

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL



MAESTRÍA EN INGENIERÍA  
DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

# **Análisis del comportamiento hidrológico del sistema de llanura “Bajos Submeridionales”, Argentina**

Edna Lucia Espinosa Gómez

**FICH**  
FACULTAD DE INGENIERIA  
Y CIENCIAS HIDRICAS

Tesis de Maestría **2021**

**Maestría en Ingeniería  
de los Recursos Hídricos**

Título de la obra:

**Análisis del comportamiento hidrológico del sistema de llanura  
“Bajos Submeridionales”, Argentina**

Autor: Edna Lucia Espinosa Gómez

Lugar: Santa Fe, Argentina

Palabras Claves:

Balance Hídrico  
Almacenamiento  
SPI  
Teledetección  
MNDWI



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL  
Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO HIDROLÓGICO DEL  
SISTEMA DE LLANURA “BAJOS SUBMERIDIONALES”,  
ARGENTINA**

**Edna Lucia Espinosa Gómez**

Tesis remitida al Comité Académico de la Maestría  
como parte de los requisitos para la obtención  
del grado de  
MAGÍSTER 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

## **ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO HIDROLÓGICO DEL SISTEMA DE LLANURA “BAJOS SUBMERIDIONALES”, ARGENTINA**

**Edna Lucia Espinosa Gómez**

**Lugar de Trabajo:**

CENEHA

Centro de Estudios Hidro-Ambientales  
Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas  
Universidad Nacional del Litoral

**Director:**

Carlos Scioli

Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas  
Universidad Nacional del Litoral

**Co-director:**

Leticia Rodríguez

Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas  
Universidad Nacional del Litoral

**Jurado Evaluador:**

María Guadalupe Ares

Consejo Nacional de Investigaciones  
Científicas y Técnicas de Argentina

María del Valle Venencio

Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas  
Universidad Nacional del Litoral

Mario Basan Nickisch

Instituto Nacional de Tecnología  
Agropecuaria

**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 veintiocho días del mes de junio 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 **“Análisis de comportamiento hidrológico del sistema de llanura Bajos Submeridionales, Argentina”**, desarrollada por la Ing. Edna Lucía ESPINOSA GÓMEZ, Pasaporte AS159263, bajo la dirección del Dr. Carlos Scioli y la codirección de la Dra. Leticia Rodríguez. Ellos son: la Dra. María Guadalupe Ares, la Dra. María del Valle Venencio y el Mag. Mario Basán Nickisch. -----  
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 tesis plantea el análisis del funcionamiento hidrológico de un sistema de llanura, el de los Bajos Submeridionales. Para ello la tesista recopila y estudia gran cantidad de información hidrometeorológica e hidrogeológica de diversas fuentes, y de imágenes satelitales, para calcular el balance hidrológico, analizar la dinámica temporal del agua en superficie y establecer las relaciones entre el sistema superficial y el subterráneo, y los procesos de generación de escurrimiento.**

**La exposición de la Tesis fue clara y precisa, abordando la temática hidrológica con un enfoque integral al incorporar la zona no saturada y saturada en una región de gran interés interprovincial. El tema expuesto es de gran vigencia e importancia y la tesista respondió con solvencia las preguntas del jurado.**

**Las conclusiones fueron avaladas por el desarrollo de la exposición. Es de destacar que se hizo mención de incorporar nuevas líneas de investigación basadas en las conclusiones del trabajo.**


**Por lo tanto, el Jurado aprueba la tesis con calificación 10 (Diez) Sobresaliente.**

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

-----  
Dra. María Guadalupe Ares

-----  
Dra. María del Valle  
Venencio

-----  
Mag. Mario Basán Nickisch

  
**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, 28 de junio de 2021.

Como miembros del Jurado Evaluador de la Tesis de Maestría titulada "*Análisis de comportamiento hidrológico del sistema de llanura Bajas Submeridionales, Argentina*", desarrollada por la Ing. Edna Lucía ESPINOSA GÓMEZ, certificamos que hemos evaluado la Tesis y recomendamos que sea aceptada como parte de los requisitos para la obtención del título de Magíster 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.

-----  
Dra. María Guadalupe Ares

-----  
Dra. María del Valle  
Venencio

-----  
Mag. Mario Basán Nickisch

Santa Fe, 28 de junio 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 Magíster en Ingeniería de los Recursos Hídricos.

-----  
Dra. Leticia Rodríguez  
Codirectora de Tesis

-----  
Dr. Carlos Scioli  
Director de Tesis

  
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

## **DECLARACIÓN LEGAL DEL AUTOR**

Esta Tesis ha sido remitida como parte de los requisitos para la obtención del grado académico de Magíster en Ingeniería de los Recursos Hídricos 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.

Certifico que el trabajo incluido en esta tesis es el resultado de tareas de investigación originales y que no han sido presentadas para optar a un título de posgrado en ninguna otra Universidad o Institución.

Edna Lucia Espinosa Gómez

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a Leticia Rodríguez y Carlos Scioli, mis directores, por su confianza, sus enseñanzas, su paciencia y su tiempo. Por la oportunidad, infinitas gracias.

A la Agencia Nacional de Promoción de la Investigación, el Desarrollo Tecnológico y la Innovación, por financiar el proyecto PICT 1334 (2016) dentro del cual se enmarca esta tesis.

A la Universidad Nacional Pública Argentina.

A la UNL, la FICH y al Instituto de Desarrollo Tecnológico para la Industria Química (INTEC), a la FIQ y a sus docentes, por la formación.

A Javier Heredia por el asesoramiento prestado.

A Dora Sosa, Hugo Terré, Hugo Vicino, Mario Basán, Hugo Rorhman, INTA Bandera, INTA Las Breñas e INTA Quimilí por aportar información tan valiosa sobre la cuenca de los Bajos Submeridionales.

A Miguel Lovino y a Elisabet Walker, por compartir sus conocimientos y brindarme su ayuda.

Al Centro de Estudios Hidro-Ambientales (CENEHA), por recibirme y brindarme los recursos necesarios para la culminación de esta tesis. Especialmente, a mis compañeras y amigas Belén, Eli y Diana por ser tan buenas amigas y acompañarme tan cercanamente.

A los miembros del jurado, por sus aportes que permitieron mejorar los resultados de esta tesis.

A Neri por ser tan buena amiga, por abrirme las puertas de su casa y de su familia y por ser un apoyo tan grande en este país.

A mis amigas y amigos argentinos por hacer tan agradable y llevadera mi estadía, por su amistad ayuda y apoyo.

A mis papas, a Dani y a toda mi familia por su cariño, por tanto esfuerzo y por respaldarme. A Kike por su amor y su gran apoyo. A Naty, Lau, Pau y toda su familia, por darme tanto valor. A todas mis amigas. A todos ellos por apoyarme a emprender este viaje a pesar de la distancia que implicaba.



# ÍNDICE GENERAL

Capítulo 1: Introducción.....	1
1.1 El caso de los Bajos Submeridionales .....	4
1.2 Descripción de la estructura de la tesis .....	6
Capítulo 2: Marco teórico.....	7
2.1 El balance hídrico .....	7
2.1.1 Variación de almacenamiento.....	9
2.2 Detección de superficies cubiertas por agua .....	11
2.3 Identificación de periodos secos y húmedos.....	13
2.4 Mecanismos de generación de escorrentía.....	15
Capítulo 3: Descripción del área de estudio .....	18
3.1 Ubicación y límite.....	18
3.2 Geología y geomorfología.....	19
3.3 Clima.....	22
3.4 Sistema hídrico superficial.....	23
3.5 Sistema hidrogeológico.....	25
3.6 Tipo y uso del suelo.....	27
3.7 Características de la vegetación natural y fauna.....	29
Capítulo 4: Metodología.....	32
4.1 Análisis del comportamiento de las componentes del balance hídrico .....	32
4.1.1 Estimación y análisis de la precipitación.....	34
4.1.2 Estimación y análisis de la evapotranspiración.....	41
4.1.3 Estimación del escurrimiento superficial en el punto de salida.....	48
4.1.4 Estimación de la variación de almacenamiento con datos de GRACE.....	50
4.2 Caracterización del comportamiento espacial y temporal de cuerpos de agua de los BBSS .....	51
4.3 Relación entre el área de ‘Agua Libre’, el sistema subterráneo y la generación de escorrentía .....	58
Capítulo 5: Resultados y discusión .....	60
5.1 Comportamiento de las componentes del balance hídrico.....	60
5.1.1 Precipitación .....	60
5.1.2 Evapotranspiración real ET .....	77
5.1.3 Escurrimiento superficial.....	83

5.1.4 Modelo de balance hídrico.....	85
5.2 Caracterización del comportamiento espacial y temporal de cuerpos de agua en los BBSS .....	92
5.3 Relación entre el área de ‘Agua Libre’, el sistema subterráneo y la generación de escorrentía .....	104
5.3.1 Relación entre el área de ‘Agua Libre’ y el sistema subterráneo.....	104
5.3.2 Relación entre el área de ‘Agua Libre’ y la generación de escurrimiento superficial .....	111
5.3.3 Superficies de ‘Agua Libre’ permanente y su vinculación con el sistema subterráneo.....	117
Capítulo 6: Conclusiones.....	120
Referencias Bibliográficas.....	142

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Red de drenaje de un sistema hidrológico de pendiente pronunciada (a) y de un sistema de llanura (b) (Scioli, 2010). .....	2
Figura 1.2. Ubicación de la cuenca de los Bajos Submeridionales. ....	4
Figura 1.3. Inundación en la cuenca de los Bajos Submeridionales, Argentina (Confederaciones Rurales Argentinas CRA, 2019). .....	5
Figura 2.1. Clasificación de mecanismos de respuesta de laderas a la precipitación donde: P es la precipitación; I, infiltración; $f_{sup}$ , flujo superficial; $f_{sub}$ , flujo subterráneo; y $f_r$ , flujo de retorno (Beven, 2011). .....	16
Figura 2.2. Incidencia del clima, vegetación, topografía, uso y tipo de suelo sobre los mecanismos de generación de escorrentía (Dunne y Leopold, 1978).....	17
Figura 3.1. Cuenca o región de los Bajos Submeridionales según: a) Giraut et al. (2001), b) INA y SPAR (2002), c) Secretaría de Gobierno de la Prov. de Santa Fe (2019) y d) FVSA y FUNDAPAZ (2007). .....	19
Figura 3.2. Límite de la cuenca de los BBSS en el mega-abanico fluvial del río Salado-Juramento (Modificado de Thalmeier et al., 2021). El modelo digital de elevación del terreno corresponde a Shuttle Radar Topography Mission- SRTM (Farr et al., 2007). Bandera, las Breñas y Reconquista corresponden a estaciones meteorológicas del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).....	20
Figura 3.3. Precipitación media mensual en estaciones del INTA (Las Breñas 1938-2008, Reconquista 1960-2016, Bandera 1980-2016). ....	22
Figura 3.4. Promedio mensual de evaporación de Tanque tipo A (obtenido de INTA Las Breñas, 2009). .....	23
Figura 3.5. Red de drenaje natural (a) y artificial (b) de la cuenca de los BBSS (INA y CFI, 2017). Imagen satelital que muestra las lagunas conectadas al sistema fluvial Golondrinas-Calchaquí. Coordenadas del recuadro: 28°16'51.11"S, 61°34'13.45"O y 30°27'36.94"S, 59°50'19.04"O, Google Earth (c).....	24
Figura 3.6. Órdenes de suelo principal (a) y textura superficial del suelo (b) en el área de los BBSS (SAGyP e INTA, 2007). ....	27
Figura 3.7. a) Aptitud de uso agrícola suelos Santa Fe (Fuente: <a href="http://visor.geointa.inta.gob.ar/?p=96">http://visor.geointa.inta.gob.ar/?p=96</a> ), b) Composición color RGB-654 del mosaico de	

imágenes Landsat 8 (LANDSAT/LC08/C01/T1_SR) adquiridas entre 2017-11-14/2017-11-23 y disponibles en Google Earth Engine. ....	29
Figura 4.1. Esquema tridimensional del volumen de control considerado (Modificado de Dingman, 2015). ....	33
Figura 4.2. Diagrama de flujo metodológico del pre procesamiento de la información pluviométrica. ....	35
Figura 4.3. Ubicación de estaciones con registros pluviométricos recopiladas (el número de las estaciones coinciden con los consignados en la Tabla del Anexo 2). ....	36
Figura 4.4. a) Puntos de información pluviométrica CRU; b) Puntos de información pluviométrica GPCC. ....	37
Figura 4.5. Diagrama de flujo metodológico del análisis de la distribución espacial y temporal de la precipitación. ....	40
Figura 4.6. Diagrama de flujo metodológico para calcular la ET a nivel puntual a partir de diferentes fuentes de datos. ....	42
Figura 4.7. Sitios de estimación de ET en torres EC y del trabajo realizado por Di Bella et al. (2000). ....	43
Figura 4.8. Diagrama de flujo metodológico del análisis de la distribución espacial y temporal de la ET en los BBSS a partir de la fuente de datos seleccionada. ....	48
Figura 4.9. Ubicación de puntos de grilla GRACE y pozos de observación del nivel freático (NF) dentro de la cuenca de los BBSS. ....	51
Figura 4.10. Diagrama de flujo metodológico seguido para la estimar la variación temporal de la superficie de ‘Agua Libre’ con imágenes MODIS. ....	56
Figura 4.11. Diagrama de flujo metodológico seguido para la estimar la variación temporal de la superficie de ‘Agua Libre’ con imágenes Landsat 8. ....	57
Figura 4.12. Caracterización del bi-plot generado por el NDWI (Gao, 1996) y SWIR 2. (Álvarez, 2020). ....	59
Figura 5.1. Análisis de doble masa entre las estaciones Ruta provincial 88s (RHN) y Reconquista (SMN). ....	61
Figura 5.2. Análisis de doble masa entre las estaciones La Escondida (APA) y Resistencia (SMN). ....	61
Figura 5.3. Ubicación de las estaciones pluviométricas seleccionadas. ....	64
Figura 5.4. Precipitación mensual de la estación La Tigra frente a datos de CRU (a) y GPCC (b). ....	65

Figura 5.5. Diagrama de dispersión entre los datos de precipitación mensual de la Estación La Tigra y bases de datos. a) CRU; b) GPCC. ....	66
Figura 5.6. Ubicación de la información pluviométrica seleccionada. ....	67
Figura 5.7. Diagrama de dispersión entre: a) Ceres y P55 GPCC; b) Escuela 1256 y P135 GPCC. ....	68
Figura 5.8. P anual media del periodo 1986-2016. ....	70
Figura 5.9. Distribución espacial de la P anual para a) 1986-2016, b) 1986-1990, c) 1991-1995, d) 1996-2000, e) 2001-2005, f) 2006-2010, g) 2011-2016 y h) 2000-2016. ....	71
Figura 5.10. a) Ciclo anual de P de los BBSS (1986-2016); b) Ciclo anual de P de Los Guasunchos (1986-2016). ....	72
Figura 5.11. Distribución espacial de P media del periodo 1986-2016 para cada mes del año. ....	72
Figura 5.12. Serie temporal de la PMB y del término de P utilizado en el balance hídrico (1986-2016). ....	74
Figura 5.13. Serie temporal del SPIM de 3 y 6 meses para el periodo 1986-2016. ....	76
Figura 5.14. Serie temporal del SPIM de 9, 12 y 24 meses para el periodo 1986-2016. ....	76
Figura 5.15. Diagramas de dispersión entre la ET observada en Virasoro y la ET estimada con diferentes fuentes de datos. ....	78
Figura 5.16. Evolución temporal de la ET en Virasoro frente a la estimación con diferentes fuentes de datos. ....	79
Figura 5.17. ET anual media de los BBSS para el periodo 2000-2016. ....	80
Figura 5.18. Distribución espacial de la ET anual para a) 2000-2016, b) 2001-2005, c) 2006-2010 y d) 2011-2016. ....	81
Figura 5.19. Ciclo anual de ET de los BBSS para el periodo 2000-2016. ....	81
Figura 5.20. Distribución espacial de ET media del periodo 2000-2016 para cada mes del año. ....	82
Figura 5.21. Serie temporal de la ETB y del término de ET utilizado en el balance hídrico (2000-2016). ....	83
Figura 5.22. Lámina de escorrentía y caudal estimados a partir de registros de altura hidrométrica (escala hidrométrica/sensor piezorresistivo). ....	85
Figura 5.23. Lámina de escorrentía/caudal mensual estimados a partir de registros de altura hidrométrica (escala/sensor) y porcentaje C de la precipitación; término de Q utilizado en el balance hídrico (2000-2016). ....	85

Figura 5.24. Evolución temporal de las componentes de la ecuación de balance hídrico para el periodo 2000-2016. ....	86
Figura 5.25. Evolución temporal de P promedio y $dS/dt$ del balance hídrico para el periodo 2000-2016. ....	86
Figura 5.26. Diagramas de dispersión entre la variación de almacenamiento de balance, P y ET para el periodo 2000-2016. ....	87
Figura 5.27. Evolución temporal de la variación de almacenamiento obtenida mediante balance hídrico y GRACE para el periodo 2002-2016. ....	87
Figura 5.28. Evolución temporal de LWET y PMB (2000-2016). ....	88
Figura 5.29. Evolución temporal del SPIM de 3 meses y LWET (2000-2016). ....	89
Figura 5.30. Evolución temporal del SPIM de 6 meses y LWET (2000-2016). ....	89
Figura 5.31. Evolución temporal del SPIM de 9 meses y LWET (2000-2016). ....	89
Figura 5.32. Evolución temporal del SPIM de 12 meses y LWET (2000-2016). ....	90
Figura 5.33. Evolucion temporal del SPIM de 24 meses y LWE (2000-2016). ....	90
Figura 5.34. Diagramas de dispersión entre LWET y PMB (a), SPIM de 3 meses (b), SPIM de 6 meses (c), SPIM de 9 meses (d), SPIM de 12 meses (e) y SPIM de 24 meses (f). ....	91
Figura 5.35. a) RGB-621 MODIS, b) RGB-654 Landsat 8, c) MNDWI MODIS, d) MNDWI Landsat 8, e) ‘Agua Libre’ MODIS y f) ‘Agua Libre’ Landsat 8. La imagen MODIS corresponde al 2015-03-22; y Landsat 8, al mosaico adquirido entre 2015-03-22/2015-03-31. ....	93
Figura 5.36. Comparación entre el área de ‘Agua Libre’ estimada con imágenes Landsat 8 y MODIS: a) Dispersión, y b) Evolución temporal. ....	94
Figura 5.37. a) Evolución temporal del área de ‘Agua Libre’ de los BBSS (2000-2019), b) área de ‘Agua Libre’ vs. diferencia de tiempo entre imágenes de ‘Agua Libre’ y c) área de ‘Agua Libre’ vs. PMB. ....	95
Figura 5.38. Histograma de frecuencia del área de ‘Agua Libre’ de los BBSS (2000-2019). ....	96
Figura 5.39. Imágenes de ‘Agua Libre’ para a) el valor mínimo de área, b) 196.30 km <sup>2</sup> , c) 323.06 km <sup>2</sup> , y d) 596.95 km <sup>2</sup> . ....	98
Figura 5.40. Imágenes de ‘Agua Libre’ para el valor de área máximo obtenida con MODIS (a) y con Landsat 7 para una fecha cercana (b). ....	99
Figura 5.41. Mapa de probabilidad de ocurrencia (PO) de ‘Agua Libre’ para el periodo 2000-2019. ....	101
Figura 5.42. Histograma para la frecuencia de ocurrencia de ‘Agua Libre’ para el periodo 2000-2019. ....	102

Figura 5.43. Mapa de caracterización de permanencia de ‘Agua Libre’ para el periodo 2000-2019.....	103
Figura 5.44. Evolución temporal del nivel freático (NF) y LWET y diagramas de dispersion respectivos en tres piezómetros : a,b) Don Tito, c,d) El Quilla, e,f) San Bernardo. Ver ubicación de piezómetros en la Figura 4.9. Los valores del NF corresponden al promedio las observaciones comprendidas entre dos observaciones sucesivas de LWET.....	105
Figura 5.45. Evolución temporal de la superficie de ‘Agua Libre’ de los BBSS y de LWET para el periodo 2000-2016.....	106
Figura 5.46. Diagrama de dispersión entre la superficie de ‘Agua Libre’ y LWET. Los valores de ‘Agua Libre’ corresponden al promedio entre dos observaciones sucesivas de LWET.....	107
Figura 5.47. Evolución temporal del área de ‘Agua Libre’ con: a) PMB, b) SPIM de 3 meses, c) SPIM de 6 meses, para el periodo 2000-2016. ....	108
Figura 5.48 Evolución temporal del área de ‘Agua Libre’ de los BBSS frente al SPIM de 9 meses (a), SPIM de 12 meses (b) y SPIM de 24 meses (c) para el periodo 2000-2016. ....	109
Figura 5.49. Diagramas de dispersión entre la superficie de ‘Agua Libre’ media mensual y PMB (a), SPIM de 3 meses (b), SPIM de 6 meses (c), SPIM de 9 meses (d), SPIM de 12 meses (e) y SPIM de 24 meses (f). ....	111
Figura 5.50. Variación temporal del escurrimiento (Q) en la estación paraje El Bonete frente a PMB (a) y el área de ‘Agua Libre’ de los BBSS (b) para el periodo 2000-2017.....	112
Figura 5.51. a) Composición color RGB-75 NDWI <sub>GAO</sub> , b) biplot NDWI <sub>GAO</sub> (eje y)-SWIR2 (eje x) y c) extracción de ‘Agua Libre’ y ‘Áreas Saturadas’ para el mosaico 12 Landsat 8 (2013-10-08). ....	114
Figura 5.52. a) Composición color RGB-75 NDWI <sub>GAO</sub> , b) biplot NDWI <sub>GAO</sub> (eje y)-SWIR2 (eje x) y c) extracción de ‘Agua Libre’ y ‘Áreas Saturadas’ para el mosaico 3 Landsat 8 (2014-08-30). ....	115
Figura 5.53. a) Composición color RGB-75 NDWI <sub>GAO</sub> , b) biplot NDWI <sub>GAO</sub> (eje y)-SWIR2 (eje x), y c) extracción de ‘Agua Libre’ y ‘Áreas Saturadas’ para el mosaico 2 Landsat 8 (2019-02-01). ....	116
Figura 5.54. Superficies de ‘Agua Libre’ permanentes presentes en los BBSS sobre el modelo digital de elevación del terreno SRTM (Farr et al. 2007). ....	117

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Intensidad de la sequía/humedad según valor de SPI (OMM, 2012).....	15
Tabla 4.1. Datos de los sitios de estimación de ET en torres de EC.....	43
Tabla 5.1 Estaciones pluviométricas seleccionadas.....	63
Tabla 5.2. Promedios del coeficiente de correlacion (r) y RMSE en las estaciones según su procedencia.....	67
Tabla 5.3 Estadísticos entre los valores de ET observados en Virasoro y los valores estimados.....	78
Tabla 5.4. Número de mediciones diarias disponibles de altura hidrométrica en la estación Paraje El Bonete.....	84
Tabla 5.5. Área de ‘Agua Libre’ de los BBSS estimada con mosaicos de imágenes Landsat 8 e imágenes MODIS temporalmente más cercanas.....	94
Tabla 5.6. Mínimo, cuartil inferior, mediana, media, cuartil superior y máximo de la superficie de ‘Agua Libre’ de los BBSS calculada mediante imágenes MODIS para el periodo 2000-2019. Porcentaje que estas variables representan en la cuenca bajo estudio....	96
Tabla 5.7. Extensión de ‘Agua Libre’ según su carácter de permanencia.....	103



## RESUMEN

La hidrología clásica se ha desarrollado en torno al concepto de una cuenca hidrográfica de límites, área de aporte y sistema de drenaje bien definidos. Las llanuras, en cambio, constituyen sistemas hidrológicos complejos; las bajas pendientes superficiales confieren gran relevancia al almacenamiento superficial/subterráneo y al intercambio vertical entre los diferentes reservorios hidrológicos. En ellas los límites de cuenca son difusos y la red de drenaje no jerarquizada. Por ende, el estudio de estos sistemas presenta variados desafíos que deben abordarse con diferentes metodologías.

El objetivo general de esta tesis es contribuir al conocimiento del funcionamiento de sistemas hidrológicos de llanura contemplando el estudio de las variaciones temporales y espaciales del almacenamiento de agua superficial. El área de estudio es la cuenca de los Bajos Submeridionales, una extensa región ubicada en la llanura Chacopampeana (Argentina). Los objetivos específicos son: el análisis del comportamiento de las distintas componentes del balance hídrico; la caracterización del comportamiento temporal y espacial de superficies de agua libre; y la identificación de la relación entre las superficies de agua libre, el sistema subterráneo somero y la generación de escorrentía. Mediante la aplicación de un modelo de balance hídrico simplificado para el periodo 2000-2016 se estudió la variación del almacenamiento (S) y la contribución relativa de cada variable del balance.

La precipitación (P) es la variable que explica en mayor medida el balance; el escurrimiento superficial tiene una influencia poco significativa. La variabilidad de P y los respectivos excesos (P- Evapotranspiración real ET) son determinantes en el funcionamiento del sistema. Así, el comportamiento temporal del Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) permite la identificación de periodos secos/húmedos y su severidad, y es capaz de reflejar la variación del S superficial/subterráneo a medida que aumenta la escala temporal de análisis. Las inferencias realizadas sobre la fluctuación del S total/subterráneo se realizaron mediante los datos de S de la misión satelital GRACE. El contraste con datos del nivel freático (NF) en tres pozos de un sector de la cuenca mostró que S GRACE es un buen indicador del estado del almacenamiento subterráneo somero. Los datos de S GRACE también fueron utilizados para contrastar la variación de S obtenida por balance hídrico, y además reflejaron las fluctuaciones temporales más importantes del S de agua superficial.

El procesamiento de imágenes satelitales MODIS y Landsat 8 para el periodo 2000-2019 y el uso del MNDWI permitieron analizar las variaciones espacio/temporales de superficies de 'Agua Libre' (MNDWI>0), su carácter de permanencia y su relación con las variables hidrológicas. Los resultados obtenidos muestran que la presencia de superficies de 'Agua Libre' estaría relacionada con el ascenso del NF. A su vez, la fluctuación de estas superficies influye en el proceso de generación de escorrentía superficial. La respuesta de la cuenca a la P, dada por el aumento/disminución de la superficie de 'Agua Libre' y por la generación de escorrentía superficial, está fuertemente condicionada por el estado de humedad antecedente/S subterráneo; es relativamente rápida en condiciones de exceso y prácticamente nula cuando el almacenamiento es bajo. La superficie de 'Agua Libre' no permanente constituye gran parte (78%) de la máxima extensión probable de presentar 'Agua Libre'. No obstante, la vinculación del sistema superficial con el subterráneo también se expresa por la existencia de cuerpos de 'Agua Libre' permanentes que dan indicios del aporte de flujo subterráneo.

## ABSTRACT

Classical hydrology has developed based on the concept of well-defined boundary basins, and properly defined drainage systems. Flatplains, instead, constitute more complex hydrological systems. Gentle slopes confer great relevance to surface/groundwater storage and vertical flow exchanges between storage compartments. Basin boundaries and drainage networks are diffuse. Therefore, the study of these systems poses diverse challenges that must be tackled with different methodologies.

The aim of this thesis is to contribute to the knowledge of the flatplain hydrological systems functioning including the study of space/time variations of surface water storage. The study area is the Bajos Submeridionales basin, an extensive region located in the Chacopampean plain (Argentina). Specific objectives are: the analysis of the behavior of water balance variables, spatial-temporal characterization of free-water areas, and identification of the relationship between free-water surfaces, the shallow hydrogeological system and runoff generation. By means of the application of a simplified water balance model for the period 2000-2016, water storage (S) variation and the relative contribution of each variable was studied.

Precipitation (P) explains most of the mass balance, surface runoff has a non-significant influence on the balance. P variability and the corresponding water excess (P-real evapotranspiration ET) are determinant factors in the system functioning. Thus, the temporal behavior of the Standardized Precipitation Index (SPI) allows the identification of dry/humid periods and their severity, and is capable of reflecting the variation of the surface/underground S as the time scale of analysis increases. The inferences made about the fluctuation of the total/underground S were made using the S storage data from the GRACE satellite mission. The contrast with water table data in three piezometers of a sector of the basin showed that S GRACE is a good indicator of the state of shallow underground storage. The S GRACE data were also used to contrast the variation of S obtained by water balance, and also reflected the most important temporal fluctuations of the surface water S.

The processing of MODIS and Landsat 8 satellite images for the period 2000-2019 and the use of the MNDWI allowed to analyze the spatial/temporal variations of 'Free Water' surfaces ( $MNDWI > 0$ ), their permanence character and their relationship with hydrological variables. The results obtained show that the presence of 'Free Water' surfaces would be related to water table levels. The fluctuation of these surfaces influences the process of generating surface runoff. The response of the basin to the P, given by the increase/decrease of the surface area of 'Free Water' and by the generation of surface runoff, is strongly conditioned by the antecedent humidity/underground S state; is relatively fast in excess condition and negligible when storage is low. The non-permanent 'Free Water' surface constitutes a large part (78%) of the maximum likely extent of presenting 'Free Water'. However, the interaction of the surface system with the underground system is also expressed by the existence of permanent 'Free Water' bodies that suggest the contribution of underground/base flow.

## Capítulo 1: Introducción

El agua, recurso finito y vulnerable, y la gama de servicios que proporciona sustentan el bienestar social, el progreso económico y la sostenibilidad ambiental. Los recursos hídricos así como la forma en que se gestionan imponen límites al desarrollo. A su vez, los modelos de desarrollo no sostenibles y las formas de gobernanza afectan la calidad y la disponibilidad de los recursos hídricos: la expansión de la urbanización, la deforestación, las prácticas agrícolas inadecuadas, la contaminación debida a las aguas residuales residenciales e industriales, entre otras, quebrantan la capacidad de los ecosistemas de prestar servicios esenciales relacionados con el agua (World Water Assessment Programme WWAP, 2015).

La creciente demanda del recurso hídrico impone un reto para asegurar la disponibilidad de agua para las personas, el sostenimiento de los ecosistemas, la demanda energética y alimentaria, entre otros usos. Se estima que para el año 2050 la demanda mundial de agua habrá crecido un 55%, profundizando el desequilibrio entre la demanda y el suministro limitado y por lo tanto el déficit global. Adicionalmente, los efectos del cambio climático agravan la incertidumbre de estas estimaciones y aumentan la probabilidad de que los desastres naturales relacionados con el agua ocurran con mayor frecuencia e intensidad (WWAP, 2015).

Los vacíos en el conocimiento sobre el estado de los recursos hídricos, entre otras causas, dificultan la gestión de los mismos y reducen la capacidad de encarar los desafíos impuestos por el desarrollo, el crecimiento económico y el cambio climático. Es por esto que el estudio de la circulación ininterrumpida del agua entre la Tierra y la atmósfera, la Hidrología (Chow et al., 1994), cobra especial importancia; las mejoras en el conocimiento de los recursos hídricos pueden disminuir las condiciones de incertidumbre y aumentar la capacidad de adaptación de las comunidades a los cambios (WWAP, 2015).

La hidrología clásica se ha desarrollado para cuencas hidrográficas con pendientes más o menos pronunciadas, bien definidas, y con una red de drenaje jerarquizada. Sin embargo, la variabilidad espacial del gradiente topográfico da lugar a la existencia de sistemas hidrológicos de diversas características. Por ejemplo, los sistemas hidrológicos de llanura, con pendientes topográficas muy bajas, presentan características particulares que les confieren mayor complejidad como se describe a continuación (Kovacs, 1978; Zimmermann, 1999).

Como se observa en la Figura 1.1 a, en las cuencas con pendientes moderadas a elevadas y bien definidas la totalidad del área drena hacia un colector principal y hacia un único punto de salida, es posible determinar con cierta facilidad las divisorias de aguas, las superficies de aporte, y el orden de jerarquía de cada componente de la red de drenaje. En estos sistemas, generalmente, los procesos hidrológicos horizontales predominan frente a los verticales, presentándose un escurrimiento rápido y un escaso almacenamiento en superficie (Kovacs, 1978).

En contraste, en las llanuras, dado que la profundidad del agua acumulada sobre la superficie eventualmente excede el rango de variación de las cotas topográficas, el escurrimiento superficial puede tomar diferentes direcciones, ser divergente y espacialmente dinámico (Jones

et al., 2008). Por esto, resulta difícil determinar con precisión las divisorias de agua y las superficies de aporte (Figura 1.1 b), lo que se traduce en la posibilidad de transferencia de agua entre divisorias y en algunos casos en la existencia de múltiples puntos de salida (Kruse y Zimmermann, 2002). Generalmente, las redes de drenaje de los sistemas de llanura están compuestas por cuerpos de agua que cuando superan su capacidad de almacenamiento pueden interconectarse (Kovacs, 1978), como se observa en la Figura 1.1 b, los cursos de agua suelen estar interrumpidos por lagunas.

Además, las bajas pendientes topográficas ocasionan que el flujo horizontal de agua (superficial y subterránea) sea gobernado por una menor energía; por lo tanto, causan una baja velocidad del escurrimiento superficial regional y consecuentemente un mayor tiempo de contacto del agua con la superficie del terreno, incrementando la posibilidad de infiltración y evapotranspiración (Kovacs, 1978). Tanto el almacenamiento de agua en la superficie, en la zona saturada y en la zona no saturada como los flujos de intercambio vertical entre estos compartimentos resultan ser de gran relevancia (Kruse et al. 2001; Kruse y Zimmermann, 2002). Como consecuencia, existen interrelaciones complejas entre los cuerpos de agua superficial y el sistema hidrogeológico, y entre los subsistemas de circulación a distintas escalas de las aguas subterráneas (Tóth, 2000).

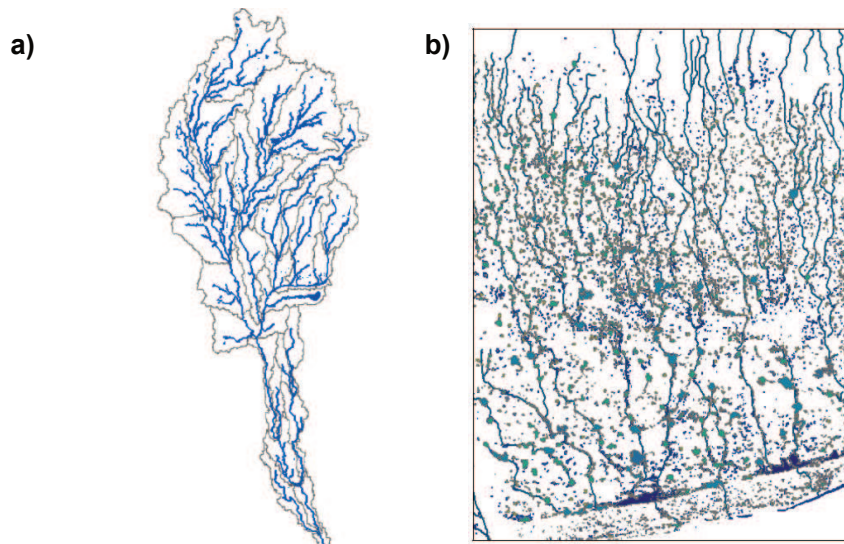


Figura 1.1. Red de drenaje de un sistema hidrológico de pendiente pronunciada (a) y de un sistema de llanura (b) (Scioli, 2010).

Una de las tareas centrales de la hidrología es el análisis de la relación entre la precipitación y el escurrimiento. En las cuencas con redes de drenaje bien definidas existe una relación estrecha entre dichas variables, con un desfase temporal relativamente corto y una menor cantidad, la distribución temporal del escurrimiento en una sección de control es muy similar a la de la precipitación (Kovacs, 1978). En este tipo de sistemas, la distribución temporal del escurrimiento en una sección dada es capaz de expresar las características fisiográficas y climáticas que rigen la relación precipitación-escurrimiento en la superficie contribuyente a la sección (Chow et al., 1994). Sin embargo, debido a que en las llanuras el escurrimiento generalmente no se concentra en cauces y, por el contrario, puede desarrollarse como flujo

laminar distribuyéndose en grandes áreas, se dificulta definir puntos o secciones que representen la respuesta del sistema ante un evento hidrológico (Scioli, 2010). En las llanuras el escurrimiento es mucho menor respecto al almacenamiento y, en general, la relación entre la precipitación-escurrimiento está fuertemente condicionada por el estado de almacenamiento previo de la cuenca. Por ejemplo, en los casos en que la precipitación no es suficiente para abastecer la capacidad de almacenamiento, no se produce escorrentía, en otros casos el almacenamiento en superficie puede prolongar el proceso de escorrentía (Kovacs, 1978). Generalmente, las grandes crecidas de arroyos y ríos de sistemas de llanura coinciden con el ascenso de niveles freáticos (Scioli, 2016), el cual produce la saturación de áreas deprimidas, comúnmente denominadas Áreas Fuente Variables (VSAs, por su sigla en inglés), que contribuyen a generar flujo superficial cuando reciben precipitación (Dunne y Black, 1970; Chow et al., 1994; Frankenberger et al., 1999; Beven, 2011).

Dada la complejidad de los sistemas de llanura expuesta anteriormente, se considera que para conocer el estado hidrológico de estas regiones es importante el conocimiento de variables hidrológicas que expliquen la condición de exceso o defecto, las fluctuaciones de niveles freáticos, humedad del suelo y superficies cubiertas por agua (Kruse et al., 2001). En el análisis de la variación espacio temporal de la escorrentía es esencial el estudio de la dinámica espacio temporal de VSAs (Scioli, 2016). Si bien los modelos hidrológicos distribuidos físicamente basados serían los más adecuados para representar las particularidades de este tipo de sistemas, pues permiten representar la distribución espacial del agua, las características del escurrimiento y predecir el comportamiento del sistema ante situaciones normales o extremas, el balance hídrico es un paso esencial para entender el comportamiento hidrológico de una región (Kruse y Zimmermann, 2002; Scioli, 2010). Aunque la estructura de la ecuación de balance hídrico es independiente de las condiciones morfológicas, topográficas y geológicas de un sistema hidrológico dado, en las llanuras cambia la preponderancia de los componentes de la ecuación que representan los distintos procesos hidrológicos (Kovacs, 1978).

Según lo expuesto anteriormente, en esta tesis se plantearon los siguientes objetivos:

### **Objetivo general**

Contribuir al conocimiento del funcionamiento de sistemas hidrológicos de llanura contemplando el estudio de las variaciones temporales y espaciales del almacenamiento de agua superficial

### **Objetivos específicos**

- Analizar el comportamiento de las distintas componentes del balance hídrico.
- Caracterizar el comportamiento temporal y espacial de superficies de agua libre.
- Identificar la relación entre las superficies de agua libre, el sistema subterráneo y el proceso de generación de escorrentía (salvo que se indique expresamente, el sistema subterráneo en esta tesis se refiere al acuífero freático).

## 1.1 El caso de los Bajos Submeridionales

El área de estudio es la región de los Bajos Submeridionales (BBSS), uno de los sistemas de llanura más particulares de Argentina, reconocida por la presencia de zonas frecuentemente anegadas y por la existencia de numerosos cuerpos de agua superficial, entre otros rasgos. Los BBSS forman parte del Gran Chaco Americano (Bachmann et al., 2007) (Figura 1.2 a) y de la cuenca del Río Salado, afluente del Río Paraná. La región cubre aproximadamente 54 000 km<sup>2</sup> entre las provincias de Santa Fe, Chaco y Santiago del Estero (Figura 1.2 b). Es un sistema caracterizado por tener una escasa pendiente y una red de drenaje no jerarquizada. El colector final de la red de drenaje, el Arroyo Golondrinas-Calchaquí, conecta a una serie de lagunas en dirección norte-sur y solo en su tramo inferior ha desarrollado un cauce bien definido (Consejo Federal de Inversiones CFI y Provincia de Santa Fe, 2002; Iriondo, 2007; Sosa, 2012) (Figura 1.2 b).

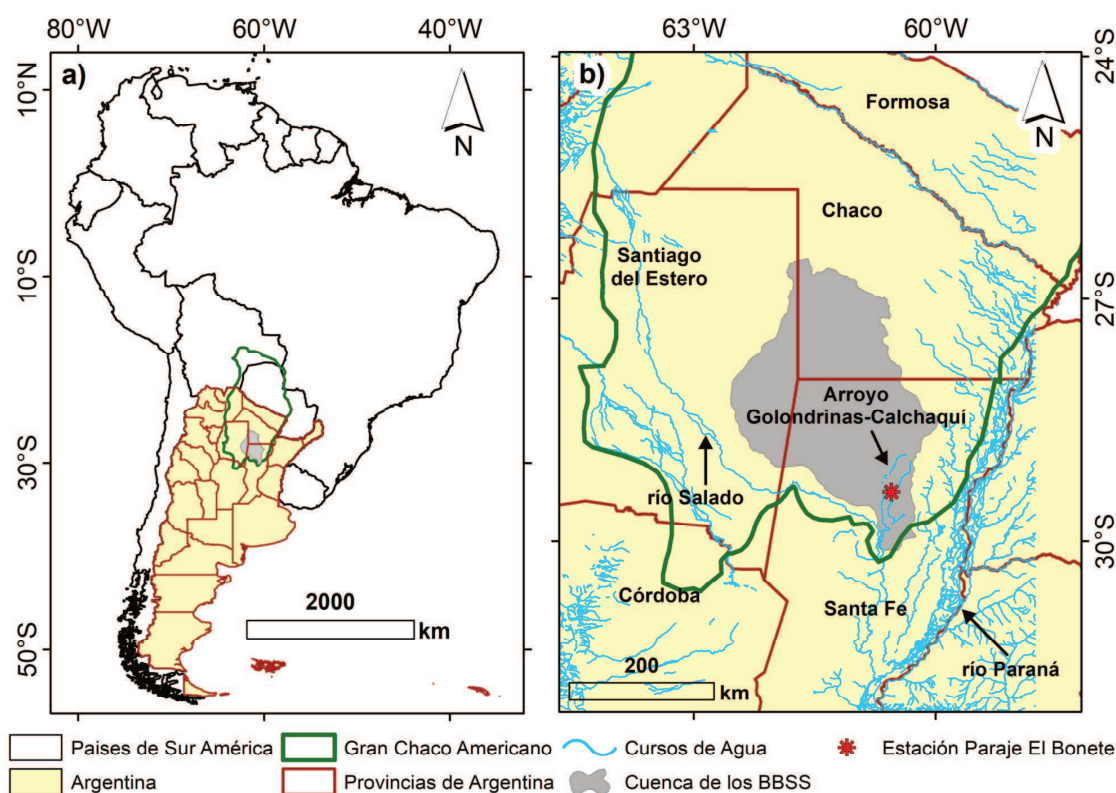


Figura 1.2. Ubicación de la cuenca de los Bajos Submeridionales.

Gran parte del área es considerada prioritaria e importante para la conservación de la biodiversidad del Gran Chaco Americano (The Nature Conservancy TNC, Fundación Vida Silvestre Argentina FVSA, Fundación para el Desarrollo Sustentable del Chaco y Wildlife Conservation Society Bolivia WCS, 2005). No obstante, la región ha experimentado una expansión de la actividad agrícola cuyos efectos no han sido lo suficientemente cuantificados. Las inundaciones recurrentes afectan extensas superficies y perjudican severamente el desarrollo de actividades socio-productivas (Figura 1.3) (Giraut et al., 2001; CFI y Provincia

de Santa Fe, 2002). Para subsanar esta problemática, en pro de aumentar el escurrimiento y por tanto disminuir los tiempos de permanencia del agua sobre la superficie, la intervención del hombre se ha visto reflejada en el desarrollo de una red significativa de canalizaciones que comenzó a desarrollarse entre los años 70 y 80 (Giraut et al., 2001; Fertonani y Scioli, 2004). Sin embargo, en áreas de llanura las canalizaciones, redes viales y las obras hidráulicas distorsionan el escurrimiento natural: las canalizaciones pueden crear gradientes hidráulicos que incluso podrían conducir el agua contra la pendiente natural (Kovacs, 1978; Kruse y Zimmermann, 2002). Algunos técnicos sostienen que en los BBSS las canalizaciones han acentuado los efectos de las inundaciones y sequías, con la consecuente salinización y degradación de los suelos (Fertonani y Scioli, 2004). No obstante, la magnitud de su influencia sobre el funcionamiento de los BBSS no es del todo conocida.



Figura 1.3. Inundación en la cuenca de los Bajos Submeridionales, Argentina (Confederaciones Rurales Argentinas CRA, 2019).

Aunque existen estudios de la región, estos han sido elaborados de forma unidisciplinar, aislada o respondiendo a objetivos específicos. Los estudios integrales de la zona son escasos y el análisis cuantitativo de variables hidrológicas es fragmentado por provincias. Hasta el momento no existe un análisis temporal/espacial de las principales variables hidrológicas con enfoque de cuenca ni un estudio sistemático del almacenamiento de agua superficial, tan relevante en zonas de llanura, que ayude a la toma de decisiones y a la gestión del recurso hídrico. Los resultados de esta tesis pretenden además contribuir al conocimiento integral de los BBSS por medio de la caracterización y análisis cuali y cuantitativo de la dinámica hídrica del mismo.

El primer objetivo específico se abordó por medio de la recopilación de información de variables hidrológicas y el análisis de su distribución espacial y temporal. Mediante la aplicación de un modelo de balance hídrico se estudió la variación temporal del almacenamiento y la contribución relativa de cada variable. Es importante mencionar que se hizo uso de la información satelital provista por la misión GRACE, la cual fue útil para analizar

la variación temporal del almacenamiento y contrastar la variación de almacenamiento obtenida por balance hídrico.

El segundo y tercer objetivo se abordaron por medio del procesamiento de una serie de imágenes satelitales. El análisis de las variaciones temporales y espaciales de la superficie de agua libre, y su relación con las variables hidrológicas más importantes, permitieron entender su comportamiento, su relación con el sistema subterráneo y su influencia en la generación de escorrentía.

## **1.2 Descripción de la estructura de la tesis**

En el Capítulo 1 se presentó una introducción general al tema, haciendo énfasis en las características hidrológicas particulares de las zonas de llanura, la problemática de la cuenca de los BBSS y la motivación para la realización de esta investigación.

En el Capítulo 2 se presenta el marco teórico de esta tesis que incluye temas como el balance hídrico, el uso de la teledetección para estudiar variables como el almacenamiento y las superficies cubiertas por agua, la identificación de periodos húmedos y secos con base en la precipitación y los mecanismos de generación de escorrentía.

En el Capítulo 3, se presenta la descripción general del área de estudio, basada en el conocimiento que existe hasta el momento sobre ella.

En el Capítulo 4 se explica la metodología aplicada para lograr los objetivos de la investigación. El capítulo ha sido subdividido en tres secciones, cada una de ellas dedicada a explicar la metodología seguida para lograr cada objetivo específico. De igual manera se organizan los resultados que se presentan en el Capítulo 5.

Por último, en el Capítulo 6 se presentan las conclusiones de la investigación y las recomendaciones para futuras investigaciones.



## Capítulo 2: Marco teórico

En este capítulo se exponen las bases teóricas necesarias para el desarrollo de esta tesis. Se abordan diferentes herramientas utilizadas para estudiar el comportamiento hidrológico de una determinada región, tales como la ecuación de balance hídrico, la estimación del almacenamiento y la detección de superficies de agua mediante teledetección, la identificación de periodos húmedos y secos con base en la precipitación. Finalmente, se describen los mecanismos de generación de escorrentía superficial.

### 2.1 El balance hídrico

El cálculo del balance hídrico de una cuenca/región constituye uno de los principales objetivos en hidrología, y sus resultados pueden contribuir para solucionar importantes problemas tanto teóricos como prácticos respecto a la distribución del agua. A partir de un estudio de balance hídrico es posible realizar una evaluación cuantitativa de los recursos de agua y sus modificaciones por efecto de la variabilidad climática o por las actividades del hombre.

El principio de conservación de masa establece que la cantidad de una sustancia conservativa que entra a un volumen de control ( $I$ ) durante un periodo de tiempo dado, menos la cantidad que sale del volumen de control ( $\emptyset$ ) durante el mismo periodo, es igual al cambio en la cantidad almacenada en el volumen ( $\Delta S$ ) durante el periodo de tiempo (Dingman, 2015) y se expresa como:

$$I - \emptyset = \Delta S \quad (2.1)$$

La expresión anterior es conocida como la ecuación de balance hídrico cuando se aplica a la masa de agua que se mueve a través del ciclo hidrológico (Dingman, 2015). Puede ser aplicada en diferentes regiones del espacio físico en diferentes escalas temporales, esto es, para 1) intervalos de corta o larga duración; 2) cuencas naturales, regiones con límites impuestos artificialmente, cuerpos o reservorios de agua y cuencas subterráneas; 3) la fase sobre la superficie del terreno, debajo de ella o para toda la fase. En su forma general, la ecuación de balance hídrico puede ser representada por la Ecuación 2.2 (Gupta, 2016):

$$P + Q_{SI} + Q_{GI} - ET - Q_{SO} - Q_{GO} - n = \Delta S \quad (2.2)$$

Donde  $P$  es la precipitación;  $Q_{SI}$  y  $Q_{GI}$  son las entradas de agua superficial y subterránea al volumen de control, respectivamente;  $ET$  es la evapotranspiración real;  $Q_{SO}$  y  $Q_{GO}$  son las salidas de agua superficial y subterránea, respectivamente; y  $\Delta S$  es la variación del almacenamiento total dentro del sistema en el intervalo de tiempo definido. Sus términos pueden estar dados en unidades de flujo ( $m^3/s$ ), de volumen ( $m^3$ ), o como lámina de agua media sobre una cuenca (mm). Generalmente, la Ecuación 2.2 no se equilibra, por ello se incluye un término residual ( $n$ ) que representa la discrepancia. Esta es causada por los errores de medición y estimación de los diferentes términos (Gupta, 2016).

En general, la precipitación y el escurrimiento son las únicas variables ampliamente medidas. En contraste, las observaciones de la evapotranspiración son muy escasas, mientras que las de infiltración generalmente están limitadas a cuencas experimentales (Dingman, 2015). Si el balance es aplicado sobre una región o cuenca, para estimar promedios areales de P es necesario considerar la densidad y la distribución espacial de las observaciones puntuales. Además, tanto el método de análisis de datos puntuales, como el método de interpolación espacial influyen en la estimación de la distribución areal de P (Gupta, 2016).

Si la escala espacial de aplicación de la Ecuación 2.2 es una cuenca hidrográfica serrana, el escurrimiento puede ser medido en un único punto, representa la respuesta hidrológica de la misma y generalmente su medición puede ser realizada de manera precisa (Dingman, 2015). No obstante, como se mencionó anteriormente, en cuencas de llanura generalmente existen múltiples puntos de salida, situación que produce una incertidumbre en la estimación del flujo total de salida.

La ET es el término que reúne a todos los procesos por los cuales el agua líquida o sólida se incorpora a la atmósfera en forma de vapor de agua. Agrupa a los procesos de evaporación desde superficies de agua libre, suelo desnudo y superficies vegetadas; el proceso transpiración vegetal; y el proceso de sublimación desde el hielo y superficies de nieve (Dingman, 2015). Es el término común tanto en el balance de masa como en el balance de energía, pues de hecho la evaporación del agua líquida requiere de energía en forma de calor latente de vaporización (Lettenmaier et al., 2015).

A diferencia del escurrimiento y P, que pueden ser medidas con una precisión adecuada, la ET es difícil de medir directamente. Las técnicas convencionales de medición en campo como los lisímetros, la relación de Bowen (BR), la covarianza de vórtices turbulentos (Eddy Covariance, EC) y el centelómetro de larga apertura (LAS) tienen limitaciones para representar la variación espacial de la evapotranspiración y su costo es elevado (Hu et al., 2015).

En áreas extensas y poco pobladas la medición temporal y espacial de variables hidrológicas es escasa y, en ese sentido, la información detectada remotamente adquiere gran relevancia. Entre las variables que pueden ser estimadas por teledetección se destacan el porcentaje y tipo de cobertura vegetal, almacenamientos en superficie, humedad del suelo, campos de precipitación, flujos de calor y evapotranspiración areal (Kruse y Zimmermann, 2002). Además, existen conjuntos de datos globales de reanálisis y sistemas de asimilación de datos que aportan valores de ET, flujo de calor latente, P, entre otras variables.

Particularmente, las estimaciones de ET obtenidas por algoritmos que usan datos satelitales (y frecuentemente combinan mediciones *in situ*) se convierten en alternativas eficaces para representar la ET a escalas regionales. Además, estos algoritmos proporcionan estimaciones independientes de ET, que antes solo eran obtenidas como la diferencia entre P y  $Q_{so}$  (Lettenmaier et al., 2015).

Las variaciones de almacenamiento son generalmente estimadas a partir del análisis de observaciones periódicas representativas de los componentes del almacenamiento superficial y subterráneo (Dingman, 2015), por ejemplo, niveles de agua subterránea y superficial.

Generalmente, las tasas de entrada y salida de agua subterránea a nivel regional se estiman de forma indirecta y en numerosas aplicaciones se desestiman dado que su magnitud puede resultar pequeña en comparación con otras componentes del balance hídrico.

Con el lanzamiento de la misión satelital GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) en 2002, ahora es posible estimar directamente la variación de almacenamiento total ( $\Delta S$ ) en escalas temporales de aproximadamente un mes para áreas extensas (Dingman, 2015; Lettenmaier et al., 2015). Entre otros usos, los datos de GRACE han permitido contrastar los valores de  $\Delta S$  obtenidos tras aplicar la Ecuación 2.2 a la fase superficial y subterránea de una cuenca hidrográfica. Ejemplo de ello son los trabajos realizados por Oliveira et al. (2014), Valladares (2014), y Moreira et al. (2019), entre otros. En la sección siguiente se explica en más detalle la información provista por GRACE.

### **2.1.1 Variación de almacenamiento**

El campo de gravedad de la Tierra es originado por la distribución de la masa sólida y por la distribución de la masa de fluidos (masa de la atmósfera y masa de agua superficial y subterránea) (Tapley et al., 2004). Los instrumentos de medición de la misión satelital GRACE y GRACE-FO (Follow on) detectan las variaciones espacio temporales del campo de gravedad terrestre, las cuales son causadas por la redistribución de masa dentro de la Tierra y sobre su superficie (Wahr et al., 1998; Cooley et al., 2019). La mayoría de los cambios mensuales del campo de gravedad pueden ser atribuidos a los cambios en el almacenamiento de agua en reservorios hidrológicos, al movimiento de la masa oceánica, atmosférica, hielo terrestre y a los intercambios de masa entre esos compartimientos del sistema terrestre (Cooley et al., 2019).

Los productos de nivel 2 de procesamiento de GRACE proveen el conjunto de coeficientes de la solución de la ecuación diferencial del campo de gravedad exterior del sistema terrestre. Los productos de nivel 3 surgen de la aplicación de varios pasos para transformar las variaciones del campo potencial de gravedad (nivel 2) a cambios en la distribución de masa (Cooley et al., 2019).

Las grillas mensuales oceánicas y terrestres de nivel 3, conocidas como mascon (Bloques de concentración de masa), vienen dadas en unidades de altura de agua equivalente o LWET (por su sigla en inglés Liquid Water Equivalent Thickness) y representan las anomalías de la masa en términos de extensión vertical de agua (cm) (Cooley et al., 2019). La altura de agua equivalente es una representación del espesor de agua que debería ser removido o agregado a la superficie terrestre para causar la variación total observada en el campo de gravedad (Seitz et al., 2008).

Las variaciones de alta frecuencia, causadas por la atmósfera, son eliminadas durante el procesamiento de nivel 2, por ende, los datos de nivel 3 no contienen la variabilidad de la masa atmosférica sobre áreas terrestres (Cooley et al., 2019). Después de descontar los efectos atmosféricos, la señal restante está relacionada principalmente con el almacenamiento de agua terrestre (TWS por su sigla en inglés: Terrestrial water storage) (Landerer y Swenson, 2012). Este se compone se compone del almacenamiento de agua subterránea ( $S_{sub}$ ); en la zona no

saturada ( $S_{zns}$ ); en ríos, superficies de agua y vegetación ( $S_{sup}$ ); en forma de nieve ( $S_{nieve}$ ) y en forma de hielo ( $S_{hielo}$ ), y puede expresarse según la Ecuación 2.3:

$$LWET = TWS = S_{sub} + S_{sup} + S_{zns} + S_{hielo} + S_{nieve} \quad (2.3)$$

Las grillas mascon proporcionan las anomalías de la masa relativas a un tiempo base de promediación 2004-2009, su discretización temporal es de uno o dos meses aproximadamente. Dichas grillas vienen dadas a una resolución espacial de 0.5 grados de longitud de arco (56 km en el ecuador), sin embargo, es importante mencionar que la resolución original de GRACE es de 3 grados de longitud de arco. Esto significa que celdas vecinas no son independientes y por el contrario están altamente correlacionas; son esencialmente un nuevo muestreo de la misma observación. Por ello, en áreas de estudio de menos de 100 000 km<sup>2</sup> (aproximadamente) la relación señal/ruido puede ser pobre, y los errores deben ser cuidadosamente evaluados (Cooley et al., 2019).

Además de los errores heredados del procesamiento de nivel 2, la incertidumbre de los productos de nivel 3 es función tanto de los errores de medición como de los errores de fuga de señal (Landerer y Swenson, 2012). Para reducir los errores de medición, que incluyen errores sistemáticos y aleatorios, se aplican filtros de suavizado gaussiano y de correlación, respectivamente. Si bien estos filtros eliminan de una manera satisfactoria el error correlacionado, se ha demostrado que eliminan las señales geofísicas reales que imitan el patrón del error (Cooley et al., 2019).

Para restaurar la señal eliminada en el proceso de filtrado, Landerer y Swenson (2012) desarrollaron un conjunto global de factores de ganancia para uso en aplicaciones de hidrología continental (Cooley et al., 2019). Estos factores de ganancia son adimensionales e invariantes en el tiempo y junto con los datos mascon se encuentran disponibles en: <https://podaac-tools.jpl.nasa.gov/drive/files/allData/tellus/retired/L3/grace/mascon/RL06/JPL/v01/CRI/netcdf>. Los factores de escala o ganancia grillados se basan en variaciones simuladas del almacenamiento de agua y son independientes de las observaciones reales de GRACE. Su propósito es extrapolar los datos de GRACE a escalas espaciales más finas que los satélites GRACE actuales no resuelven bien (Landerer y Swenson, 2012). Luego de comparar algunos promedios de cuencas fluviales, tanto grandes como pequeñas, estos autores concluyen que los factores de ganancia grillados son una alternativa viable al enfoque de escala de cuenca. Aun así, podrían introducir sesgos y podrían ser necesarios factores de ganancia adicionales y personalizados (Cooley et al., 2019).

La guía de usuario sugiere el uso de los datos mascon por varias razones. Una de ellas es que no necesitan ser suavizados y sufren menos errores de fuga que los productos de nivel 2. Además, en el cálculo de promedios de cuencas para aplicaciones hidrológicas las soluciones mascon suelen tener una mejor resolución para regiones espaciales más pequeñas (Cooley et al., 2019).

## 2.2 Detección de superficies cubiertas por agua

La detección y mapeo de superficies afectadas por agua es una de las aplicaciones clásicas de la teledetección, el entendimiento de la interacción de la energía electromagnética con los cuerpos de agua hace posible su detección y el monitoreo de sus variaciones espaciales y temporales (Di Bella et al., 2008; Ji et al., 2009; Schumann, 2015). Esto cobra especial importancia en estudios hidrológicos; los datos obtenidos por sensoramiento remoto pueden ser integrados con modelos, ya sea para su calibración o validación, o para sistemas de asimilación de datos (Schumann, 2015).

Ejemplo de su uso para validación de modelos, es el realizado por Scioli (2016) en la cuenca de llanura del Arroyo Santa Catalina (Partido de Azul, Provincia de Buenos Aires, Argentina). El autor encontró una correspondencia adecuada entre los mapas de áreas saturadas obtenidos usando imágenes Landsat, y los mapas obtenidos con modelación hidrológica distribuida utilizando el modelo MIKE SHE. De igual manera, García et al. (2018) utilizaron imágenes Landsat para contrastar los mapas obtenidos con el modelo MIKE SHE en la cuenca sur del río Salado Bonaerense. No obstante, la cartografía de superficies inundadas no sólo encuentra aplicación en los modelos hidrológicos, sino que también proporciona valiosa información para evaluar los peligros y extensión de las inundaciones, proporcionando herramientas a los planificadores y a las instituciones de manejo de desastres una metodología práctica y costo-efectiva para identificar llanuras de inundación, y otras áreas susceptibles, y evaluar el grado del impacto del desastre.

Existen numerosas técnicas de procesamiento de información teledetectada así como tipos de sensores que permiten obtener información sobre las superficies afectadas por agua, estos pueden captar el espectro del rango visible, térmico y de microondas del espectro electromagnético (Schumann, 2015). Los sensores de microondas activos y pasivos tienen la capacidad de captar longitudes de onda que penetran las nubes y las copas de los árboles. En contraste, los sensores pasivos, que captan el espectro visible e infrarrojo, se ven afectados por las condiciones atmosféricas y por la presencia de vegetación densa. Aun así, estos últimos son los más accesibles y su interpretación es más directa (Ji et al., 2009).

De acuerdo al número de bandas utilizadas, los métodos para extraer información sobre el agua en superficie pueden dividirse en dos categorías, multibanda o de banda única. A través del análisis de las características espectrales de las superficies de interés, uno de los enfoques utilizados en el método multibanda consiste en aprovechar las diferencias reflectivas de las bandas involucradas (Xu, 2006). Así, mediante una operación aritmética entre éstas se produce una banda artificial que permite mejorar la discriminación del aspecto temático de interés, en este caso el agua (Chuvienco, 1995). Posteriormente, de acuerdo a las características espectrales de las coberturas se establece un umbral adecuado para separar o extraer las superficies de agua (Ji et al., 2009).

Ejemplos de este enfoque son el NDWI (Normalized Difference Water Index) propuesto por McFeeters (1996), el MNDWI (Modification of Normalised Difference Water Index,

(Ecuación 2.4) propuesto por Xu (2006), el NDPI (Normalized Difference Pond Index) propuesto por Lacaux et al. (2007), entre otros.

$$MNDWI = \frac{GREEN-SWIR}{GREEN+SWIR} \quad (2.4)$$

Donde, GREEN corresponde a la banda verde del espectro electromagnético que abarca el rango de 0.52 - 0.60  $\mu\text{m}$  de longitud de onda y SWIR al infrarrojo de onda corta que abarca el rango de 1.55 - 1.75  $\mu\text{m}$  de longitud de onda.

Es importante hacer una distinción entre el NDWI propuesto por McFeeters (1996) y el NDWI propuesto por Gao (1996) (Ecuación 2.5). Aunque fueron designados bajo la misma terminología, son conceptualmente diferentes; mientras el NDWI de McFeeters (1996) involucra bandas del visible (GREEN) y del infrarrojo cercano (NIR), el NDWI de Gao (1996) involucra a bandas del NIR y SWIR. El NDWI de Gao (1996) es un índice complementario al NDVI, fue propuesto para la detección remota de agua líquida en la vegetación. En general, los índices que involucran bandas del infrarrojo cercano (NIR) y del SWIR permiten monitorear el contenido de agua de la vegetación, mientras que los que relacionan las bandas del visible con el NIR/SWIR han sido propuestos para la detección de superficies de agua (Boschetti et al., 2014; Li et al., 2015).

$$NDWI_{GAO} = \frac{\rho(0.86\mu\text{m})-\rho(1.24\mu\text{m})}{\rho(0.86\mu\text{m})+\rho(1.24\mu\text{m})} \quad (2.5)$$

Donde  $\rho$  es la reflectancia en las longitudes de onda de 0.86 y 1.24  $\mu\text{m}$ .

El MNDWI propuesto por Xu (2006) ha sido ampliamente utilizado, numerosos estudios que comparan la capacidad de diferentes índices en la detección de superficies de agua han mostrado que es adecuado y confiable (Ji et al., 2009, Boschetti et al., 2014; Ogilvie et al., 2015; Ogilvie et al., 2018, entre otros). El MNDWI puede tomar valores entre -1 y 1, las superficies de agua libre toman valores positivos dado que el agua refleja mayor cantidad de energía en el GREEN que en el SWIR; por lo tanto, GREEN-SWIR es positivo. Las áreas urbanizadas, superficies vegetadas y el suelo toman valores negativos, pues reflejan mayor cantidad de energía en el SWIR que en el GREEN (Xu, 2006).

Aunque índices como el NDWI (McFeeters, 1996) y el MNDWI por definición utilizan al 0 como el valor del umbral sobre el cual se extraen las superficies con agua, la mayor dificultad en el uso de este tipo de índices es la determinación de umbrales que permitan realizar una separación adecuada y precisa de los píxeles de agua pura, mixtos y otras coberturas (Ji et al., 2009). Por ejemplo, Xu (2006) usando imágenes Landsat obtuvo la mayor precisión al tomar al 0 como umbral de MNDWI para extraer en una única clase las superficies de agua del lago Bayi. Sin embargo, en otras zonas las mayores precisiones fueron logradas mediante un ajuste manual del umbral. Con valores de 0.09 y 0.07 de MNDWI, el autor extrajo de forma más precisa las superficies de agua alrededor de la ciudad de Xiamen y del río Min, respectivamente.

La presencia de píxeles mixtos, es decir, de aquellos que presentan dos o más clases de cobertura con superficies inferiores a la superficie del píxel, se encuentra relacionada con la heterogeneidad de la cobertura de la superficie y con la resolución espacial de la imagen. Si se pretende extraer superficies de agua a partir de una imagen de MNDWI de alta resolución, es posible distinguir con mayor facilidad la presencia de dos únicas clases: píxeles con agua y píxeles sin agua. Sin embargo, cuando se usan imágenes de MNDWI de resolución gruesa, los píxeles mixtos adquieren relevancia y se pueden tener dos tipos de clase de agua: agua pura o agua mixta. En ese caso, es recomendado el uso conjunto de imágenes de resolución más fina para calibrar los valores de los umbrales a utilizar, los cuales permitirían diferenciar los píxeles de agua pura, píxeles mixtos y píxeles sin agua (Ji et al., 2009).

Por ejemplo, Ferral et al. (2019) encontraron que en el humedal de Mar Chiquita (Argentina), de acuerdo al MNDWI obtenido con imágenes Landsat 5 y 8, los píxeles de agua mixta constituyen una fracción importante de la superficie total cubierta por agua, principalmente, en los años en los que se registraron los niveles mínimos en la laguna. Los autores identificaron valores del umbral de MNDWI para detectar píxeles sin agua, píxeles mixtos y píxeles de agua pura y validaron sus resultados con el uso de imágenes de alta resolución (SPOT5-HGR).

Ogilvie et al. (2015) identificaron el umbral más adecuado realizando matrices de confusión entre imágenes Landsat clasificadas e imágenes de agua/no-agua de menor resolución, específicamente imágenes de agua/no-agua obtenidas con diferentes umbrales de MNDWI de imágenes MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer). Así, identificaron que el umbral de -0.34 produjo los menores errores de omisión y comisión en la separación del agua de las otras coberturas, y lo utilizaron sobre una serie temporal de imágenes MODIS del delta interior del río Niger.

Si la clase que interesa es definida como agua mixta (fracción de agua inferior al 100% del píxel), el valor de un índice para detección de agua (como el MNDWI, NDWI, NDPI) estaría influenciado por las proporciones de otras clases presentes. Por lo tanto, el valor del umbral no es constante, depende de las proporciones de las otras coberturas presentes dentro del píxel y debería ser ajustado en función de ello. Mientras que, si la clase de agua que interesa es definida como agua pura (100% de cobertura dentro del píxel) es apropiado usar un umbral único. Ji et al. (2009) encontraron que cuando la banda del SWIR, utilizada para calcular el MNDWI, se encuentra entre 1.2 y 1.8  $\mu\text{m}$  el umbral es menos sensible a la variación de las proporciones de otras coberturas y obtuvieron valores de umbrales de MNDWI para extraer píxeles de agua pura y píxeles de agua mixta (Fracción de agua de 25, 50 y 75%) con diferentes fracciones de suelo y vegetación. Sin embargo, los umbrales analizados en su trabajo se basaron en datos de una biblioteca espectral, por lo tanto, no deben ser aplicados directamente a imágenes satelitales. Estos pueden ser tomados como valores iniciales para luego ser calibrados con datos de referencia.

## **2.3 Identificación de periodos secos y húmedos**

En la cuenca de los BBSS se presentan periodos climáticos extremos de diferente duración que se expresan como grandes acumulaciones de agua sobre la superficie y como extensas zonas

afectadas por falta de agua durante las sequías. Ambos extremos afectan de diferente manera a las actividades productivas, a la población y a los demás servicios ecosistémicos de la región.

Para identificar y cuantificar dichos periodos varios índices han sido desarrollados. Estos pueden ser calculados en función de diferentes variables climáticas, por ejemplo, el SPI (Standardized Precipitation Index) propuesto por McKee et al. (1993) considera únicamente a la precipitación. En cambio, el SPEI (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index) y el PDSI (Palmer Drought Severity Index) además de la precipitación tienen en cuenta a la temperatura (Vicente Serrano et al., 2012). Aunque en un principio fueron desarrollados para cuantificar la sequía, también permiten cuantificar los periodos húmedos.

El SPI, recomendado por la Organización Meteorológica Mundial OMM (2012) para el monitoreo de sequías, se calcula ajustando un registro de precipitación mensual (preferiblemente de 30 años o más) a una función Gamma, estableciendo así una relación entre la precipitación y la probabilidad. Luego, se transforma a una función de densidad de probabilidad distribuida normalmente (media 0 y desviación estándar de 1) (McKee et al., 1993). Al estar distribuido normalmente, los valores positivos de SPI indican precipitaciones superiores al valor de la media y los valores negativos indican precipitaciones inferiores a la misma (OMM, 2012).

El periodo de tiempo sobre el cual se acumulan los déficits/excesos de precipitación impacta de manera diferente al almacenamiento en los diferentes reservorios hidrológicos, por ejemplo, las sequías agrícolas (humedad del suelo) son causadas por un déficit de precipitación en un periodo de tiempo más corto que las sequías hidrológicas (aguas subterráneas, corrientes y reservorios) (McKee et al., 1993). En ese sentido, una de las mayores ventajas del SPI es que puede ser calculado para diferentes escalas temporales, comúnmente, para escalas de 3, 6, 12, 24 y 48 meses. Aunque son definidas arbitrariamente, permiten identificar el efecto del déficit/exceso en los diferentes reservorios hidrológicos (humedad del suelo, agua subterránea, almacenamiento en depresiones, flujo superficial y nieve).

Los periodos de sequía inician cuando el valor del SPI cae por debajo de 0 y terminan con el valor positivo de SPI después de haber llegado a tomar un valor menor o igual a -1 (McKee et al., 1993), el mismo criterio se aplica para identificar el inicio y fin de los periodos húmedos. Según esto, la duración de un evento húmedo o seco estaría dada por la diferencia en meses entre dos cruces por 0 después de haber alcanzado el umbral de 1 o -1, respectivamente (Krepper y Zucarelli, 2010). El SPI además permite determinar la intensidad máxima de la sequía/humedad de acuerdo a las categorías que se muestran en la Tabla 2.1.



$\geq 2$	Extremadamente Húmedo
1.5 a 1.9	Muy Húmedo
1 a 1.49	Moderadamente Húmedo
0.99 a -0.99	Normal o Aproximadamente normal
-1 a -1.49	Moderadamente Seco
-1.5 a -1.99	Severamente Seco
$\leq -2$	Extremadamente Seco

Tabla 2.1. Intensidad de la sequía/humedad según valor de SPI (OMM, 2012).

## 2.4 Mecanismos de generación de escorrentía

La transformación de la precipitación en el escurrimiento que se observa en una red de drenaje puede darse mediante el flujo superficial, el flujo subsuperficial o ambos. La generación de flujo superficial puede describirse mediante dos modelos conceptuales: el flujo superficial hortoniano y el flujo superficial de saturación. El primero de ellos, también llamado flujo superficial por exceso de infiltración, es aquel que se produce cuando la intensidad de lluvia excede la capacidad de infiltración del suelo, el cual se satura desde arriba mediante infiltración. En contraste, el flujo superficial de saturación se produce cuando la precipitación cae sobre el suelo saturado, a diferencia del flujo superficial hortoniano, la saturación se produce desde abajo por el flujo subsuperficial (Chow et al., 1994). La zona de saturación puede darse desde el basamento o por encima de una capa impermeable (Beven y Kirkby, 1979).

El flujo superficial hortoniano, el flujo superficial de saturación o el flujo subsuperficial pueden ocurrir en la misma cuenca en diferentes momentos y lugares, ya sea por las condiciones antecedentes, las características del suelo o las características de la precipitación (Beven, 2011). Debido a la variabilidad espacial de la capacidad de infiltración, del estado de humedad antecedente y de la precipitación, en cuencas naturales el flujo superficial hortoniano no se produce necesariamente sobre la totalidad del área (Figura 2.1 a). Betson (1964) señala que el área que contribuye a la escorrentía con flujo superficial hortoniano puede ser sólo una parte de la cuenca, a la que denomina área parcial (Figura 2.1 b).

De igual manera, las áreas que contribuyen al flujo superficial de saturación, generalmente, se ubican en la parte inferior de las pendientes de laderas, en áreas deprimidas del paisaje y/o en suelos delgados con baja capacidad de almacenamiento (Figura 2.1 c). Estas áreas, comúnmente denominadas Áreas Fuente Variable (VSAs por su sigla en inglés), pueden considerarse como una extensión de la red de drenaje, presentan tamaño variable durante el desarrollo de una determinada tormenta, se expanden durante el humedecimiento y se contraen con posterioridad a la lluvia (Dunne y Black, 1970; Chow et al., 1994; Frankenberg et al., 1999; Beven, 2011). Este mecanismo de generación de crecidas es típicamente no lineal, ya que el área efectiva de aportes varía con el tiempo (Frankenberg et al., 1999).

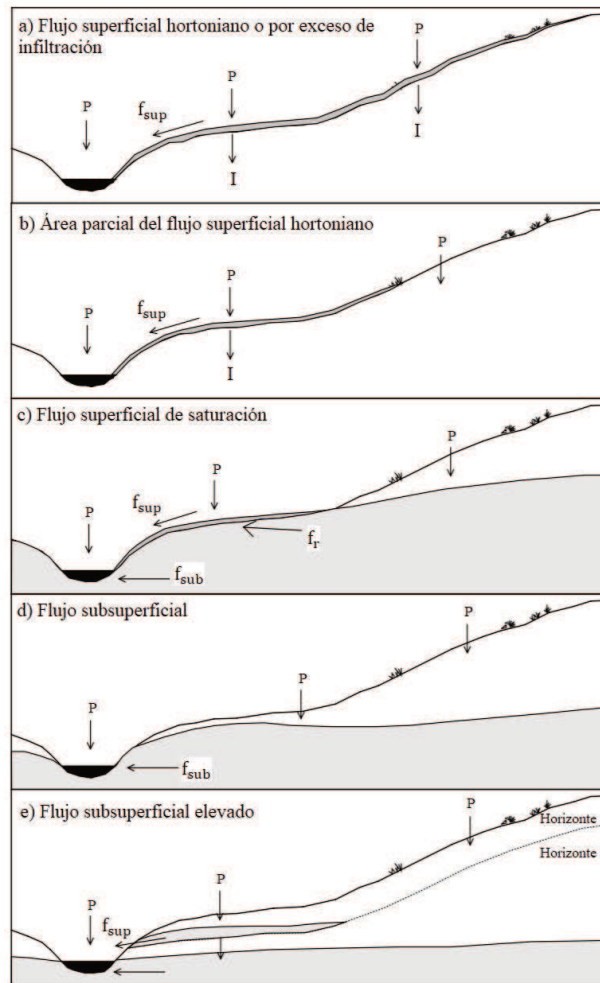


Figura 2.1. Clasificación de mecanismos de respuesta de laderas a la precipitación donde: P es la precipitación; I, infiltración;  $f_{sup}$ , flujo superficial;  $f_{sub}$ , flujo subterráneo; y  $f_r$ , flujo de retorno (Beven, 2011).

Debido a sus bajas velocidades, a excepción de circunstancias especiales, el flujo subsuperficial (Figura 2.1 d) por sí solo no contribuye en forma significativa a transformar directamente la precipitación a flujo en canal (Chow et al., 1994). Como se observa en la Figura 2.2, si bien en zonas escarpadas el flujo subsuperficial domina volumétricamente el hidrograma, los picos son producidos por el flujo superficial de saturación y la precipitación directa. Cuando el flujo subsuperficial se produce sobre un horizonte de suelo relativamente impermeable es denominado como flujo subsuperficial elevado (Figura 2.1 e).

En las regiones vegetadas y húmedas la actividad biológica y el contenido de materia orgánica y de raíces mejoran la estructura del suelo. Además, la vegetación protege el terreno del impacto de las gotas de lluvia. Generalmente, bajo tales condiciones, las intensidades de lluvia no exceden la capacidad de infiltración y la ocurrencia del flujo superficial hortoniano es rara. Factores como la topografía y las características del suelo determinan la dominancia del flujo superficial de saturación sobre el flujo subsuperficial, de modo que la importancia del flujo subsuperficial en el hidrograma aumenta en zonas escarpadas (Figura 2.2). Por ejemplo, Scioli

(2016), en una cuenca de llanura, concluye que cuando los niveles freáticos se encuentran a menos de 2 m de la superficie, se satura el perfil de suelo en las zonas bajas del paisaje y el flujo de saturación predomina. En cambio, cuando la profundidad del nivel freático (NF) supera los 2 m, generalmente, solo las precipitaciones de elevada intensidad generan escurrimiento, siendo el flujo superficial hortoniano el que predomina.

Por último, en las regiones áridas y semiáridas la capacidad de infiltración es un factor limitante y el flujo superficial hortoniano es el mecanismo dominante en la generación de escorrentía. También sería válido en superficies urbanas impermeables, en zonas con suelos poco profundos y con baja capacidad de infiltración (Chow et al., 1994).

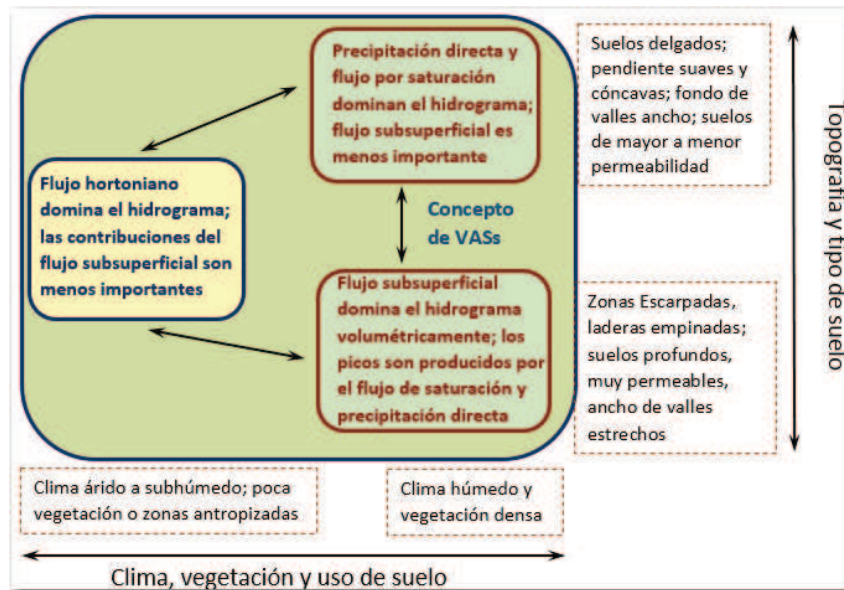


Figura 2.2. Incidencia del clima, vegetación, topografía, uso y tipo de suelo sobre los mecanismos de generación de escorrentía (Dunne y Leopold, 1978).

## Capítulo 3: Descripción del área de estudio

### 3.1 Ubicación y límite

El área de estudio (BBSS) constituye una extensa zona de llanura ubicada en el Chaco Austral, sector argentino del Gran Chaco Americano (Figura 1.2 a). El Chaco Austral es una zona poco a moderadamente poblada, cálida y semiárida en el Oeste (O; Chaco Seco) y húmedo a sub-húmedo en el Este (E) (Maldonado y Höhne, 2006). Su pendiente regional desciende de O a E, con un drenaje generalmente deficiente y una amplia combinación de condiciones físicas (Morello et al., 2012).

Los BBSS constituyen un sistema complejo, de muy escasa pendiente, con un gradiente topográfico algo menor a 1% en la mayor parte de su extensión. Las características propias de los sistemas de llanura dificultan la definición de divisorias de aguas, las que generalmente se definen a partir de consideraciones prácticas, asumiendo que los límites son aproximadamente constantes cuando en realidad pueden variar (Usunoff, 2009). Según los criterios adoptados, existen diferentes definiciones del límite de los BBSS. En la Figura 3.1 se muestran algunos de ellos publicados para la región de los BBSS delineados por: a) Giraut et al. (2001), disponible en el Atlas Digital de los Recursos Hídricos Superficiales de la República Argentina (SsRH, 2010) y correspondiente a la llamada Cuenca 22; b) Instituto Nacional del Agua INA y Servicio Provincial de Agua Rural SPAR (2002), que define la cuenca de los BBSS aportante al río Salado; c) Equipo Técnico Interdisciplinario Bajos Submeridionales ETIBS (2019), que muestra una zonificación por ambientes homogéneos en el sector santafesino de los BBSS, y d) FVSA y FUNDAPAZ (2007) que corresponde al “área de los Bajos Submeridionales”, a la que los autores asignan el carácter de humedal.

El límite de cuenca utilizado en esta tesis (Figura 1.2 a), difiere de la delimitación oficial de la Cuenca 22 (Giraut et al., 2001). El mismo fue definido fusionando el sector que las provincias de Santa Fe, Santiago del Estero y Chaco le atribuyen en sus respectivas jurisdicciones a la cuenca hidrográfica de los BBSS, según los mapas de cuencas de cada provincia elaborados por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación. Conceptualmente, abarcaría la cuenca “natural”, sin considerar los trasvases de agua que en sector norte se producirían en condiciones extremas a través del Sistema Línea Paraná y Línea Tapenagá, descritos más abajo. Según el límite considerado, la cuenca superficial de los BBSS cubre 53 824 km<sup>2</sup>, de los cuales 26 763 km<sup>2</sup> pertenecen a la provincia de Santa Fe; 15 565 km<sup>2</sup>, a la provincia de Chaco; y 11 496 km<sup>2</sup>, a la provincia de Santiago del Estero.

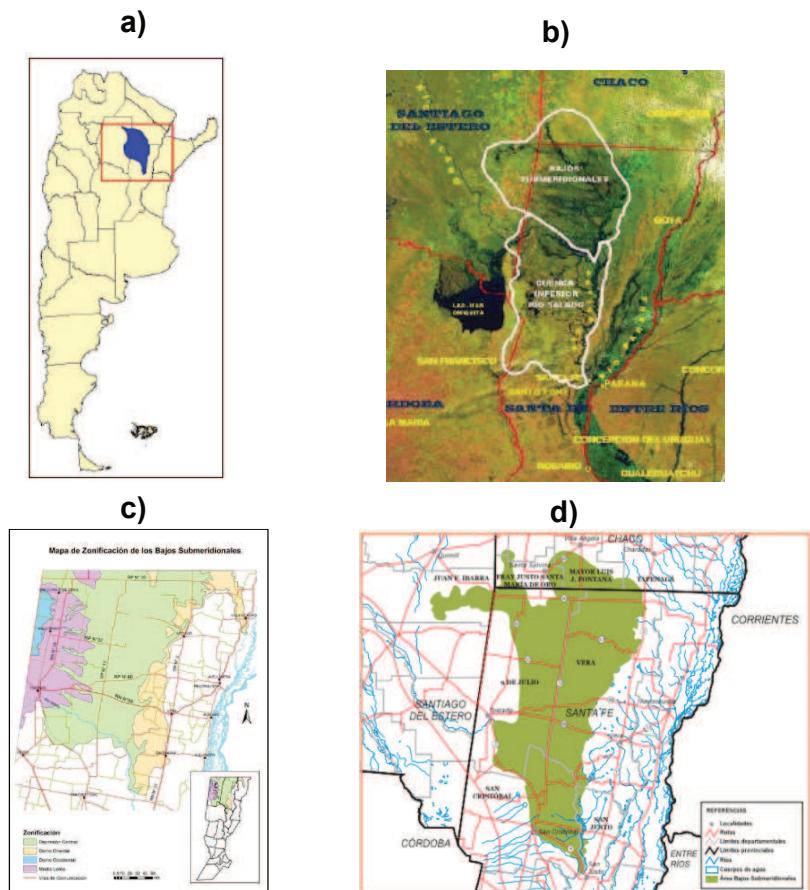


Figura 3.1. Cuenca o región de los Bajos Submeridionales según: a) Giraut et al. (2001), b) INA y SPAR (2002), c) Secretaría de Gobierno de la Prov. de Santa Fe (2019) y d) FVSA y FUNDAPAZ (2007).

### 3.2 Geología y geomorfología

Los BBSS forman parte de una gran cuenca sedimentaria asentada sobre depósitos de cientos de metros de espesor. Más precisamente, forman parte de la planicie distal del mega-abanico fluvial del río Salado-Juramento (Figura 3.2) (Thalmeier et al., 2021a). El mismo se encuentra dentro de la provincia geomorfológica del Gran Chaco Argentino, una extensa llanura con fuerte identidad morfo-sedimentológica que pertenece a la provincia geológica Llanura Chacopampeana (Brunetto et al., 2014; Thalmeier et al., 2018).

La provincia geológica, también llamada cuenca de la Llanura Chacopampeana, constituye un sector importante de la planicie distal del piedemonte Andino Central. A escala regional, presenta una sucesión sedimentaria que se depositó sobre un basamento conformado por grandes depocentros o cubetas separadas por altos o dorsales. Esta sucesión sedimentaria y la configuración del basamento registran diversos eventos geológicos ocurridos en diferentes épocas. Las orientaciones de los rasgos estructurales del basamento son Noreste (NE)-Suroeste (SO), similares y coherentes con otros rasgos mayores de la geología argentina (Peri, 2012).

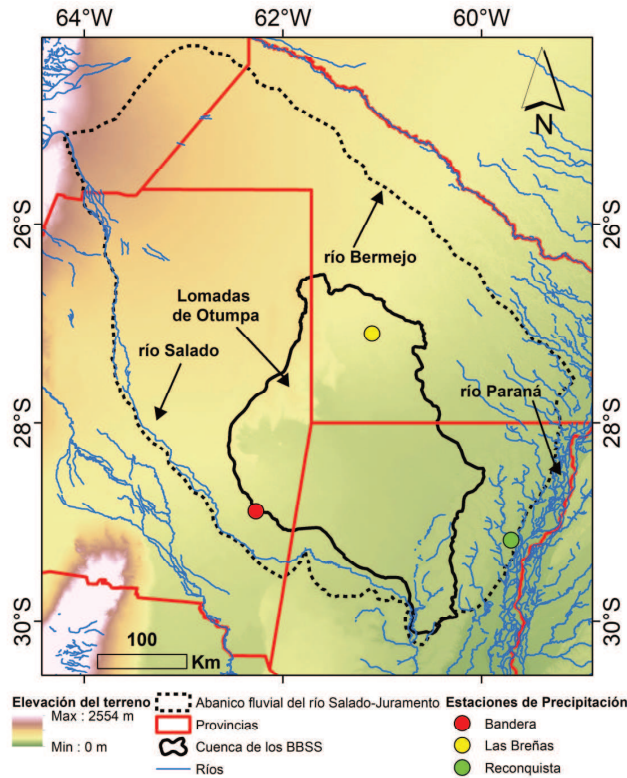


Figura 3.2. Límite de la cuenca de los BBSS en el mega-abanico fluvial del río Salado-Juramento (Modificado de Thalmeier et al., 2021a). El modelo digital de elevación del terreno corresponde a Shuttle Radar Topography Mission- SRTM (Farr et al., 2007). Bandera, las Breñas y Reconquista corresponden a estaciones meteorológicas del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).

En el Plioceno comienzan a desarrollarse los mega-abanicos aluviales chaqueños a partir del ascenso de las Sierras Subandinas (Iriondo, 2010). Dentro del gran abanico se destaca la morfoestructura de las Lomadas de Otumpa (Rossello y Bordarampé, 2005; ver ubicación en Figura 3.2), que constituyen estribaciones suaves del relieve que se vinculan espacialmente con estructuras antiguas del subsuelo. El cauce del río Salado-Juramento en sus comienzos escurría en sentido Noroeste (NO)-Sureste (SE), pero luego migró hacia el SO, formando una planicie fluvial de gran dimensión. Peri (2012) infiere que el río Salado habría sido antecedente a las Lomadas de Otumpa y que posteriormente, por pérdida en la capacidad de transporte y competencia y/o reactivaciones estructurales que generaron un suave levantamiento del relieve, se produjo el desvío del cauce con la posterior migración hacia niveles topográficos más bajos. Sin embargo, no existen evidencias geomorfológicas y estratigráficas que sugieran el tiempo de levantamiento de las lomadas (Thalmeier et al., 2021a). Estas constituyen el límite mejor definido de la cuenca superficial al NO.

Mediante análisis de imágenes satelitales, Peri (2012) y Thalmeier et al. (2021a) identificaron y mapearon numerosos paleocauces transversales a las lomadas. Los paleocauces en diferentes sectores de los BBSS han sido identificados también por Sosa et al. (2001). El mega-abanico tiene su ápice en Salta y mide aproximadamente 650 km de longitud por 150 km de ancho en

su parte distal (Figura 3.2). Su límite Nor-Noreste (NNE) se encuentra enmascarado por el mega-abanico fluvial del Bermejo debido a los derrames e interdigitaciones de ambos sistemas. Lo mismo ocurre con su límite Sur-Suroeste (SSO) con el sistema del río Dulce (Thalmeier et al., 2021a).

En el Terciario, la región de los BBSS fue el lecho de un gran mar interior al que le sucedieron lagunas saladas, que en el Cuaternario emergió parcialmente, sedimentándose arenas fluviales y clastos limo-arcillosos (Iriondo, 1987; Kröhling e Iriondo, 2003). La acción tectónica configuró su límite E y SE, umbral del río Salado, que recibe la descarga del sistema a través del Arroyo Golondrinas-Calchaquí (Iriondo, 2011). El Cuaternario está representado por una variada distribución y extensión litológica, producto de las interdigitaciones de los mega-abanicos en el sector Norte (N) de los BBSS, a la propia complejidad sedimentológica/estratigráfica de los abanicos, a los diferentes modelos de sedimentación y transporte eólicos, entre otras causas.

La formación (Fm.) Ituzaingó, de extensión restringida y vinculada a la dinámica del río Paraná, está formada por arenas finas intercaladas con estratos de limos que corresponden al Plioceno-Cuaternario. Coetáneamente, inician en el Plioceno y se desarrollan en todo el Cuaternario, los mega-abanicos aluviales cuyo desarrollo se vio influenciado por periodos de sequía extrema o muy húmedos (Iriondo, 2010). En el Pleistoceno Superior ocurren procesos periglaciares y glaciares, correspondientes a la última Máxima Glaciación. Se depositan cuerpos de loess con cuarzo e illita dominantes y vidrio volcánico, interestratificado con los sedimentos aluviales del mega-abanico del Salado-Juramento (Iriondo, 1990). La Fm. Urundel representa este periodo y se extiende por todo el Chaco Occidental. Se correlaciona con las formaciones Tezanos Pinto, Fortín Tres Pozos, Río Bermejo (Iriondo, 2010).

Según Iriondo (2010), la Fm. Fortín Tres Pozos se extiende en el centro del Chaco Austral, en la depresión de los BBSS. Presenta una granulometría limo-arcillosa, facies de loess típico, palustres verdes y castañas, y facies limosas con carbonatos de calcio y locales de arena. Suprayacen a esta formación, los Sedimentos Palustres Superficiales, depósitos eólicos-lacustres, arcillo-limosos y arcillosos con concreciones de carbonato de calcio (Thalmeier et al., 2018).

En la sección distal del mega-abanico fluvial del Salado-Juramento, donde se encuentran los BBSS, son comunes los pantanos permanentes o esteros y los temporarios o bañados (Iriondo, 2007; Thalmeier et al., 2021a). Esta sección se caracteriza por presentar una pendiente extremadamente baja y estar conformada por materiales de muy baja permeabilidad, es decir, sedimentos limo-arcillosos de características palustres que presentan un significativo porcentaje en coloides. El ambiente es típico de humedales distales de abanicos aluviales. Los grandes bañados y esteros están vinculados a un clima subhúmedo a húmedo. Existen lagunas someras interconectadas por el Arroyo Golondrinas-Calchaquí, numerosas hoyas de deflación de 200 a 500 m de diámetro con cuerpos de agua permanentes o semi-permanentes y paleocauces. El ambiente de sedimentación de esta unidad fue principalmente palustre, y en menor medida, se encuentran fajas de origen fluvial, ambiente típico de zonas distales de abanicos aluviales (Iriondo, 2007).

### 3.3 Clima

Si bien el análisis detallado de la precipitación P y la evapotranspiración real ET son motivo de esta investigación (ver Capítulos 4 y 5), se presentan aquí algunos rasgos que caracterizan el clima de la región, que han sido documentados por diversos autores. La información analizada en tres estaciones del INTA (ver ubicación en la Figura 3.2) fue obtenida del portal <http://siga.inta.gob.ar/>.

La región se incluye dentro del tipo climático mesotermal subhúmedo húmedo (Morello et al., 2012). La precipitación media anual de la cuenca es algo menor a 1000 mm, aunque su magnitud crece de O a E a una tasa aproximada de 166 mm cada 100 km. A saber, en la estación INTA Reconquista (altitud 42 msnm), ubicada en el extremo E aunque fuera de los límites de la cuenca, la precipitación media anual es 1251 mm (serie 1960-2016); en la estación INTA Las Breñas (altitud 101.6 msnm), ubicada aproximadamente en una longitud media respecto al ancho E-O de la cuenca, la precipitación media anual es 946 mm (serie 1938-2008); en la estación INTA Bandera (altitud 92 msnm), ubicada en una latitud similar a Reconquista aunque en el extremo SO del límite de la cuenca, la precipitación media anual es 678 mm (serie 1980-2016). Además, su evolución interanual presenta ciclos hidroclimáticos de fuertes contrastes, con extremos de 1600 mm/año y 400 mm/año (Sosa, 2012). Esta marcada heterogeneidad espacio-temporal de la precipitación condiciona las actividades socio-productivas en la región y la dinámica hídrica.

Si bien los periodos de cada estación son diferentes, es posible observar que el ciclo anual de la precipitación muestra escasez en los meses invernales que se prolonga hasta inicio de la primavera, y una estación lluviosa entre octubre y abril (Figura 3.3). Entre las tres estaciones analizadas, a nivel mensual, se observa que la magnitud crece en dirección O-E. En INTA Reconquista marzo es el mes de máxima precipitación, con una media de 161.7 mm, para dicho mes en Las Breñas es de 128 mm y en Bandera de 114.7 mm. De igual manera, en el mes de menor precipitación (agosto, muy similar a julio) en Reconquista, Las Breñas y Bandera se registra una media de 31.8 mm, 17.1 mm y 14.5 mm, respectivamente (ver ubicación en Figura 3.2).

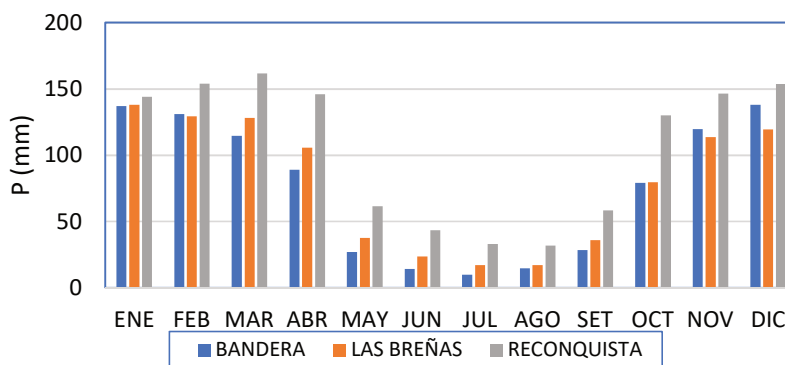


Figura 3.3. Precipitación media mensual en estaciones del INTA (Las Breñas 1938-2008, Reconquista 1960-2016, Bandera 1980-2016).



La temperatura media anual es de 21°C. En INTA Las Breñas, la temperatura máxima promedio es de 28.1 °C y la mínima promedio es de 14.9 °C. En verano las temperaturas son muy elevadas, superando con frecuencia los 40 °C, y en invierno son bajas, pueden descender de 0 °C. En INTA Reconquista la máxima media de enero es 32 °C y en junio de 19.4 °C, mientras que la mínima media en esos meses es 20.6 °C y 9.4 °C, respectivamente.

Al igual que la precipitación, el ciclo anual de evapotranspiración tiene un carácter monomodal. Entre mayo y agosto la ET media mensual de la cuenca es baja, con valores inferiores a 50 mm, estos meses también experimentan las precipitaciones y temperaturas más bajas. Entre octubre y marzo los valores de evapotranspiración real superan los 75 mm, acorde con la ocurrencia de las precipitaciones y temperaturas más elevadas. ET es máxima en diciembre, con un valor de 138.8 mm y mínima en junio con un valor de 28.7 mm. Según datos de la estación INTA Las Breñas, la evaporación de tanque tipo A alcanza en promedio 1500 mm/año, con un máximo en diciembre y un mínimo en junio (Figura 3.4). Según la fórmula de Penman, la evapotranspiración potencial (ETP) media anual es de 1576 mm (INTA Las Breñas, 2009).

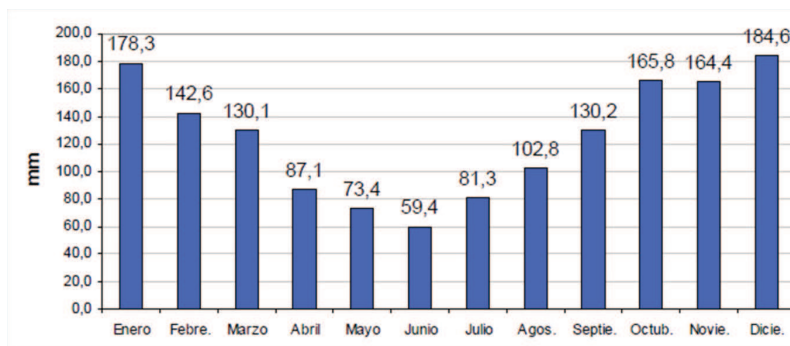


Figura 3.4. Promedio mensual de evaporación de Tanque tipo A (obtenido de INTA Las Breñas, 2009).

### 3.4 Sistema hídrico superficial

La principal característica del sistema de drenaje de los BBSS es la disipación energética mediante el almacenamiento en lagunas, esteros, áreas deprimidas y otras geoformas que permiten la acumulación de agua (Fertonani y Prendes, 1984; Gioria, 2002). Los rasgos geomorfológicos y edafológicos, más la influencia climática, han contribuido a la conformación de la red de drenaje natural de la región. En la Figura 3.5 se muestra el mapa de la red de drenaje natural (a) y artificial (b) de la cuenca de los BBSS. La red de drenaje natural de la provincia de Santa Fe (Centro Regional Litoral CRL-INA y CFI, 2017) se presenta sobre el modelo digital de elevación del terreno (Shuttle Radar Topography Mission- SRTM, Farr et al. 2007). El límite NO de los BBSS, ubicado sobre las Lomadas de Otumpa, presenta la mayor elevación (alrededor de 205 m). El resto de la cuenca es una extensa planicie cuya elevación decrece en dirección NO-SE y se encuentra dentro del rango de 45 a 119 m, aproximadamente (Figura 3.5 a). En el O, en proximidades del límite con Santiago del Estero, la pendiente es de alrededor de 30 cm/km y llega a 5 cm/km en la zona de la depresión central de la cuenca en la provincia de Santa Fe (INA, 2017).

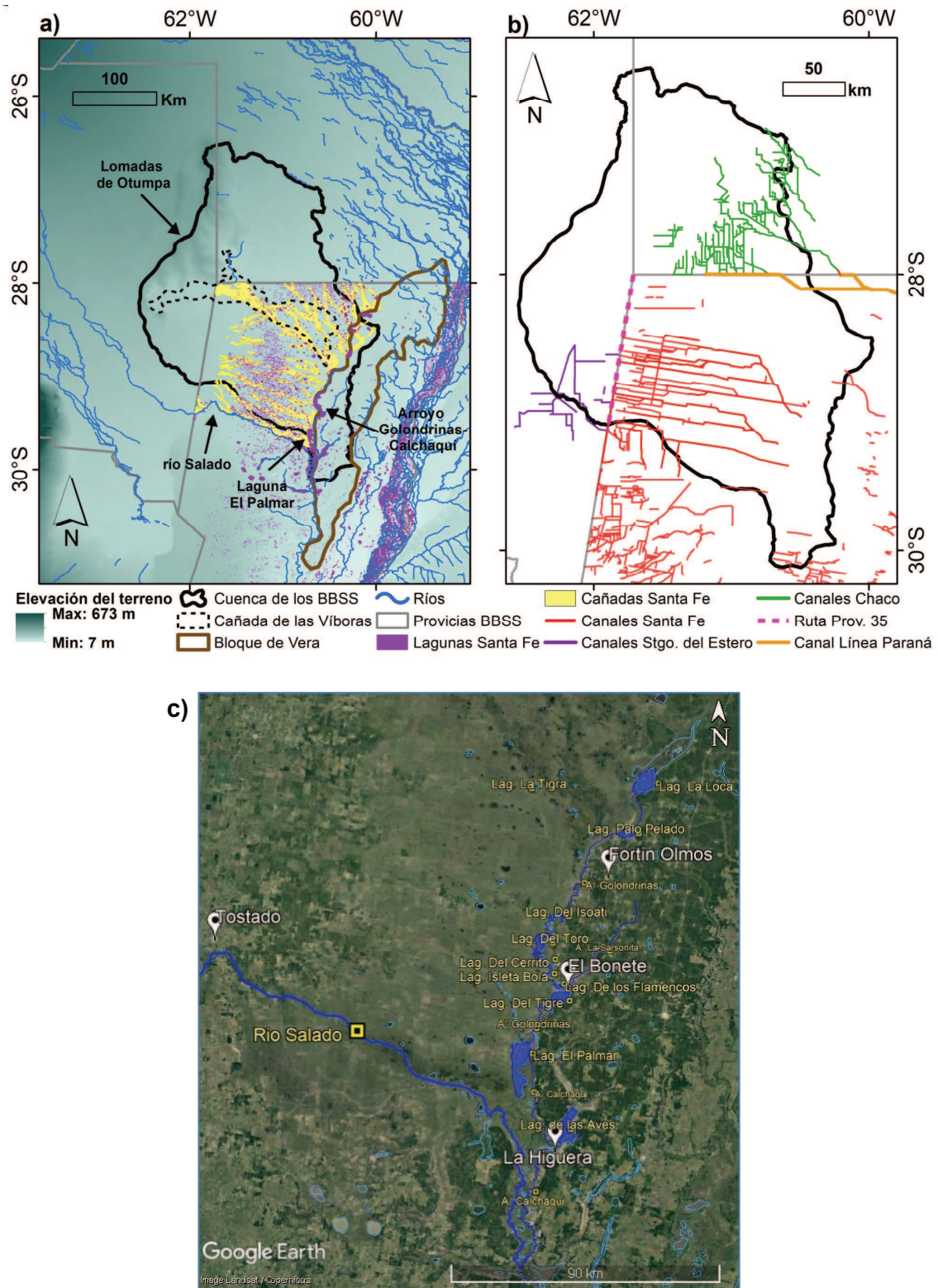


Figura 3.5. Red de drenaje natural (a) y artificial (b) de la cuenca de los BBSS (INA y CFI, 2017). Imagen satelital que muestra las lagunas conectadas al sistema fluvial Golondrinas-Calchaquí. Coordenadas del recuadro: 28°16'51.11"S, 61°34'13.45"O y 30°27'36.94"S, 59°50'19.04"O, Google Earth (c).

La pendiente NO-SE distribuye el flujo superficial hacia el colector del sistema (Arroyo Golondrinas-Calchaquí) a través de cañadas y bajos que suelen interconectar numerosas lagunas, conformando una compleja red de drenaje no jerarquizada típica de zonas de llanura. El sistema de encadenamiento de lagunas del Arroyo Golondrinas-Calchaquí, recostado sobre el borde NO del denominado bloque de Vera (Iriondo, 2011), geoforma conocida en la zona como Domo Oriental, recibe los aportes provenientes de la provincia del Chaco, conducidos principalmente por la cañada de las Víboras al igual que los aportes provenientes de la provincia de Santiago del Estero y los generados en la depresión central de la cuenca (provincia de Santa Fe). Igualmente, desde Chaco numerosos bañados y lagunas descargan sus aguas en sentido N-S y NO-SE en parte dentro de los límites de la cuenca y parte fuera de ellos, que en ese sector son de trazado difuso. El Arroyo Golondrinas-Calchaquí presenta una serie de lagunas de diferente jerarquía, la mayor de las cuales es la laguna El Palmar, que puede alcanzar unas 7000 ha, conocida por sus bellos palmares y playas arenosas. A esta laguna llega el Arroyo Golondrinas y de ella nace el Arroyo Calchaquí que, luego de atravesar la laguna Las Aves, descarga en el río Salado en el paraje Las Juntas (Figura 3.5 c).

En periodos húmedos los BBSS acumulan gran cantidad de agua que, dada la escasa pendiente, permanece anegando vastas extensiones durante largos periodos. Esta situación afecta a la histórica actividad ganadera de la zona y a la actividad agrícola, y también a la población dispersa y concentrada en localidades, lo que ha motivado una apreciable intervención en el sistema natural de escurrimiento a través de la ejecución de obras hidroviales de canalización/caminos, algunas de las cuales trasladan el escurrimiento a través de los límites de cuenca. Es el caso, por ejemplo, de los canales del Chaco (Figura 3.5 b), que colectan las aguas de extensos sectores del SO chaqueño para sanear tierras agrícolas, cuyos caudales son conducidos por el sistema Línea Paraná/Arroyo Los Amores y el sistema Tapenagá/Arroyo Tapenagá hacia el río Paraná. Como se observa en la Figura 3.5 b, la red de drenaje artificial no siempre ha respetado la orientación del drenaje natural. Los canales de la provincia de Santa Fe poseen una dirección predominante O-E. Algunos canales de Santiago del Estero conducen el agua hacia bajos naturales que luego desaguan al río Salado, otros la conducen al canal interprovincial a lo largo de la Ruta Prov. 35, que desagua también en el río Salado.

### **3.5 Sistema hidrogeológico**

Dada la heterogeneidad horizontal y vertical del medio sedimentario, el sistema hidrogeológico de los BBSS es complejo, compuesto por una sucesión de acuíferos y acuitardos alojados en las diferentes formaciones que componen la columna estratigráfica de la región. El modelo conceptual de funcionamiento del sistema hidrogeológico ha sido recientemente descrito por (Thalmeier et al., 2018) y en más detalle por Thalmeier (2021b). De igual manera que el sistema hidrológico superficial, el sistema hidrogeológico somero de los BBSS se caracteriza por una piezometría con escaso gradiente hidráulico, que acompaña la topografía, con una predominancia del movimiento vertical sobre el horizontal (Sosa, 2012; Thalmeier et al., 2018).

Los resultados del trabajo realizado por Thalmeier et al. (2018) muestran que los límites del sistema hidrogeológico son inciertos y difieren de los límites de la cuenca superficial. A partir

del análisis e interpretación de las características geológicas y geomorfológicas del mega abanico fluvial del río Salado-Juramento donde se inserta la región de estudio, con el apoyo de información piezométrica, hidroquímica e isotópica, Thalmeier (2021b) identificó diferentes unidades hidrogeológicas que contienen acuíferos confinados, semiconfinados, y en superficie el acuífero freático. La piezometría reconstruida con base en relevamientos de profundidad del agua subterránea en diferentes unidades hidrogeológicas indica que, en general, la circulación regional del flujo subterráneo se da en dirección NO-SE, con gradientes hidráulicos entre 33 cm/km y 12 cm/km, aproximadamente. La zona de descarga del flujo subterráneo más somero es el Arroyo Golondrinas-Calchaquí, mientras que los niveles acuíferos más profundos podrían descargar en el río Paraná (Sosa, 2012; Boujon et al., 2016; Thalmeier et al., 2018; Thalmeier, 2021b). No obstante, la circulación profunda podría estar afectada localmente por controles estratigráficos y estructurales. Aunque aparentemente no constituyen una barrera al flujo subterráneo, las Lomas de Otumpa imprimen cierta complejidad al patrón de flujo regional generando una distorsión local. Las evidencias encontradas por Thalmeier et al. (2018) sugieren que en esa zona existen potenciales vías preferenciales de flujo vertical y el posible aporte de flujo desde las unidades más profundas/inferiores a las someras/superiores.

El acuífero freático es mayormente afectado por flujos verticales de infiltración/evapotranspiración. En épocas normales la profundidad a la freática oscila entre 0 y 3 m. No obstante, es importante mencionar que, si bien el acuífero freático es el mayormente monitoreado por su interés socio-productivo para la región, la distribución espacial de los sitios de medición es irregular y la información presenta importantes vacíos temporales. Las mediciones de niveles del agua subterránea en las que se basa el trabajo de Thalmeier et al. (2018) presentan un desfase temporal importante, cuya influencia sería más importante en los niveles acuíferos someros mayormente afectados por procesos de infiltración/evapotranspiración.

La heterogeneidad del ambiente sedimentario conlleva a la heterogeneidad de la química de las aguas, por lo que existen grandes variaciones hidroquímicas en cortas distancias. Los numerosos paleocauces del río Salado y algunos del río Bermejo en el sector N constituyen zonas de mayor permeabilidad y menor salinidad que su entorno, y poseen agua de mejor calidad. Han sido ampliamente estudiados desde diferentes puntos de vista para su caracterización geomorfológica (Peri y Rossello, 2010; Thalmeier et al., 2021a) y en busca de dar solución a los problemas de disponibilidad de agua para el ganado y la población rural (Sosa et al., 2009; Sosa, 2012, 2017). De igual manera, organismos como en INTA, INA, Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) y otros realizan constantes esfuerzos en el territorio aportando alternativas creativas para capacitación y proveer agua segura tanto para la población como para el ganado de la región (Basán Nickisch, 2011; Basán Nickisch, 2012; INTI, 2014; Basán Nickisch et al., 2017; Sosa, 2017).

Aunque el agua superficial interactúa con el agua subterránea en diversos tipos de paisajes (Winter, 1999), en las llanuras las aguas superficiales y subterráneas están altamente relacionadas (Aragón et al., 2011). Las variaciones del nivel freático (NF) tienen una influencia significativa en los procesos hidrológicos superficiales y en la dinámica de sequías e inundaciones (Guevara-Ochoa et al., 2020). Además de su efecto en la generación de

escorrentía por saturación en épocas de exceso, la proximidad del nivel freático a la superficie del terreno contribuye a la concentración de sales, en un ambiente de por sí muy salino, por efecto de la evaporación. Esto se debe a la elevada salinidad de las aguas subterráneas de la región, que además limitan el desarrollo productivo y el abastecimiento a la población. El agua subterránea almacenada en los numerosos paleocauces, de mejor calidad que la de su entorno, es utilizada por el sector ganadero y otros.

### 3.6 Tipo y uso del suelo

De acuerdo a la clasificación de los suelos y evaluación de las tierras realizadas por la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca (SAGyP) y el INTA (2007), en la Figura 3.6 se muestran a escala 1:500 000 los órdenes principales del suelo (a) y la textura superficial del mismo (b). Como se observa, dos grupos de orden constituyen la mayor parte de la cuenca: Molisoles y Alfisoles. Los Alfisoles, ubicados principalmente en el E de los BBSS, en proximidades del Arroyo Golondrinas-Calchaquí, se caracterizan por la ausencia de un epipedón mólico; el horizonte superficial es de poco espesor y, generalmente, presenta bajo contenido de materia orgánica. Otra de sus características es la presencia de un horizonte argílico desarrollado en condiciones de acidez o de alcalinidad sódica. En los BBSS se han identificado suelos del suborden Acualfes, los cuales se encuentran asociados a la saturación por periodos prolongados (Sosa, 2012).

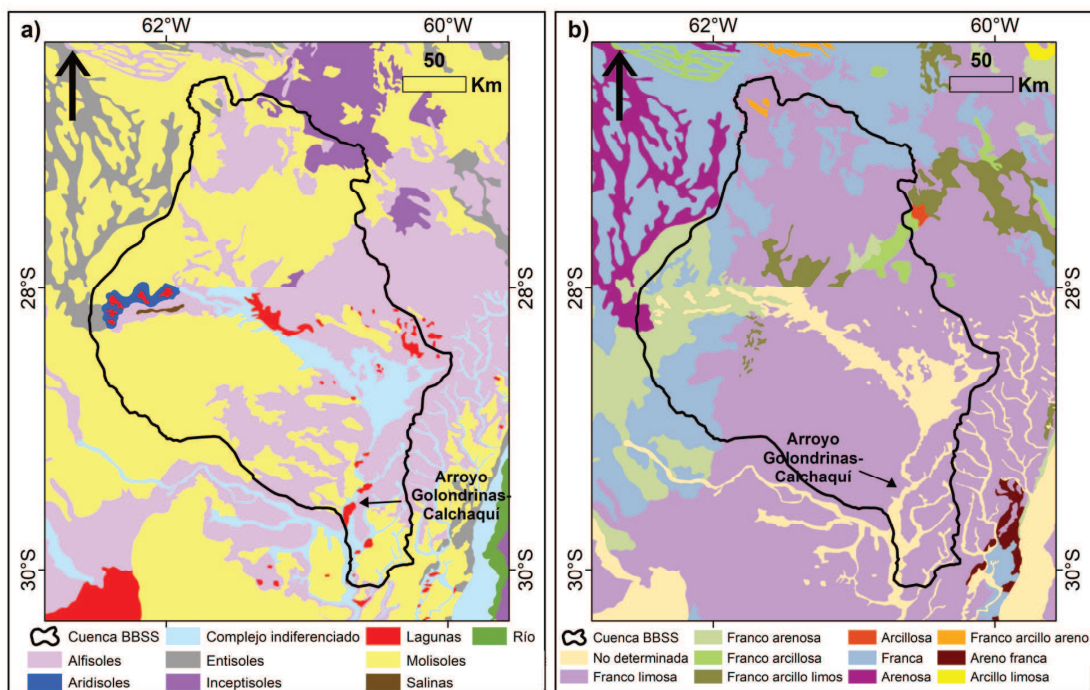


Figura 3.6. Órdenes de suelo principal (a) y textura superficial del suelo (b) en el área de los BBSS (SAGyP e INTA, 2007).

Los Molisoles, ubicados principalmente en el O, se caracterizan por presentar un epipedón mólico. Son suelos oscuros, desarrollados bajo coberturas de gramíneas, generalmente, en

climas templado-húmedos a semiáridos. Su estructura granular característica facilita el movimiento del agua. Dentro de este orden, en los BBSS se han identificado los subórdenes Alboles, Acuales y Udoles (Sosa, 2012). La Figura 3.6 (b) muestra, además, que la mayoría de la superficie de los BBSS es de textura franco limosa. La región del límite O, que contiene a las Lomadas de Otumpa, presenta textura franca y franco arenosa. Sobre el complejo indiferenciado y textura no determinada, coincidentes en ambas figuras, se ubica el colector final del sistema: el Arroyo Golondrinas-Calchaquí, y las cañadas aguas arriba de él.

En cuanto al uso del suelo, el estudio realizado por Viglizzo et al. (2011) muestra que, en una extensa región de Argentina, entre 1960 y 2005, se produjo un incremento del área destinada a cultivos anuales, con una consecuente reducción del área de bosques naturales. Mientras que la provincia de Buenos Aires y Sur de Santa Fe soportaron una intensificación de la actividad agrícola durante el periodo (1960-2005), la frontera agrícola avanzó hacia el NO del país, afectando las tres provincias que integran la cuenca de los BBSS, siendo Santiago del Estero la provincia argentina que más superficie de monte nativo ha perdido en el proceso denominado “pampeanización” (Correa et al., 2012). Si bien los resultados expuestos por Viglizzo et al. (2011) muestran que el chaco seco y el chaco central sub húmedo, regiones que contienen a los BBSS, experimentaron un crecimiento del área destinada a cultivos anuales en detrimento de bosques y pasturas (5.38 y 14.05 %, respectivamente), hasta el momento no existe una cuantificación exacta de las superficies que han experimentado un cambio del uso del suelo en los BBSS.

En el N y O de la cuenca se distinguen las denominadas “dorsales agrícolas-ganaderas”, que anteriormente estuvieron cubiertas por monte. La aptitud de sus suelos (Figura 3.7 a) ha determinado el desarrollo de alguna de estas dos actividades productivas, aunque el uso real en ocasiones no coincide con la aptitud del suelo. Como se observa en la Figura 3.7 b, donde se muestra la composición color verdadero RGB-654, en dichas regiones la matriz agropecuaria imprime una discontinuidad en la cobertura del suelo. En la zona de bajos propiamente dicha (SE de la cuenca) los pastizales predominan y su actividad principal es la ganadería de cría (Giraut et al., 2001).

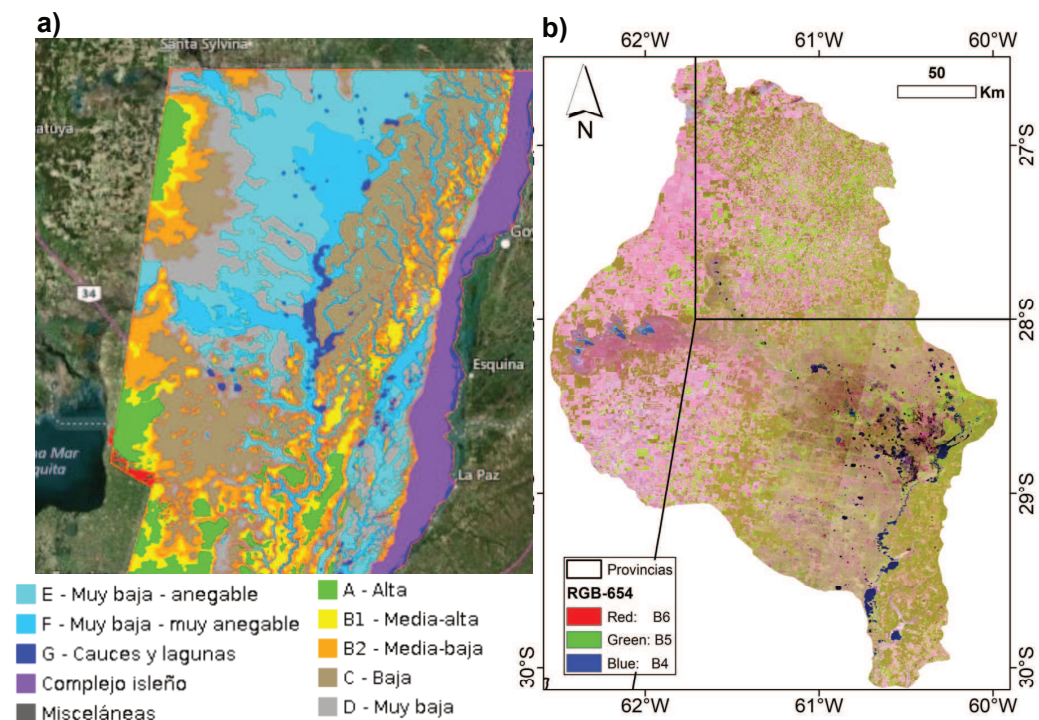


Figura 3.7. a) Aptitud de uso agrícola suelos Santa Fe (Fuente: <http://visor.geointa.inta.gob.ar/?p=96>), b) Composición color RGB-654 del mosaico de imágenes Landsat 8 (LANDSAT/LC08/C01/T1\_SR) adquiridas entre 2017-11-14/2017-11-23 y disponibles en Google Earth Engine.

### 3.7 Características de la vegetación natural y fauna

Algunos autores como FVSA y FUNDAPAZ (2007) consideran a la región de los BBSS mostrada en la Figura 3.1 (d) como uno de los humedales de gran importancia en Argentina. Si bien parte de esa región puede caracterizarse como un humedal, su extensión geográfica es aún motivo de debate. Este sistema alberga numerosas poblaciones de flora y fauna relacionadas a este tipo de ambiente (FVSA y FUNDAPAZ, 2007), y ha sido identificada como una región significativa para la conservación de biodiversidad (TNC, FVSA, DeSdel Chaco y WCS, 2005).

Aunque en el trabajo realizado por Morello et al. (2012) no se muestra la delimitación de la región de los BBSS, los autores caracterizan a la vegetación de la zona como “tipo bosque semidecídulo o decídulo, palmar-humedal, pajonal-humedal, y pastizal de suelos salinos (*Spartina argentinensis*) y de suelos agrícolas (*Elionurus cf. muticus*)”. Según estos autores, la composición de las comunidades de vegetación natural varía según su posición en el relieve regional. Los autores estiman que “más del 75% del área está cubierta por espartillares de *Spartina spartinae* los cuales disimulan cubetas y lagunas temporarias. En los sitios de relieve más elevado crece *Elionurus cf. muticus*, mientras que en las zonas más bajas y salinas *Spartina spartinae*, que se desarrolla sobre los tacurúes. *Paspalum intermedium* ocupa las depresiones ubicadas en las proximidades del Arroyo Golondrinas y Los Amores. Como consecuencia del

uso de suelo para ganadería extensiva, se introdujeron pasturas tolerantes a suelos salinos y salinos alcalinos.

También existen algunas comunidades arbóreas o arbustivas de especies de palmeras (*Copernicia alba*), sabanas y cejas de monte (*Prosopis sp*), isletas de chañar (*Geoffroea decorticans*), entre otras. La presencia de especies arbóreas aumenta gradualmente hacia el O, manifestándose en la formación de sabanas o isletas boscosas (Morello et al., 2012).

El sector NE santiagueño se encuentra emplazado en la región denominada Neotropical, en el Dominio Chaqueño (Cabrera, 1994). La vegetación original del sector está constituida por bosques xerófilos, algunos palmares, estepas halófilas y algunas sabanas edáficas o inducidas por incendios o desmontes. La comunidad más importante está compuesta por el bosque de quebracho colorado santiagueño (*Schinopsis lorentzii*) y quebracho blanco (*Aspidosperma quebracho-blanco*). Otros árboles importantes son el itín (*Prosopis kuntzei*), el mistol (*Ziziphus mistol*), guayacán (*Caesalpinia paraguariensis*) y quebracho colorado chaqueño (*Schinopsis balansae*). Existen especies arbóreas de menor altura como el garabato (*Acacia praecox*), brea (*Cercidium australe*), sombra de toro (*Jodina rhombifolia*), algarrobo blanco (*Prosopis alba*), y yuchán (*Chorisia insignis*). Las especies arbóreas están acompañadas de un estrato arbustivo. Según Morello y Saravia (1959), la presencia de chañar (*Geoffroea decorticans*), churqui (*Acacia caven*), tusca (*Acacia macrantha*), entre otras especies, indican exceso de pastoreo. Existen además especies cactáceas, y herbáceas compuestas por gramíneas. En la zona de paraje La Espezanza, más hacia el centro en el límite con Chaco, la vegetación predominante está compuesta por los “tres quebrachos” (*Schinopsis balansae*, *Schinopsis lorentzii* y *Aspidosperma quebracho-blanco*), cuya presencia en conjunto existe únicamente allí, favorecida por las condiciones climáticas (Morello et al., 2012).

Como se mencionó anteriormente, tanto en Santiago del Estero como en Chaco y Santa Fe, que contaban con importantes extensiones de monte, el avance de la frontera agrícola ha modificado completamente el paisaje. La transformación en el uso de suelo, iniciada en los 90 a mayor escala, aún continúa.

Adicionalmente, la región acoge a numerosas especies de animales. Pautasso (2011) describió la composición de especies de aves y el uso de hábitats en los BBSS. El autor registró un total de 202 especies de aves, las cuales hacen uso de ambientes como humedales, bosques y pastizales. Los bosques son los que presentan mayor riqueza de especies, seguido por los humedales y pastizales. Un gran porcentaje de especies registradas en humedales son exclusivas de ellos.

Además, el sistema aloja la población de venado de las pampas (*Ozotoceros bezoarticus leucogaster*), la población santafesina es la más pequeña y amenazada de Argentina. Pese a que no se ha evaluado el impacto de la sustitución de pastizales por cultivos en la población del venado en los BBSS, se ha comprobado que las labores de siembra provocan la migración de tropas de venados a pastizales naturales cercanos (Pautasso et al., 2010).



A pesar de la importancia en la conservación de diferentes especies el grado de protección que gozan los humedales de la región es irregular legislativamente y de implementación deficiente en el terreno (Lewis et al., 1990 a, b; Pautasso, 2011).

## Capítulo 4: Metodología

Este capítulo se divide en tres grandes secciones, en las que se describen los métodos aplicados para cumplir los objetivos específicos de la investigación, respectivamente. La primera sección está dedicada al estudio del balance hídrico y sus componentes. En la segunda se aborda el estudio del comportamiento espacio-temporal de los cuerpos de agua, finalmente en la tercera se estudia la relación entre las superficies de agua libre, el sistema hidrogeológico y la generación de escorrentía. Cada sección del capítulo describe en detalle los datos utilizados y el desarrollo metodológico aplicado. Dado que además de los datos observados se utilizan datos de diversa procedencia, en el Anexo 1 se describe el conjunto de datos utilizados, en el que se especifican el periodo de disponibilidad de los datos, resolución espacial/temporal, entre otras características. La disponibilidad de datos observados de P, ET y Q se explica en detalle en el Anexo 2, Tabla 4.1 y Tabla 5.4, respectivamente.

Varios pasos de la metodología fueron desarrollados a través de la plataforma Google Earth Engine (GEE), la cual reúne un amplio catálogo de datos globales almacenados en la nube para procesar a través de una interfaz de programación.

### 4.1 Análisis del comportamiento de las componentes del balance hídrico

Se aplicó un modelo de balance hídrico simplificado de paso mensual dado por la Ecuación 4.1 a la fase superficial y subterránea de los BBSS (Figura 4.1): la superficie superior del volumen de control es la superficie de la cuenca, los lados del volumen se extienden verticalmente desde los límites de la cuenca hacia abajo hasta una distancia indefinida que se supone que llega por debajo del nivel de movimiento significativo de agua subterránea. Se consideran solo las entradas/salidas más relevantes en escalas de tiempo mensual: se asume que la única entrada al sistema es la precipitación (P) y las salidas son la evapotranspiración real (ET) y la lámina de escorrentía (Q) observada en la salida de la cuenca (estación Paraje El Bonete, ver ubicación en Figura 1.2 b). En este caso, la variación del almacenamiento se expresa en forma continua y no discreta como en la Ecuación 2.2.

$$P - ET - Q = dS/dt \quad (4.1)$$

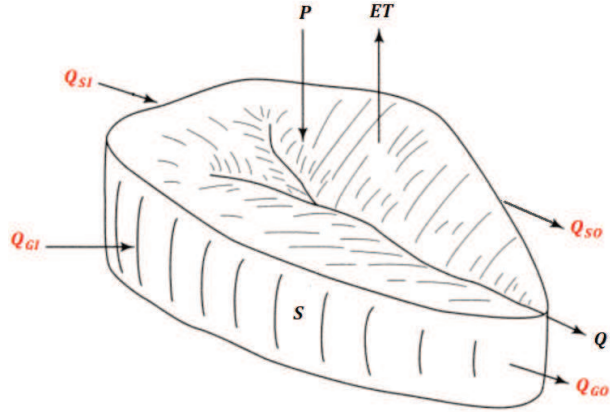


Figura 4.1. Esquema tridimensional del volumen de control considerado (Modificado de Dingman, 2015).

Como se indicó en la Ecuación 2.2 y como se resalta con rojo en la Figura 4.1, otras entradas/salidas pueden ocurrir a través del sistema subterráneo ( $Q_{GI}$  y  $Q_{GO}$ , respectivamente), a través de canalizaciones antrópicas y por transferencia de agua superficial entre divisorias en épocas de grandes lluvias ( $Q_{SI}$  y  $Q_{SO}$ , respectivamente). A los fines de esta tesis se asume que  $Q_{GI}$  y  $Q_{GO}$  son términos poco significativos frente a las componentes verticales del balance. El análisis y simplificaciones realizadas sobre las entradas o salidas superficiales por canalizaciones se abordan en la sección de la estimación de  $Q$ .

Dos metodologías fueron aplicadas para calcular  $dS/dt$ . Por un lado,  $dS/dt$  fue calculado por medio de la suma algebraica de las componentes del balance (primer miembro de la Ecuación 4.1). Por otra parte,  $dS/dt$  fue calculado de manera independiente utilizando los datos de GRACE. Los resultados obtenidos por ambas metodologías fueron comparados, asumiendo errores mínimos en la estimación de variables como  $P$ ,  $ET$  y  $dS/dt$  (GRACE), las diferencias podrían estar relacionadas con los términos no considerados en el balance. Este enfoque es similar al utilizado por Valladares (2014).

Dado que  $dS/dt$  GRACE representa el cambio promedio en el almacenamiento entre los periodos de observación, para hacer temporalmente comparable el primer miembro de la Ecuación 4.1 con la variación de almacenamiento de GRACE se utilizaron valores medios mensuales de cada componente del balance (Oliveira et al., 2014; Moreira et al., 2019). Es decir,  $P$ ,  $ET$  y  $Q$  fueron calculadas como el promedio entre dos observaciones sucesivas al tiempo  $t$  y  $t+1$ :

$$\frac{P_{(t+1)}+P_t}{2} - \frac{ET_{(t+1)}+ET_t}{2} - \frac{Q_{(t+1)}+Q_t}{2} = \frac{dS}{dt} \quad (4.2)$$

Donde  $P$ ,  $ET$  y  $Q$  están dadas en mm/mes en el mes considerado y  $S$  es el almacenamiento total (mm). En cada paso de tiempo,  $P$ ,  $ET$  y  $S$  corresponden a los valores medios sobre el área de la cuenca de los BBSS.

A continuación, se describen detalladamente los datos y la metodología empleada para estimar cada una de las variables del modelo de balance hídrico. En la Sección 4.1.4 se explicará en detalle el procedimiento de cálculo empleado para estimar  $dS/dt$  a partir de los datos GRACE. El periodo de aplicación del balance hídrico estuvo condicionado por la disponibilidad de la información hidrometeorológica.

#### **4.1.1 Estimación y análisis de la precipitación**

Esta sección está dividida en dos subsecciones. En la primera se describen los datos pluviométricos utilizados y la metodología aplicada para el pre procesamiento de los mismos. En la segunda se describe la metodología empleada para realizar el análisis de la distribución espacial y temporal de la precipitación.

##### **4.1.1.1 Datos y procesamiento de la información pluviométrica**

En la Figura 4.2 se presenta el diagrama de flujo metodológico del pre procesamiento de la información pluviométrica, los rectángulos simbolizan procesos y los paralelogramos representan datos y/o resultados de los mismos. Para analizar el comportamiento de  $P$  a escala regional dentro de la cuenca, y como es habitual, se buscó información más allá de sus límites de modo de minimizar los efectos de borde en la interpolación de  $P$  dentro de la misma. Es decir, se estableció un área rectangular que excede los límites de los BBSS, denominada a los fines prácticos región de interés, comprendida entre las latitudes  $-24.585754$  y  $-30.840325$ , y entre las longitudes  $-63.197078$  y  $-58.617008$ . En ella se recopilaron registros de precipitación de 101 estaciones pertenecientes al Servicio Meteorológico Nacional (SMN), el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), la red hidrológica nacional (RHN), la Administración Provincial del Agua del Chaco (APA), cooperativas y propiedades privadas (ver ubicación en Figura 4.3). Además de estaciones de organismos estatales, se recopiló información pluviométrica de 16 estancias y productores agrícolas del departamento 9 de Julio (Santa Fe), información que en su mayoría se encuentra desactualizada. En el Anexo 2 se presenta el listado de todas las estaciones recopiladas, donde se especifica su ubicación, el organismo al cual pertenecen, la resolución temporal y el porcentaje de datos faltantes.

Como se observa en la Figura 4.3, existen extensas zonas que presentan vacíos de información pluviométrica, en particular, en las provincias de Santa Fe y Santiago del Estero (aunque es posible que existan más estaciones en Santiago y aún no fueron recopiladas y sistematizadas). Para cubrir el faltante de información en esos sectores fue necesario recurrir al uso de información alternativa provista por bases de datos globales de reanálisis. Es decir, los datos de precipitación utilizados en esta tesis provienen tanto de información pluviométrica observada en estaciones meteorológicas como de datos globales de reanálisis.

Las bases de datos globales de las cuales se obtuvo información de precipitación fueron CRU TS (Climate Research Unit) Versión 4.03 (Harris et al., 2020) y GPCC (Global Precipitation Climatology Centre) versión 2018 (Schneider et al., 2018) (ver Anexo 1). Ambas proveen datos de precipitación mensual, la primera con una resolución espacial de  $0.5^\circ$  de longitud de arco y la segunda con una de  $0.25^\circ$  de longitud de arco. Las series de precipitación mensual de CRU y GPCC fueron obtenidas para los puntos de grilla que se observan en la Figura 4.4.

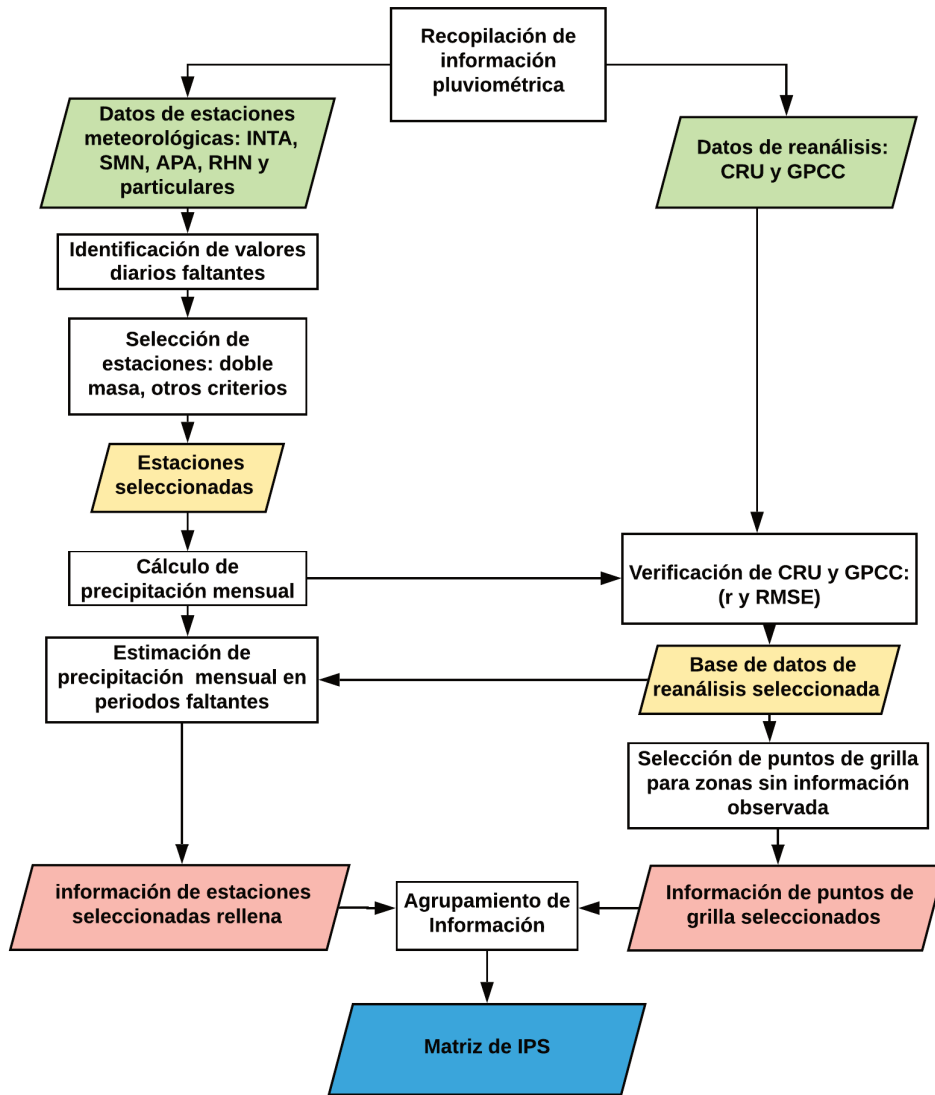


Figura 4.2. Diagrama de flujo metodológico del pre procesamiento de la información pluviométrica.

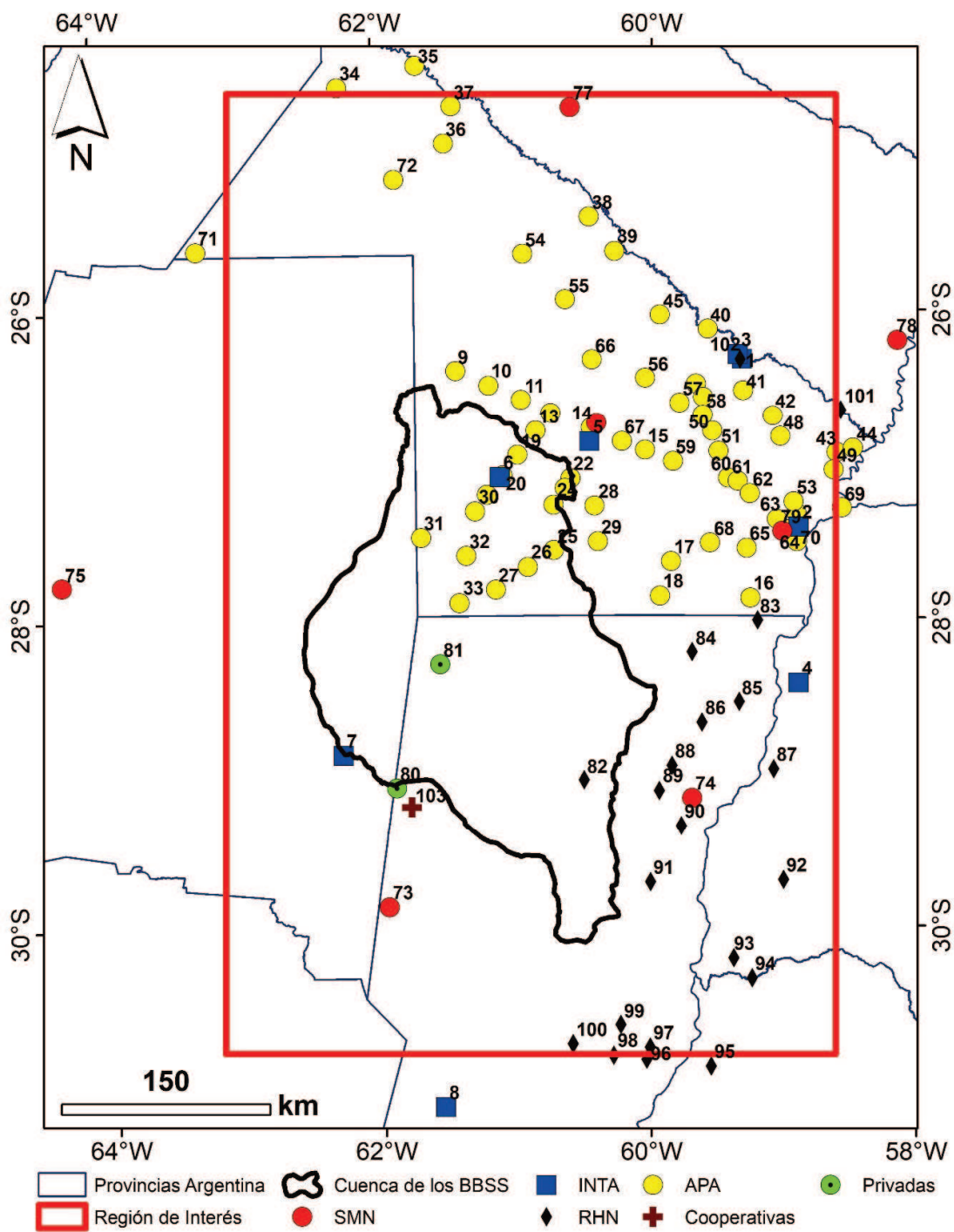


Figura 4.3. Ubicación de estaciones con registros pluviométricos recopiladas (el número de las estaciones coinciden con los consignados en la Tabla del Anexo 2).

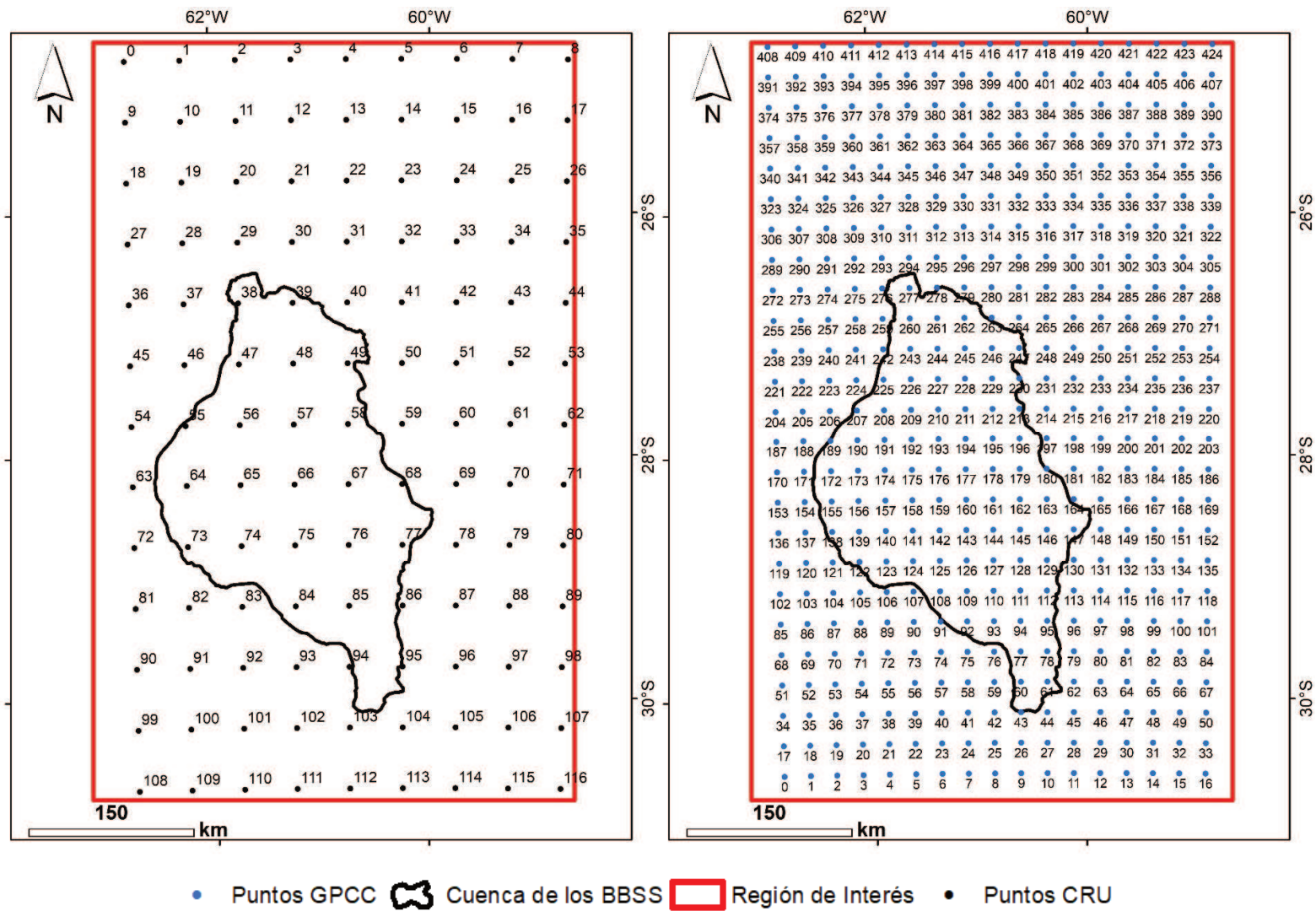


Figura 4.4. a) Puntos de información pluviométrica CRU; b) Puntos de información pluviométrica GPCC.

Como primer paso del procesamiento de la información pluviométrica observada, se realizó la identificación de periodos con datos diarios/mensuales faltantes. Luego, se seleccionaron las estaciones según su ubicación, el periodo de información disponible y la consistencia y resolución temporal de sus datos.

La consistencia de la información fue evaluada mediante el método de doble masa. Las estaciones de SMN y del INTA se consideraron más confiables y se utilizaron como estaciones de referencia para contrastar el resto de las estaciones. Los análisis de doble masa se realizaron con valores de precipitación anual antes de completar los valores faltantes (diarios/mensuales). Para evitar que los valores diarios/mensuales faltantes influyeran en la estimación de la precipitación acumulada anual y por lo tanto en el resultado del análisis de doble masa, en el caso de tener datos faltantes por ejemplo en la estación de referencia, se descartaron los valores observados para esos días/meses en la estación a controlar. Es decir, las series de precipitación mensual para cada par de estaciones presentaron correspondencia temporal de valores faltantes.

Posteriormente, debido a que para el desarrollo de esta investigación se adoptó un intervalo de tiempo mensual, se homogenizó la resolución temporal de las series. En otras palabras, en las estaciones en las cuales se contaba con información pluviométrica diaria se calculó la precipitación mensual.

Como se mencionó anteriormente, fue requerido el uso de información pluviométrica alternativa para cubrir los sectores con escasez de estaciones. Para eso, se evaluó la representatividad de las bases de datos CRU y GPCC respecto a la información pluviométrica observada en las estaciones meteorológicas seleccionadas. Se evaluaron estadísticos como el coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ) y del error medio cuadrático (RMSE por su sigla en inglés) entre la información observada en estaciones y la información de grilla más cercana de ambas bases de datos. Además, se graficaron los pares de series temporales para evaluar visualmente la correspondencia temporal. Como resultado de dicha evaluación una de las dos bases de datos fue seleccionada.

El relleno de series mensuales se realizó mediante modelos de regresión lineal entre los datos de la estación incompleta y los datos de una estación de referencia (estación predictora). Para ello, se tuvieron en cuenta los datos pluviométricos tanto de las estaciones seleccionadas como la totalidad de información grillada de la base de datos seleccionada. A continuación, se describe el procedimiento de cálculo realizado:

1. Identificación de la fecha y mes del valor faltante en la estación a completar.
2. Filtrado de los datos (información pluviométrica observada en estaciones seleccionadas e información de grilla de la base de datos) para el mes faltante identificado en 1.
3. Cálculo del coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ) entre los datos filtrados de la estación a completar y los datos filtrados del resto de estaciones y puntos de grilla.
4. Identificación de la estación predictora para el mes faltante. Esta corresponde a la estación o punto de grilla que presenta el coeficiente de determinación máximo con la estación a completar para ese mes.



5. Identificación del valor de precipitación observada en la estación predictor (Xobs) para la fecha del valor faltante. En caso de que en esa fecha no se hubiera medido la precipitación en la estación predictor, el valor a completar se asumió como el promedio de la precipitación observada en la estación a completar para ese mes.
6. Regresión lineal entre los datos filtrados de la estación a completar y de la estación predictor (Ecuación 4.3).

$$y = \beta_0 + \beta_1 x \quad (4.3)$$

Donde  $x$  es la variable o estación predictor (identificada en el punto 4), y es la variable respuesta o estación incompleta.  $\beta_1$  es la pendiente de la recta y  $\beta_0$  es el intercepto de la recta con el eje  $y$ .

7. Cálculo de  $y$  (valor a completar) para  $x$  igual a Xobs (punto 5).
8. Verificación de los supuestos de normalidad de los datos y de la homocedasticidad del modelo (shapiro.test y ncvTes del software estadístico R, respectivamente).
9. En caso de tener vacíos de información de 2 a 29 días, se verificó que la precipitación estimada a partir del modelo de regresión lineal resultara ser mayor a la precipitación acumulada observada en los días de dicho mes, en caso contrario se tomó a esta última como la precipitación mensual del mes incompleto.
10. Los vacíos de información de 1 día no fueron tenidos en cuenta, se consideró que la precipitación de ese mes corresponde a la precipitación observada en los días disponibles (29 o 30).

Como resultado del pre procesamiento de la información, se creó una matriz con información pluviométrica mensual compuesta por la información de estaciones seleccionadas y por la información de puntos de grilla seleccionados en zonas sin disponibilidad de datos observados. De ahora en adelante, en el desarrollo de la presente tesis, la información contenida en esta matriz se denominará información pluviométrica seleccionada (IPS) (Figura 4.2).

#### 4.1.1.2 Análisis de la distribución espacial y temporal de la precipitación

A partir de la matriz de IPS se identificó el periodo común a las estaciones seleccionadas, éste abarca los años 1986-2016. En la Figura 4.5 se presenta el diagrama de flujo metodológico seguido para la obtención de mapas de distribución espacial de  $P$  en la región de interés y las series temporales de  $P$  media de la cuenca. Las series temporales de  $P$  media fueron estimadas a través de polígonos de Thiessen, mientras que los mapas de isohietas de la precipitación media anual y media mensual fueron obtenidos aplicando el método de interpolación de la Distancia Inversa Ponderada (IDW).

Se realizaron ocho mapas de la precipitación media anual, cada uno de ellos para diferentes periodos. En dos de ellos se promedió la precipitación anual de los periodos 1986-2016 y 2000-2016, los mapas restantes fueron realizados promediando la precipitación anual en periodos de 5 años (1986-1990, 1991-1995, 1996-2000, 2001-2005, 2006-2010, 2011-2016). Esto permitió identificar el patrón espacial de la precipitación en cada periodo, así como las diferencias y similitudes entre periodos. Lo anterior fue relacionado con las series de precipitación anual media de la región de interés y de la cuenca, obtenidas por Thiessen, las cuales permitieron identificar las variaciones de la precipitación anual y los años con valores máximos y mínimos.

Los mapas de isohietas de la precipitación media de cada mes permitieron identificar el patrón de distribución espacial de la precipitación de cada uno, así como las diferencias y similitudes entre meses. Asimismo, el ciclo anual promedio permitió identificar los meses en los que se presentan las precipitaciones máximas y mínimas.

Finalmente, teniendo en cuenta las áreas de los polígonos de Thiessen dentro de los BBSS, se obtuvo la serie temporal de la precipitación media de la cuenca (PMB) para el periodo de información común, que fue utilizada para estimar el primer término del primer miembro de la Ecuación 4.2.

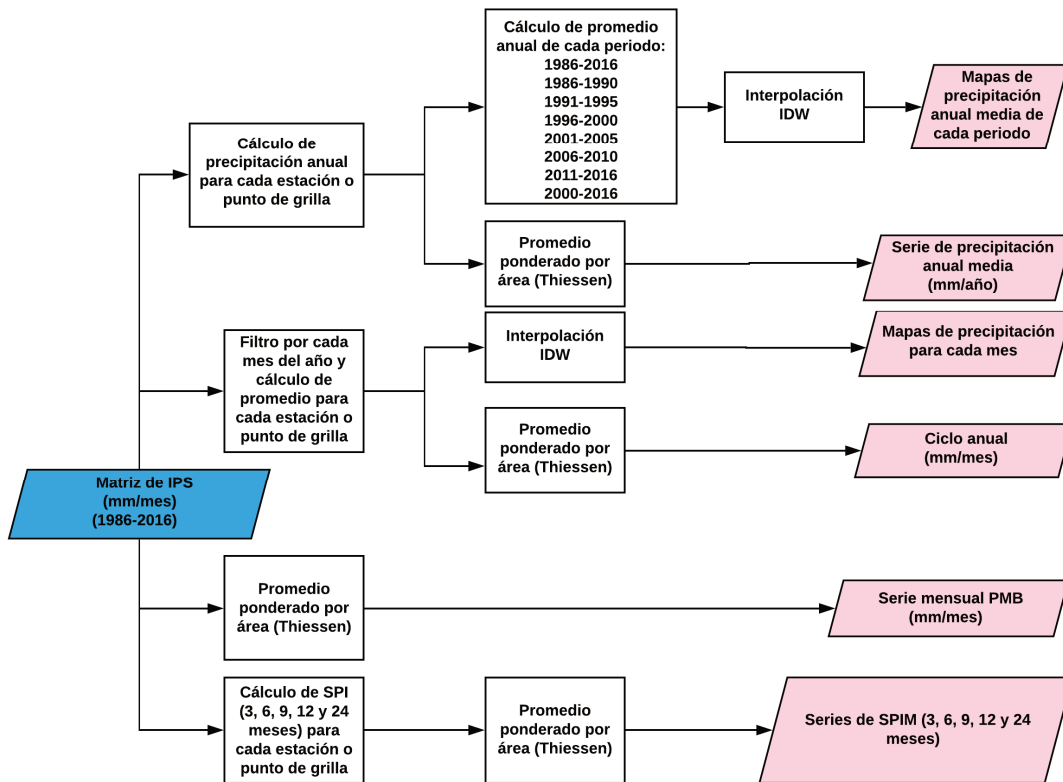


Figura 4.5. Diagrama de flujo metodológico del análisis de la distribución espacial y temporal de la precipitación.

#### 4.1.1.3 Identificación de periodos húmedos y secos con el SPI

El SPI fue calculado para cada serie mensual contenida en la matriz de IPS, utilizando el programa desarrollado por el Laboratorio de Investigación Hidroclimática de la Universidad de California (HRL por su sigla en inglés, 2020), para escalas temporales de 3, 6, 9, 12 y 24 meses. Posteriormente, teniendo en cuenta las áreas de los polígonos ubicados dentro de la cuenca, se obtuvieron series de SPI medio de la cuenca (SPIM) para cada una de las escalas temporales (Figura 4.5). Las series de SPIM así obtenidas, permitieron identificar los periodos húmedos y secos experimentados por la cuenca durante el periodo 1986-2016.

#### **4.1.2 Estimación y análisis de la evapotranspiración**

Esta sección se ha dividido en dos subsecciones. La primera está dedicada a explicar la metodología empleada para seleccionar la fuente de datos a utilizar para estimar ET en los BBSS. En la segunda se describe la metodología para analizar, con base en la fuente de datos seleccionada, la distribución espacial y temporal de la ET. El procesamiento fue realizado a través de GEE.

##### **4.1.2.1 Datos de ET y procesamiento**

Con el objetivo de estimar la ET de la manera más precisa, en esta tesis se evaluaron varios conjuntos de datos que aportan valores de ET, específicamente, se evaluaron los datos de GLDAS, FLDAS, CFSV2, TerraClimate y MOD16A2 (ver Anexo 1). Además, se evaluaron los resultados obtenidos tras aplicar el modelo regional desarrollado por Di Bella et al. (2000). La evaluación de los datos consistió en comparar los valores de ET medidos en torres de Eddy Covariance (EC) frente a los datos de cada una de las fuentes de información mencionadas. Finalmente, la identificación del conjunto de datos que representa con mayor precisión la ET observada se realizó por medio del análisis de diagramas de dispersión entre los pares de valores observados y estimados, y por medio del cálculo de estadísticos como el  $r$  y el RMSE.

Desafortunadamente, los registros de mediciones *in situ* de ET que provienen de torres de EC en Argentina son muy escasos, lo que limita la capacidad de verificar la precisión de los datos de ET provistos por diferentes fuentes de información. La ubicación de las dos torres EC, sus principales características climáticas y las similitudes con la cuenca de los BBSS, permitió definir el sitio más adecuado para evaluar la precisión de las fuentes de datos. En la subsección siguiente se presentan los detalles de la información observada en torres EC.

En la Figura 4.6 se presenta el diagrama de flujo metodológico seguido para estimar, con cada fuente de datos, la ET a nivel puntual. Posteriormente, se describen detalladamente los conjuntos de datos a partir de los cuales se realizaron las estimaciones de ET y la metodología de cálculo realizada para obtener series mensuales con cada uno de ellos.

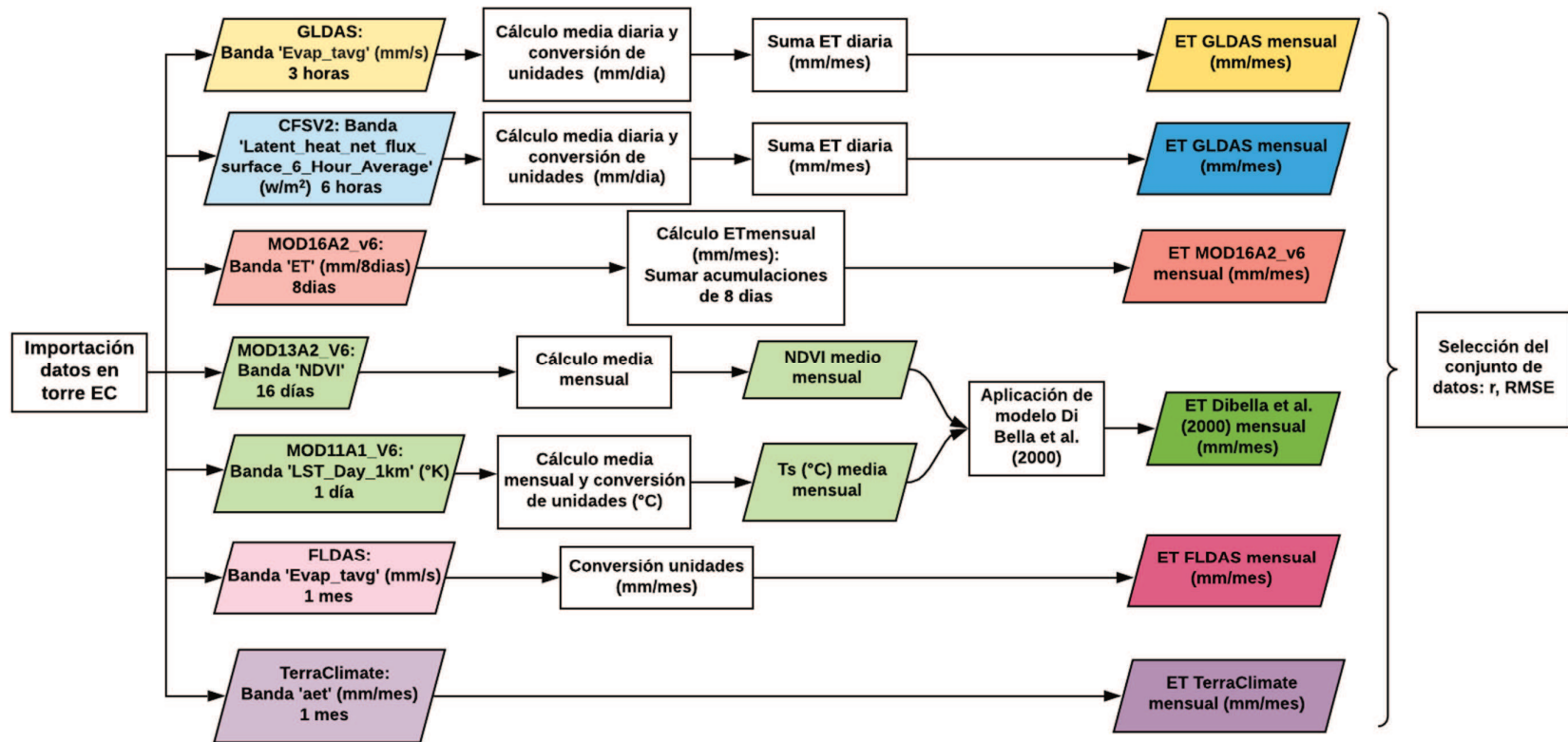


Figura 4.6. Diagrama de flujo metodológico para calcular la ET a nivel puntual a partir de diferentes fuentes de datos.

**a) Datos de ET estimados en torres de EC**

Las mediciones de ET de las que se dispone forman parte de la red global FLUXNET, y han sido obtenidas por el método EC. Esta red cuenta con más de ochocientos sitios de medición, sus datos se encuentran disponibles en <https://fluxnet.fluxdata.org/>. Como se observa en la Figura 4.7, en Argentina solo existen dos torres de EC, sus coordenadas de ubicación y el periodo de tiempo para el cual los datos están disponibles se detallan la Tabla 4.1. Los datos de FLUXNET están dados como flujo promedio de calor latente en  $W/m^2$  para diferentes escalas temporales. En este caso, se utilizaron los datos mensuales y se realizó la transformación de unidades de  $W/m^2$  a  $mm/mes$  ( $1 W/m^2 = 0.0352 mm/d$ ).

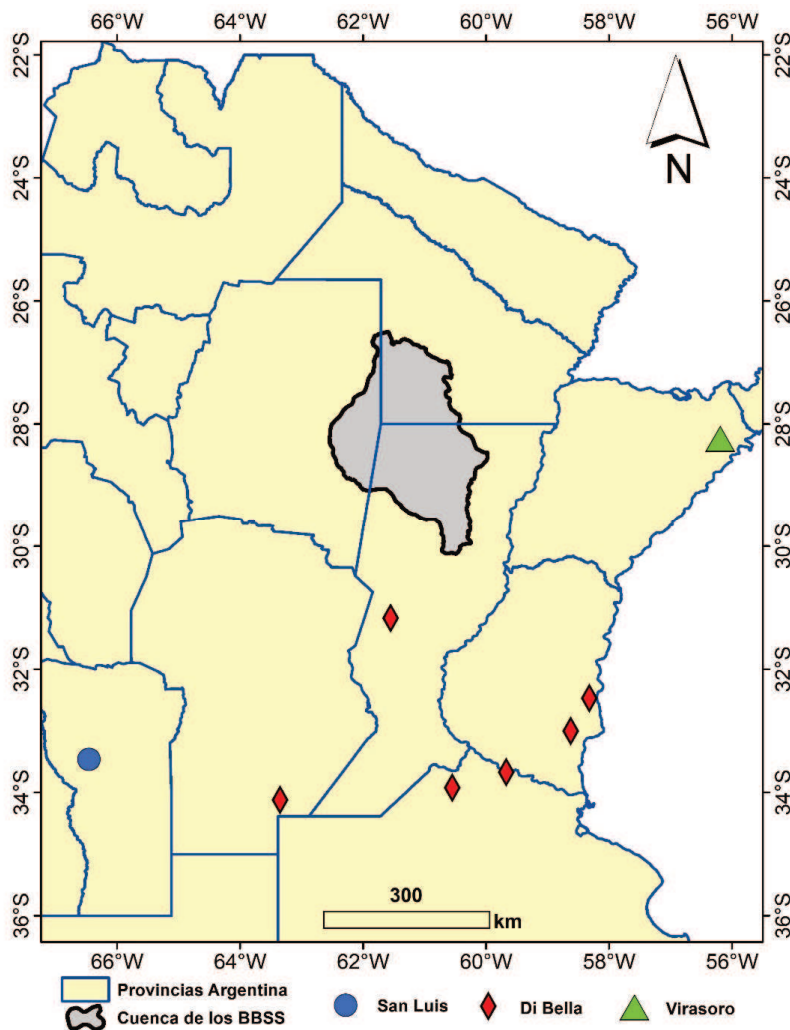


Figura 4.7. Sitios de estimación de ET en torres EC y del trabajo realizado por Di Bella et al. (2000).

Sitio	Latitud	Longitud	Periodo de datos disponibles
San Luis	-33.4648	-66.4598	2009-12/2011-03
Virasoro	-28.2395	-56.1886	2009-12/2012-05

Tabla 4.1. Datos de los sitios de estimación de ET en torres de EC.

Como se evidencia en la Figura 4.7, las dos torres de EC se encuentran muy alejadas de la zona de estudio. Además, presentan condiciones meteorológicas muy diferentes. Según la clasificación de ecorregiones y complejos ecosistémicos argentinos (Morello et al., 2012), la torre de EC ubicada en Virasoro (Corrientes) es parte del complejo Colinas y Llanuras onduladas, dentro de la ecorregión Campos y malezas. Esa zona se caracteriza por tener un clima subtropical sin estación seca, con una precipitación anual de 1500 a 1700 mm y una temperatura media anual de 20°C.

Por otra parte, la torre de EC ubicada en San Luis se encuentra ubicada en el límite de tres ecorregiones Espinal, Chaco Seco y Monte de Llanuras y mesetas. Y dentro de ellas se encuentra en la confluencia de tres subregiones, una de ellas es la Llanura Chacopampeana con Cadenal (subregión Espinal) caracterizada por tener un clima templado semiárido, una temperatura media anual de 15-16°C y una precipitación anual de 200 a 300 mm. Dentro de la ecorregión Chaco Seco, pertenece a la subregión Árida que se caracteriza por tener un clima árido-semiárido, precipitación anual entre 100 y 400 mm y temperatura media anual de 18 a 20°C. Por último, es parte la subregión Septentrional complejo de Bolsones Endorreicos (Monte de Llanuras y mesetas), la cual se caracteriza por tener un clima templado árido, con temperaturas medias anuales de 16°C y precipitaciones inferiores a 200 mm anuales.

Según lo anterior, y a pesar de no ser lo ideal, Virasoro es el sitio elegido para evaluar la capacidad de cada conjunto de datos en representar la ET observada, pues al menos se encuentra ubicada en una latitud similar a la del punto tripartito de las provincias que componen los BBSS, y por ende el régimen climático presenta mayor similitud. Se compararon los datos de ET disponibles en Virasoro con la ET obtenida en el mismo sitio con las fuentes de datos b) a g) descritos a continuación. Como resultado se identificó la fuente de datos más precisa.

#### **b) Estimación de ET aplicando el modelo de Di Bella et al. (2000)**

Di Bella et al. (2000) realizaron una regresión lineal múltiple (Ecuación 4.4) para relacionar la ET con variables obtenidas por sensoramiento remoto, como el NDVI (Índice de vegetación de diferencia normalizada) y la temperatura de superficie ( $T_s$ ). La regresión fue construida con información de ET de seis localidades de la llanura pampeana para los meses comprendidos entre julio de 1982 y enero de 1983 (ver ubicación en la Figura 4.7).

$$ET = -88.3439 + 1.77636 * T_s + 286.406 * NDVI \quad (4.4)$$

Donde ET está dada en unidades de mm/mes,  $T_s$  en °C y NDVI es adimensional.

Di Bella et al. (2000) encontraron que para altos valores de ET el modelo subestima ET, reportando que uno de los factores a los que podría atribuirse ese hecho es la incertidumbre asociada a los valores de ET utilizados para realizar la regresión. No se trata de valores estimados por alguno de los métodos de medición directa antes mencionados, sino de valores estimados aplicando un modelo de balance hídrico mensual. De todas maneras, el modelo de Di Bella et al. (2000) es utilizado a escala regional para estimar ET. A saber, desde 2014 el Instituto de Clima y Agua del INTA genera mapas de ET a partir del modelo de Di Bella et al. (2000) (Di Bella et al., 2019).

Para estimar Ts y NDVI se usaron productos MODIS con resolución espacial de 1 km por píxel. El producto MOD13A2 V6 (Didan, K., 2015) cuenta con una resolución temporal de 16 días y fue utilizado para estimar los valores de NDVI. Por otra parte, los valores de Ts fueron obtenidos del producto MOD11A1 V6 (Wan, Z. et al., 2015) que provee valores de Ts con una resolución temporal diaria.

Para el píxel donde se encuentra ubicada la estación de Virasoro, se obtuvieron las series temporales de NDVI y Ts, esto para el periodo en el cual se encuentran disponibles los datos de EC. Luego, los valores de Ts mensuales fueron obtenidos promediando los valores diarios (Figura 4.6). El cálculo del NDVI mensual se realizó de manera simplificada. En su mayoría el NDVI mensual se calculó promediando los valores disponibles (dos valores). Para meses con un único valor disponible, este fue adoptado como el valor de NDVI mensual. En este promedio mensual simplificado se asume el error asociado al hecho de que los valores de NDVI de inicio del mes también son representativos de los últimos días del mes anterior. Finalmente, a partir de los valores mensuales de NDVI y Ts, así obtenidos, se aplicó la Ecuación 4.4.

**c) Estimación de ET a partir del producto MOD16A2**

El producto MOD16A2 versión 6 (Running, S. et al., 2017) proporciona datos de evapotranspiración real y potencial acumulada en periodos de 8 días (mm/8días), tiene una resolución espacial de 500 m y está disponible desde enero de 2001 hasta la fecha. MOD16A2 V6 se basa en la ecuación de Penman-Monteith, como entradas requiere datos diarios de reanálisis meteorológico de radiación, temperatura del aire, humedad del aire y presión del aire. Adicionalmente, utiliza información de cobertura del suelo, índice de área foliar, albedo y fracción de la radiación fotosintéticamente activa detectadas remotamente por el sensor MODIS.

Para el píxel donde se encuentra ubicada la torre EC de Virasoro se obtuvo la serie temporal de la banda ET del producto MOD16A2, esto para el periodo en el cual se encuentran disponibles los datos de EC. Posteriormente, se calcularon los valores de ET mensuales sumando las acumulaciones de 8 días (Figura 4.6). En el cálculo de la ET mensual se tuvo en cuenta que una fracción del primer valor acumulado de cada mes corresponde al mes anterior.

**d) Estimación de ET a partir de los datos GLDAS**

El sistema global de asimilación de datos de la Tierra GLDAS (Rodell et al., 2004) ha sido desarrollado conjuntamente por científicos de la NASA (National Aeronautics and Space Administration), el GSFC (Goddard Space Flight Center), NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) y NCEP (National Centers for Environmental Prediction). Utilizando técnicas avanzadas de modelado y asimilación de datos, GLDAS incorpora observaciones satelitales y terrestres para producir campos óptimos de estados y flujos de la superficie terrestre en tiempo real (Rodell et al., 2004).

Los datos de GLDAS-2.1, disponibles en GEE, abarcan el periodo comprendido entre el primero de enero del 2000 hasta el presente. Con una resolución espacial de 0.25° de longitud de arco y temporal de 3 horas, aportan información de la tasa de evapotranspiración potencial ( $W/m^2$ ) y evapotranspiración real (mm/s).

Para el píxel en donde se encuentran ubicada la torre EC de Virasoro y para el periodo en el cual se encuentran disponibles los datos de EC, se obtuvo el valor medio diario de ET promediando los 8 valores de cada día. Posteriormente se transformaron las unidades de mm/s a mm/día. Y finalmente se obtuvieron los valores mensuales, acumulando los valores de ET diarios de cada mes (Figura 4.6).

**e) Estimación de ET a partir de FLDAS**

El conjunto de datos FLDAS (McNally et al. 2017) provee información sobre variables relacionadas con el clima como contenido de humedad, evapotranspiración, temperatura media del suelo, precipitación, entre otras. El conjunto de datos FLDAS, disponible en GEE, utiliza el modelo de superficie NOAH versión 3.6.1 junto con la precipitación horaria CHIRPS-6. Además, para el forzamiento de datos utiliza una nueva combinación de MERRA-2 (Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications version 2) y CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data).

FLDAS tiene una cobertura global, una resolución espacial de  $0.1^\circ$  de longitud de arco y una resolución temporal mensual. Brinda valores de evapotranspiración real en unidades de mm/s. Para el píxel donde se encuentra ubicada la torre EC de Virasoro y para el periodo en el cual se encuentran disponibles los datos, se obtuvo la serie mensual de los valores llevados a mm/mes (Figura 4.6).

**f) Estimación de ET a partir de CFSV2**

El sistema de pronóstico climático (CFS por su sigla en inglés) es un modelo acoplado que representa la interacción entre la atmósfera de la Tierra, océanos, superficie terrestre y el hielo marino. Fue desarrollado en el centro de modelación ambiental (EMC por su sigla en inglés) del NCEP (National Center for Environmental Prediction). La versión operacional 2 (CFSV2; Saha et al., 2011) provee información desde enero de 1979 hasta la actualidad. Con una resolución espacial de  $0.2^\circ$  de longitud de arco y 6 horas de resolución temporal, brinda información de flujo de calor latente  $W/m^2$ , tasa de evapotranspiración potencial ( $W/m^2$ ), entre otras.

Para el píxel en donde se encuentran ubicada la torre de EC de Virasoro y para el periodo en el cual se encuentran disponibles los datos de EC, se obtuvo el valor medio diario del flujo de calor latente. Posteriormente se transformaron las unidades de  $W/m^2$  a mm/día y finalmente se obtuvieron los valores mensuales, acumulando los valores de ET diarios de cada mes (Figura 4.6).

**g) Estimación de ET a partir de TerraClimate**

TerraClimate (Abatzoglou et al., 2018) es un conjunto de datos de la superficie terrestre global de alta resolución espacial (longitud de arco de 2.5 minutos o aproximadamente 4 km). Entre otras variables, aporta información de ET, evapotranspiración de referencia y escorrentía superficial a escala mensual para el periodo 1958-2018.

TerraClimate utiliza interpolación climática asistida, combinando normales climatológicas de alta resolución del conjunto de datos de WorldClim, con datos de CRU Ts4.0 y el Japanese



55-year Reanalysis (JRA55). Variables como temperatura, precipitación, presión de vapor son obtenidas en su mayoría de CRU Ts4.0, los datos de JRA55 se usan para regiones donde los datos de CRU no cuentan con estaciones climáticas contribuyentes. Además, para esas variables la universidad de Idaho (Estados Unidos) proporciona datos adicionales. Los datos de JRA55 se utilizan para variables como radiación solar y la velocidad del viento.

La evapotranspiración real provista por TerraClimate es generada por medio de un modelo de balance hídrico unidimensional a escala mensual. El modelo de balance hídrico aplicado es el modificado de Thornthwaite-Mather, incorpora la evapotranspiración de referencia, precipitación, temperatura, y datos de capacidad de extracción de agua de la vegetación con resolución de 0.5° de longitud de arco. Los valores de evapotranspiración real están dados en mm/mes. Para el píxel donde se encuentra ubicada la torre EC de Virasoro y para el periodo en el cual se encuentran disponibles los datos se obtuvo la serie temporal mensual (Figura 4.6).

#### **4.1.2.2 Análisis de la distribución espacial y temporal de ET en los BBSS**

Como resultado de la sección anterior, se seleccionó el conjunto o base de datos que aporta los valores de ET más precisos en la estación Virasoro. Utilizando dicha base de datos, se obtuvieron los mapas mensuales de ET para el periodo 2001-2016. Esto se realizó importando los datos de la región de los BBSS y procediendo de la misma manera en que se obtuvieron los valores mensuales puntuales en las torres de EC (Figura 4.6).

Con base en los mapas mensuales de ET se analizó la distribución espacial y temporal de esta variable. En la Figura 4.8 se presenta el diagrama de flujo metodológico que se siguió para ello. En primer lugar, se calculó el promedio de ET considerando los píxeles de cada mapa mensual, lo que resultó en la serie mensual de ET de los BBSS (ETB), la cual fue utilizada para estimar el segundo término del primer miembro de la Ecuación 4.2.

Luego, con el fin de identificar los patrones de distribución espacial de ET se construyeron mapas de la distribución media mensual y anual. Los mapas de ET media anual fueron obtenidos para diferentes periodos (ver periodos en la Figura 4.8). Esto permitió identificar el patrón de la distribución espacial para cada uno, así como similitudes y diferencias entre ellos. Lo anterior fue relacionado con la serie de ET anual media de los BBSS, análisis que permitió identificar variaciones de la ET anual, así como años con valores máximos y mínimos.

La obtención de mapas de ET media para cada mes del año hizo posible identificar el patrón espacial de cada uno, así como las diferencias y similitudes entre ellos. Lo anterior fue relacionado con la estimación del ciclo de ET, mediante el cual se identificaron los meses en los que se presentan valores máximos y mínimos.

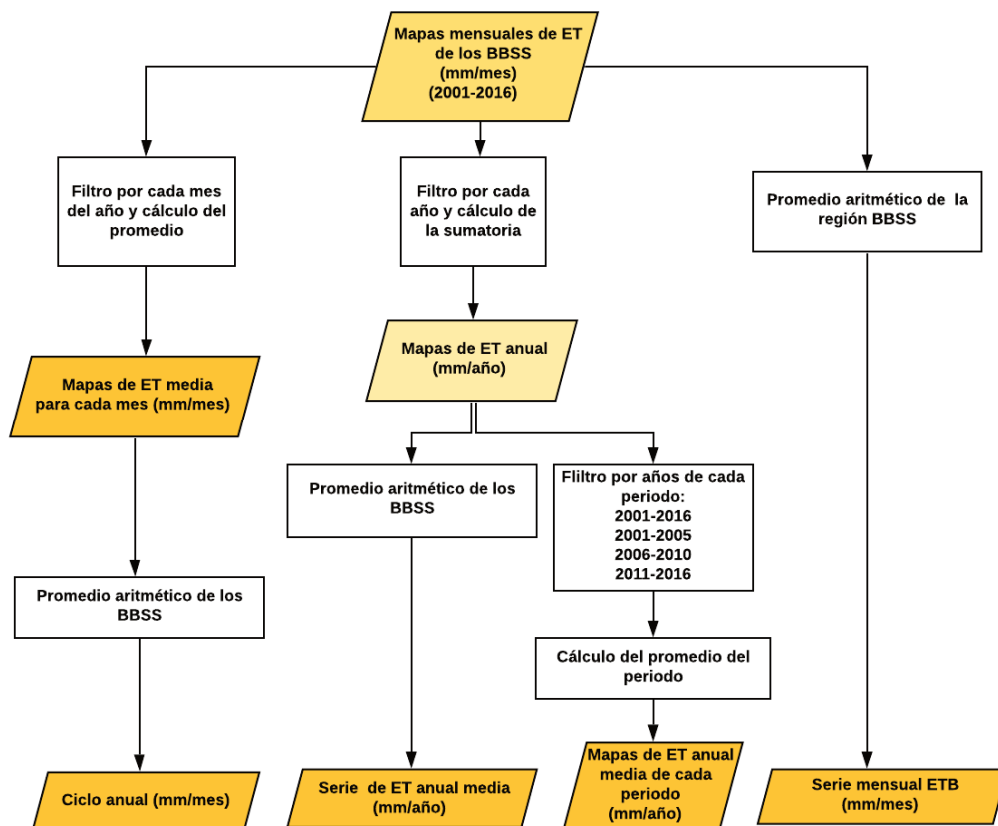


Figura 4.8. Diagrama de flujo metodológico del análisis de la distribución espacial y temporal de la ET en los BBSS a partir de la fuente de datos seleccionada.

#### 4.1.3 Estimación del escurrimiento superficial en el punto de salida

La estimación del escurrimiento a la salida de la cuenca fue realizada por medio del análisis de la información hidrométrica disponible en la estación Paraje El Bonete, ubicada en las coordenadas 60.55°O y 29.39°S (ver ubicación en Figura 1.2 b). Esta estación es parte de la red de alerta del río Salado mantenida por el Ministerio de Infraestructura, Servicios Públicos y Hábitat de la provincia de Santa Fe (MISPHsf).

Se dispone de expresiones de la curva Altura-Caudal (Ecuaciones 4.5 y 4.6), basadas en aforos volumétricos, obtenidas por la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas FICH y el MISPHsf (2006). En el año 2006 se instaló un sensor piezorresistivo de presión diferencial, con una amplitud de registro de 0 a 7 m, desde entonces se realiza un monitoreo horario automatizado. En años anteriores solo existen lecturas manuales y esporádicas de escala hidrométrica.

$$Q = e^{(0.499+1.418*h)} \quad \text{Para } h \leq 3.15 \text{ m} \quad (4.5)$$

$$Q = e^{(-1.088+1.903*h)} \quad \text{Para } h > 3.15 \text{ m} \quad (4.6)$$

Donde h es la altura de escala limnigráfica (m) y Q es el caudal (m<sup>3</sup>/s).

Como primer paso del procesamiento de la información de altura (h), se identificó el número de observaciones diarias disponibles para cada mes y se calcularon los valores de caudal con las Ecuaciones 4.5 y 4.6. A partir de dichos valores, se calculó el volumen (m<sup>3</sup>) acumulado en cada intervalo de tiempo horario y, finalmente, se calculó el caudal mensual (m<sup>3</sup>/mes) sumando las acumulaciones horarias de cada mes.

Como se observa en la Figura 1.2 (b), la estación El Bonete se encuentra ubicada aguas arriba de la sección de salida de la cuenca. Esto significa que el área de aporte hasta la estación es inferior al área de BBSS. Según la monografía de la estación hidrométrica, la superficie de aporte hasta El Bonete es de 48 150 km<sup>2</sup> (FICH y MAH, 2006). Esta superficie fue tenida en cuenta para calcular la lámina de escorrentía, esto es, la transformación de unidades de m<sup>3</sup>/mes a mm/mes. Se asume que la lámina mensual de escurrimiento obtenida hasta la estación Paraje El Bonete (mm/mes; ver ubicación en Figura 1.2 b) es representativa de toda el área de los BBSS.

Una de las limitantes encontradas para aplicar el modelo de balance para un periodo de tiempo largo, es la escasez y discontinuidad de la información de altura hidrométrica. Dada la necesidad de estimar los valores de la lámina de escorrentía en meses sin registros y teniendo en cuenta la predominancia de procesos hidrológicos verticales, característica de las zonas de llanura, se aplicó un método simplificado. Este consistió en identificar el periodo más largo con información de escurrimiento y calcular para ese periodo el porcentaje (C) de la lámina de precipitación (P) que se transformó en lámina de escorrentía (Q) (Ecuación 4.7), de forma similar al coeficiente de escorrentía.

$$C = \frac{Q}{P} * 100\% \quad (4.7)$$

Donde P (mm) y Q (mm) son los valores acumulados en el periodo. Para meses sin registros la lámina de escurrimiento fue estimada aplicando el porcentaje C a la precipitación mensual. La serie completa de Q fue utilizada para estimar el tercer término del primer miembro de la Ecuación 4.2.

Es importante mencionar que las salidas de agua por escurrimiento superficial, ya sea a través de canalizaciones o por transferencia de agua entre divisorias, no fueron consideradas en el análisis a escala mensual realizado en esta tesis. La transferencia de agua entre divisorias, que se presentan solo en condiciones de crecidas extremas, es compleja y difícil de cuantificar. Existen pocos registros de caudal en los canales que drenan el agua hacia afuera de la cuenca, y en general, dichas erogaciones se generan para condiciones de crecidas extremas, dificultando la cuantificación de las mismas. En periodos de sequía el escurrimiento por esas canalizaciones es bajo o nulo. Para tener una idea del orden de magnitud de las salidas por escurrimiento superficial a través de canalizaciones en casos de crecidas extraordinarias, a continuación, se indican algunos valores recopilados para fechas particulares. La información fue provista por el ETIBS.

Para la crecida de 2003, año incluido dentro del periodo de estudio, se cuenta con aforos en el Paraje El Bonete de 780 m<sup>3</sup>/s el 5 de mayo. Por otra parte, el sistema Línea Paraná, si bien no

registra mediciones de caudal, por características de diseño solo puede conducir como máximo 35 – 40 m<sup>3</sup>/s. Cabe mencionar que los excedentes que no son conducidos por este canal drenan hacia el territorio santafesino a través de alcantarillas sobre la RP 30, siendo este derrame de un valor por debajo del 10 % del caudal en El Bonete en condiciones extraordinarias. Se considera que el impacto de estas componentes en el cálculo del balance hídrico estaría limitado a casos excepcionales, dentro del periodo de estudio esta situación se produjo en 2003.

#### 4.1.4 Estimación de la variación de almacenamiento con datos de GRACE

En esta tesis se utilizó el producto de nivel 3 mascons versión 6 (RL06) (Wiese et al., 2018). El procesamiento de los datos mascon consistió en la obtención de las series temporales de LWET (en cm) de los puntos de grilla que se encuentran dentro de los límites de los BBSS (Figura 4.9). Como el análisis realizado en esta investigación involucra a todo el periodo disponible de GRACE (2002-2016), se calcularon las anomalías relativas al valor medio dicho periodo. Para ello, se calculó en cada punto de grilla el valor medio del periodo 2002-2016, el cual posteriormente fue restado a los valores de cada punto.

Los valores de LWET de cada punto de grilla fueron multiplicados por el factor de escala correspondiente, desarrollados por Landerer y Swenson (2012), según se explicó en el Capítulo 2. Luego, se obtuvo la serie temporal de LWET (mm) media de la cuenca promediando, para cada tiempo, los valores de LWET y llevando las unidades a mm. Si bien se hubiera podido utilizar polígonos de Thiessen, dada la grilla regular de LWET se consideró adecuado usar un promedio aritmético.

La variación de almacenamiento fue calculada usando un método derivativo simple (Oliveira et al., 2014; Moreira et al., 2019) que consiste en calcular la diferencia entre dos observaciones sucesivas de LWET (Ecuación 4.8), el resultado así obtenido representa el cambio promedio en el almacenamiento entre los periodos de observación (Oliveira et al., 2014).

$$\frac{dS}{dt} = \frac{LWET_{i+1} - LWET_i}{t_{i+1} - t_i} \quad (4.8)$$

Donde, LWET está dada en mm y corresponde al valor medio de la cuenca de los BBSS. El denominador es el intervalo de tiempo (mes) entre las dos observaciones sucesivas, las cuales están dadas en intervalos irregulares de aproximadamente un mes. La serie temporal de la variación de almacenamiento así obtenida fue graficada junto con la obtenida mediante la Ecuación 4.2. A partir de ello, se analizaron las diferencias entre los resultados obtenidos y sus posibles causas.

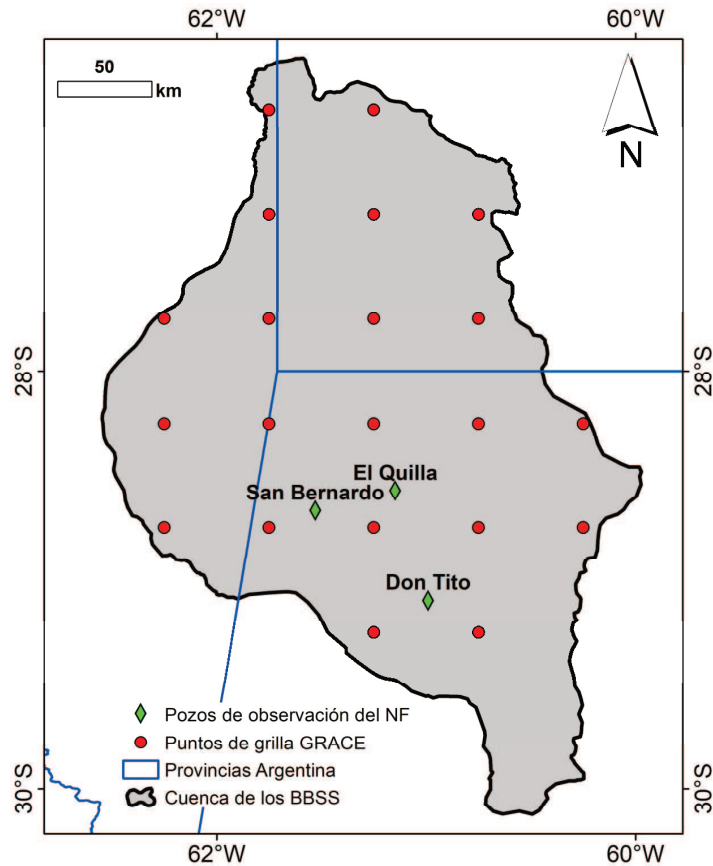


Figura 4.9. Ubicación de puntos de grilla GRACE y pozos de observación del nivel freático (NF) dentro de la cuenca de los BBSS.

## 4.2 Caracterización del comportamiento espacial y temporal de cuerpos de agua de los BBSS

La caracterización del comportamiento espacial y temporal de los cuerpos de agua se realizó mediante el análisis de imágenes satelitales Landsat y MODIS, particularmente, mediante el uso del índice MNDWI propuesto por Xu (2006). En una primera etapa, por medio de un análisis multitemporal de imágenes MODIS, se estudió la variación temporal de las superficies afectadas por agua a nivel de cuenca. Específicamente, se utilizó una colección de imágenes del producto MOD09A1 (Vermote, 2015) adquiridas entre 2000 y 2019. A pesar de que la resolución espacial de Landsat permite identificar cuerpos de agua de menor tamaño, su resolución temporal (16 días) dificulta realizar un seguimiento adecuado de las variaciones en los BBSS. Esto se debe a que para cubrir la zona es necesario hacer un mosaico de imágenes adquiridas en dos pasadas del sensor, lo que implica una disminución de la resolución temporal del mosaico. Por ello, se utilizó el producto MOD09A1 para analizar la variación temporal de las superficies afectadas por agua, que cuenta con una mejor resolución temporal (8 días).

Siguiendo la sugerencia de Xu (2006), se tomó al 0 como el umbral para extraer de manera automática las superficies de agua en la serie temporal de imágenes. Las superficies extraídas

de esa manera fueron denominadas ‘Agua Libre’ y eventualmente podrían contener también píxeles de agua mixta. Para el análisis realizado, no se considera realizar una distinción exacta entre los píxeles de agua pura y los píxeles de agua mixta, ni tampoco determinar con exactitud la fracción de agua de los píxeles mixtos que toman valores positivos de MNDWI.

Si bien es sabido que MOD09A1 es menos eficiente en la identificación de áreas anegadas de pequeño tamaño y que permanecen anegadas por menos de 8 días (Campos et al., 2014), se considera que las variaciones temporales de las superficies de ‘Agua Libre’ (MNDWI positivo) identificadas con este producto son representativas de las variaciones del área real y están acompañadas por las variaciones temporales de superficies de menor tamaño. Esta consideración fue verificada con mosaicos de Landsat 8 para el periodo 2013-2019.

Posteriormente, en una segunda etapa se analizó la distribución espacial de la superficie de ‘Agua Libre’. Como se describe en detalle más adelante, a través de álgebra de imágenes se obtuvo un mapa de probabilidad de ocurrencia de ‘Agua Libre’ que se utilizó como base para construir un mapa de caracterización de los cuerpos de agua. El análisis de la distribución espacial del ‘Agua Libre’ se realizó a partir de la colección de imágenes del producto MOD09A1 y se apoyó en el uso de imágenes Landsat. En las Etapas 1 y 2, a continuación, se describen los detalles de la metodología aplicada, el procesamiento de imágenes satelitales se realizó a través de la plataforma GEE.

### **Etapa 1 “Análisis de la variación temporal del área de ‘Agua Libre’ de los BBSS”**

En la Figura 4.10 se muestra el diagrama de flujo seguido para obtener la serie temporal de ‘Agua Libre’ a partir de imágenes MODIS.

#### **1. Datos:**

Se utilizó el producto global MOD09A1 versión 6. Con una resolución espacial de 500 m, MOD09A1 provee una estimación de la reflectancia de la superficie de las bandas 1-7 de MODIS. El producto está corregido atmosféricamente, cada píxel corresponde a la mejor observación ocurrida en el periodo de adquisición de 8 días. A través de la función de filtrado en la nube, disponible en la plataforma GEE, se seleccionaron las imágenes adquiridas entre los años 2000 y 2019. Cada una de estas fue cortada con los límites de los BBSS.

#### **2. Colección de imágenes de trabajo:**

Entre 2000-01-01 y 2019-12-31 hay disponibles 913 imágenes, sin embargo, solo 468 fueron utilizadas. Estas fueron el resultado de un proceso de filtrado basado en las bandas de calidad (‘State QA’ y ‘QA’), las cuales aportan información sobre la nubosidad y la calidad de cada una de las bandas. Por un lado, los bits 0-1 de la banda ‘State QA’ aportan información sobre la nubosidad de cada píxel, los píxeles sin nubes resultan ser aquellos que toman valores de 0 y 3. Por otra parte, los bits de banda ‘QA’ aportan información sobre la calidad de los píxeles de cada una de las bandas de la imagen. Por ejemplo, los bits 14-17 dan información sobre la banda GREEN

(‘sur\_refl\_b04’) y los bits 22-25 sobre la banda del SWIR (‘sur\_refl\_b06’). Para ambas bandas los píxeles de alta calidad resultan ser aquellos que toman un valor de 0.

Las 468 imágenes resultantes fueron aquellas que presentaron el 98% de los píxeles sin nubes y de alta calidad para las bandas utilizadas en el cálculo del MNDWI (GREEN y SWIR). Para ello, en cada imagen se extrajeron los bits 0-1 de la banda ‘State QA’, y se contaron los píxeles que tomaron valor de 0 y 3. Así mismo, se extrajeron los bits 14-17 y 22-25 de la banda ‘QA’ y se contaron los píxeles que tomaron valor de 0.

### 3. Procesamiento de las imágenes y cálculo del MNDWI:

Las bandas ‘sur\_refl\_b04’ y ‘sur\_refl\_b06’, de cada imagen, fueron multiplicadas por el factor de escala correspondiente al producto MOD09A1 (0.0001). Luego, se calculó el MNDWI según la expresión dada por la Ecuación 4.9 Esto dio como resultado una colección de 468 imágenes del índice MNDWI.

$$MNDWI_{modis} = \frac{sur\_refl\_b04 - sur\_refl\_b06}{sur\_refl\_b04 + sur\_refl\_b06} \quad (4.9)$$

### 4. Identificación de ‘Agua Libre’:

Como se mencionó anteriormente, se seleccionó al 0 como valor predeterminado del umbral para extraer la superficie de ‘Agua Libre’ en las 468 imágenes de MNDWI. La selección de los píxeles positivos de MNDWI, de cada imagen, dio como resultado una colección de 468 imágenes de ‘Agua Libre’. En cada una de ellas los píxeles de ‘Agua Libre’ toman el valor de 1, mientras que los píxeles de otras coberturas toman el valor 0.

### 5. Análisis del área de ‘Agua Libre’ de los BBSS:

Para determinar la superficie total de ‘Agua Libre’ de cada imagen, se multiplicó la cantidad de píxeles con valor 1 por el área del píxel. Esto permitió construir la serie temporal de área de ‘Agua libre’ de los BBSS para el periodo comprendido entre el 2000 y 2019. Finalmente, a través del histograma de frecuencia, se analizó la distribución de los datos de área de ‘Agua Libre’ de los BBSS.

### 6. Estimación del área de ‘Agua Libre’ a partir de imágenes Landsat 8 y su relación con MODIS:

En la Figura 4.11 se muestra el diagrama de flujo metodológico seguido para la generación de mosaicos de imágenes Landsat 8 y el procesamiento de los mismos para la identificación de ‘Agua Libre’ y su variación temporal. A continuación, se describen los detalles de la metodología y los datos utilizados:

- Datos

Se utilizaron imágenes del producto ‘LANDSAT/LC08/C01/T1\_SR’ disponible en GEE. Este provee imágenes ortorectificadas y corregidas atmosféricamente usando el código Landsat Surface Reflectance (LaSRC, por su sigla en inglés). El producto en

mención es generado por Google, su resolución espacial y temporal es de 30 m y 16 días, respectivamente.

- Identificación de rangos de fecha para mosaico

Como se mencionó anteriormente, para cubrir la superficie de los BBSS es necesario unir seis imágenes Landsat que son adquiridas en las pasadas 227 y 228 del satélite. De la pasada 227 se requieren las filas 79, 80 y 81; y de la pasada 228, las filas 78, 79 y 80. Debido a que el producto ‘LANDSAT/LC08/C01/T1\_SR’ provee escenas de alta calidad es posible que, para algunas fechas, no estén disponibles las tres filas de la pasada. Por eso, fue necesario identificar, para cada pasada, fechas comunes a las tres filas. Luego, se identificaron los pares de fechas más cercanas entre pasadas. Finalmente, con base en la propiedad ‘CLOUD\_COVER’ de producto ‘LANDSAT/LC08/C01/T1’, se filtraron las imágenes que presentaran menos del 10% de los píxeles con nubes. Para el periodo comprendido entre 2013 a 2019, se encontraron 13 rangos de fechas sin nubes para crear mosaicos de los BBSS.

- Procesamiento de imágenes y cálculo del MNDWI

El MNDWI fue calculado según la expresión dada por la Ecuación 4.10.

$$MNDWI_{L8} = \frac{B3-B6}{B3+B6} \quad (4.10)$$

- Identificación de ‘Agua Libre’

Procediendo de la misma manera que con las imágenes MODIS, para cada mosaico se seleccionaron los píxeles que tomaron valores de MNDWI mayores a 0.

- Análisis de la superficie de ‘Agua Libre’ de los BBSS

Multiplicando el número de píxeles de ‘Agua Libre’ por el área del píxel se calculó el área de ‘Agua Libre’ de los BBSS. Posteriormente, se analizó la dispersión generada entre el área de ‘Agua Libre’ de la cuenca estimada a partir de imágenes Landsat 8 y MODIS. Este análisis permitió relacionar la superficie detectada con los dos tipos de imágenes y validar la consideración de que las variaciones temporales de ‘Agua Libre’ detectadas con MODIS son representativas de las variaciones detectadas con Landsat 8.

## Etapa 2 “Análisis de la distribución espacial del ‘Agua Libre’

El análisis de la distribución espacial del ‘Agua Libre’ se realizó a través de la obtención de un mapa de probabilidad de ocurrencia (PO) (Ecuación 4.11), basado en las 468 imágenes de ‘Agua Libre’:

$$PO = \frac{\sum_1^{468} \text{Imagen 'Agua Libre'}}{468} = \frac{\text{Frecuencia de ocurrencia}}{468} \quad (4.11)$$



Como los píxeles de 'Agua Libre' tienen valor de 1 y los demás 0, al sumar las 468 imágenes (término del numerador en la Ecuación 4.11), se obtiene la imagen de frecuencia de ocurrencia con valores que van de 0 a 468. Cada valor indica el número de veces que un determinado píxel estuvo cubierto por 'Agua Libre'. Luego, al dividir por 468 se obtiene el mapa de probabilidad con valores que van de 0 a 1, donde 1 corresponde a la máxima probabilidad de ocurrencia.

El mapa de probabilidad de ocurrencia permitió identificar las zonas de mayor y menor probabilidad de presentar 'Agua Libre'. Además, permitió determinar la máxima superficie con probabilidad de presentar 'Agua Libre'. Finalmente, se adoptaron umbrales de probabilidad que dieron como resultado el mapa de caracterización de los cuerpos de agua según su carácter de permanencia. Este mapa permitió identificar las zonas de 'Agua Libre' de carácter permanente, semipermanente y no permanente, así como sus respectivas extensiones.

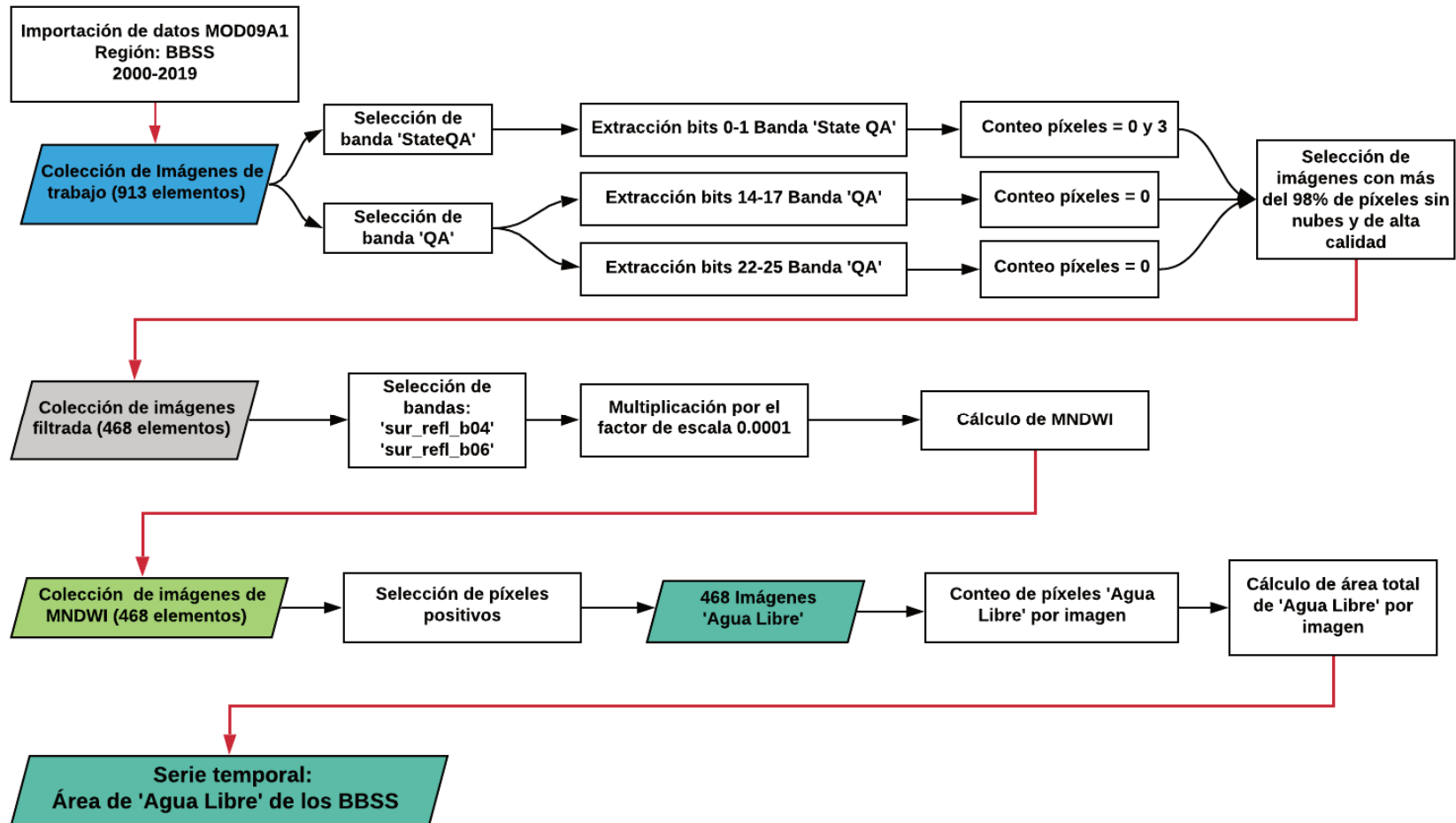


Figura 4.10. Diagrama de flujo metodológico seguido para la estimar la variación temporal de la superficie de 'Agua Libre' con imágenes MODIS.

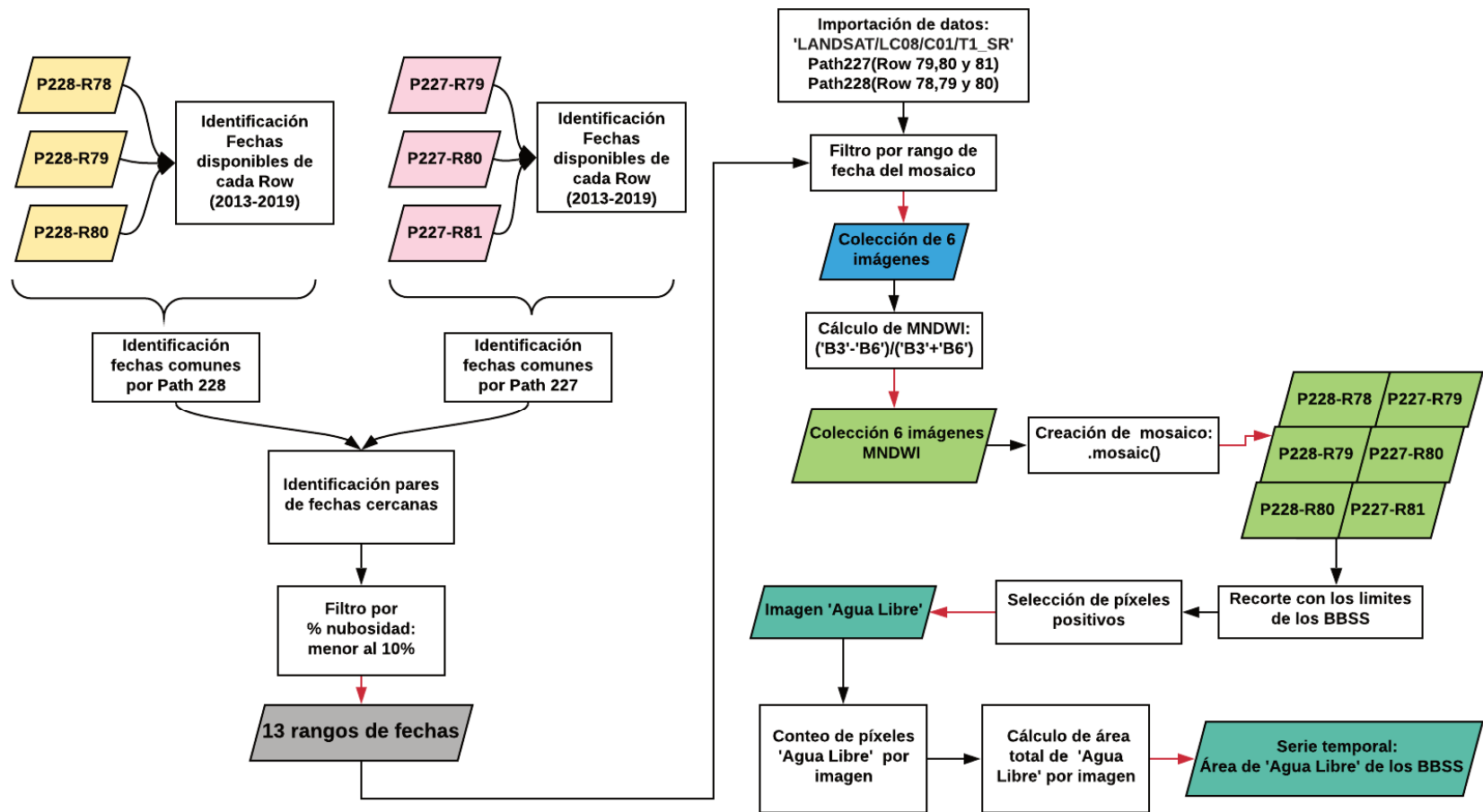


Figura 4.11. Diagrama de flujo metodológico seguido para la estimar la variación temporal de la superficie de 'Agua Libre' con imágenes Landsat 8.

### 4.3 Relación entre el área de ‘Agua Libre’, el sistema subterráneo y la generación de escorrentía

En áreas de llanura, existe una estrecha relación en el agua superficial y el agua subterránea (Guevara-Ochoa et al., 2020), en particular con el acuífero freático. En los BBSS una limitante para su caracterización es la escasez espacio-temporal de datos de niveles freáticos y niveles hidrométricos. Por ende en este trabajo, se recurrió a variables auxiliares que permitan avanzar en el conocimiento de dicha relación y otras características del sistema conjunto superficial/subterráneo.

La relación existente entre la superficie de ‘Agua Libre’ y el almacenamiento total en la cuenca se examinó por medio del análisis del comportamiento temporal de LWET y el área de ‘Agua Libre’, así como mediante el análisis de la dispersión respectiva. Además, se analizó la relación entre LWET y el NF en tres piezómetros ubicados en el centro y sur de la cuenca (ver ubicación en Figura 4.9). Los piezómetros, denominados Don Tito, El Quilla y San Bernardo, tienen una profundidad de 4, 6 y 9.5 m, respectivamente. Este análisis permitió inferir en forma indirecta la relación entre la presencia de superficies de ‘Agua Libre’ y el ascenso de los niveles freáticos. De manera similar, para identificar la respuesta de la superficie de ‘Agua Libre’ a anomalías de precipitación de diferentes escalas temporales, se estudió la relación entre las variaciones temporales de la superficie de ‘Agua Libre’, PMB y el SPIM (3 a 24 meses). Los diagramas de dispersión respectivos también fueron analizados. Por otra parte, para identificar si la expansión y contracción de las superficies de ‘Agua Libre’ tiene una influencia en la generación de escorrentía, se analizó el comportamiento temporal del escurrimiento superficial frente a PMB y frente a la superficie de ‘Agua Libre’.

Seguidamente, se aplicó la metodología propuesta por Scioli (2016) para detectar la localización de áreas con alto contenido de humedad en periodos de humedad contrastante. La aplicación de dicha metodología posibilitó identificar la relación cualitativa entre la presencia de superficies de ‘Agua Libre’ y la presencia de áreas con elevado contenido de humedad. Scioli (2016) encontró una correspondencia entre las áreas identificadas con esta metodología y las imágenes de saturación resultantes de la modelación hidrológica distribuida, concluyendo que estas áreas podrían contribuir en la generación de flujo superficial de saturación como VSAs.

De ahora en adelante, en el desarrollo de esta tesis las áreas con alto contenido de humedad, identificadas con la metodología propuesta por Scioli, serán denominadas ‘Áreas Saturadas’. La metodología de Scioli (2016) fue aplicada utilizando los mosaicos de imágenes Landsat 8 identificados en la sección anterior (Figura 4.11), en los cuales, además de realizar la identificación de ‘Agua Libre’, se calculó el  $NDWI_{GAO}$  según la Ecuación 4.12:

$$NDWI_{GAO} = \frac{B5 - B6}{B5 + B6} \quad (4.12)$$

La metodología utiliza herramientas del programa ENVI sobre el bi-plot generado entre las bandas del SWIR2 (Eje x) y el NDWI<sub>GAO</sub> (Eje y). En el bi-plot se seleccionan píxeles que corresponden a zonas con alto contenido de humedad y las herramientas de ENVI permiten visualizar, sobre una determinada imagen, la ubicación de dichos píxeles, los cuales son exportados como una nueva imagen o capa vectorial. La visualización de los píxeles seleccionados se realiza sobre la imagen composición color RGB-75NDWI<sub>GAO</sub> que resulta útil para identificar coberturas con diferente contenido de humedad. Al asignar el color azul al NDWI<sub>GAO</sub>, las coberturas con alto contenido de humedad toman color azul oscuro. En contraste, el color rojo y los colores formados por la combinación predominante del verde y el rojo representan coberturas con bajo contenido de humedad.

Álvarez (2020), por medio de interpretación visual y realizando clasificaciones supervisadas en una serie de imágenes Landsat 8, caracterizó el bi-plot generado entre el SWIR2 y el NDWI<sub>GAO</sub>, mejorando la técnica para seleccionar los píxeles del bi-plot. En la Figura 4.12 se muestra la caracterización realizada por Álvarez (2020), donde las ‘Áreas Saturadas’ están formadas por el conjunto de píxeles que quedan por debajo del límite de saturación. Estos píxeles se componen de ‘Agua Libre’ (1), Vegetación moderada (2) o densa saturada (4), Suelo desnudo saturado (2), suelo desnudo parcialmente húmedo (5) y vegetación moderada parcialmente húmeda (5).

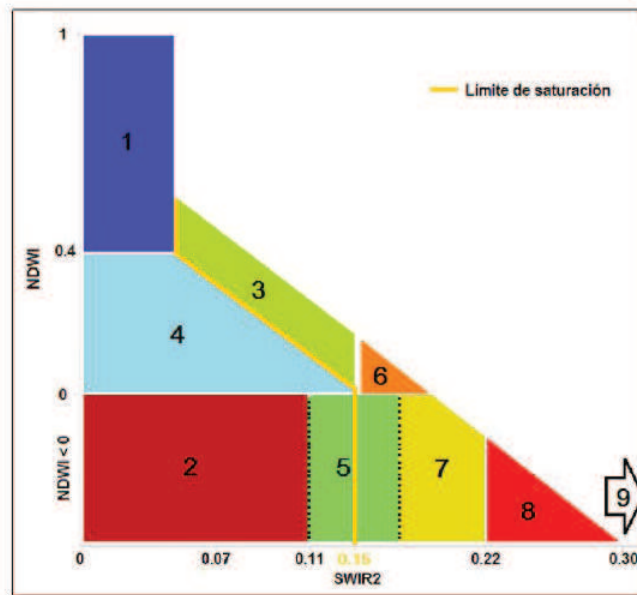


Figura 4.12. Caracterización del bi-plot generado por el NDWI (Gao, 1996) y SWIR 2. (Álvarez, 2020).

Como resultado del análisis realizado en esta sección fue posible llegar a un modelo conceptual de la conexión de las superficies de ‘Agua Libre’ con el sistema subterráneo. Se utilizó como base topográfica los datos SRTM (Farr et al. 2007), disponibles en GEE, el cual cuenta con una resolución espacial de 1 segundo de arco (30 m aproximadamente).

## Capítulo 5: Resultados y discusión

Los resultados obtenidos y su discusión se organizan en tres grandes secciones: 1) el cálculo y análisis de las componentes hidrológicas del balance, que resulta en la obtención de series mensuales para cada una de ellas para el periodo 2000-2016, acompañado de una interpretación de la distribución temporal y espacial de cada variable a fin de identificar patrones hidrológicos particulares, y por último, la aplicación del modelo de balance hídrico; 2) el cálculo de la superficie cubierta por 'Agua Libre' mediante el tratamiento de una colección de imágenes MODIS (2000-2019) y el análisis de su comportamiento espacial y temporal, lo que resultó en un mapa de probabilidad de ocurrencia de 'Agua Libre' y en un mapa de caracterización de cuerpos de agua; 3) el análisis de la evolución temporal de la superficie de 'Agua Libre' frente a variables como SPIM, LWET, ETB y Q, así como los respectivos diagramas de dispersión. Esto junto con la detección de 'Áreas Saturadas' resultó en un modelo conceptual del funcionamiento del sistema.

### 5.1 Comportamiento de las componentes del balance hídrico

#### 5.1.1 Precipitación

##### 5.1.1.1 Pre procesamiento de la información pluviométrica recopilada

A modo de ejemplo, en la Figura 5.1 se muestra el análisis de doble masa entre la estación Ruta Provincial 88s (SRH) y la estación Reconquista (SMN), donde se observa que la precipitación anual acumulada se ajusta a una recta de pendiente única. Esto demuestra la consistencia de la información de la estación Ruta Provincial 88s, razón por la cual fue seleccionada para el análisis posterior de la precipitación.

En contraste, la Figura 5.2 muestra el resultado del análisis de doble masa entre la estación La Escondida (APA) y la estación Resistencia Aero (SMN), ambas ubicadas en la provincia de Chaco. Como se observa en la figura, se presenta un cambio importante en la pendiente de la precipitación anual acumulada, razón por la cual, la información pluviométrica de la estación La Escondida fue considerada no consistente y se excluyó del análisis posterior. De acuerdo a Orsolini et al. (2000) los cambios de pendiente formados por más de cinco puntos sucesivos se consideran errores sistemáticos.

Del total de 117 estaciones recopiladas y analizadas, solo 49 fueron seleccionadas para el análisis posterior. Estas se presentan en la Tabla 5.1 y la Figura 5.3. Como se observa en la Figura 5.3, las estaciones seleccionadas no se encuentran uniformemente distribuidas en la cuenca, concentrándose principalmente en la provincia del Chaco y por fuera de los límites de la cuenca. Si bien existen algunas estaciones adicionales del INTA en el sector santiagueño de la cuenca, las series son muy recientes, con periodos de datos que abarcan entre 6 y 10 años. Este resultado evidenció aún más la necesidad de contar con información pluviométrica alternativa en regiones con baja densidad espacial de estaciones.

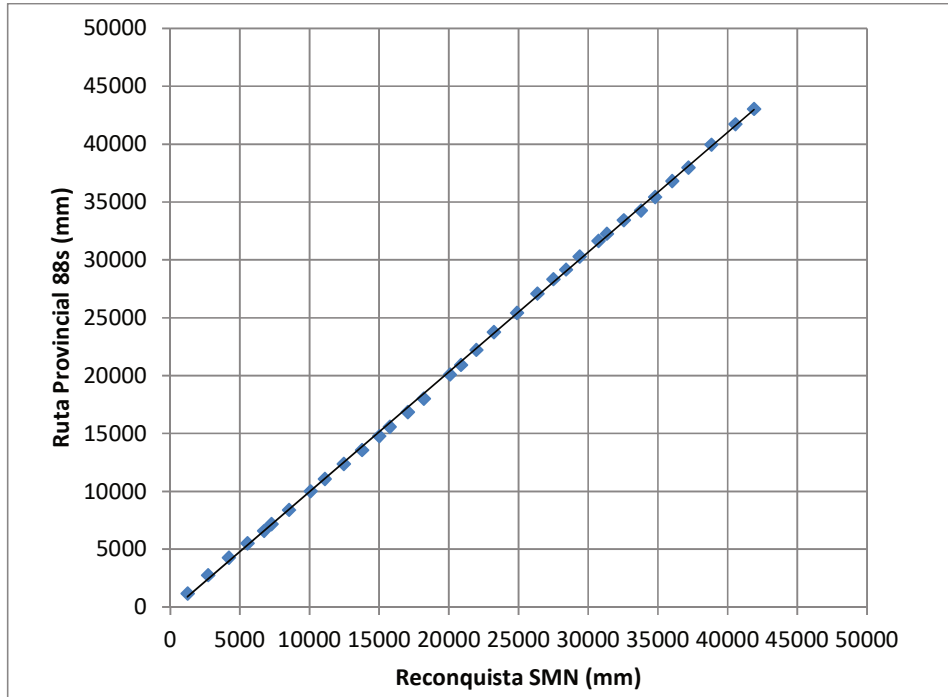


Figura 5.1. Análisis de doble masa entre las estaciones Ruta provincial 88s (RHN) y Reconquista (SMN).

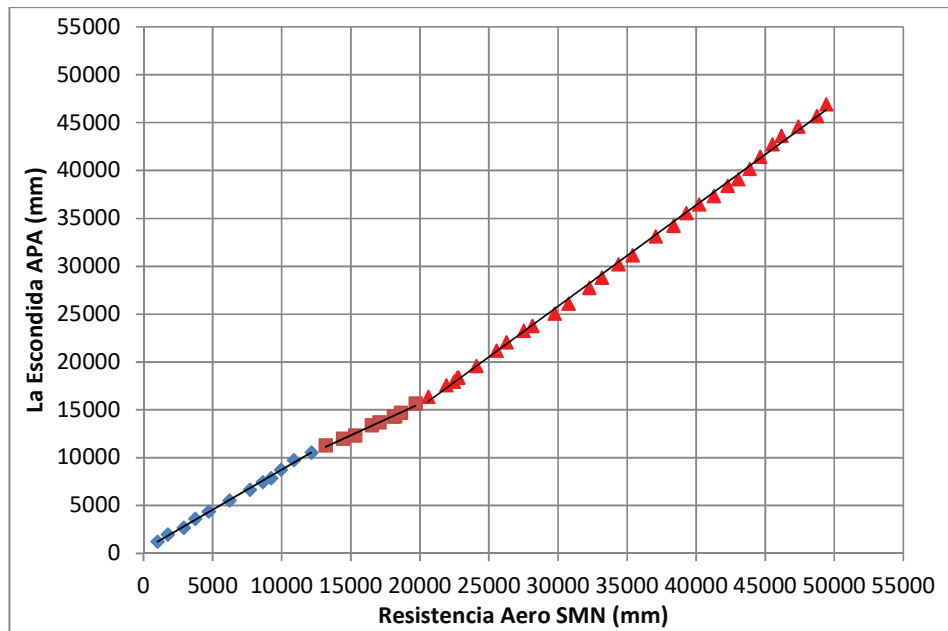


Figura 5.2. Análisis de doble masa entre las estaciones La Escondida (APA) y Resistencia (SMN).

<b>N°</b>	<b>Nombre</b>	<b>Organismo</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>Provincia</b>
2	Colonia Benítez	INTA	-27.42	-58.93	Chaco
4	Bellavista	INTA	-28.43	-58.92	Corrientes
6	Las Breñas	INTA	-27.10	-61.10	Chaco
7	Bandera	INTA	-28.89	-62.27	Santiago del Estero
10	Pampa del infierno	APA	-26.50	-61.18	Chaco
15	Machagai	APA	-26.93	-60.05	Chaco
16	Basail	APA	-27.88	-59.28	Chaco
19	Corzuela	APA	-26.96	-60.97	Chaco
21	Charata	APA	-27.22	-61.20	Chaco
22	La Tigra	APA	-27.11	-60.59	Chaco
24	San Bernardo	APA	-27.28	-60.71	Chaco
27	Santa Sylvina	APA	-27.83	-61.14	Chaco
28	Villa Berthet	APA	-27.29	-60.41	Chaco
30	Gral. Pinedo	APA	-27.32	-61.28	Chaco
31	Gancedo	APA	-27.49	-61.68	Chaco
41	Gral. San Martín	APA	-26.54	-59.34	Chaco
45	Pampa del Indio	APA	-26.05	-59.94	Chaco
48	La Eduvigis	APA	-26.84	-59.07	Chaco
49	Las Palmas	APA	-27.05	-58.68	Chaco
50	Capitán Solari	APA	-26.80	-59.56	Chaco
55	Juan José Castelli	APA	-25.95	-60.62	Chaco
56	Tacurazal-El Palmar	APA	-26.46	-60.05	Chaco
57	Las Garcitas	APA	-26.62	-59.80	Chaco
58	Colonia Unidas	APA	-26.70	-59.63	Chaco
61	La Verde	APA	-27.13	-59.38	Chaco
62	Makalle	APA	-27.21	-59.29	Chaco
66	Tres Isletas	APA	-26.34	-60.43	Chaco
67	Quitilipi	APA	-26.87	-60.22	Chaco
68	Cote Lai	APA	-27.53	-59.57	Chaco
73	Ceres	SMN	-29.88	-61.95	Santa Fe
74	Reconquista	SMN	-29.18	-59.70	Santa Fe
76	Roque Sáenz	SMN	-26.75	-60.40	Chaco
77	Las Lomitas	SMN	-24.70	-60.58	Formosa
79	Resistencia Aero	SMN	-27.45	-59.05	Chaco
81	Los Guasunchos	Privada	-28.31	-61.55	Santa Fe
82	Fortín Olmos	RHN	-29.07	-60.50	Santa Fe
83	Florencia	RHN	-28.03	-59.23	Santa Fe
84	Escuela 1256	RHN	-28.24	-59.70	Santa Fe
85	Ruta Nacional N° 011	RHN	-28.56	-59.36	Santa Fe
88	La sarita	RHN	-28.97	-59.85	Santa Fe
89	Ruta Provincial N° 042 S	RHN	-29.13	-59.94	Santa Fe



90	Ruta Provincial N° 088 S	RHN	-29.36	-59.78	Santa Fe
91	Margarita	RHN	-29.73	-60.01	Santa Fe
92	Malvinas Sur	RHN	-29.71	-59.02	Santa Fe
93	Pueblo Libertador	RHN	-30.22	-59.38	Santa Fe
94	Paso Junce	RHN	-30.35	-59.25	Santa Fe
99	Cacique Ariacaiquín	RHN	-30.66	-60.23	Santa Fe
100	San justo	RHN	-30.78	-60.59	Santa Fe
102	El colorado	RHN	-26.33	-59.36	Chaco

Tabla 5.1 Estaciones pluviométricas seleccionadas.

Como se mencionó en el Capítulo 4, se evaluaron los datos de CRU y GPCC para completar vacíos espaciales, se verificó su capacidad y precisión en la representación de la información observada. Como un ejemplo de ello, la Figura 5.4 muestra la serie de precipitación mensual de la estación La Tigra (APA; estación número 22 de la Figura 5.3) frente a las series del punto de grilla más cercano de CRU (a) y GPCC (b) (ver grillas en Figura 4.4). Es posible apreciar una mejor correspondencia entre los datos observados y GPCC, aunque ambas bases de datos presentan picos estacionales de menor magnitud respecto a lo observado. Esto también se aprecia en la Figura 5.5, en la cual se presentan los diagramas de dispersión correspondientes a dicha información. El ajuste lineal por mínimos cuadrados (en negro), muestra una desviación hacia abajo de la línea 1:1 (en rojo), lo que indica una tendencia al error por defecto en los datos de ambas bases de datos. GPCC resulta en una mejor correlación con datos observados ( $r=0.84$ ) y en un menor error de estimación (48.89 mm/mes).

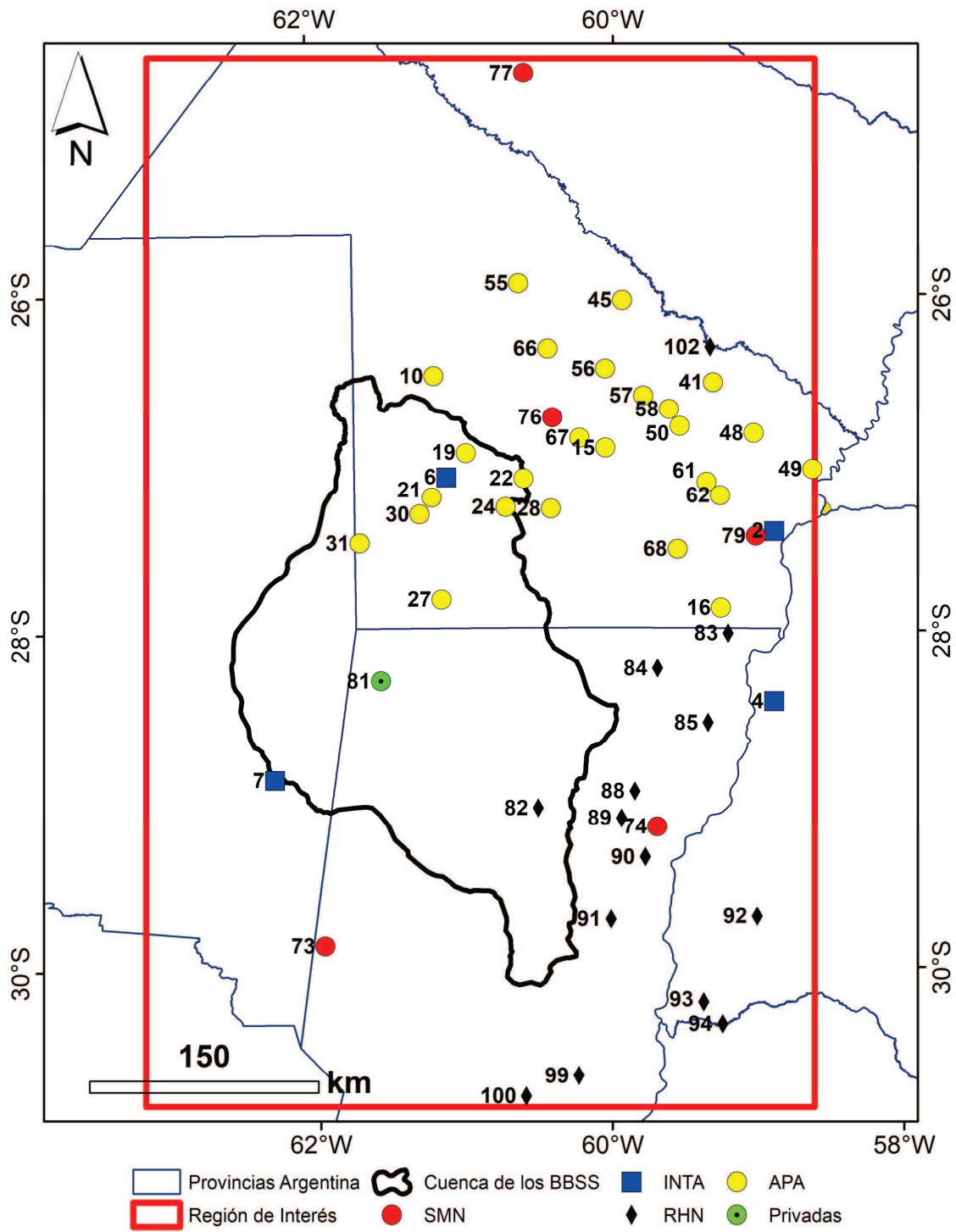


Figura 5.3. Ubicación de las estaciones pluviométricas seleccionadas.

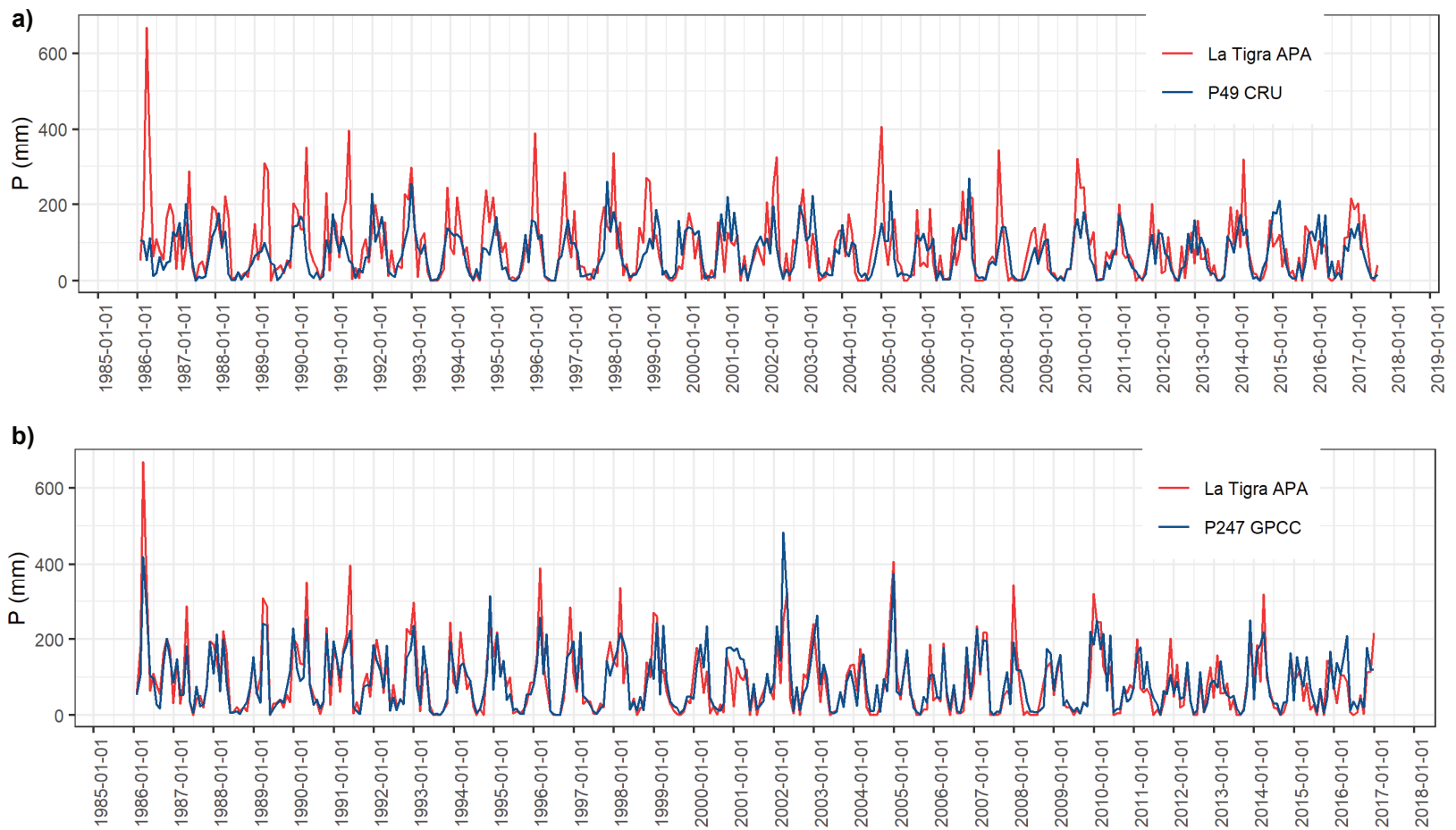


Figura 5.4. Precipitación mensual de la estación La Tigra frente a datos de CRU (a) y GPCC (b).

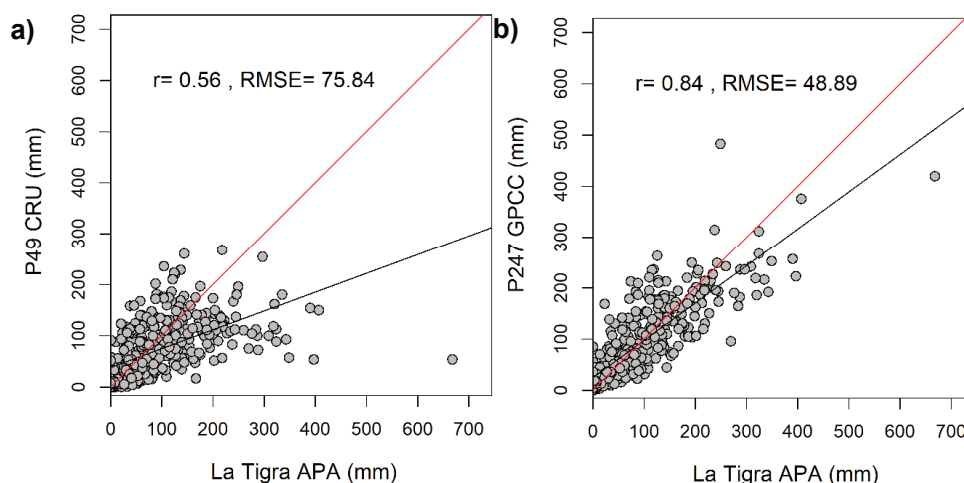


Figura 5.5. Diagrama de dispersión entre los datos de precipitación mensual de la Estación La Tigra y bases de datos. a) CRU; b) GPCC.

Similar comportamiento se observó al analizar los diagramas de dispersión entre cada una de las 49 estaciones y los puntos de grilla más cercanos de ambas bases de datos. Es decir, aunque tanto CRU como GPCC subestiman los valores de precipitación, se obtienen errores menores con los datos de GPCC. En el Anexo 3 se presentan los valores de RMSE y  $r$  obtenidos entre la información observada y ambas bases de datos.

A modo de resumen, en la Tabla 5.2 se presenta el promedio de RMSE y  $r$  para CRU y GPCC agrupándolos por la institución que provee la información observada. En promedio, los mayores valores de  $r$  se obtuvieron con los datos de GPCC, indicando una mayor correlación. De igual manera, el menor RMSE se obtuvo con los datos GPCC. Los valores máximos de  $r$  se obtuvieron entre las estaciones de SMN y la información de GPCC, lo que se debe a que, posiblemente, estas estaciones forman parte de las entradas del reanálisis de esa base de datos. Lovino et al. (2014) compararon la información provista por CRU TS 3.2 y GPCC V6 para la región del NE argentino, y encontraron que los datos de GPCC están mejor correlacionados con la información observada.

Con base en el análisis realizado, se concluye que los datos provistos por GPCC subestiman en menor medida los valores de precipitación. Por esta razón, esta base de datos fue escogida para completar vacíos espaciales en la información observada. Como resultado del pre procesamiento de la información pluviométrica, se conformó la matriz de IPS, la cual se compone de la información mensual de 49 estaciones meteorológicas y 359 puntos de grilla de GPCC.

En la Figura 5.6 se observa la ubicación de los puntos de información pluviométrica seleccionada, así como los polígonos de Thiessen generados para cada uno de ellos. Se distinguen con diferente color los polígonos que se encuentran dentro de los límites de la cuenca, cuyas áreas fueron utilizadas para calcular promedios espaciales. Además, como

resultado de la conformación de la matriz de IPS fue posible establecer un periodo común comprendido entre 1986 y 2016.

Organismo	GPCC		CRU	
	r	RMSE	r	RMSE
APA	0.78	53.94	0.61	70.03
INTA	0.88	36.95	0.62	69.32
Privadas	0.69	56.94	0.64	55.81
RHN	0.84	52.47	0.67	71.43
SMN	0.99	12.18	0.67	64.99
Promedio General	0.83	47.93	0.63	69.57

Tabla 5.2. Promedios del coeficiente de correlacion (r) y RMSE en las estaciones según su procedencia.

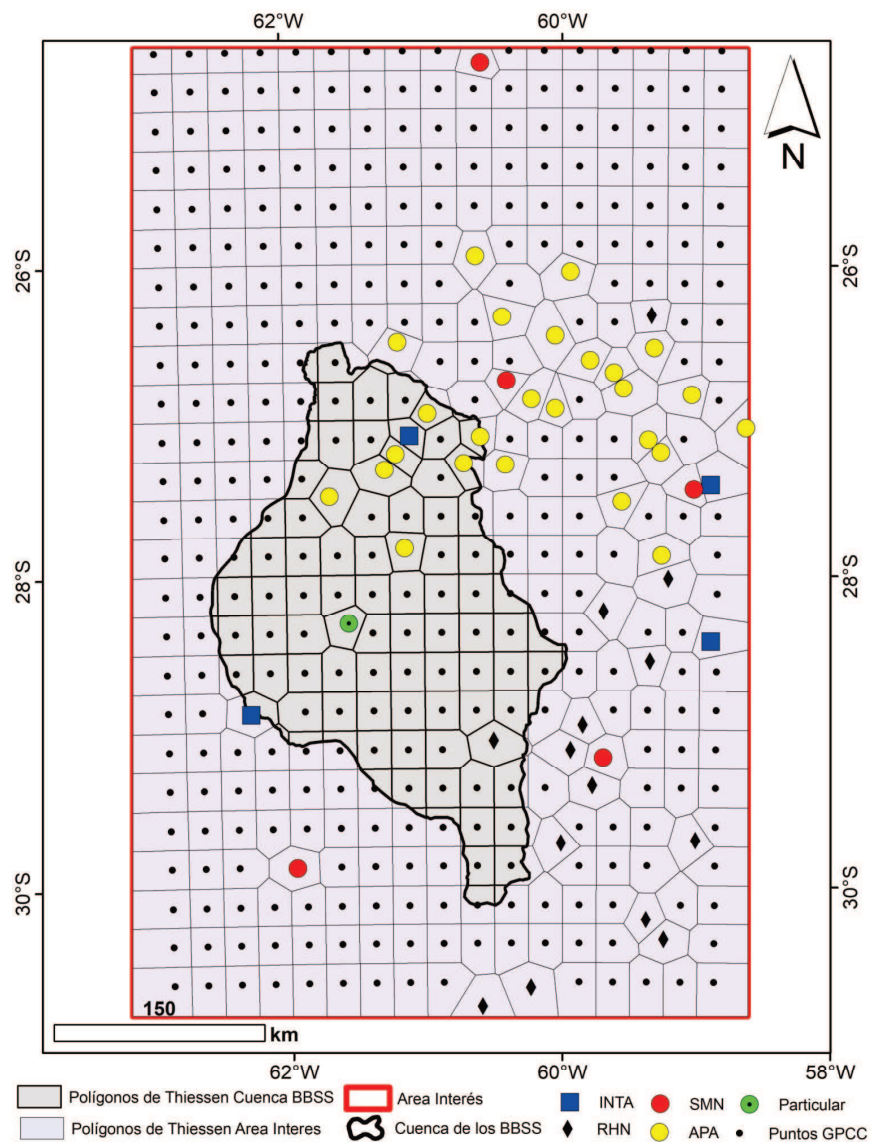


Figura 5.6. Ubicación de la información pluviométrica seleccionada.

Por último, se procedió a completar los datos faltantes. Del total de 29 452 datos mensuales solo se tenían 355 datos faltantes, de ellos 59 fueron completados con la media de la estación incompleta para ese mes. Los 296 restantes fueron calculados por medio de modelos de regresión lineal. Solo en 85 ocasiones, se cumplió tanto el supuesto de normalidad de los datos como el supuesto de la homogeneidad de la varianza. Es decir, en 211 casos no se cumplen los tests y por ende los valores predichos de precipitación podrían tener errores. A pesar de eso, estos resultados se consideraron aceptables pues los 211 datos que no cumplen los supuestos representan solo un 0.71% del total de datos mensuales con los que se cuenta.

En la Figura 5.7 se muestran dos ejemplos de diagramas de dispersión y la recta del modelo de regresión lineal para el relleno de las series de a) Ceres (Santa Fe; estación número 73 de la Figura 5.3) con el punto 55 de GPCC; y b) Escuela 1256 (Santa Fe; estación número 84 de la la Figura 5.3) con el punto 135 de GPCC. En el Anexo 4 se presenta para cada dato mensual faltante el mes, año, la estación o punto de grilla tomado como estación predictora, el valor de  $r$ , coeficientes del modelo lineal,  $p$  valores de los test de normalidad y homocedasticidad del modelo realizados. También se muestran los valores de precipitación calculada y la precipitación observada para la fecha faltante en la estación predictora.

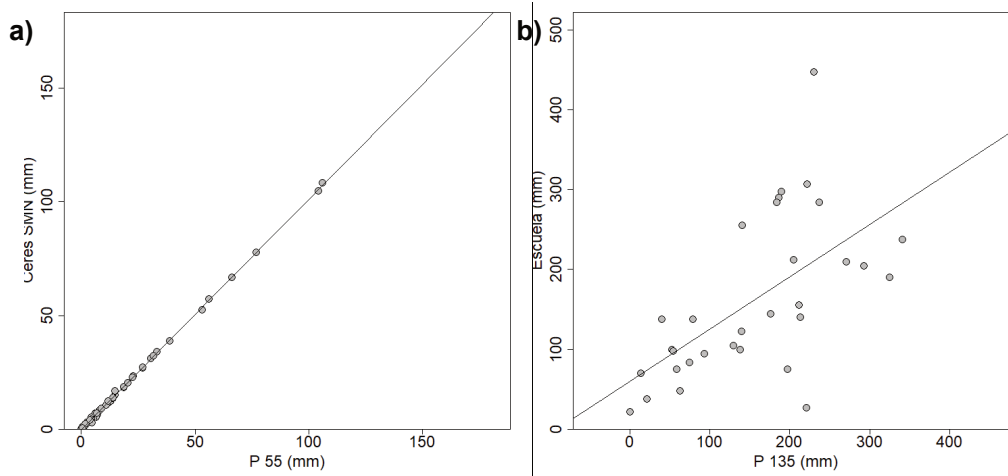


Figura 5.7. Diagrama de dispersión entre: a) Ceres y P55 GPCC; b) Escuela 1256 y P135 GPCC.

#### 5.1.1.2 Análisis de la distribución espacial y temporal de la precipitación

Para el periodo comprendido entre 1986 y 2016, la precipitación media anual de los BBSS y de la región de interés fue de 1023 y 1045 mm, respectivamente. Como se observa en la Figura 5.8, la precipitación media anual de los BBSS y de la región de interés muestra un comportamiento similar, en los años 1986 y 2002 se presentaron las precipitaciones más altas del periodo, con valores superiores a 1300 mm. En contraste, en 1988, 1995 y 2008 se presentaron las precipitaciones más bajas, con valores inferiores a 800 mm. La tendencia lineal de la  $P$  anual en la región de interés (línea negra) tiene un comportamiento decreciente a razón de 3.9 mm/año.

En cuanto a la distribución espacial de la precipitación media anual, en la Figura 5.9 se presentan los mapas para diferentes periodos, hasta el presente no se contaba con mapas sistematizados de la distribución espacio-temporal de la precipitación en la zona de estudio a una escala de detalle. En la Figura 5.9 a se muestra el promedio anual del periodo completo 1986-2016, mientras que en las Figura 5.9 b-g se tuvieron en cuenta periodos de 5 años consecutivos para el cálculo del promedio anual. Por último, en la Figura 5.9 h se muestra la distribución espacial para el periodo de aplicación del balance hídrico (2000-2016). En general, en todos los periodos analizados las isohietas presentan una dirección predominante N-S y P crece en dirección O-E. Para el periodo 1986-2016, P anual crece a una tasa aproximada de 166 mm cada 100 km.

Respecto al periodo 1986-2016, en el quinquenio 2006-2010 se presentó un desplazamiento de las isohietas hacia el E, lo que se traduce en una disminución de la precipitación anual en esos años en toda la región. Esto concuerda con lo observado en la Figura 5.8, la precipitación anual del periodo 2006-2010 se encuentra por debajo de la línea de tendencia y por debajo del valor medio anual (1045 mm/año). Para este periodo, la tasa de cambio de P en sentido O-E tuvo un valor aproximado de 125 mm por cada 100 km, esto es, 0.75 veces la registrada en el periodo 1986-2016.

De manera similar, respecto al promedio del periodo 1986-2016, en el quinquenio 1991-1995 se aprecia un leve desplazamiento de las isohietas hacia el E y un aumento de la superficie con P entre 1000 y 1100 mm, lo que significa una disminución de la precipitación anual. En efecto, en los años 1993, 1994 y 1995 la cuenca de los BBSS experimentó precipitaciones inferiores a la media, la tasa de cambio de P en sentido O-E resultó ser de 83 mm por cada 100 km aproximadamente, esto es, casi la mitad de la estimada en el periodo 1986-2016.

En contraste, para el quinquenio 1986-1990, las isohietas muestran un desplazamiento hacia el O lo que implica mayores precipitaciones. La tasa de cambio de P en sentido O-E resultó ser de 250 mm por cada 100 km aproximadamente, es decir, 1.5 la tasa de cambio del periodo 1986-2016. De forma similar, respecto al periodo 1986-2016, en el periodo 2001-2005 ocurrió un desplazamiento de las isohietas hacia el O, razón por la cual en gran parte del área de los BBSS se presentaron precipitaciones entre 1100-1200 mm anuales, la tasa de cambio de P en sentido O-E fue de 166 mm cada 100 km. Por último, la distribución de P anual de los periodos 1996-2000 y 2000-2016 resultó ser muy similar a la del promedio del periodo completo (1986-2016), con tasas de cambio en sentido O-E de igual magnitud: 166 mm cada 100 km.

En cuanto a la distribución de la precipitación en el año hidrológico, la Figura 5.10 a muestra que el ciclo anual medio de la cuenca de los BBSS para el periodo 1986-2016 presenta un carácter monomodal. Como se observa, el inicio del año hidrológico se da en septiembre, entre octubre y abril se registra el 76.5% de la precipitación anual. Mientras la precipitación máxima se presenta en marzo con un valor de 151.5 mm, la mínima ocurre en julio con un valor de 19.4 mm. Es notable que entre noviembre y abril la precipitación media de los BBSS parece ser constante, lo que podría deberse a que se trata del ciclo anual medio espacial. Para analizar el efecto del promedio espacial de la cuenca, en la Figura 5.10 b se muestra como ejemplo el ciclo anual medio (1986-2016) en la estación Los Guasunchos (Dpto. 9 de Julio, Santa Fe; estación

número 81 de la Figura 5.3). Si bien en Los Guasunchos el aplanamiento entre noviembre y abril no es tan marcado, el comportamiento es similar.

En relación a lo anterior, la Figura 5.11 muestra la distribución espacial de la precipitación media del periodo 1986-2016 para cada mes. Si bien en algunos meses puede detectarse la influencia del método de interpolación/información de base, es posible identificar patrones regionales para los diferentes meses. En concordancia con lo encontrado en la Figura 5.10, entre octubre y abril se presentan las mayores precipitaciones; sin embargo, aunque los valores medios de los BBSS entre noviembre y abril (Figura 5.10 a) son aproximadamente constantes, la distribución espacial difiere. En abril, octubre y noviembre la distribución espacial es similar, las isohietas presentan una dirección predominante N-Sur, P crece en dirección O-E a tasas de cambio aproximadas de 29, 20, 20 mm cada 100 km, respectivamente. Estos meses corresponden a la transición entre la estación seca y húmeda. En cambio, entre diciembre y marzo, aunque la precipitación decrece hacia el O, el patrón espacial expresa mayor irregularidad.

La distribución espacial para los meses más secos, mayo a septiembre (Figura 5.11 e-i), muestra un patrón similar: las isohietas tienen una dirección predominante N-S y la precipitación crece en dirección O-E. La tasa de cambio O-E aproximada para mayo, junio, julio, agosto y septiembre es de 12.5, 16.6, 8.33, 12.5 y 12.5 mm por cada 100 km, respectivamente, valores menores a los observados en los meses más lluviosos.

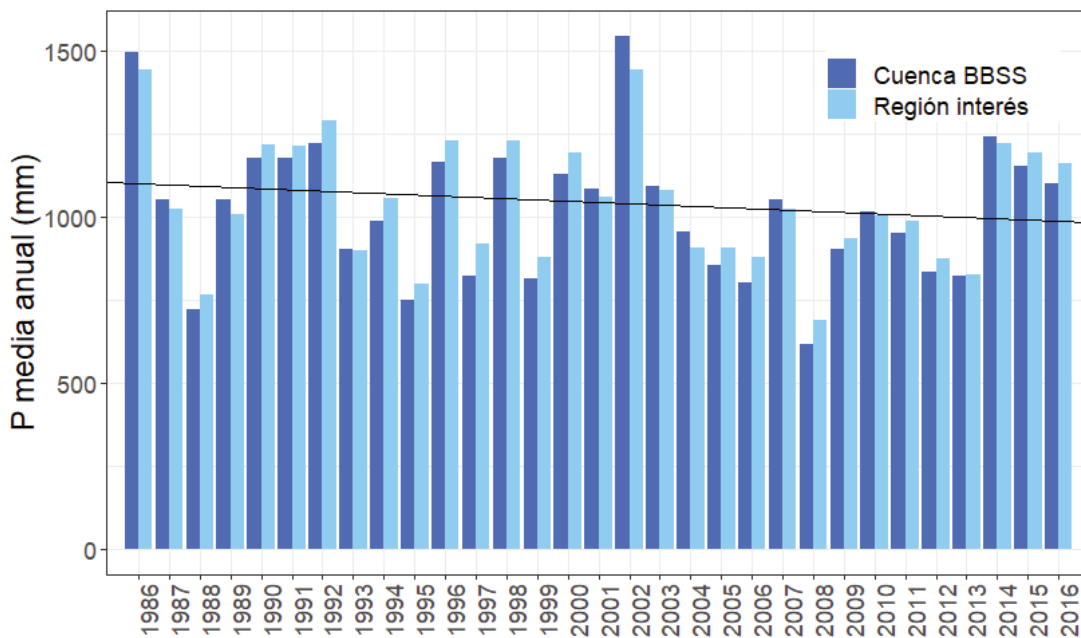


Figura 5.8. P anual media del periodo 1986-2016.



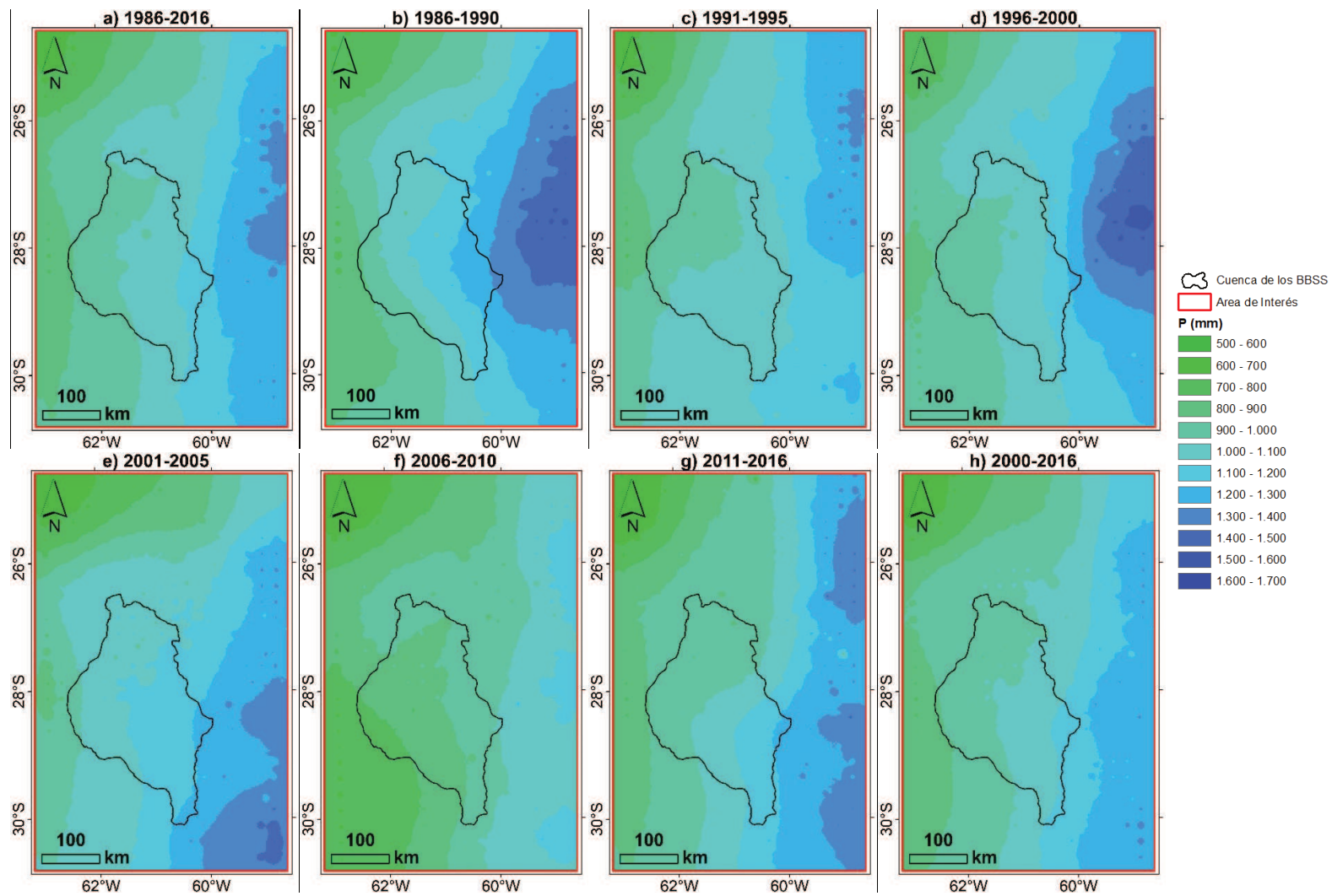


Figura 5.9. Distribución espacial de la P anual para a) 1986-2016, b) 1986-1990, c) 1991-1995, d) 1996-2000, e) 2001-2005, f) 2006-2010, g) 2011-2016 y h) 2000-2016.

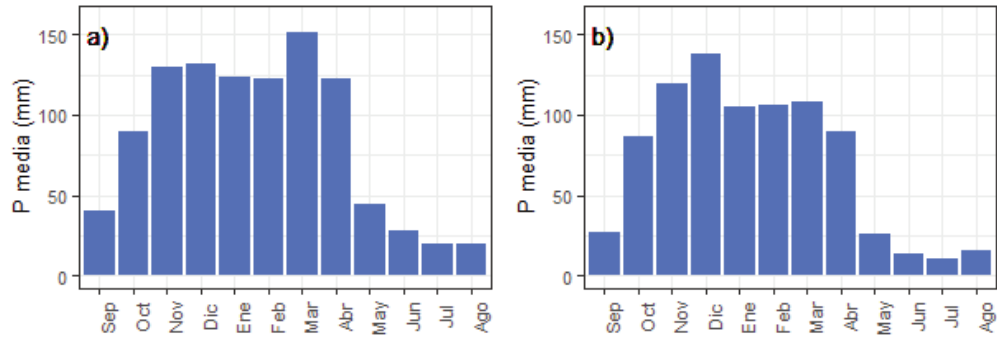


Figura 5.10. a) Ciclo anual de P de los BBSS (1986-2016); b) Ciclo anual de P de Los Guasunchos (1986-2016).

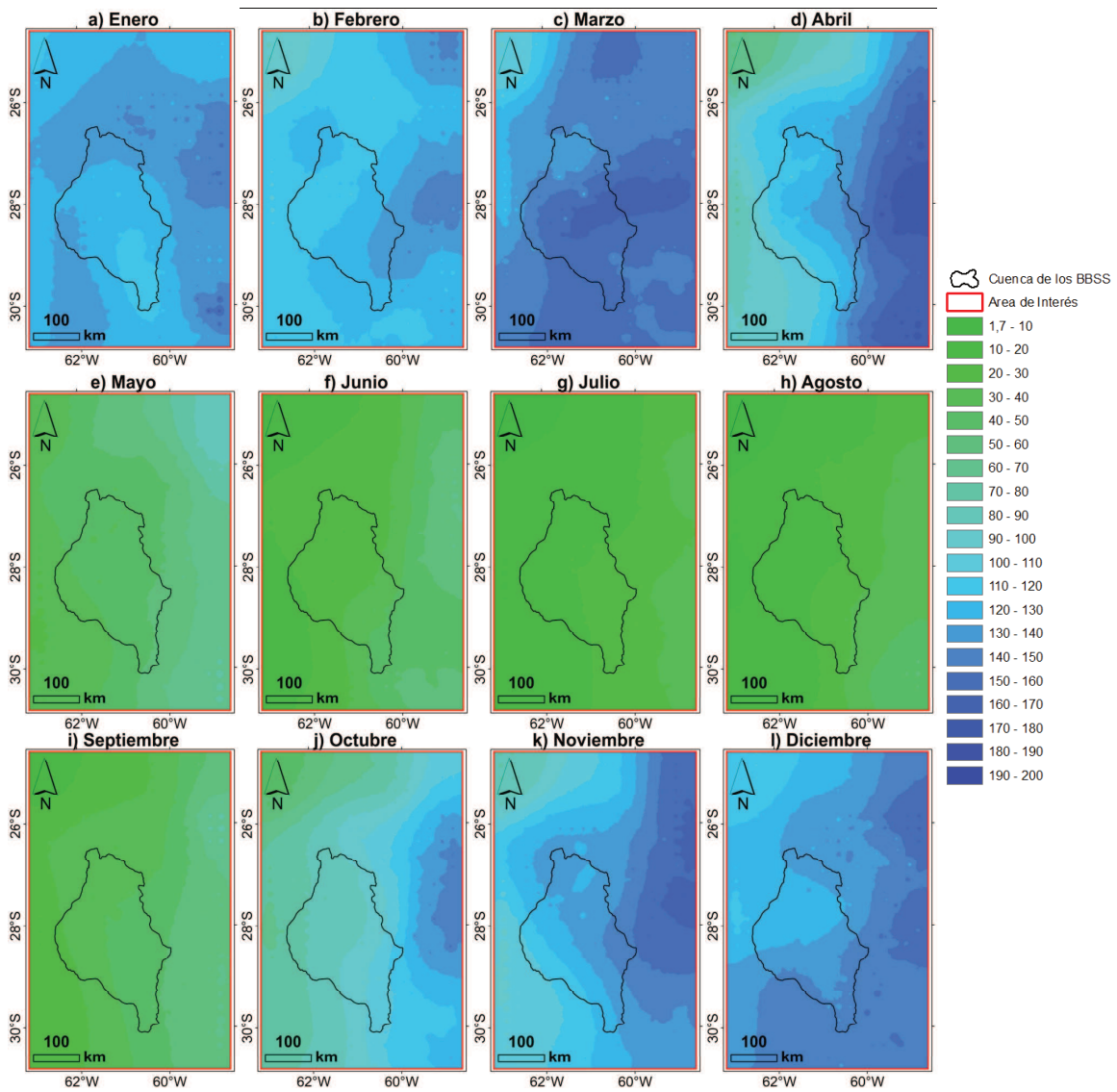


Figura 5.11. Distribución espacial de P media del periodo 1986-2016 para cada mes del año.

La serie temporal PMB para el periodo 1986-2016 (Figura 5.12) presenta un valor máximo de 311.7 mm/mes registrado en marzo de 2002. Otros picos importantes se presentan en marzo del 1986, noviembre de 2009, abril de 2016 y marzo de 2003, con valores de 280.8 mm/mes, 270.8 mm/mes, 260.6 mm/mes y 254.3 mm/mes, respectivamente. La precipitación mínima de la PMB fue de 0.3 mm/mes registrado en agosto de 2013.

En la Figura 5.12, además, se muestra el término de P utilizado en el modelo de balance hídrico (primer término del primer miembro de la Ecuación 4.2) calculado promediando dos valores mensuales consecutivos de la PMB. El tiempo asignado a cada valor (del término P de balance) es el tiempo promedio entre las dos observaciones, como la PMB corresponde al valor acumulado a final de mes, el tiempo promedio generalmente corresponde al día 15 del mes. Como se observa, el término de P utilizado en el balance muestra cierta atenuación de los picos estacionales de la PMB.

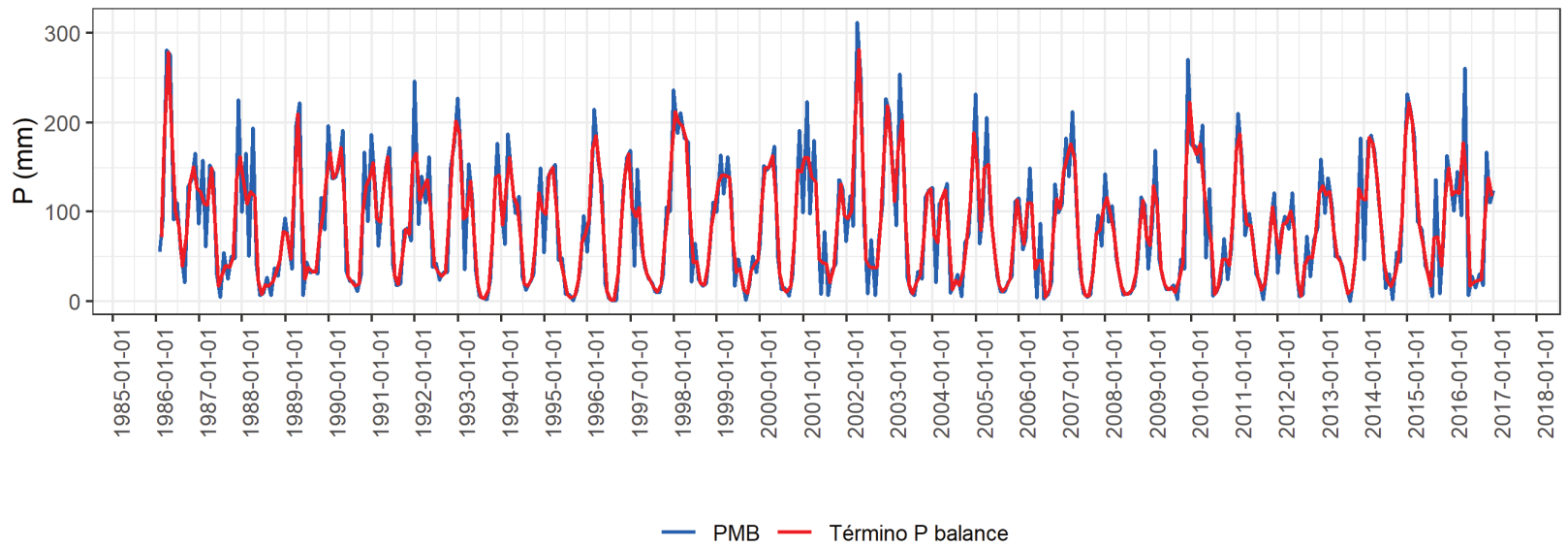


Figura 5.12. Serie temporal de la PMB y del término de P utilizado en el balance hídrico (1986-2016).

### 5.1.1.3 Identificación de periodos húmedos y secos con el SPI

Como se explicó anteriormente, las series de SPIM (índice estandarizado de precipitación media de la cuenca) calculadas mediante polígonos de Thiessen permitieron identificar periodos húmedos/secos para diferentes escalas temporales. En las Figura 5.13 y 5.14 se muestran las series temporales del SPIM de 3 a 24 meses. Se observa que a medida que aumenta la escala temporal se identifican periodos de sequía de mayor duración. Esto se debe a que para escalas temporales menores cada mes tiene un gran impacto y el índice puede variar rápidamente, por ello las series temporales de SPIM de 3 y 6 meses muestran una mayor variabilidad. En efecto, respecto al SPIM de 6 meses, el SPIM de 3 meses presenta mayor variabilidad y picos positivos/negativos de mayor magnitud, lo que significa que el déficit/exceso de precipitación implicaría mayor impacto en reservorios hidrológicos que responden a la escala temporal de 3 meses.

De acuerdo a los valores del índice de la Tabla 2.1, periodos severamente secos, comunes al SPIM de 3 y 6 meses, se presentaron en 1988-04/1989-05, 1995-04/1996-03, 1997-03/1997-11 y 1999-09/2000-01. Con el SPIM de 6 meses se identificó un periodo extremadamente seco entre 2007-09/2009-10, el cual incluye dos periodos extremadamente secos identificados con el SPI de 3 meses (2007-11/2008-09 y 2008-12/2009-10). En cuanto a los periodos húmedos, periodos muy húmedos comunes al SPI de 3 y 6 meses se presentaron en 1991-05/1991-10, 1992-04/1993-02, 2002-03/2003-07 y 2009-11/2010-09.

En la Figura 5.14 se observa que el SPIM de 9 y 12 meses tienen un comportamiento muy similar, a excepción de tres picos negativos observados en 1986-01, 1997-09 y 2000-01, en los cuales el SPIM de 9 meses fue de mayor magnitud. Dos de ellos se clasifican, según el SPIM de 9 meses, como periodos severamente secos (1995-04/1996-08 y 1997-03/1997-12). Si se analiza el SPIM de 9 y 12 meses en forma conjunta, se identifican periodos secos/húmedos comunes a ambos: un periodo extremadamente seco se presentó entre 1988-06/1989-10 aproximadamente; un periodo severamente seco ocurrió en 2007-12/2009-11; un periodo extremadamente húmedo se presentó en 2000-09/2004-02; y finalmente, periodos moderadamente húmedos se presentaron en 1989-10/1993-10, 1998-01/1999-07, 2010-01/2011-02 y 2014-03/2016-12.

En cuanto al SPIM de 24 meses, se destaca la ocurrencia de un periodo muy húmedo entre 2001-01/2005-03 y la ocurrencia de un periodo severamente seco entre 2005-03/2010-06, aproximadamente. Además, se observa que, respecto al SPIM de 9 y 12 meses, el SPIM de 24 meses presenta menor variabilidad, periodos húmedos/secos de mayor duración y en general picos de menor magnitud. Por ejemplo, entre 2004-01 y 2010-01 el SPIM de 24 meses no refleja los picos observados en el SPIM de 9 y 12 meses.

Es importante destacar el desfase temporal que se observa entre los picos del SPIM de 24 meses y el del SPIM de 9 y/o 12 meses. Estos últimos se desarrollan de forma sincrónica, mientras que los picos del SPIM de 24 meses muestran un desfase temporal, presentándose de manera retardada. En otras palabras, los reservorios hidrológicos que responden a las anomalías de precipitación de 24 meses experimentarían la intensidad máxima de sequía/humedad de manera retardada.

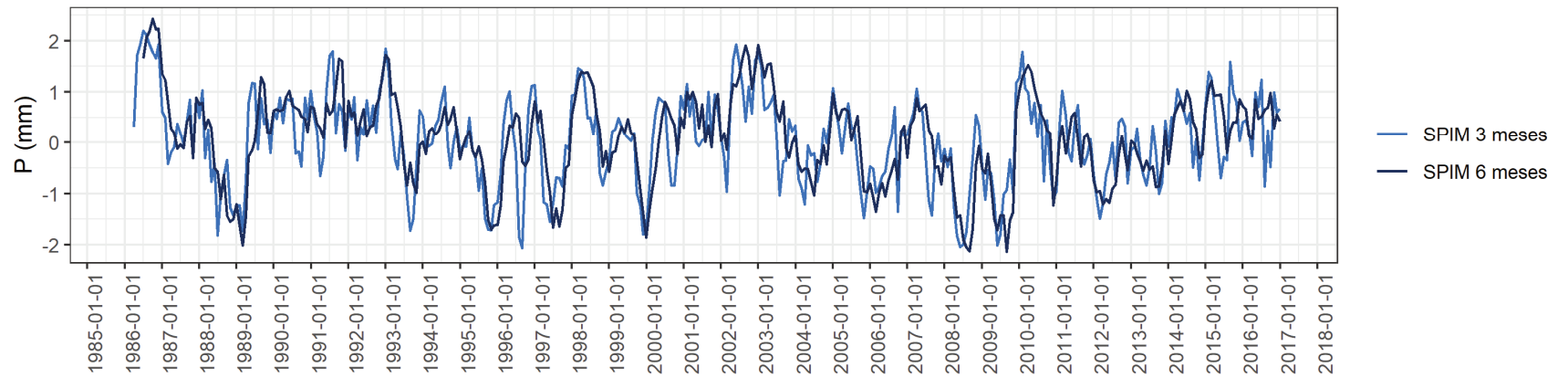


Figura 5.13. Serie temporal del SPIM de 3 y 6 meses para el periodo 1986-2016.

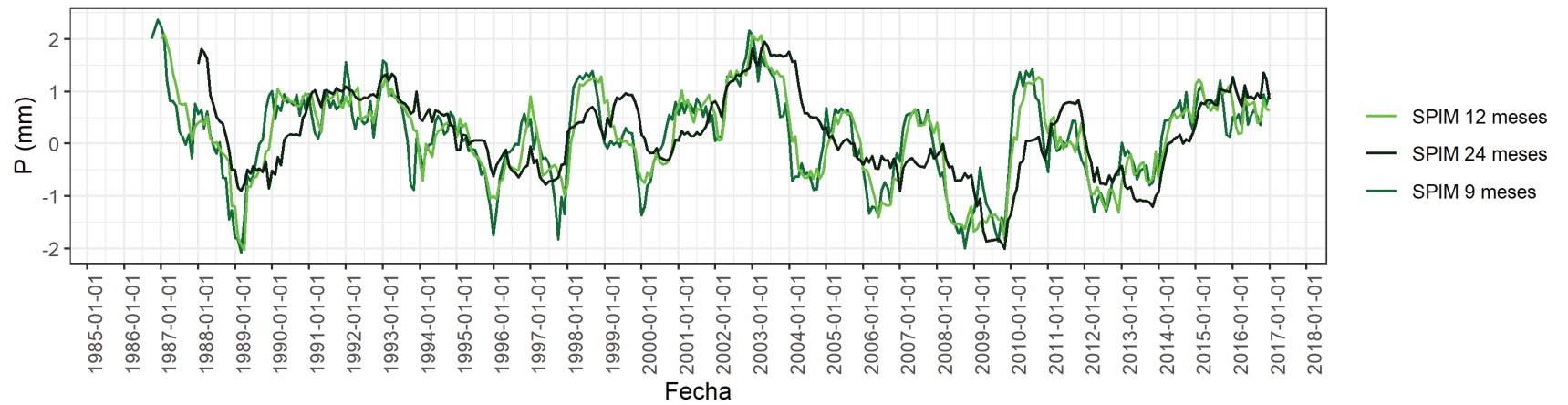


Figura 5.14. Serie temporal del SPIM de 9, 12 y 24 meses para el periodo 1986-2016.

### **5.1.2 Evapotranspiración real ET**

Los valores medidos de ET en Virasoro (ver ubicación en Figura 4.7) fueron comparados con los valores de ET provistos por diferentes fuentes de datos. La fuente de datos elegida, por brindar la estimación de ET más precisa, fue utilizada para confeccionar los primeros mapas de la distribución espacial de ET en la cuenca de los BBSS y para obtener la serie ETB de la cuenca.

#### **5.1.2.1 Estimación de ET a partir de diferentes fuentes de información**

Para el periodo de observaciones disponibles (diciembre de 2009 a mayo del 2012) la ET media mensual en Virasoro fue de 96.20 mm, la ET mínima y máxima fue de 41.53 y 153.36 mm/mes, respectivamente. En la Figura 5.15 se observan los diagramas de dispersión entre la ET observada en Virasoro y la ET estimada utilizando los datos de GLDAS, FLDAS, CFSV2, TerraClimate, MOD16A2 y por la aplicación del modelo regional de Di Bella et al. (2000). Se observa además el ajuste lineal por mínimos cuadrados (en negro) y la línea 1:1 (en rojo).

Además de eso, en la Tabla 5.3 se presentan los valores de  $r$  y RMSE obtenidos de las comparaciones entre los datos observados en Virasoro y los estimados. El coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ) no es un buen indicador de la representatividad de la fuente de datos. Por ejemplo, para Di Bella et al. (2000) se obtuvo un  $r=0.8$ , sin embargo, este modelo sobreestima en exceso los datos observados. Según el RMSE, la mejor estimación se obtiene con GLDAS con un error de 18.85 mm/mes. A excepción de TerraClimate, se observa que los ajustes lineales entre observado-estimado presentan una desviación hacia arriba de la línea 1:1, lo que indica que las fuentes de datos sobreestiman los valores de ET. La sobreestimación se produce principalmente entre los meses de octubre a abril y para valores de ET observados mayores a 100 mm aproximadamente (Figura 5.16).

El modelo de Di Bella et al. (2000) resultó ser el que más se aleja de los valores observados, sobreestimando ET en 91 mm/mes. En la Figura 5.16 se observa en línea punteada la estimación realizada con Di Bella et al. (2000) desde febrero a junio, meses en los cuales el modelo presenta la mayor incertidumbre puesto que el mismo fue construido con datos que abarcan el periodo 1982-07/1983-01. Estos resultados muestran las limitaciones de la aplicación de ese modelo a escalas regionales y, de manera similar a lo encontrado por García et al. (2013), la necesidad de que las estimaciones realizadas a partir del mismo sean evaluadas. Según el análisis anterior, los datos provistos por GLDAS fueron seleccionados para estimar la ET en la cuenca de los BBSS.

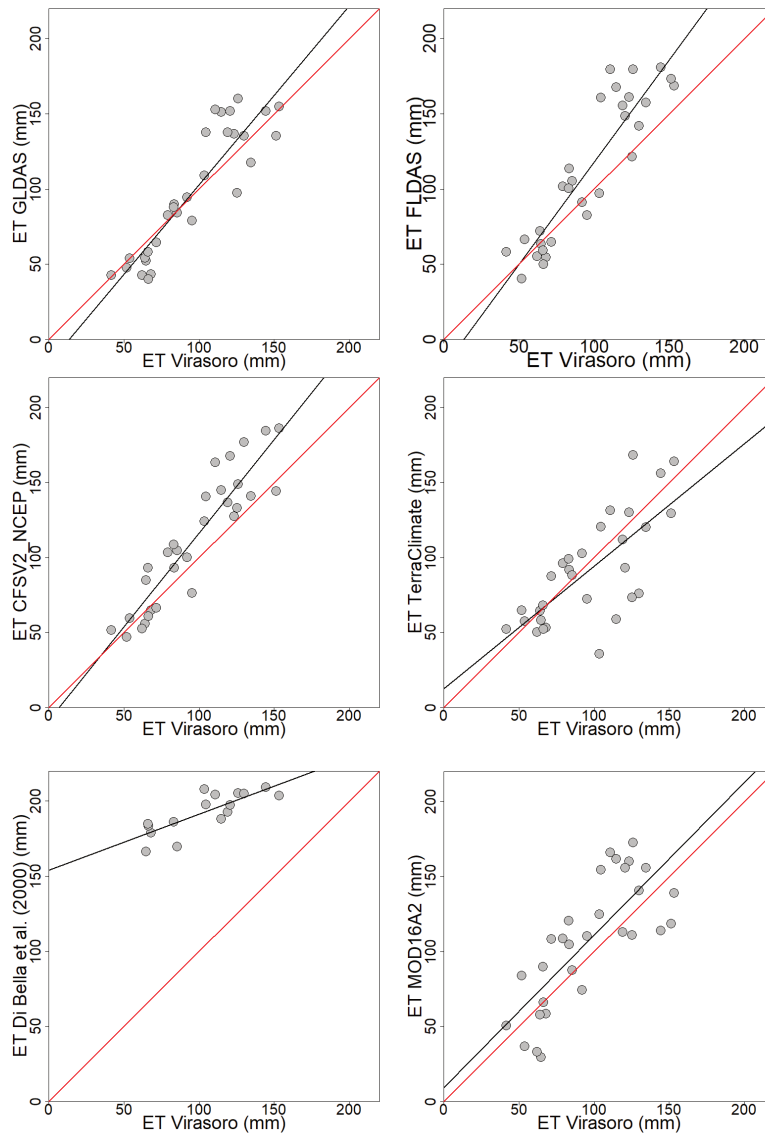


Figura 5.15. Diagramas de dispersión entre la ET observada en Virasoro y la ET estimada con diferentes fuentes de datos.

Base de datos	r	RMSE
GLDAS	0.9	18.85
FLDAS	0.91	28.01
CFSV2_NCEP	0.92	24.05
TerraClimate	0.72	25.76
Di Bella et al. (2000)	0.8	91
MOD16A2	0.77	28.8

Tabla 5.3 Estadísticos entre los valores de ET observados en Virasoro y los valores estimados.



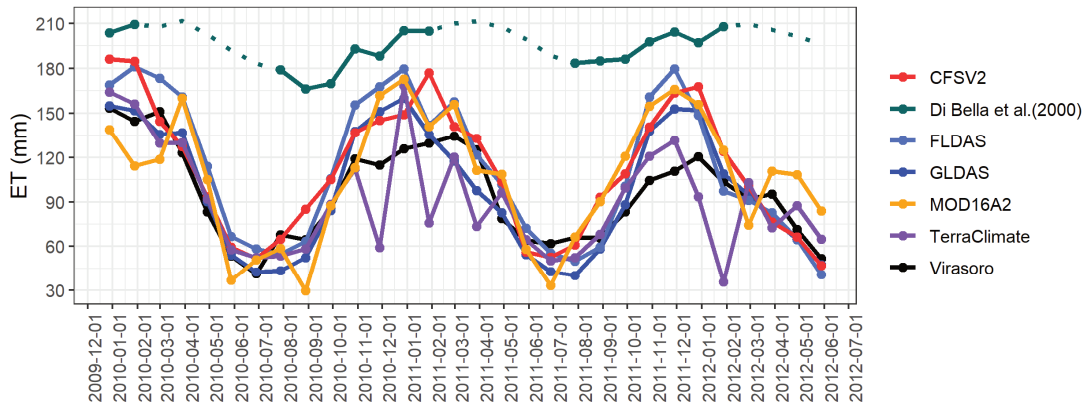


Figura 5.16. Evolución temporal de la ET en Virasoro frente a la estimación con diferentes fuentes de datos.

### 5.1.2.2 Análisis de la distribución espacial y temporal de ET en los BBSS

En la cuenca de los BBSS la ET media anual del periodo 2000-2016 fue de 954.93 mm, con un mínimo y máximo de 768.51 y 1141.57 mm, respectivamente (Figura 5.17). La tendencia lineal de la ET anual (línea negra de la Figura 5.17) muestra un comportamiento decreciente. Valores de ET superiores a 1050 mm ocurrieron en los años 2001, 2002, 2003, 2010 y 2015. Los valores más bajos del periodo, cercanos a 750 mm, se presentaron en 2009, 2012 y 2016. A excepción de 2007, entre 2004 y 2009 la ET anual mostró un comportamiento decreciente con valores inferiores al promedio (954.93 mm), lo que estaría relacionado con el periodo de sequía ocurrido durante esos años.

La Figura 5.18 muestra los mapas de la distribución espacial de la ET media anual para diferentes periodos. La Figura 5.18 a es el promedio del período 2000-2016, mientras que las Figuras 5.18 b-d corresponden a promedios para periodos de 5 años consecutivos, periodos que se corresponden con los mapas de P. En general, se observa que la magnitud de la ET anual crece en dirección O-E, de manera similar al comportamiento de la precipitación anual. Esto muestra la relación existente entre la ET y la disponibilidad de agua. Para el periodo 2000-2016, la tasa de cambio aproximada de ET en los BBSS en sentido O-E es de 208.33 mm cada 100 km.

De manera similar a lo observado con la precipitación, en el periodo 2006-2010 se aprecia un leve desplazamiento de las isolíneas hacia el E, indicando una disminución en la ET anual en esos años. Para este periodo, la tasa de cambio de la ET anual en sentido O-E es de 166 mm cada 100 km, esto es, 0.8 veces la del periodo 2000-2016. En contraste, en el periodo 2001-2005 se observa un desplazamiento de las isolíneas hacia el O, lo que se traduce en un aumento de ET en acuerdo con la mayor disponibilidad de agua en esos años. Entre 2001 y 2005, la tasa de cambio de la ET anual en los BBSS en sentido O-E se mantuvo igual a la del periodo 2000-2016: 208.33 mm cada 100 km.

La distribución espacial del periodo 2011-2016 es similar al comportamiento medio del periodo 2000-2016, la tasa de cambio de la ET anual en los BBSS en sentido O-E se mantuvo en 208.33 mm cada 100 km. Aunque no se menciona el periodo, en la estación INTA Las Breñas, ubicada

en el centro N de la cuenca (estación número 6 de la Figura 5.3), la ET media anual estimada como  $0.7 \cdot ET_{\text{tanque}}$  es 1050 mm, lo que estaría dentro del orden de magnitud de la media de la cuenca y el valor espacial de Figura 5.18 a.

De manera similar a lo observado en el ciclo anual de P, el ciclo de ET tiene un carácter monomodal (Figura 5.19), el máximo se presenta en diciembre con un valor de 138.76 mm y el mínimo en junio con un valor de 28.71 mm. Entre mayo y agosto se presentan los valores más bajos de ET, con valores inferiores a 50 mm, estos meses también experimentan las precipitaciones y temperaturas más bajas. Entre octubre y marzo los valores de ET superan los 75 mm, en acuerdo con la ocurrencia de precipitaciones y temperaturas más elevadas.

En relación a esto, en la Figura 5.20 se muestra la distribución espacial de la ET media del periodo 2000-2016 para cada mes. Entre abril y agosto las isolíneas presentan una dirección predominante N-S y la magnitud de ET muestra un crecimiento en dirección E-O. Para dichos meses, la tasa de cambio aproximada de ET en los BBSS en sentido E-O es de 12.24, 12.5, 8.33, 16.66 y 16.66 mm por cada 100 km, respectivamente. Entre septiembre y febrero se observa un comportamiento algo diferente, la dirección de crecimiento de ET es NO-SE con tasas de cambio aproximadas, en esa dirección, de 20.41, 20.41, 24.49, 16.33, 12.24 y 8.16 mm cada 100 km, respectivamente. Tanto la disponibilidad de agua (relacionada a la precipitación) como la temperatura (T), entre otros, son factores fundamentales que influyen en la magnitud de ET. La temperatura media mensual en la zona de estudio muestra una dirección de crecimiento S-N, más marcado en los meses cálidos como enero y menos pronunciado en los meses fríos como julio (Bianchi y Cravero, 2010). Teniendo en cuenta los gradientes regionales de precipitación y temperatura, los resultados alcanzados indicarían que durante los meses de menor ET predomina la influencia de P sobre esta variable, mientras que en los meses de primavera-verano, el gradiente regional de ET muestra la influencia combinada de P y T.

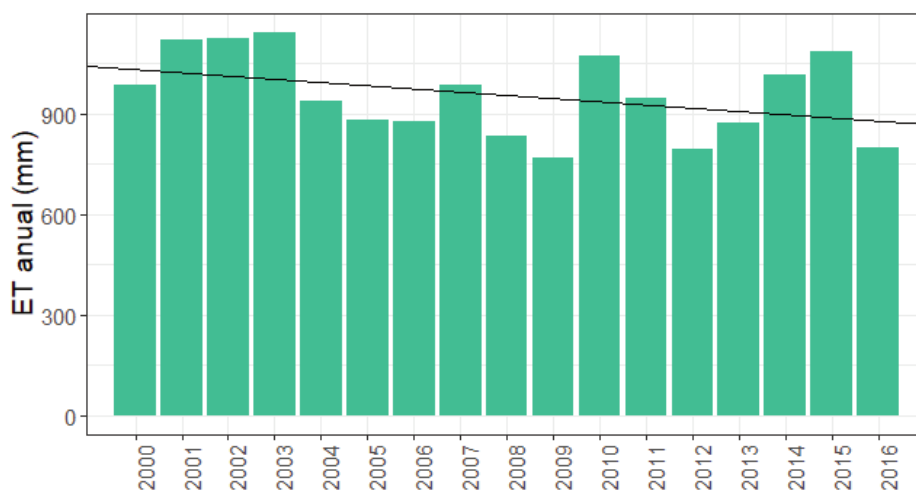


Figura 5.17. ET anual media de los BBSS para el periodo 2000-2016.

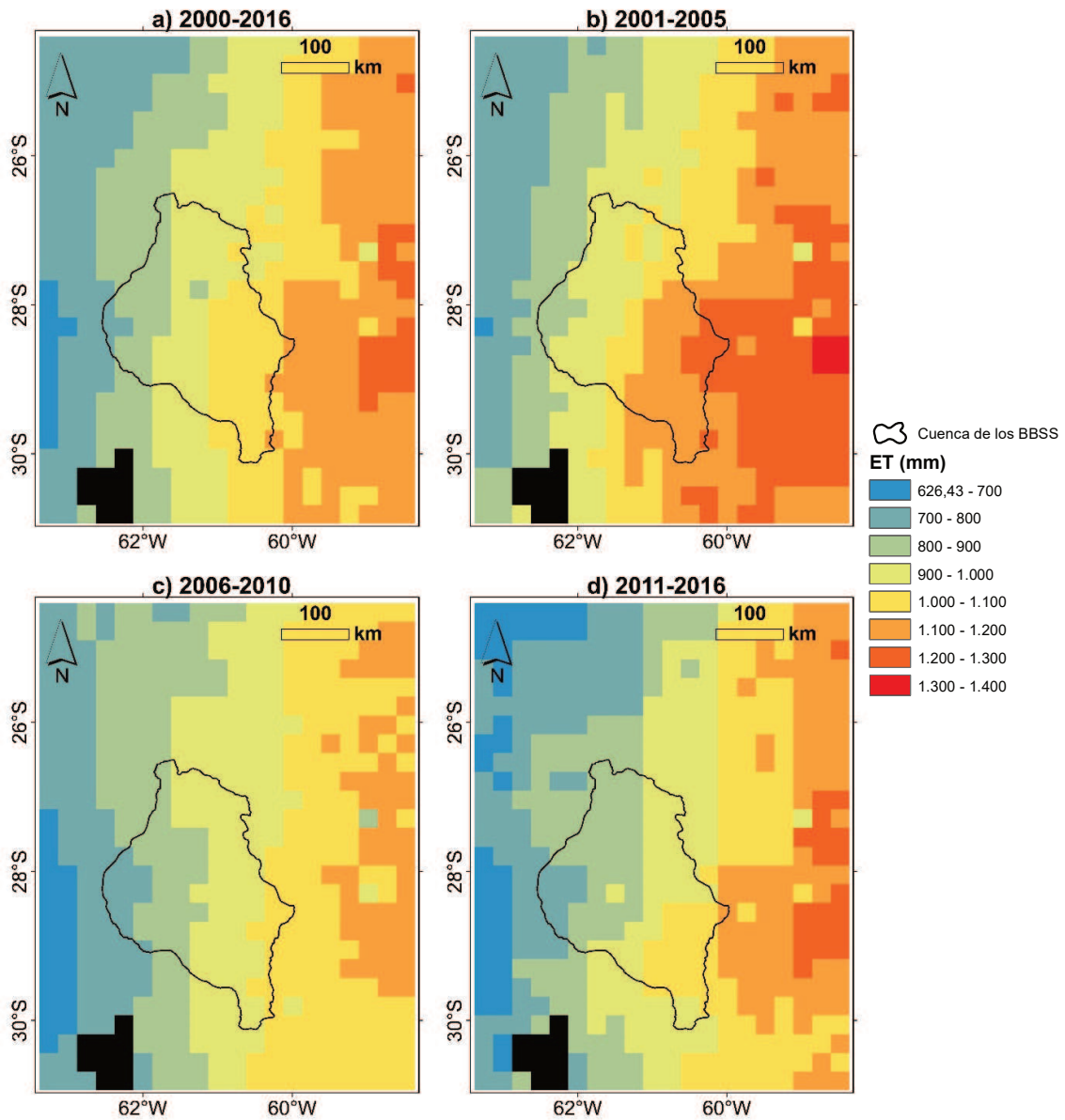


Figura 5.18. Distribución espacial de la ET anual para a) 2000-2016, b) 2001-2005, c) 2006-2010 y d) 2011-2016.

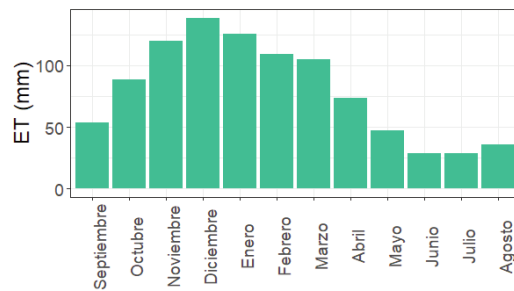


Figura 5.19. Ciclo anual de ET de los BBSS para el periodo 2000-2016.

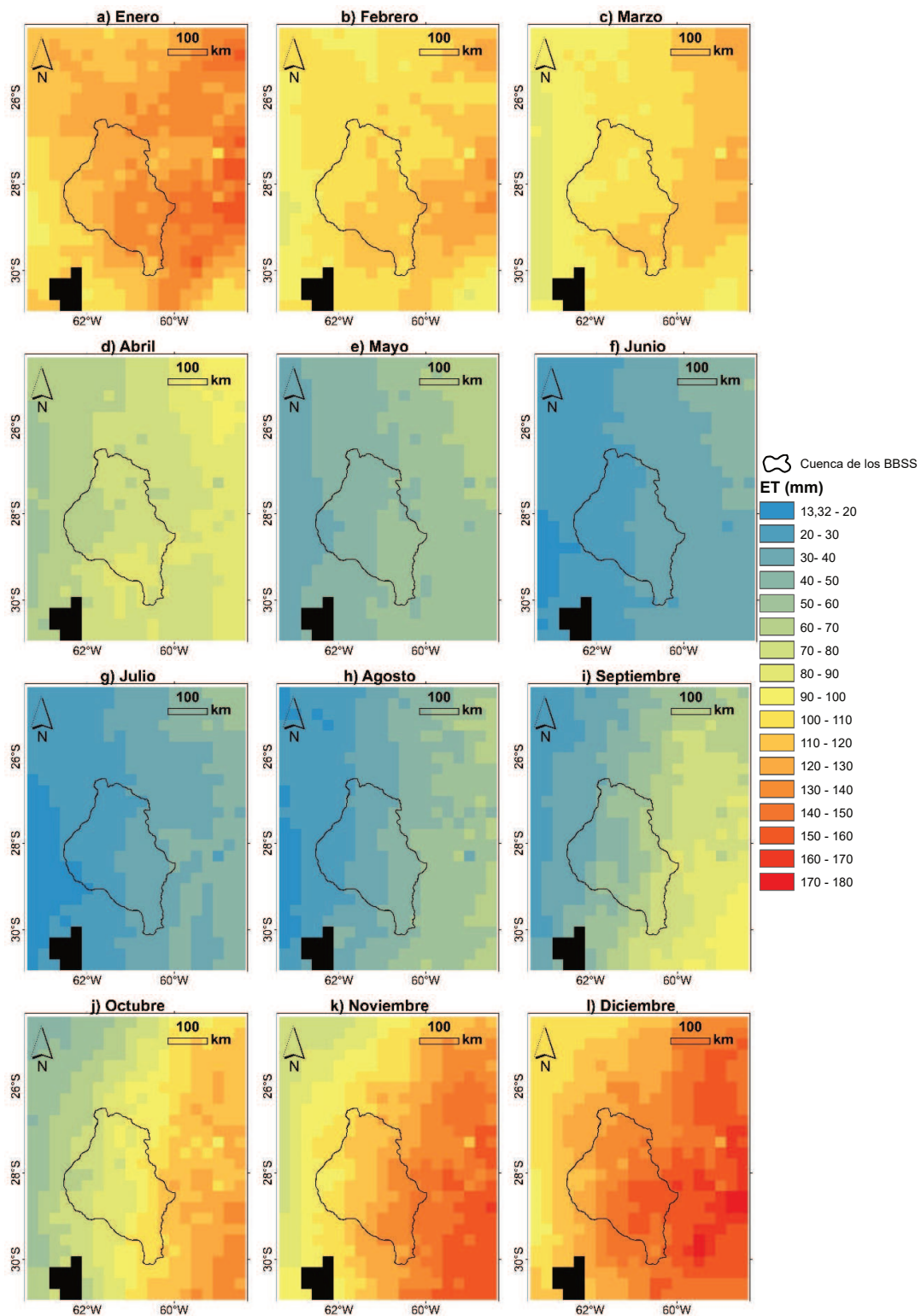


Figura 5.20. Distribución espacial de ET media del periodo 2000-2016 para cada mes del año.

Finalmente, la serie temporal de ETB (evapotranspiración real promedio de la cuenca de los BBSS) para el periodo 2000-2016 se muestra en la Figura 5.21. Esta presenta un valor máximo de 165.13 mm en diciembre de 2001, y un valor mínimo de 12.28 mm ocurrido en julio del 2008. En la Figura 5.21, además, se muestra la el término de ET utilizado en el modelo de balance hídrico (segundo término del primer miembro de la Ecuación (4.2), calculado promediando dos valores consecutivos de la ETB. El tiempo asignado a cada valor (del término ET de balance) es el tiempo promedio entre las dos observaciones, como la ETB corresponde al valor acumulado a final de mes, el tiempo promedio generalmente está asignado al día 15 del mes. Como se observa, existen diferencias mínimas entre el término de ET del balance y la ETB; la atenuación en los máximos estacionales es mucho menor a la atenuación observada en la precipitación (Figura 5.12).

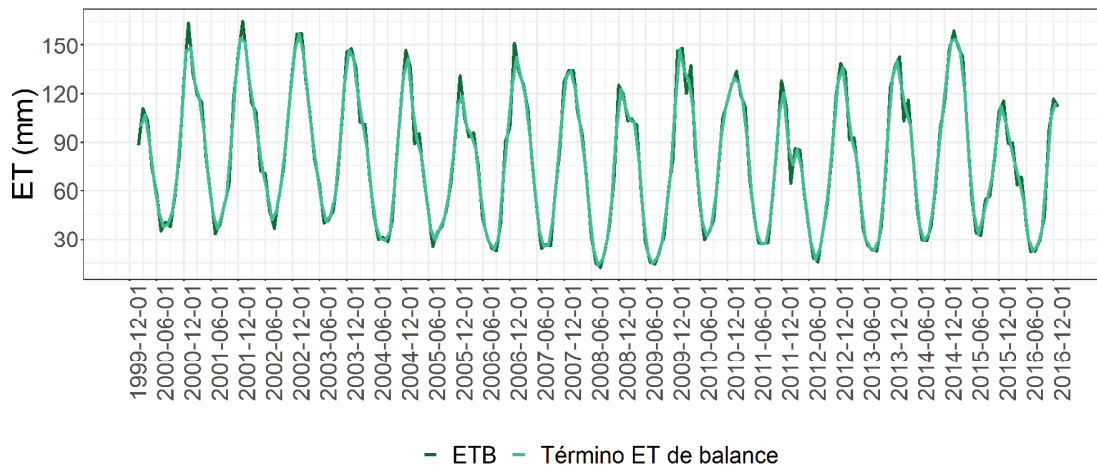


Figura 5.21. Serie temporal de la ETB y del término de ET utilizado en el balance hídrico (2000-2016).

### 5.1.3 Escurrimiento superficial

La Tabla 5.4 muestra el número de mediciones diarias de altura hidrométrica disponibles en la estación Paraje El Bonete (Ver ubicación en Figura 1.2 b). Como se aprecia, la cantidad de registros no es igual en todos los meses y, además, existen importantes vacíos de información. Para periodos anteriores a la instalación del sensor las mediciones son muy escasas.

La Figura 5.22 muestra la evolución temporal del escurrimiento mensual desde 2003 al 2018, como se mencionó en la Sección 4.1.3, los valores de  $Q$  fueron estimados con las Ecuaciones 4.5 y 4.6, la lámina de escorrentía fue estimada teniendo en cuenta el área de aporte hasta la estación Paraje El Bonete. El máximo se registró en mayo de 2003, con un valor de  $540 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $29.47 \text{ mm}/\text{mes}$ ). El mínimo se registró en agosto de 2013, con un valor de  $0.39 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $0.02 \text{ mm}/\text{mes}$ ). El valor medio del periodo 2000-2018 es de  $40.7 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $2.59 \text{ mm}/\text{mes}$ ).

Mes\Año	Escala hidrométrica		Sensor piezorresistivo									
	2003	2005	2007	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Enero						31		6	10	29	30	
Febrero			5			26		9	5	13	21	
Marzo			27		9	28		15	5		22	27
Abril		2			16	26	5	11	12	15	28	
Mayo	5		15		31	31	27	8	11	24	30	
Junio	2		29		28	30	29	7	21	27	17	
Julio	1		31		30	29	26	14	29	29	25	
Agosto			16	12	31	8	3	17	31	30	31	
Septiembre			3	27	30		27	13	28	26	10	
Octubre			9	30	30	1	31	16	29	31	1	
Noviembre				29	30	16	18	9	30	26		
Diciembre				10	31	31	8	8	31	26		

Tabla 5.4. Número de mediciones diarias disponibles de altura hidrométrica en la estación Paraje El Bonete.

Como se mencionó en la Sección 4.1.4, los valores mensuales faltantes se estimaron como un porcentaje C de la precipitación mensual. El porcentaje C, calculado abarcando el periodo de registro de escurrimiento más largo entre 2000-2016 (abril de 2013 a febrero de 2016), resultó ser de 1.9%. Este valor se considera poco significativo frente a la magnitud de variables como P y ET y demostraría que, en términos generales, los procesos hidrológicos verticales como ET e infiltración son predominantes.

Como resultado, en la Figura 5.23 se observa la evolución temporal de la lámina de escurrimiento/caudal mensual desde el 2000 hasta el 2016, donde se distinguen los valores estimados a partir de registros de altura hidrométrica (escala hidrométrica/sensor piezorresistivo) y una curva H-Q de los estimados en periodos sin registros (C). Además, en la Figura 5.23 se muestra el término de Q utilizado en el modelo de balance (tercer término del primer miembro de la Ecuación 4.2), calculado promediando dos valores consecutivos de lámina mensual. El tiempo asignado a cada valor (del término de Q de balance) es el tiempo promedio entre las dos observaciones, como la lámina mensual de escurrimiento corresponde al valor acumulado a final de mes, el tiempo promedio generalmente está dado para el día 15.

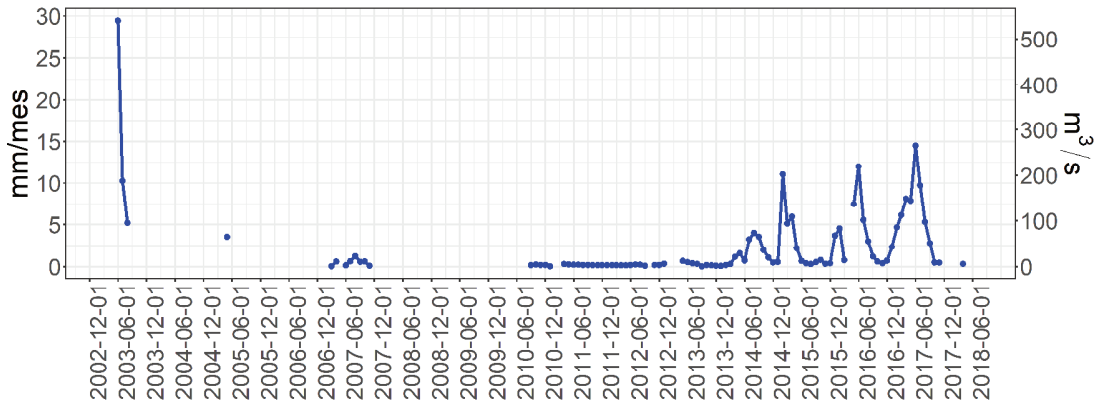


Figura 5.22. Lámina de escorrentía y caudal estimados a partir de registros de altura hidrométrica (escala hidrométrica/sensor piezorresistivo).

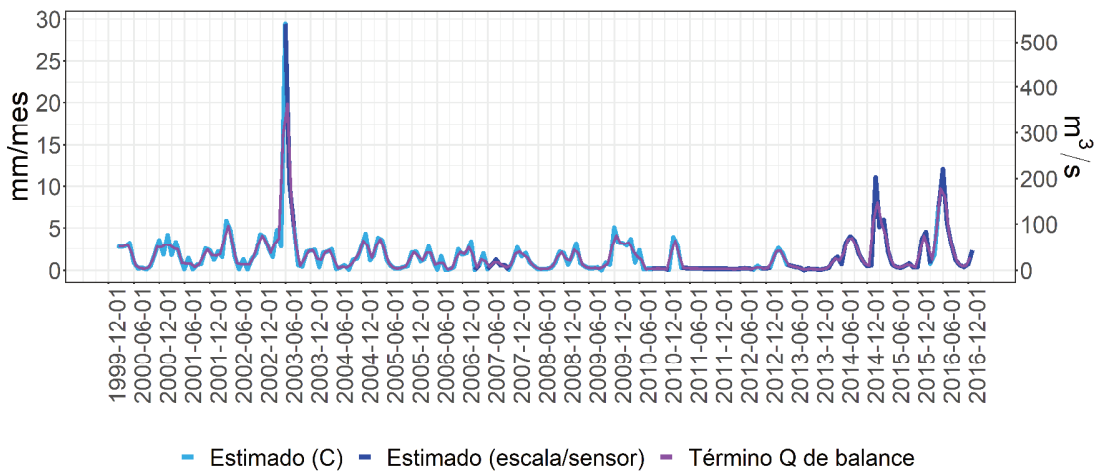


Figura 5.23. Lámina de escorrentía/caudal mensual estimados a partir de registros de altura hidrométrica (escala/sensor) y porcentaje C de la precipitación; término de Q utilizado en el balance hídrico (2000-2016).

#### 5.1.4 Modelo de balance hídrico

Las series temporales de las variables hidrometeorológicas involucradas en el modelo de balance hídrico (Ecuación 4.2), aplicado entre 2000 y 2016, se muestran en la Figura 5.24. Se observa que la magnitud del escurrimiento es prácticamente despreciable frente a la precipitación y a la evapotranspiración real. Además, las oscilaciones estacionales de ET se mantienen relativamente constantes, por el contrario, la precipitación se caracteriza por tener mayores variaciones, con máximos estacionales de mayor magnitud en algunos periodos.

La variación de almacenamiento resultante de la aplicación del balance presenta una elevada correspondencia con la precipitación, mostrando una sincronía de picos/valles (Figura 5.25). Se encontró que la precipitación es la variable que mayor influencia tiene en la variación de almacenamiento, como se observa en la Figura 5.26, entre P y  $dS/dt$  existe una relación lineal con un elevado coeficiente de correlación, mientras que la correlación con ET es muy baja.

Como se explicó en la metodología, la variación de almacenamiento también fue evaluada a partir de los datos de LWET provistos por la misión satelital GRACE. En la Figura 5.27 se compara la variación de almacenamiento obtenida por la aplicación del modelo de balance y la obtenida a partir de los datos de GRACE (Ecuación 4.8). El tiempo correspondiente a cada valor de  $dS/dt$  GRACE, calculado como el promedio entre dos observaciones ( $(t_{i+1} - t_i)/2$ ), generalmente, está dado para los primeros días de cada mes. En cambio, el tiempo correspondiente a cada valor de  $dS/dt$  del balance se da aproximadamente el 15 de cada mes. Debido a este desfase, para la realización de la Figura 5.27, se probó realizar un desplazamiento de entre 15 y 30 días hacia adelante a la serie  $dS/dt$  GRACE. De esta manera, se encontró que con un desplazamiento de 30 días se observa mayor correspondencia de picos/valles de ambas series.

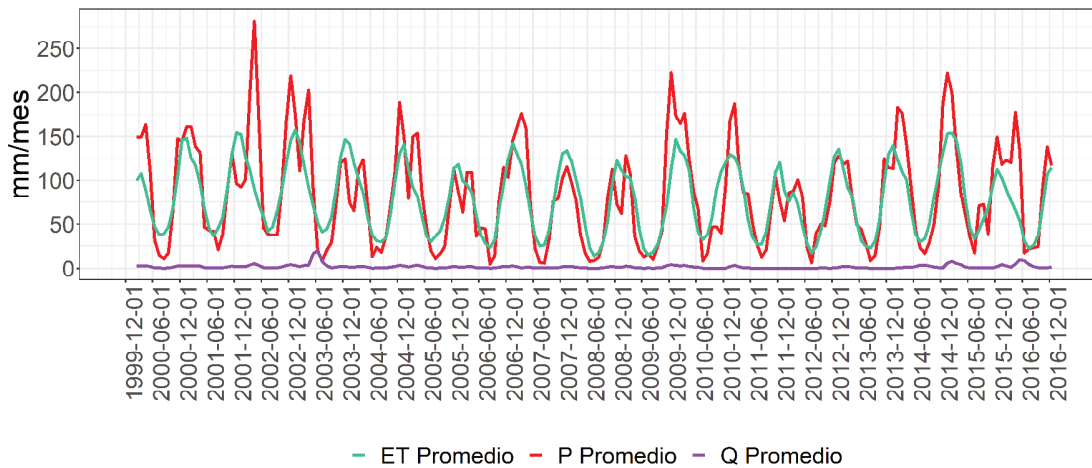


Figura 5.24. Evolución temporal de las componentes de la ecuación de balance hídrico para el periodo 2000-2016.

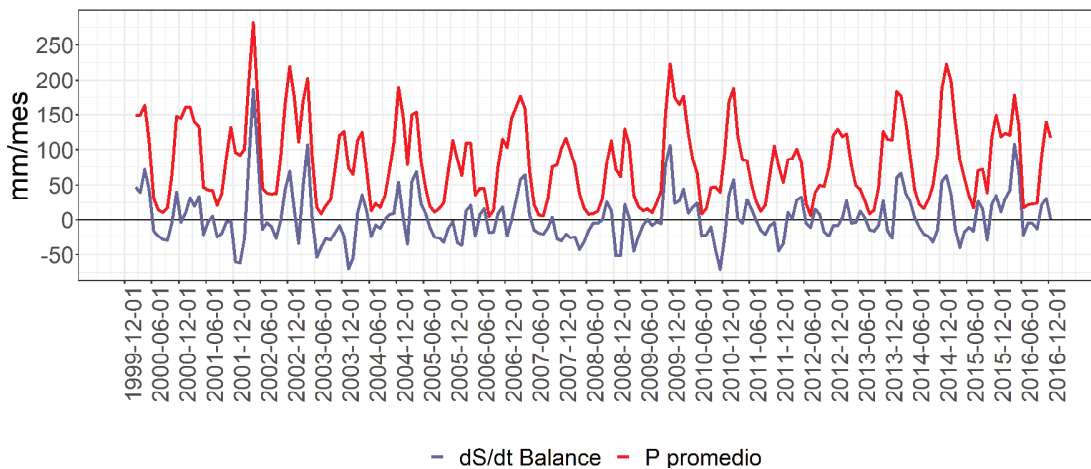


Figura 5.25. Evolución temporal de P promedio y  $dS/dt$  del balance hídrico para el periodo 2000-2016.



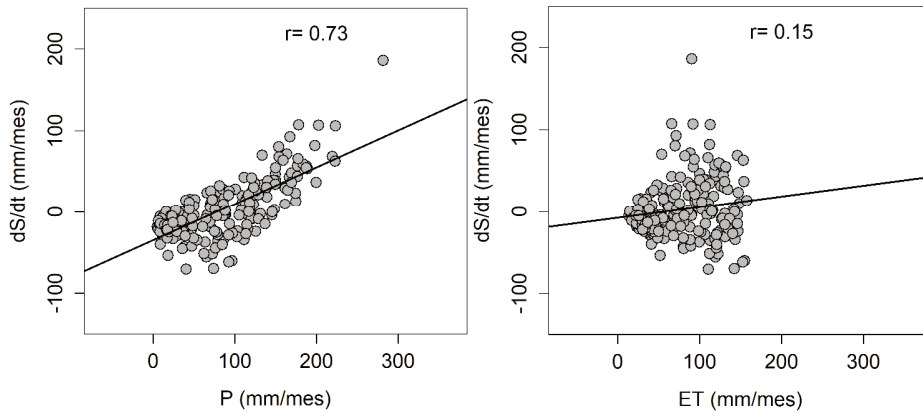


Figura 5.26. Diagramas de dispersión entre la variación de almacenamiento de balance, P y ET para el periodo 2000-2016.

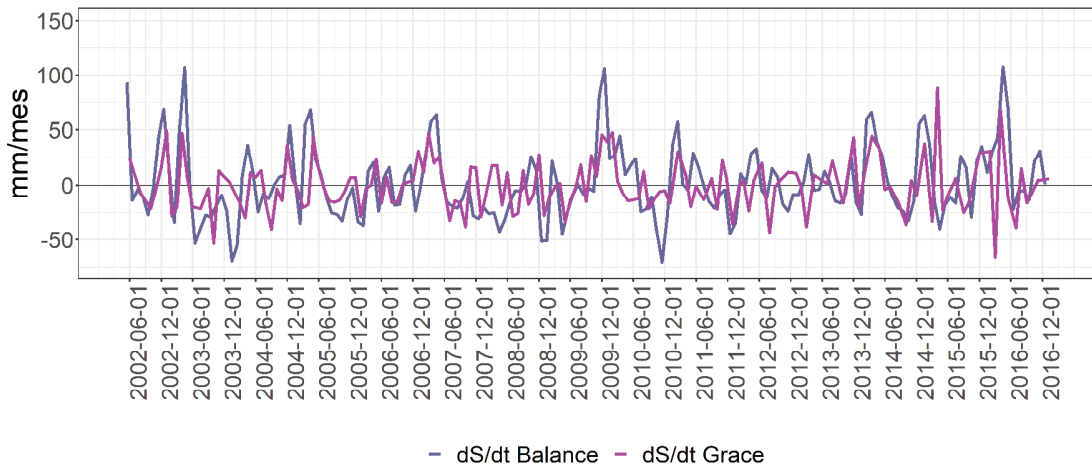


Figura 5.27. Evolución temporal de la variación de almacenamiento obtenida mediante balance hídrico y GRACE para el periodo 2002-2016.

Como se observa en la Figura 5.27, a pesar de que existe cierta correspondencia entre las series de  $dS/dt$  obtenidas con ambas metodologías, la variación de almacenamiento obtenida por la aplicación del modelo de balance presenta picos positivos y negativos de mayor magnitud. Las diferencias observadas podrían deberse a tres razones y una combinación de las mismas. Por un lado, las diferencias estarían relacionadas con los errores en la estimación de variables como P y ET. Se considera que existe una mayor incertidumbre en los valores de ET provistos por GLDAS, aunque la incidencia de ET en el balance es menos significativa que la de P. La subestimación de ET resultaría en mayores valores de  $dS/dt$  obtenido por balance. Por otra parte, las diferencias podrían estar relacionadas con las simplificaciones realizadas en la ecuación de balance. Valladares (2014), en un estudio similar realizado en la región hídrica del Iberá, atribuyó las diferencias a la no consideración de entradas/salidas a través del sistema subterráneo en la ecuación de balance.

Otra posible causa estaría relacionada con la incertidumbre asociada a los datos de GRACE, tanto por el procesamiento de nivel 3 del producto utilizado como por sus limitaciones para

representar escalas espaciales de menos de 100 000 km<sup>2</sup>. Moreira et al. (2019) encontraron una menor correlación y mayor RMSE al comparar los valores de dS/dt GRACE y los obtenidos por balance hídrico (basado en datos observados remotamente) en cuencas de menos de 100 000 km<sup>2</sup>. Sin embargo, los autores aclaran que el desempeño de los datos GRACE en cuencas menores a ese tamaño depende, según sus resultados, de la condición climática de cada una de ellas.

Para examinar la posible incidencia de los errores en la estimación de P, en las Figuras 5.28 a 5.33, se muestra la evolución temporal de LWET frente a la PMB y al SPIM (3 a 24 meses). Además, se analizaron los diagramas de dispersión correspondientes (Figura 5.34). A medida que aumenta la escala temporal del SPIM aumenta la relación lineal entre LWET y el SPIM hasta un máximo de  $r=0.8$  para SPIM 24 meses. Además, se observa una correspondencia temporal entre LWET y el SPIM de 9 y 12 meses, si bien la serie de LWET no acompaña idénticamente al SPIM, las tendencias de aumento y disminución son capturadas por ambas fuentes de información. De estos resultados se infiere que el almacenamiento captado por GRACE (LWET) se relaciona con el efecto del déficit/exceso de precipitación que se da en reservorios hidrológicos que responden a escalas temporales mayores a 6 meses y, además, que la relación aumenta a medida que aumenta la escala temporal de respuesta del reservorio.

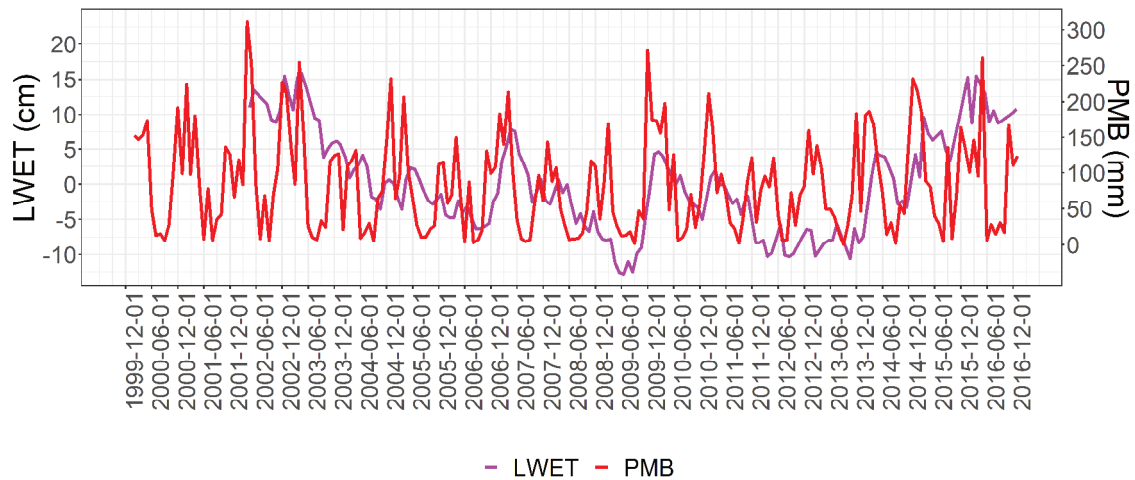


Figura 5.28. Evolución temporal de LWET y PMB (2000-2016).

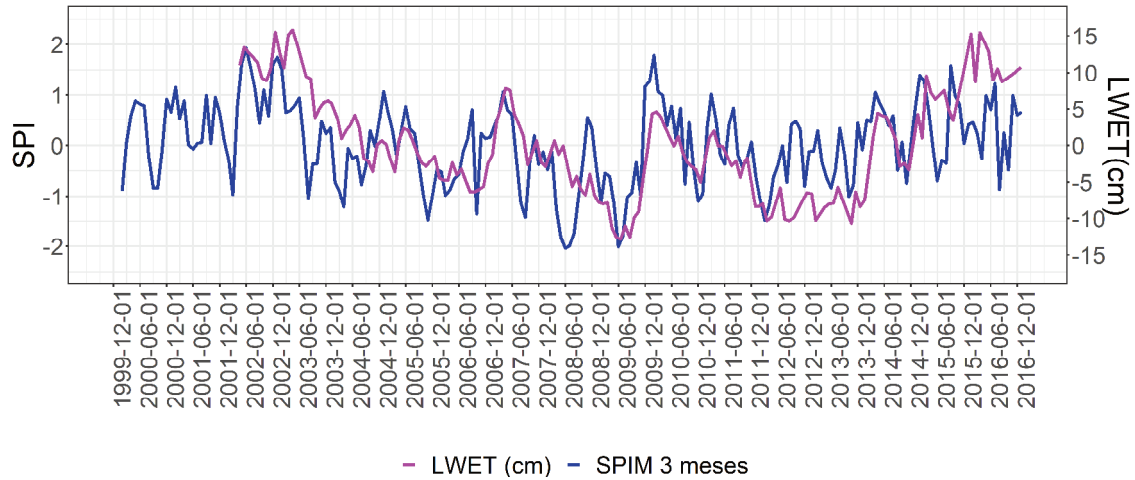


Figura 5.29. Evolución temporal del SPIM de 3 meses y LWET (2000-2016).

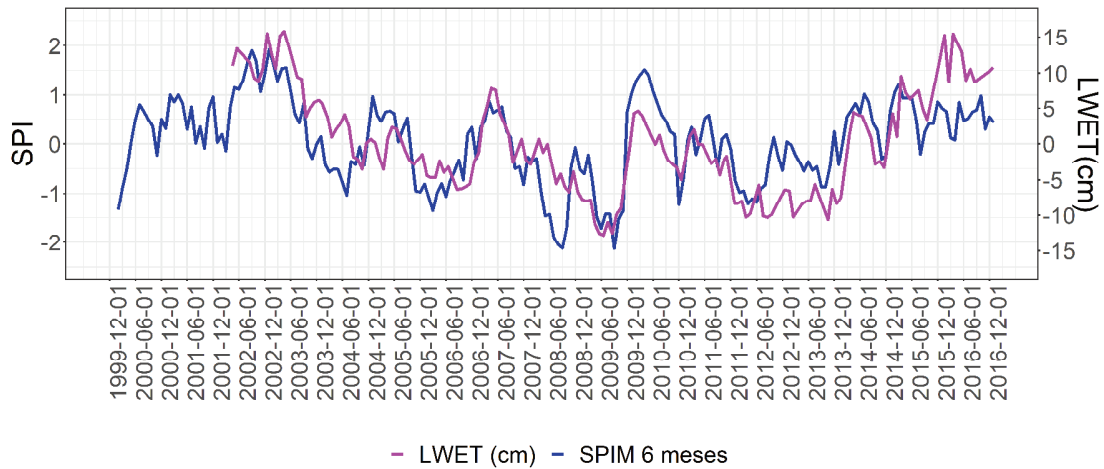


Figura 5.30. Evolución temporal del SPIM de 6 meses y LWET (2000-2016).

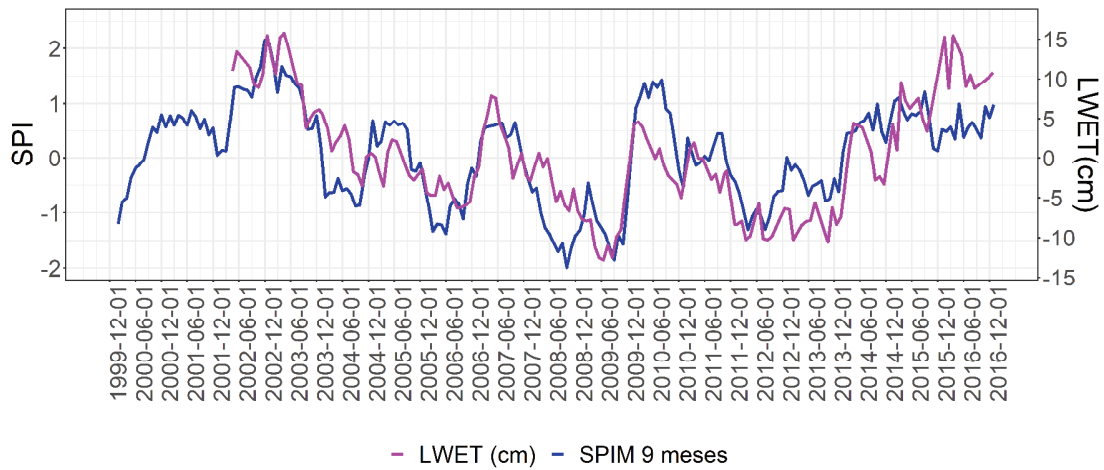


Figura 5.31. Evolución temporal del SPIM de 9 meses y LWET (2000-2016).

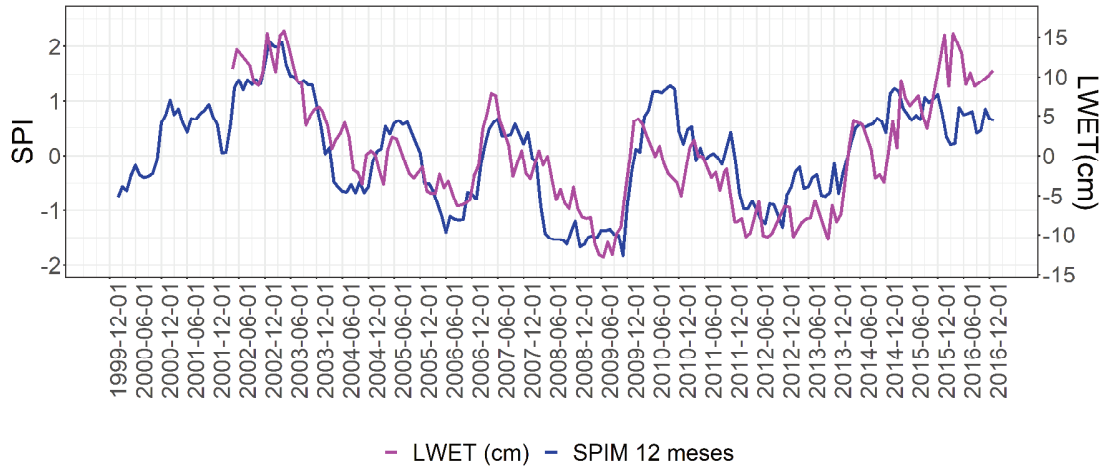


Figura 5.32. Evolución temporal del SPIM de 12 meses y LWET (2000-2016).

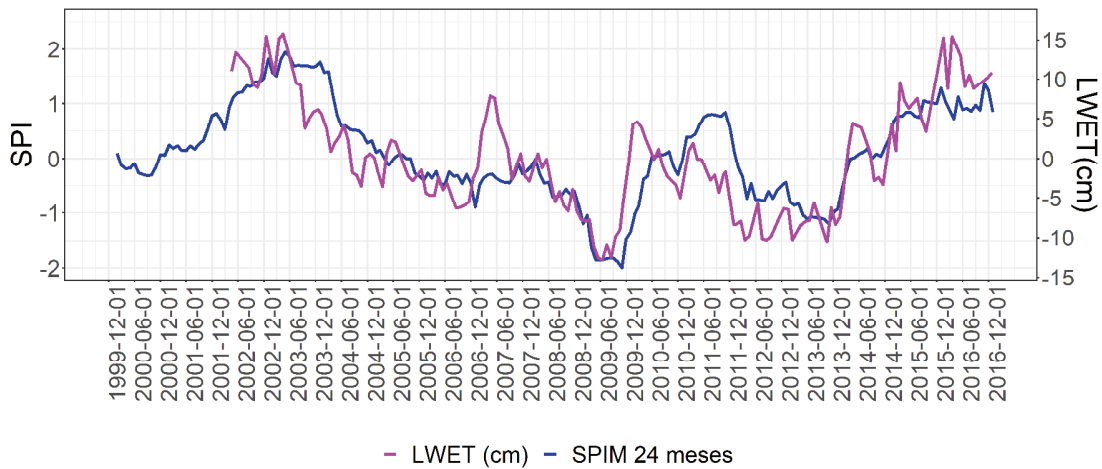


Figura 5.33. Evolucion temporal del SPIM de 24 meses y LWE (2000-2016).

Por otra parte, el hecho de que  $dS/dt$  obtenida por balance y LWET estén tan relacionadas con la precipitación (Figura 5.25 y 5.26) y el SPIM, respectivamente, podría indicar que las diferencias observadas en la Figura 5.27 no serían atribuibles del todo a los errores en la estimación de P. Por ende, las diferencias observadas en la Figura 5.27 estarían más relacionadas con los términos no tenidos en cuenta en la ecuación de balance, con el error asociado a la estimación de ET, con la limitación de los datos de GRACE para representar escalas espaciales menores a 100 000 km<sup>2</sup> y/o con una combinación de estos factores.

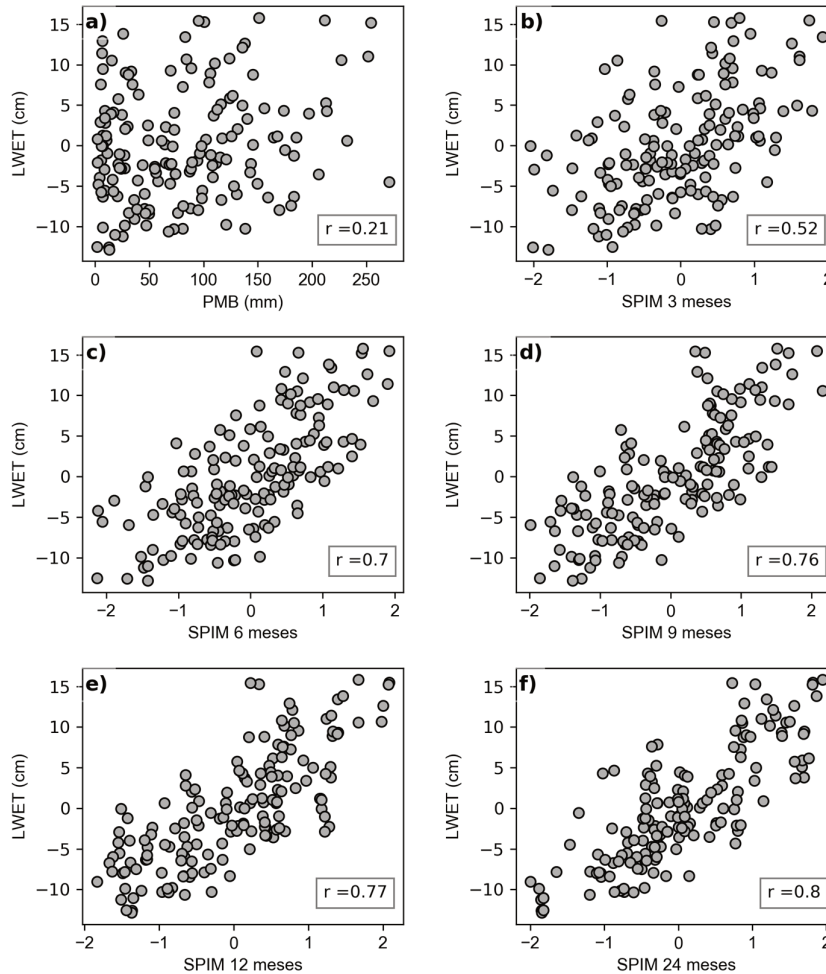


Figura 5.34. Diagramas de dispersión entre LWET y PMB (a), SPIM de 3 meses (b), SPIM de 6 meses (c), SPIM de 9 meses (d), SPIM de 12 meses (e) y SPIM de 24 meses (f).

Por ejemplo, el pico de variación de almacenamiento obtenido con el modelo de balance en diciembre del 2009 significa que el crecimiento de la cantidad de agua acumulada dentro del sistema ocurriría a una tasa mayor que la que observa GRACE. La menor variación de almacenamiento observada para esa situación con GRACE resultaría de una mayor cantidad de agua que sale del sistema, ya sea a través del sistema subterráneo o a través del proceso de ET.

Los picos negativos más pronunciados resultantes del modelo de balance equivaldrían a una situación de disminución rápida del almacenamiento de agua en la cuenca. Los mayores valores observados con GRACE significarían que existe una mayor cantidad de agua almacenada en la cuenca, ya sea en el sistema superficial, en el subterráneo o en ambos. Cabe recordar que, para la zona de estudio, LWET está compuesto por el almacenamiento subterráneo, en la zona no saturada y en la superficie (Ecuación 2.3).

Dada la escasa disponibilidad de mediciones de variables hidrológicas que caracteriza al área de estudio y la escala regional de la investigación, se considera que las comparaciones entre

diferentes variables indicadoras de los forzantes del sistema y de su respuesta, contribuye al avance del conocimiento de su dinámica hídrica superficial/subterránea.

## **5.2 Caracterización del comportamiento espacial y temporal de cuerpos de agua en los BBSS**

A modo de ejemplo, en las Figura 5.35 a, c y e se muestra para una zona de la cuenca la composición color RGB-621, el MNDWI y la identificación de superficies de ‘Agua Libre’, respectivamente, basados en la imagen MODIS adquirida el 22 de marzo de 2015. Para esa misma zona, en las Figura 5.35 b, d y f se muestra la composición RGB-654, el MNDWI y la extracción de ‘Agua Libre’, respectivamente, con base en el mosaico de imágenes Landsat 8 adquiridas entre el 22 y el 31 de marzo de 2015. Como se observa, la baja resolución espacial de imágenes MODIS dificulta la identificación de cuerpos pequeños de ‘Agua Libre’, causando una subestimación en el cálculo de la superficie de ‘Agua Libre’.

Esta subestimación se evidencia con claridad en la Figura 5.36 (a), donde se comparan los valores de área de ‘Agua Libre’ obtenidos de los 13 mosaicos de imágenes Landsat 8 con los valores obtenidos de las imágenes MODIS temporalmente más cercanas (Tabla 5.5). A pesar de que existe una relación entre ellas, el ajuste lineal por mínimos cuadrados (en negro) está por debajo de la línea 1:1 (en rojo). Además, se observa que la subestimación crece a medida que aumenta la superficie detectada con Landsat 8, es decir, los cuerpos de agua pequeños van adquiriendo relevancia a medida que aumenta la superficie de ‘Agua Libre’. No obstante, se puede decir que las variaciones temporales de ‘Agua Libre’ detectadas con MODIS tienen la capacidad de representar las variaciones temporales de la superficie de agua estimada con imágenes de mayor resolución, es decir, del área más próxima a la realidad (Figura 5.36 b). Aunque el establecimiento de un umbral de MNDWI menor a 0 en imágenes MODIS permitiría incluir píxeles de mayor mixtura, aumentando la magnitud de la superficie, el uso del umbral 0 logra capturar las variaciones temporales de la superficie del área real.

En ese sentido, con base en una serie de imágenes MODIS adquiridas entre 2000 y 2019, en la Figura 5.37 (a) se presenta la evolución temporal del área de ‘Agua Libre’ de los BBSS. En términos generales, se observa la presencia de dos periodos con valores altos interrumpidos por un periodo con valores comparativamente muy bajos. Desde el inicio de la serie (octubre del año 2000), se observa un crecimiento del área hasta llegar al valor máximo de 1955.36 km<sup>2</sup> (3.63% de la superficie de los BBSS) observado el 30 de marzo de 2003. Desde ahí, a pesar de pequeñas fluctuaciones, se presenta una disminución significativa del área hasta llegar al valor mínimo de 60.94 km<sup>2</sup> (0.11% de la superficie de los BBSS), observado el 17 de enero del 2009. Luego, entre febrero del 2009 y enero del 2014 se observan pequeñas variaciones de la superficie de ‘Agua Libre’, con una leve tendencia al aumento. Finalmente, entre enero del 2014 y diciembre del 2019 se observa una sucesión de grandes picos, en general, es un periodo con altos valores de área de ‘Agua Libre’.

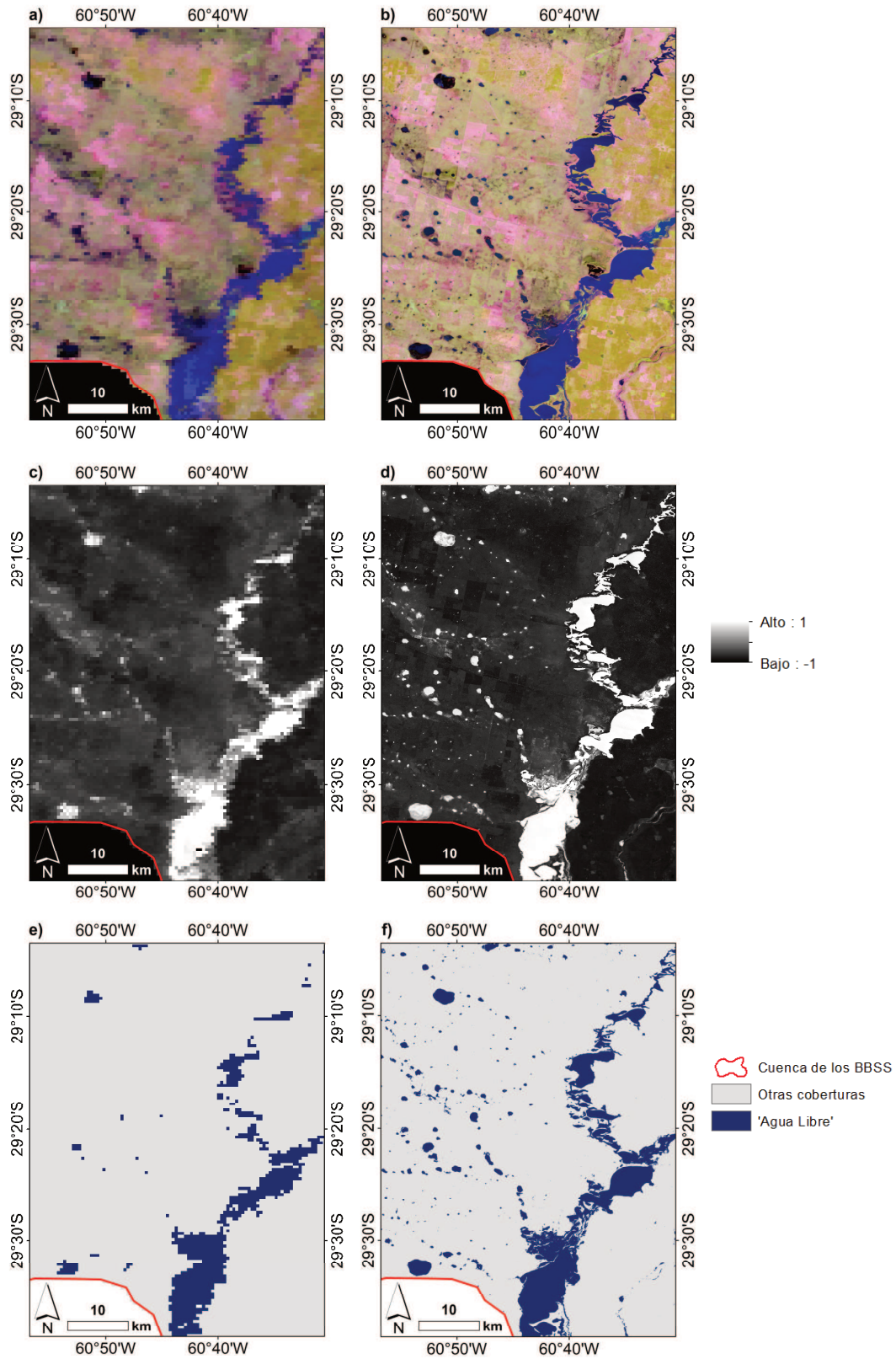


Figura 5.35. a) RGB-621 MODIS, b) RGB-654 Landsat 8, c) MNDWI MODIS, d) MNDWI Landsat 8, e) 'Agua Libre' MODIS y f) 'Agua Libre' Landsat 8. La imagen MODIS corresponde al 2015-03-22; y Landsat 8, al mosaico adquirido entre 2015-03-22/2015-03-31.

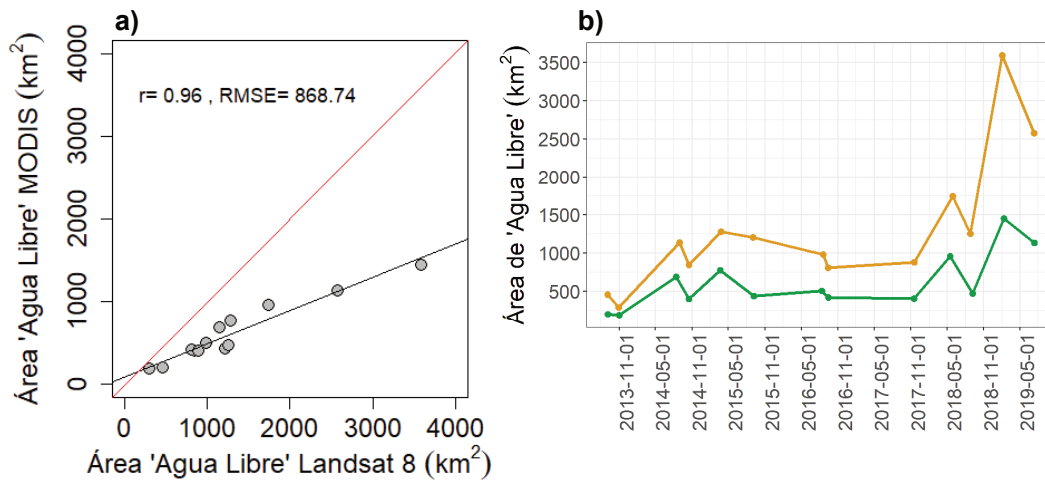


Figura 5.36. Comparación entre el área de ‘Agua Libre’ estimada con imágenes Landsat 8 y MODIS: a) Dispersión, y b) Evolución temporal.

LANDSAT/LC08/C01/T1 SR				MODIS/006/MOD09A1	
Mosaico	Fecha Row 227	Fecha Row 228	Área (km <sup>2</sup> )	Fecha	Área (km <sup>2</sup> )
1	2013-09-09	2013-08-31	457.45	2013-09-06	199.54
2	2013-10-27	2013-11-03	291.08	2013-11-01	189.31
3	2014-08-27	2014-09-03	1137.93	2014-08-13	688.56
4	2014-10-14	2014-10-21	847.32	2014-10-16	402.59
5	2015-03-23	2015-03-30	1276.96	2015-03-22	776.55
6	2015-08-30	2015-09-06	1205.50	2015-09-06	440.09
7	2016-08-16	2016-08-23	980.61	2016-08-12	504.88
8	2016-09-17	2016-09-08	809.26	2016-09-13	422.78
9	2017-11-23	2017-11-14	879.99	2017-11-17	406.98
10	2018-06-03	2018-05-25	1742.97	2018-05-17	956.46
11	2018-08-22	2018-08-29	1251.14	2018-09-06	472.26
12	2019-01-29	2019-02-05	3591.60	2019-02-10	1450.79
13	2019-07-08	2019-07-15	2578.19	2019-07-12	1132.27

Tabla 5.5. Área de ‘Agua Libre’ de los BBSS estimada con mosaicos de imágenes Landsat 8 e imágenes MODIS temporalmente más cercanas.

Como se mencionó en la Sección 4.2, los filtros de calidad y nubosidad aplicados eliminaron el 48.74% de las imágenes disponibles entre 2000 y 2019, dejando **un promedio** de 1.95 imágenes por mes. Sin embargo, como se observa en la Figura 5.37 (b), estas se distribuyen de manera desigual en el tiempo. Entre 2007-05 y 2014-01 se presentan las mayores diferencias de tiempo entre imágenes sin nubosidad disponibles, superando en algunos casos los 80 días. Estos vacíos de información, evidentemente, impactan en la continuidad de la curva de evolución temporal de superficie de ‘Agua Libre’. Dado que la magnitud de esta variable por un lado está relacionada al vínculo del sistema superficial-subterráneo, pero también a la magnitud de la precipitación, se compararon ambas variables.



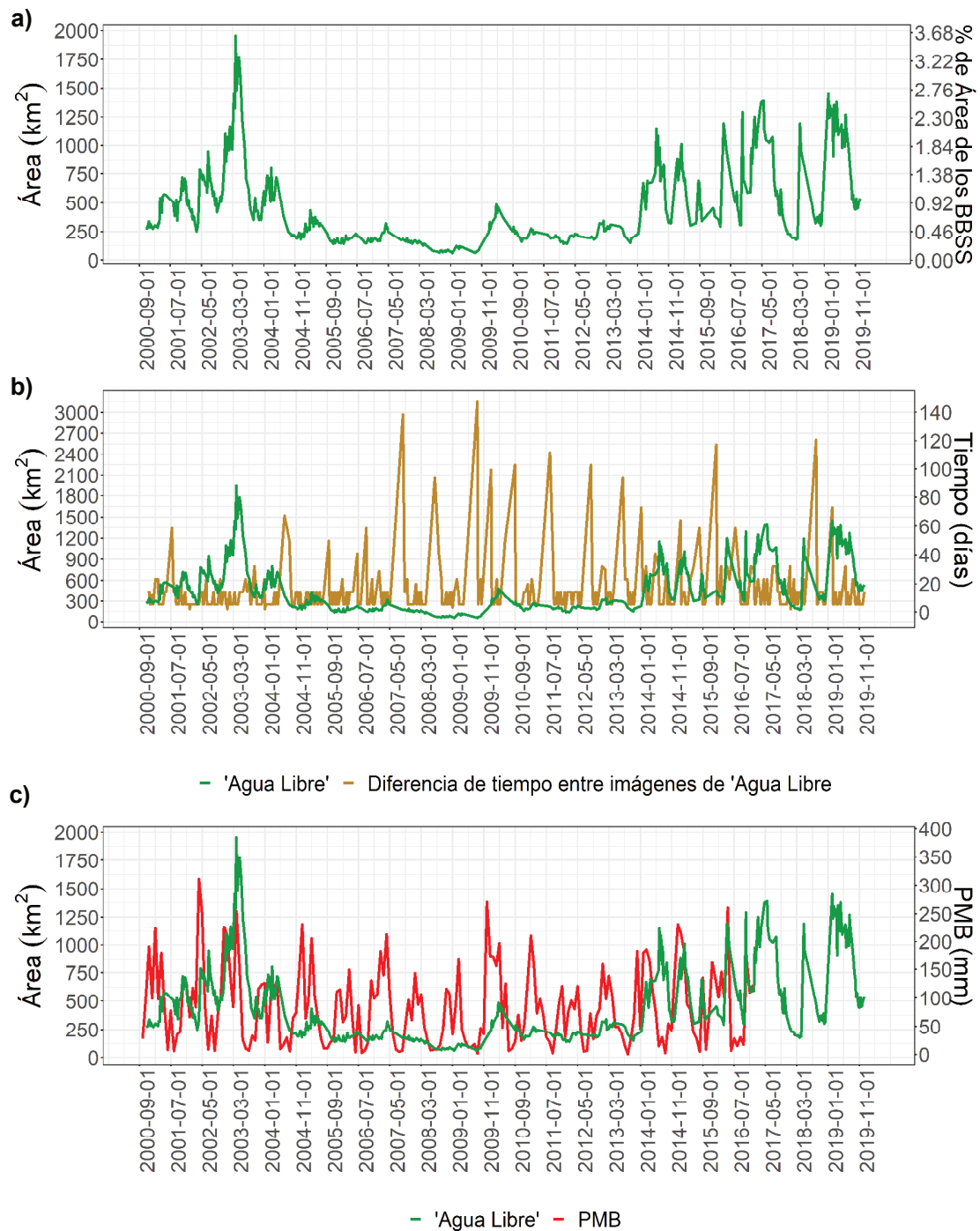


Figura 5.37. a) Evolución temporal del área de 'Agua Libre' de los BBSS (2000-2019), b) área de 'Agua Libre' vs. diferencia de tiempo entre imágenes de 'Agua Libre' y c) área de 'Agua Libre' vs. PMB.

Aunque con algunas similitudes, el comportamiento temporal de la superficie de 'Agua Libre' muestra diferencias respecto al ciclo estacional de la PMB (Figura 5.37 c), lo que indicaría que la respuesta de la cuenca, expresada en aumento/disminución de superficie de 'Agua Libre', no podría explicarse exclusivamente por la variación de la precipitación mensual. Como se

muestra en la siguiente sección, el estado de almacenamiento antecedente de la cuenca es un factor determinante de la respuesta de la cuenca a la precipitación; ante una cantidad de precipitación similar la superficie de ‘Agua Libre’ puede diferir enormemente si su condición antecedente es de déficit, de normalidad o de exceso/saturación. Para entender el comportamiento de la superficie de ‘Agua Libre’, en la siguiente sección se estudia su relación con el SPIM y LWET. No obstante, el valor máximo y mínimo de la serie se corresponden con periodos húmedos/secos identificados con base en el SPI, respectivamente (Sección 5.1.1.2).

En la Figura 5.38 se muestra el histograma de frecuencia para las estimaciones de superficie de ‘Agua Libre’ entre 2000-2019. En general, se observa que el histograma está sesgado hacia la izquierda, en la mayoría de las imágenes procesadas la superficie de ‘Agua Libre’ estuvo entre 0 y 500 km<sup>2</sup>. Se encontró que 315 imágenes presentaron valores entre 0 y 500 km<sup>2</sup>; 111 imágenes, entre 500 y 1000 km<sup>2</sup>; 38 imágenes, entre los 1000 y 1500 km<sup>2</sup>; y solo 4 imágenes, entre 1500 a 2000 km<sup>2</sup>. En la Tabla 5.6 se presentan los valores de superficie de ‘Agua Libre’ para el mínimo, cuartil inferior, mediana, media, cuartil superior y máximo, el 50% de las observaciones se encuentran entre 196.68 y 596.45 km<sup>2</sup>. Se debe tener presente que, si bien las áreas están subestimadas por efecto de la resolución de las imágenes utilizadas, la tendencia temporal y la frecuencia están correctamente representadas. Esto es, la mayor cobertura de ‘Agua Libre’ ocurre en escasas ocasiones en comparación con múltiples situaciones de escasez de ‘Agua Libre’.

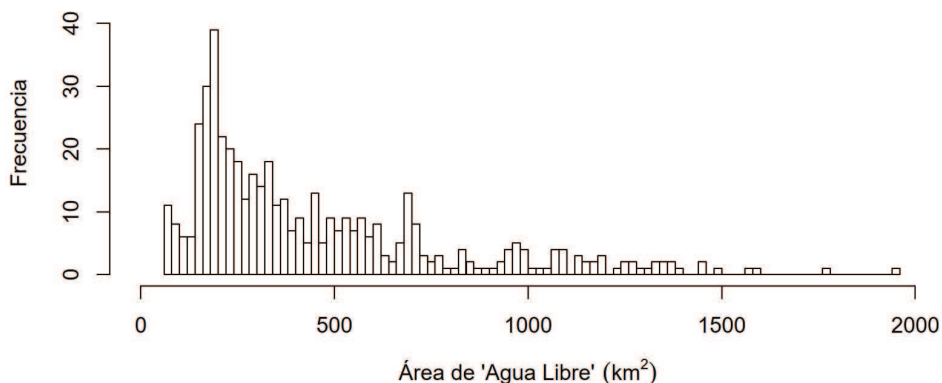


Figura 5.38. Histograma de frecuencia del área de ‘Agua Libre’ de los BBSS (2000-2019).

	Superficie de 'Agua Libre' (km <sup>2</sup> )	% Área de la cuenca
<b>Mínimo</b>	60.94	0.11
<b>Cuartil inferior 25%</b>	196.68	0.37
<b>Mediana 50%</b>	323.61	0.60
<b>Media</b>	448.44	0.83
<b>Cuartil superior 75%</b>	596.45	1.11
<b>Máximo</b>	1955.36	3.63

Tabla 5.6. Mínimo, cuartil inferior, mediana, media, cuartil superior y máximo de la superficie de ‘Agua Libre’ de los BBSS calculada mediante imágenes MODIS para el periodo 2000-2019. Porcentaje que estas variables representan en la cuenca bajo estudio.

En cuanto a la distribución espacial del ‘Agua Libre’, se encontró que para valores similares de superficie de ‘Agua Libre’ la distribución espacial de la misma puede ser diferente, lo que puede deberse a la variabilidad espacial de la precipitación, del estado de humedad antecedente y de las características del suelo. Sin embargo, para tener una idea inicial de la distribución espacial de la superficie de ‘Agua Libre’, en la Figura 5.39 y Figura 5.40 se muestran imágenes de ‘Agua Libre’ para valores de área aproximados a los presentados en la Tabla 5.6, esto es, la imagen del valor mínimo e imágenes con valores cercanos a la mediana, cuartil inferior y superior. La imagen del valor máximo obtenida con MODIS (Figura 5.40 a) se presenta acompañada de la imagen de ‘Agua Libre’ obtenida con Landsat 7 (‘LANDSAT/LE07/C01/T1\_SR’ MNDWI > 0) para una fecha cercana. Las superficies de ‘Agua Libre’ que se observan en la imagen del valor mínimo (Figura 5.39 a) corresponden a las lagunas Saladas, Los Patos y del Gazpacho localizadas en las estribaciones de las Lomadas de Otumpa, en la provincia de Santiago del Estero, en el extremo O de la cuenca de los BBSS. Estas lagunas se presentan también en las imágenes de valores cercanos a la mediana, cuartil inferior y superior (Figura 5.39 b, c, y d), en las cuales además van apareciendo progresivamente otros cuerpos de ‘Agua Libre’ correspondientes a la serie de lagunas moniliformes ubicadas a lo largo del Arroyo Golondrinas-Calchaquí y sus alrededores.

La diferencia más notable entre las imágenes del valor máximo (Figura 5.40) es que con Landsat 7 se detectan numerosos cuerpos de agua pequeños ubicados de forma circundante a los más grandes, principalmente en las regiones que se encuentran demarcadas con rojo, en la depresión central de los BBSS y en numerosas lagunas al NE de la Cañada de las Víboras. De acuerdo con la relación encontrada entre la superficie detectada con MODIS y Landsat 8 (Figura 5.36 a), con MODIS únicamente se detectan los cuerpos de agua más grandes. Por ende, las áreas calculadas constituyen un límite inferior de la superficie ocupada por Agua Libre.

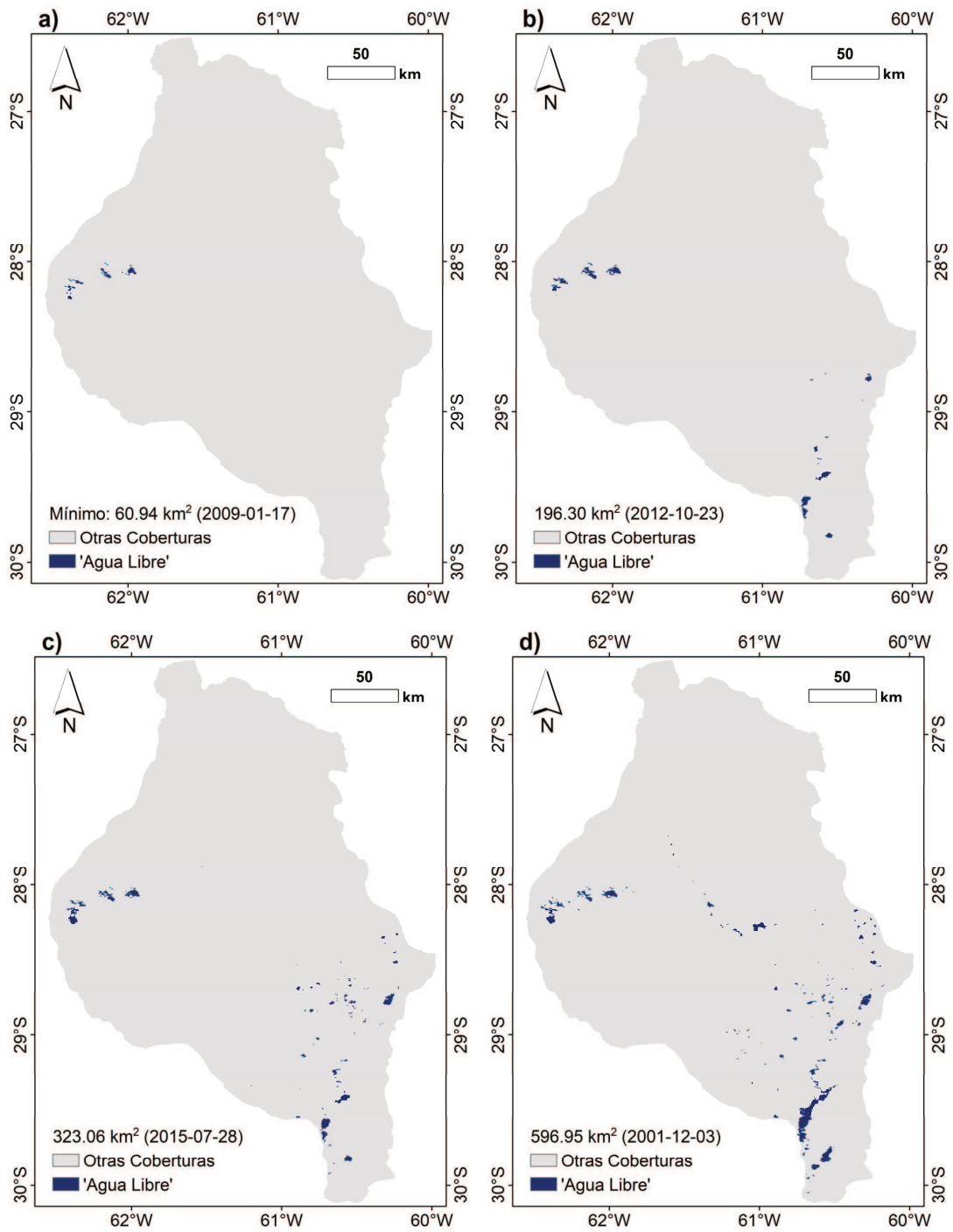


Figura 5.39. Imágenes de 'Agua Libre' para a) el valor mínimo de área, b) 196.30 km<sup>2</sup>, c) 323.06 km<sup>2</sup>, y d) 596.95 km<sup>2</sup>.

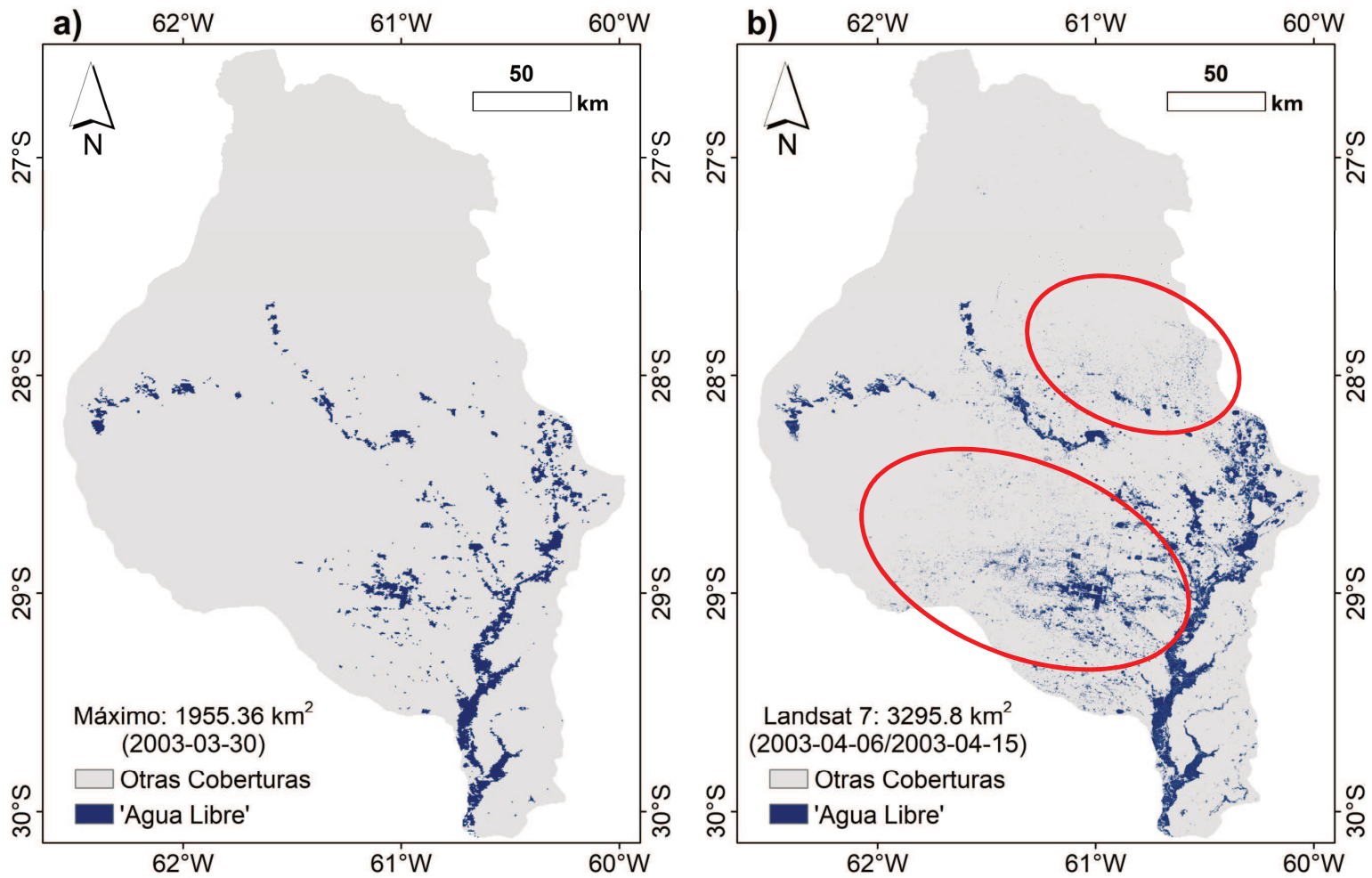


Figura 5.40. Imágenes de 'Agua Libre' para el valor de área máximo obtenida con MODIS (a) y con Landsat 7 para una fecha cercana (b).

De acuerdo al mapa de probabilidad de ocurrencia de 'Agua Libre' para el periodo 2000-2019, presentado en la Figura 5.41, la máxima extensión con probabilidad de estar cubierta por 'Agua Libre' es de 5314.74 km<sup>2</sup>, lo que equivale a un 9.88% de la superficie de los BBSS. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, la máxima extensión probable real estaría dada por la presencia de un gran número de pequeños cuerpos de agua ubicados de manera circundante a los cuerpos de agua más grandes. Su detección a partir de imágenes MODIS requeriría del establecimiento de un umbral menor a 0, que permita incluir píxeles de mayor mixtura. Los resultados aquí presentados constituyen una primera aproximación al conocimiento de la distribución espacial de las superficies afectadas por agua.

En la Figura 5.41, las superficies de color rojo presentan la máxima probabilidad de ocurrencia (0.9 a 1), mientras que las de color verde tienen la probabilidad de ocurrencia más baja (0.002 a 0.1, a los fines prácticos entre 0 y 0.1). Como se observa, las superficies de color rojo son máximos locales; están rodeados por zonas cuya probabilidad va disminuyendo a medida que uno se aleja de ellas. Las superficies de color verde oscuro presentan la mayor extensión acorde con el histograma correspondiente al mapa de probabilidad (Figura 5.42); la mayoría de píxeles tienen una probabilidad de ocurrencia muy baja (0.002 a 0.1), mientras que una cantidad reducida de píxeles tienen una probabilidad de ocurrencia alta (0.9 a 1).

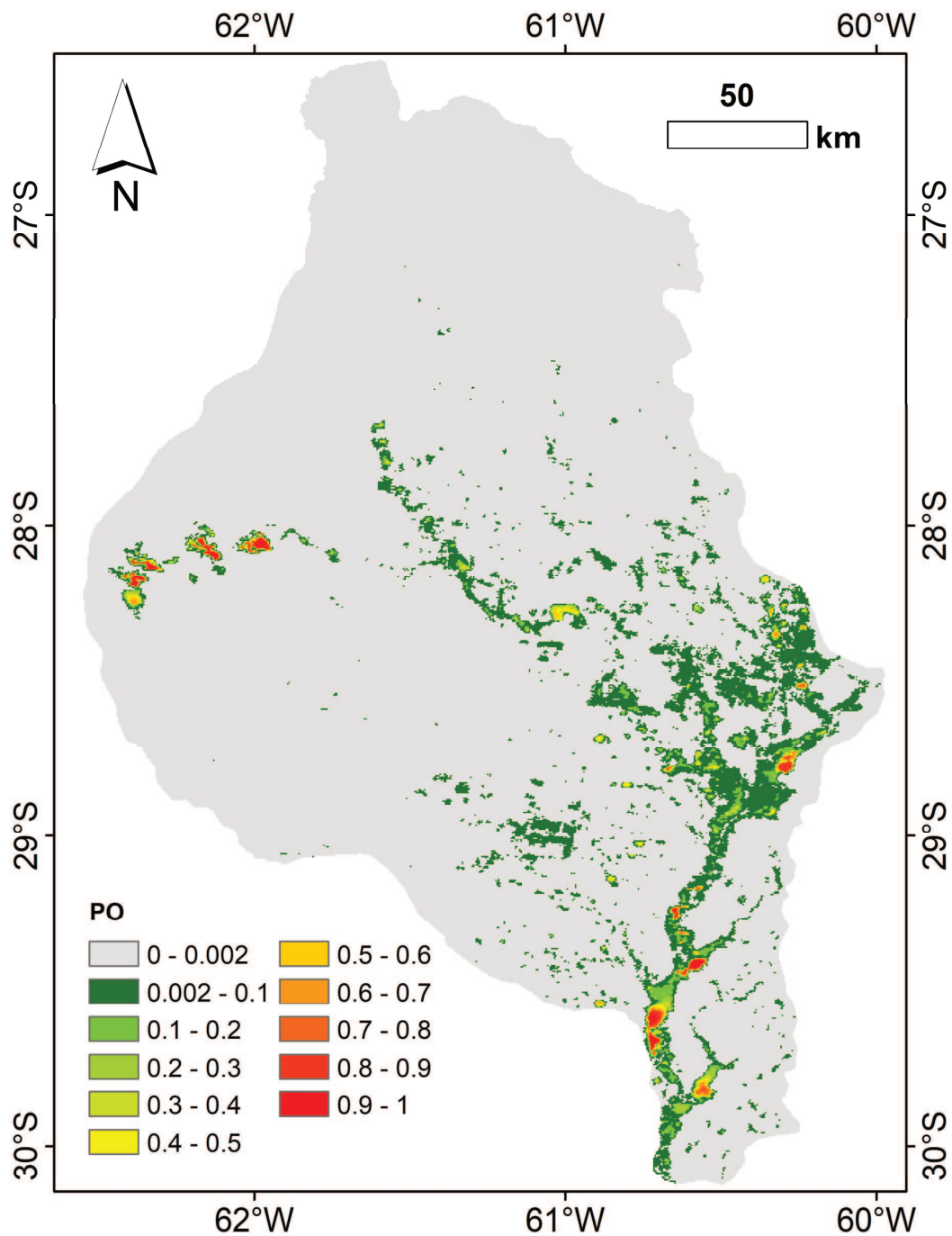


Figura 5.41. Mapa de probabilidad de ocurrencia (PO) de 'Agua Libre' para el periodo 2000-2019.

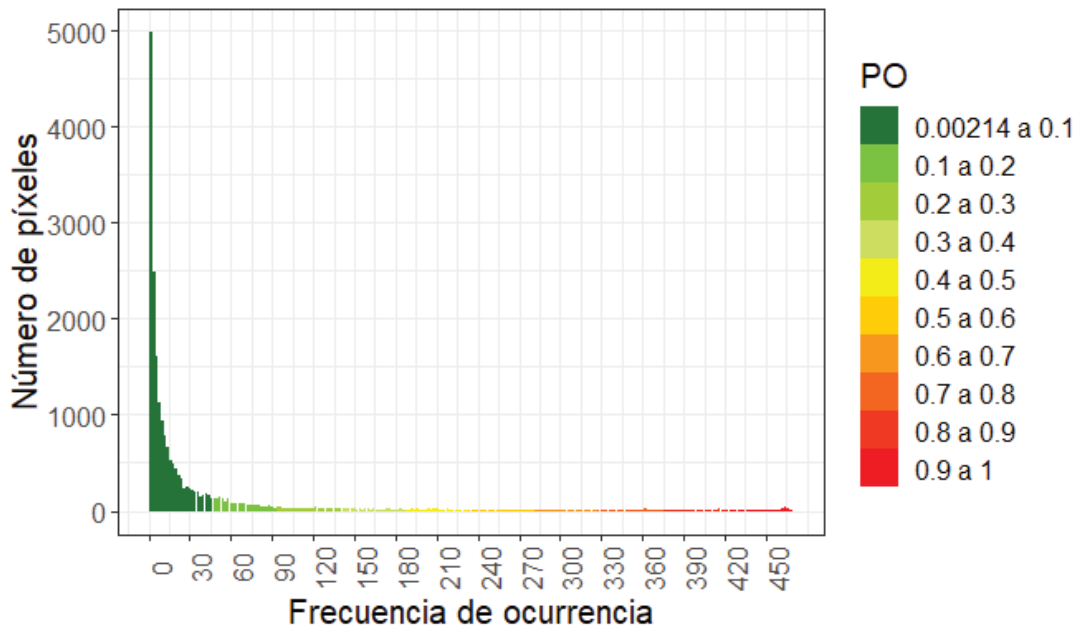


Figura 5.42. Histograma para la frecuencia de ocurrencia de ‘Agua Libre’ para el periodo 2000-2019.

El establecimiento de umbrales de probabilidad permitió obtener el mapa de caracterización de los cuerpos de agua que se muestra en la Figura 5.43. En él se clasificaron las áreas de ‘Agua Libre’ en tres categorías: superficies permanentes, semipermanentes y no permanentes. Las superficies permanentes presentan una probabilidad de ocurrencia mayor a 0.9, es decir, representan zonas que se mantienen cubiertas por agua la mayor parte del tiempo. Las superficies no permanentes presentan una probabilidad de ocurrencia menor a 0.1 y las semipermanentes presentan un rango de probabilidad más amplio (0.1 a 0.9).

Como se detalla en la Tabla 5.7 y se observa en la Figura 5.43, las superficies de ‘Agua Libre’ no permanente son las más extensas; representan un 78.93% de la máxima extensión probable y un 7.8% de la superficie de los BBSS. En contraste, las superficies permanentes constituyen solo un 1.43% de la máxima extensión probable y un 0.14% de la superficie de los BBSS. A pesar de que las superficies semipermanentes tienen el rango de probabilidad más amplio, su extensión es equivalente a un 19.64% de la máxima extensión probable y a un 1.94% de la superficie de los BBSS.

Es importante mencionar que la presencia de píxeles mixtos (agua/vegetación/suelo) sería relevante debido a la existencia de cuerpos de agua de diversos tamaños, que implican una heterogeneidad de la cobertura de la superficie, y a la resolución espacial de las imágenes MODIS. La identificación de superficies afectadas por agua de mayor mixtura a partir de imágenes MODIS será motivo de futura investigación.



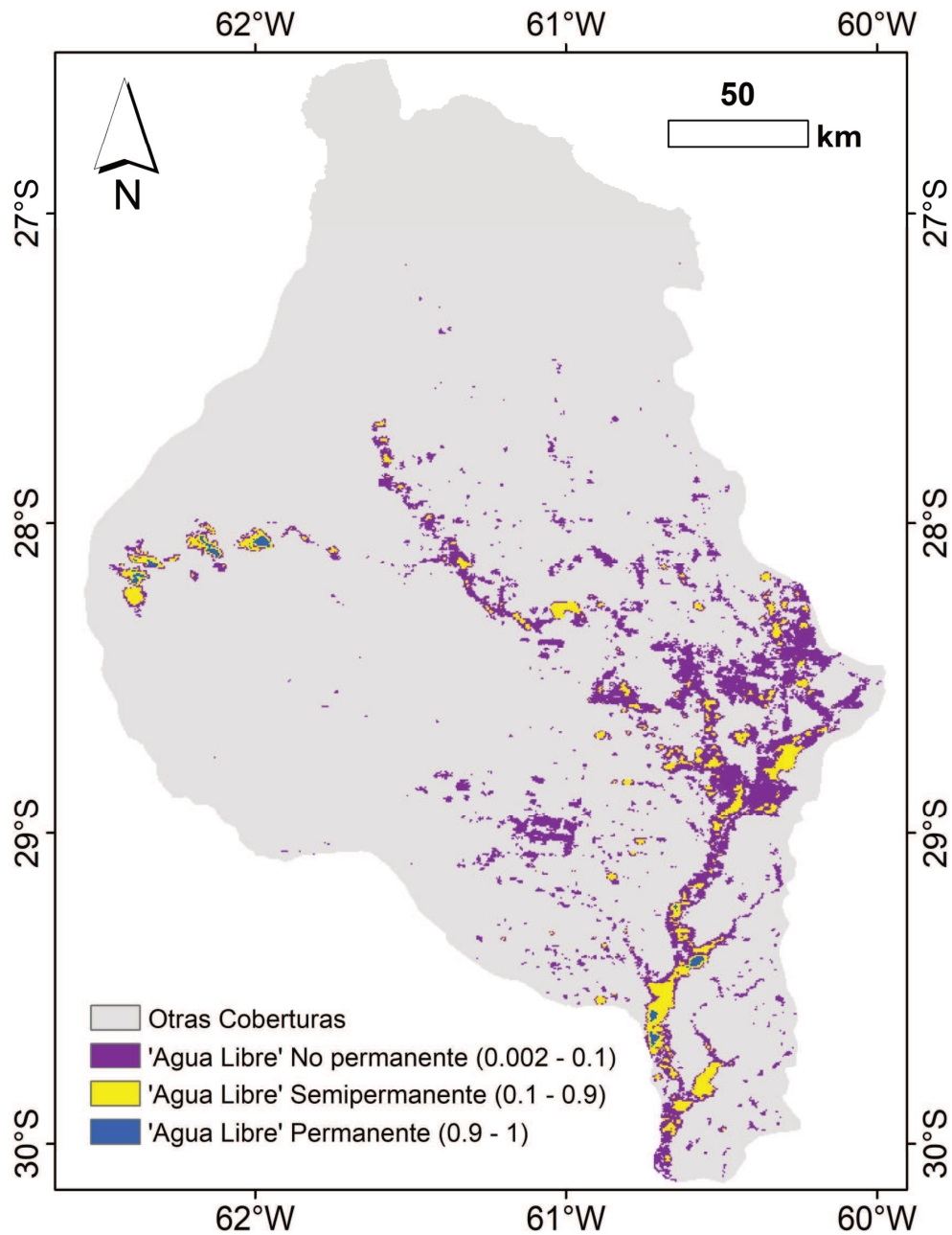


Figura 5.43. Mapa de caracterización de permanencia de 'Agua Libre' para el periodo 2000-2019.

Permanencia	Área (km <sup>2</sup> )	% de área de los BBSS	% de la máxima extensión probable
Permanente	75.92	0.14	1.43
Semipermanente	1043.97	1.94	19.64
No permanente	4195.85	7.80	78.93
Máxima extensión probable	5315.74	9.88	

Tabla 5.7. Extensión de 'Agua Libre' según su carácter de permanencia.

### **5.3 Relación entre el área de ‘Agua Libre’, el sistema subterráneo y la generación de escorrentía**

Los resultados que se muestran en esta sección se organizan en tres subsecciones. Por medio del análisis conjunto de la evolución temporal de LWET, NF y la superficie de ‘Agua Libre’, así como los respectivos diagramas de dispersión, en la primera se establece la relación existente entre la superficie de ‘Agua Libre’ y el sistema subterráneo. Además, por medio del análisis de la superficie de ‘Agua Libre’ frente a PMB y SPIM, se estudia la respuesta de la cuenca a la precipitación dada en términos de aumento/disminución del ‘Agua Libre’. En la segunda sección se estudia la relación entre las fluctuaciones de ‘Agua Libre’ y la generación de escorrentía por medio del análisis de la evolución temporal de Q frente a PMB y a la superficie de ‘Agua Libre’. Además, se analizan los resultados de aplicar la metodología propuesta por Scioli (2016). Por último, en la tercera sección se analiza la vinculación de las superficies de ‘Agua Libre’ permanentes con el sistema subterráneo.

#### **5.3.1 Relación entre el área de ‘Agua Libre’ y el sistema subterráneo**

Como se explicó en la Sección 2.1.1, GRACE brinda información sobre el almacenamiento de agua terrestre, que comprende el almacenamiento de agua subterránea; en la zona no saturada; en ríos, superficies de agua y vegetación; en forma de nieve y en forma de hielo (que en los BBSS son nulos), expresado según la Ecuación 2.3. El almacenamiento subterráneo se refiere al agua almacenada en la sucesión de acuíferos que pudiera tener el sistema hidrogeológico. Sin embargo, al trabajar con fluctuaciones del almacenamiento respecto a la media del periodo analizado, es de esperar que la variación de almacenamiento en acuíferos confinados/semiconfinados sea despreciable y por ende la variación del almacenamiento subterráneo refleje el comportamiento del acuífero freático. Existen antecedentes que demuestran que en la llanura pampeana existe una relación directa entre la variación de almacenamiento detectada por GRACE y la variación del NF. A saber, Montenegro (2010) verificó la dependencia lineal entre  $dS_{GRACE}$  y la variación de los niveles freáticos en dos pozos ubicados en Azul y en La Plata, provincia de Buenos Aires.

A fin de investigar la relación entre LWET y el NF, se comparó el NF medido en tres piezómeros y los valores de LWET correspondientes a los puntos de grilla más cercanos a los mismos (ver ubicación en Figura 4.9). A pesar de que los datos son discontinuos, permiten un análisis comparativo entre las dos variables, según se muestra en las Figuras 5.44 a, c y e. Se incluyen además los diagramas de dispersión respectivos (Figuras 5.44 b, d y f). A pesar de que GRACE no está diseñado para representar datos puntuales, en Don Tito y San Bernardo se observa que LWET representa adecuadamente bien las variaciones del NF, con valores de  $r$  de 0.39 y 0.8 (Figuras 5.44 b y f), respectivamente. No obstante, en Don Tito el valor de  $r$  se encuentra afectado por un posible desfase temporal entre el valor mínimo del NF (58.46 m) observado en 2010-02 y un alto valor de LWET (13.95 cm) para ese mismo periodo, y que corresponde al punto que más se aleja de la nube de puntos en la Figura 5.44 b. En El Quillá se observa un desfase temporal de ambas series para el pico ocurrido en 2007, que puede ser causante de bajo valor de  $r$ .

Los resultados hasta aquí expuestos permiten inferir que en los BBSS las variaciones de LWET son un buen indicador del nivel freático y que ambas variables se relacionan linealmente, de manera coincidente con los resultados encontrados por Montenegro (2010).

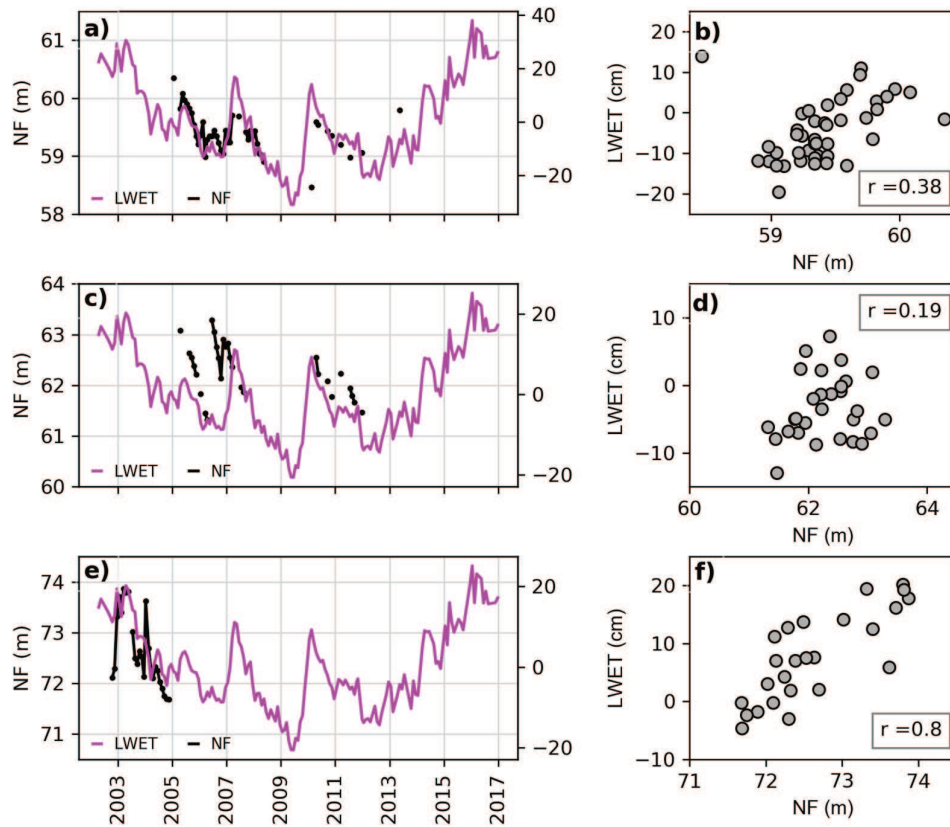


Figura 5.44. Evolución temporal del nivel freático (NF) y LWET y diagramas de dispersión respectivos en tres piezómetros: a,b) Don Tito; c,d) El Quilla; e,f) San Bernardo. Ver ubicación de piezómetros en la Figura 4.9. Los valores del NF corresponden al promedio las observaciones comprendidas entre dos observaciones sucesivas de LWET.

Por otra parte, antecedentes encontrados en la llanura pampeana demuestran que las fluctuaciones de las superficies saturadas se encuentran relacionadas con las variaciones del NF. En la cuenca de llanura del Arroyo Santa Catalina (Provincia de Buenos Aires), Scioli (2016) encontró una relación exponencial entre el ascenso de los niveles freáticos y la superficie saturada de la cuenca. De igual manera, García et al. (2018) encontraron una relación exponencial entre el porcentaje de área inundada y el ascenso de los niveles freáticos en la cuenca sur del río Salado bonaerense. Ambos estudios señalan que cuando la profundidad del NF es inferior a 2 m las áreas saturadas crecen significativamente.

En ese sentido, en la Figura 5.45 se muestra la evolución temporal de la superficie de 'Agua Libre' y LWET; y en la Figura 5.46 (a), el diagrama de dispersión respectivo. Como se observa en la Figura 5.45, existe una correspondencia y un acompañamiento entre ambas series temporales de modo que los cambios más importantes en la superficie de 'Agua Libre' también son evidenciados por el almacenamiento de GRACE. Esto demostraría la capacidad de GRACE

para detectar grandes cambios en el almacenamiento en cuerpos de ‘Agua Libre’ de la cuenca de los BBSS.

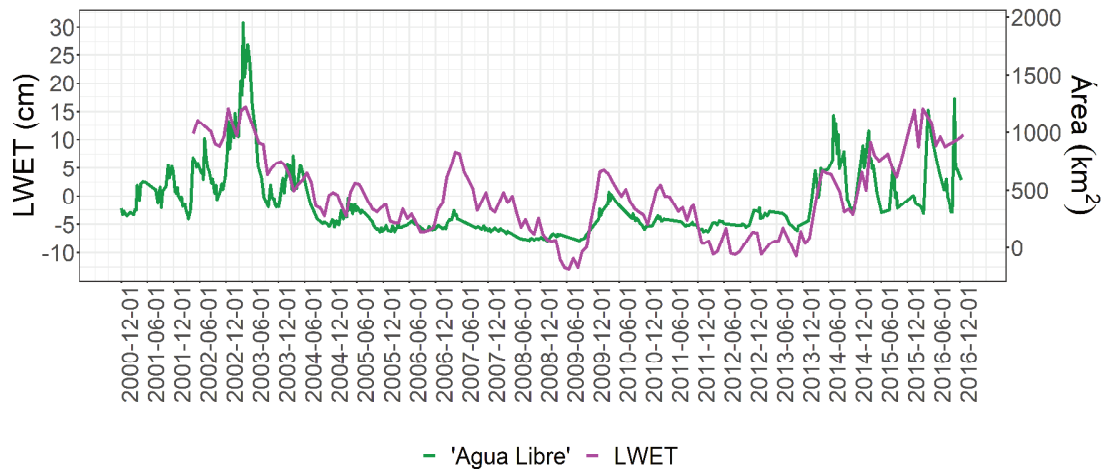


Figura 5.45. Evolución temporal de la superficie de ‘Agua Libre’ de los BBSS y de LWET para el periodo 2000-2016.

Por otra parte, como se observa en la Figura 5.46 (a), la relación entre la superficie de ‘Agua Libre’ y LWET se asemeja a una relación exponencial; a medida que aumenta el almacenamiento, la superficie de ‘Agua Libre’ crece exponencialmente. Debido a que LWET se compone en parte por el almacenamiento en superficies de ‘Agua Libre’, el hecho de que no exista una relación lineal entre ‘Agua Libre’ y LWET sugiere que LWET puede estar mayormente explicada por el almacenamiento en los reservorios hidrológicos restantes, esto es, el sistema subterráneo. Esto coincide con expresado en la Sección 5.1.4, en donde se encontró que LWET se explica en mayor medida por el aumento de la escala temporal de respuesta del reservorio hidrológico y con lo observado en la Figura 5.44. La relación exponencial entre LWET y la superficie de ‘Agua Libre’ (Figura 5.46 a) es similar a las relaciones encontradas por Scioli (2016; Figura 5.46 b) y García et al. (2018; Figura 5.46 c) entre el NF y las áreas saturadas, dada la relación lineal entre LWET y el NF (Figura 5.44).

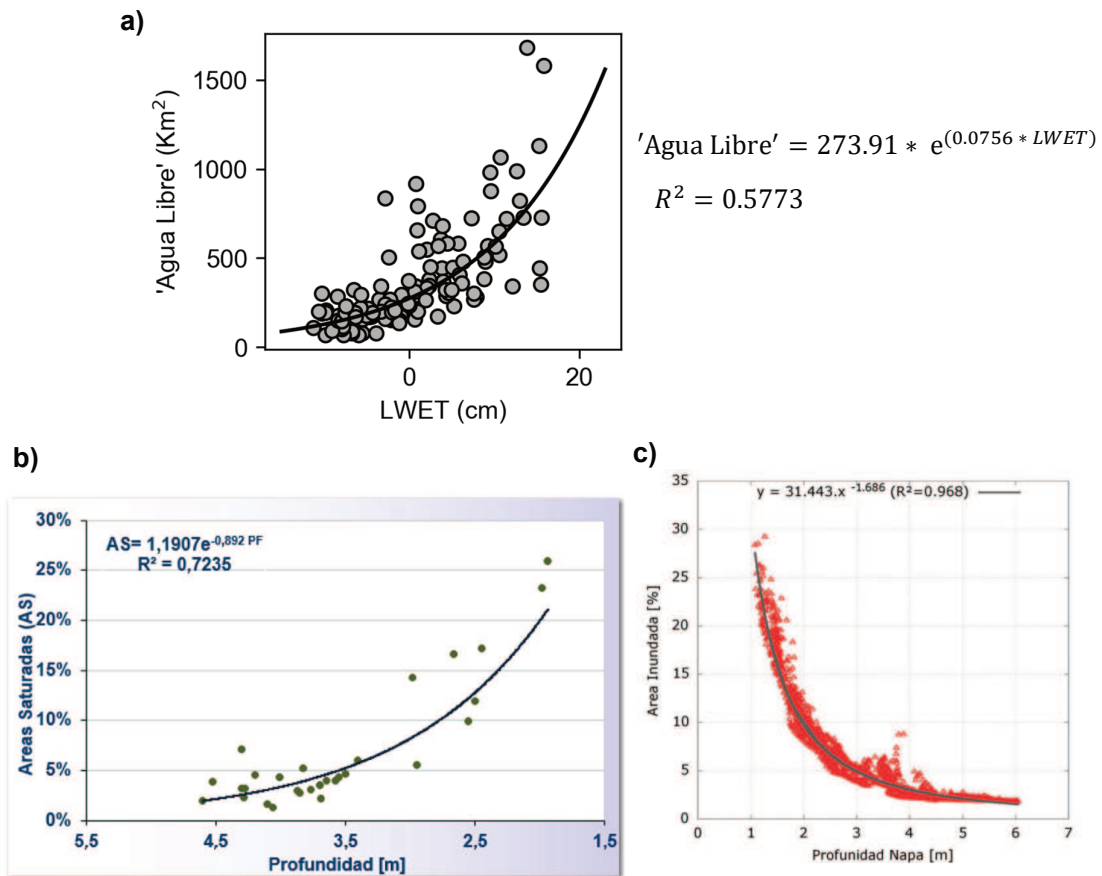


Figura 5.46. Diagramas de dispersión entre: a) la superficie de 'Agua Libre' y LWET en los BBSS, los valores de 'Agua Libre' corresponden al promedio entre dos observaciones sucesivas de LWET; b) Porcentaje de área saturadas y profundidad del nivel freático en el Arroyo Santa Catalina (Scioli, 2016); c) Porcentaje de área saturadas y profundidad del nivel freático en la cuenca sur del río Salado bonaerense (García et al., 2018).

En cuanto al comportamiento de la superficie de 'Agua Libre' como respuesta a la precipitación, en las Figuras 5.47 y 5.48 se presenta la evolución temporal de la superficie de 'Agua Libre', de la PMB y del SPIM de distintas escalas temporales. Además, en la Figura 5.49 se presentan los diagramas de dispersión respectivos. El análisis cualitativo de la evolución temporal de la superficie de 'Agua Libre', PMB, LWET y SPIM de distintas escalas temporales permite inferir que en función de LWET, y por tanto del estado de almacenamiento, la superficie de 'Agua Libre' responde de manera diferente a las anomalías de precipitación de diferentes escalas temporales.

En periodos de aumento de LWET (al inicio y final de la serie analizada en la Figura 5.45) la superficie de 'Agua Libre' responde más cercanamente a las anomalías de precipitación de escalas temporales cortas, esto es el SPIM de 3 y 6 meses. Este es el caso de los periodos 2001-06/2002-12 y 2013-09/2016-12 (ver Figura 5.47 b y c). El pico de 'Agua Libre' observado entre 2002-12 y 2003-06 se produce como respuesta al pico de PMB de 2003-03 (ver Figura 5.47 a). Lo anterior considerando que el periodo previo a las primeras observaciones de LWET,

acorde con el aumento en la superficie de ‘Agua Libre’, es un periodo de aumento del almacenamiento (Figura 5.45).

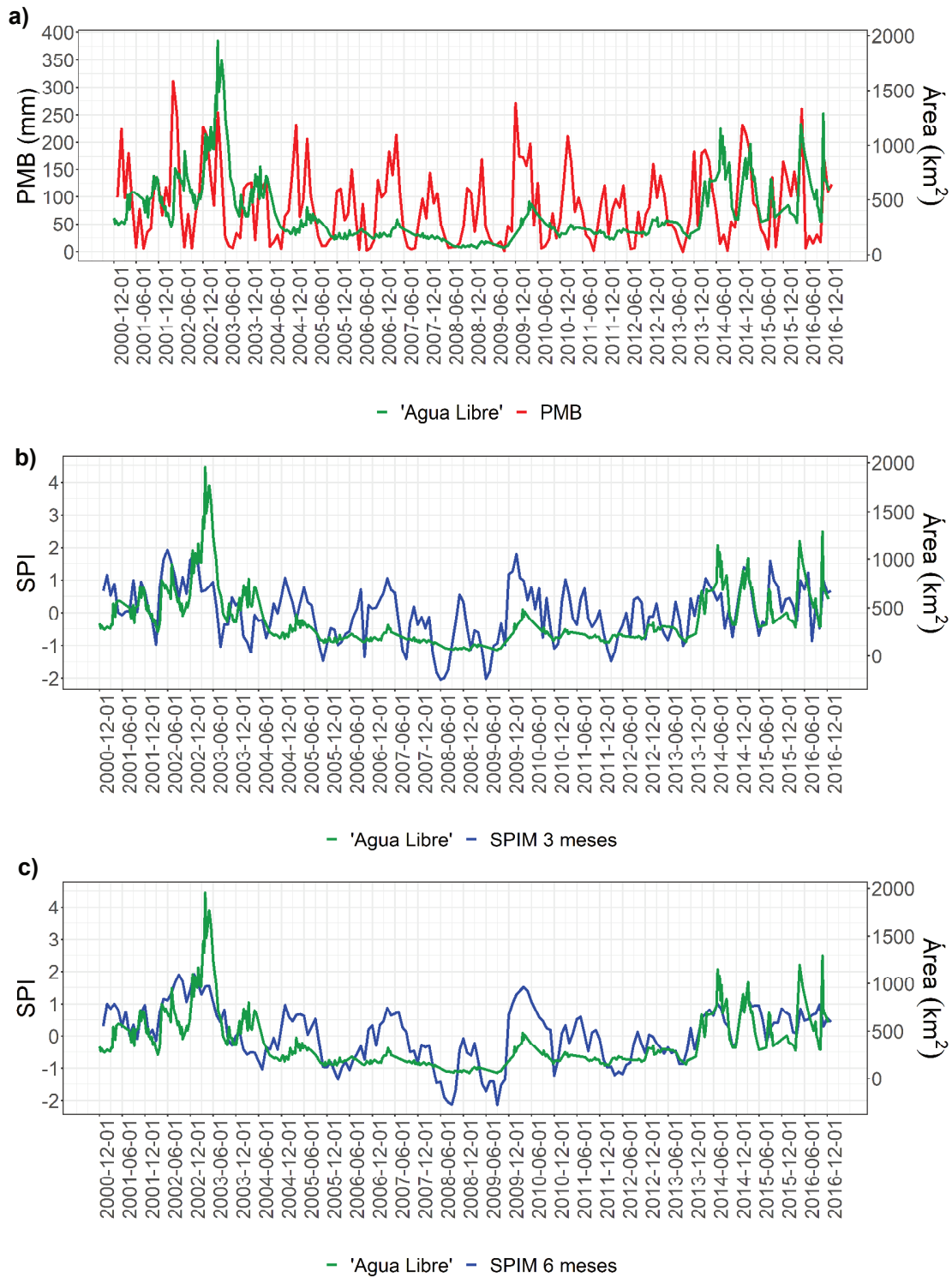


Figura 5.47. Evolución temporal del área de ‘Agua Libre’ con: a) PMB, b) SPIM de 3 meses, c) SPIM de 6 meses, para el periodo 2000-2016.

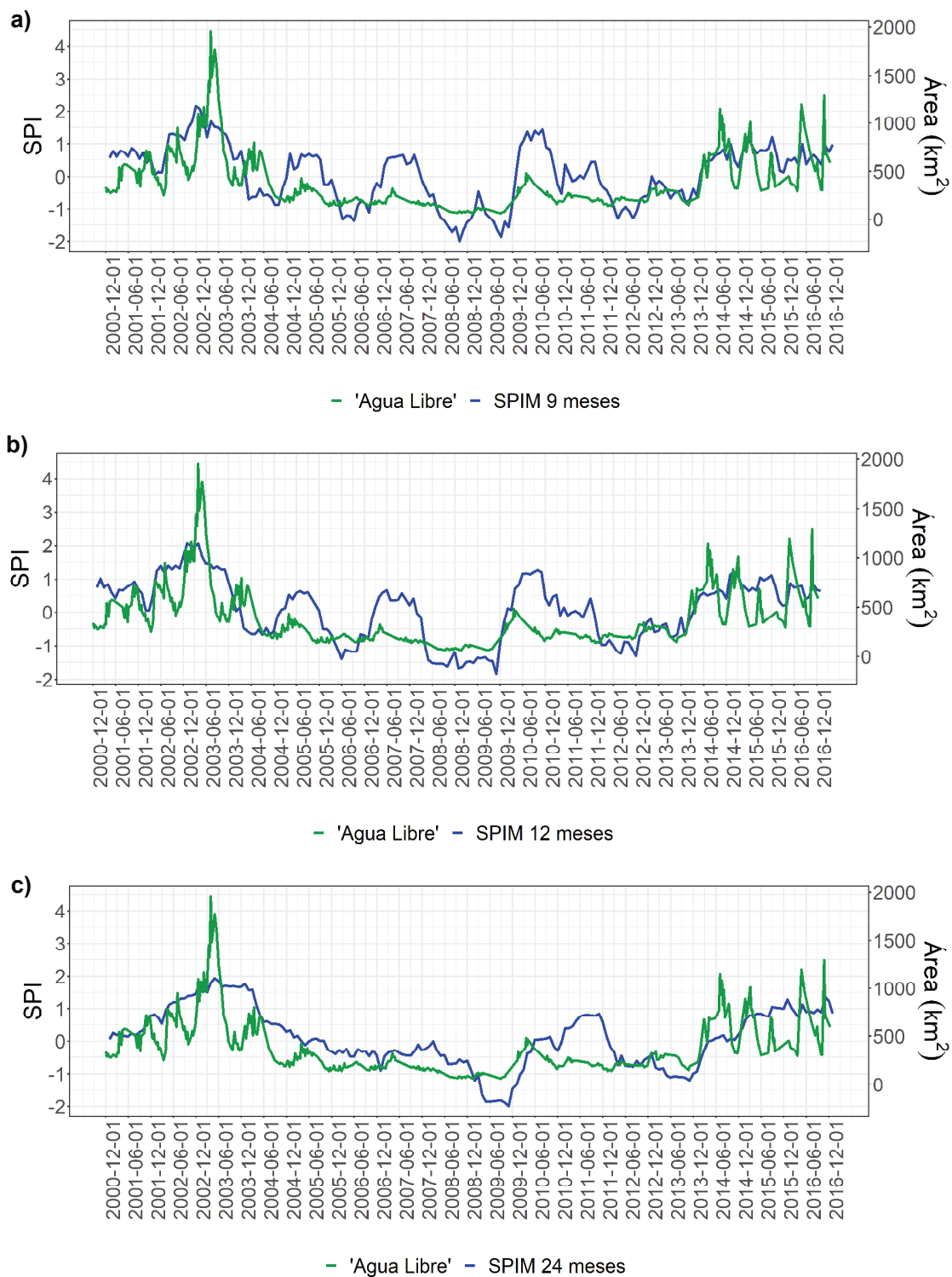


Figura 5.48 Evolución temporal del área de ‘Agua Libre’ de los BBSS frente al SPIM de 9 meses (a), SPIM de 12 meses (b) y SPIM de 24 meses (c) para el periodo 2000-2016.

Sin embargo, cuando el almacenamiento conjunto del sistema superficial y subterráneo expresado en LWET es bajo (2004-12/2013-12; Figura 5.45), no existe una relación clara de la superficie de ‘Agua Libre’ con la PMB y el SPIM (ver Figuras 5.47 y 5.48). En esta condición

de almacenamiento, el excedente de agua (P-ET) infiltraría aumentando el almacenamiento subterráneo y no la superficie de 'Agua Libre'. Esto se evidencia en el pico positivo de LWET observado en mayo de 2007 (Figura 5.45).

Después de que se presenta un gran almacenamiento en cuerpos de agua superficial aun si la PMB es baja se observa un aumento en el área de 'Agua Libre', como sucedió entre 2003-08 y 2004-06 (Figura 5.47 a). Debido a que el suelo está saturado la infiltración es limitada, el agua precipitada se almacena en la superficie o escurre a través de ella, dando oportunidad al proceso de ET. En contraste, luego de un largo periodo de disminución tanto de la superficie de 'Agua Libre' como de LWET solo se observa una leve respuesta en la superficie de 'Agua Libre' tras un periodo de precipitación intensa, como ocurrió entre 2009-09 y 2010-12 (Figura 5.47 a); la magnitud de la precipitación fue suficiente para contribuir a la acumulación de agua en superficie.

A diferencia de lo observado en la Figuras 5.49 a-b, en las dispersiones entre el área de 'Agua Libre' y el SPIM de 6 a 24 meses (Figuras 5.49 c-f) se observa un patrón más definido, de tipo exponencial. Esto es, a medida que aumenta el SPIM la superficie de 'Agua Libre' crece exponencialmente, particularmente, para valores de SPIM (6 a 24 meses) entre 1 y 2 los valores de área, en general, pueden variar entre 500 y 1500 km<sup>2</sup>, aproximadamente. Esta relación es similar a la encontrada entre el área de 'Agua Libre' y LWET (Figura 5.46 a) que, a su vez, guarda una relación lineal con el SPIM de 6 a 24 meses (Figura 5.34).

Sin embargo, se observa que la dispersión aumenta con el aumento del valor del SPIM, en particular cuando el SPIM es mayor a 0. La mayor dispersión estaría relacionada con el hecho de que, en condición de exceso, la cuenca responde (aumento/disminución de área de 'Agua Libre') más cercanamente a la PMB y a las anomalías de precipitación de corto plazo, que presentan mayor variabilidad. En contraste, cuando hay déficit de precipitación en reservorios hidrológicos que responden a escalas temporales de 6 a 24 meses (SPIM menor o igual a -1, aproximadamente) la dispersión disminuye y el área se mantiene casi constante. Esto indica que, una vez la superficie de 'Agua Libre' llega a valores mínimos (superficies permanentes/semipermanentes), el déficit de precipitación empezaría a impactar en otros reservorios hidrológicos (reservorios subterráneos), no tanto en el almacenamiento de agua superficial. En el caso de la Figura 5.49 f, por ejemplo, estos resultados sugieren una conexión de los cuerpos de agua, que constituyen las observaciones correspondientes a SPIM menor a -1.5, con sistemas de flujo subterráneo con escalas temporales de respuesta a la precipitación mayores a 24 meses, en los que el déficit de precipitación impactaría de manera retardada.

Si bien estas explicaciones son plausibles, se debe tener presente que entre 2007-05 y 2014-01 se presentan las mayores diferencias de tiempo entre las imágenes disponibles/utilizadas para determinación de la superficie de 'Agua Libre', superando en algunos casos los 80 días.



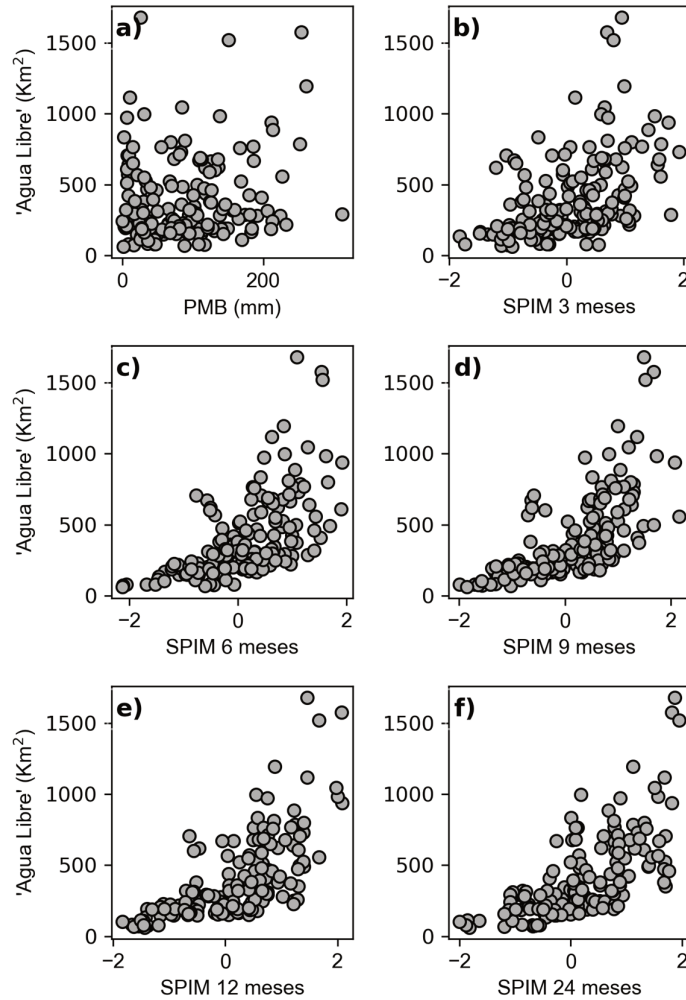


Figura 5.49. Diagramas de dispersión entre la superficie de 'Agua Libre' media mensual y PMB (a), SPIM de 3 meses (b), SPIM de 6 meses (c), SPIM de 9 meses (d), SPIM de 12 meses (e) y SPIM de 24 meses (f).

### 5.3.2 Relación entre el área de 'Agua Libre' y la generación de escurrimiento superficial

En cuanto a la relación entre el escurrimiento superficial ( $Q$ ) y la precipitación (PMB) (Figura 5.50 a) se encontró que en determinados periodos la relación es poco significativa. Ante los pulsos de precipitación ocurridos entre marzo de 2010 y marzo de 2014 no se observó una respuesta en el escurrimiento superficial, el caudal observado reflejaría el flujo base. Esto puede deberse al hecho de que la precipitación no es suficiente para abastecer la capacidad de almacenamiento y por lo tanto para generar escorrenría superficial. Por otra parte, se observa que en este mismo periodo el caudal se mantiene relativamente constante de manera coincidente con la escasa superficie de 'Agua Libre' (Figura 5.50 b).

A partir de marzo de 2014 se observa una mayor correspondencia entre PMB y  $Q$ , aunque con un desfase de al menos un mes (regido por la escala temporal del análisis) dada la baja velocidad de desplazamiento del agua superficial en la zona. En este periodo también se observa una correspondencia temporal entre las fluctuaciones de la superficie de 'Agua Libre'

y el escurrimiento superficial (Figura 5.50 b), comportamiento que también se observa en el pico/recesión de 2003.

A pesar de la discontinuidad de las observaciones de Q, estos resultados muestran que las fluctuaciones del ‘Agua Libre’ tendrían una influencia en la generación de escurrimiento superficial. Debido a que la presencia de estas áreas está relacionado con el ascenso regional del nivel freático, estos resultados también sugieren que el flujo superficial de saturación contribuye en cierta medida a la escorrentía observada en la estación Paraje El Bonete.

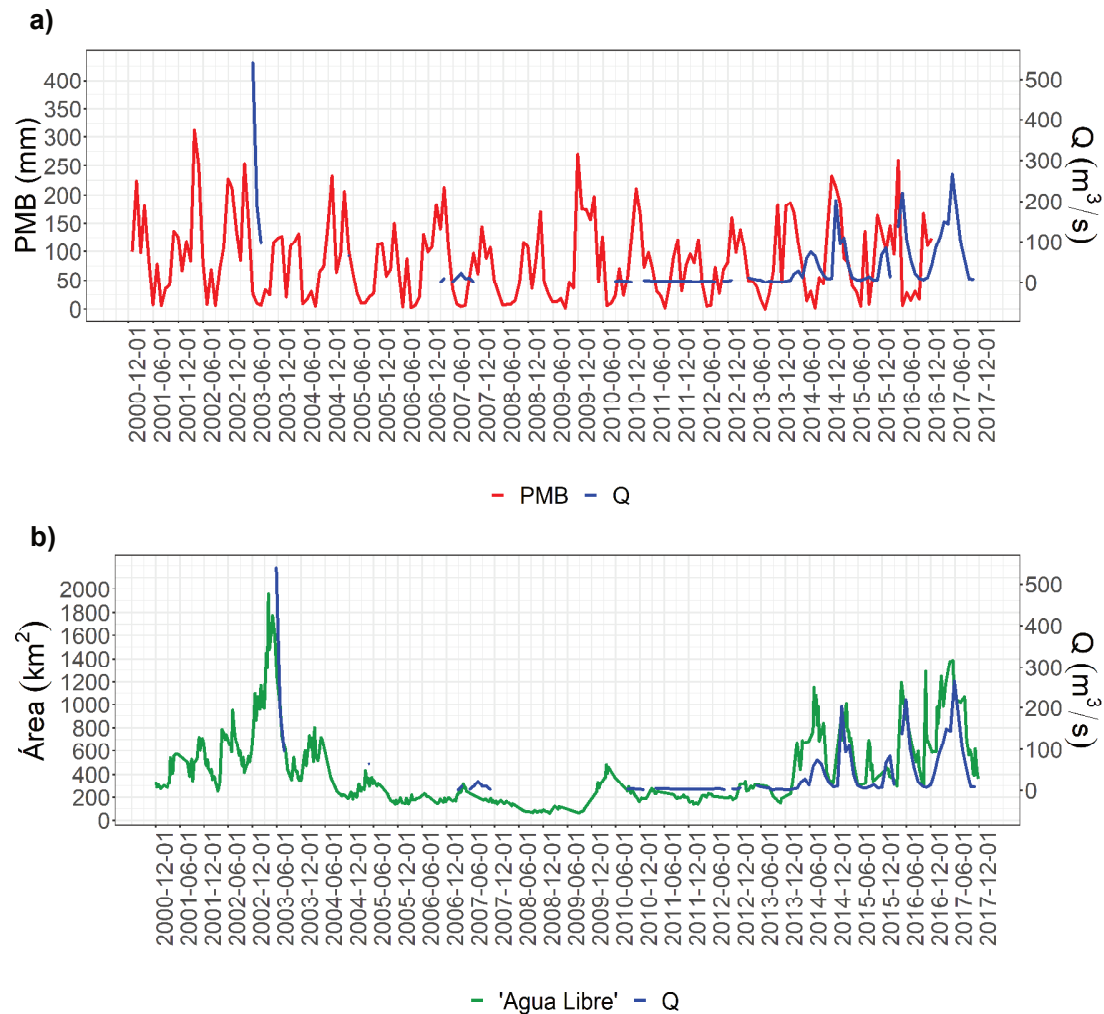


Figura 5.50. Variación temporal del escurrimiento (Q) en la estación paraje El Bonete frente a PMB (a) y el área de ‘Agua Libre’ de los BBSS (b) para el periodo 2000-2017.

El ascenso del NF además de contribuir a la presencia de superficies de ‘Agua Libre’ generaría la presencia de ‘Áreas Saturadas’ circundantes. Estas áreas en conjunto podrían estar relacionadas con la generación de escorrentía (VSAs). Para analizar este fenómeno, se seleccionaron tres fechas de mosaicos Landsat 8 con valores de superficie de ‘Agua Libre’ contrastantes, en cada uno se aplicó la metodología propuesta por Scioli (2016). Los mosaicos

escogidos son los números 2, 3 y 12 de la Tabla 5.5 cuya humedad se considera baja, media y alta, respectivamente.

Para dichos mosaicos, en las Figuras 5.51 a 5.53 se muestra la composición color RGB-75NDWI<sub>GAO</sub> junto con la extracción de superficies de ‘Agua Libre’, ‘Áreas Saturadas’ y los bi-plots de extracción de ‘Áreas Saturadas’ correspondientes. La intensidad del color azul en los bi-plots indica mayor densidad de píxeles. Al comparar los bi-plots de los tres escenarios, se aprecia que a medida que aumenta la humedad mayor cantidad de píxeles presentan valores más altos de NDWI<sub>GAO</sub>.

Es clara la predominancia del color azul en la composición color del periodo más húmedo (Figura 5.53 a); gran cantidad de píxeles toman valores altos de NDWI<sub>GAO</sub> (Figura 5.53 b) lo que resulta en una predominancia del color azul (asignado al NDWI<sub>GAO</sub>) sobre el verde (asignado al NIR) y el rojo (asignado al SWIR2). Esto demuestra que la saturación se manifiesta de manera generalizada y en efecto las superficies de ‘Agua Libre’ se encuentran rodeadas por ‘Áreas Saturadas’ extensas.

De manera contrastante, en los periodos de humedad baja y media predomina el color pardo rojizo (Figura 5.51 a y 5.52 a, respectivamente). En el periodo más seco gran cantidad de píxeles toman valores negativos de NDWI<sub>GAO</sub> (Figura 5.51 b); la mayor reflectancia en las bandas del SWIR2 y NIR resulta en una predominancia del rojo (asignado al SWIR2) y del verde (asignado al NIR) sobre el azul (Figura 5.51 a). La extensión de las ‘Áreas Saturadas’ es mucho menor (ver Figura 5.51 c) que la del periodo más húmedo (Figura 5.53 c).

En el periodo de humedad media la extensión de las ‘Áreas Saturadas’ es intermedia. En general, las ‘Áreas Saturadas’ rodean a las superficies de ‘Agua Libre’. Las áreas circundantes a las superficies de ‘Agua Libre’ del NO, cercanas a las Lomadas de Otumpa, se saturan incluso en el periodo más seco. Asimismo, a medida que aumenta la humedad la zona que se marca en verde en la Figura 5.52 c se satura y se expande.

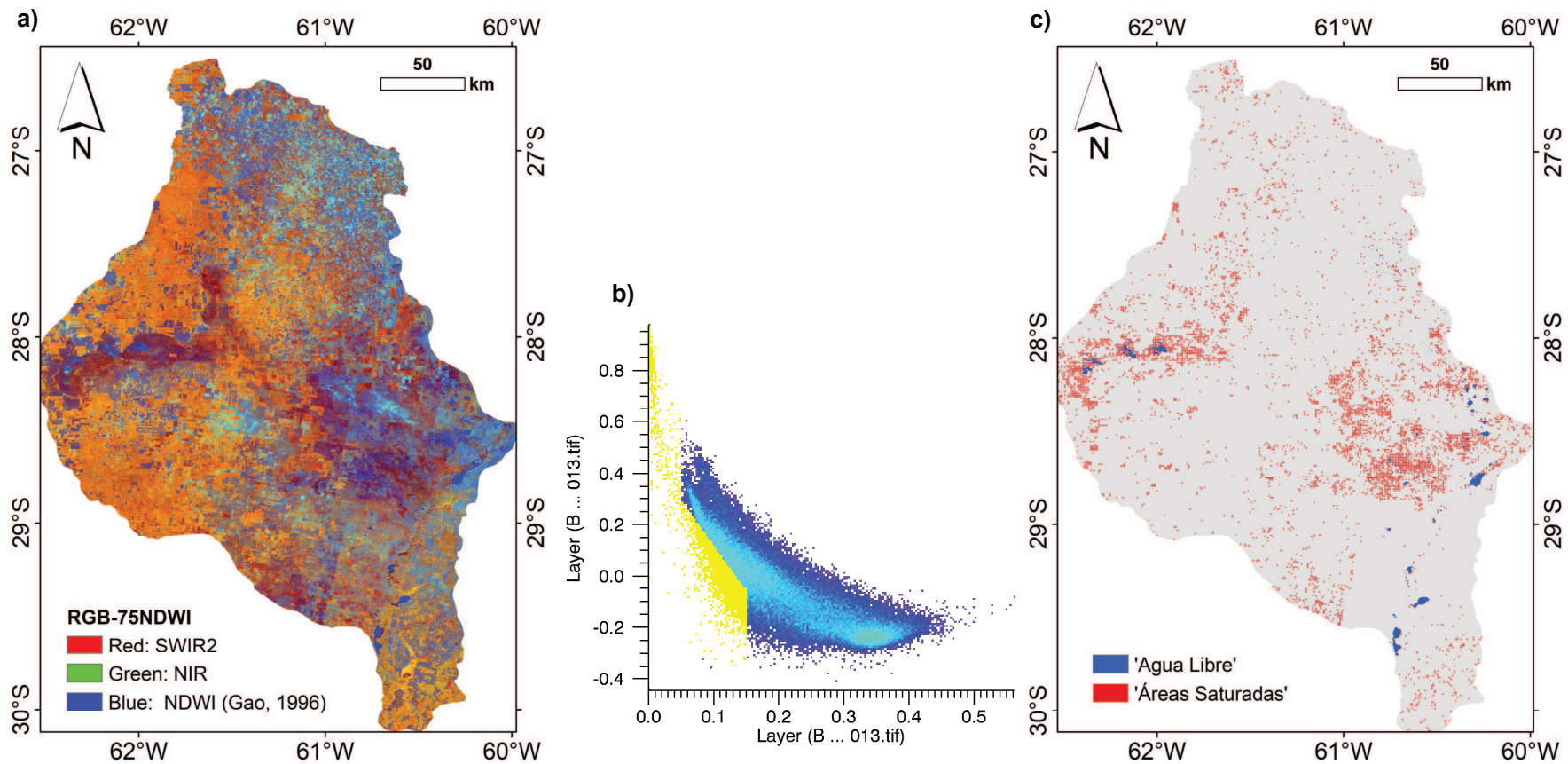


Figura 5.51. a) Composición color RGB-75  $NDWI_{GAO}$ , b) biplot  $NDWI_{GAO}$  (eje y)-SWIR2 (eje x) y c) extracción de 'Agua Libre' y 'Áreas Saturadas' para el mosaico 12 Landsat 8 (2013-10-08).

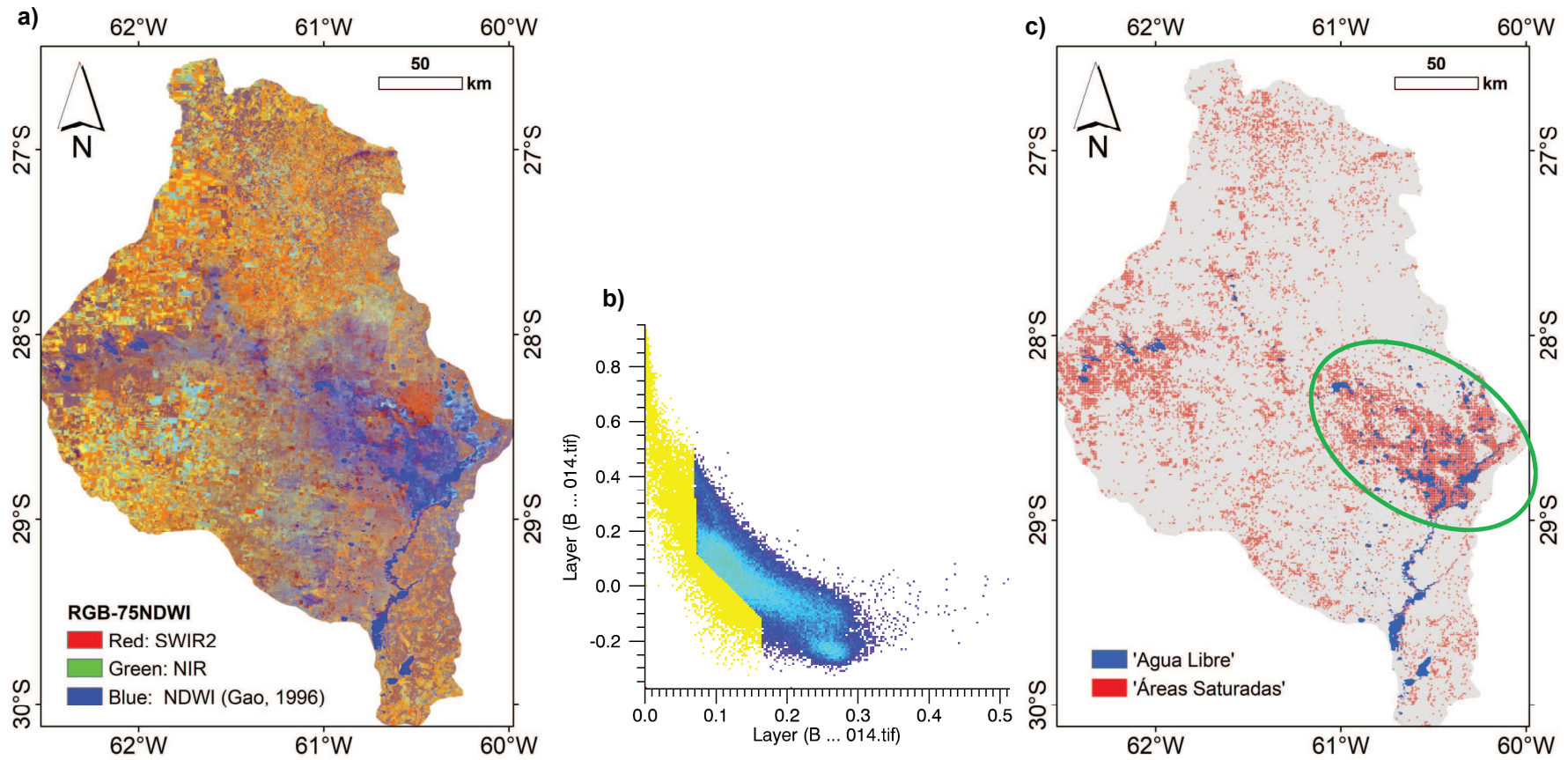


Figura 5.52. a) Composición color RGB-75  $NDWI_{GAO}$ , b) biplot  $NDWI_{GAO}$  (eje y)-SWIR2 (eje x) y c) extracción de 'Agua Libre' y 'Áreas Saturadas' para el mosaico 3 Landsat 8 (2014-08-30).

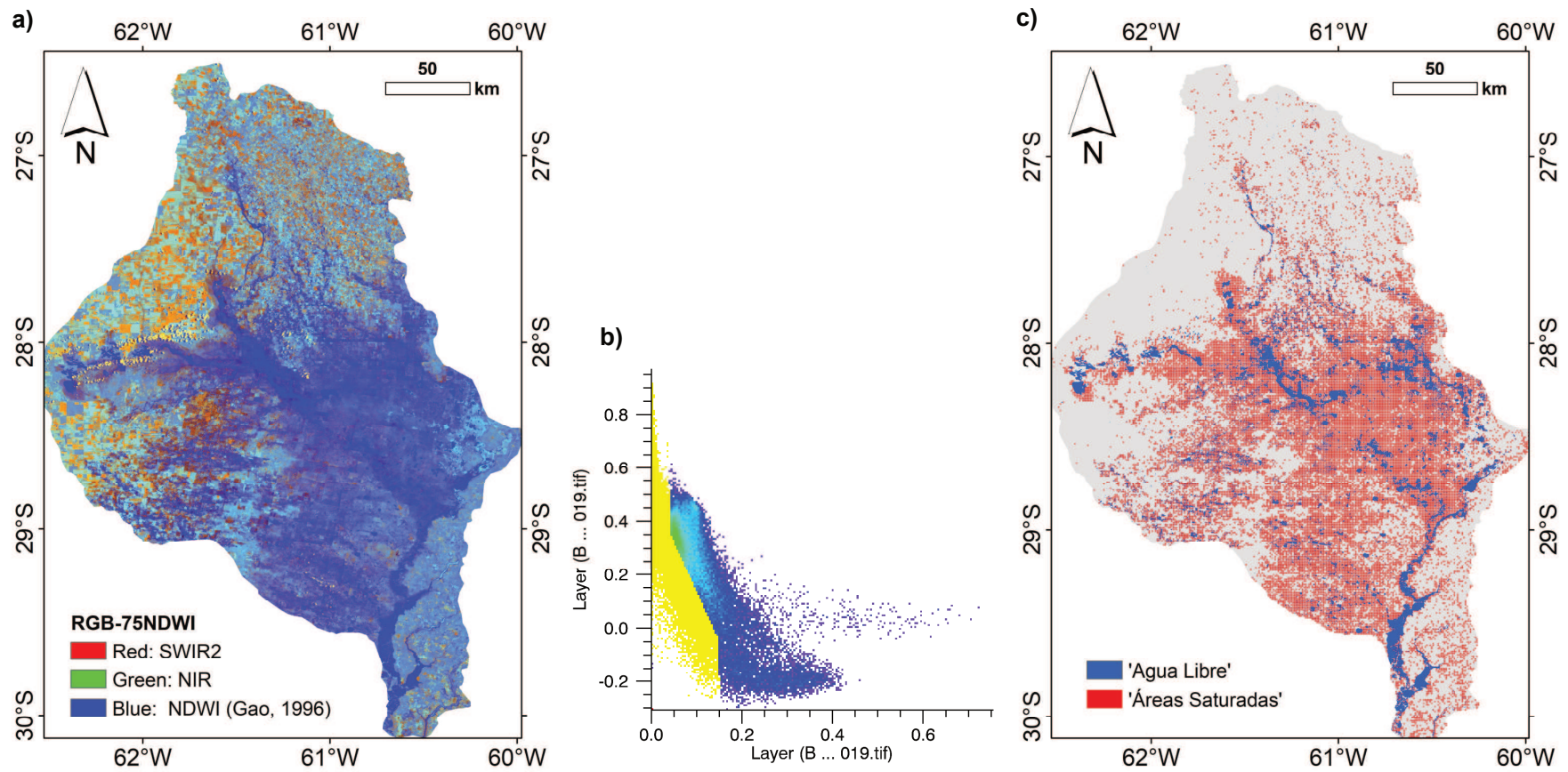


Figura 5.53. a) Composición color RGB-75 NDWI<sub>GAO</sub>, b) biplot NDWI<sub>GAO</sub> (eje y)-SWIR2 (eje x), y c) extracción de 'Agua Libre' y 'Áreas Saturadas' para el mosaico 2 Landsat 8 (2019-02-01).

### 5.3.3 Superficies de ‘Agua Libre’ permanente y su vinculación con el sistema subterráneo.

Considerando que la presencia de superficies de ‘Agua Libre’ está relacionada con el ascenso del nivel freático, es interesante explicar la existencia de superficies de ‘Agua Libre’ permanentes y su vinculación con el sistema subterráneo, dado que, como se comentó al final de la Sección 5.3.1, existen indicios de una conexión entre los cuerpos de agua permanentes/semipermanentes con sistemas de flujo subterráneo. Las superficies de ‘Agua Libre’ permanentes se muestran en la Figura 5.54 (a), sobre el modelo de elevación digital. Es posible observar que, contrastantemente, las dos zonas en donde se ubican las superficies de ‘Agua Libre’ permanentes se hallan alejadas entre sí, y se encuentran sobre niveles del terreno muy diferentes (Figura 5.54 a).

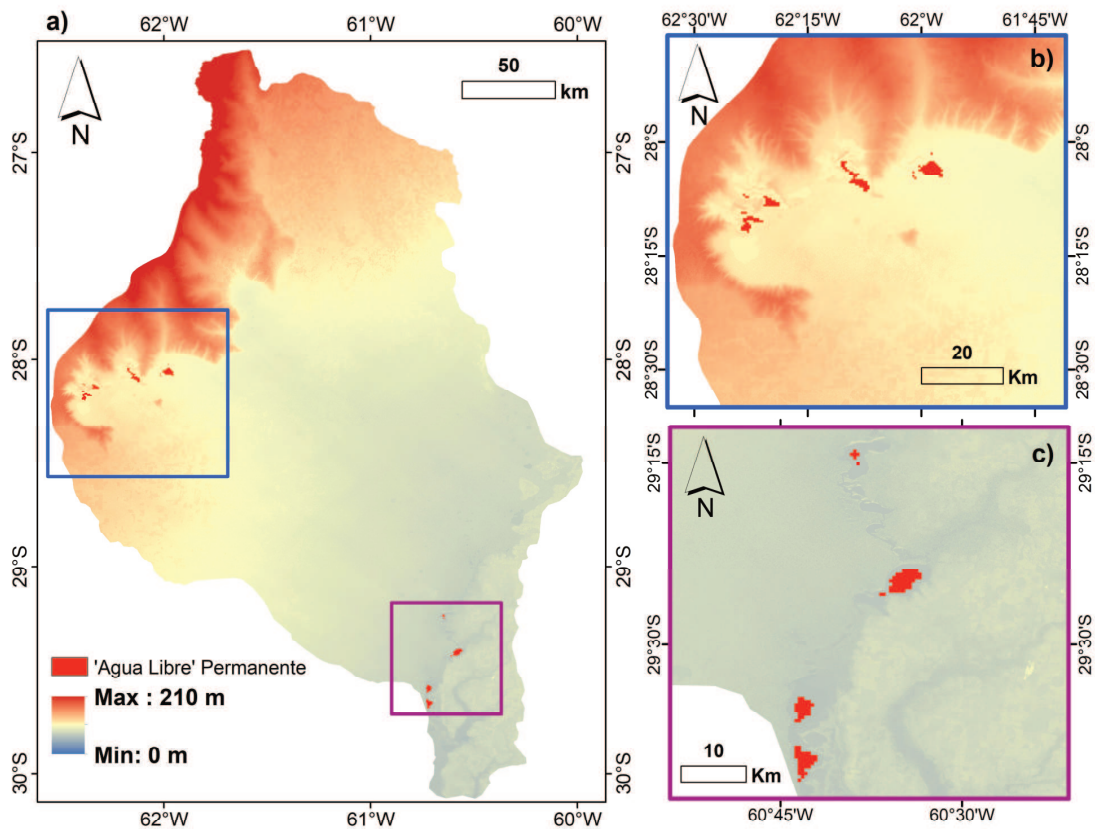


Figura 5.54. Superficies de ‘Agua Libre’ permanentes presentes en los BBSS sobre el modelo digital de elevación del terreno SRTM (Farr et al. 2007).

La presencia permanente de agua en lagunas ubicadas en el piedemonte de las Lomadas de Otumpa (Figura 5.54 b), sobre una elevación aproximada de 87 msnm, podría estar relacionada con la confluencia del flujo subterráneo, además del escurrimiento originado en las suaves laderas contiguas. Considerando que se trata de la zona en donde se registran las menores precipitaciones, es posible que el aporte del flujo subterráneo sea la causa principal de la presencia permanente de agua. Como se mencionó en el Capítulo 3, los resultados expuestos por Thalmeier et al. (2018) sugieren que en cercanías de las Lomadas pueden existir vías

preferenciales del flujo subterráneo y aporte de flujo desde las unidades hidrogeológicas más profundas/inferiores a las someras/superiores. No obstante, esta hipótesis debería ser probada con base en un estudio más detallado sobre la geología y la formación de esas lagunas.

Por otra parte, las superficies de ‘Agua Libre’ que se observan en la Figura 5.54 c se ubican precisamente en la zona más baja de la cuenca, sobre los 50 msnm, aproximadamente. Teniendo en cuenta que la dirección principal del flujo subterráneo es NO-SE y que el Arroyo Golondrinas-Calchaquí es la vía de descarga del sistema subterráneo (Thalmeier et al., 2018), la presencia permanente de agua en dichas superficies estaría relacionada con el aporte continuo de flujo subterráneo/base. La Figura 5.51 c también sería muestra de ello, aun en un periodo seco como el de la figura, la presencia de ‘Agua Libre’ se da sin el acompañamiento de ‘Áreas Saturadas’ circundantes.

En síntesis, los resultados expuestos en este Capítulo permiten mejorar el modelo conceptual de funcionamiento de los BBSS:

Aunque los movimientos verticales son predominantes, y variables como P y ET permiten explicar el balance de masa, estos resultados muestran que el flujo horizontal en el sistema subterráneo y que no fue tenido en cuenta en el modelo de balance podría ser en parte causante de las diferencias entre la variación de almacenamiento, teniendo en cuenta que la fluctuación de LWET es capaz de reflejar los cambios más importantes en el almacenamiento superficial y el impacto del déficit de precipitación en reservorios que responden a escalas temporales de 6 a 24 meses (SPIM 9 a 24 meses).

La predominancia del movimiento vertical implica un vínculo estrecho entre el sistema hidrológico superficial y el subterráneo; la respuesta de la cuenca a la precipitación, dada en términos de aumento/disminución del almacenamiento superficial, está determinada por la fluctuación del almacenamiento subterráneo, de modo que el almacenamiento superficial crece exponencialmente con el aumento del almacenamiento subterráneo. Aunque el almacenamiento subterráneo y, por ende, el almacenamiento superficial tienen una escala temporal de respuesta a la precipitación relativamente larga, mayor a 6 meses, cuando el almacenamiento subterráneo es alto, y el NF se aproxima a la superficie, el almacenamiento superficial puede aumentar significativamente en respuesta a los pulsos de la precipitación mensual que presentan mayor variabilidad. Esta respuesta se reflejaría en la extensión de las superficies de ‘Agua Libre’ no permanentes. Por otra parte, en condición de déficit de almacenamiento subterráneo solo las precipitaciones de gran magnitud causan un aumento en el almacenamiento superficial, el cual se encuentra limitado a las superficies de ‘Agua Libre’ permanentes y semipermanentes cuya presencia se relaciona con el aporte permanente de flujo subterráneo. La existencia de determinados cuerpos de agua permanentes, aún en épocas de déficit hídricos, indicaría un estrecho vínculo con el sistema subterráneo en diferentes sectores del área de estudio.

Por último, la respuesta de la cuenca a la precipitación, dada en términos de aumento/disminución del escurrimiento superficial, se encuentra relacionada con la fluctuación del almacenamiento superficial y, por ende, con la fluctuación del almacenamiento



subterráneo. Es decir, el flujo superficial de saturación contribuye a la generación del escurrimiento superficial.

## Capítulo 6: Conclusiones

La hidrología se desarrolló históricamente estudiando cuencas de drenaje bien definidas, caracterizadas por pendientes moderadas a elevadas en las que los flujos horizontales predominan sobre los verticales. En contraposición, en las cuencas de llanura, paisajes dominados por la escasa pendiente del terreno, las redes de drenaje son poco jerarquizadas, los límites de cuenca suelen ser difusos, y el almacenamiento y los flujos verticales resultan ser de gran relevancia. En este contexto, esta tesis tuvo como objetivo general contribuir al conocimiento del comportamiento de sistemas hidrológicos de llanura contemplando el estudio de las variaciones temporales y espaciales del almacenamiento de agua superficial.

Tomando como área de estudio la cuenca interprovincial de los Bajos Submeridionales, los objetivos específicos fueron 1) analizar el comportamiento de las distintas componentes del balance hídrico, 2) caracterizar el comportamiento temporal y espacial de superficies de agua libre, y 3) identificar la relación entre las superficies de agua libre, el sistema subterráneo y el proceso de generación de esorrentía.

Los resultados expuestos en esta tesis verifican que la cuenca de los BBSS tiene un comportamiento característico de las llanuras: los movimientos verticales de agua son predominantes y la condición de almacenamiento es un factor determinante en el comportamiento de la cuenca. La predominancia del movimiento vertical implica una relación estrecha entre el sistema hidrológico superficial y el subterráneo, relación que se da mediante infiltración y ascenso del nivel freático.

En una zona tan extensa, donde la escasez de información hidrometeorológica ha limitado en ocasiones profundizar estudios hidrológicos y hasta el diseño de obras, la complementación de observaciones de campo con datos de las bases de datos globales GPCC y GLDAS permitió analizar la distribución temporal y espacial de variables como la precipitación (P) y la evapotranspiración real (ET), respectivamente. Dichas variables muestran una relación entre sí, ambas presentan un ciclo anual modomodal sincrónico y una dirección de crecimiento O-E tanto a nivel anual como mensual. La tasa de cambio en sentido O-E de los valores anuales medios para el periodo analizado (2000-2016) fue de 166 y 208 mm cada 100 km para P y ET, respectivamente.

La realización de un balance hídrico simplificado (acorde a la escala espacial de trabajo) de paso mensual para el periodo 2000-2016 permitió identificar que P es la variable que explica en mayor medida el balance de masa, el volumen del escurrimiento superficial es mucho menor y su influencia es poco significativa. Debido a que las oscilaciones temporales de ET se mantienen relativamente constantes, la variabilidad de P y los respectivos excesos (P-ET) son determinantes en el funcionamiento del sistema. De esta manera, el comportamiento temporal del SPI, además de permitir la identificación de periodos secos/húmedos y su severidad, es capaz de reflejar la variación del almacenamiento total (superficial/subterráneo) a medida que aumenta la escala temporal de análisis. En ese sentido, es importante mencionar que las inferencias realizadas sobre la fluctuación del almacenamiento total se realizaron con base en

los datos de almacenamiento (S) de la misión satelital GRACE, que además sirvieron para contrastar la variación de almacenamiento obtenida por balance hídrico y mostrar que la altura de agua equivalente suministrada por GRACE es un buen indicador del nivel freático, al menos en el sector comprobado. Este resultado es de suma relevancia dada la escasa información medida de esta variable.

Aunque la clase ‘Agua Libre’ (MNDWI>0) extraída de imágenes MODIS no incluye cuerpos de agua pequeños, su variación temporal es capaz de representar la fluctuación de la superficie estimada con imágenes de mayor resolución (Landsat 8), es decir, imágenes que se aproximan más a la realidad. La presencia de cuerpos de agua pequeños adquiere relevancia a medida que aumenta la saturación de la cuenca. Si bien existen algunos periodos prolongados con falta de imágenes de calidad, se encontró que la máxima extensión probable de presentar ‘Agua Libre’ constituye el 9.88% de la superficie de los BBSS. Se trata de una primera aproximación a esta variable, aunque las evidencias encontradas con Landsat 7 y 8 muestran que la magnitud de esta superficie sería mayor. Su adecuada estimación a partir de imágenes MODIS requeriría el establecimiento de un umbral de MNDWI menor a 0, el cual debería ser calibrado usando imágenes de mayor resolución. El uso del umbral igual a 0 permitió identificar que la superficie de ‘Agua Libre’ no permanente constituye gran parte (78%) de la máxima extensión probable de presentar ‘Agua Libre’.

A diferencia de variables como P y ET, la superficie de ‘Agua Libre’ no muestra un comportamiento anual cíclico. A pesar de los vacíos temporales de imágenes de calidad, se encontró que la respuesta de la cuenca a la precipitación, dada por el aumento/disminución de la superficie de ‘Agua Libre’, está fuertemente condicionada por el estado de humedad antecedente y por el estado del almacenamiento subterráneo, de modo que la superficie de ‘Agua Libre’ crece exponencialmente con el aumento del almacenamiento subterráneo. En condiciones de bajo almacenamiento superficial/subterráneo los excesos (P-ET) se van acumulando en el sistema subterráneo mediante infiltración y solo las altas precipitaciones producen un aumento de la superficie de ‘Agua Libre’. En cambio, cuando el almacenamiento superficial/subterráneo es alto, la respuesta de la cuenca a la precipitación, dada en términos de aumento/disminución del almacenamiento superficial, puede aumentar significativamente en respuesta a los pulsos de la precipitación mensual. La fluctuación de la superficie de ‘Agua Libre’ está relacionada con el proceso de generación de escorrentía superficial, lo que indica que el flujo superficial de saturación, causado por el ascenso del nivel freático, contribuye en buena medida en la generación del escurrimiento.

La vinculación del sistema superficial con el subterráneo, además de expresarse por la relación exponencial existente entre el almacenamiento superficial y subterráneo, se manifiesta por la existencia de cuerpos de ‘Agua Libre’ permanentes, dando indicios de la vinculación de los mismos con el flujo subterráneo. Si bien las diferencias entre la variación de almacenamiento obtenida por balance hídrico y a partir de GRACE estarían influenciadas por la incertidumbre en la estimación de P, ET, S (GRACE), los flujos subterráneos y las diferencias entre sus entradas y salidas, que no fueron tenidas en cuenta en el modelo de balance hídrico, podrían ser relevantes.

Los resultados obtenidos en esta tesis constituyen un aporte a la caracterización hidrológica y al modelo conceptual del funcionamiento del sistema superficial y su vínculo con el subterráneo en la extensa llanura de los BBSS, respaldado en el análisis cuantitativo de las variables hidrológicas más importantes. Además, contribuyen al conocimiento sobre el comportamiento hidrológico de los sistemas de llanura, constituyendo una base para futuras investigaciones y apoyando la gestión del recurso hídrico.

Por último, se recomienda mejorar la estimación de las superficies afectadas por agua mediante la calibración del umbral de MNDWI de imágenes MODIS que permita la discriminación de píxeles de agua pura de los mixtos. Esta mejora permitiría disminuir la incertidumbre de la estimación de las superficies afectadas por agua y obtener valores más precisos, que servirían de insumo para la calibración en futuras modelaciones hidrológicas. En ese sentido, se recomienda que en la modelación hidrológica futura se contemple la vinculación del sistema superficial y el subterráneo mediante la representación de procesos de infiltración y asenso del nivel freático.

### Anexo 1. Fuentes de datos utilizadas y sus características

Variable	Fuente de datos	Versión	Disponibilidad	Periodo utilizado	Resolución espacial	Resolución temporal	Referencia	Proveedor del conjunto de datos
Precipitación	GPCC	V2018	1891-01-01/ 2016-12-31	1986-01-01/ 2016-12-31	0.25°	1 mes	Schneider, U. et al. (2018)	German Weather Service
Precipitación	CRU	V4.03	1901-01-01/ 2018-12-31	1986-01-01/ 2018-12-31	0.5°	1 mes	Harris, I. et al. (2020)	University of East Anglia
Evapotranspiración real	GLDAS	V2	2000-01-01 al presente	Virasoro: 2009-12-01/ 2012-05-01 BBSS: 2000-01-01/ 2016-12-31	0.25°	3 horas	Rodell, M. et al. (2004)	NASA GES DISC
Evapotranspiración real	FLDAS	V001	1982-01-01/ 2020-11-01	2009-12-01/ 2012-05-01	0.1°	1 mes	McNally, A. et al. (2017)	NASA GES DISC
Evapotranspiración real	MOD16A2	V6	2001-01-01 al presente	2009-12-01/ 2012-05-01	500 m	8 días	Running, S. et al. (2017)	NASA LP DAAC
Evapotranspiración real	TerraClimate		1958-01-01/ 2019-12-01	2009-12-01/ 2012-05-01	1/24°	1 mes	Abatzoglou, J.T. et al. (2018)	University of California Merced
Evapotranspiración real	CFSV2	V2	2011-01-01 al presente	2009-12-01/ 2012-05-01	0.2°	6 horas	Saha, S. et al. (2011)	NOAA NWS NCEP
Evapotranspiración real	MOD13A2	V6	2000-02-18 al presente	2009-12-01/ 2012-05-01	1 km	16 días	Didan, K. (2015)	NASA LP DAAC
Evapotranspiración real	MOD11A1	V6	2000-02-24 al presente	2009-12-01/ 2012-05-01	1km	1 día	Wan, Z. et al. (2015)	NASA LP DAAC
Superficie cubierta por agua	Landsat 8 Surface Reflectance Tier 1		2013-04-11/ 2020-12-16	2013-04-11/ 2019-12-31	30 m	16 días	Google	NASA USGS
Superficie cubierta por agua	Landsat 7 Surface Reflectance Tier 1		1999-01-01/ 2021-03-18	2003-04-06/ 2003-04-15	30 m	16 días	Google	NASA USGS
Superficie cubierta por agua	MOD09A1	V6	2000-03-05/ 2021-01-09	2000-03-05/ 2019-12-31	500 m	8 días	Vermote, E. (2015)	NASA LP DAAC
Elevación del terreno	SRTM	V3	2000-02-11/ 2000-02-22	2000-02-11/ 2000-02-22	30 m		Farr, T.G. et al. (2007)	NASA USGS JPL-Caltech
Almacenamiento de agua terrestre (TWS) o altura de agua equivalente (LWET)	GRACE Level-3 gridded Mascon	RL06	2002-03-31/ 2017-05-22	2002-03-31 a 2017-05-22	0.5°	~ 1 a 2 meses	Wiese, D.N. et al. (2018)	NASA JPL

**Anexo 2. Estaciones meteorológicas recopiladas**

Nº	Latitud	Longitud	Nombre	Organismo	Resolución Temporal	Datos Faltantes %	Inicio Serie	Fin Serie
1	-26.33	-59.35	El colorado Automática	INTA	Diaria	15.71	oct-13	jul-19
2	-27.42	-58.93	Colonia Benítez	INTA	Diaria	0.00	ene-68	jul-19
3	-26.30	-59.38	El colorado	INTA	Diaria	1.65	ene-60	jun-15
4	-28.43	-58.92	Bellavista	INTA	Diaria	6.46	ene-59	jul-19
5	-26.87	-60.45	Roque Sáenz Peña	INTA	Diaria	2.20	ene-59	jul-19
6	-27.10	-61.10	Las Breñas	INTA	Diaria	0.32	ene-67	jul-19
7	-28.89	-62.27	Bandera	INTA	Mensual	0.00	ene-80	jul-18
8	-31.18	-61.55	RAFAELA	INTA	Diaria	2.89	abr-56	jul-19
9	-26.41	-61.42	Los frentones	APA	Mensual	0.00	sep-56	ago-17
10	-26.50	-61.18	Pampa del Infierno	APA	Mensual	0.82	sep-56	ago-17
11	-26.60	-60.94	Concepción del Bermejo	APA	Mensual	0.00	sep-56	ago-17
12	-26.69	-60.73	Avia Terai	APA	Mensual	0.00	sep-54	ago-17
13	-26.80	-60.84	Campo Largo	APA	Mensual	0.14	sep-56	ago-17
14	-26.78	-60.44	Presidencia Roque Sáenz Peña	APA	Mensual	0.00	sep-28	ago-17
15	-26.93	-60.05	Machagai	APA	Mensual	0.00	sep-54	ago-17
16	-27.88	-59.28	Basail	APA	Mensual	0.00	sep-55	ago-17
17	-27.65	-59.86	Charadai	APA	Mensual	0.00	sep-55	ago-17
18	-27.87	-59.94	La Sabana	APA	Mensual	0.00	sep-54	ago-17
19	-26.96	-60.97	Corzuela	APA	Mensual	0.00	sep-54	ago-17
20	-27.09	-61.08	Las Breñas	APA	Mensual	0.00	sep-54	ago-17
21	-27.22	-61.20	Charata	APA	Mensual	0.00	sep-54	ago-17
22	-27.11	-60.59	La tigra	APA	Mensual	0.00	sep-78	ago-17
23	-27.18	-60.63	La Clotilde	APA	Mensual	0.00	sep-78	ago-17
24	-27.28	-60.71	San Bernardo	APA	Mensual	0.00	sep-59	ago-17
25	-27.58	-60.71	Villa Ángela	APA	Mensual	0.00	sep-54	ago-17
26	-27.68	-60.90	Coronel du Graty	APA	Mensual	0.00	sep-54	ago-17
27	-27.83	-61.14	Santa Sylvina	APA	Mensual	0.66	sep-54	ago-17
28	-27.29	-60.41	Villa Berthet	APA	Mensual	0.00	sep-52	ago-17
29	-27.52	-60.39	Samuhú	APA	Mensual	0.00	sep-54	ago-17
30	-27.32	-61.28	Gral. Pinedo	APA	Mensual	0.00	sep-54	ago-17
31	-27.49	-61.68	Gancedo	APA	Mensual	0.00	sep-54	ago-17
32	-27.61	-61.35	Hermoso Campo	APA	Mensual	0.00	sep-54	ago-17
33	-27.91	-61.40	Chorotis	APA	Mensual	0.00	sep-54	ago-17
34	-24.56	-62.24	Comandancia Frías	APA	Mensual	1.52	sep-84	ago-17

35	-24.42	-61.68	El Sauzalito	APA	Mensual	0.51	sep-84	ago-17
36	-24.93	-61.49	Misión Nueva Pompeya	APA	Mensual	0.21	sep-78	ago-17
37	-24.69	-61.43	Wichi	APA	Mensual	0.00	sep-93	ago-17
38	-25.41	-60.45	El Espinillo	APA	Mensual	0.00	sep-93	ago-17
39	-25.63	-60.27	V. rio Bermejito	APA	Mensual	0.00	sep-93	ago-17
40	-26.14	-59.60	Pcia. Roca	APA	Mensual	0.13	sep-54	ago-17
41	-26.54	-59.34	Gral. San Martín	APA	Mensual	0.00	sep-55	ago-17
42	-26.70	-59.13	Pampa Almirón	APA	Mensual	0.00	sep-93	ago-17
43	-26.94	-58.66	Gral. Vedía	APA	Mensual	0.00	sep-56	ago-17
44	-26.91	-58.54	Puerto Bermejo	APA	Mensual	0.00	sep-56	ago-17
45	-26.05	-59.94	Pampa del Indio	APA	Mensual	0.00	sep-56	ago-17
46	-26.49	-59.68	Laguna Limpia	APA	Mensual	0.27	sep-55	ago-17
47	-26.58	-59.63	Ciervo Petiso	APA	Mensual	0.00	sep-55	ago-17
48	-26.84	-59.07	La Eduvigis	APA	Mensual	2.78	sep-81	ago-17
49	-27.05	-58.68	Las palmas	APA	Mensual	0.00	sep-56	ago-17
50	-26.80	-59.56	Capitán Solari	APA	Mensual	0.00	sep-56	ago-17
51	-26.93	-59.52	Colonia Elisa	APA	Mensual	0.00	sep-54	ago-17
52	-27.33	-58.95	Colonia Benítez	APA	Mensual	0.00	sep-55	ago-17
53	-27.26	-58.97	Margarita Belén	APA	Mensual	0.00	ene-56	ago-17
54	-25.65	-60.93	Miraflores	APA	Mensual	0.00	sep-93	ago-17
55	-25.95	-60.62	Juan José Castelli	APA	Mensual	0.13	sep-54	ago-17
56	-26.46	-60.05	El tacuruzal-El palmar	APA	Mensual	0.64	sep-78	ago-17
57	-26.62	-59.80	Las Garcitas	APA	Mensual	0.00	sep-56	ago-17
58	-26.70	-59.63	Colonia Unidas	APA	Mensual	0.13	sep-54	ago-17
59	-27.00	-59.85	Pcia. de la plaza	APA	Mensual	0.00	sep-54	ago-17
60	-27.11	-59.45	La escondida	APA	Mensual	18.03	sep-56	ago-17
61	-27.13	-59.38	La verde	APA	Mensual	0.00	sep-56	ago-17
62	-27.21	-59.29	Makalle	APA	Mensual	0.00	sep-55	ago-17
63	-27.37	-59.09	Puerto tirol	APA	Mensual	0.00	sep-55	ago-17
64	-27.44	-59.00	Resistencia	APA	Mensual	0.00	sep-54	ago-17
65	-27.56	-59.31	Colonia Baranda	APA	Mensual	0.43	sep-78	ago-17
66	-26.34	-60.43	Tres Isletas	APA	Mensual	0.00	sep-54	ago-17
67	-26.87	-60.22	Quitilipi	APA	Mensual	0.00	sep-54	ago-17
68	-27.53	-59.57	Cote Lai	APA	Mensual	0.00	sep-54	ago-17
69	-27.30	-58.62	Isla del Cerrito	APA	Mensual	6.20	sep-78	ago-17
70	-27.52	-58.94	Puerto Vilelas	APA	Mensual	17.20	sep-55	ago-17
71	-25.61	-63.27	Taco pozo	APA	Mensual	0.57	sep-73	ago-17
72	-25.16	-61.84	Fuerte esperanza	APA	Mensual	0.00	sep-78	ago-17
73	-29.88	-61.95	Ceres	SMN	Diaria	0.27	ene-56	abr-17
74	-29.18	-59.70	Reconquista	SMN	Diaria	2.04	feb-56	abr-17

75	-27.77	-64.30	Santiago del Estero	SMN	Diaria	0.00	feb-56	abr-17
76	-26.75	-60.40	ROQUE SAENZ PEÑA	SMN	Diaria	0.27	ene-56	abr-17
77	-24.70	-60.58	Las Lomitas	SMN	Diaria	0.00	ene-59	abr-17
78	-26.20	-58.23	Formosa Aero	SMN	Diaria			
79	-27.45	-59.05	Resistencia Aero	SMN	Diaria	0.00	ene-63	abr-17
80	-29.11	-61.88	La delia	Privada	Mensual	0.00	mar-08	abr-17
81	-28.31	-61.55	Los Guasunchos	Privada	Mensual	0.00	ene-44	dic-18
82	-29.07	-60.50	Fortín Olmos	RHN	Diaria	4.48	ene-73	jun-19
83	-28.03	-59.23	Florencia	RHN	Diaria	0.23	ago-83	may-19
84	-28.24	-59.70	Escuela 1256	RHN	Diaria	6.02	nov-84	may-19
85	-28.56	-59.36	Ruta Nacional N° 011	RHN	Diaria	5.44	ene-75	may-19
86	-28.69	-59.63	Tres Bocas	RHN	Diaria	0.24	dic-84	may-19
87	-28.99	-59.10	Santa Lucia	RHN	Diaria	6.37	jun-68	may-19
88	-28.97	-59.85	La sarita	RHN	Diaria	6.33	ene-76	may-19
89	-29.13	-59.94	Ruta Provincial N° 042 S	RHN	Diaria	0.24	nov-84	may-19
90	-29.36	-59.78	Ruta Provincial N° 088 S	RHN	Diaria	1.83	nov-82	may-19
91	-29.73	-60.01	Margarita	RHN	Diaria	11.22	may-76	may-19
92	-29.71	-59.02	Malvinas Sur	RHN	Diaria	1.35	may-76	may-19
93	-30.22	-59.38	Pueblo libertador	RHN	Diaria	3.45	mar-83	may-19
94	-30.35	-59.25	Paso Junce	RHN	Diaria	5.03	may-76	may-19
95	-30.92	-59.55	Paso Medina	RHN	Diaria	10.30	sep-88	may-19
96	-30.88	-60.03	Saladero Cabal	RHN	Diaria	12.16	ene-70	may-19
97	-30.80	-60.01	Colonia Macías	RHN	Diaria	5.19	oct-82	ene-18
98	-30.85	-60.28	Ruta Provincial N° 81	RHN	Diaria	0.32	jun-93	may-19



99	-30.66	-60.23	Cacique Ariacaiquín	RHN	Diaria	1.30	ene-81	may-19
100	-30.78	-60.59	San justo	RHN	Diaria	0.90	jul-81	may-18
101	-26.66	-58.63	Puerto Velaz	RHN	Diaria	0.00	dic-88	may-19
102	-26.33	-59.36	El colorado	RHN	Diaria	3.27	ene-66	jun-19
103	-29.23	-61.77	Tostado	Cooperativa de provisión de agua potable, vivienda y servicios asistenciales de tostado limitada	Mensual	0.00	ene-77	jun-19
104			Villa Minetti	Privada	Anual	0.00	1937	2012
105			Averias	Privada	Anual	0.00	1918	1950
106			4 Bocas	Privada	Anual	0.00	1972	1986
107			La Angélica	Privada	Anual	4.17	1912	1984
108			La Irene	Privada	Anual	2.63	1912	1950
109			El Dichoso	Privada	Anual	0.00	1920	1950
110			Santa Lucia	Privada	Anual	1.30	1912	1990
111			Atahualp	Privada	Anual	0.00	1999	1999
112			Tostado	Privada	Anual	0.00	1969	1990
113			El Amarg	Privada	Anual	0.00	2001	2001
114			El Urunda	Privada	Anual	0.00	2001	2001
115			Quimili	Privada	Anual	0.00	1918	1999
116			Los Gatos	Privada	Anual	0.00	1953	2001
117			Tosado (Zabala)	Privada	Anual	1.30	1929	2006

**Anexo 3.** Valores de r y RMSE entre la información provista por las bases de datos globales y la información observada

Comparación	r GPCC	RMSE GPCC	Comparación	r CRU	RMSE CRU
Bandera INTA vs. P121 GPCC	0.75	53.31	Bandera INTA vs. P73 CRU	0.63	60.73
Basail APA vs. P201 GPCC	0.84	55.23	Basail APA vs. P61 CRU	0.6	87.39
Bellavista INTA vs. P169 GPCC	0.92	34.41	Bellavista INTA vs. P71 CRU	0.56	76.09
Capitán Solari APA vs. P268 GPCC	0.79	53.3	Capitán Solari APA vs. P42 CRU	0.5	77.52
Charata APA vs. P245 GPCC	0.8	46.2	Charata APA vs. P48 CRU	0.69	60.82
Colonia Benítez INTA vs. P237 GPCC	0.95	29.22	Colonia Benítez INTA vs. P53 CRU	0.6	81.12
Colonia Unidas APA vs. P285 GPCC	0.8	53.51	Colonia Unidas APA vs. P42 CRU	0.52	81.53
Cote Lai APA vs. P217 GPCC	0.87	45.94	Cote Lai APA vs. P60 CRU	0.57	75.78
El colorado RHN vs. P303 GPCC	0.75	58.2	El Colorado RHN vs. P34 CRU	0.67	64.28
Escuela 1256 RHN vs. P183 GPCC	0.8	64.51	Escuela 1256 RHN vs. P69 CRU	0.58	90.98
Florencia RHN vs. P185 GPCC	0.86	49.13	Florencia RHN vs. P70 CRU	0.65	77.36
Gancedo APA vs. P226 GPCC	0.63	66.41	Gancedo APA vs. P47 CRU	0.66	62.76
Gral. Pinedo APA vs. P227 GPCC	0.77	51.56	Gral. Pinedo APA vs. P48 CRU	0.68	64.31
Gral. San Martin vs. P286 GPCC	0.76	58.52	Gral. San Martin APA vs. P43 CRU	0.49	81.77
Juan José Castelli APA vs. P332 GPCC	0.72	57.85	Juan José Castelli APA vs. P22 CRU	0.6	59.96
La Eduvigis APA vs. P270 GPCC	0.75	67.67	La Eduvigis APA vs. P43 CRU	0.44	86.76
La Sarita RHN vs. P131 GPCC	0.88	44.65	La Sarita RHN vs. P78 CRU	0.62	73.31
La Tigra APA vs. P247 GPCC	0.84	48.89	La Tigra APA vs. P49 CRU	0.56	75.84
La Verde APA vs. P252 GPCC	0.84	51.18	La Verde APA vs. P52 CRU	0.57	78.14
Las Breñas INTA vs. P245 GPCC	0.91	30.84	Las Breñas INTA vs. P48 CRU	0.7	59.33
Las Garcitas APA vs. P284 GPCC	0.78	54.86	Las Garcitas APA vs. P42 CRU	0.53	77.28

Las Lomitas SMN vs. P417 GPCC	0.98	13.35	Las Lomitas SMN vs. P4 CRU	0.74	49.6
Las Palmas APA vs. P254 GPCC	0.81	53.45	Las Palmas APA vs. P53 CRU	0.5	80.1
Los Guasunchos vs. P158 GPCC	0.69	56.94	Los Guasunchos vs. P65 CRU	0.64	55.81
Machagai APA vs. P266 GPCC	0.82	50	Machagai APA vs. P41 CRU	0.74	60.3
Makalle APA vs. P252 GPCC	0.87	46.15	Makalle APA vs. P52 CRU	0.59	78.24
Pampa del Indio APA vs. P318 GPCC	0.67	63.09	Pampa del Indio APA vs. P33 CRU	0.66	62.02
Pampa del Infierno APA vs. P279 GPCC	0.75	54.43	Pampa del Infierno APA vs. P39 CRU	0.66	59.21
Quitilipi APA vs. P266 GPCC	0.81	50.51	Quitilipi APA vs. P41 CRU	0.7	63.18
Reconquista SMN vs. P115 GPCC	1	8.58	Reconquista SMN vs. P87 CRU	0.64	69.97
Resistencia AERO SMN vs. P236 GPCC	0.98	16.12	Resistencia AERO SMN vs. P52 CRU	0.63	79.99
Roque Sáenz Peña SMN vs. P265 GPCC	0.98	17.69	Roque Sáenz Peña SMN vs. P41 CRU	0.79	50.04
Ruta Nacional N 011 RHN vs. P150 GPCC	0.87	48.97	Ruta Nacional N 011 RHN vs. P79 CRU	0.64	78.4
Ruta Provincial N 042 S RHN vs. P114 GPCC	0.91	39.82	Ruta Provincial N 042 S RHN vs. P87 CRU	0.63	72.27
San Bernardo APA vs. P230 GPCC	0.78	53.1	San Bernardo APA vs. P49 CRU	0.6	68.8
Santa Sylvina APA vs. P194 GPCC	0.74	55.81	Santa Sylvina APA vs. P57 CRU	0.61	61.13
Tacurazal APA vs. P300 GPCC	0.79	56.42	Tacurazal APA vs. P32 CRU	0.71	64.06
Tres Isletas APA vs. P299 GPCC	0.74	56.32	Tres Isletas APA vs. P32 CRU	0.68	58.82
Villa Berthet APA vs. P231 GPCC	0.77	53.8	Villa Berthet APA vs. P50 CRU	0.57	69.06
Cacique Ariacaiquin RHN vs. P11 GPCC	0.8	56.88	Cacique Ariacaiquin RHN vs. P113 CRU	0.79	58.46
Ceres SMN vs. P55 GPCC	1	5.14	Ceres SMN vs. P92 CRU	0.55	75.37
Corzuela APA vs. P263 GPCC	0.83	44.28	Corzuela APA vs. P40 CRU	0.71	56.09
Fortín Olmos RHN vs. P112 GPCC	0.77	61.11	Fortín Olmos RHN vs. P86 CRU	0.58	75.6
Malvinas Sur RHN vs. P83 GPCC	0.84	50.43	Malvinas Sur RHN vs. P97 CRU	0.63	72.65
Margarita RHN vs. P79 GPCC	0.8	62.31	Margarita RHN vs. P95 CRU	0.62	81.33

Paso Junce RHN vs. P32 GPCC	0.87	48.91	Paso Junce RHN vs. P106 CRU	0.8	62.77
Pueblo Libertador RHN vs. P48 GPCC	0.83	59.14	Pueblo Libertador RHN vs. P106 CRU	0.8	67.43
Ruta Provincial N 088 S RHN vs. P97 GPCC	0.9	43.53	Ruta Provincial N 088 S RHN vs. P87 CRU	0.59	78.96
San Justo RHN vs. P9 GPCC	0.83	47.05	San justo RHN vs. P112 CRU	0.83	46.25

#### Anexo 4. Detalle relleno de series mensuales

Variable Predictora (x)	Estación Incompleta (Variable respuesta y)	Mes	Año	Xobs (mm)	P calc. (mm)	Coef. Pearson	$\beta_1$	$\beta_0$	P Valor ncvTest	P Valor Shapiro Test
P 152	Bellavista INTA	7	1959	54.63	53.39	0.9417	0.9857978	-0.4642716	2.E-01	2.E-04
P 168	Bellavista INTA	8	1959	34.25	37.57	0.9200	0.9543153	4.8881301	3.E-03	2.E-06
P 152	Bellavista INTA	9	1959	53.15	49.98	0.9458	1.038076	-5.1961664	1.E+00	1.E-04
P 152	Bellavista INTA	10	1959	250.36	265.64	0.9004	1.0085653	13.13475	3.E-01	2.E-09
P 151	Bellavista INTA	11	1959	99.83	106.19	0.9421	0.9282475	13.521754	2.E-07	3.E-03
P 152	Bellavista INTA	1	1960	84.00	91.72	0.9007	0.9450635	12.334862	3.E-01	2.E-08
P 152	Bellavista INTA	2	1960	55.28	61.96	0.9093	1.1058553	0.8285162	4.E-04	2.E-08
P 152	Bellavista INTA	3	1960	111.93	110.08	0.9341	1.0000934	-1.8652453	8.E-01	1.E-05
P 135	Bellavista INTA	4	1960	135.53	151.72	0.9478	1.0274932	12.463825	2.E-06	5.E-05
P 152	Bellavista INTA	5	1960	11.11	17.02	0.8708	0.9462938	6.5108112	3.E-02	3.E-07
Florencia	Bellavista INTA	6	1960	NA	47.67	0.9456	NA	NA	NA	NA
P 152	Bellavista INTA	7	1960	88.85	87.12	0.9417	0.9857978	-0.4642716	2.E-01	1.E-04
P 168	Bellavista INTA	8	1960	36.81	40.02	0.9200	0.9543153	4.8881301	2.E-03	2.E-06
P 152	Bellavista INTA	9	1960	144.83	145.15	0.9458	1.038076	-5.1961664	1.E+00	8.E-05
P 152	Bellavista INTA	10	1960	197.84	212.67	0.9004	1.0085653	13.13475	4.E-01	2.E-09
P 151	Bellavista INTA	11	1960	65.76	74.56	0.9421	0.9282475	13.521754	9.E-08	2.E-03
P 152	Bellavista INTA	12	1960	98.73	112.66	0.9396	0.9905471	14.858429	4.E-01	2.E-03
P 152	Bellavista INTA	1	1961	93.88	101.06	0.9007	0.9450635	12.334862	3.E-01	2.E-08
P 152	Bellavista INTA	2	1961	25.70	29.25	0.9093	1.1058553	0.8285162	2.E-04	1.E-08
P 152	Bellavista INTA	3	1961	323.07	321.23	0.9341	1.0000934	-1.8652453	7.E-01	8.E-06
P 135	Bellavista INTA	4	1961	270.84	290.75	0.9478	1.0274932	12.463825	1.E-06	4.E-05
P 152	Bellavista INTA	5	1961	123.27	123.16	0.8708	0.9462938	6.5108112	2.E-02	2.E-07
Florencia	Bellavista INTA	6	1961	NA	47.67	0.9456	NA	NA	NA	NA
P 152	Bellavista INTA	7	1961	14.04	13.38	0.9417	0.9857978	-0.4642716	3.E-01	8.E-05
P 168	Bellavista INTA	8	1961	33.46	36.82	0.9200	0.9543153	4.8881301	2.E-03	1.E-06
P 152	Bellavista INTA	9	1961	28.71	24.61	0.9458	1.038076	-5.1961664	9.E-01	5.E-05
P 152	Bellavista INTA	10	1961	253.24	268.54	0.9004	1.0085653	13.13475	4.E-01	1.E-09
P 151	Bellavista INTA	11	1961	177.32	178.12	0.9421	0.9282475	13.521754	4.E-08	2.E-03
P 152	Bellavista INTA	12	1961	71.48	85.66	0.9396	0.9905471	14.858429	3.E-01	1.E-03
P 152	Bellavista INTA	1	1962	84.13	91.84	0.9007	0.9450635	12.334862	2.E-01	1.E-08
P 152	Bellavista INTA	2	1962	15.62	18.10	0.9093	1.1058553	0.8285162	1.E-04	8.E-09
P 152	Bellavista INTA	3	1962	237.43	235.59	0.9341	1.0000934	-1.8652453	9.E-01	5.E-06
P 135	Bellavista INTA	4	1962	80.96	95.65	0.9478	1.0274932	12.463825	2.E-06	3.E-05
P 152	Bellavista INTA	5	1962	48.48	52.39	0.8708	0.9462938	6.5108112	3.E-02	1.E-07
Florencia	Bellavista INTA	6	1962	NA	47.67	0.9456	NA	NA	NA	NA
P 152	Bellavista INTA	7	1962	23.56	22.76	0.9417	0.9857978	-0.4642716	3.E-01	6.E-05
P 168	Bellavista INTA	8	1962	26.90	30.56	0.9200	0.9543153	4.8881301	1.E-03	8.E-07
P 152	Bellavista INTA	12	1965	288.40	300.53	0.9396	0.9905471	14.858429	3.E-01	1.E-03
P 152	Bellavista INTA	1	1966	238.32	237.56	0.9007	0.9450635	12.334862	2.E-01	8.E-09
P 152	Bellavista INTA	2	1966	158.20	175.77	0.9093	1.1058553	0.8285162	7.E-05	6.E-09
P 152	Bellavista INTA	3	1966	256.83	254.99	0.9341	1.0000934	-1.8652453	1.E+00	3.E-06
P 135	Bellavista INTA	4	1966	214.83	233.20	0.9478	1.0274932	12.463825	1.E-06	2.E-05

P 152	Bellavista INTA	5	1966	83.38	85.41	0.8708	0.9462938	6.5108112	2.E-02	9.E-08
Florencia	Bellavista INTA	6	1966	NA	47.67	0.9456	NA	NA	NA	NA
P 152	Bellavista INTA	7	1966	34.16	33.21	0.9417	0.9857978	-0.4642716	2.E-01	4.E-05
P 152	Bellavista INTA	9	1967	104.31	103.09	0.9458	1.038076	-5.1961664	9.E-01	3.E-05
P 222	Las Breñas INTA	7	1995	11.04	11.11	0.9144	1.5193424	-5.6684641	7.E-02	4.E-04
Las breñas apa	Las Breñas INTA	8	1995	2.00	5.94	0.9229	0.8172269	4.3022773	1.E-02	2.E-04
La Tigra APA	Pampa del infierno APA	3	1960	NA	113.75	0.7190	NA	NA	NA	NA
Quitilipi APA	Pampa del infierno APA	4	1960	NA	99.75	0.7714	NA	NA	NA	NA
Quitilipi APA	Pampa del infierno APA	4	1976	NA	99.75	0.7714	NA	NA	NA	NA
Florencia	Pampa del infierno APA	5	1976	NA	39.67	0.7409	NA	NA	NA	NA
P 342	Pampa del infierno APA	6	1976	2.30	6.63	0.7893	1.1727554	3.9291597	8.E-02	9.E-06
P 233	Pampa del infierno APA	1	1979	84.16	75.49	0.7195	0.875983	1.7691829	2.E-01	7.E-01
Gancedo APA	Santa Sylvina APA	4	1976	NA	113.18	0.7768	NA	NA	NA	NA
San Bernardo APA	Santa Sylvina APA	5	1976	6.00	13.15	0.7388	0.5949217	9.5846845	8.E-01	4.E-06
Gancedo APA	Santa Sylvina APA	6	1976	NA	19.77	0.8309	NA	NA	NA	NA
Cacique Ariacaiquin	Santa Sylvina APA	7	1976	NA	15.08	0.8702	NA	NA	NA	NA
Ruta Provincial N 42 S	Santa Sylvina APA	8	1976	NA	18.94	0.8886	NA	NA	NA	NA
Juan José Castelli APA	Pampa del Indio APA	2	1981	0.00	33.00	0.6873	0.7111841	32.999014	5.E-03	2.E-01
Gral. San Martin APA	La Eduvigis APA	11	1982	308.00	239.89	0.6636	0.7029448	23.383887	5.E-01	6.E-01
P 304	La Eduvigis APA	12	1982	170.37	116.11	0.7277	0.8254328	-24.520195	2.E-03	7.E-02
P 304	La Eduvigis APA	12	1984	90.99	50.59	0.7277	0.8254328	-24.520195	1.E-03	7.E-02
P 102	La Eduvigis APA	1	1985	37.06	56.65	0.6637	0.921101	22.514641	8.E-01	2.E-01
Colonia Benítez INTA	La Eduvigis APA	6	1985	4.00	16.98	0.8305	0.7195755	14.102664	3.E-05	8.E-02
Colonia Benítez INTA	La Eduvigis APA	6	1988	32.70	37.63	0.8305	0.7195755	14.102664	1.E-05	7.E-02
Machagai APA	La Eduvigis APA	7	1988	6.00	15.05	0.8953	1.8814855	3.7635843	3.E-04	2.E-01
Capitán Solari APA	La Eduvigis APA	8	1988	0.00	6.17	0.8374	0.9644014	6.1710426	4.E-01	8.E-02
Capitán Solari APA	La Eduvigis APA	8	1989	86.00	89.11	0.8374	0.9644014	6.1710426	4.E-01	7.E-02
Machagai APA	La Eduvigis APA	7	1990	67.00	129.82	0.8953	1.8814855	3.7635843	2.E-04	2.E-01
Machagai APA	La Eduvigis APA	7	1991	6.00	15.05	0.8953	1.8814855	3.7635843	2.E-03	2.E-01

P 287	La Eduvigis APA	9	2009	70.06	40.87	0.8311	0.8496675	-18.656975	6.E-01	1.E+00
Pampa del Indio APA	Juan José Castelli APA	5	2016	4.00	7.82	0.8425	0.463969	5.9615045	3.E-02	3.E-03
Makalle APA	Tacuruzal APA	2	1981	174.00	176.67	0.7655	0.8681254	25.619073	1.E-01	7.E-02
Las Garcitas APA	Tacuruzal APA	8	1988	0.00	4.99	0.8580	0.8172333	4.9931706	5.E-01	4.E-04
Quitilipi APA	Tacuruzal APA	7	1989	25.00	28.87	0.8704	1.0736976	2.0253131	2.E-01	3.E-07
Juan José Castelli APA	Colonia Unidas APA	8	2006	5.00	18.42	0.8559	1.3745159	11.545214	7.E-03	7.E-03
P 72	Ceres SMN	2	1967	93.12	92.14	0.9995	1.0048972	-1.4395622	3.E-01	1.E-05
P 55	Ceres SMN	7	1967	10.15	10.31	0.9997	1.0111949	0.0491087	4.E-01	2.E-02
P 98	Reconquista SMN	1	1960	51.81	62.78	0.9963	1.0217162	9.8489815	1.E-02	7.E-09
P 114	Reconquista SMN	2	1960	31.73	37.03	0.9992	1.0174307	4.7471698	2.E-02	3.E-06
P 114	Reconquista SMN	3	1960	22.37	24.16	0.9990	1.0102658	1.5605775	8.E-01	9.E-04
P 114	Reconquista SMN	4	1960	139.13	151.34	0.9996	1.0157263	10.022068	6.E-01	1.E-01
P 114	Reconquista SMN	5	1960	7.19	10.81	0.9987	1.0198607	3.4728413	2.E-03	2.E-09
P 98	Reconquista SMN	6	1960	108.78	109.46	0.9974	1.0175047	-1.2228768	1.E-03	1.E-08
P 114	Reconquista SMN	7	1960	122.67	123.49	0.9988	1.005609	0.1313792	6.E-06	2.E-05
P 98	Reconquista SMN	8	1960	31.03	30.83	0.9989	1.0182224	-0.7661584	5.E-07	1.E-08
P 114	Reconquista SMN	9	1960	45.10	42.43	0.9976	1.0150781	-3.3481399	7.E-02	5.E-05
P 114	Reconquista SMN	10	1960	236.41	242.18	0.9989	1.0144619	2.3510549	1.E-04	1.E-07
P 98	Reconquista SMN	11	1960	40.47	41.36	0.9988	1.0179952	0.166367	5.E-02	2.E-07
P 114	Reconquista SMN	12	1960	103.97	108.41	0.9992	1.014877	2.8979449	9.E-03	2.E-07
P 114	Reconquista SMN	3	1978	73.50	75.82	0.9990	1.0102658	1.5605775	9.E-01	6.E-04
P 114	Reconquista SMN	4	1978	43.18	53.88	0.9996	1.0157263	10.022068	6.E-01	9.E-02
P 114	Reconquista SMN	12	1985	25.81	29.09	0.9992	1.014877	2.8979449	7.E-03	1.E-07
P 301	Roque Sáenz SMN	10	1957	147.84	147.14	0.9868	1.0101063	-2.1971904	9.E-01	1.E-03
P 282	Roque Sáenz SMN	12	1988	230.12	229.67	0.9805	1.0123141	-3.2864909	1.E+00	1.E-05
P 77	Fortín Olmos	7	1973	25.22	17.30	0.8732	1.0226655	-8.4946815	6.E-03	4.E-01
P 60	Fortín Olmos	10	1974	39.25	20.89	0.8523	0.9941401	-18.12522	1.E-02	7.E-01
Margarita	Fortín Olmos	9	1978	NA	42.80	0.7660	NA	NA	NA	NA
P 60	Fortín Olmos	10	1978	170.39	151.27	0.8523	0.9941401	-18.12522	8.E-03	7.E-01
P 144	Fortín Olmos	11	1978	164.74	150.65	0.7461	0.7143505	32.966	1.E-02	5.E-01
P 164	Fortín Olmos	2	1979	125.90	127.37	0.7708	1.061299	-6.2445574	1.E-01	2.E-01
P 126	Fortín Olmos	3	1979	154.20	133.00	0.7001	0.8539347	1.3273842	4.E-02	4.E-01
Ruta Provincial N 42 S	Fortín Olmos	4	1979	NA	129.23	0.8327	NA	NA	NA	NA
Ruta Nacional N 11	Fortín Olmos	5	1979	NA	59.08	0.7941	NA	NA	NA	NA
Las Breñas INTA	Fortín Olmos	6	1979	42.10	56.78	0.8378	1.301861	1.9684246	2.E-02	2.E-03
P 77	Fortín Olmos	7	1979	16.28	8.15	0.8732	1.0226655	-8.4946815	5.E-03	4.E-01
Margarita	Fortín Olmos	8	1979	NA	30.97	0.7894	NA	NA	NA	NA
P 60	Fortín Olmos	10	1979	105.08	86.34	0.8523	0.9941401	-18.12522	1.E-02	7.E-01
P 144	Fortín Olmos	11	1979	73.27	85.31	0.7461	0.7143505	32.966	9.E-03	4.E-01

La sarita	Fortín Olmos	12	1979	207.50	171.19	0.8127	0.7353927	18.593841	4.E-01	8.E-02
P 126	Fortín Olmos	3	1980	64.79	56.65	0.7001	0.8539347	1.3273842	4.E-02	4.E-01
Ruta Provincial N 42 S	Fortín Olmos	4	1980	NA	129.23	0.8327	NA	NA	NA	NA
Margarita	Fortín Olmos	8	1980	NA	30.97	0.7894	NA	NA	NA	NA
P 77	Fortín Olmos	7	1984	35.21	27.51	0.8732	1.0226655	-8.4946815	3.E-03	4.E-01
Margarita	Fortín Olmos	8	1984	NA	30.97	0.7894	NA	NA	NA	NA
Margarita	Fortín Olmos	9	1984	NA	42.80	0.7660	NA	NA	NA	NA
P 60	Fortín Olmos	10	1984	196.45	177.17	0.8523	0.9941401	-18.12522	1.E-02	7.E-01
P 144	Fortín Olmos	11	1984	162.74	149.22	0.7461	0.7143505	32.966	6.E-03	4.E-01
La sarita	Fortín Olmos	12	1984	41.00	48.74	0.8127	0.7353927	18.593841	4.E-01	7.E-02
Ruta Nacional N 11	Fortín Olmos	5	1985	134.50	110.75	0.7941	0.8549679	-4.2426253	9.E-02	1.E-01
Charata APA	Florencia	7	1986	38.00	88.71	0.8791	2.1992768	5.1347021	3.E-03	8.E-01
Florencia	Escuela 1256	10	1987	25.00	44.59	0.8016	1.004697	19.467652	2.E-01	5.E-01
Florencia	Escuela 1256	11	1987	139.50	153.47	0.9010	0.9843065	16.162538	3.E-01	8.E-01
Santa Sylvina APA	Escuela 1256	12	1987	133.00	175.32	0.7728	1.2690757	6.5320607	2.E-01	4.E-01
Bellavista INTA	Escuela 1256	1	1988	113.80	116.19	0.7081	0.8112276	23.8769	2.E-01	2.E-01
Ruta Nacional N 11	Escuela 1256	2	1988	NA	146.09	0.7705	NA	NA	NA	NA
P 135	Escuela 1256	3	1988	130.19	145.16	0.6040	0.6541507	60.000871	3.E-02	3.E-02
P 100	Escuela 1256	4	1988	18.84	47.38	0.8509	1.1064684	26.53522	2.E-03	3.E-02
Resistencia Aero SMN	Escuela 1256	5	1988	4.60	15.21	0.8794	0.9134337	11.006015	8.E-01	5.E-02
Ruta Provincial N 88 S	Escuela 1256	6	1988	9.00	21.76	0.8410	0.8667306	13.963008	7.E-01	3.E-01
P 150	Escuela 1256	7	1988	14.01	10.75	0.8598	0.863397	-1.3484767	8.E-03	7.E-01
P 222	Escuela 1256	8	1988	1.65	11.29	0.8508	2.4535298	7.2380639	5.E-01	2.E-01
P 118	Escuela 1256	9	1988	87.37	75.99	0.6837	0.8148898	4.7907128	3.E-03	6.E-01
Florencia	Escuela 1256	10	1988	26.00	45.59	0.8016	1.004697	19.467652	2.E-01	4.E-01
Florencia	Escuela 1256	11	1988	76.00	90.97	0.9010	0.9843065	16.162538	3.E-01	7.E-01
Santa Sylvina APA	Escuela 1256	12	1988	104.00	138.52	0.7728	1.2690757	6.5320607	2.E-01	4.E-01
Ruta Provincial N 88 S	Escuela 1256	6	1989	104.50	104.54	0.8410	0.8667306	13.963008	6.E-01	3.E-01
P 150	Escuela 1256	7	1989	46.98	39.21	0.8598	0.863397	-1.3484767	5.E-03	6.E-01
P 222	Escuela 1256	8	1989	9.20	29.81	0.8508	2.4535298	7.2380639	4.E-01	3.E-01
P 118	Escuela 1256	9	1989	24.65	24.88	0.6837	0.8148898	4.7907128	3.E-03	5.E-01
Florencia	Escuela 1256	10	1989	224.00	244.52	0.8016	1.004697	19.467652	1.E-01	4.E-01
Florencia	Escuela 1256	11	1989	51.00	66.36	0.9010	0.9843065	16.162538	4.E-01	7.E-01



Santa Sylvina APA	Escuela 1256	12	1989	199.00	259.08	0.7728	1.2690757	6.5320607	2.E-01	3.E-01
Ruta Nacional N 11	Escuela 1256	2	1992	96.50	91.98	0.7705	0.9726786	-1.8841019	1.E-01	8.E-01
Santa Sylvina APA	Escuela 1256	12	2018	NA	153.97	0.7728	NA	NA	NA	NA
Ruta Nacional N 11	Escuela 1256	2	2019	75.00	71.07	0.7705	0.9726786	-1.8841019	9.E-02	8.E-01
P 181	Ruta Nacional N 11	1	1976	230.95	277.88	0.8556	1.1830292	4.6558882	6.E-01	9.E-01
Bellavista INTA	Ruta Nacional N 11	2	1976	88.50	92.94	0.8471	0.9049343	12.853926	2.E-01	5.E-01
P 149	Ruta Nacional N 11	3	1976	228.81	208.21	0.7938	0.7690517	32.243948	2.E-01	6.E-01
P 135	Ruta Nacional N 11	4	1976	78.25	102.42	0.8773	1.1804992	10.0489	6.E-02	3.E-01
Bellavista INTA	Ruta Nacional N 11	5	1976	16.50	20.78	0.8435	0.8673791	6.470836	5.E-03	3.E-04
P 164	Ruta Nacional N 11	6	1976	6.52	8.33	0.9163	1.211141	0.4365719	1.E-05	4.E-03
P 134	Ruta Nacional N 11	7	1976	3.25	2.38	0.8336	0.9247787	-0.6227545	3.E-04	3.E-05
P 177	Ruta Nacional N 11	8	1976	7.75	18.62	0.9211	1.2185697	9.171914	4.E-02	5.E-01
P 133	Ruta Nacional N 11	9	1976	44.89	40.08	0.8868	1.200662	-13.82203	4.E-02	9.E-01
P 133	Ruta Nacional N 11	10	1976	99.56	114.77	0.8810	1.1786486	-2.5717297	8.E-03	3.E-01
Bellavista INTA	Ruta Nacional N 11	11	1976	57.40	69.92	0.8581	0.9135636	17.478701	4.E-05	3.E-01
P 152	Ruta Nacional N 11	12	1976	193.22	190.57	0.8562	0.8462222	27.065703	2.E-01	3.E-02
P 181	Ruta Nacional N 11	1	1979	81.75	101.37	0.8556	1.1830292	4.6558882	5.E-01	9.E-01
Bellavista INTA	Ruta Nacional N 11	2	1979	122.30	123.53	0.8471	0.9049343	12.853926	1.E-01	5.E-01
P 149	Ruta Nacional N 11	3	1979	167.42	161.00	0.7938	0.7690517	32.243948	3.E-01	7.E-01
P 135	Ruta Nacional N 11	4	1979	68.95	91.44	0.8773	1.1804992	10.0489	5.E-02	3.E-01
Bellavista INTA	Ruta Nacional N 11	5	1979	26.80	29.72	0.8435	0.8673791	6.470836	3.E-03	2.E-04
P 164	Ruta Nacional N 11	6	1979	24.81	30.48	0.9163	1.211141	0.4365719	6.E-06	3.E-03
P 134	Ruta Nacional N 11	7	1979	22.16	19.87	0.8336	0.9247787	-0.6227545	2.E-04	2.E-05
P 177	Ruta Nacional N 11	8	1979	11.07	22.66	0.9211	1.2185697	9.171914	3.E-02	4.E-01
P 133	Ruta Nacional N 11	9	1979	114.26	123.37	0.8868	1.200662	-13.82203	3.E-02	9.E-01
P 133	Ruta Nacional N 11	10	1979	195.37	227.70	0.8810	1.1786486	-2.5717297	6.E-03	3.E-01
Bellavista INTA	Ruta Nacional N 11	11	1979	203.60	203.48	0.8581	0.9135636	17.478701	2.E-05	3.E-01
P 152	Ruta Nacional N 11	12	1979	149.66	153.71	0.8562	0.8462222	27.065703	2.E-01	3.E-02
Bellavista INTA	Ruta Nacional N 11	11	1987	227.30	225.13	0.8581	0.9135636	17.478701	2.E-05	2.E-01
P 152	Ruta Nacional N 11	12	1987	96.53	108.75	0.8562	0.8462222	27.065703	2.E-01	3.E-02
P 181	Ruta Nacional N 11	1	1988	152.71	185.32	0.8556	1.1830292	4.6558882	5.E-01	9.E-01
Bellavista INTA	Ruta Nacional N 11	2	1988	63.50	70.32	0.8471	0.9049343	12.853926	1.E-01	4.E-01
Bellavista INTA	Ruta Nacional N 11	5	1988	9.00	14.28	0.8435	0.8673791	6.470836	2.E-03	1.E-04

Ruta Provincial N 42 S	La sarita	1	1982	NA	145.36	0.8610	NA	NA	NA	NA
Ruta Provincial N 42 S	La sarita	2	1982	NA	163.81	0.7695	NA	NA	NA	NA
P 163	La sarita	3	1982	24.85	48.73	0.8602	0.8340559	28.003865	1.E-01	8.E-01
Ruta Provincial N 42 S	La sarita	4	1982	NA	151.21	0.9121	NA	NA	NA	NA
Ruta Provincial N 88 S	La sarita	5	1982	NA	64.56	0.8766	NA	NA	NA	NA
Ruta Provincial N 88 S	La sarita	6	1982	NA	37.22	0.9367	NA	NA	NA	NA
P 145	La sarita	7	1982	5.51	10.05	0.8223	1.0958681	4.0074043	8.E-02	5.E-07
Ruta Provincial N 42 S	La sarita	8	1982	NA	34.30	0.9725	NA	NA	NA	NA
P 99	La sarita	9	1982	145.26	132.28	0.8592	0.9106167	0.00036	1.E-03	5.E-02
P 111	La sarita	10	1982	32.85	50.22	0.8240	0.8008364	23.909997	4.E-05	6.E-03
Ruta Provincial N 42 S	La sarita	11	1982	NA	141.52	0.8368	NA	NA	NA	NA
Ruta Provincial N 42 S	La sarita	12	1982	NA	145.50	0.9229	NA	NA	NA	NA
Ruta Provincial N 42 S	La sarita	1	1983	NA	145.36	0.8610	NA	NA	NA	NA
Ruta Provincial N 42 S	La sarita	2	1983	NA	163.81	0.7695	NA	NA	NA	NA
P 163	La sarita	3	1983	180.44	178.50	0.8602	0.8340559	28.003865	9.E-02	8.E-01
Ruta Provincial N 42 S	La sarita	4	1983	NA	151.21	0.9121	NA	NA	NA	NA
Ruta Provincial N 88 S	La sarita	5	1983	51.00	51.99	0.8766	1.0080991	0.5748401	1.E-01	8.E-02
Ruta Provincial N 88 S	La sarita	6	1983	30.00	28.54	0.9367	0.9381387	0.3930808	5.E-04	4.E-02
P 145	La sarita	7	1983	71.63	82.50	0.8223	1.0958681	4.0074043	6.E-02	3.E-07
Ruta Provincial N 42 S	La sarita	8	1983	NA	34.30	0.9725	NA	NA	NA	NA
P 99	La sarita	9	1983	44.28	40.32	0.8592	0.9106167	0.00036	5.E-03	4.E-02
P 111	La sarita	10	1983	134.41	131.55	0.8240	0.8008364	23.909997	2.E-05	4.E-03
Ruta Provincial N 42 S	La sarita	11	1983	NA	141.52	0.8368	NA	NA	NA	NA

Ruta Provincial N 42 S	La sarita	12	1983	NA	145.50	0.9229	NA	NA	NA	NA
Ruta Provincial N 42 S	La sarita	1	1984	NA	145.36	0.8610	NA	NA	NA	NA
Ruta Provincial N 42 S	La sarita	2	1984	NA	163.81	0.7695	NA	NA	NA	NA
P 163	La sarita	3	1984	237.09	225.75	0.8602	0.8340559	28.003865	9.E-02	8.E-01
Ruta Provincial N 42 S	La sarita	4	1984	NA	151.21	0.9121	NA	NA	NA	NA
Ruta Provincial N 88 S	La sarita	5	1984	13.00	13.68	0.8766	1.0080991	0.5748401	1.E-01	6.E-02
Ruta Provincial N 88 S	La sarita	6	1984	31.50	29.94	0.9367	0.9381387	0.3930808	3.E-04	3.E-02
P 145	La sarita	7	1984	28.29	35.01	0.8223	1.0958681	4.0074043	1.E-01	2.E-07
Ruta Provincial N 42 S	La sarita	8	1984	NA	34.30	0.9725	NA	NA	NA	NA
Ruta Provincial N 88 S	La sarita	6	1987	NA	36.84	0.9367	NA	NA	NA	NA
Ruta Provincial N 88 S	Ruta Provincial N 42 S	7	1992	45.00	49.15	0.9174	1.010827	3.6624981	1.E-08	5.E-03
P 77	Ruta Provincial N 88 S	4	1986	353.33	474.06	0.8992	1.2363668	37.219271	9.E-01	1.E-01
P 77	Ruta Provincial N 88 S	5	1986	89.73	85.98	0.8888	0.8349045	11.060978	4.E-02	4.E-01
P 77	Ruta Provincial N 88 S	5	1987	30.16	36.24	0.8888	0.8349045	11.060978	6.E-02	3.E-01
P 130	Ruta Provincial N 88 S	6	1987	8.61	4.03	0.9574	1.0852694	-5.3117782	1.E-01	7.E-01
P 128	Ruta Provincial N 88 S	3	1988	223.18	212.29	0.9011	0.8558244	21.283798	3.E-02	9.E-01
P 77	Ruta Provincial N 88 S	4	1988	0.00	37.22	0.8992	1.2363668	37.219271	7.E-01	9.E-02
P 77	Ruta Provincial N 88 S	5	1988	0.00	11.06	0.8888	0.8349045	11.060978	5.E-02	2.E-01
Margarita	Ruta Provincial N 88 S	8	1988	NA	38.64	0.9338	NA	NA	NA	NA
P 79	Ruta Provincial N 88 S	1	2017	NA	149.97	0.8981	NA	NA	NA	NA
P 67	Margarita	1	1986	121.65	70.32	0.9066	1.0483124	-57.20567	2.E-01	6.E-02
Malvinas Sur	Margarita	2	1986	115.00	144.75	0.7838	0.9008485	41.147937	4.E-01	5.E-01
P 43	Margarita	3	1986	105.10	91.16	0.8543	0.9926209	-13.163565	4.E-02	2.E-02
Pueblo libertador	Margarita	4	1986	466.00	333.85	0.9016	0.6435999	33.933388	4.E-01	6.E-03
Pueblo libertador	Margarita	5	1986	115.00	92.20	0.8893	0.8426046	-4.7028633	1.E-02	4.E-01
P 65	Margarita	6	1986	164.71	99.48	0.8138	0.5699751	5.6023693	2.E-02	3.E-01

P 49	Margarita	7	1986	32.27	17.35	0.8182	0.6267049	-2.8736353	1.E-02	8.E-02
P 16	Margarita	8	1986	52.55	27.10	0.9664	0.6030514	-4.586643	5.E-01	7.E-01
Pueblo libertador	Margarita	9	1986	100.00	72.89	0.7998	0.5885116	14.036253	8.E-01	1.E+00
P 67	Margarita	1	1987	139.07	88.58	0.9066	1.0483124	-57.20567	1.E-01	4.E-02
Malvinas Sur	Margarita	2	1987	46.00	82.59	0.7838	0.9008485	41.147937	3.E-01	6.E-01
P 43	Margarita	3	1987	270.85	255.69	0.8543	0.9926209	-13.163565	3.E-02	2.E-02
Pueblo libertador	Margarita	4	1987	NA	150.49	0.9016	NA	NA	NA	NA
Pueblo libertador	Margarita	5	1987	NA	56.47	0.8893	NA	NA	NA	NA
P 65	Margarita	6	1987	9.39	10.95	0.8138	0.5699751	5.6023693	5.E-02	3.E-01
P 16	Margarita	8	1987	49.85	25.48	0.9664	0.6030514	-4.586643	4.E-01	7.E-01
Pueblo libertador	Margarita	9	1987	14.00	22.28	0.7998	0.5885116	14.036253	9.E-01	9.E-01
P 43	Margarita	10	1987	32.02	16.44	0.8466	1.3003651	-25.200998	8.E-03	9.E-01
P 180	Margarita	11	1987	314.41	348.60	0.8455	1.2479284	-43.756806	2.E-01	4.E-01
P 83	Margarita	12	1987	69.58	81.41	0.8943	1.2433779	-5.1079824	7.E-02	2.E-03
P 67	Margarita	1	1988	393.16	354.95	0.9066	1.0483124	-57.20567	1.E-01	2.E-02
Malvinas Sur	Margarita	2	1988	14.00	53.76	0.7838	0.9008485	41.147937	3.E-01	6.E-01
Pueblo libertador	Margarita	4	1988	14.00	42.94	0.9016	0.6435999	33.933388	5.E-01	4.E-03
Pueblo libertador	Margarita	5	1988	21.00	12.99	0.8893	0.8426046	-4.7028633	1.E-02	4.E-01
P 65	Margarita	6	1988	24.80	19.74	0.8138	0.5699751	5.6023693	3.E-02	2.E-01
P 49	Margarita	7	1988	20.96	10.26	0.8182	0.6267049	-2.8736353	9.E-03	8.E-02
P 16	Margarita	8	1988	66.49	35.51	0.9664	0.6030514	-4.586643	4.E-01	7.E-01
Pueblo libertador	Margarita	9	1988	97.00	71.12	0.7998	0.5885116	14.036253	8.E-01	9.E-01
P 43	Margarita	10	1988	48.48	37.84	0.8466	1.3003651	-25.200998	5.E-03	1.E+00
P 180	Margarita	11	1988	81.60	58.07	0.8455	1.2479284	-43.756806	3.E-01	4.E-01
P 83	Margarita	12	1988	88.09	104.42	0.8943	1.2433779	-5.1079824	5.E-02	1.E-03
P 67	Margarita	1	1989	154.95	105.23	0.9066	1.0483124	-57.20567	2.E-01	1.E-02
Malvinas Sur	Margarita	2	1989	60.00	95.20	0.7838	0.9008485	41.147937	2.E-01	6.E-01
P 43	Margarita	3	1989	166.91	152.51	0.8543	0.9926209	-13.163565	5.E-02	2.E-02
Pueblo libertador	Margarita	4	1989	239.00	187.75	0.9016	0.6435999	33.933388	4.E-01	3.E-03
Pueblo libertador	Margarita	5	1989	27.00	18.05	0.8893	0.8426046	-4.7028633	8.E-03	3.E-01
P 65	Margarita	6	1989	47.55	32.70	0.8138	0.5699751	5.6023693	2.E-02	2.E-01
P 49	Margarita	7	1989	16.31	7.35	0.8182	0.6267049	-2.8736353	5.E-03	8.E-02
P 16	Margarita	8	1989	77.84	42.35	0.9664	0.6030514	-4.586643	4.E-01	6.E-01
Pueblo libertador	Margarita	9	1989	0.00	14.04	0.7998	0.5885116	14.036253	9.E-01	9.E-01
P 43	Margarita	10	1989	98.69	103.13	0.8466	1.3003651	-25.200998	3.E-03	1.E+00
P 180	Margarita	11	1989	81.41	57.84	0.8455	1.2479284	-43.756806	2.E-01	4.E-01
P 83	Margarita	12	1989	116.62	139.89	0.8943	1.2433779	-5.1079824	4.E-02	9.E-04
P 67	Margarita	1	1990	98.55	46.11	0.9066	1.0483124	-57.20567	2.E-01	7.E-03

Malvinas Sur	Margarita	2	1990	111.00	141.14	0.7838	0.9008485	41.147937	2.E-01	6.E-01
P 43	Margarita	3	1990	285.89	270.62	0.8543	0.9926209	-13.163565	4.E-02	1.E-02
Pueblo libertador	Margarita	4	1990	317.00	237.95	0.9016	0.6435999	33.933388	4.E-01	2.E-03
Pueblo libertador	Margarita	5	1990	41.00	29.84	0.8893	0.8426046	-4.7028633	5.E-03	2.E-01
P 65	Margarita	6	1990	29.63	22.49	0.8138	0.5699751	5.6023693	2.E-02	1.E-01
P 49	Margarita	7	1990	43.49	24.38	0.8182	0.6267049	-2.8736353	3.E-03	7.E-02
P 16	Margarita	8	1990	20.87	8.00	0.9664	0.6030514	-4.586643	4.E-01	6.E-01
Pueblo libertador	Margarita	9	1990	54.00	45.82	0.7998	0.5885116	14.036253	8.E-01	8.E-01
P 43	Margarita	10	1990	223.50	265.43	0.8466	1.3003651	-25.200998	2.E-03	1.E+00
P 180	Margarita	11	1990	132.29	121.33	0.8455	1.2479284	-43.756806	2.E-01	3.E-01
P 83	Margarita	12	1990	187.29	227.76	0.8943	1.2433779	-5.1079824	3.E-02	6.E-04
P 49	Margarita	7	1991	66.83	39.01	0.8182	0.6267049	-2.8736353	3.E-03	6.E-02
P 16	Margarita	8	1991	18.59	6.62	0.9664	0.6030514	-4.586643	4.E-01	5.E-01
P 83	Malvinas Sur	3	1979	172.84	160.65	0.8257	0.9846099	-9.5269219	2.E-01	2.E-03
P 62	Malvinas Sur	4	1979	60.18	93.96	0.8431	1.0663019	29.792992	2.E-01	2.E-07
Margarita	Malvinas Sur	5	1979	NA	72.59	0.8188	NA	NA	NA	NA
P 65	Malvinas Sur	6	1979	16.19	20.14	0.9141	0.9957454	4.0153506	4.E-01	2.E-01
Pueblo libertador	Malvinas Sur	7	1979	NA	36.02	0.8882	NA	NA	NA	NA
Ruta Provincial N 42 S	Malvinas Sur	8	1979	NA	44.13	0.9572	NA	NA	NA	NA
P 66	Malvinas Sur	12	2018	NA	132.07	0.8567	NA	NA	NA	NA
Paso Junce	Pueblo libertador	10	1986	50.00	59.48	0.9077	0.9489935	12.02865	4.E-02	2.E-02
P 32	Pueblo libertador	11	1986	227.40	195.70	0.8731	0.7019003	36.085264	4.E-01	8.E-01
Paso Junce	Pueblo libertador	12	1986	32.00	50.68	0.9535	0.8678104	22.907044	2.E-01	1.E+00
Paso Junce	Pueblo libertador	1	1987	155.00	156.38	0.9136	0.6966642	48.398922	1.E-04	6.E-01
Paso Junce	Pueblo libertador	2	1987	89.00	94.53	0.7275	0.7074603	31.562856	2.E-01	5.E-01
P 65	Pueblo libertador	3	1987	283.63	261.54	0.8185	0.8332497	25.20541	5.E-02	4.E-03
Paso Junce	Pueblo libertador	4	1987	127.00	118.65	0.9731	1.1993676	-33.670906	4.E-02	4.E-01
Paso Junce	Pueblo libertador	5	1987	119.50	106.40	0.9017	0.7755044	13.729382	3.E-01	6.E-01
Margarita	Pueblo libertador	6	1987	NA	40.09	0.7412	NA	NA	NA	NA
Paso Junce	Pueblo libertador	7	1987	62.00	63.97	0.9103	0.9950359	2.2735461	2.E-01	8.E-03
Paso Junce	Pueblo libertador	8	1987	66.00	62.70	0.9295	0.9279895	1.4539848	4.E-02	2.E-02
Paso Junce	Pueblo libertador	1	1992	141.00	146.63	0.9136	0.6966642	48.398922	9.E-05	6.E-01
Paso Junce	Pueblo libertador	2	1992	109.00	108.68	0.7275	0.7074603	31.562856	2.E-01	4.E-01
P 65	Pueblo libertador	3	1992	159.71	158.28	0.8185	0.8332497	25.20541	8.E-02	3.E-03
Paso Junce	Pueblo libertador	7	1992	25.00	27.15	0.9103	0.9950359	2.2735461	3.E-01	6.E-03
P 15	Paso Junce	6	1976	27.19	25.04	0.8149	0.7005978	5.9924252	1.E-17	2.E-04
Pueblo libertador	Paso Junce	7	1979	NA	31.99	0.9103	NA	NA	NA	NA
Pueblo libertador	Paso Junce	8	1979	NA	44.80	0.9295	NA	NA	NA	NA
P 25	Paso Junce	2	1980	123.19	130.81	0.7606	0.9188122	17.621084	2.E-01	7.E-01
Pueblo libertador	Paso Junce	10	1981	NA	128.21	0.9077	NA	NA	NA	NA

Pueblo libertador	Paso Junce	11	1981	NA	146.54	0.8200	NA	NA	NA	NA
Pueblo libertador	Paso Junce	12	1981	NA	143.83	0.9535	NA	NA	NA	NA
P 15	Paso Junce	6	1983	5.10	9.57	0.8149	0.7005978	5.9924252	1.E-18	1.E-04
Pueblo libertador	Paso Junce	12	1983	NA	143.83	0.9535	NA	NA	NA	NA
P 16	Paso Junce	3	1985	78.44	102.75	0.8661	0.915441	30.941664	3.E-01	1.E-01
Pueblo libertador	Paso Junce	5	1988	21.00	20.94	0.9017	1.0484798	-1.0768921	9.E-03	4.E-01
Pueblo libertador	Paso Junce	10	1988	78.00	79.93	0.9077	0.8681821	12.212306	2.E-05	2.E-01
P 25	Paso Junce	2	1989	47.14	60.93	0.7606	0.9188122	17.621084	1.E-01	6.E-01
Pueblo libertador	Paso Junce	1	1991	126.00	117.62	0.9136	1.1980695	-33.335091	4.E-04	1.E-02
P 25	Paso Junce	2	1991	41.84	56.06	0.7606	0.9188122	17.621084	1.E-01	5.E-01
P 16	Paso Junce	3	1991	134.55	154.11	0.8661	0.915441	30.941664	3.E-01	9.E-02
Pueblo libertador	Paso Junce	4	1991	184.00	181.38	0.9731	0.7895976	36.092631	6.E-01	2.E-01
Pueblo libertador	Paso Junce	5	1991	108.00	112.16	0.9017	1.0484798	-1.0768921	6.E-03	3.E-01
P 15	Paso Junce	6	1991	183.01	134.21	0.8149	0.7005978	5.9924252	1.E-19	6.E-05
Pueblo libertador	Paso Junce	7	1991	51.00	45.53	0.9103	0.8327166	3.0635934	3.E-02	2.E-02
Pueblo libertador	Paso Junce	8	1991	21.50	24.34	0.9295	0.9309885	4.3188659	7.E-01	6.E-03
P 9	Paso Junce	9	1991	48.82	53.21	0.8382	0.930053	7.8060848	1.E-02	1.E+00
Pueblo libertador	Paso Junce	10	1991	187.00	174.56	0.9077	0.8681821	12.212306	1.E-05	1.E-01
Pueblo libertador	Paso Junce	11	1991	75.00	90.76	0.8200	0.7451091	34.879191	5.E-01	1.E-02
Pueblo libertador	Paso Junce	12	1991	351.00	357.72	0.9535	1.0476351	-10.003896	6.E-02	4.E-01
Pueblo libertador	Paso Junce	11	2016	105.00	113.12	0.8200	0.7451091	34.879191	6.E-01	1.E-02
Paso Junce	Cacique Ariacaiquin	5	1988	NA	53.56	0.7616	NA	NA	NA	NA
P 32	Cacique Ariacaiquin	10	1988	70.39	78.33	0.7609	0.8178889	20.758615	1.E-01	1.E-01
P 8	San justo	3	1989	141.57	135.18	0.8273	0.8533953	14.365551	5.E-01	1.E+00
P 59	San justo	4	1989	206.73	244.15	0.8457	1.0830291	20.257687	2.E-01	3.E-02
P 8	San justo	3	2010	231.51	211.94	0.8273	0.8533953	14.365551	5.E-01	1.E+00
Cacique Ariacaiquin	San justo	11	2012	83.00	91.35	0.7906	0.8261376	22.781619	1.E-04	4.E-01
El colorado INTA	El colorado RHN	1	1967	191.40	173.02	0.8887	0.9376658	-6.4497025	9.E-02	5.E-03
El colorado INTA	El colorado RHN	2	1967	131.50	126.22	0.9553	0.9582513	0.2114015	3.E-01	3.E-03
El colorado INTA	El colorado RHN	3	1967	167.60	158.74	0.9370	0.9468542	0.0497557	2.E-02	4.E-03
El colorado INTA	El colorado RHN	4	1967	34.80	37.43	0.8837	0.8909148	6.4276829	1.E-03	2.E-03
El colorado INTA	El colorado RHN	5	1967	77.10	71.46	0.9550	1.0017863	-5.7809316	8.E-01	6.E-06
El colorado INTA	El colorado RHN	6	1967	12.80	11.63	0.8641	0.8341041	0.9488076	2.E-05	2.E-06

El colorado INTA	El colorado RHN	7	1967	117.80	101.45	0.8475	0.8685962	-0.8728186	5.E-04	7.E-03
El colorado INTA	El colorado RHN	8	1967	20.50	18.83	0.8481	0.8813849	0.7645321	4.E-01	2.E-06
El colorado INTA	El colorado RHN	9	1967	30.30	26.94	0.9321	1.0134272	-3.7680426	1.E-01	5.E-06
El colorado INTA	El colorado RHN	10	1967	31.00	37.16	0.8479	0.9181052	8.7025677	6.E-01	4.E-05
El colorado INTA	El colorado RHN	11	1967	81.80	74.64	0.9060	0.9250914	-1.0333677	2.E-01	2.E-04
El colorado INTA	El colorado RHN	12	1967	52.50	44.05	0.8452	0.9244742	-4.4865958	2.E-01	2.E-03
El colorado INTA	El colorado RHN	8	1968	59.30	53.03	0.8481	0.8813849	0.7645321	4.E-01	1.E-06
El colorado INTA	El colorado RHN	9	1968	NA	48.92	0.9321	NA	NA	NA	NA
El colorado INTA	El colorado RHN	10	1968	NA	107.81	0.8479	NA	NA	NA	NA
El colorado INTA	El colorado RHN	4	1972	113.50	107.55	0.8837	0.8909148	6.4276829	8.E-04	1.E-03
El colorado INTA	El colorado RHN	5	1972	63.00	57.33	0.9550	1.0017863	-5.7809316	8.E-01	4.E-06
El colorado INTA	El colorado RHN	7	1972	11.80	9.38	0.8475	0.8685962	-0.8728186	4.E-03	5.E-03
El colorado INTA	El colorado RHN	3	1990	60.90	57.71	0.9370	0.9468542	0.0497557	2.E-02	3.E-03
El colorado INTA	El colorado RHN	7	1990	60.60	51.76	0.8475	0.8685962	-0.8728186	2.E-03	3.E-03
El colorado INTA	El colorado RHN	2	1992	140.70	135.04	0.9553	0.9582513	0.2114015	3.E-01	2.E-03
P 152	Bellavista INTA	9	1962	55.91	52.84	0.9458	1.0381	-5.1962	9.E-01	5.E-05
P 318	Roque Sáenz SMN	9	1967	23.62	26.24	0.9834	1.0362	1.7613	1.E-02	2.E-06
P 59	San justo	4	2010	35.10	58.27	0.8457	1.0830	20.2577	2.E-01	3.E-02
P 25	San justo	8	2005	15.60	15.27	0.8892	1.1271	2.3121	7.E-02	3.E-02

## Referencias Bibliográficas

- Abatzoglou, J.T., Dobrowski S.Z., Parks, S.A. y Hegewisch, K.C. (2018). Terraclimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958-2015. *Scientific Data*, 5, 170191. doi: 10.1038/sdata.2017.191
- Álvarez, C.A. (2020). *Áreas fuentes variables como proceso de generación de escorrentía dominante en zonas de llanura: identificación e incertidumbre en la modelación hidrológica* (Tesis de Maestría). Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina.
- Aragón, R., Jobágy, E.G. y Viglizzo, E.F. (2011). Surface and groundwater dynamics in the sedimentary plains of the Western Pampas (Argentina). *Ecohydrology*, 4, 433-337. doi: 10.1002/eco.149
- Bachmann, L., Daniele, C., Mereb, J. y Frassetto, A. (2007). Identificación expeditiva de los principales problemas ambientales en el ‘Gran Chaco’ argentino. Universidad de Buenos Aires, Argentina.
- Basán Nickisch M. (2011). *Informe Técnico: nueva perforación más el sistema de bombeo en el Área de Ganadería de la EEA Reconquista* (268). Recuperado de: [http://www.produccion-animal.com.ar/agua\\_bebida/268-perforacion\\_y\\_bombeo\\_1.pdf](http://www.produccion-animal.com.ar/agua_bebida/268-perforacion_y_bombeo_1.pdf)
- Basán Nickisch M. (2012, Marzo). Manejo eficiente del agua en los Bajos Submeridionales y su área de influencia. *2do Foro Regional del Agua: “Agua, gestión y desarrollo, aportes para la construcción del PEA en la región”*. Avellaneda.
- Basán Nickisch M., Lahite A., Sosa D., Sánchez L., y Tosolini R. (2017). Aguadas para ganadería bovina en los bajos submeridionales y áreas de influencia. *Revista FAVE - Ciencias Agrarias*, 16(1), 11-38.
- Betson, R.P. (1964). What Is Watershed Runoff?. *Journal of Geophysical Research*, 68(8), 1541-1552. doi: 10.1029/JZ069i008p01541
- Beven, K.J., y Kirkby, M.J. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology/Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. *Hydrological Sciences Journal*, 24(1), 43-69. doi: 10.1080/02626667909491834
- Beven, K.J. (2011). *Rainfall-runoff modelling: the primer*. Chichester: Jon Wiley y Sons Ltd.
- Bianchi, A.R. y Cravero S.A.C. (2010). Atlas climático digital de la república Argentina. *Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria INTA*.



- Boschetti, M., Nutini, F., Manfron, G., Brivio, P.A. y Nelson, A. (2014). Comparative Analysis of Normalised Difference Spectral Indices Derived from MODIS for Detecting Surface Water in Flooded Rice Cropping Systems. *Plos One*, 9(2): e88741. doi: 10.1371/journal.pone.0088741
- Boujon, P., Fernández, D.S., Trevisiol, S., Pereyra, F.X. y Gambandé, L. (2016, Septiembre). Hidrogeología de la Región Chaqueña de la República Argentina. *IX Congreso Argentino de Hidrogeología y VII Seminario Hispano-Latinoamericano Sobre Temas Actuales de la Hidrología Subterránea*. Catamarca.
- Brunetto, E., Kröhling, D. y Francisconi, C. (2014, Junio). La geomorfología de una región representativa de Pampa Norte y sur de la Mesopotamia en el contexto de los procesos endógenos. Aportes para el mapeo de áreas de llanura. *XIX Congreso Geológico Argentino*. Córdoba.
- Cabrera, A. (1994). Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería. Primera reimpresión. Tomo II. Regiones Fitogeografía Argentinas. Buenos Aires: ACME S.A.C.I.
- Campos, A.N., Schibber, E.F., y García, A.G. (2014). *Evaluación de la información satelital para el estudio de la dinámica hidrológica de la Llanura Pampeana*. Recuperado de: <https://www.ina.gob.ar/ifrh-2014/Eje3/3.11.pdf>.
- Chow, V.T., Maidment, D. R., Mays, L.W. y Saldarriaga J.C. (1994). *Hidrología Aplicada*. Santa Fe de Bogotá: McGraw-Hill Interamericana S.A.
- Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Madrid: Rialp S.A.
- Confederaciones Rurales Argentinas (CRA). (2019). Desafiar la próxima década: Lo que hay que hacer para recuperar los Bajos Submeridionales. Recuperado de: <http://www.cra.org.ar/nota/22418-desafiar-la-proxima-decada-lo-que-hay-que-hacer-para-recuperar-los-bajos-submeridionales/>
- Consejo Federal de Inversiones (CFI) y Provincia de Santa Fe. (2002). *Estudio de verificación del funcionamiento hídrico, Sistema Bajos Submeridionales subsistema A° Golondrinas –A° Calchaquí-Río salado*. Recuperado de: <http://biblioteca.cfi.org.ar/wp-content/uploads/sites/2/2002/01/44241.pdf>
- Cooley, S.S., Landerer, F.W., Humphrey, V., Reager, J.T., y Srinivasan, M.M. (2019). *Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) Follow-On (GRACE-FO) Level-3 Data Product User Handbook*.
- Correa, J.J., Volante, J. y Seghezzo, L. (2012). Análisis de la fragmentación y la estructura del paisaje en bosques nativos del norte argentino. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 16.

- Di Bella, C.M., Rebella, C.M., y Paruelo, J. M. (2000). Evapotranspiration estimates using NOAA AVHRR imagery in the Pampa region of Argentina. *International Journal of Remote Sensing*, 21(4), 791-797. doi: 10.1080/014311600210579
- Di Bella, C.M., Posse, G., Beget, M.E., Fischer, M.A., Mari, N. y Veron, S. (2008). La teledetección como herramienta para la prevención, seguimiento y evaluación de incendios e inundaciones. *Ecosistemas*, 17 (3): 39-52.
- Di Bella, C.M, Oricchio, P.A, Gusmerotti, L.A y Texeira, M. (2019). Actualización del algoritmo de estimación de la evapotranspiración real para el sensor VIIRS-Suomi NPP. *Ecología Austral*, 29, 428-432. doi: 10.25260/EA.19.29.3.0.887
- Didan, K. (2015). MOD13A2 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 1km SIN Grid V006. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. doi:10.5067/MODIS/MOD13A2.006. Recuperado el 2019-11-28.
- Dingman, S.L. (2015). *Physical hydrology*. Long Grove: Waveland Press Inc.
- Dunne, T., y Black, R.D. (1970). Partial area contributions to storm runoff in a small New England watershed. *Water Resources Research*, 6(5), 1296-1311. doi: 10.1029/WR006i005p01296
- Dunne, T. y Leopold, W.H. (1978). *Water in Environmental Planning*. New York: Freeman & Co.
- Equipo Técnico Interdisciplinario Bajos submeridionales ETIBS. (2019). Plan de Manejo Integral de los Bajos Submeridionales Santafesinos. Equipo editorial, dirección y organización: Vanesa Soto, Mario Basán, Germán Castro y Ricardo Biasatti.
- Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH) y Ministerio de Infraestructura, Servicios Públicos y Hábitat de la provincia de Santa Fe (MISPHsf). (2006). *Implementación de un Sistema de Alerta Hidrológico para la Cuenca del río Salado. Informe Final*.
- Farr, T.G., Rosen, P.A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D. y Alsdorf, D.E. (2007). The shuttle radar topography mission. *Reviews of Geophysics*, 45, RG2004. doi: 10.1029/2005RG000183
- Ferral, A., Luccini, E., Aleksinkó, A., y Scavuzzo, C.M. (2019). Flooded-area satellite monitoring within a Ramsar wetland Nature Reserve in Argentina. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 15, 100230. doi: 10.1016/j.rsase.2019.04.003
- Fertonani M. y Prendes, H. (1984). Sistemas hidrológicos no típicos. Anales del Congreso del agua Olavarria, Vol 1, 203-207.
- Fertonani M. y Scioli, C. (2004). *Evaluación del comportamiento de las variables hidrológicas de sistemas hidrológicos no típicos (área bajos submeridionales), con*

*la implementación de obras de sistematización a nivel predial, tendiente al manejo de los déficits y excedentes hídricos.* Inédito.

- Frankenberger, J.R., Brooks, E.S., Walter, M.T., Walter, M.F. y Steenhuis, T.S. (1999). A GIS-based variable source area hydrology model. *Hydrological Processes*, 13, 805-822. doi: doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(19990430)13:6%3C805::AID-HYP754%3E3.0.CO;2-M
- Fundación Vida Silvestre Argentina (FVSA) y Fundación para el Desarrollo en Justicia y Paz (FUNDAPAZ). (2007). *Zonificación de los Bajos Submeridionales del Norte Santafesino. Una Herramienta para la Planificación del Desarrollo Productivo y la Conservación de la Biodiversidad del Humedal.* Recuperado de: <https://ecodes.org/docs/cooperacion/Zonificacion.pdf>
- Gao, B.C. (1996). NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 257-266. doi: 10.1016/S0034-4257(96)00067-3
- García, A.G., Campos, A. N., Di Bella, C.M., y Posse Beaulieu, G. (2013). *Evolución de la evapotranspiración en diferentes coberturas vegetales de la Argentina utilizando productos derivados del sensor MODIS.* Recuperado de: [https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta\\_\\_resumen\\_expandido\\_garcia\\_alfredo.pdf](https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta__resumen_expandido_garcia_alfredo.pdf)
- García, P.E., Badano, N.D., Menéndez, A.N., Bert, F., García, G., Podestá, G., Rovere, S., Verdin, A., Rajagopalan, B. y Arora, P. (2018). Influencia de los cambios en el uso del suelo y la precipitación sobre la dinámica hídrica de una cuenca de llanura extensa. Caso de estudio: Cuenca del Río Salado, Buenos Aires, Argentina. *Ribagua*, 5(2), 92-106. doi: 10.1080/23863781.2018.1495990
- Giraut, M., Laboranti, E., Rey, C., Fioriti, M. y Ludueña, S. (2001, Octubre). Cuenca propia de los bajos submeridionales, creación de una unidad hídrica independiente. *Seminario Internacional sobre manejo integral de cuencas hidrográficas.* Rosario.
- Gioria R. (2002). Sistema Bajos Submeridionales - Subsistema A°. Golondrinas – A° Calchaquí – Río Salado. Estudio de verificación del funcionamiento hídrico. Convenio Consejo Federal de Inversiones-Provincia de Santa Fe.
- Guevara-Ochoa, C., Medina-Sierra, A. y Vives, L. (2020). Spatio-temporal effect of climate change on water balance and interactions between groundwater and surface water in plains. *Science of the Total Environment*, 722 (137886). doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137886
- Gupta, R. S. (2016). *Hydrology and hydraulic systems.* Long Grove: Waveland Press Inc.
- Harris, I., Osborn, T.J., Jones, P., y Lister, D. (2020). Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Scientific data*, 7, 1-18. doi: 10.1038/s41597-020-0453-3

- Hu, G., Jia, L., y Menenti, M. (2015). Comparison of MOD16 and LSA-SAF MSG evapotranspiration products over Europe for 2011. *Remote Sensing of Environment*, 156, 510-526. doi: 10.1016/j.rse.2014.10.017
- HRL (2020). Nonparametric Standardized Precipitation Index SPI. MATLAB Central File Exchange. Recuperado de: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/51080-nonparametric-standardized-precipitation-index-spi>, 2018-10-30.
- Instituto Nacional del Agua (INA) y Consejo Federal de Inversiones (CFI). (2017). *Recopilación, análisis y clasificación de información y confección de un Sistema de Información Geográfica SIG en Bajos Submeridionales área provincia de Santa Fe*.
- Instituto Nacional del Agua (INA) y Servicio Provincial de Agua Rural (SPAR). (2002). *Recopilación de información hidrogeológica de la provincia de Santa Fe*. Inédito.
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria INTA-Las Breñas. (2009). Parámetros climáticos. Estación Meteorológica EEA INTA Las Breñas.
- Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI). (2014). Capacitación en tecnologías de acceso al agua subterránea a través de métodos manuales en la localidad Las Breñas (Depto. 9 de Julio) Provincia de Chaco. Coordinadores Gómez Godoy et al.
- Iriondo, M.H. (1987). Geomorfología y Cuaternario de Santa Fe. *D'Orbignyana*, 4, 1-54.
- Iriondo, M. (1990). Map of the South American plains - its present state. En: Rabassa, J. (Ed.), *Quaternary of South America and Antarctic Peninsula* (6: 297-308). Rotterdam: A.A. Balkema Publ.
- Iriondo, M.H. (2007). El Chaco Santafecino Neógeno y Geomorfología. *Comunicaciones del Museo Provincial de Ciencias Naturales "Florentino Ameghino"*, 13(1), 1-31.
- Iriondo, M.H. (2010). Geología del Cuaternario de Argentina. *Museo Provincial de Ciencias Naturales Florentino Ameghino, Santa Fe*.
- Iriondo, M.H. (2011). Aguas Subterráneas de Santa Fe. *Museo Florentino Ameghino, Santa Fe*.
- Ji, L., Zhang, L., y Wylie, B. (2009). Analysis of dynamic thresholds for the normalized difference water index. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 75(11), 1307-1317. doi: 10.14358/PERS.75.11.1307
- Jones, K. L., Poole, G.C., O'Daniel, S. J., Mertes, L.A., y Stanford, J.A. (2008). Surface hydrology of low-relief landscapes: Assessing surface water flow impedance using LIDAR-derived digital elevation models. *Remote Sensing of Environment*, 112(11), 4148-4158. doi: 10.1016/j.rse.2008.01.024

- Kovacs, G. (1978). Hydrology and water control on large plains/Hydrologie et contrôle des eaux sur les grandes plaines. *Hydrological Sciences Journal*, 23(3), 305-332. doi:10.1080/02626667809491807
- Krepper, C.M. y Zucarelli, G.V. (2010). Climatology of water excesses and shortages in the La Plata Basin. *Theor Appl Climatol*, 102, 13-27. doi: 10.1007/s00704-009-0234-6
- Kröhling, D. e Iriondo, M.H. (2003). El loess de la Pampa Norte en el Bloque de San Guillermo. *Revista de la Asociación Argentina de Sedimentología*, 10(2), 137-150.
- Kruse, E., Forte Lay, J.A., Aiello, J.L., Basualdo, A. y Heinzenknecht, G. (2001) Hydrological Processes on Large Flatlands. Case Study: Northwest region of Buenos Aires Province (Argentina). *International Association of Hydrological Sciences (IAHS)*, 267, 531-536.
- Kruse, E., y Zimmermann, E.D. (2002). *Hidrogeología de grandes llanuras. Particularidades en la llanura pampeana (Argentina)*. Recuperado de: <https://www.fceia.unr.edu.ar/curiham/Publicaciones/WORKSH~1.pdf>
- Lacaux, J.P., Tourre, Y.M., Vignolles, C., Ndione, J.A. y Lafaye, M. (2007). Classification of ponds from high-spatial resolution remote sensing: Application to Rift Valley Fever epidemics in Senegal. *Remote Sensing of Environment*, 106 (1), 66-74. doi: 10.1016/j.rse.2006.07.012.
- Landerer, F.W. y Swenson, S.C. (2012). Accuracy of scaled GRACE terrestrial water storage estimates. *Water resources research*, 48, 1-11. doi: 10.1029/2011WR011453
- Lettenmaier, D.P., Alsdorf, D., Dozier, J., Huffman, G.J., Pan, M., y Wood, E.F. (2015). Inroads of remote sensing into hydrologic science during the WRR era. *Water Resources Research*, 51(9), 7309-7342. doi:10.1002/2015WR017616
- Lewis J.P., Pire, E.F., Prado, D.E, Stofella, S.L., Franceschi, E.A. y Carnevale, N.J. (1990a). Plant communities and phytogeographical position of a large depression in the Great Chaco, Argentina. *Vegetatio*, 86 (1), 25-38.
- Lewis J.P., Stofella, S.L., Pire, E.F., Franceschi, E.A., Carnevale, N.J y Prado, D.E. (1990b). Dynamics and development of floristic richness in the vegetation of a large depressed área of the Great Chaco. *Flora*, 184, 63-77. doi: 10.1016/S0367-2530(17)31590-6
- Li, L., Vrieling, A., Skidmore, A., Wang, T., Muñoz, A.R. y Turak, E. (2015). Evaluation of MODIS Spectral Indices for Monitoring Hydrological Dynamics of a Small, Seasonally-Flooded Wetland in Southern Spain. *Wetlands*, 35, 851-864. doi: 10.1007/s13157-015-0676-9
- Lovino, M., García, N.O., y Baethgen, W. (2014). Spatiotemporal analysis of extreme precipitation events in the Northeast region of Argentina (NEA). *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2, 140-158. doi: 10.1016/j.ejrh.2014.09.001

- Maldonado, P., y Höhne, J. (2006). Atlas del Gran Chaco Sudamericano. Buenos Aires: ErreGé & Asoc.
- McFeeters, S.K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425-1432. doi: 10.1080/01431169608948714
- McKee, T.B., Doesken, N.J., y Kleist, J. (1993, Enero). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*. California.
- McNally, A., Arsenault, K., Kumar, S., Shukla, S., Peterson, P., Wang, S., Funk, C., Peters-Lidard, C.D., y Verdin, J.P. (2017). A land data assimilation system for sub-Saharan Africa food and water security applications. *Scientific Data*, 4(170012), 1-19. doi: 10.1038/sdata.2017.12
- Montenegro, M.S. (2010). *Variaciones de las reservas de agua durante la sequía del año 2009 en la provincia de Buenos Aires a partir de datos satelitales de la misión GRACE* (Tesis de Grado). Universidad Nacional de la Plata, La Plata, Argentina.
- Moreira, A.A., Ruhoff, A.L., Roberti, D.R., de Arruda Souza, V., da Rocha, H.R., y de Paiva, R.C.D. (2019). Assessment of terrestrial water balance using remote sensing data in South America. *Journal of Hydrology*, 575, 131-147. doi: 10.1016/j.jhydrol.2019.05.021
- Morello, J., Matteucci, S.D., Rodriguez, A.F., y Silva, M.E. (2012). *Ecorregiones y complejos Ecosistémicos de Argentina*. Buenos Aires: Orientación Grafica Editora.
- Morello, J. y Saravia Toledo, C. (1959). El bosque chaqueño: I Paisaje primitivo, paisaje natural y paisaje cultural en el oriente de Salta. *Revista agronómica del noroeste argentino*, 3 (1-2), 5-81.
- Ogilvie, A., Belaud, G., Delenne, C., Bailly, J.S., Bader, J.C., Oleksiak, A., Ferry, L. y Martin, D. (2015). Decadal monitoring of the Niger Inner Delta flood dynamics using MODIS optical data. *Journal of Hydrology*, 523, 368-383. doi: 10.1016/j.jhydrol.2015.01.036
- Ogilvie, A., Belaud, G., Massuel, S., Mulligan, M., Goulven, P.L. y Calvez, R. (2018). Surface water monitoring in small water bodies: potential and limits of multi-sensor Landsat time series. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22, 4349-4380. doi: 10.5194/hess-22-4349-2018
- Oliveira, P.T.S., Nearing, M.A., Moran, M.S., Goodrich, D.C., Wendland, E., y Gupta, H.V. (2014). Trends in water balance components across the Brazilian Cerrado. *Water Resources Res.*, 50, 7100-7114. doi: 10.1002/2013WR015202
- Organización Meteorológica Mundial (OMM). (2012). *Índice Normalizado De Precipitación. Guía de Usuario* (Svoboda, M., Hayes, M., y Wood, D.).

- Orsolini, H.E., Zimmermann, E.D. y Basile, P.A. (2000). *Hidrología: procesos y métodos*. Rosario: Universidad Nacional de Rosario.
- Pautasso, A.A., Raimondi, V.B. y Li Puma, M.C. (2010). Conservación del venado de las pampas (*Ozotoceros bezoarticus leucogaster*) en los Bajos Submeridionales de Santa Fe, Argentina: un índice para monitorear factores de amenaza y su implementación en el período 1998-2009. *Museo Provincial de Ciencias Naturales "Florentino Ameghino" y Biológica*, 12, 25-36.
- Pautasso, A.A. (2011). La fauna y su conservación en los Bajos Submeridionales. *Ediciones Biológica*. Santa Fe: Ediciones Biológicas.
- Peri V.G. y Rossello, E. (2010). Anomalías morfoestructurales del drenaje del río Salado sobre las Lomadas de Otumpa (Santiago del Estero y Chaco) detectadas por procesamiento digital. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 66(4), 634-645.
- Peri, V.G. (2012). *Caracterización morfotectónica de las Lomadas de Otumpa (Gran Chaco, Santiago del Estero y Chaco): influencias en el control del drenaje*. (Tesis doctoral). Universidad Nacional de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.
- Rodell, M., Houser, P.R., Jambor, U., Gottschalck, J., Mitchell, K., Meng, C.J., Arsenault, K., Cosgrove, B., Radakovich, J., Bosilovich, M., Entin, J.K., Walker, J.P., Lohmann, D., Entin, J.K. y Toll, D. (2004). The global land data assimilation system. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85(3), 381-394. doi: 10.1175/BAMS-85-3-381
- Rossello, E.A., y Bordarampé, C.P. (2005, Septiembre). Las Lomadas de Otumpa: nuevas evidencias cartográficas de deformación neotectónica en el Gran Chaco (Santiago del Estero, Argentina). *XVI Congreso Geológico Argentino: Relatorio, Geología y recursos minerales de la Provincia de Buenos Aires*. La Plata.
- Running, S., Mu, Q. y Zhao, M. (2017). MOD16A2 MODIS/Terra Net Evapotranspiration 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V006. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. doi: 10.5067/MODIS/MOD16A2.006. Recuperado el 2019-11-18.
- Saha, S., Moorthi, S., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Behringer, D., Hou, Y.-T., Chuang, Y.-T., Iredell, M., Ek, M., Meng, J., Yang, R., Peña Mendez, M., Dool, H.V.D., Zhang, Q., Wang, W., Chen, M., y Becker, E. (2011). NCEP climate forecast system version 2 (CFSv2) 6-hourly products. *Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory*. <https://doi.org/10.5065/D61C1TXF>. Recuperado el 2019-09-30.
- Secretaria de Agricultura, Ganadería y Pesca SAGyP e Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria INTA. (2007). Suelos de la República Argentina. Tomado de: <http://www.geointa.inta.gob.ar/2013/05/26/suelos-de-la-republica-argentina/>. Recuperado el 2020-01-01.

- Seitz, F., Schmidt, M., y Shum, C.K. (2008). Signals of extreme weather conditions in Central Europe in GRACE 4-D hydrological mass variations. *Earth and Planetary Science Letters*, 268, 165-170. doi:10.1016/j.epsl.2008.01.001
- Schneider, U., Becker, A., Finger, P., Meyer-Christoffer, A., y 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. *Global Precipitation Climatology Centre (GPCC) at Deutscher Wetterdienst*. doi: 10.5676/DWD\_GPCC/FD\_M\_V2018\_025. Recuperado el 2019-07-01.
- Schumann, G. (2015). Preface: Remote Sensing in Flood Monitoring and Management. *Remote Sensing*, 7(12), 17013–17015. doi: 10.3390/rs71215871
- Scioli, C.C. (2010). *Modelación del escurrimiento superficial en áreas de llanura: Implementación y calibración de un modelo distribuido de grilla* (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Rosario, Santa Fe, Argentina.
- Scioli, C.C. (2016). *Un nuevo índice de similitud hidrológica para la simulación precipitación - escorrentía en sistemas de llanura* (Tesis Doctoral). Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina.
- Sosa, D., Palazzo, R. y Genesio, M. (2001, Septiembre). Los paleocauces del río Salado como fuente de abastecimiento humano y ganadero. *Congreso en memoria de Germán Galarza: Las Caras del Agua Subterránea*. Barcelona.
- Sosa, D., Schmidt, F. y Genesio, M. (2009). *Informes técnicos del Instituto Nacional del Agua (CRL): "Prospección geoeléctrica en establecimientos ganaderos del norte santafesino en el Departamento Vera"*. Inédito. Entregas N° 1, N° 2 y N° 3. Convenio Específico N° 6 (MASPyMA).
- Sosa, D. (2012). *El agua, excesos y déficits, en la producción agrícola de secano y pecuaria dentro de la cuenca inferior del río Salado* (Tesis Doctoral). Universidad de La Coruña, La Coruña, España.
- Sosa, D., Díaz, E., Genesio, M., Marchetti, Z., Castro, S., Venencio, M.D.V., Heredia, J., Rodríguez, L., Silva Busso, A., Moreno, L. y Veizaga, E. (2016, Septiembre). Primera aproximación sobre la circulación de los flujos subterráneos en los Bajos Submeridionales santafesinos. *IX Congreso Argentino de Hidrogeología*. Catamarca.
- Sosa, D. (2017). El agua subterránea en los bajos submeridionales Santafesinos y su aprovechamiento en la producción ganadera. *Revista FAVE - Ciencias Agrarias*, 16(1), 115-129.
- Subsecretaría de Recursos Hídricos SsRH. (2010). Atlas Digital de los Recursos Hídricos Superficiales de la República Argentina. CD-ROM.



- Tapley B.D., Bettadpur S., Ries J.C., Thompson P.F. y Watkins M.M. (2004). GRACE Measurements of Mass Variability in the Earth System. *Science*, 305, 503-505. doi: 10.1126/science.1099192
- Thalmeier, M.B., Rodríguez, L., Heredia, J., Sosa, D., Veizaga, E., Díaz, E., y Moreno, L. (2018, Octubre). Patrones de flujo regionales del Gran Chaco Argentino: región de los Bajos Submeridionales. *XIV Congreso Latinoamericano de Hidrogeología*. Salta.
- Thalmeier, M.B., Kröhling, D., y Brunetto, E. (2021a). The geomorphology and the stratigraphic record of the Salado/Juramento Fluvial Megafan of the Central Andes foreland basin (Chaco Plain, Argentina). *Geomorphology*, 373, 107495. doi: 10.1016/j.geomorph.2020.107495
- Thalmeier, M.B. (2021b). *Modelo hidrogeológico conceptual y numérico del flujo subterráneo de la región de los Bajos Submeridionales, planicie distal del megabanico fluvial del Salado-Juramento, Chaco Argentino* (Tesis Doctoral). Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.
- The Nature Conservancy (TNC), Fundación Vida Silvestre Argentina (FVSA), Fundación para el Desarrollo Sustentable del Chaco (DeSdel Chaco) y Wildlife Conservation Society Bolivia (WCS). (2005). *Evaluación Ecorregional del Gran Chaco Americano*. Recuperado de: <http://awsassets.wwfarc.org/downloads/dossier.pdf>
- Tóth, J. (2000). Las aguas subterráneas como agente geológico: causas, procesos y manifestaciones. *Boletín Geológico y Minero*, 111(4), 9-26.
- Usunoff E.J., 2009. Hydrogeology of large plains. En Silveira, L. y Usunoff, E.J. (Eds.), *Groundwater* (pp. 308 -325). Singapur: Eolss Publishers Co. Ltd.
- Valladares A. (2014). *Análisis de las variaciones de las reservas de agua en la región hídrica de los esteros del Iberá, Corrientes, Argentina* (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de La Pampa, Santa Rosa, Argentina.
- Vermote, E. (2015). MOD09A1 MODIS/Terra Surface Reflectance 8-Day L3 Global 500m SIN Grid V006. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. doi: 10.5067/MODIS/MOD09A1.006. Recuperado el 2019-11-28.
- Vicente Serrano, S.V., Beguería, S., Lorenzo Lacruz, J., Camarero, J. J., López Moreno, J. I., Azorín Molina, C., Revuelo, J., Morán Tejeda, E. y SánchezLorenzo, A. (2012, Septiembre). Análisis comparativo de diferentes índices de sequía para aplicaciones ecológicas, agrícolas e hidrológicas. *8º Congreso Internacional de la Asociación Española de Climatología (AEC): Cambio climático. Extremos e impactos*, Salamanca.
- Viglizzo, E.F., Frank, F.C., Carreño, L.V., Jobbagy, E.G., Pereyra, H., Clatt, J., y Ricard, M.F. (2011). Ecological and environmental footprint of 50 years of agricultural

expansion in Argentina. *Global Change Biology*, 17, 959-973. doi: 10.1111/j.1365-2486.2010.02293.x

Wahr, J., Molenaar, M., y Bryan, F. (1998). Time variability of the Earth's gravity field: Hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 103(B12), 30205-30229. doi: 10.1029/98JB02844

Wan, Z., Hook, S. y Hulley, G. (2015). MOD11A1 MODIS/Terra Land Surface Temperature/Emissivity Daily L3 Global 1km SIN Grid V006. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. doi: 10.5067/MODIS/MOD11A1.006 . Recuperado el 2019-11-28.

Wiese, D.N., Yuan, D.N, Boening, C., Landerer, F.W. y Watkins, M.M. (2018). JPL GRACE Mascon Ocean, Ice, and Hydrology Equivalent Water Height Release 06 Coastal Resolution Improvement (CRI) Filtered Version 1.0. Ver. 1.0. PO.DAAC, CA, USA. doi: 10.5067/TEMSC-3MJC6. Recuperado el 2019-11-28.

Winter, T.C. (1999). Relation of streams, lakes, and wetlands to groundwater flow systems. *Hydrogeology Journal*, 7, 28-45. doi: 10.1007/s100400050178

World Water Assessment Programme (WWAP). (2015). *Informe de las Naciones Unidas sobre los recursos hídricos en el mundo 2015: Agua para un mundo sostenible. Resumen ejecutivo.* Recuperado de: [https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000232272\\_spa](https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000232272_spa)

Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27 (14), 3025-3033. doi: 10.1080/01431160600589179

Zimmermann, E.D. (1999). *Adaptación de tecnologías existentes a los sistemas hidrológicos de llanura: modificación y aplicación del modelo de onda cinemática.* Recuperado de: <https://www.fceia.unr.edu.ar/curiham/Publicaciones/CURI992.pdf>