anormales.

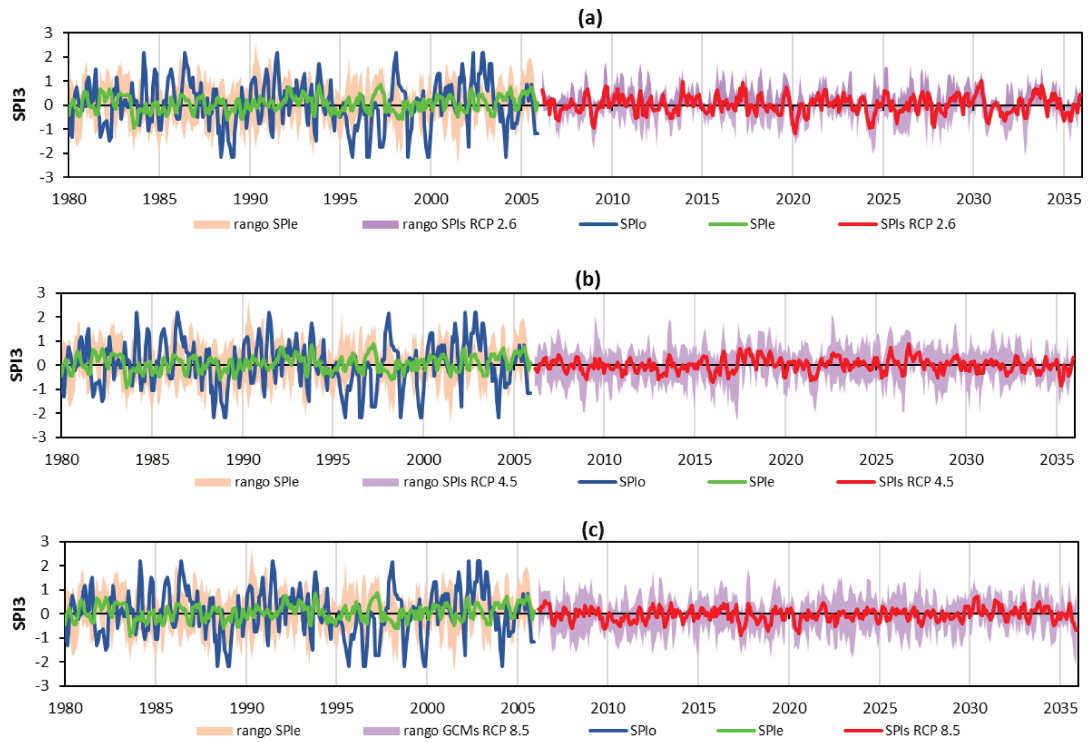


Figura 4.16 Series temporales de SPI3 en el periodo 1980-2035. Línea azul:  $SPI_o$  (1980-2005). Línea verde:  $SPI_e$  (1980-2005). Línea roja:  $SPI_s$  (2006-2035) para los escenarios de emisión: (a) RCP 2.6. (b) RCP 4.5 y (c) RCP 8.5.

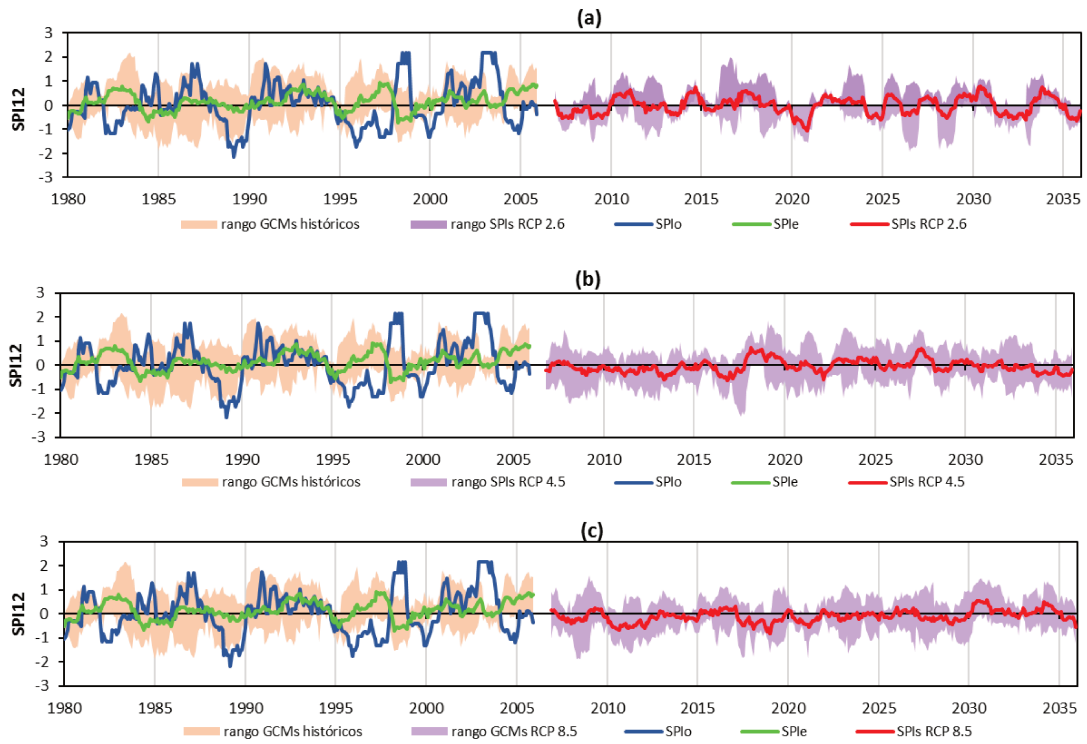


Figura 4.17 Series temporales de SPI12 en el periodo 1980-2035. Línea azul: SPI<sub>o</sub> (1980-2005). Línea verde: SPI<sub>e</sub> (1980-2005). Línea roja: SPI<sub>s</sub> (2006-2035) para los escenarios de emisión: (a) RCP 2.6. (b) RCP 4.5 y (c) RCP 8.5.

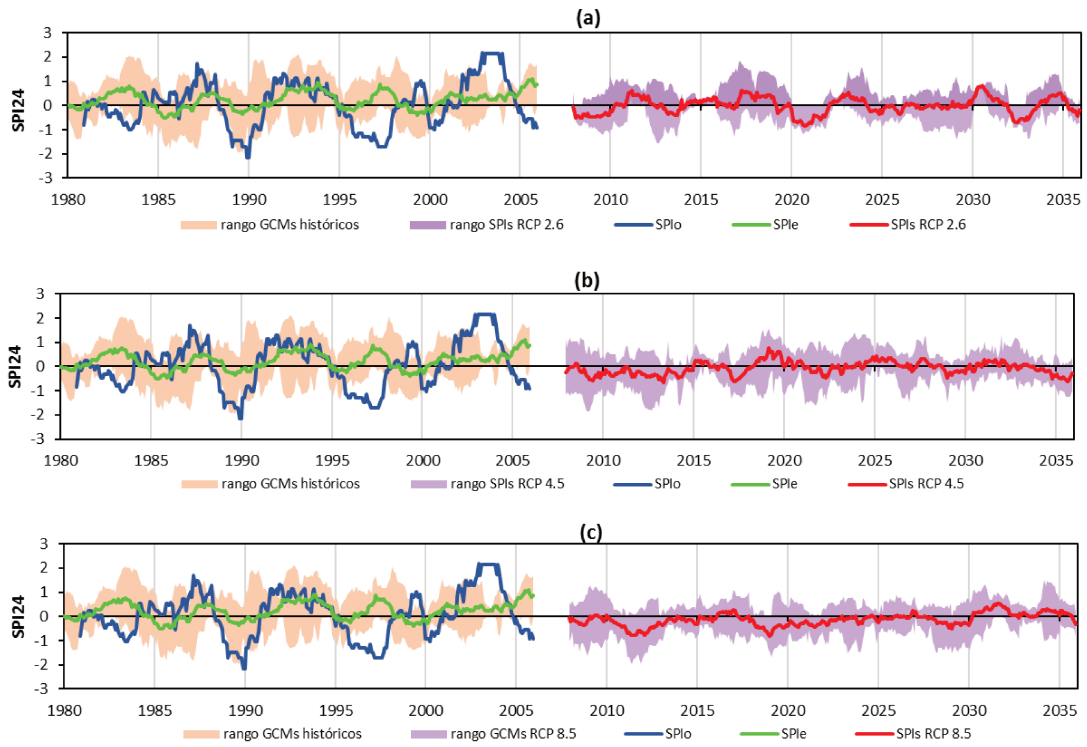


Figura 4.18 Series temporales de SPI24 en el periodo 1980-2035. Línea azul: SPI<sub>o</sub> (1980-2005). Línea verde: SPI<sub>e</sub> (1980-2005). Línea roja: SPI<sub>s</sub> (2006-2035) para los escenarios de emisión: (a) RCP 2.6. (b) RCP 4.5 y (c) RCP 8.5

En la Figura 4.19 se comparan los SPI<sub>o</sub> con los SPI<sub>e</sub> en el periodo histórico 1980-2005. Como se explicó anteriormente, los ensambles multimodelos reducen la variabilidad temporal y, por lo tanto, tienen dificultades para representar los eventos extremos. Por lo consiguiente, en los SPI<sub>e</sub> prevalecen condiciones normales a lo largo del periodo de estudio. Se identifica el evento húmedo 1992-1993, donde es categorizado como evento moderado con una duración aproximada de 20 meses.

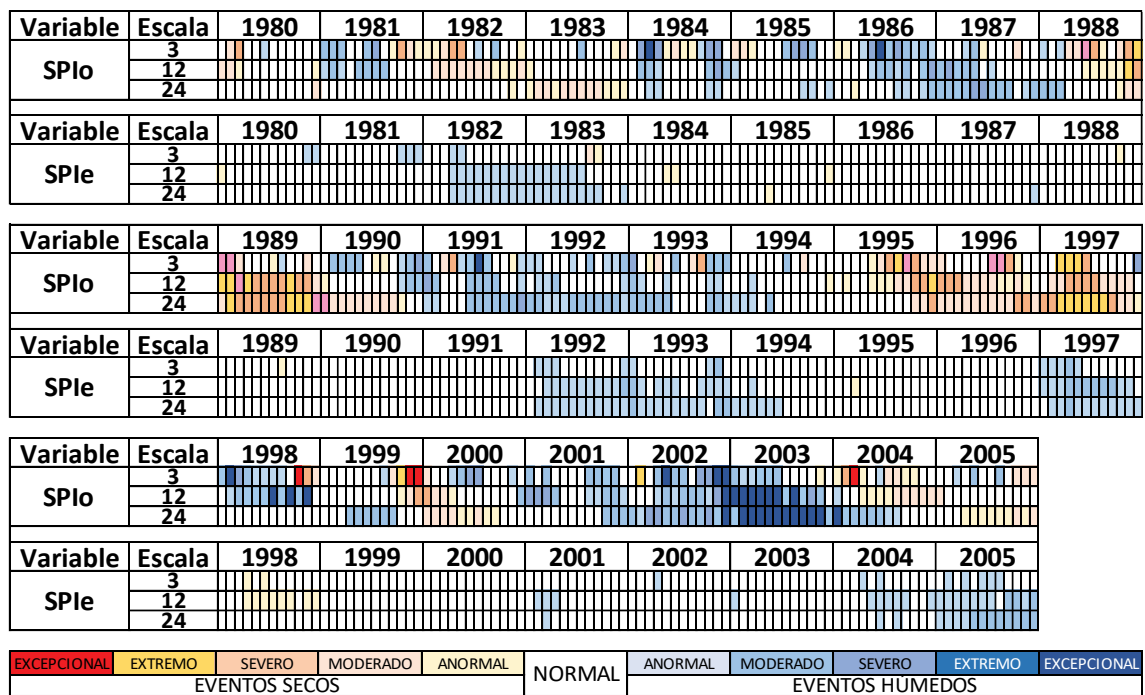


Figura 4.19 Comparación entre el SPI<sub>m</sub> del ensamble multimodelo y el SPI<sub>o</sub> para las escalas temporales de 3, 12 y 24 meses, en el periodo 1980-2005.

La Figura 4.20 muestra el SPI<sub>s</sub> del ensamble para los tres escenarios de emisión en el periodo 2006-2035. En el escenario RCP 2.6 se identifican 2 eventos húmedos (2017 y 2030) con intensidad moderada con duraciones de 6 meses y un evento seco (2020) de moderado que proyecta una duración de 12 meses. Para los escenarios RCP4.5 y RCP 8.5 se identifican posibles periodos húmedos o con déficit, no obstante, no se reconocen en las 3 escalas temporales y en magnitudes significativas (anormal) por periodos prolongados; es decir, se indica que en promedio ocurrirán eventos normales.

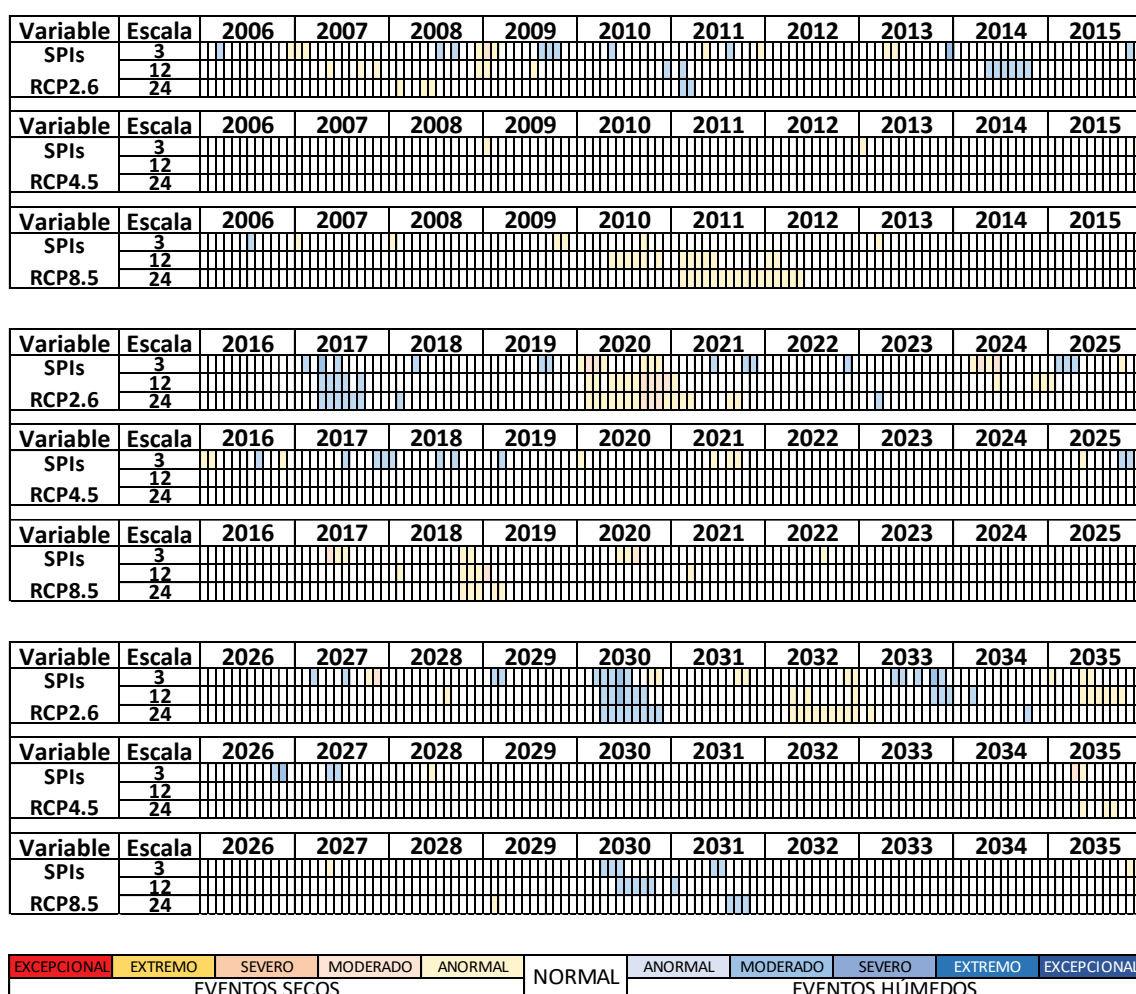


Figura 4.20 SPI<sub>s</sub> del ensamble multimodelo en los escenarios de emisión RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 para las escalas temporales de 3, 12 y 24 meses, en el periodo 2006-2035.

## 4.4 Conclusiones

En este capítulo se analizaron las características de los eventos extremos de precipitación (duración e intensidad) en el nordeste de Argentina, mediante el índice de precipitación estandarizado (SPI). Se compararon los índices obtenidos a partir de datos observados ( $SPI_o$ ) y simulaciones provenientes de los MCG seleccionados ( $SPI_m$ ) y su ensamble ( $SPI_e$ ) para el periodo histórico 1980-2005. Por medio de proyecciones, se caracterizaron los eventos extremos de precipitación en los escenarios de emisiones RCP 2.6, RCP 4.5 y RCP 8.5 en el periodo 2006-2035

Los hallazgos de este capítulo muestran que los MCG utilizados son capaces de reconocer adecuadamente la mayor parte de los eventos húmedos históricos observados, aunque subestimando su intensidad y duración. Por otro parte, los MCGs presentan dificultades para identificar eventos de sequías ocurridas entre 1980 y 2005. Los modelos con mayor habilidad para reconocer los eventos extremos históricos observados han sido el CanESM2, el CCSM4 y el INM-CM4. El ensamble de los modelos reduce la variabilidad de las series temporales dificultando la representación de eventos extremos de precipitación.

Las proyecciones no son reproducidas adecuadamente por los modelos. Se asume que, si las simulaciones históricas subestiman la intensidad y duración de los eventos extremos, lo mismo ocurrirá con las simulaciones futuras.

Dada la alta inconsistencia tanto en la duración como en la intensidad y la cantidad de eventos en las simulaciones históricas de los MCG, se puede concluir que los modelos estudiados no tienen una adecuada capacidad para representar los eventos extremos de precipitación en los escenarios analizados. En cambio, los MCGs pueden reconocer las tendencias medias del clima y son la herramienta más eficiente en la actualidad para el estudio de los escenarios climáticos futuros. La comunidad científica está desarrollando una nueva línea de MCGs (CMIP6, Eyring et al., 2016) en los que se busca mayor eficiencia en la representación de extremos, aun teniendo en cuenta las limitaciones propias de los MCG en cuanto a las parametrizaciones adecuadas de la variable precipitación.

## 4.5 Referencias Bibliográficas

- Barros, V. R., & Doyle, M. E. (2018). Low-level circulation and precipitation simulated by CMIP5 GCMS over southeastern South America. *International Journal of Climatology*, 38(15), 5476-5490. <https://doi.org/10.1002/joc.5740>.
- Barros, V. R., Doyle, M. E., & Camilloni, I. A. (2008). Precipitation trends in southeastern South America: relationship with ENSO phases and with low-level circulation. *Theoretical and Applied Climatology*, 93(1-2), 19-33. <https://doi.org/10.1007/s00704-007-0329-x>.
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, GA, Senior, CA, Stevens, B., & Stouffer, RJ. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, European Geosciences Union, 9, 1937-1958. doi: 10.5194 / gmd-9-1937-2016
- Gulizia, C., & Camilloni, I. (2014). Comparative analysis of the ability of a set of CMIP3 and CMIP5 global climate models to represent precipitation in South America. *International Journal of Climatology*, 35(4), 583-595. doi: 10.1002/joc.4005.
- IPCC. (2013). Summary for policymakers. En Stocker, T., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., y Midgley, P., editores, *Climate Change 2013 the Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., Van Vuuren, D. P., ... & Meehl, G. A. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282), 747-756. <https://doi.org/10.1038/nature08823>.
- Lovino, M. A., Müller, O. V., Berbery, E. H., & Müller, G. V. (2018a). How have daily climate extremes changed in the recent past over northeastern Argentina?. *Global and Planetary Change*, 168, 78-97. doi: <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.06.008>.
- Lovino, M. A., Müller, O. V., Berbery, E. H., & Müller, G. V., (2018b): Evaluation of CMIP5 retrospective simulations of temperature and precipitation in northeastern Argentina. *Int. J. Climatol*, 38: e1158-e1175. doi:10.1002/joc.5441
- Re, M., & Barros, V. R. (2009). Extreme rainfalls in se South America. *Climatic Change*, 96(1-2), 119-136. <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9619-x>
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J., & Meehl, G. A. (2012). An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(4), 485-498. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>.
- Vera, C. S., & Díaz, L. (2015). Anthropogenic influence on summer precipitation trends over South America in CMIP5 models. *International Journal of Climatology*, 35(10), 3172-3177. <https://doi.org/10.1002/joc.4153>.



## Capítulo 5: Conclusiones generales

En esta investigación se analizó la variabilidad espacio-temporal y se detectaron los cambios en el pasado reciente y en el futuro cercano de los eventos extremos de precipitación y sus efectos en los subsistemas zona no saturada y el acuífero libre en la provincia de Santa Fe. La evaluación espacio-temporal de la precipitación del área de estudio se analizó a través de la base de datos de alta resolución GPCC v2018a ya que mostró un mejor ajuste en la precipitación observada con respecto a la base de datos CRU TS4.01. Los análisis locales se realizaron con datos de precipitación observada en 8 estaciones meteorológicas distribuidas en la provincia que cuentan con extensos períodos y escasos datos faltantes.

Los eventos extremos se identificaron a través de índices estandarizados no paramétricos de precipitación (SPI), contenido de humedad de suelo (SSI) y niveles freáticos (SGI) en las escalas temporales de 1, 3, 6, 12, y 24 meses. El promedio areal del SPI y del SSI permitió determinar 9 eventos húmedos y 5 eventos secos en el periodo 1976-2016 en la región de estudio. Entre los eventos más relevantes se encuentra el evento húmedo excepcional entre los años 2000-2003, con una duración promedio de 40 meses y el evento seco excepcional que se prolongó por 12 meses en el periodo 2008-2009. Las simulaciones de humedad del suelo del modelo de superficie Noah mostraron que los niveles inferiores de la zona no saturada del suelo responden a la duración e intensidad de eventos húmedos, aunque la respuesta suele ser más lenta para los eventos secos. La respuesta de la zona no saturada se expresa con una correlación máxima ( $r = 0.81$ ) entre la serie de SPI de 12 meses y la serie de SSI de 6 meses en la capa de 10-40 cm de profundidad. La interacción de los extremos de precipitación con la zona saturada en Rafaela (estación en donde se estudiaron los niveles freáticos) indica que el SGI se retrasa en 10 meses en promedio con respecto al SPI.

Se examinó la variabilidad espacial y temporal de los eventos extremos aplicando un Análisis por Componentes Principales (ACP) y también se identificaron los modos dominantes de variabilidad temporal (tendencias y ciclos oscilatorios) mediante el Análisis Espectral Singular (SSA). La distribución de la correlación espacial de la PC1 con los índices SPI en las escalas temporales de 3, 12 y 24 meses mostró correlaciones positivas superiores a 0.70 en la mayor parte del área de estudio. La correlación máxima

(0.90) se encuentra en el centro de la provincia de Santa Fe. Por otro lado, para el SSI en la escala temporal de 6 meses desde las profundidades de 0-10 cm hasta 40-100 cm se aprecian valores positivos de correlación con un valor máximo de 0.95 en centro de la región. En cuanto a la profundidad de 100-200 cm, difiere del patrón observado en los niveles superiores. Se encuentra que la correlación máxima se presenta en zonas aledañas al cauce del río Paraná y en el noroeste de la región. Los índices SPI y SSI de 3, 6 y 12 meses presentan dos bandas de variabilidad, una con períodos dominantes de  $T \approx 10$  años y otros de alta frecuencia de  $T \approx 2.5 - 4$  años. En cambio, las series de índices estandarizados a 24 meses solo presentan variabilidad temporal en escalas decadal ( $T \approx 10$  años). Se evidenció una tendencia no lineal en los eventos extremos de precipitación en el periodo 1901-2016 que diferencia 2 periodos: entre 1901 y 1970 predominaron eventos extremos secos mientras que entre 1970 y 2016 se incrementó la frecuencia, intensidad y duración de los eventos extremos húmedos. Asimismo, los resultados muestran que, en el período común de datos de precipitación, humedad de suelo y niveles freáticos (1979-2016), no se detectan tendencias no lineales en los índices estandarizados que caracterizan los eventos extremos.

Se identificaron los extremos de precipitación en cortas escalas temporales, incluyendo tormentas intensas en 1 y 5 días y la cantidad de días secos consecutivos, analizando sus cambios históricos y su variabilidad en 8 estaciones meteorológicas a través de 3 índices ETCCDI: cantidad máxima de precipitación en 1 día (Rx1), cantidad máxima de precipitación en 5 días (Rx5), y el número de días secos consecutivos (CDD) para los periodos de registro. Se encontró que los índices Rx1 y Rx5 en el norte y centro del área de estudio presentan una tendencia de aumento a partir de 1960 mientras que al sur permanecen sin variaciones significativas. El índice Rx1 indica que los valores máximos de las tormentas intensas en un día exceden los 150mm. Por su parte, el índice Rx5 registra valores mayores a 300 mm. Por otro lado, el índice CDD para el centro y norte de la provincia de Santa Fe ha ido en ascenso, mientras que al sur no exhibe una tendencia definida.

Se analizó la respuesta en la zona no saturada ante eventos extremos máximos absolutos de precipitación mediante la variación del contenido de humedad (HS) en las mencionadas estaciones representativas del área de estudio. Los eventos de precipitación caracterizados por los índices Rx1, Rx5 y CDD se vieron reflejados en la HS. Ante los

eventos máximos absolutos del índice Rx1, se evidenció un aumento de entre 2.5% y 4% de HS entre 3 y 10 días después. Como respuesta a condiciones secas o eventos aislados previos al máximo absoluto del índice Rx5, la HS tiende a un aumento gradual de 7 a 14 días después del inicio del evento, alcanzando hasta un 18.6%. Por el contrario, ante precipitaciones consecutivas mayores a 20 mm previos al evento máximo absoluto, la HS alcanza su pico máximo antes de la ocurrencia de evento analizado. El índice máximo CDD indica que la HS disminuye entre 1 y 5%.

Se evaluaron las características de los eventos extremos de precipitación simulados por MCGs en escenarios históricos y futuros. Los resultados indican que los MCG utilizados son capaces de reconocer adecuadamente la mayor parte de los eventos húmedos históricos observados, aunque subestiman su intensidad y duración. Los MCGs presentan dificultades para identificar eventos de sequías. Los modelos con mayor habilidad para reconocer los eventos extremos históricos observados son el CanESM2, el CCSM4 y el INM-CM4. El ensamble de los modelos reduce la variabilidad de las series temporales dificultando la representación de eventos extremos de precipitación. Las proyecciones futuras no son reproducidas adecuadamente por los modelos. Se asume que, si las simulaciones históricas subestiman la intensidad y duración de los eventos extremos, lo mismo ocurrirá con las simulaciones futuras. Dada la alta inconsistencia en las simulaciones históricas de los MCG, se puede concluir que los modelos estudiados no tienen una adecuada capacidad para representar los eventos extremos de precipitación en los escenarios analizados.

## Anexos

### Anexo I: Correlación de las series temporales areales de SPI y SSI

|    |             | 1     |              |              |            |             | 3     |              |              |              |              | 6     |              |              |              |              | 12           |              |              |              |              | 24    |          |           |            |             |  |
|----|-------------|-------|--------------|--------------|------------|-------------|-------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------|----------|-----------|------------|-------------|--|
|    |             | SPI   | SSI 0-10     | SSI 10-40    | SSI 40-100 | SSI 100-200 | SPI   | SSI 0-10     | SSI 10-40    | SSI 40-100   | SSI 100-200  | SPI   | SSI 0-10     | SSI 10-40    | SSI 40-100   | SSI 100-200  | SPI          | SSI 0-10     | SSI 10-40    | SSI 40-100   | SSI 100-200  | SPI   | SSI 0-10 | SSI 10-40 | SSI 40-100 | SSI 100-200 |  |
| 1  | SPI         | 1.000 |              |              |            |             |       |              |              |              |              |       |              |              |              |              |              |              |              |              |              |       |          |           |            |             |  |
|    | SSI 0-10    | 0.606 | 1.000        |              |            |             |       |              |              |              |              |       |              |              |              |              |              |              |              |              |              |       |          |           |            |             |  |
|    | SSI 10-40   | 0.493 | 0.963        | 1.000        |            |             |       |              |              |              |              |       |              |              |              |              |              |              |              |              |              |       |          |           |            |             |  |
|    | SSI 40-100  | 0.317 | 0.862        | 0.938        | 1.000      |             |       |              |              |              |              |       |              |              |              |              |              |              |              |              |              |       |          |           |            |             |  |
|    | SSI 100-200 | 0.185 | 0.682        | 0.753        | 0.846      | 1.000       |       |              |              |              |              |       |              |              |              |              |              |              |              |              |              |       |          |           |            |             |  |
| 3  | SPI         | 0.604 | <b>0.767</b> | <b>0.745</b> | 0.657      | 0.472       | 1.000 |              |              |              |              |       |              |              |              |              |              |              |              |              |              |       |          |           |            |             |  |
|    | SSI 0-10    | 0.296 | 0.844        | 0.901        | 0.942      | 0.835       | 0.675 | 1.000        |              |              |              |       |              |              |              |              |              |              |              |              |              |       |          |           |            |             |  |
|    | SSI 10-40   | 0.239 | 0.800        | 0.875        | 0.949      | 0.859       | 0.610 | 0.982        | 1.000        |              |              |       |              |              |              |              |              |              |              |              |              |       |          |           |            |             |  |
|    | SSI 40-100  | 0.157 | 0.709        | 0.795        | 0.915      | 0.888       | 0.478 | 0.920        | 0.959        | 1.000        |              |       |              |              |              |              |              |              |              |              |              |       |          |           |            |             |  |
|    | SSI 100-200 | 0.106 | 0.558        | 0.631        | 0.743      | 0.956       | 0.322 | 0.760        | 0.800        | 0.862        | 1.000        |       |              |              |              |              |              |              |              |              |              |       |          |           |            |             |  |
| 6  | SPI         | 0.419 | 0.755        | 0.791        | 0.793      | 0.680       | 0.706 | <b>0.808</b> | <b>0.793</b> | <b>0.746</b> | <b>0.603</b> | 1.000 |              |              |              |              |              |              |              |              |              |       |          |           |            |             |  |
|    | SSI 0-10    | 0.199 | 0.706        | 0.772        | 0.865      | 0.866       | 0.441 | 0.882        | 0.908        | 0.938        | 0.870        | 0.739 | 1.000        |              |              |              |              |              |              |              |              |       |          |           |            |             |  |
|    | SSI 10-40   | 0.163 | 0.667        | 0.739        | 0.841      | 0.867       | 0.393 | 0.849        | 0.887        | 0.934        | 0.883        | 0.704 | 0.985        | 1.000        |              |              |              |              |              |              |              |       |          |           |            |             |  |
|    | SSI 40-100  | 0.111 | 0.594        | 0.667        | 0.791      | 0.860       | 0.320 | 0.786        | 0.831        | 0.909        | 0.898        | 0.623 | 0.947        | 0.970        | 1.000        |              |              |              |              |              |              |       |          |           |            |             |  |
|    | SSI 100-200 | 0.073 | 0.450        | 0.508        | 0.612      | 0.869       | 0.201 | 0.622        | 0.664        | 0.744        | 0.947        | 0.459 | 0.804        | 0.832        | 0.874        | 1.000        |              |              |              |              |              |       |          |           |            |             |  |
| 12 | SPI         | 0.293 | 0.641        | 0.684        | 0.746      | 0.751       | 0.527 | 0.742        | 0.761        | 0.783        | 0.748        | 0.732 | <b>0.816</b> | <b>0.818</b> | <b>0.815</b> | <b>0.722</b> | 1.000        |              |              |              |              |       |          |           |            |             |  |
|    | SSI 0-10    | 0.120 | 0.517        | 0.573        | 0.670      | 0.787       | 0.267 | 0.669        | 0.704        | 0.762        | 0.836        | 0.464 | 0.832        | 0.851        | 0.881        | 0.881        | 0.775        | 1.000        |              |              |              |       |          |           |            |             |  |
|    | SSI 10-40   | 0.096 | 0.481        | 0.545        | 0.647      | 0.769       | 0.241 | 0.638        | 0.679        | 0.742        | 0.823        | 0.439 | 0.806        | 0.835        | 0.869        | 0.873        | 0.756        | 0.989        | 1.000        |              |              |       |          |           |            |             |  |
|    | SSI 40-100  | 0.058 | 0.408        | 0.467        | 0.583      | 0.735       | 0.161 | 0.570        | 0.612        | 0.696        | 0.807        | 0.368 | 0.756        | 0.787        | 0.845        | 0.873        | 0.701        | 0.965        | 0.975        | 1.000        |              |       |          |           |            |             |  |
|    | SSI 100-200 | 0.055 | 0.304        | 0.349        | 0.430      | 0.708       | 0.115 | 0.427        | 0.458        | 0.529        | 0.787        | 0.253 | 0.595        | 0.624        | 0.683        | 0.890        | 0.576        | 0.851        | 0.856        | 0.882        | 1.000        |       |          |           |            |             |  |
| 24 | SPI         | 0.180 | 0.357        | 0.389        | 0.447      | 0.554       | 0.341 | 0.442        | 0.459        | 0.499        | 0.592        | 0.471 | 0.520        | 0.540        | 0.567        | 0.637        | <b>0.671</b> | <b>0.672</b> | <b>0.681</b> | <b>0.685</b> | <b>0.717</b> | 1.000 |          |           |            |             |  |
|    | SSI 0-10    | 0.084 | 0.322        | 0.365        | 0.446      | 0.600       | 0.186 | 0.432        | 0.453        | 0.515        | 0.653        | 0.297 | 0.551        | 0.575        | 0.614        | 0.721        | 0.500        | 0.768        | 0.780        | 0.796        | 0.837        | 0.827 | 1.000    |           |            |             |  |
|    | SSI 10-40   | 0.069 | 0.290        | 0.335        | 0.418      | 0.572       | 0.169 | 0.402        | 0.426        | 0.490        | 0.627        | 0.276 | 0.523        | 0.553        | 0.593        | 0.696        | 0.476        | 0.745        | 0.764        | 0.779        | 0.817        | 0.818 | 0.990    | 1.000     |            |             |  |
|    | SSI 40-100  | 0.042 | 0.239        | 0.276        | 0.361      | 0.530       | 0.106 | 0.343        | 0.367        | 0.440        | 0.595        | 0.206 | 0.472        | 0.502        | 0.557        | 0.675        | 0.415        | 0.708        | 0.727        | 0.761        | 0.812        | 0.781 | 0.976    | 0.981     | 1.000      |             |  |
|    | SSI 100-200 | 0.034 | 0.132        | 0.156        | 0.212      | 0.454       | 0.056 | 0.206        | 0.223        | 0.277        | 0.522        | 0.109 | 0.306        | 0.332        | 0.383        | 0.619        | 0.272        | 0.535        | 0.544        | 0.576        | 0.789        | 0.674 | 0.859    | 0.857     | 0.880      | 1.000       |  |

Figura A.I.1 Matriz de correlación del comportamiento del SPI y del SSI para las escalas temporales de 1, 3, 6, 12 y 24 meses en el período 1979-2016

## Anexo II: Series temporales SPI y SSI estaciones de la provincia de Santa Fe.

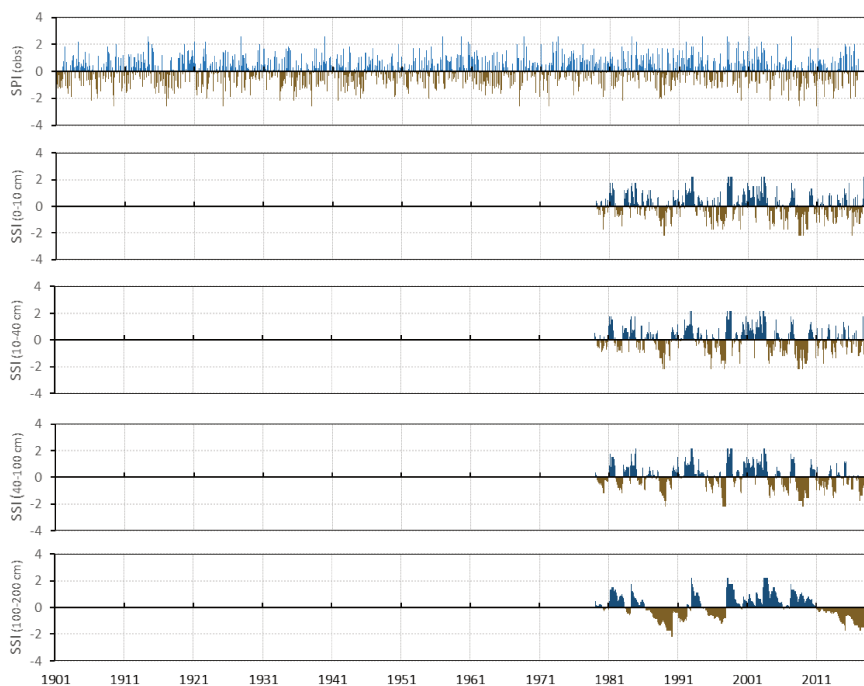


Figura A.II 1 Series temporales para SPI1 en el periodo 1901-2016 (a), y SSI1 (0-10 cm, 10-40 cm, 40-100 cm, 100-200 cm) en el periodo 1979-2016 (b). Estación Ceres

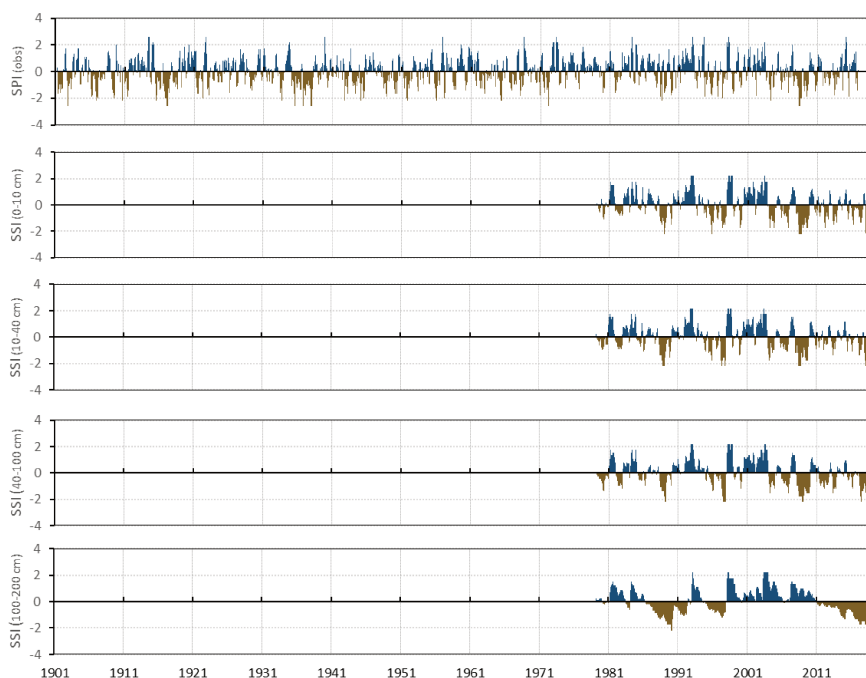


Figura A.II 2 Series temporales para SPI3 en el periodo 1901-2016 (a), y SSI3 (0-10 cm, 10-40 cm, 40-100 cm, 100-200 cm) en el periodo 1979-2016 (b). Estación Ceres

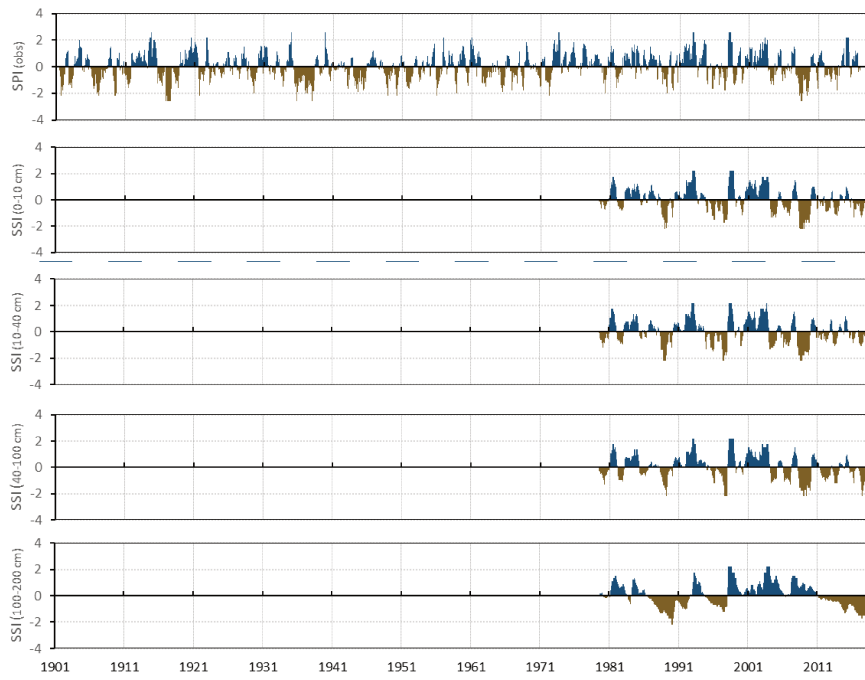


Figura A.II 3 Series temporales para SPI6 en el periodo 1901-2016 (a), y SSI6 (0-10 cm, 10-40 cm, 40-100 cm, 100-200 cm) en el periodo 1979-2016 (b). Estación Ceres

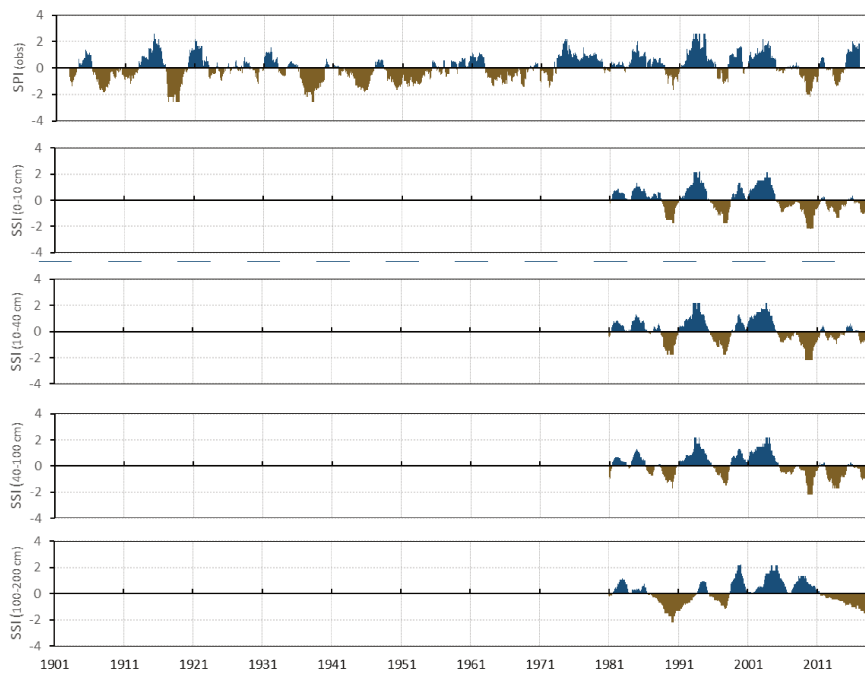


Figura A.II 4 Series temporales para SPI24 en el periodo 1901-2016 (a), y SSI24 (0-10 cm, 10-40 cm, 40-100 cm, 100-200 cm) en el periodo 1979-2016 (b). Estación Ceres

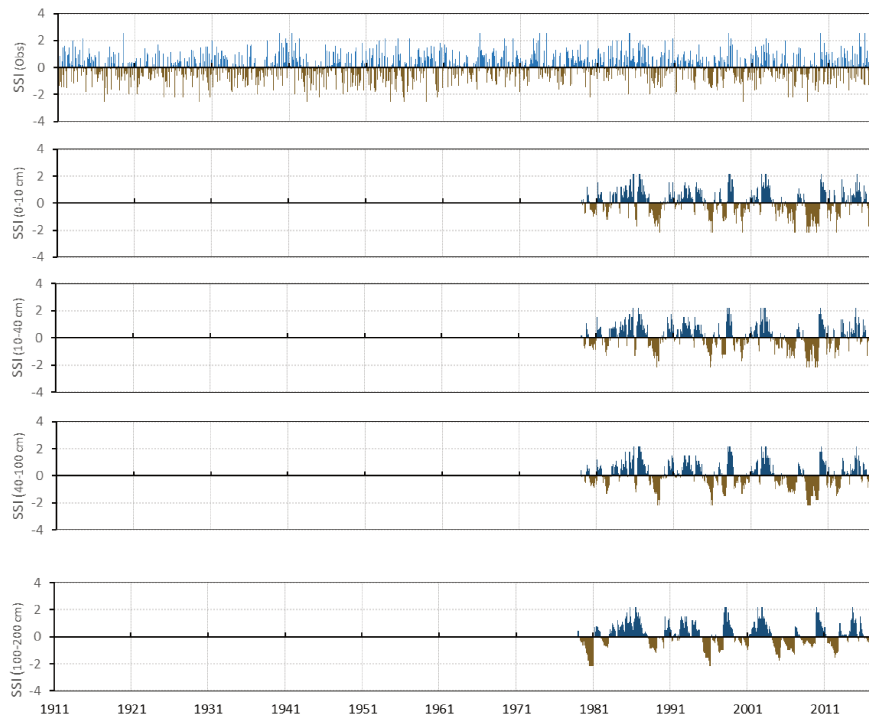


Figura A.II 5 Series temporales para SPI1 en el periodo 1911-2016 (a), y SSI1 (0-10 cm, 10-40 cm, 40-100 cm, 100-200 cm) en el periodo 1979-2016 (b). Estación Reconquista

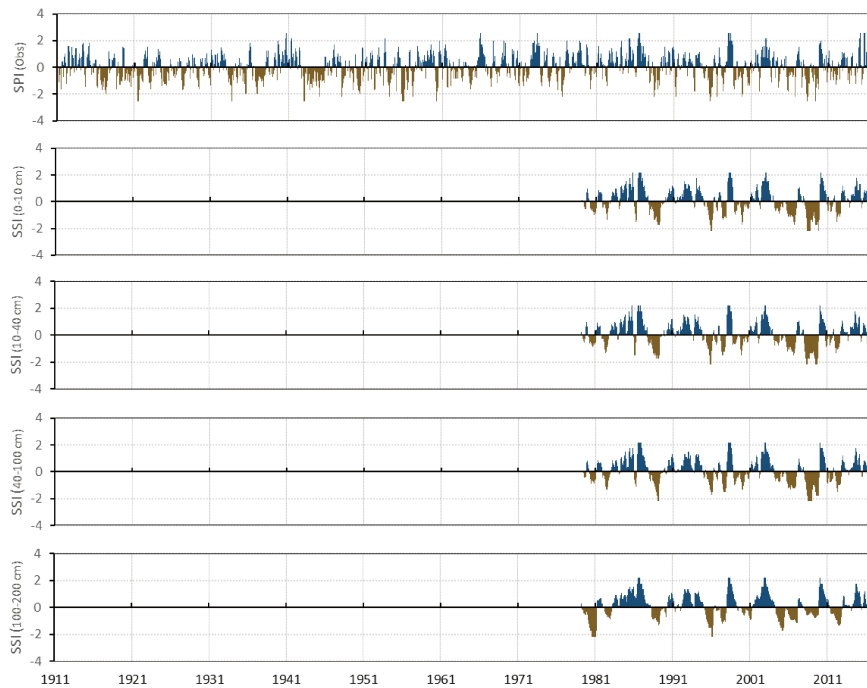


Figura A.II 6 Series temporales para SPI3 en el periodo 1911-2016 (a), y SSI3 (0-10 cm, 10-40 cm, 40-100 cm, 100-200 cm) en el periodo 1979-2016 (b). Estación Reconquista

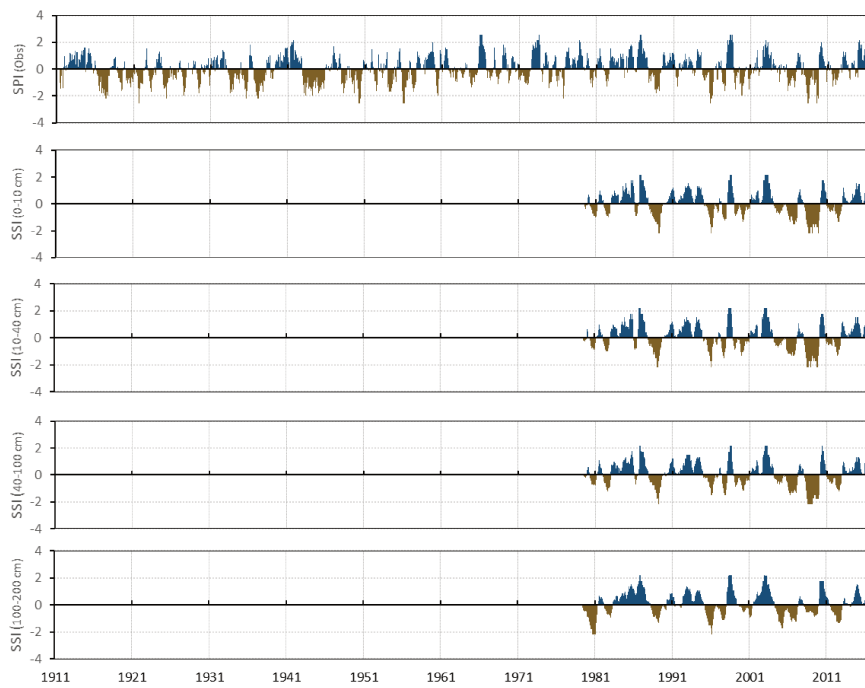


Figura A.II 7 Series temporales para SPI6 en el periodo 1911-2016 (a), y SSI6 (0-10 cm, 10-40 cm, 40-100 cm, 100-200 cm) en el periodo 1979-2016 (b). Estación Reconquista

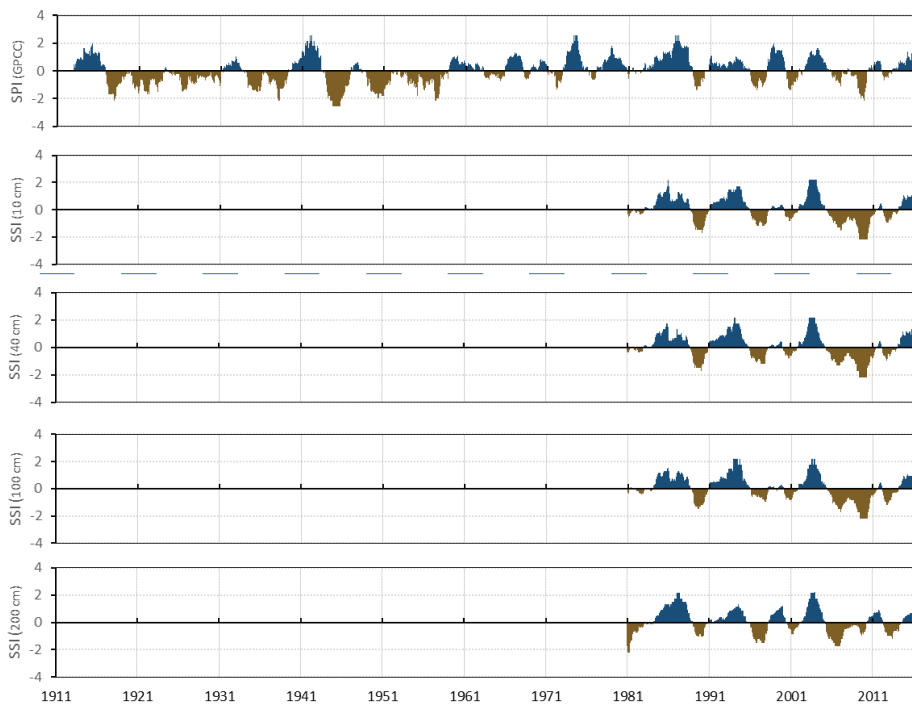


Figura A.II 8 Series temporales para SPI24 en el periodo 1911-2016 (a), y SSI24 (0-10 cm, 10-40 cm, 40-100 cm, 100-200 cm) en el periodo 1979-2016 (b). Estación Reconquista



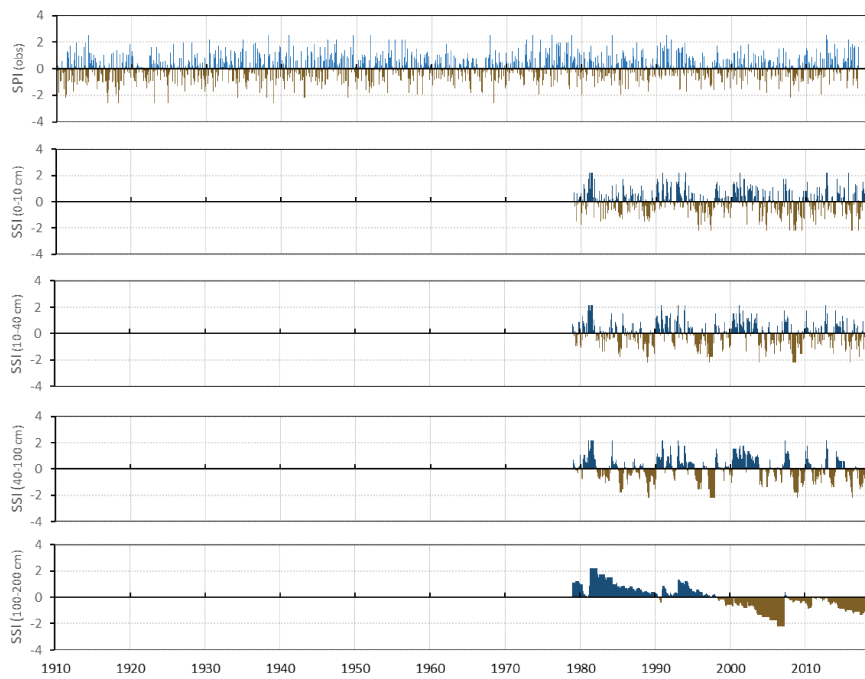


Figura A.II 9 Series temporales para SPI1 en el periodo 1910-2016 (a), y SSI1 (0-10 cm, 10-40 cm, 40-100 cm, 100-200 cm) en el periodo 1979-2016 (b). Estación Marcos Juárez

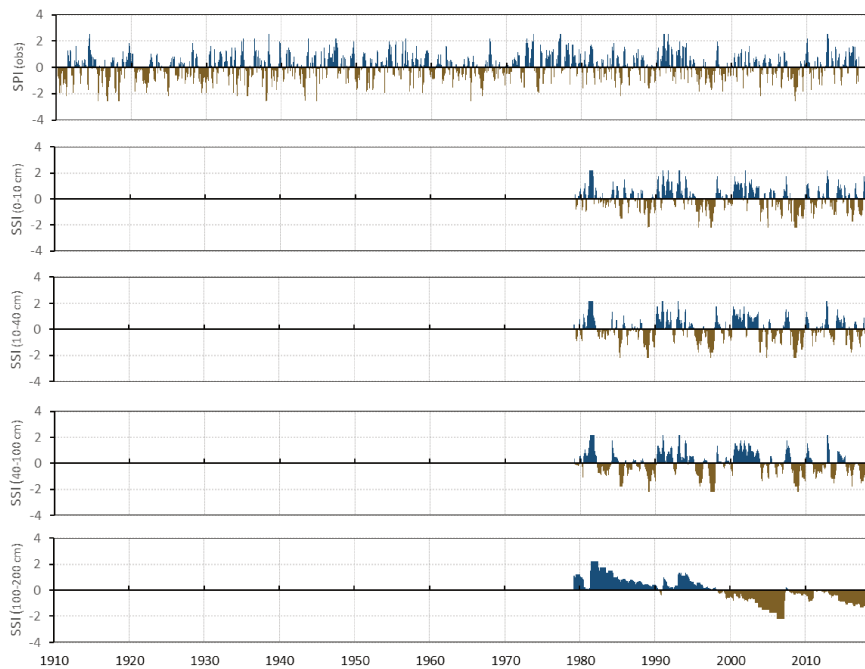


Figura A.II 10 Series temporales para SPI3 en el periodo 1910-2016 (a), y SSI3 (0-10 cm, 10-40 cm, 40-100 cm, 100-200 cm) en el periodo 1979-2016 (b). Estación Marcos Juárez

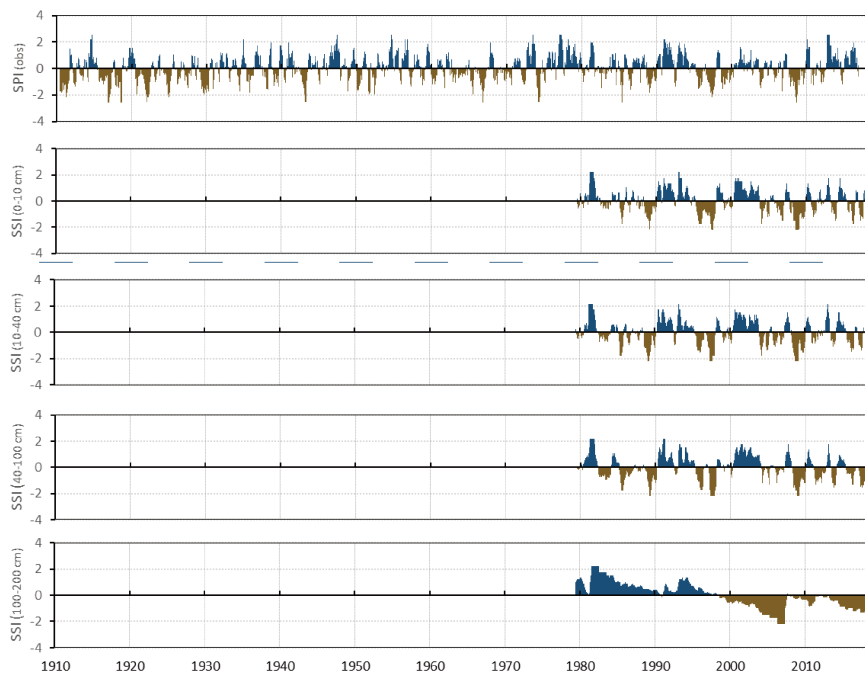


Figura A.II 11 Series temporales para SPI6 en el periodo 1910-2016 (a), y SSI6 (0-10 cm, 10-40 cm, 40-100 cm, 100-200 cm) en el periodo 1979-2016 (b). Estación Marcos Juárez

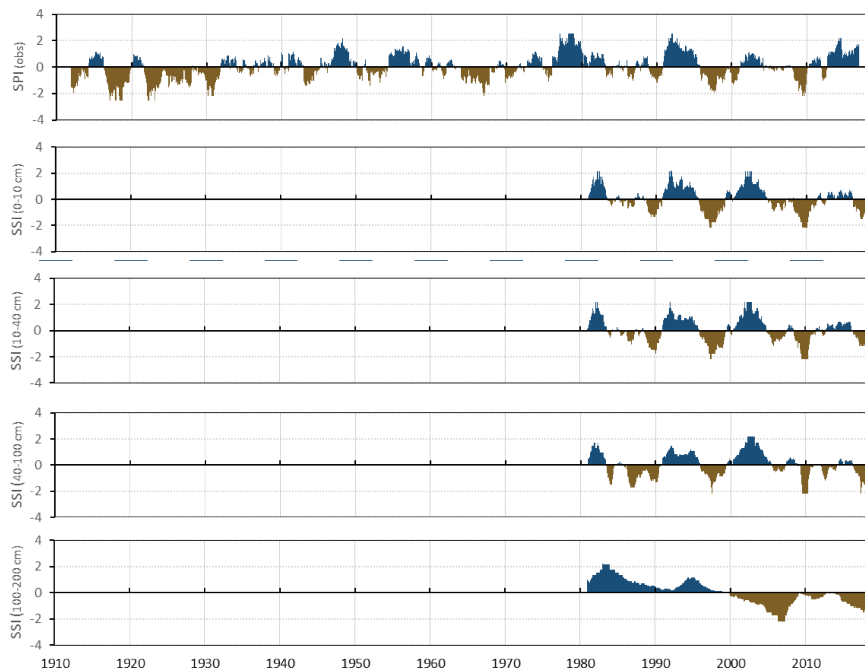


Figura A.II 12 Series temporales para SPI24 en el periodo 1910-2016 (a), y SSI24 (0-10 cm, 10-40 cm, 40-100 cm, 100-200 cm) en el periodo 1979-2016 (b). Estación Marcos Juárez

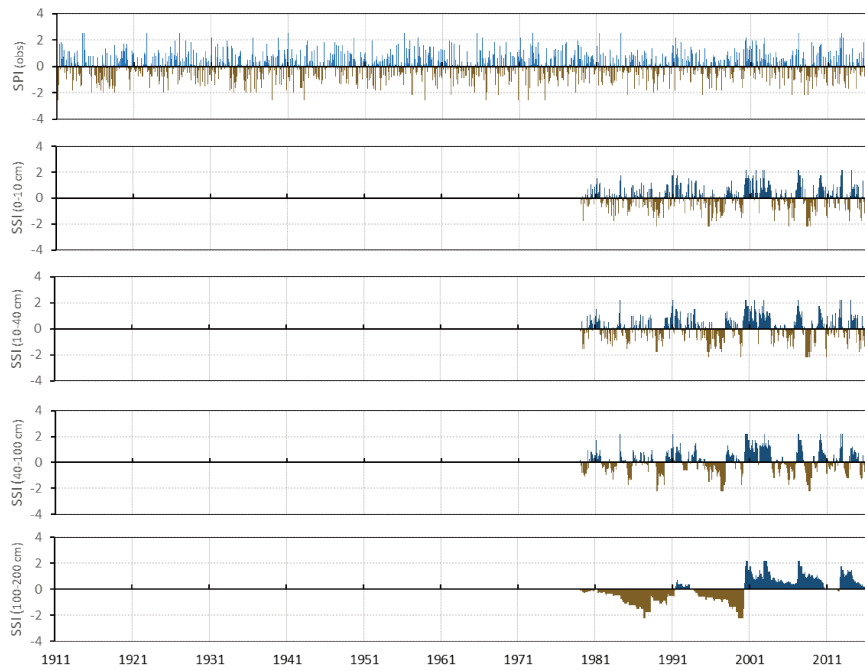


Figura A.II 13 Series temporales para SPI1 en el periodo 1911-2016 (a), y SSI1 (0-10 cm, 10-40 cm, 40-100 cm, 100-200 cm) en el periodo 1979-2016 (b). Estación Rosario

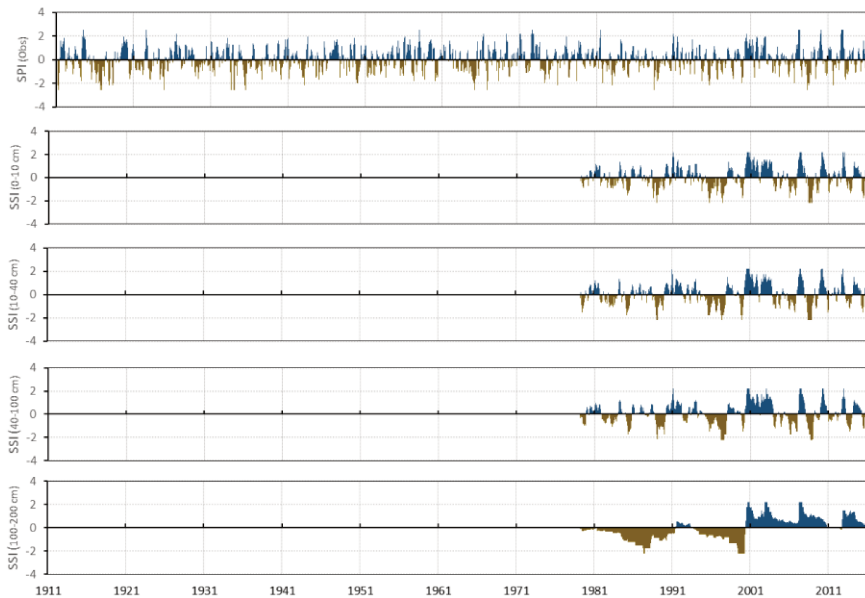


Figura A.II 14 Series temporales para SPI3 en el periodo 1911-2016 (a), y SSI3 (0-10 cm, 10-40 cm, 40-100 cm, 100-200 cm) en el periodo 1979-2016 (b). Estación Rosario

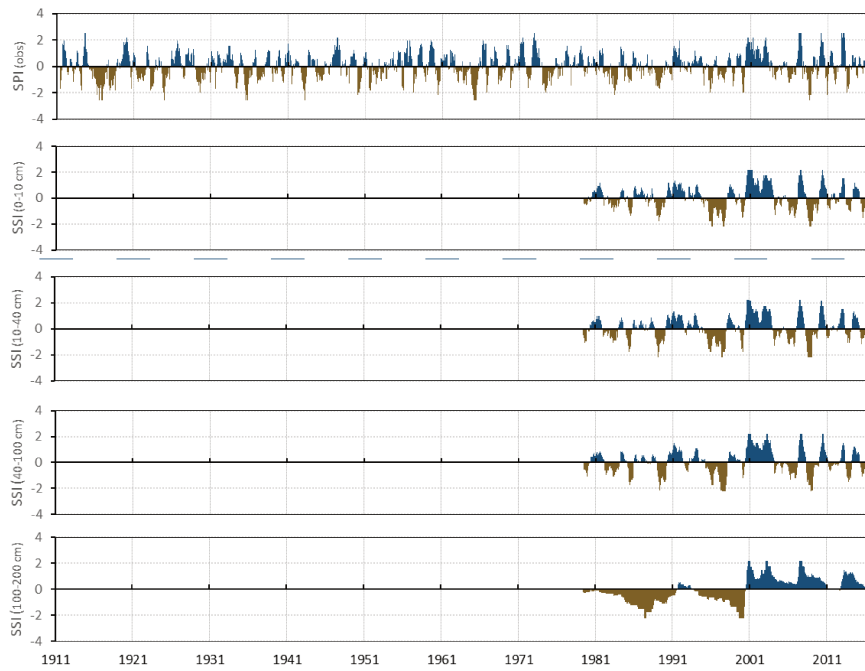


Figura A.II 15 Series temporales para SPI6 en el periodo 1911-2016 (a), y SSI6 (0-10 cm, 10-40 cm, 40-100 cm, 100-200 cm) en el periodo 1979-2016 (b). Estación Rosario

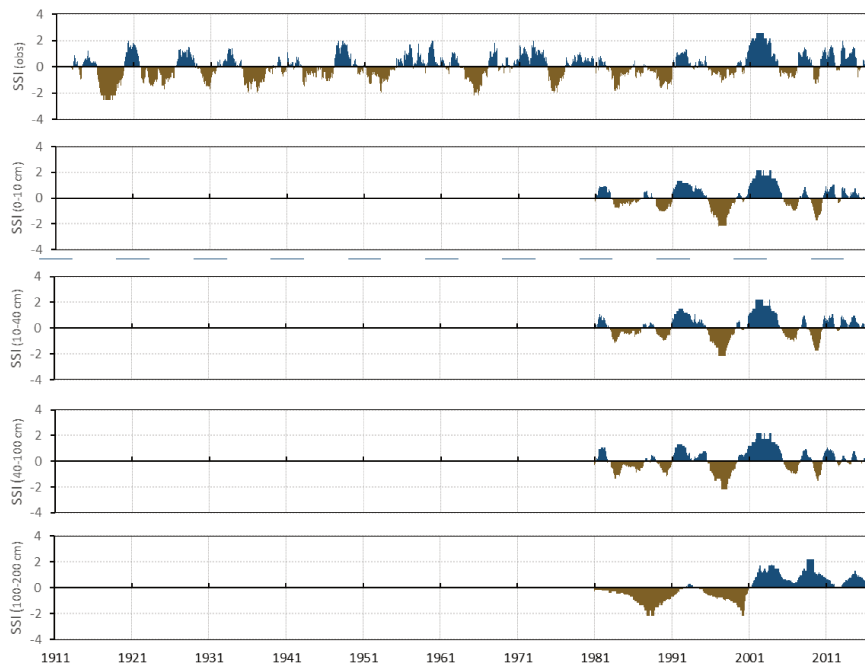


Figura A.II 16 Series temporales para SPI24 en el periodo 1911-2016 (a), y SSI24 (0-10 cm, 10-40 cm, 40-100 cm, 100-200 cm) en el periodo 1979-2016 (b). Estación Rosario

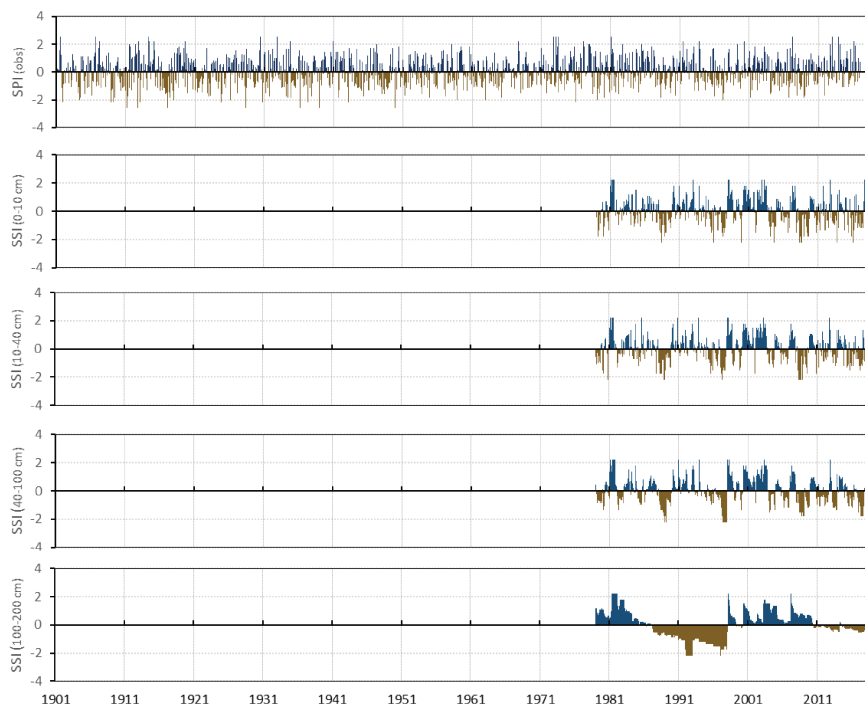


Figura A.II 17 Series temporales para SPI en el periodo 1901-2016 (a), y SSI1 (0-10 cm, 10-40 cm, 40-100 cm, 100-200 cm) en el periodo 1979-2016 (b). Estación Rafaela

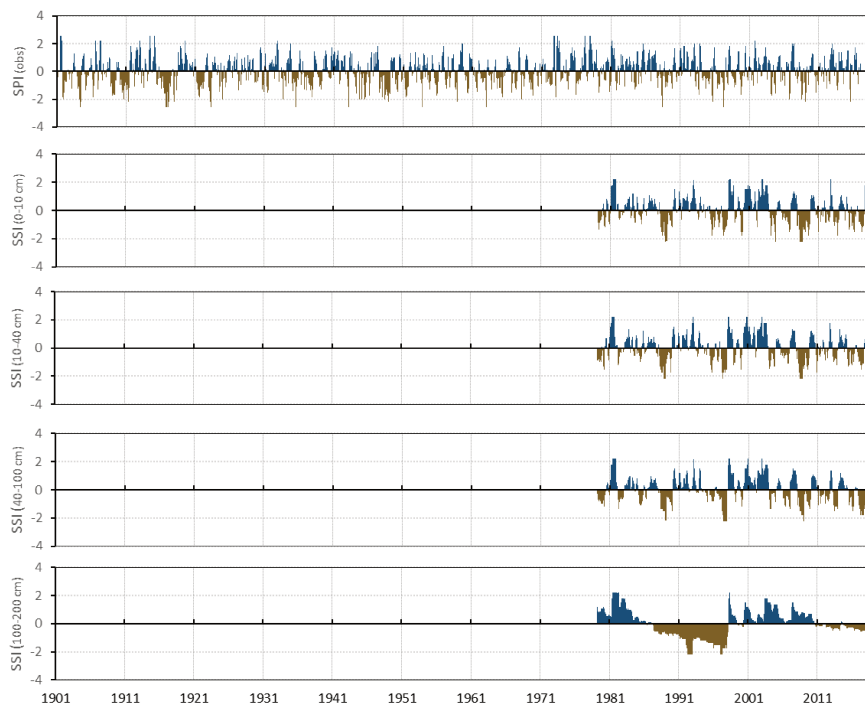


Figura A.II 18 Series temporales para SPI3 en el periodo 1901-2016 (a), y SSI3 (0-10 cm, 10-40 cm, 40-100 cm, 100-200 cm) en el periodo 1979-2016 (b). Estación Rafaela

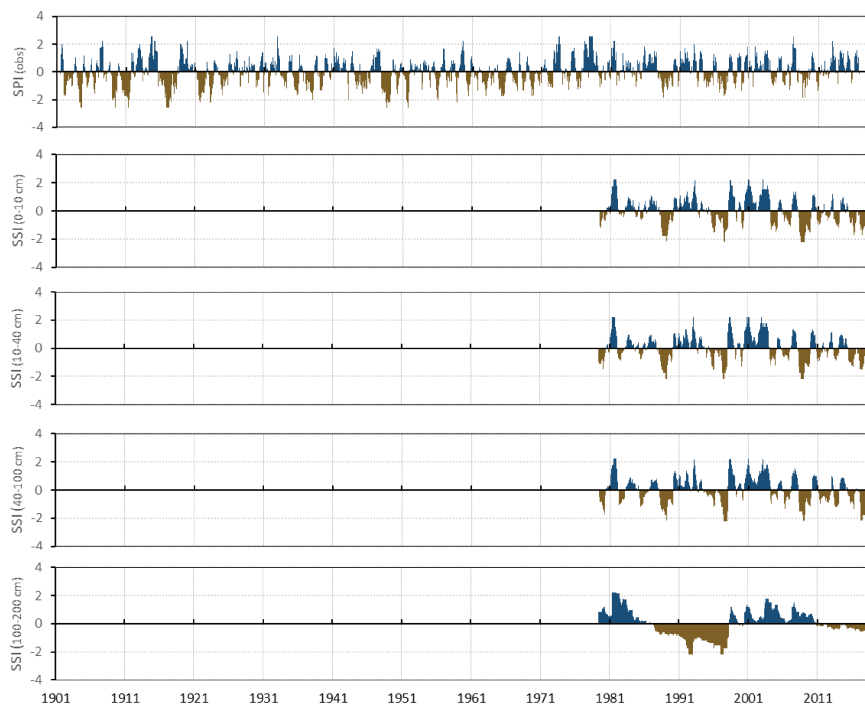


Figura A.II 19 Series temporales para SPI6 en el periodo 1901-2016 (a), y SSI6 (0-10 cm, 10-40 cm, 40-100 cm, 100-200 cm) en el periodo 1979-2016 (b). Estación Rafaela

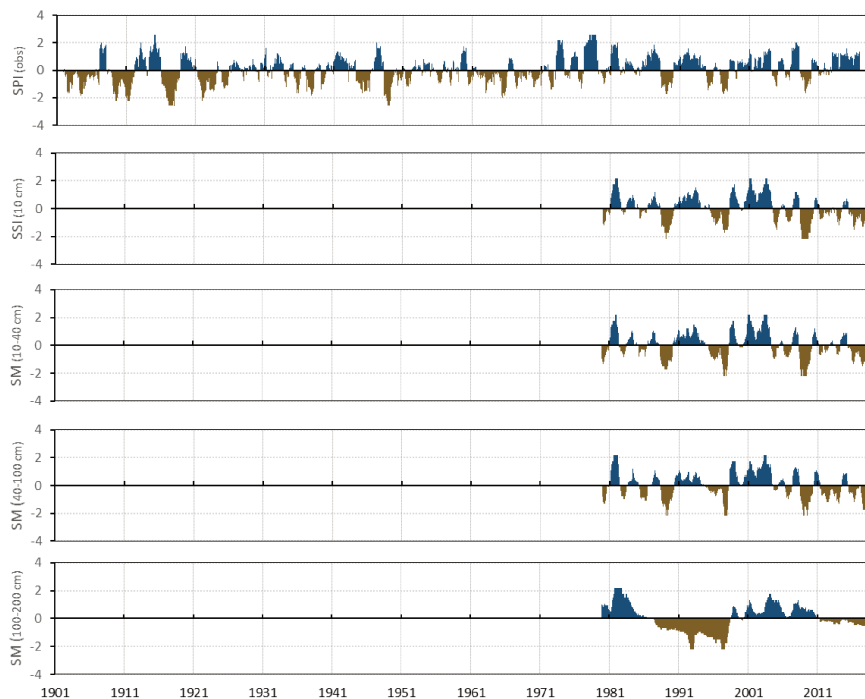


Figura A.II 20 Series temporales para SPI12 en el periodo 1901-2016 (a), y SSI12 (0-10 cm, 10-40 cm, 40-100 cm, 100-200 cm) en el periodo 1979-2016 (b). Estación Rafaela

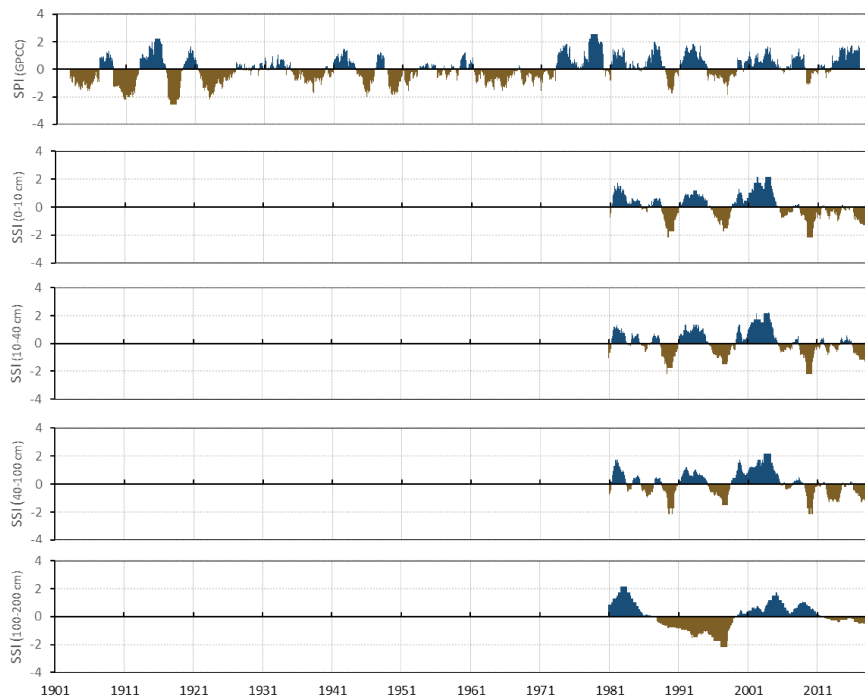


Figura A.II 21 Series temporales para SPI24 en el periodo 1901-2016 (a), y SSI24 (0-10 cm, 10-40 cm, 40-100 cm, 100-200 cm) en el periodo 1979-2016 (b). Estación Rafaela

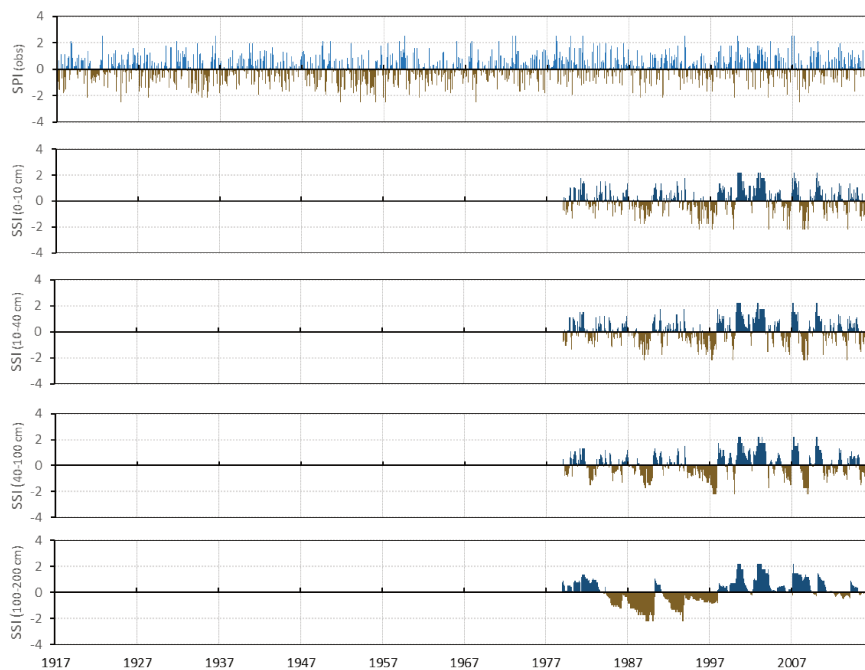


Figura A.II 22 Series temporales para SPI1 en el periodo 1917-2016 (a), y SSI1 (0-10 cm, 10-40 cm, 40-100 cm, 100-200 cm) en el periodo 1979-2016 (b). Estación Paraná

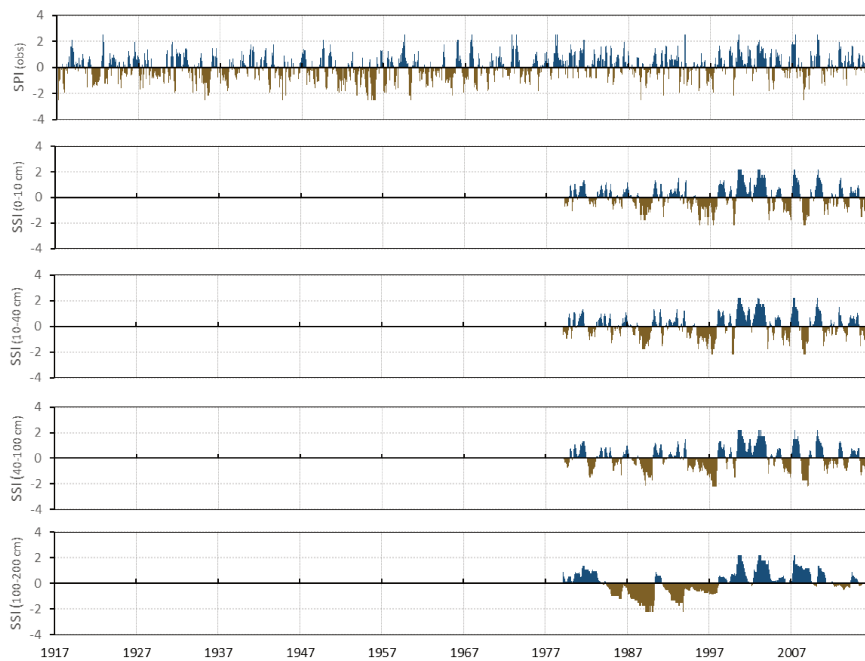


Figura A.II 23 Series temporales para SPI3 en el periodo 1917-2016 (a), y SSI3 (0-10 cm, 10-40 cm, 40-100 cm, 100-200 cm) en el periodo 1979-2016 (b). Estación Paraná

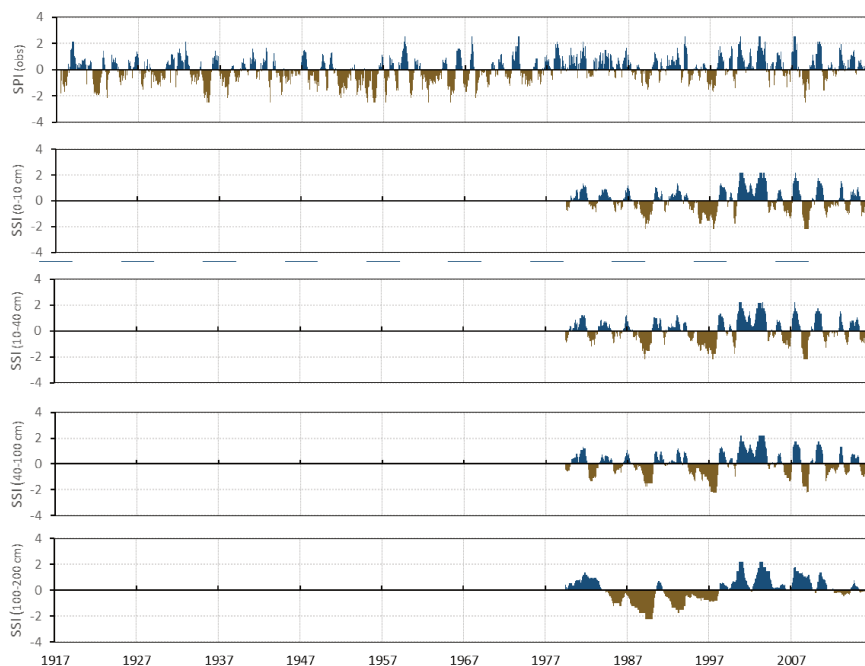


Figura A.II 24 Series temporales para SPI6 en el periodo 1917-2016 (a), y SSI6 (0-10 cm, 10-40 cm, 40-100 cm, 100-200 cm) en el periodo 1979-2016 (b). Estación Paraná



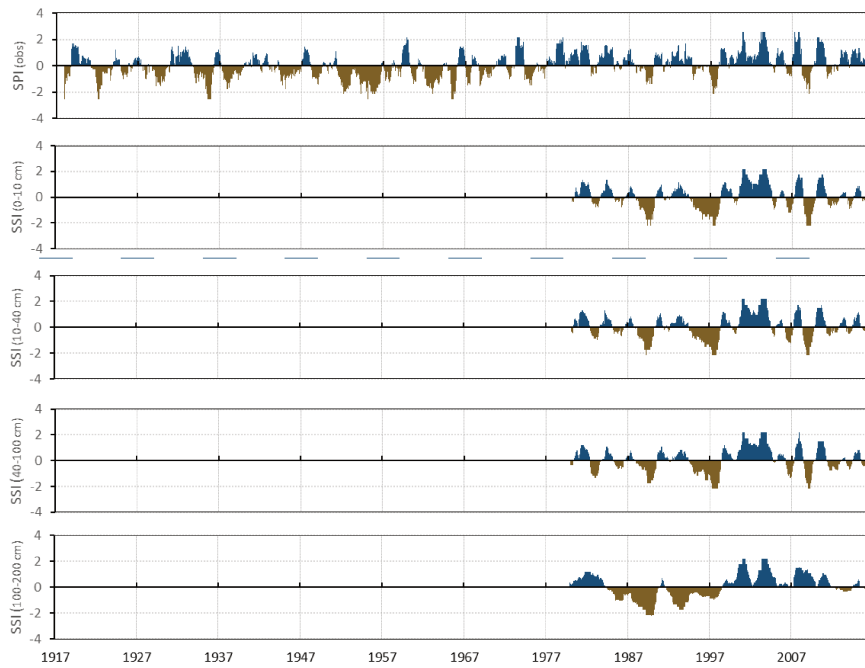


Figura A.II 25 Series temporales para SPI12 en el periodo 1917-2016 (a), y SSI12 (0-10 cm, 10-40 cm, 40-100 cm, 100-200 cm) en el periodo 1979-2016 (b). Estación Paraná

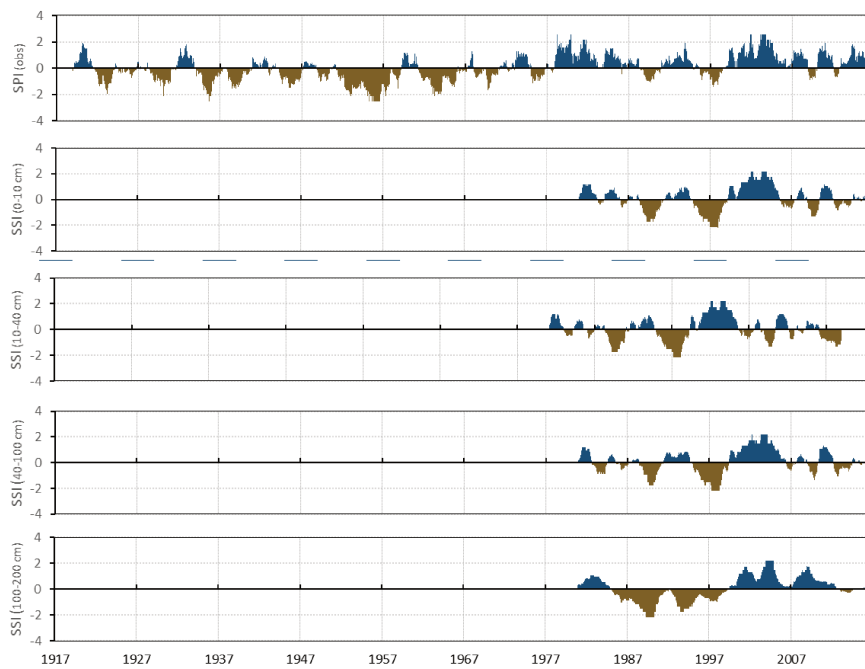


Figura A.II 26 Series temporales para SPI24 en el periodo 1917-2016 (a), y SSI24 (0-10 cm, 10-40 cm, 40-100 cm, 100-200 cm) en el periodo 1979-2016 (b). Estación Paraná

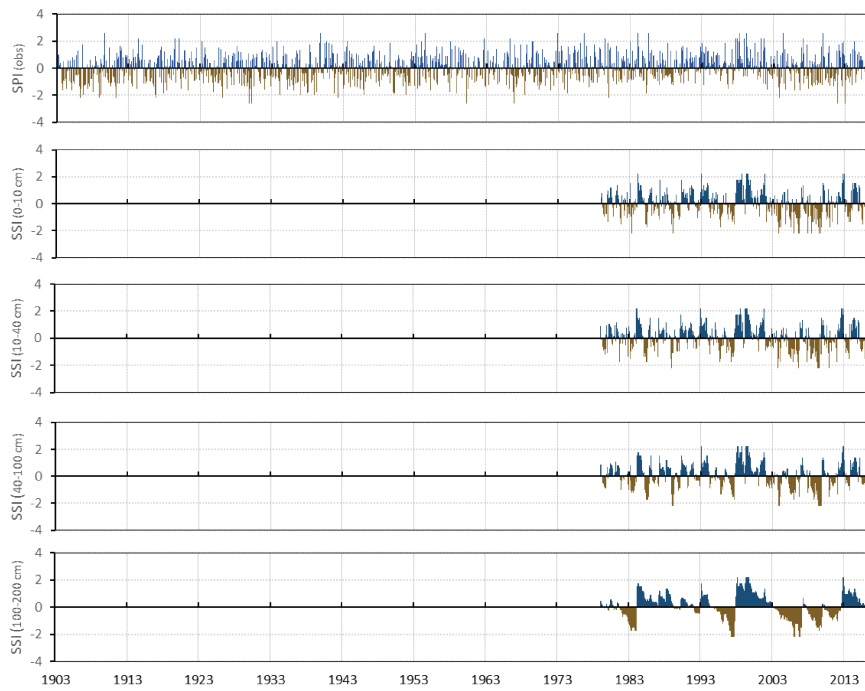


Figura A.II 27 Series temporales para SPI1 en el periodo 1903-2016 (a), y SSI1 (0-10 cm, 10-40 cm, 40-100 cm, 100-200 cm) en el periodo 1979-2016 (b). Estación Laboulaye

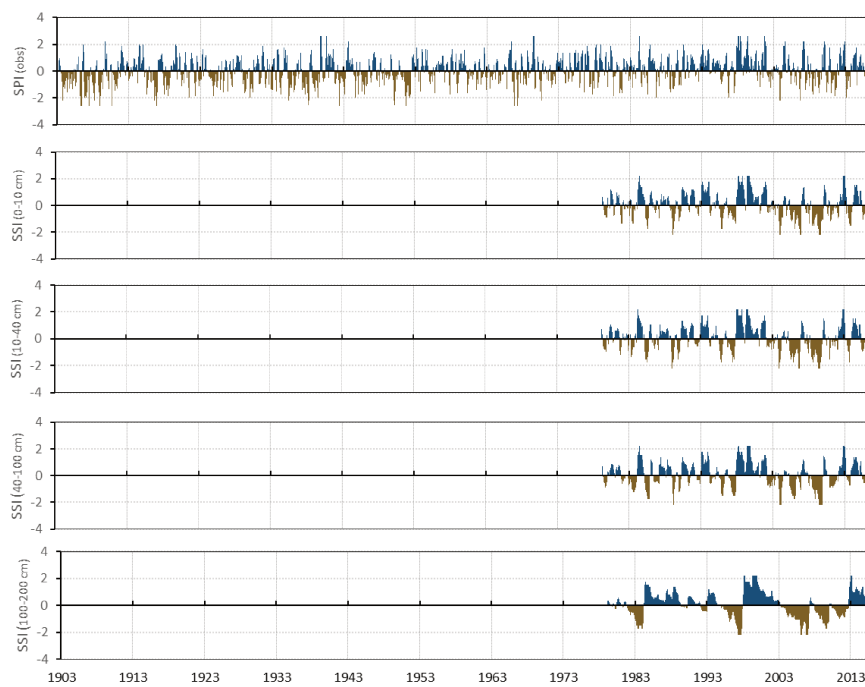


Figura A.II 28 Series temporales para SPI3 en el periodo 1903-2016 (a), y SSI3 (0-10 cm, 10-40 cm, 40-100 cm, 100-200 cm) en el periodo 1979-2016 (b). Estación Laboulaye

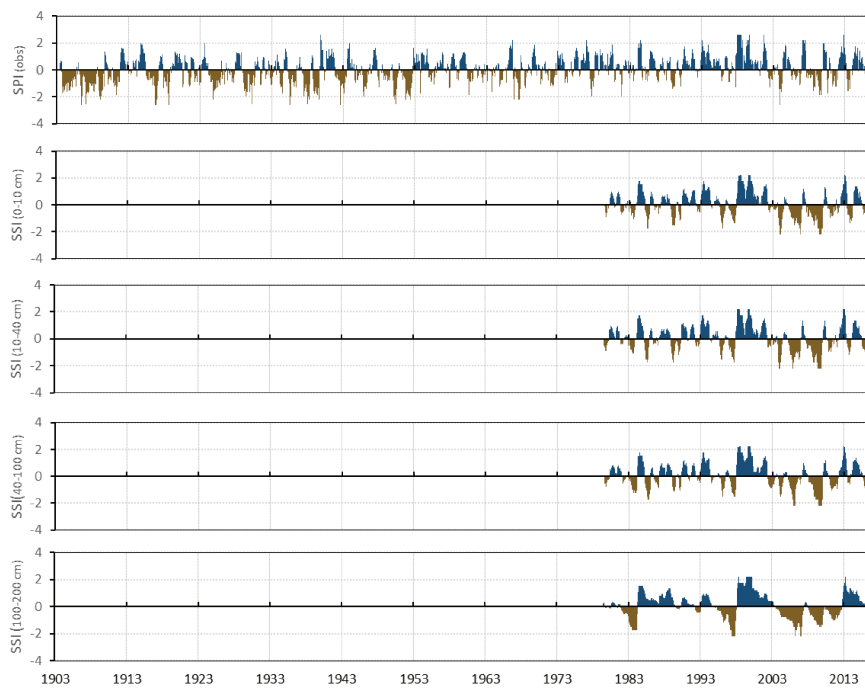


Figura A.II 29 Series temporales para SPI6 en el periodo 1903-2016 (a), y SSI6 (0-10 cm, 10-40 cm, 40-100 cm, 100-200 cm) en el periodo 1979-2016 (b). Estación Laboulaye

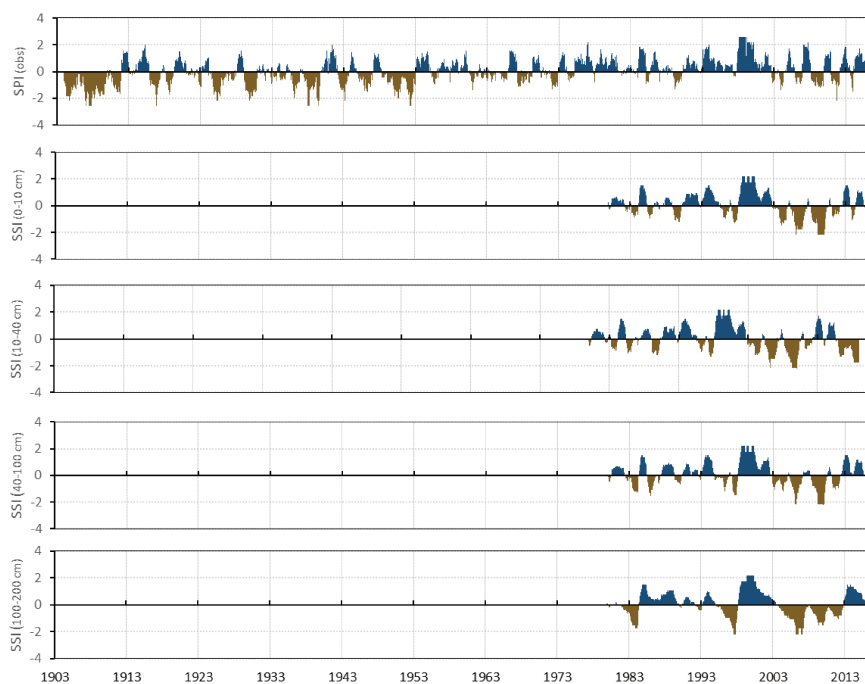


Figura A.II 30 Series temporales para SPI12 en el periodo 1903-2016 (a), y SSI12 (0-10 cm, 10-40 cm, 40-100 cm, 100-200 cm) en el periodo 1979-2016 (b). Estación Laboulaye

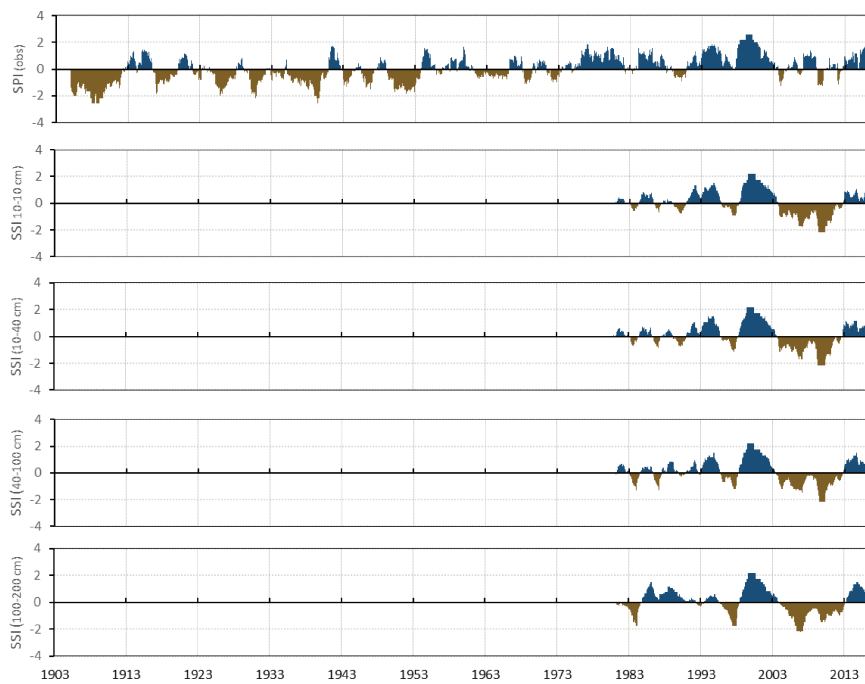


Figura A.II 31 Series temporales para SPI24 en el periodo 1903-2016 (a), y SSI24 (0-10 cm, 10-40 cm, 40-100 cm, 100-200 cm) en el periodo 1979-2016 (b). Estación Laboulaye

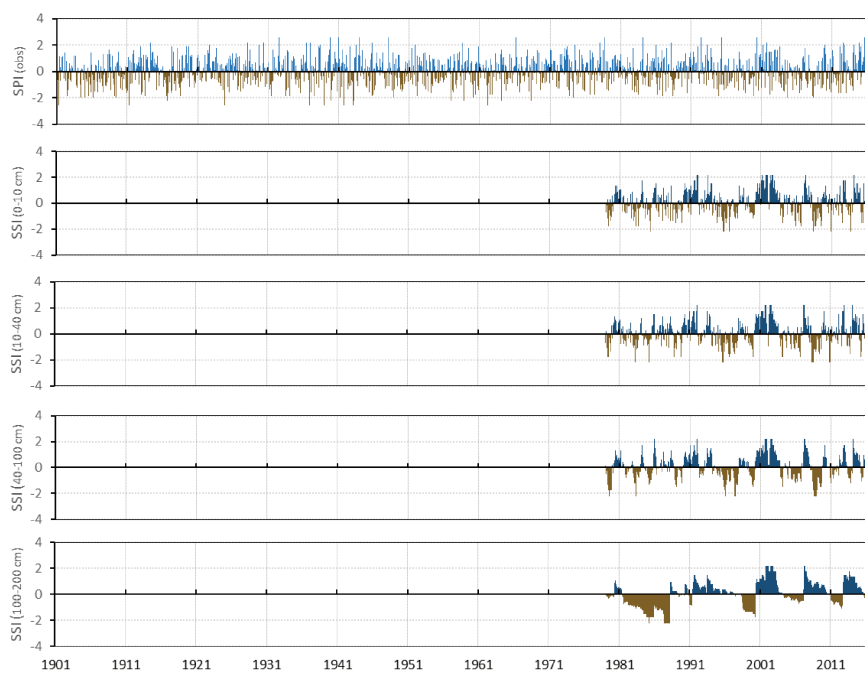


Figura A.II 32 Series temporales para SPI1 en el periodo 1901-2016 (a), y SSI1 (0-10 cm, 10-40 cm, 40-100 cm, 100-200 cm) en el periodo 1979-2016 (b). Estación Pergamino

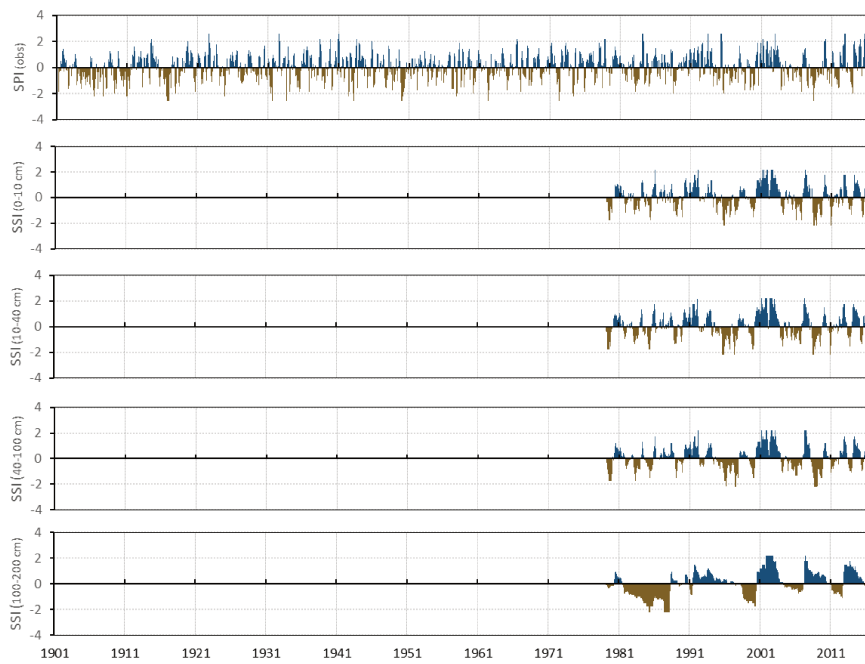


Figura A.II 33 Series temporales para SPI3 en el periodo 1901-2016 (a), y SSI3 (0-10 cm, 10-40 cm, 40-100 cm, 100-200 cm) en el periodo 1979-2016 (b). Estación Pergamino

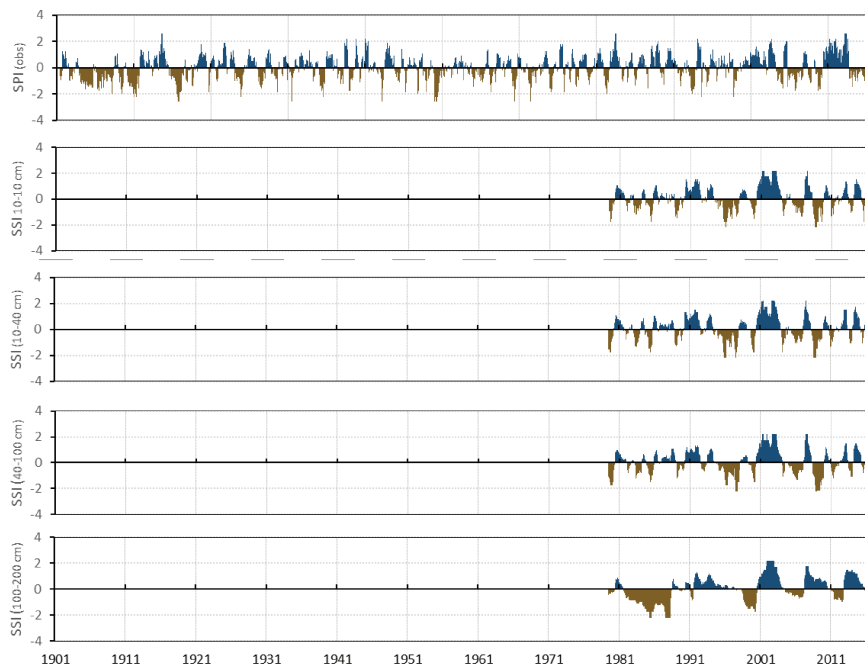


Figura A.II 34 Series temporales para SPI6 en el periodo 1901-2016 (a), y SSI6 (0-10 cm, 10-40 cm, 40-100 cm, 100-200 cm) en el periodo 1979-2016 (b). Estación Pergamino

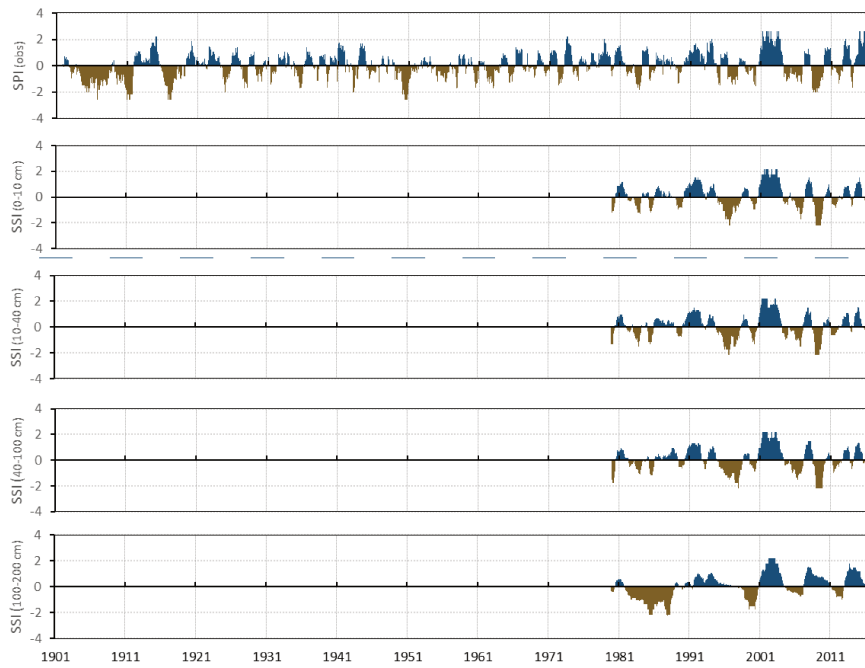


Figura A.II 35 Series temporales para SPI12 en el periodo 1901-2016 (a), y SSI12 (0-10 cm, 10-40 cm, 40-100 cm, 100-200 cm) en el periodo 1979-2016 (b). Estación Pergamino

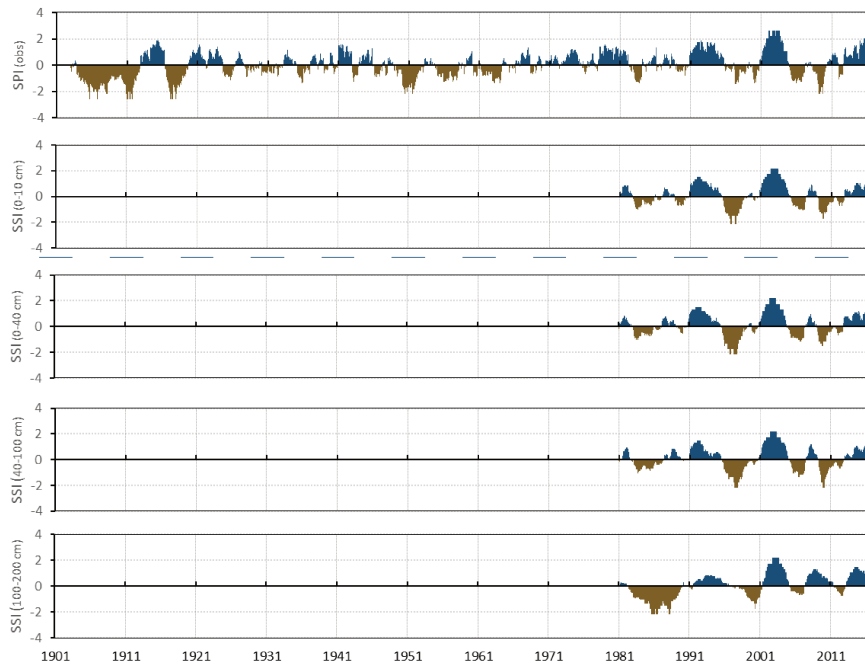


Figura A.II 36 Series temporales para SPI24 en el periodo 1901-2016 (a), y SSI24 (0-10 cm, 10-40 cm, 40-100 cm, 100-200 cm) en el periodo 1979-2016 (b). Estación Pergamino