



Universidad Nacional de Rosario (UNR)
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura (FCEIA)
Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales (CURIHAM)

MAESTRÍA EN RECURSOS HÍDRICOS EN ZONA DE LLANURA

Trabajo de Tesis
para optar al grado de
Magíster en Recursos Hídricos en Zona de Llanura

Comportamiento del sistema acuífero en la cuenca inferior del río Carcarañá. Provincias de Santa Fe y Córdoba, República Argentina.

Autor: Ing. Marcelo H. Polare
Director: Dr. Ing. Luis Vives
Codirectoras: Dra. Geól. Daniela Kröhling
Dra. Ing. María del Valle Venencio

ROSARIO

2019

NOTA DEL AUTOR

Está prohibido el uso comercial del presente trabajo, como así también la generación de cualquier tipo de obra derivada, de acuerdo a la licencia otorgada.

Marcelo H. Polare

DEDICATORIA

A mis padres y esposa.

A Chiche.

*“Comienza haciendo lo que es
necesario, después lo que es posible y de
repente estarás haciendo lo imposible”
(San Francisco de Asís)*

AGRADECIMIENTOS

Durante este largo tiempo de trabajo hubo muchas personas a las que debo agradecer por la ayuda brindada. Pido disculpas a los que olvido mencionar a continuación.

A mi Director y Codirectoras, Dr. Ing. Luis Vives, Dra. Geól. Daniela Kröhling y Dra. Ing. María del Valle Venencio, por estar siempre ahí, por compartir sus vastos conocimientos abiertamente, y, fundamentalmente, por permitirme conocerlos desde lo humano en este tiempo que trabajamos juntos, asombrándome por el espíritu, pasión y optimismo que transmiten.

A los integrantes del Instituto de Fisiografía y Geología “Dr. Alfredo Castellanos”, y del Departamento de Ciencias Geológicas “Prof. Dra. Pierina Pasotti” (FCEIA-UNR) por su constante apoyo, tanto técnico como humano, y especialmente al Ing. Agr. Jorge Postma por su invaluable ayuda en lo concerniente a la temática edafológica, y al Ing. Gfo. Juan M. Racca por su asesoramiento sobre la construcción del Modelo Digital de Elevaciones.

A mis compañeros de cátedra en la FCEIA-UNR y en la Facultad de Arquitectura, Planeamiento y Diseño (FAPyD-UNR) por su continuo aliento.

Al Dr. Ing. Sergio Montico, del Departamento Ciencias de la Tierra y Tecnología (FCA-UNR), por su amabilidad y asesoramiento edafológico en el presente trabajo.

Al personal del Centro de Información Meteorológica del Servicio Meteorológico Nacional, por responder siempre prontamente y con eficiencia a mis pedidos de datos meteorológicos.

Al Dr. Geól. Ernesto Brunetto, (CICyTTP-CONICET y UAER) por sus desinteresados aportes en lo geológico y por demostrarme siempre, lo mismo que Daniela, cómo se trabaja científicamente en el campo de la Geología actual.

A los Tcos. Elvecia y Juan Arce, de la EEA INTA Marcos Juárez y al Geól. Rubén Tosolini, de la EEA INTA Rafaela, por su cordialidad y predisposición ante mis requerimientos de datos y consultas efectuadas.

Al Ing. Agr. José Andriani, de la EEA INTA Oliveros, por el enriquecedor intercambio de opiniones y los datos brindados.

Al Ing. Agr. Guillermo Gerster, de la AER INTA Roldán por su amabilidad y ayuda brindada para la búsqueda de información meteorológica recabada por INTA en la prov. de Santa Fe.

Al Ing. Raúl Navarro, del Departamento de Hidráulica (FCEIA-UNR), y al Dr. Ing. Erik Zimmermann, del Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales (FCEIA-UNR) por estar siempre predispuestos a dar una mano y a sus constantes palabras de aliento.

Al Lic. Daniel Cielak, administrador del Banco de Datos Hidrológicos (SSRH), por su amabilidad y aliento durante mi trabajo, y por siempre responder con prontitud mis consultas.

A Griselda Storani y María José Copello, bibliotecarias del Centro de Documentación del Ministerio de Aguas, Servicios Públicos y Medio Ambiente de la provincia de Santa Fe (MASPyMA), por su cordialidad y predisposición en la búsqueda de material para este trabajo.

Al Dr. Marcelo Varni, del Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr. Eduardo Usunoff" (UNCPBA-CIC-CONICET), por sus consejos brindados durante mi trabajo.

A Julia Capurro (AER INTA Cañada de Gómez), Florencia Luraschi (AER INTA Casilda), Marianela De Emilio (AER INTA Las Rosas), Graciela Cazenave (Instituto de Clima y Agua-CIRN-INTA Castelar) y Verónica Anibalini (estación meteorológica UNR Zavalla), por el envío de datos meteorológicos y lo amable en el trato.

A la Dra. Margarita Portapila y su grupo de trabajo del Centro Internacional Franco Argentino de Ciencias de la Información y de Sistemas (CIFASIS-UNR-CONICET), por el aliento y la constante predisposición a brindarme ayuda para este trabajo.

Al Dr. Armando Schmukler, por ser el médico que es.

A mis padres, por apoyarme en este camino y haberme brindado a lo largo de la vida valores tan importantes como la perseverancia y la voluntad para alcanzar una meta, creciendo interiormente en ese camino. Gracias a ellos he podido llegar hasta aquí.

A Roxana, por su apoyo e infinita paciencia a lo largo de estos años de trabajo, a la cual pido perdón por el tiempo no compartido y cedido a esta Tesis.

RESUMEN

La zona de estudio es la cuenca inferior del río Carcarañá que se extiende desde el sudeste de la provincia de Córdoba y abarca la zona centro – sur de la provincia de Santa Fe. Es una zona de actividad agrícola ganadera por excelencia. La provincia de Santa Fe tiene como principales cultivos, por orden de importancia, a la soja, maíz, trigo, sorgo y girasol. La provincia contribuyó en la campaña 2016/17 con el 18% de la producción total nacional de soja, en donde aproximadamente un 26% fue aportado por el área de estudio.

La mayoría de las localidades de la zona de estudio y de las adyacencias tienen a las aguas subterráneas como única fuente de provisión de agua para la población, salvo las ubicadas en el este de la provincia de Santa Fe donde captan de los cursos de agua superficiales, como ser los ríos Coronda y Paraná. Las localidades ubicadas en el oeste provincial y en la provincia de Córdoba presentan además el problema de la calidad del agua subterránea, teniendo que recurrir a diversos métodos de potabilización.

Este trabajo pretende definir el funcionamiento del sistema acuífero a escala regional que conlleve a futuro a la implementación de un plan de gestión sustentable del recurso hídrico subterráneo por parte de las autoridades competentes.

El estudio se inició con la definición del modelo geológico del subsuelo en base a una reconstrucción estratigráfica y sedimentológica como así también a los procesos geológicos intervinientes, distinguiéndose la presencia de una unidad muy particular desde el punto de vista morfoestratigráfico como lo es el Bloque de San Guillermo.

Además, se obtuvo un mapa de recargas de detalle para el área de estudio, calculando el valor a través de la confección de un programa de balance hídrico seriado que considera las distintas variables implicadas, pudiendo obtener valores de recarga diarios, mensuales y anuales. La relación promedio recarga – precipitación fue de 5 a 11% para las zonas de mayor recarga y de 1 a 3% para las de menor recarga.

Basado en la comprensión de los diversos factores (geológicos, hidrológicos, etc.) que condicionan el movimiento del flujo subterráneo, se definió un modelo conceptual de funcionamiento del sistema acuífero, que posteriormente se validó con un modelo numérico tricapas implementado en el código Visual MODFLOW. La capa superior alberga el acuífero libre y la inferior el semiconfinado, separados por una capa con comportamiento de acuitardo.

El proceso de calibración se realizó en estado estacionario para el año 1966 y se desarrolló de manera manual a través del método de prueba y error. Los parámetros de calibración elegidos fueron las conductividades hidráulicas y las conductancias y niveles de pelo de agua de los cursos de agua.

Los resultados de la calibración fueron satisfactorios y validaron el modelo conceptual propuesto. El ajuste entre los valores observados y calculados, tanto para los niveles freáticos (acuífero libre) como para los piezométricos (acuífero semiconfinado) fue excelente, obteniéndose valores del

residuo medio absoluto RMA de 2,64 m para el acuífero libre y de 1,52 m para el semiconfinado, ambos por debajo de los 3 m adoptados como margen de error. El coeficiente de eficiencia E para el acuífero libre fue de 0,96 contra 0,87 para el acuífero semiconfinado. Los parámetros hidráulicos obtenidos durante el proceso de calibración dieron en el orden de las estimaciones previas.

El modelo numérico desarrollado permitió analizar el flujo entre las capas que conforman el sistema acuífero, y particularmente a través del acuitardo. Se calcularon flujos ascendentes y descendentes a través del mismo, provenientes de ambos acuíferos, evidenciándose la conexión hidráulica entre ellos. En cuanto a la descarga regional, ésta se da directamente hacia los ríos Coronda y Paraná, mientras que las descargas locales se identifican en el caudal base de los cursos de agua interiores.

El balance de masas global del sistema acuífero reflejó que prácticamente toda la recarga que ingresa al sistema se destina a conformar el caudal base de los cursos de agua, por lo que éstos representan una importante salida de flujo del sistema, y cuyo comportamiento es fundamentalmente efluente. Tomando como referencia la recarga, el caudal base representa el 93%, la extracción por bombeo el 1% y el caudal neto que pasa al acuífero inferior es el 5%.

Se efectuaron dos análisis de sensibilidad del modelo: uno a nivel general contemplando toda la zona de estudio, y otro a nivel local considerando la provincia de Córdoba, la Depresión de la Cañada de San Antonio y el Bloque de San Guillermo. En el primero se hizo variar las conductividades hidráulicas de las tres capas del modelo y la recarga, arrojando que ésta última fue el parámetro donde el modelo se mostró más sensible. En el segundo, el modelo se mostró sensible a la conductividad hidráulica del acuífero semiconfinado, y en menor grado para las del acuífero libre y del acuitardo. Finalmente, con el objetivo de evaluar la interacción sistema acuífero – cursos de agua, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad de la recarga disminuyendo y aumentando ésta hasta un 20%, observándose en los cursos de agua un comportamiento influente de los mismos en el primer caso, y efluente en el segundo.

ABSTRACT

The study area is the lower basin of the Carcarañá river that extends from the southeast of the province of Córdoba and covers the central-southern area of the province of Santa Fe. It is an area of agricultural and livestock activity par excellence. The main crops grown in the province of Santa Fe are, in order of importance, soya, corn, wheat, sorghum and sunflower. The province contributed in the 2016/17 campaign with the 18% of the total national production of soya, with approximately 26% provided by the study area.

Most of the towns in the study area and adjacent have groundwater as their only source of water supply for the population, except for those located in the east of the province of Santa Fe, where they collect water from surface watercourses, such as the Coronda and Paraná rivers. The towns located in the west of the province and in the province of Córdoba also have the problem of groundwater quality, having to resort to various drinking water treatment methods.

This work aims to define the functioning of the aquifer system on a regional scale that may lead to the future implementation of a sustainable groundwater resource management plan by the competent authorities.

The study began with the definition of the geological model based on a stratigraphic and sedimentological reconstruction as well as the geological processes involved, distinguishing the presence of a very particular unit from the morphological and stratigraphic point of view, such as the San Guillermo Block.

In addition, a detailed recharge map was obtained for the study area, calculating the value through the preparation of a serial water balance program that considers the different variables involved, allowing for daily, monthly and annual recharge values. The average ratio between the recharge and precipitation was 5 to 11% for the areas with the highest recharge and 1 to 3% for those with the lowest recharge.

Based on the understanding of the various factors (geological, hydrological, etc.) that condition the movement of groundwater flow, a conceptual model of the functioning of the aquifer system was defined, which was later validated with a three-layer numerical model implemented in the Visual MODFLOW code. The upper layer contains the free aquifer and the lower the semi-confined one, separated by an aquitard-like layer.

The calibration process was performed in a steady state for the year 1966 and was developed manually through the trial and error method. The calibration parameters chosen were the hydraulic conductivities and the conductances and river stages of the watercourses.

The results of the calibration were satisfactory and validated the proposed conceptual model. The adjustment between the observed and calculated values, both for the phreatic levels (free aquifer) and for the piezometrics levels (semi-confined aquifer) was excellent, obtaining values of the absolute mean residue RMA of 2.64 m for the free aquifer and 1.52 m for the semi-confined aquifer, both below the 3 m adopted as margin of error. The efficiency coefficient E for the free

aquifer was 0,96 against 0,87 for the semi-confined aquifer. The hydraulic parameters obtained during the calibration process were given in the order of the previous estimates.

The numerical model developed allowed to analyze the flow between the layers that make up the aquifer system, and particularly through the aquitard. Ascending and descending flows were calculated through the aquifer, coming from both aquifers, and the hydraulic connection between them was evidenced. The regional discharge is directly to the Coronda and Paraná rivers, while the local discharges are identified in the base flow of inland watercourses.

The global mass balance of the aquifer system showed that practically all the recharge entering the system is destined to form the base flow of the watercourses, so that these represent an important flow outlet of the system, and whose behaviour is fundamentally effluent. Taking recharge as a reference, the base flow represents 93%, the pumped extraction 1% and the net flow to the lower aquifer is 5%.

Two sensitivity analyses of the model were carried out: one at a general level covering the entire study area, and another at a local level considering the province of Córdoba, the San Antonio Cañada Depression and the San Guillermo Block. In the first one, the hydraulic conductivities of the three layers of the model and the recharge were varied, revealing that the latter was the parameter where the model was most sensitive. In the second, the model was sensitive to the hydraulic conductivity of the semi-confined aquifer, and to a lesser extent for the free aquifer and the aquitard. Finally, in order to evaluate the interaction between the aquifer system and the watercourses, a sensitivity analysis of the recharge was carried out, decreasing and increasing it up to 20%, observing in the watercourses an influent behaviour in the first case, and an effluent behaviour in the second.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN	i
ABSTRACT	iii
ÍNDICE GENERAL	v
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABLAS	xvii
ABREVIATURAS Y SIGLAS UTILIZADAS	xix

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. MOTIVACIÓN	1
1.2. OBJETIVOS	2
1.2.1. Objetivo General.....	2
1.2.2. Objetivos Específicos.....	2
1.3. HIPÓTESIS	3
1.4. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	3
2. ANTECEDENTES	5
3. METODOLOGÍA	9
4. DESCRIPCIÓN DEL MEDIO FÍSICO	13
4.1. CLIMATOLOGÍA	13
4.2. GEOLOGÍA	16
4.2.1. Tectónica.....	17
4.2.2. Estratigrafía.....	19
4.3. HIDROGEOLOGÍA	30
4.4. GEOMORFOLOGÍA	34
4.5. EDAFOLOGÍA.....	40
4.6. DINÁMICA HÍDRICA SUPERFICIAL.....	46
4.7. DINÁMICA HÍDRICA SUBTERRÁNEA.....	49
4.8. HIDROQUÍMICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	52

5.	MODELO CONCEPTUAL HIDROGEOLÓGICO	55
5.1.	FUNDAMENTOS DEL MODELO CONCEPTUAL	55
5.2.	MATERIAL ELABORADO PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL	57
5.2.1.	Modelo Digital de Elevaciones	57
5.2.2.	Red de drenaje.....	60
5.2.3.	Análisis estratigráfico.....	63
5.2.4.	Freatimetría base	73
5.2.5.	Mapa de zonas de recarga.....	78
5.2.6.	Cuantificación de las recargas	81
5.2.6.1.	Datos meteorológicos disponibles.....	81
5.2.6.2.	Cálculo de evapotranspiraciones.....	88
5.2.6.3.	Cálculo de balances hídricos.....	92
5.2.6.3.1.	Determinación de los balances hídricos en las zonas de recarga.....	96
5.2.6.4.	Cálculo de las recargas	100
5.2.7.	Captación de agua mediante bombeo para consumo en localidades	104
5.2.8.	Parámetros hidráulicos.....	106
5.3.	DESCRIPCIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL DE FUNCIONAMIENTO.....	109
6.	MODELO NUMÉRICO	113
6.1.	ESTRUCTURA DEL MODELO NUMÉRICO	113
6.1.1.	Dominio del modelo y discretización espacial	113
6.1.2.	Condiciones de contorno	117
6.1.2.1.	Límites de la zona de modelación.....	117
6.1.2.2.	Cursos de agua	119
6.1.3.	Fuentes y sumideros.....	123
6.1.3.1.	Zonas de recarga.....	123
6.1.3.2.	Pozos de bombeo.....	124
6.1.4.	Parámetros hidráulicos y zonificación	126
6.2.	ESTRATEGIA DE LA CALIBRACIÓN.....	129
6.3.	RESULTADOS	131
6.3.1.	Parámetros hidráulicos calibrados.....	136
6.3.2.	Ajuste de los niveles	138
6.3.3.	Mapa de residuos	140
6.3.4.	Superficies freaticométrica y piezométrica. Direcciones de flujo	143

6.3.5.	Balance de masas.....	149
6.3.6.	Caudales base de cursos de agua.....	153
6.4.	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	154
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	159
	CONCLUSIONES.....	159
	RECOMENDACIONES.....	161
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	165
	ANEXOS	179
I.	ANEXO I – MAPA DE SUELOS: UNIDADES CARTOGRÁFICAS.....	181
II.	ANEXO II – CLASIFICACIÓN DE LAS TIERRAS POR SU CAPACIDAD DE USO.....	187
III.	ANEXO III – ESTUDIO DE EVAPOTRANSPIRACIONES POR DIVERSOS MÉTODOS	193
IV.	ANEXO IV – BALANCES HÍDRICOS: ANÁLISIS ZONAL DE PRECIPITACIONES Y RECARGA	203
V.	ANEXO V – ESTADÍSTICOS UTILIZADOS PARA EVALUAR LA BONDAD DEL AJUSTE....	237

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Localización del área de estudio.	3
Figura 3.1 – Metodología para la modelación numérica del flujo subterráneo (tomado de Molinero y Samper, 2000).	9
Figura 4.1 – Precipitación media anual (período 1921-2000) en la zona de estudio (recuadro negro) (Fuente: Bianchi y Cravero, 2010).	13
Figura 4.2 – Precipitación semestral correspondiente al semestre cálido (octubre a marzo) - período 1921-2000 - en la zona de estudio (Fuente: Cravero <i>et al.</i> , 2017).	14
Figura 4.3 – Precipitación semestral correspondiente al semestre frío (abril a setiembre) - período 1921-2000 - en la zona de estudio (Fuente: Cravero <i>et al.</i> , 2017).	14
Figura 4.4 – Temperatura media anual (período 1921-2000) en la zona de estudio (Fuente: Bianchi y Cravero, 2010).	15
Figura 4.5 – Temperatura media mensual de enero (período 1921-2000) en la zona de estudio (Fuente: Bianchi y Cravero, 2010).	16
Figura 4.6 – Temperatura media mensual de julio (período 1921-2000) en la zona de estudio (Fuente: Bianchi y Cravero, 2010).	16
Figura 4.7 – Ubicación en la zona de estudio del Bloque de San Guillermo y la Fosa tectónica de la cañada de San Antonio a través del Modelo Digital de Elevaciones SRTM (NASA).	17
Figura 4.8 – Esquema simplificado de las Fallas de San José del Salteño, Tostado – Selva, El Trébol y del río Carcarañá. Vale aclarar que se tratan de lineamientos vinculados a fallas o sistemas de fallas.	18
Figura 4.9 – Esquema del Sistema Eólico Pampeano durante el Último Máximo Glacial (tomado de Iriondo y Kröhling, 1995, 2007), con indicación del área de estudio.	20
Figura 4.10 – Perfil estratigráfico general de la cuenca inferior del río Carcarañá (tomado de Kröhling, 1999a).	21
Figura 4.11 – Columna estratigráfica del Bloque de San Guillermo (tomado de Kröhling e Iriondo, 2003).	26
Figura 4.12 – Ubicación de las perforaciones y de las transectas de correlaciones estratigráficas P1-P8 y P9-P19 (basado en Kröhling e Iriondo, 2003).	27
Figura 4.13 – Columnas estratigráficas complementarias del Bloque de San Guillermo (basado en Kröhling e Iriondo, 2003).	28
Figura 4.14 – Columnas estratigráficas complementarias al este del Bloque de San Guillermo (basado en Kröhling e Iriondo, 2003).	28

Figura 4.15 – Ubicación de los perfiles Tortugas y Carcarañá (tomado de Kröhling y Orfeo, 2002).....	29
Figura 4.16 – Perfil norte de la cantera Tortugas (tomado de Kröhling, 1998b).....	29
Figura 4.17 – Perfil sur de la cantera Carcarañá (tomado de Kröhling, 1998b).	29
Figura 4.18 – Mapa de Subregiones Hidrogeológicas (tomado de Santa Cruz y Silva Busso, 1999). Se destaca en recuadro la zona de estudio.....	31
Figura 4.19 – Mapa Geomorfológico de la zona de estudio a nivel de Sistemas y Unidades Geomorfológicas (Fuente: Brunetto <i>et al.</i> , 2014, 2017a; Carignano <i>et al.</i> , 2014).....	36
Figura 4.20 – Esquema geomorfológico de la cuenca del río Carcarañá en la provincia de Santa Fe en donde se muestra recuadrada el área de estudio (basado en Kröhling, 1999a).....	39
Figura 4.21 – Mapa de suelos del área de estudio.	41
Figura 4.22 – Zonas y subzonas agroeconómicas de la prov. de Santa Fe. Se muestra la zona de estudio correspondiente a la provincia. Fuente: INTA - CR Santa Fe - EEA Rafaela. ..	43
Figura 4.23 – Mapa de Capacidad Productiva de las tierras para uso agrícola correspondiente a la zona de estudio en la prov. de Santa Fe. Basada en información de INTA - CR Santa Fe - EEA Rafaela.....	45
Figura 4.24 – Zonas y subzonas agroeconómicas de la provincia de Córdoba. Se muestra la zona de estudio correspondiente a la provincia. Fuente: INTA – RIAP.	46
Figura 4.25 – Cuencas hidrográficas adoptadas por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (2002) que comprende el área de estudio.	46
Figura 4.26 – Hidrografía de la zona de modelación (Fuente: SIG-250 del IGN).	47
Figura 4.27 – Mapas freaticos: (a) Kreimer (1969), (b) Bitesnik (1968) y (c) Bitesnik (1970). En el mapa de Kreimer se muestra la ubicación de los pozos censados, mientras que en los de Bitesnik solo se presentan algunos pozos a modo indicativo. En los mapas se destaca recuadrada en azul el área correspondiente a la zona de estudio.....	51
Figura 4.28 – Mapa freático de la cuenca del inferior río Carcarañá para diciembre de 2003 (tomado de Venencio, 2007).....	52
Figura 5.1 – Ubicación de los 155 puntos utilizados para determinar la diferencia de cotas entre geoides de referencia. De fondo se observa el MDE inicial.....	58
Figura 5.2 – Modelo Digital de Elevaciones definitivo correspondiente a la zona de modelación.....	58
Figura 5.3 – Topografía de la zona de modelo expresada a través de las curvas de nivel (equidistancia 5 m) sobre el MDE SRTM (NASA).....	59

Figura 5.4 – Pendientes derivadas del MDE expresadas en porcentaje.....	59
Figura 5.5 – Redes de drenaje obtenidas para distintos valores del umbral U.....	61
Figura 5.6 – Composición RGB 351 basada en bandas Landsat 7 ETM+.....	62
Figura 5.7 – Red de drenaje de la zona de estudio en donde se consideran los cursos principales a fines del modelo.	62
Figura 5.8 – Principales localidades con datos de perforaciones y descripción litológica resumida de las mismas. En azul la zona de estudio.....	64
Figura 5.9 – Esquema general de las unidades litológicas adoptadas para la estratigrafía en la zona de estudio.....	65
Figura 5.10 – Perfil Los Surgentes – Cruz Alta – Villa Eloísa – Carcarañá.	67
Figura 5.11 – Perfil General Roca – Montes de Oca – Salto Grande.....	68
Figura 5.12 – Perfil San José de la Esquina – Villa Eloísa – Casilda.	68
Figura 5.13 – Curvas de nivel (equidistancia 5 m) de la superficie del techo de las arcillas de la Fm Paraná, evidenciando la incidencia del Bloque de San Guillermo (líneas en trazo grueso) en los desniveles de estratos en el subsuelo de la zona de estudio. En color azul las cotas en localidades empleadas para su confección.....	69
Figura 5.14 – Vista axonométrica de la superficie del techo de las arcillas de la Formación Paraná con las curvas de nivel (equidistancia 5 m). Puede observarse con claridad el bloque elevado. Localidades en proyección a modo de referencia.	69
Figura 5.15 – Perfil Los Surgentes – Cruz Alta – Villa Eloísa – Carcarañá.	71
Figura 5.16 – Perfil General Roca – Montes de Oca – Salto Grande.....	71
Figura 5.17 – Perfil San José de la Esquina – Villa Eloísa – Casilda.	72
Figura 5.18 – Esquema de un pliegue monoclinal. Los estratos se deforman ante el movimiento de la falla. (Tomado de Tarbuck y Lutgens, 2005).....	72
Figura 5.19 – Perfil Los Surgentes – Cruz Alta – Villa Eloísa – Carcarañá sintetizado (con la interpretación de la deformación plástica de los sedimentos por efectos de la neotectónica).....	73
Figura 5.20 – Relación entre la zona de estudio y las correspondientes a los estudios hidrogeológicos de Bitesnik (1968, 1970) y Kreimer (1969).....	74
Figura 5.21 – Sistema de ubicación de pozos empleado en los trabajos hidrogeológicos de Bitesnik (1968, 1970) y Kreimer (1969). En color azul se destaca en la carta topográfica de Bigand la cuadrícula que contiene el pozo, la cual se observa en detalle a la derecha de la figura. Coordenadas de Gauss-Krüger de la cuadrícula en km.	75

Figura 5.22 – Freatimetría para el año 1966 superpuesta a la superficie topográfica (cotas en m s.n.m.). En líneas azules los cursos de agua y en líneas de trazos las zonas de estudio unificadas de Kreimer (1969) y Bitesnik (1968, 1970).....	76
Figura 5.23 – Freatimetría para el año 1966 superpuesta a la superficie topográfica (cotas en m s.n.m.) y los pozos empleados en la construcción. En líneas de trazos las zonas de estudio unificadas de Kreimer (1969) y Bitesnik (1968, 1970).....	76
Figura 5.24 – Estaciones de monitoreo en la cuenca del río Carcarañá en la prov. de Santa Fe empleadas por Venencio (2007).....	77
Figura 5.25 – Mapa de zonas de recarga.....	79
Figura 5.26 – Vista tridimensional con las zonas de recarga.	79
Figura 5.27 – Ubicación de las estaciones meteorológicas de las que se recabaron datos. En línea continua amarilla la zona de estudio.	83
Figura 5.28 – Resultados del Método de Doble Masa para las estaciones Casilda y Zavalla (UNR).	85
Figura 5.29 – Precipitación anual (1962 – 2011) para Oliveros y Marcos Juárez.....	87
Figura 5.30 – Precipitación promedio mensual (1962 – 2011) para Oliveros, Casilda, Las Rosas y Marcos Juárez.....	87
Figura 5.31 – Temperatura máxima promedio mensual (1962 – 2011) para Oliveros, Casilda y Marcos Juárez.	88
Figura 5.32 – Temperatura mínima promedio mensual (1962 – 2011) para Oliveros, Casilda y Marcos Juárez.	88
Figura 5.33 – Valores mensuales de ET_o (01/1962 al 12/1966).....	90
Figura 5.34 – Valores mensuales de ET_o (01/1967 al 07/2012).....	91
Figura 5.35 – Diferencia de valores mensuales de ET_o entre Marcos Juárez y Oliveros (01/1962 al 07/2012).	92
Figura 5.36 – Modelo de suelo implementado en el programa y datos requeridos para cada horizonte.	94
Figura 5.37 – Esquema simplificado de la estructura de la planilla de cálculo destinada a la realización de los Balances Hídricos Seriadados a paso diario.	96
Figura 5.38 – Zonas de recarga. División de la zona de estudio en tres sectores de acuerdo con qué estación meteorológica se trabaje (Oliveros, Casilda o Marcos Juárez).....	97
Figura 5.39 – Recargas y precipitaciones diarias en la zona 1 de recarga.	101
Figura 5.40 – Recargas y precipitaciones mensuales en la zona 1 de recarga.	102
Figura 5.41 – Recargas y precipitaciones anuales en la zona 1 de recarga.....	103

Figura 5.42 – Pozos de bombeo (círculos amarillos) en Cañada de Gómez durante el año 1966.	105
Figura 5.43 – Volúmenes obtenidos por extracción por bombeo en Cañada de Gómez durante el año 1966.	105
Figura 5.44 – Volúmenes anuales por pozo de bombeo en Cañada de Gómez (año 1966).	106
Figura 5.45 – Datos de conductividades hidráulicas. Los puntos negros corresponden a la recopilación hidrogeológica del Convenio DPOH-SPAR e INA-CRL (2002), mientras que los puntos azules corresponden a datos de trabajos de investigación.	107
Figura 5.46 – Esquema del Modelo Conceptual de funcionamiento del sistema acuífero.	111
Figura 6.1 – Discretización en planta del área de estudio.	114
Figura 6.2 – Asignación de capas a las unidades litológicas.	114
Figura 6.3 – Perfiles transversales del modelo pasantes por Villa Eloísa (prov. de Santa Fe).	115
Figura 6.4 – Profundidad de la superficie freática respecto a la topográfica. El nivel freático en los sectores en color azul está por encima de la superficie del terreno, en celeste está en la capa superior y en verde cuando está en capas más profundas.	116
Figura 6.5 – Límites de la zona de modelación superpuestos al MDE. Se muestran, además, diversas localidades situadas en dicha zona.	117
Figura 6.6 – Condiciones de contorno en los límites de la zona de modelación para la Capa 1 (NF: nivel fijo, FN: flujo nulo, CHG: carga hidráulica general, TR: tipo río).	118
Figura 6.7 – Subdivisión en tramos para la definición de las condiciones de contorno en los límites de la zona de modelación para la Capa 3 (NF: nivel fijo, FN: flujo nulo, CHG: carga hidráulica general, TR: tipo río).	119
Figura 6.8 – Cursos de agua implementados en el modelo.	121
Figura 6.9 – Perfil longitudinal obtenido del río Carcarañá.	122
Figura 6.10 – Zonas de recarga y valores estimados para la calibración.	124
Figura 6.11 – Pozos de bombeo en Cañada de Gómez.	125
Figura 6.12 – Espesor de la capa 2 (modelo de cuatro capas) en el área de estudio.	127
Figura 6.13 – Zonificación y valores de las conductividades hidráulicas para la calibración en régimen estacionario del modelo. En color gris se muestran las celdas inactivas.	129
Figura 6.14 – Pozos de observación. En color verde los correspondientes al acuífero libre (capa 1) y en color azul los del acuífero semiconfinado (capa 3).	130
Figura 6.15 – Sector donde los niveles freáticos están por encima de la superficie topográfica. En el zoom y en números de color rojo se muestran las diferencias de cotas entre la superficie del acuífero libre y la topográfica en algunas localidades de la zona afectada.	131

Figura 6.16 – Ubicación de las lagunas alineadas en la dirección SO-NE y su interconexión en eventos lluviosos como el que se muestra (observar el desborde de la cañada del Carrizal). Fecha imagen satelital: 03/11/2013.	132
Figura 6.17 – En la foto superior pueden observarse las lagunas alineadas y aisladas que en eventos lluviosos se conectan entre sí originando líneas de flujo longitudinales en dirección y sentido SO-NE, como se observa en la foto inferior a través de las flechas. (Fuente: www.flickr.com , fotógrafo: F. Mori [®]).	133
Figura 6.18 – Esquema reformulado del Modelo Conceptual de funcionamiento del sistema acuífero.	134
Figura 6.19 – Sectores y sub Sectores de Balance Hídrico (SEBH y sSEBH, respectivamente) considerados para la etapa de calibración y valores de recarga adoptados para las zonas de recarga (período analizado 1962-1966).	135
Figura 6.20 – Zonificación de las conductividades hidráulicas y valores calibrados.	136
Figura 6.21 – Niveles freáticos Observados vs. Calculados para 1966 (Ac. Libre, capa 1).	139
Figura 6.22 – Niveles piezométricos Observados vs. Calculados para 1966 (Ac. Semiconfinado, capa 3).	139
Figura 6.23 – Mapa de residuos para el acuífero libre (capa 1).	141
Figura 6.24 – Histograma de residuos para el acuífero libre (capa 1).	141
Figura 6.25 – Mapa de residuos para el acuífero semiconfinado (capa 3).	142
Figura 6.26 – Histograma de residuos para el acuífero semiconfinado (capa 3).	142
Figura 6.27 – Freatimetría base correspondiente a 1966 (construida a partir de Kreimer, 1969 y Bitesnik, 1968, 1970) y simulada para el acuífero libre (capa 1). En línea de trazos se marca la zona de relevamiento hidrogeológico.	144
Figura 6.28 – Vectores de flujo para el acuífero libre (capa 1).	145
Figura 6.29 – Comportamiento efluente del río Carcarañá en zona aledaña a las localidades de Villa Eloísa, Arequito y Los Molinos (prov. de Santa Fe).	145
Figura 6.30 – Piezometría simulada para el acuífero semiconfinado (capa 3).	146
Figura 6.31 – Vectores de flujo para el acuífero semiconfinado (capa 3).	147
Figura 6.32 – Esquema conceptual natural entre los acuíferos libre y semiconfinado (modificado de Auge, 2004b).	147
Figura 6.33 – Sectores de recarga (verde) y descarga (amarillo) del acuífero semiconfinado.	148
Figura 6.34 – Freatimetría y direcciones de flujo en un corte transversal dirección N-S a la altura de la localidad de Marcos Juárez.	149

Figura 6.35 – Freatimetría y direcciones de flujo en un corte transversal dirección O-E a la altura de la localidad de General Roca.	149
Figura 6.36 – Balance de masas global del sistema acuífero.	149
Figura 6.37 – Esquema del balance de masas global del sistema acuífero (expresado en caudales y porcentajes). Las flechas de color rojo indican salidas de flujo del sistema, mientras que las de color azul representan entradas al mismo.	150
Figura 6.38 – Balance de masas por capas y condición de contorno. Las flechas de color rojo indican salidas de flujo del sistema, las de color azul representan entradas al mismo y las de color blanco flujos internos entre capas.	151
Figura 6.39 – Balance de masas correspondientes a los principales cursos de agua. Las flechas de color rojo indican salidas de flujo del curso, mientras que las de color azul representan entradas al mismo.	152
Figura 6.40 – Acuífero libre. Análisis de sensibilidad de los niveles respecto a las conductividades hidráulicas y de la recarga.	155
Figura 6.41 – Acuífero semiconfinado. Análisis de sensibilidad de los niveles respecto a las conductividades hidráulicas y de la recarga.	155
Figura 6.42 – Análisis de sensibilidad de las conductividades hidráulicas del acuífero libre (columna izquierda) y semiconfinado (columna derecha) en la provincia de Córdoba, cañada de San Antonio y del bloque de San Guillermo.	157
Figura 6.43 – Variación porcentual de los flujos entrantes y salientes del sistema acuífero hacia los cursos de agua respecto a los obtenidos durante la calibración al variar la recarga.	158
Figura 6.44 – Relación del flujo entrante respecto del saliente en los cursos de agua debido a la variabilidad de la recarga.	158

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1 – Caracterización de la Subregión Hidrogeológica I (tomado de Santa Cruz y Silva Busso, 1999)	31
Tabla 4.2 – Freatimetrías existentes en la zona de estudio	50
Tabla 5.1 – Materiales y datos relevantes a recopilar y/o procesar para la confección de un modelo conceptual hidrogeológico.....	56
Tabla 5.2 – Estaciones de monitoreo de la freaticimetría (tomado de Venencio, 2007)	78
Tabla 5.3 – Características de las zonas de recarga	82
Tabla 5.4 – Estaciones y variables meteorológicas procesadas – CIM-SMN.	84
Tabla 5.5 – Estaciones y variables meteorológicas procesadas – INTA.....	84
Tabla 5.6 – Coeficiente de determinación entre la Estación INTA Oliveros y Rosario Aero.	86
Tabla 5.7 – Pendientes topográficas de cada SEBH, en %.....	98
Tabla 5.8 – Variables edáficas y de escurrimiento superficial consideradas para cada zona de recarga.	99
Tabla 5.9 – Recargas estimadas en régimen estacionario.	104
Tabla 5.10 – Conductividades hidráulicas y coeficientes de almacenamiento (Fuente: Convenio DPOH-SPAR e INA-CRL, 2002).	108
Tabla 5.11 – Conductividades hidráulicas prov. de Santa Fe por diferentes autores.....	108
Tabla 6.1 – Variables hidráulicas y geométricas consideradas para los cursos de agua. (K) conductividad hidráulica vertical del material del lecho, (W) ancho del curso en la celda, (M) espesor del material del lecho del río y (C ₅₀₀) Conductancia.	122
Tabla 6.2 – Información de los pozos de bombeo (año 1966).	126
Tabla 6.3 – Resumen Unidades Litoestratigráficas (modelo inicial de cuatro capas).....	128
Tabla 6.4 – Parámetros hidráulicos iniciales adoptados para la calibración del modelo.	128
Tabla 6.5 – Valores calibrados de las conductancias de los cursos de agua.	138
Tabla 6.6 – Estadísticos del ajuste	140
Tabla 6.7 – Caudales base de los principales cursos de agua.....	153

ABREVIATURAS Y SIGLAS UTILIZADAS

Abreviaturas

AP	Antes del Presente
ca.	circa (lat.: ‘aproximadamente’, ‘cerca de’)
c.b.d.p.	cota boca de pozo
Ea.	Estancia
et. al.	et alii (lat.: ‘y otros’)
Fm	Formación
ka	miles de años
p. ej.	por ejemplo
prov.	Provincia
m b.b.p	metros bajo boca de pozo
m s.n.m	metros sobre el nivel del mar
s/d	sin datos disponibles

Siglas

AER	Agencia de Extensión Rural
APSF	Aguas Provinciales de Santa Fe
ASSA	Aguas Santafesinas SA
BDHI	Base de Datos Hidrológica Integrada
BHS	Balance Hídrico Seriado
CAAAS	Convenio Argentino Alemán de Aguas Subterráneas
CAD	Capacidad de Agua Disponible
CAI69	Campo Inchauspe 1969
CC	Capacidad de Campo
CGIAR	Consultative Group on International Agricultural Research (Grupo Consultivo para la Investigación Agrícola Internacional)
CIC	Comisión de Investigaciones Científicas de la prov. de Buenos Aires
CICyTTP	Centro de Investigaciones Científicas y Transferencia de Tecnología a la Producción
CIFASIS	Centro Internacional Franco Argentino de Ciencias de la Información y de Sistemas
CIM	Centro de Información Meteorológica
CIRN	Centro de Investigación de Recursos Naturales
CN	Curve Number (Número de Curva)
CONICET	Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
CR	Centro Regional del INTA
CRL	Centro Regional Litoral

CSI	Consortium for Spatial Information (Consortio para la Información Espacial)
CURIHAM	Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales
DNEC	Dirección Nacional de Estadística y Censos
DPOH	Dirección Provincial de Obras Hidráulicas
E	Coefficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe
EEA	Estación Experimental Agropecuaria
EGM96	Earth Gravitational Model 1996 (Modelo Geopotencial Terrestre 1996)
ET _c	Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar
EIO	Estadio Isotópico de Oxígeno
ETM+	Enhanced Thematic Mapper Plus (Mapeador Temático Mejorado +)
ET _o	Evapotranspiración del cultivo de referencia o evapotranspiración de referencia
ETP	Evapotranspiración Potencial
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación)
FCA	Facultad de Ciencias Agrarias
FCEIA	Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura
FPL	Franja Periférica de Loess
GHS	Grupo Hidrológico de Suelo
GNSS	Global Navigation Satellite System (Sistema Global de Navegación por Satélite)
GSF	Gobierno de Santa Fe
IGM	Instituto Geográfico Militar (actualmente Instituto Geográfico Nacional)
IGN	Instituto Geográfico Nacional
INA	Instituto del Agua
INDEC	Instituto Nacional de Estadística y Censos
INTA	Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria
K _c	Coefficiente del cultivo
MAG	Ministerio de Agricultura y Ganadería
MAP	Mar de Arena Pampeano
MASPyMA	Ministerio de Aguas, Servicios Públicos y Medio Ambiente (provincia de Santa Fe)
MDE	Modelo Digital de Elevación
MDT	Modelo Digital del Terreno
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NRCS	Natural Resources Conservation Service (Servicio de Conservación de Recursos Naturales)
OSN	Obras Sanitarias de la Nación
PMP	Punto de Marchitez Permanente
R ²	Coefficiente de determinación
RGB	Red-Green-Blue (Rojo-Verde-Azul)
RIAP	Red de Información Agroeconómica para la Región Pampeana

RMA	Residuo Medio Absoluto
RRCMN	Raíz del Residuo Cuadrático Medio Normalizado
SCS	Soil Conservation Service (Servicio de Conservación de Suelos)
SEA	Servicio de Evaluación Ambiental de Chile
SEBH	Sector de Estudio de Balance Hídrico
SEIA	Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental
SIG	Sistema de Información Geográfica
SIGA	Sistema de Información y Gestión Agrometeorológica
SMN	Servicio Meteorológico Nacional
SNIH	Sistema Nacional de Información Hídrica
SPAR	Servicio Provincial de Agua Rural
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission (Misión Topográfica Radar de Trayectos Cortos)
sSEBH	sub Sector de Estudio de Balance Hídrico
SSRH	Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación
TM	Thornthwaite y Mather
UAER	Universidad Autónoma de Entre Ríos
U	Umbral
UG	Unidad Geomorfológica
UNCPBA	Universidad Nacional del Centro de la prov. de Buenos Aires
UNR	Universidad Nacional de Rosario
USDA	United States Department of Agriculture (Departamento de Agricultura de Estados Unidos)
USGS	United States of Geological Survey (Servicio Geológico de Estados Unidos)
WGS84	World Geodetic System 1984 (Sistema Geodésico Mundial 1984)

1. INTRODUCCIÓN

1.1. MOTIVACIÓN

La cuenca inferior del río Carcarañá se extiende desde el sudeste de la provincia de Córdoba y ocupa la zona centro – sur de la provincia de Santa Fe. El río toma su nombre desde la confluencia del río Tercero y el sistema conformado por los ríos Cuarto y Saladillo, en la provincia de Córdoba, e ingresa en la provincia de Santa Fe en cercanías de la localidad de Cruz Alta. Luego de recibir los aportes del arroyo de las Tortugas en su margen izquierda, y del arroyo de las Mojarras en su margen derecha, ambos en el límite interprovincial entre Santa Fe y Córdoba, recorre la provincia de Santa Fe a lo ancho para desembocar en el río Coronda, recibiendo previamente el aporte del arroyo Leones en su margen derecha, al este de la localidad de San José de la Esquina, y del arroyo Cañada de Gómez en su margen izquierda, cerca de la localidad de Carcarañá.

Dicha cuenca está enclavada en una zona agrícola ganadera por excelencia, donde en los últimos tiempos hubo una evolución desde la ganadería a una actividad agrícola predominante, siendo los cultivos principales: soja, maíz, trigo, sorgo y girasol. La provincia de Santa Fe aportó con el 18% de la producción total nacional de soja en la campaña 2016/17, en donde un 26%, aproximadamente, fue proporcionado por el área de estudio. Más de 40 localidades se encuentran ligadas a la cuenca baja del río Carcarañá, las que, además de la agricultura y la ganadería, tienen su sustento en diversos emprendimientos comerciales e industriales, en donde la provisión de agua de calidad adquiere un carácter relevante para el sostén de la población.

Si bien las localidades ubicadas al este de la provincia de Santa Fe captan agua potable de los cursos de agua superficiales, la problemática vinculada a la calidad y cantidad del agua disponible se manifiesta en el oeste en la provincia. Las aguas subterráneas constituyen la única fuente disponible, a través de captación mediante pozos de bombeo y posterior tratamiento mediante diversos métodos, como el de ósmosis inversa.

La gran mayoría de los pozos de captación se encuentran ubicados en los acuíferos que posee el paquete sedimentario cuaternario de la llanura pampeana (lo que informalmente se denomina: Sedimentos Pampeanos o Formación Pampeana) y en menor proporción en los localizados en las arenas que infrayacen a los Sedimentos Pampeanos. De los acuíferos citados, los pozos de captación se ubican en aquellos acuíferos que, fundamentalmente, provean agua de razonable

calidad, ya que existen otros en donde las aguas no son aptas para el consumo, y con variaciones a nivel local dentro de la misma cuenca.

Por lo mencionado precedentemente se propone definir y modelar el funcionamiento del sistema acuífero de la cuenca inferior del río Carcarañá, como base para la implementación de un futuro plan de gestión del uso sustentable del agua subterránea en la zona de estudio.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo General

Definir el modelo conceptual que represente el funcionamiento hidrodinámico del sistema acuífero en la cuenca inferior del río Carcarañá (provincias de Santa Fe y Córdoba), y validarlo mediante la simulación numérica del flujo de agua subterránea.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Reproducir geológicamente el subsuelo del sistema en estudio, teniendo en cuenta la escala del modelo a desarrollar.
- Analizar y conceptualizar las distintas variables agrohidrológicas que intervienen en el proceso del cálculo de recargas.
- Definir un modelo numérico de balance hídrico a los efectos de su implementación en la cuantificación de recargas.
- Zonificar la recarga en la zona de estudio.
- Estudiar el comportamiento hidráulico entre los acuíferos libre y semiconfinado.
- Implementar un modelo numérico que valide el funcionamiento del sistema acuífero.
- Poner en práctica una metodología de trabajo para la construcción de los modelos conceptual y numérico de un sistema acuífero genérico y así poder comprender y conceptualizar su funcionamiento, identificando las diversas variables intervinientes y apreciando su grado de importancia en el mismo.

1.3. HIPÓTESIS

- Los acuíferos libre y semiconfinado se están comportando hidráulicamente como un único sistema y se encuentran conectados a través del acuitardo, donde existen flujos ascendentes y descendentes a través del mismo.
- El conocimiento estratigráfico es clave a fines de una correcta modelación de la hidrología subterránea.

1.4. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Los 18.000 km² que conforman el área de estudio se encuentran ubicados en plena Llanura Pampeana, abarcando la cuenca inferior del Río Carcarañá (Figura 1.1). Esta presenta un paisaje con evidentes rasgos tectónicos y una morfología en la que se destaca la participación hídrica y eólica entre los procesos geomórficos de superficie, con un desnivel máximo de la superficie topográfica cercano a los 120 m. El 57% del área de estudio corresponde a la cuenca baja del río Carcarañá, y el resto a cuencas de cursos contiguas que no aportan al mismo.

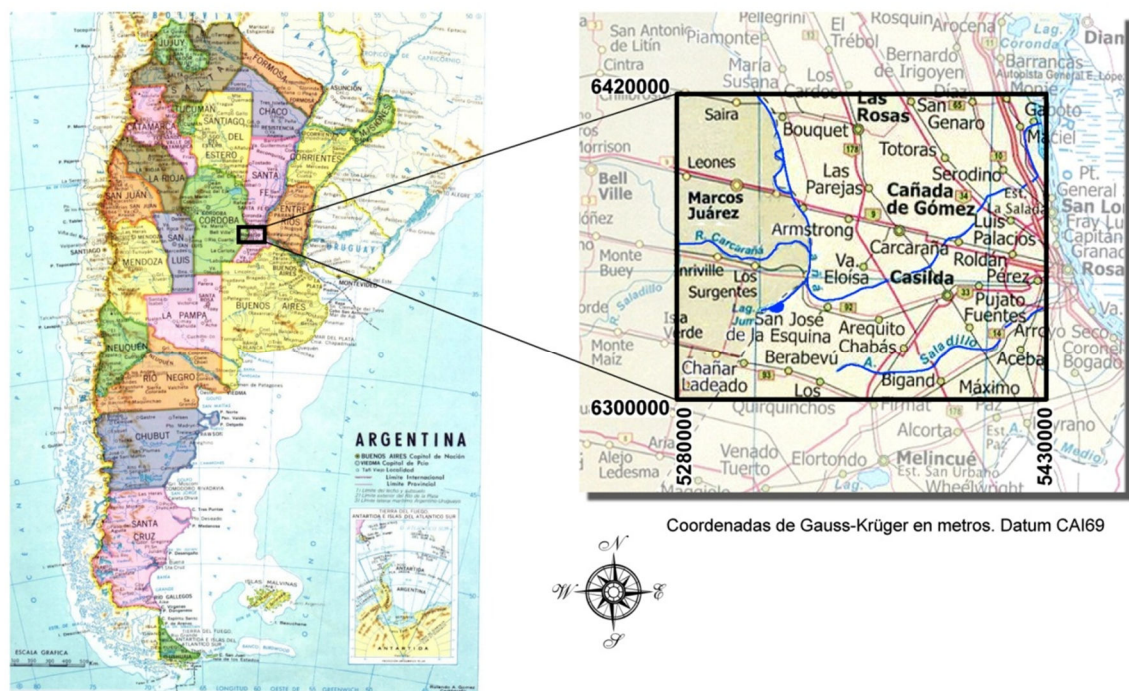


Figura 1.1 – Localización del área de estudio.

Políticamente, en la provincia de Santa Fe los departamentos que presentan mayor extensión en el área de estudio son los de Belgrano, Iriondo, San Lorenzo y Caseros, siguiéndolos en importancia los de Rosario y San Jerónimo, y finalmente los de Constitución, General López y

San Martín. En la provincia de Córdoba, fundamentalmente es el departamento Marcos Juárez el de mayor superficie, con un muy pequeño aporte del departamento Unión.

Como muestra la Figura 1.1, el área de estudio está delimitada, según el sistema cartográfico argentino Gauss-Krüger Faja 5 Datum Campo Inchauspe 1969 (CAI69), por las coordenadas $X=6.300.000$ m al sur, $X=6.420.000$ m al norte, $Y=5.280.000$ m al oeste y $Y=5.430.000$ m al este. En coordenadas geográficas, podemos ubicar dicha área entre los $32^{\circ} 20' 33''$ y $33^{\circ} 26' 38''$ de Latitud Sur y los $62^{\circ} 21' 54''$ y $60^{\circ} 44' 37''$ de Longitud Oeste.

2. ANTECEDENTES

El aporte de la mayoría de los autores citados en el contexto de este trabajo, y correspondiente a las distintas disciplinas involucradas, se verán reflejados en detalle a lo largo de los posteriores capítulos. Aquí solamente se hará un listado de los diferentes autores y sus contribuciones.

La geología y geomorfología de la llanura pampeana fue objeto de diversos trabajos de campo e investigaciones, y en donde la zona de estudio adquirió un papel muy importante. Los estudios geológicos se iniciaron con los llevados a cabo por Stappenbeck (1926), basados en investigaciones de carácter hidrogeológicas ejecutadas en diferentes partes del país, con perforaciones propias y el aporte de distintas administraciones de ferrocarriles y de particulares, pasando por Frenguelli (1928), Castellanos (1918, 1928, 1936, 1974), Pasotti y Castellanos (1963), Pasotti (1956, 1963, 1966, 1968, 1969, 1974a, 1974b, 1987), Pasotti y Canoba (1979), Gómez (1995), entre otros, y llegando finalmente en la actualidad, a investigadores como Iriondo, Kröhling, Brunetto y Carignano que abordaron enfoques actualizados respecto a análisis geológicos y geomorfológicos de la llanura pampeana norte, viéndose esto reflejado en una importante cantidad de publicaciones científicas (Iriondo, 1987, 2010; Iriondo y Kröhling, 1995; Kröhling, 1998a, 1998b, 1999a; Carignano, 1999; Kröhling e Iriondo, 2003; Brunetto e Iriondo, 2007; Costa *et al.*, 2014; Carignano *et al.*, 2014; Kröhling y Carignano, 2014, entre otras).

Se expusieron con detalle los evidentes rasgos tectónicos que caracterizan la zona de estudio como la Falla de San José del Salteño, la Fosa tectónica de la cañada de San Antonio, el pilar tectónico de Armstrong, la Falla de El Trébol, etc., junto a la conocida Falla de Tostado – Selva, y donde vale destacar la definición del Bloque de San Guillermo, cuya extensión hacia el sur confluye con el pilar tectónico de Armstrong, definido por Pasotti y Castellanos (1963), y que se encuentra en la zona de estudio, como así también la caracterización geomorfológica y geológica de los macizos sedimentarios en dicha zona.

En el campo de la hidrogeología diversos autores aportaron a través de trabajos e investigaciones al conocimiento de las aguas subterráneas de la zona. Stappenbeck (1926), Gollán y Lachaga (1939), Kreimer (1969), Bitesnik (1968, 1970), Convenio Argentino Alemán de Aguas Subterráneas (CAAAS, 1973), Filí y Tujchneider (1977), Bojanich y Risiga (1975, 1981), Pasotti y Albert (1995), Filí *et al.* (1999), Mauro y Sánchez (1999), Santa Cruz y Silva Busso (1999), Venencio y Manavella (1999), Pérez *et al.* (2000), Auge (2004a), Auge *et al.* (2006), Iriondo (1987, 2011), Díaz y Dalla Costa (2000), Tujchneider *et al.* (2005), Venencio (2007), Venencio y Sosa (2014), Blarasin *et al.* (2000, 2014), entre otros, han desarrollado trabajos de carácter general,

regional y local, con aplicación en la zona de estudio. Desde la delimitación de regiones hidrogeológicas, pasando por estudios de perfil regional como los del CAAAS (1973), primer antecedente importante sobre hidrogeología de un área importante de la llanura pampeana norte, con gran cantidad de datos que luego fueron reinterpretados por Iriondo, Kröhling y Brunetto en trabajos estratigráficos, Bitesnik (1968, 1970), Kreimer (1969), Filí y Tujchneider (1977), Filí *et al.* (1999), Venencio (2007), Venencio y Varni (2003), Rodríguez (2005), Venencio y García (2005, 2006, 2007), Iriondo (2011), Venencio y Sosa (2014), Blarasin *et al.* (2000, 2014), Giannini *et al.* (2015) y otros, hasta estudios de carácter local como los llevados a cabo, por ejemplo, por Mauro y Sánchez (1999), Aguas Provinciales de Santa Fe (APSF, 1996) y Pérez *et al.* (2000) en localidades de la zona de estudio como San Lorenzo y Cañada de Gómez, muestran las distintas escalas que alcanzaron dichos trabajos.

En lo que respecta a hidrología, se pueden citar los trabajos de Mazza (1962), Pasotti (1964, 1966), Pasotti y Albert (1991, 1995), Riccardi *et al.* (2008a, 2008b, 2013a, 2013b), Scuderi *et al.* (2008), Golín *et al.* (2010), Barchiesi, *et al.* (2013), Basile *et al.* (2013), Burgués *et al.* (2014), Díaz Losada *et al.* (2015), Gardiol (2015), Stenta *et al.* (2014, 2016), Baraquet *et al.* (2017) y Herrero *et al.* (2017), que refieren al río Carcarañá, los arroyos Cañada de Gómez, Ludueña, Saladillo y Las Turbias. A su vez, varias reparticiones nacionales y provinciales aportan conocimientos a través de diversos trabajos. La Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (SSRH) tiene a disposición vía web su Base de Datos Hidrológica Integrada (BDHI), donde brinda información sobre caudales, alturas, etc. de los cursos de agua de la diversas cuencas hídricas del país (SSRH, 2017a), y en versiones digitales el Atlas Digital de los Recursos Hídricos Superficiales de la República Argentina confeccionado en conjunto con el Instituto del Agua (Giraut *et al.*, 2002), que luego fuera incorporado a las series de Publicaciones Hidrometeorológicas (SSRH, 2017b). Por otra parte, el Gobierno de la provincia de Santa Fe, a través de sus distintas Secretarías y Ministerios, ha desarrollado en el tiempo varios trabajos de licitaciones y proyectos hidrológicos e hidráulicos destinados a obras que afectan cursos en la zona de estudio, y que pueden consultarse en el Centro de Documentación del Ministerio de Aguas, Servicios Públicos y Medio Ambiente de la provincia (MASPyMA, 1936-2011). Además, se proyecta la construcción de una serie de acueductos en la provincia de Santa Fe, para proveer de agua potable, previa captación de agua cruda superficial a muchas de las localidades de la provincia (GSF, 2018).

La edafología aportó mediante diversos trabajos de variada índole a la caracterización de los suelos de la zona de estudio. Entre ellos cabe citar los aportes de Bellón *et al.* (1958), Marelli *et al.*

(1984), el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA, 1985a, 1985b), Damiano y Taboada (2000), Hämmerly (2001), Weir *et al.* (2004), Montico *et al.* (2006), Steinbach y Álvarez (2007), Zuliani y Costanzo (2007), Zimmermann y Basile (2008), Zimmermann *et al.* (2008), Andriani (2009), entre otros. Además, el INTA aporta al mejor conocimiento zonal de los suelos, ya sea a nivel local a través de sus Cartas de Suelos en escala 1:50.000 (INTA, 1974-1988), como así también a nivel regional (INTA-MAG, 1981; INTA, 1990; INTA-Aeroterra SA, 1995; Giorgi *et al.*, 2002, 2005). INTA posee además la plataforma vía web GeoINTA con material georreferenciado de suelos, y en particular de los suelos de la República Argentina en escala 1:500.000 (GeoINTA, 2013), y de las provincias de Santa Fe y Córdoba en escala 1:50.000 (Tosolini y Sapini, 2014; GeoINTA, 2017).

Por otra parte, diversos autores han hecho sus aportes al conocimiento del área climatología en la zona de estudio y a diversas escalas. Venencio (2007), Giraudo *et al.* (2017), Zucarelli y Paris (2015), hasta el Atlas Climático Digital de la República Argentina de INTA (Bianchi y Cravero, 2010; Cravero *et al.*, 2017). Además, diversas reparticiones disponen de información meteorológica a través de bases de datos sistematizadas de diversas estaciones meteorológicas, que incluyen el área de estudio, como las del Centro de Información Meteorológica (CIM) del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y el Sistema de Información y Gestión Agrometeorológica (SIGA) de INTA, entre otras.

Algo semejante ocurre con el área de gestión de los recursos, donde existen proyectos de investigación sobre los efectos que acarrea el uso intensivo del suelo sobre los recursos hídricos, y el desarrollo de tecnología relacionada con la gestión sustentable de dichos recursos como los del Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales (CURIHAM, 2011) y el de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura de la Universidad Nacional de Rosario en conjunto con el Centro Internacional Franco Argentino de Ciencias de la Información y de Sistemas (FCEIA-CIFASIS, 2015), sumados a los de otros autores como Castellarín *et al.* (2013).

3. METODOLOGÍA

La Figura 3.1 muestra un esquema que representa las distintas etapas que normalmente se persiguen para la construcción de un modelo numérico o matemático de flujo de agua subterránea.

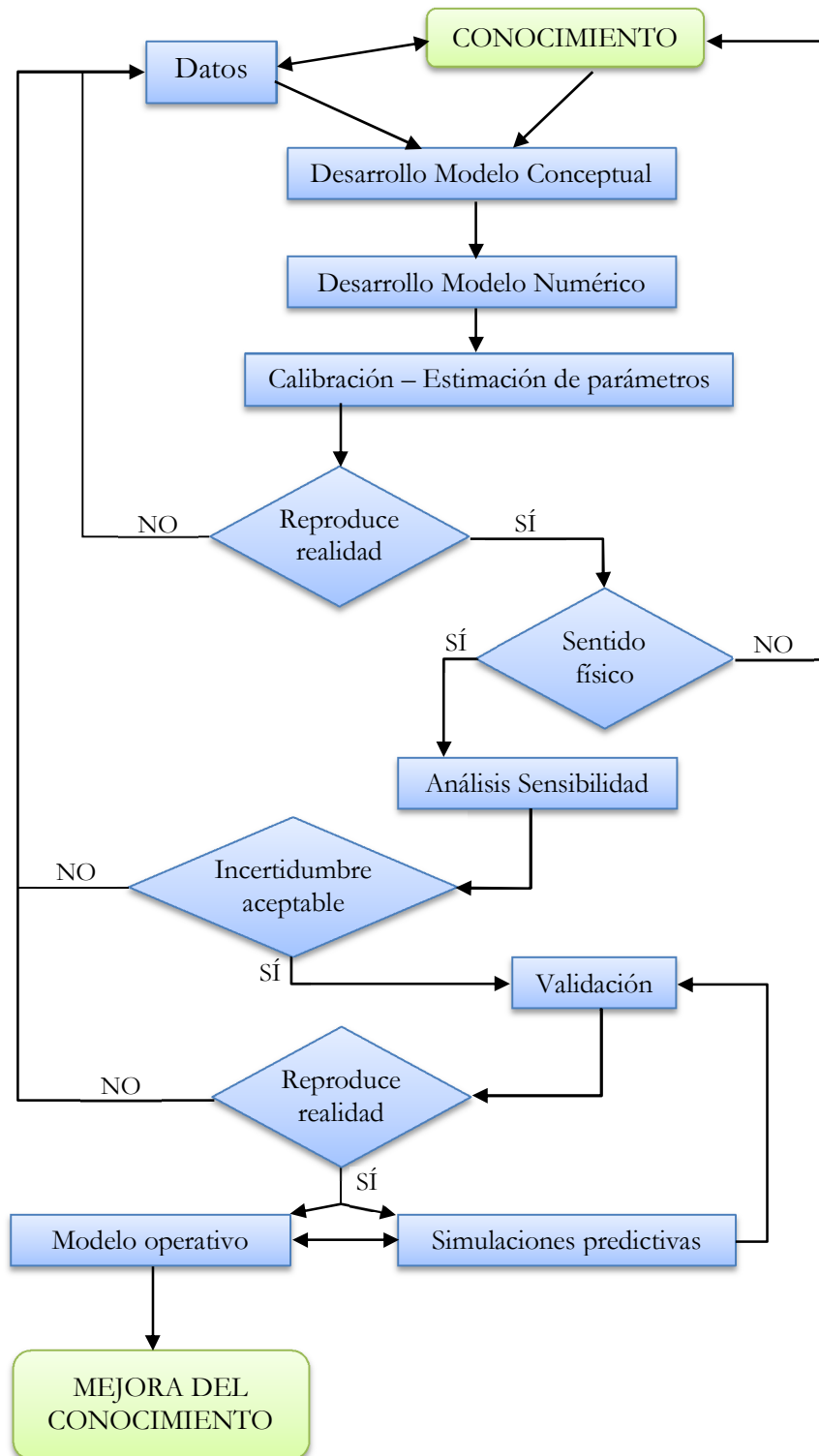


Figura 3.1 – Metodología para la modelación numérica del flujo subterráneo (tomado de Molinero y Samper, 2000).

La primera etapa es la construcción del modelo conceptual de funcionamiento del sistema acuífero desarrollado a partir de la recopilación de datos disponibles y estudios de antecedentes. Como segunda etapa, y basado en dicho modelo conceptual, se tiene la construcción del modelo matemático, y que involucra la definición de la estructura del mismo (definición del dominio del modelo y su discretización espacial, las condiciones de contorno, y la zonificación de los parámetros hidráulicos que se incluirán en las ecuaciones que gobiernan el movimiento del flujo subterráneo). Luego sigue la etapa de calibración del modelo numérico, en donde se ajustan determinados parámetros con el objetivo de lograr un buen ajuste entre los valores de niveles freáticos y piezométricos observados del sistema acuífero y los calculados por el modelo, lo que permite junto con valores de estadísticos y un balance de masas coherentes, validar el modelo conceptual propuesto inicialmente. Los errores involucrados en el modelo numérico final pueden ser evaluados a través de un análisis de sensibilidad posterior. En algunos casos puede obtener datos adicionales para mejorar o robustecer el modelo conceptual. Una vez construidos los modelos conceptual y numérico, se está en condiciones de realizar la simulación o predicción de la evolución futura para las distintas hipótesis que se contemplen, de acuerdo al objetivo del estudio en cuestión (Vives *et al.*, 2012).

En el presente trabajo los pasos desarrollados fueron hasta el análisis de sensibilidad y la evaluación de su incertidumbre, y no se realizó la validación del modelo numérico ni se hicieron simulaciones predictivas.

Para desarrollar el modelo numérico que simuló el flujo subterráneo del sistema acuífero en estudio, se empleó el código de simulación de flujo cuasi-tridimensional MODFLOW (Harbaugh, 2005) desarrollado por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), y que resuelve las ecuaciones de flujo de agua subterránea expresadas en derivadas parciales a través del método de diferencias finitas. Particularmente en este trabajo, se empleó su versión amigable Visual MODFLOW 2011.1 (Waterloo Hydrogeologic, 2015).

La ecuación que gobierna el movimiento del flujo de agua subterránea en un volumen elemental perteneciente a un medio tridimensional (x, y, z), heterogéneo y anisótropo, y con aportes externos, se muestra en la Ecuación (3.1) (Harbaugh, 2005).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.1)$$

donde:	K_{xx} , K_{yy} y K_{zz}	conductividades hidráulicas a lo largo de los ejes x, y, z, que se asumen paralelos a los ejes principales de anisotropía (L/T)
	h	carga hidráulica (L)
	W	flujo volumétrico por unidad de volumen y que representa las fuentes y/o sumideros de agua, en donde si $W < 0$ representa flujo saliente del sistema y si $W > 0$ significa que el flujo ingresa al sistema (T ⁻¹)
	S_s	almacenamiento específico del material poroso (L ⁻¹)
	t	tiempo (T)

La ecuación presentada no es más que la aplicación del principio de conservación de la masa y de la ley de Darcy, es decir que entradas menos salidas son iguales a variación de almacenamiento en el volumen elemental en un intervalo de tiempo.

En el presente trabajo la modelación numérica se implementó en estado estacionario. Por lo tanto, al no producirse variación de almacenamiento, el término derecho de la ecuación se anula, quedando lo que se denomina ecuación de Laplace, y en el volumen elemental no se registra ninguna variación en el contenido de agua a lo largo del tiempo.

4. DESCRIPCIÓN DEL MEDIO FÍSICO

4.1. CLIMATOLOGÍA

El clima de la zona de estudio, de acuerdo a la clasificación climática de Köppen, es Cfa (subtropical húmedo), con veranos lluviosos y cálidos, sin estación seca (Kottek *et al.*, 2006; Rubel y Kottek, 2010; Rohli y Vega, 2015).

Las condiciones de relieve de la región, una llanura alejada de los cordones montañosos de rumbo submeridional, permiten el libre desplazamiento de las masas de aire tanto frías como cálidas. Las precipitaciones son, en su mayoría, de origen frontal, con preponderancia de las correspondientes a formaciones de frente frío sobre las de cálidos. La humedad es aportada por el anticiclón del Atlántico Sur, que entra al país por el NE, a través de una rama desviada de los vientos alisios del SE. El mayor enfriamiento continental del invierno y el desplazamiento del anticiclón hacia el N, hacen más dificultoso el ingreso de humedad, con lo cual las lluvias disminuyen notablemente (Pasotti y Albert, 1995).

De acuerdo al Atlas climático digital de la República Argentina del INTA (Bianchi y Cravero, 2010; Cravero *et al.*, 2017) para el período 1921-2000, se presentan para la zona de estudio los mapas de precipitación media anual, como así también los mapas de precipitación semestral correspondientes a los semestres cálido (octubre a marzo) y frío (abril a setiembre) (figuras 4.1 a 4.3). Puede apreciarse cómo las precipitaciones tienen el máximo en la región oriental, disminuyendo hacia el oeste.

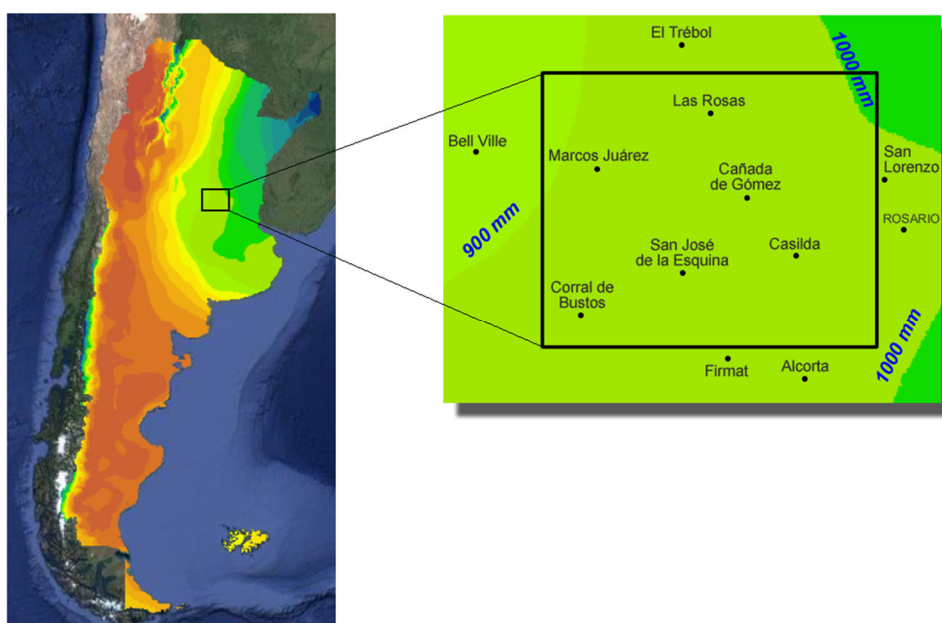


Figura 4.1 – Precipitación media anual (período 1921-2000) en la zona de estudio (recuadro negro) (Fuente: Bianchi y Cravero, 2010).

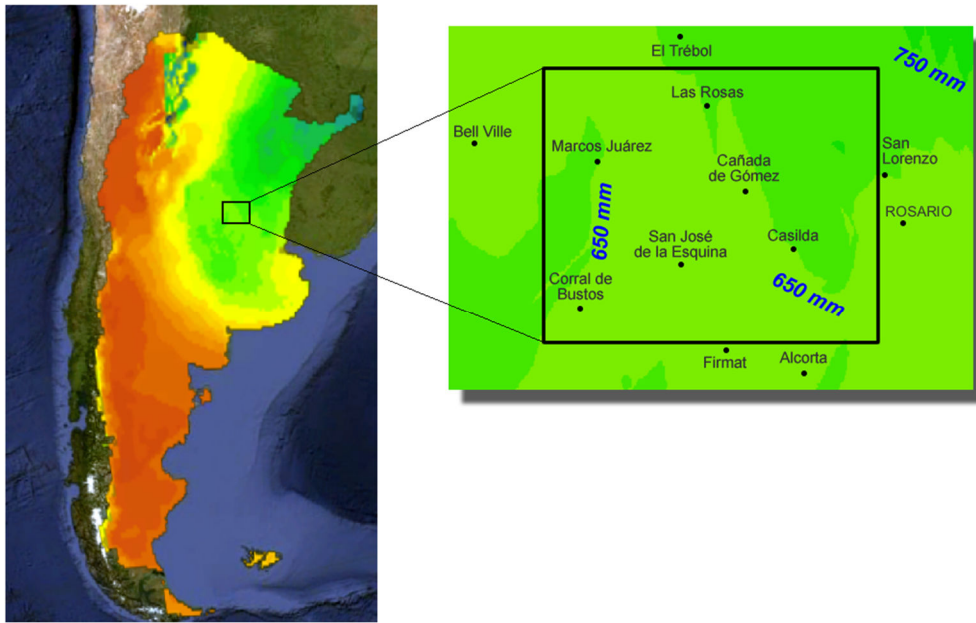


Figura 4.2 – Precipitación semestral correspondiente al semestre cálido (octubre a marzo) - período 1921-2000 - en la zona de estudio (Fuente: Cravero *et al.*, 2017).

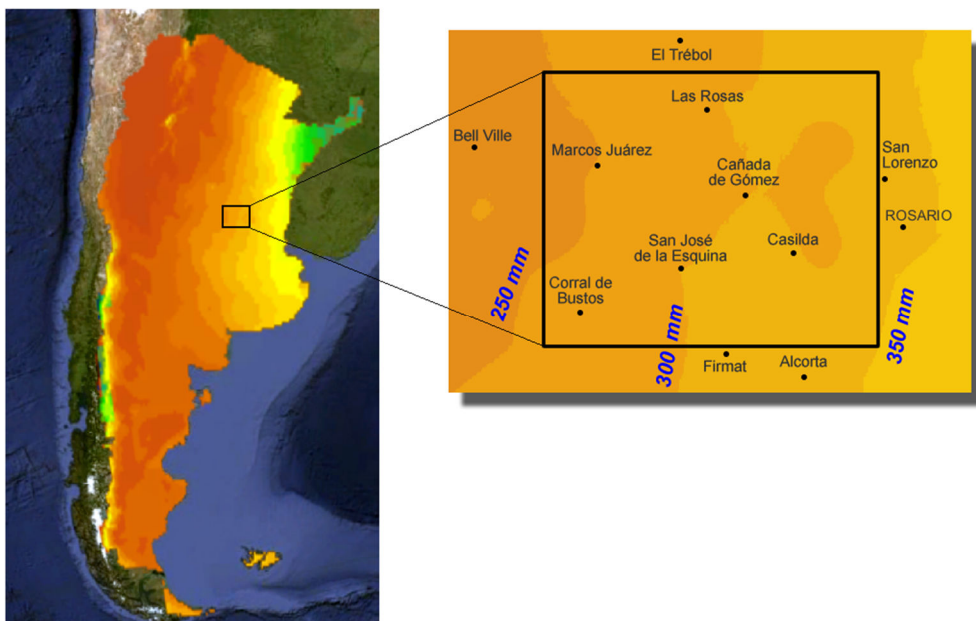


Figura 4.3 – Precipitación semestral correspondiente al semestre frío (abril a setiembre) - período 1921-2000 - en la zona de estudio (Fuente: Cravero *et al.*, 2017).

A través de información pluviométrica recopilada en diversas estaciones de la provincia de Santa Fe (Rafaela, Oliveros, La Silesia, Marcos Juárez y Zavalla) entre 1971 y 2000, Venencio (2007) manifiesta que el máximo mensual de precipitación se produce al final del verano y principios de otoño (marzo, abril), mientras que el mínimo en invierno (junio-agosto). En la zona de estudio en la provincia de Santa Fe, la concentración pluvial es desde octubre a marzo, y en algunos casos abril, cuando cae más del 70% de la precipitación anual, mientras que en la estación seca (resto

del año) se produce solamente un 30%, y menos aún del total anual. Aun así, dicha región tiene lluvias todo el año. En la llanura cordobesa el 82% de las lluvias se concentran en primavera-verano y sólo el 18% en otoño-invierno, de acuerdo a registros de precipitación corresponden a series de 30 a 76 años (Blarasin *et al.*, 2000).

El período más húmedo es octubre-marzo, cuando el máximo de precipitación se mantiene en el este y el mínimo al oeste, como muestra la Figura 4.2. La misma tendencia se aprecia en la Figura 4.3 para el período más seco (abril-setiembre). Las lluvias son de dos tipos: chubascos y lluvias menos intensas, pero persistentes y extensas, que ocurren con el desarrollo de frentes retrógrados y durante sudestadas, durante el invierno; y lluvias intensas de tipo convectivo durante el verano. Sin embargo es necesario poner en relieve que las tormentas convectivas, que hasta la década de los '60 en la región santafesina eran características del verano, paulatinamente fueron aumentando su frecuencia de ocurrencia en la temporada invernal generando lluvias intensas y hasta granizo durante el invierno (Venencio, 2007).

La Figura 4.4 muestra la variación en la zona de estudio de la temperatura media anual, mientras que las figuras 4.5 y 4.6 grafican la variabilidad térmica media mensual en el mes más cálido (enero) y en el más frío (julio), respectivamente. Para el período 1921-2000, la temperatura media anual promedio para la zona de estudio es cercana a los 18° C, y mientras en enero la temperatura media mensual oscila entre 25° C y 26° C, en julio varía entre 10° C y 11° C, aproximadamente.

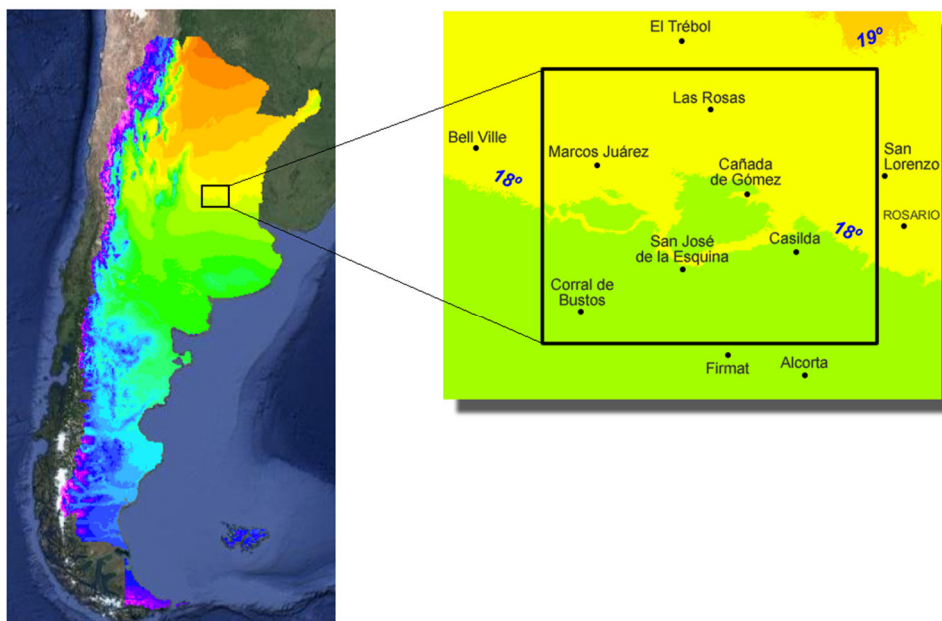


Figura 4.4 – Temperatura media anual (período 1921-2000) en la zona de estudio (Fuente: Bianchi y Cravero, 2010).

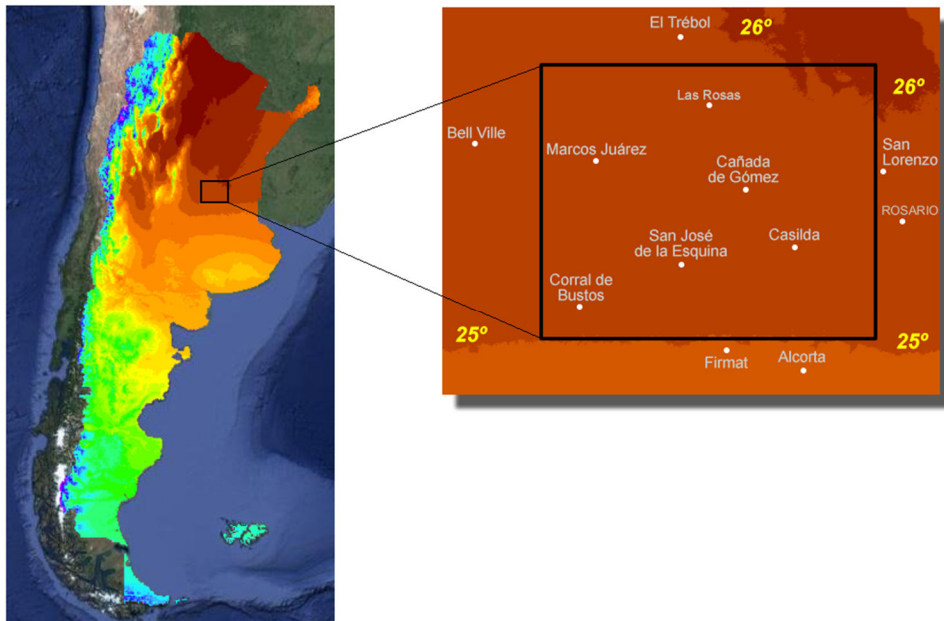


Figura 4.5 – Temperatura media mensual de enero (período 1921-2000) en la zona de estudio (Fuente: Bianchi y Cravero, 2010).

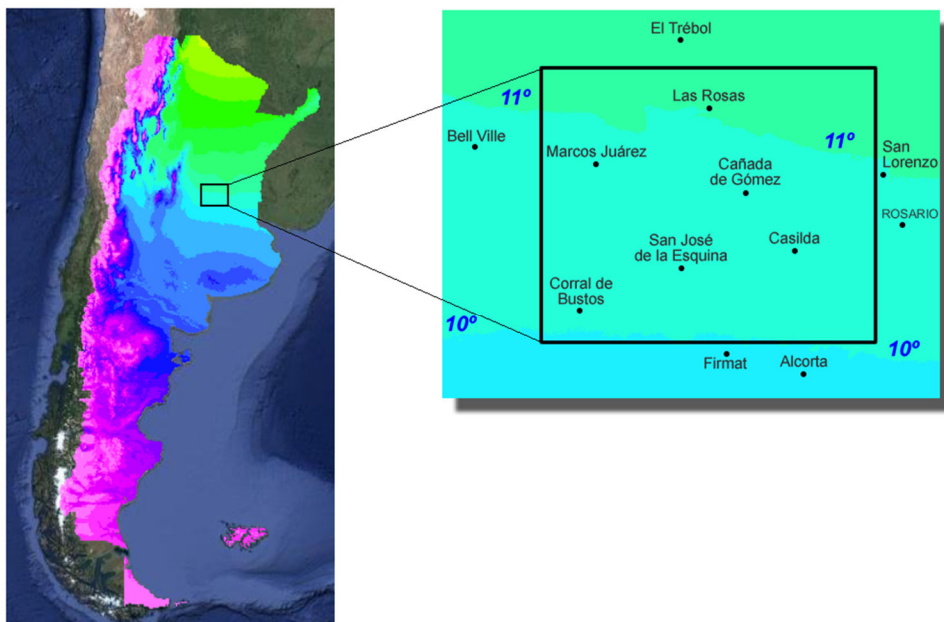


Figura 4.6 – Temperatura media mensual de julio (período 1921-2000) en la zona de estudio (Fuente: Bianchi y Cravero, 2010).

4.2. GEOLOGÍA

Varios investigadores han aportado al mejor conocimiento de la geología de la llanura pampeana a través de sus trabajos de campo y, especialmente, del área de estudio, como Stappenbeck (1926), Frenguelli (1928), Castellanos (1918, 1928, 1936, 1974), Pasotti y Castellanos (1963), Pasotti (1956, 1963, 1968, 1969, 1974a, 1974b), entre otros. Recientemente, investigadores como Iriondo, Kröhling y Brunetto han abordado enfoques actualizados respecto a la geología de la llanura pampeana norte, aplicando técnicas estratigráficas, sedimentológicas y geomorfológicas

con base en trabajos de campo y numerosos datos de laboratorio, incluyendo dataciones absolutas de sedimentos, lo que se vio reflejado en una importante cantidad de publicaciones científicas en la temática. Por este motivo, el marco geológico de la zona de estudio fue basado fundamentalmente de trabajos de estos últimos autores citados.

4.2.1. Tectónica

La zona de estudio presenta una topografía muy particular y destacada que evidencia rasgos tectónicos en el paisaje de la llanura, y que motivara a Castellanos y Pasotti a llevar adelante diversos trabajos de investigación en la región.

Investigaciones posteriores en la región vinculadas con el análisis estructural se centraron en la correlación estratigráfica y el análisis geológico y geomorfológico (Iriondo, 1987; Kröhling, 1998a, 1999a).

Recientemente se definió el Bloque de San Guillermo (Kröhling e Iriondo, 2003; Brunetto e Iriondo, 2007), una unidad morfoestructural con definida identidad en la llanura pampeana norte (117–95 m s.n.m). Su prolongación hacia el sur coincide con el pilar tectónico de Armstrong, definido por Pasotti y Castellanos (1963). Éste ocupa la porción central superior de la zona de estudio del presente trabajo y que de aquí en más se citará a través de la primera de las denominaciones (Figura 4.7).

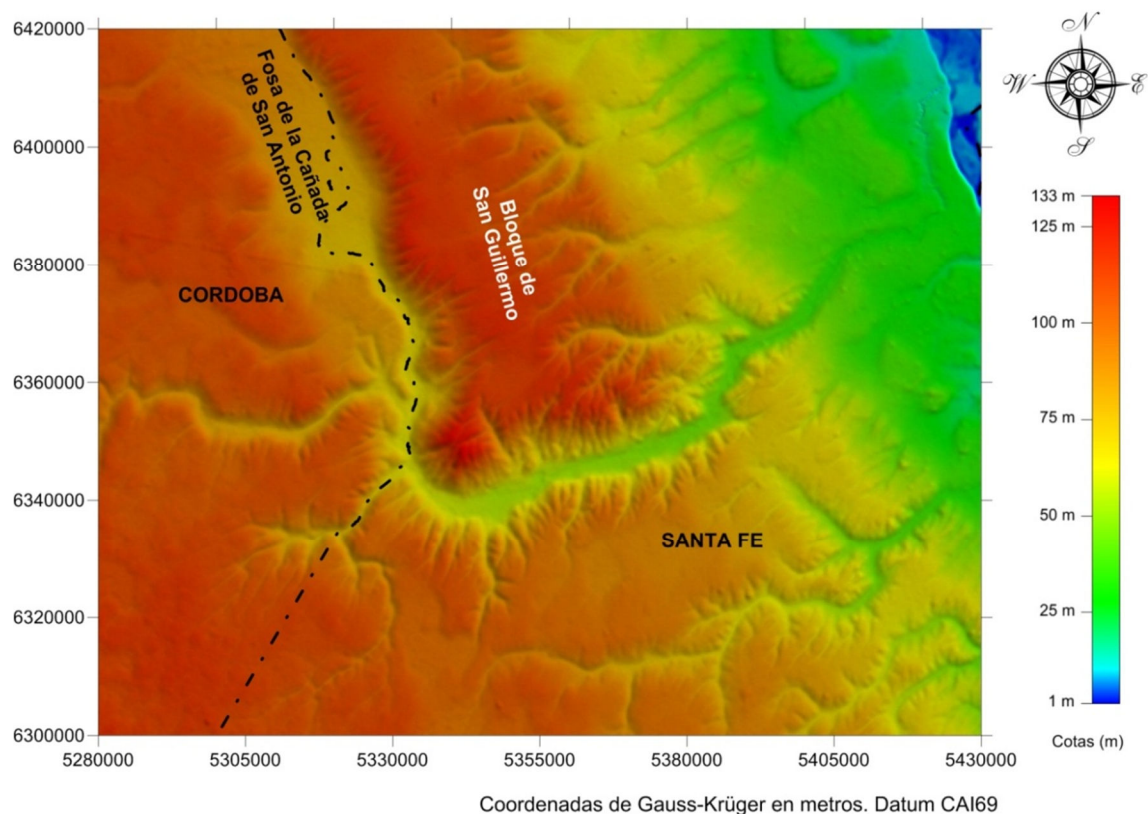


Figura 4.7 – Ubicación en la zona de estudio del Bloque de San Guillermo y la Fosa tectónica de la cañada de San Antonio a través del Modelo Digital de Elevaciones SRTM (NASA).

Según Kröhling e Iriondo (2003), el Bloque de San Guillermo es un sector elevado de la llanura limitado por fracturas y fallas reactivadas por neotectónica. Su mayor parte se encuentra en la provincia de Santa Fe, con excepción de un sector del noreste de la provincia de Córdoba. Su superficie constituye una planicie prácticamente horizontal con muy leve pendiente general hacia el ENE y, sólo localmente, está atravesado por algunas cañadas o paleocauces. Presenta un desnivel de 15 a 35 m respecto a las unidades vecinas.

El límite oeste del bloque es la Falla Tostado – Selva (definida por Pasotti y Castellanos, 1963), reactivada en el Pleistoceno Tardío (Brunetto e Iriondo, 2007), ver Figura 4.8. Estos últimos autores comprobaron al norte de la presente área de estudio la existencia de dicha falla y su reciente reactivación a través del análisis de imágenes satelitales, del rechazo de estratos observados en perforaciones ejecutadas a ambos lados del lineamiento y de indicadores sedimentológicos y estratigráficos en afloramientos ubicados en el norte del bloque. La falla presenta una traza irregular formada por una sucesión de segmentos rectos de 10 a 30 km de longitud, orientación variable y dirección general norte – sur. La falla aparece algo al norte de la localidad de Tostado y aumenta su desnivel y altura hacia el sur, hasta terminar bruscamente sobre la margen norte del río Carcarañá, a 420 km de distancia. Forma una escarpa de pendiente constante y superficie regular afectada por erosión hídrica (Pasotti y Castellanos, 1963).

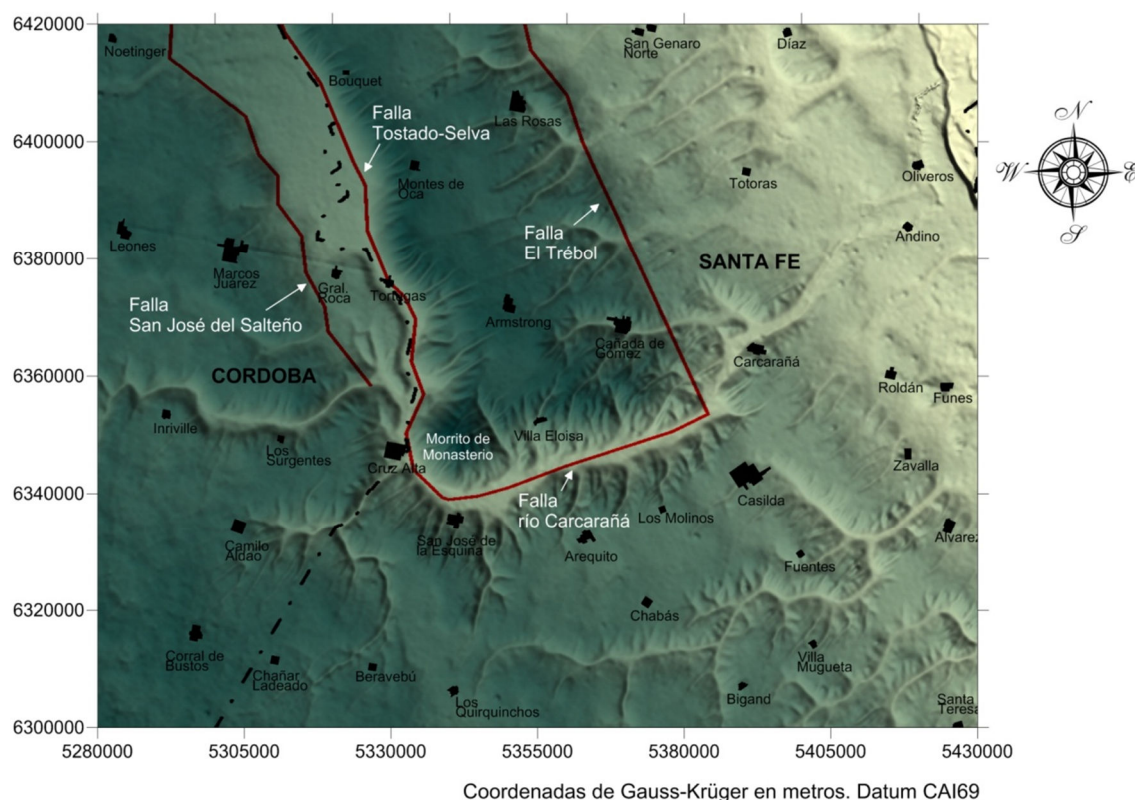


Figura 4.8 – Esquema simplificado de las Fallas de San José del Salteño, Tostado – Selva, El Trébol y del río Carcarañá. Vale aclarar que se tratan de lineamientos vinculados a fallas o sistemas de fallas.

El límite oriental del Bloque de San Guillermo, y en el sector sur del mismo, está representado por la escarpa de la Falla El Trébol (definida por Pasotti y Castellanos, 1963; Kröhling, 1998a, 1998b), de 3 a 8 km de ancho, 4 a 7‰ de gradiente y 15 a 30 m de desnivel, aumentando localmente a 38 m por erosión retrocedente en las cabeceras de arroyos locales.

El límite sur del bloque corresponde a una dislocación menor ortogonal a la Falla Tostado – Selva y que es recorrida por el río Carcarañá entre Arteaga y Berreta (Pasotti y Castellanos, 1963).

Por último, adosado en el extremo sudoeste del bloque, y limitado por las fallas Tostado – Selva y El Trébol y por fracturas ortogonales de segundo orden, se encuentra un bloque elevado de reducida dimensión respecto del Bloque de San Guillermo. En varios trabajos se lo cita como horst o “Morrito” de Monasterio (Pasotti, 1974a, 1974b).

La zona de estudio también incluye la denominada Fosa tectónica de la cañada de San Antonio (Pasotti y Castellanos, 1963) que puede distinguirse en la Figura 4.7 al oeste del Bloque de San Guillermo y en tonos de amarillo. Está delimitada al oeste por la Falla de San José del Salteño en la provincia de Córdoba, y al este por la Falla Tostado – Selva. Esta fosa está ocupada por el arroyo de las Tortugas, en su último tramo adosado a la margen oriental de aquella.

Bruneto *et al.* (2017a) analizan la deformación de la región pampeana norte, en base al estudio de las velocidades de movimiento de las estaciones permanentes de GNSS arribando a conclusiones importantes a fines del análisis del campo de deformación de la región.

4.2.2. Estratigrafía

La zona de estudio forma parte del subsistema morfo-sedimentario denominado Faja Periférica de Loess (FPL) de la Pampa Norte. Esta Faja Loéssica cubre extensas áreas de cinco provincias. Su ancho oscila entre 150 y 300 km y una longitud cercana a los 2000 km en la Pampa Norte. Junto al subsistema geomorfológico Mar de Arena Pampeano (MAP; ubicado al sur de la citada Faja) conforma el Sistema Eólico Pampeano (Iriondo y Kröhling, 1995), ver Figura 4.9. El modelo sobre el origen de este sistema morfosedimentario se basó en estudios geomorfológicos, granulométricos y mineralógicos (Iriondo y Kröhling, 1995, 1996). La FPL está caracterizada por una secuencia formada por unidades loéssicas alternantes con paleosuelos que se desarrollaron durante el Pleistoceno Tardío (Kröhling, 1999a; Kröhling y Orfeo, 2002).

El contacto entre la FPL y el MAP corresponde a una faja de transición que sigue un rumbo aproximado NNO-SSE, siguiendo el alineamiento de las ciudades de Río Cuarto, Venado Tuerto y hasta Junín (Iriondo y Kröhling, 1995, 2007). Localidades como La Chispa, Murphy, Gödeken, Hansen, Berabevú, Los Quirquinchos, entre otras, se encuentran en un tramo de la zona de transición (Kröhling, 1999a, 1999b).

La zona de estudio está localizada en su mayor parte en la FPL, excepto el sector sudoeste que forma parte de esta zona de transición.

A través de trabajos de campo y expediciones realizadas en la cuenca inferior del río Carcarañá, Kröhling (1999a) ha definido formalmente varias formaciones geológicas del Cuaternario Superior, aflorantes en perfiles de barrancas fluviales y de préstamos del área, cuyas características principales se exponen a continuación apoyadas por el perfil estratigráfico general de la cuenca inferior del río Carcarañá (Figura 4.10).

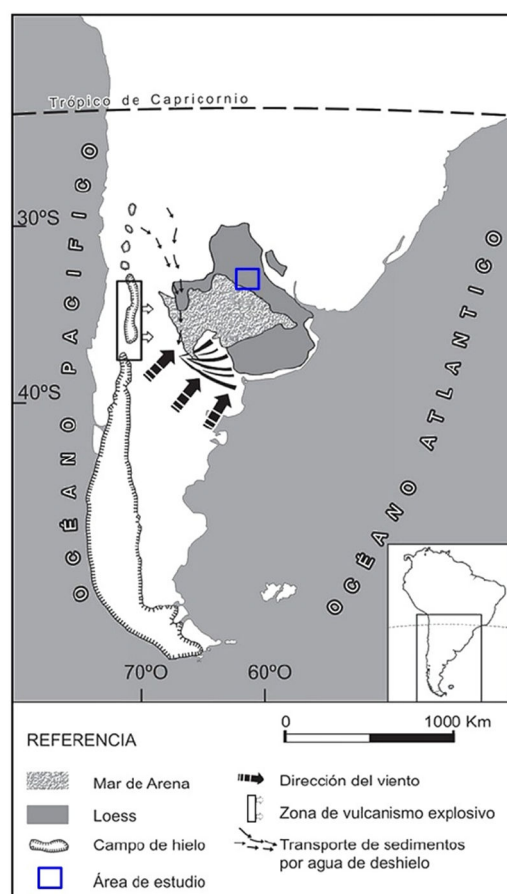


Figura 4.9 – Esquema del Sistema Eólico Pampeano durante el Último Máximo Glacial (tomado de Iriondo y Kröhling, 1995, 2007), con indicación del área de estudio.

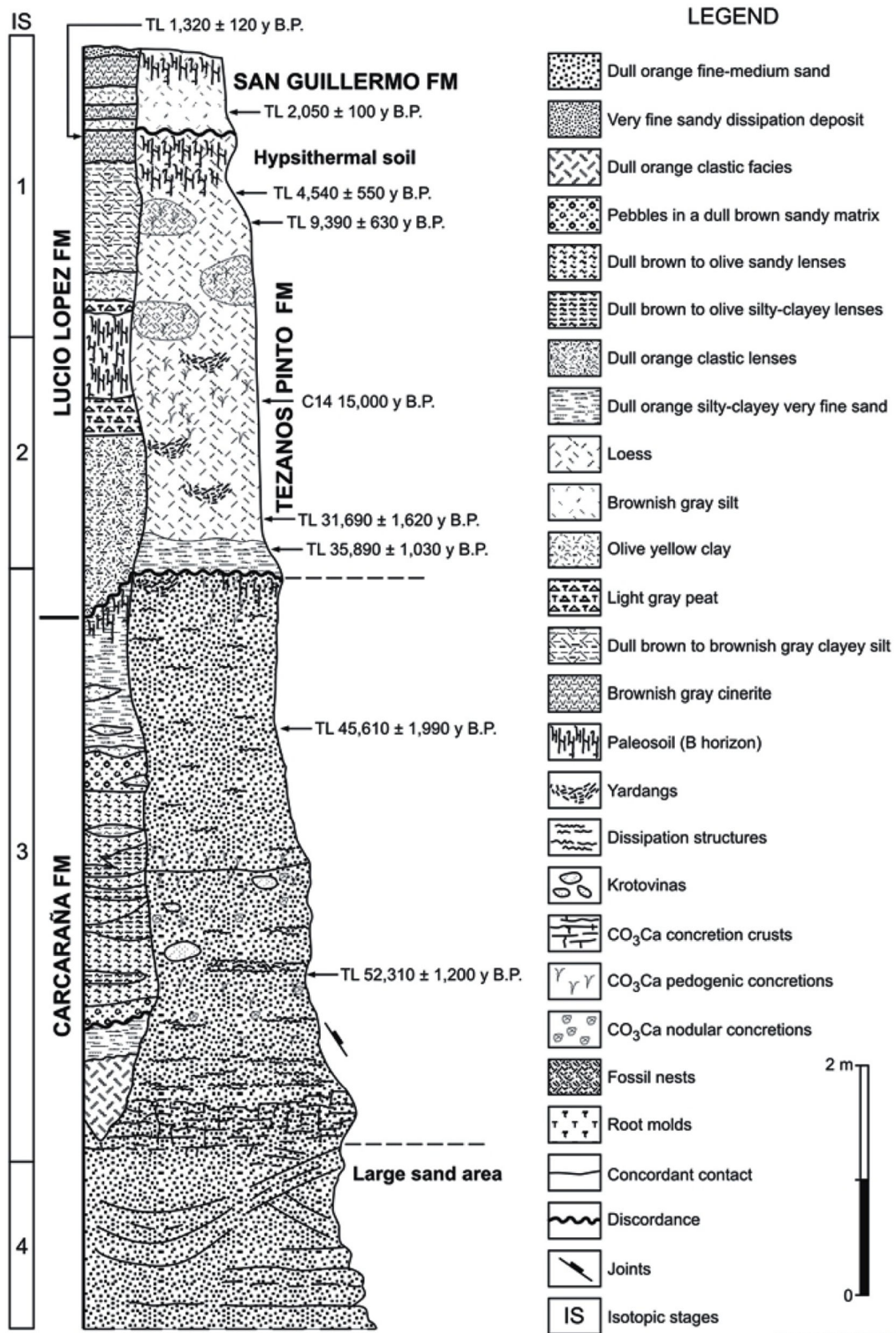


Figura 4.10 – Perfil estratigráfico general de la cuenca inferior del río Carcarañá (tomado de Kröhling, 1999a).

Formación Carcarañá (Kröhling, 1999a; Iriondo y Kröhling, 2007)

En general, compone la parte inferior de los perfiles de mayor potencia del área, aflorando en la base de cárcavas, canales cuneta, en partes de barrancas del río, en los cortes artificiales del arroyo

Cañada de Gómez, arroyo de las Tortugas, arroyo de los Leones y arroyo Mojarras. Su potencia oscila entre 0,60 y 5,50 m sin ver su base en los afloramientos, y la extensión lateral de estos varía entre pocos metros y varios kilómetros. Tiene contacto superior discordante con la Fm Lucio López (Holoceno) en los valles fluviales y contacto superior discordante con la Fm Tezanos Pinto (Pleistoceno Superior) en las áreas de interfluvio. La formación, de evidente génesis eólica, está típicamente formada por arena fina a muy fina limosa con escasa participación de arcilla, de color pardo rojizo, masivos, de talud vertical a subvertical. El sedimento presenta un grado de consolidación intermedio entre friable y consolidado. Además de su facies eólica (barrancas del arroyo Cañada de Gómez, por ejemplo), puede presentarse en facies palustre (estratos lenticulares formados por arena muy fina con limo y arcilla) o facies aluvial (lentes de guijas finas en matriz arenosa, intercaladas con lentes de arena fina o limo laminados) en las barrancas del río Carcarañá en la ciudad de Carcarañá. La unidad puede ser interpretada como un depósito de disipación de un campo de dunas originado en el Pleistoceno Tardío.

Formación Tezanos Pinto (Iriondo, 1980; Kröhling, 1999a, 1999b)

Constituye la unidad loésica típica de la región pampeana norte. Presenta un espesor uniforme de 6 a 8 m, aproximadamente, y está compuesta por limo eólico con baja proporción de arena muy fina y arcilla. Es un depósito masivo, friable, permeable, de color castaño claro. El sedimento es calcáreo en la parte inferior de los perfiles; el resto tiene un contenido de CaCO_3 moderado a nulo. Dentro de la homogeneidad de este depósito Iriondo (1987) e Iriondo y Manavella (1990) reconocieron una serie de facies sedimentarias que reflejan los procesos locales a los que fue sometido el limo en el momento de su sedimentación. En la región apoya mediante discordancia erosiva sobre la Fm Carcarañá y el techo de la formación está generalmente señalado por una discordancia erosiva bien visible sobre la que yace la Formación San Guillermo. En el área de estudio se diferenciaron dos miembros, separados por una discordancia intraformacional. Fue depositada durante el Pleistoceno Tardío-Holoceno Temprano, teniendo en cuenta varias dataciones absolutas (Kröhling, 1999a).

Arenas Eólicas de Hansen (*denominación informal*, Kröhling, 1999a, 1999b)

Esta unidad está formada por arena eólica correspondiente a dunas del MAP, equivalente en edad a la Fm Tezanos Pinto, reemplazándola a ésta en partes del sector sudoeste de la cuenca del río Carcarañá, y extendiéndose en sectores de provincias vecinas hacia el sudoeste. Aflora en perfiles que limitan caminos excavados por debajo del nivel general del terreno o en perfiles de canales y del arroyo de los Leones, con un espesor visible máximo de 3,50 m cerca de la localidad de

Hansen y cubre en discordancia a la facies aluvial de la Fm Carcarañá, mientras que su techo es cubierto en discordancia por la Fm San Guillermo. La unidad está formada por arena muy fina poco limosa y algo plástica en algunos sectores, de color pardo amarillenta en seco y de tinte ocráceo más acentuado cuando está húmeda. Es friable, masiva o con estructuras sedimentarias casi imperceptibles, con numerosas concreciones de CaCO_3 en forma de racimos en la parte inferior de los afloramientos.

Esta unidad fue luego formalmente definida como Fm Teodelina por Iriondo y Kröhling (2007), a partir de la ejecución de perforaciones de investigación con extracción de testigos indisturbados en el sur de Santa Fe) y SE de la provincia de Córdoba (MAP). En su área tipo (Teodelina, Villa Cañas, María Teresa, Venado Tuerto), la formación descansa con una potencia de 10–12 m, en discordancia erosiva sobre la Fm Carcarañá.

El paleosuelo “Hypsithermal” (Kröhling, 1999a) o suelo enterrado del *Optimum Climaticum* del Holoceno (Iriondo *et al.*, 2009).

El tope de la Formación Tezanos Pinto y de las Arenas Eólicas de Hansen está definido por un suelo enterrado, de espesor entre 0,30 y 1,10 m, y que está típicamente representado por el horizonte Bt. Tiene color pardo oscuro a negro y estructura prismática bien desarrollada, con abundantes barnices y moldes de tallos vegetales y raíces. Normalmente el suelo está decapitado por erosión eólica, cubriéndolo en casi toda la región la Fm San Guillermo.

Formación San Guillermo (Iriondo, 1987; Kröhling 1999a, 1999b)

Es una formación loésica joven y cubre un área muy extensa a manera de manto continuo, culminando la secuencia sedimentaria de la llanura pampeana y áreas vecinas. Está compuesta por limo grueso eólico con escasas proporciones de arena y arcilla, de color gris con variaciones tonales al gris parduzco a pardo grisáceo y en general negro parduzco en húmedo, masivo, friable en general, poroso, permeable y no hay presencia de calcáreos. Apoya en discordancia erosiva de forma plana a ondulada sobre el horizonte B del paleosuelo desarrollado en el techo de la Fm Tezanos Pinto o en el techo de las Arena Eólica de Hansen. En otros sectores descansa en forma concordante horizontal sobre los estratos grises blanquecinos que coronan la Fm Lucio López. Sedimentos fluviales actuales o un depósito de origen antrópico cubren localmente la formación. El limo eólico que forma la unidad tiene su origen en la deflación del horizonte A del suelo desarrollado en el techo de la Fm Tezanos Pinto o en el techo de las Arenas Eólicas de Hansen. En este último caso la Fm San Guillermo está formada por importante cantidad de arena muy fina y en general su color gris es reemplazado por el pardo grisáceo. Su edad es Holoceno Tardío.

Formación Lucio López (Kröhling, 1996; 1999a)

Esta formación, con un claro origen palustre, aflora en forma discontinua en la barrancas del río Carcarañá y en casi todos los arroyos de la región. Constituye el relleno de geoformas erosivas localizadas en las fajas fluviales de la cuenca del Carcarañá, en el centro – sur de Santa Fe y SE de Córdoba. Su espesor oscila entre 0,50 y 4,50 m, siendo los perfiles del río Carcarañá los de mayor potencia. Su continuidad lateral alcanza varios cientos de metros en algunos sectores mientras que en otros afloran sólo pocos metros. Apoya en discordancia erosiva sobre la Fm Carcarañá y está cubierta por la Fm San Guillermo. En algunos lugares la formación constituye el techo del perfil. Está compuesta por tres miembros, inferior, medio y superior. Miembro inferior: arcilla plástica limosa con arena muy fina amarillo – oliva a gris, friable, en estratos tabulares difusos, coronada por un estrato de turba gris. Miembro medio: suelo complejo. Miembro superior: intercalación de estratos tabulares arcillo – limosos, friables, de color marrón grisáceo con estratos tabulares. La unidad fue depositada principalmente durante todo el Holoceno.

Arenas eólicas de la Pequeña Edad de Hielo (*nombre informal*; Kröhling, 1999a, 1999b; Iriondo y Kröhling, 2007)

Constituye un depósito discontinuo de arenas eólicas que cubren la secuencia sedimentaria en el sector oeste del área (provincia de Córdoba) y parte del sur de la provincia de Santa Fe. Representan campos de dunas en general parabólicas posteriormente disipados bajo el clima actual. Uno de los campos más cercano al área de estudio (hacia el SO) está formado por el re trabajado eólico de las arenas fluviales del río Tercero. Se extiende entre 50 y 80 km hacia el norte del límite norte del MAP. Su potencia varía desde 0,50 a 2,50 m en pocos metros. Yace en discordancia sobre la Fm San Guillermo o del paleosuelo superior de la Fm Carcarañá en perfiles a lo largo del río Tercero. También se encuentra en discordancia sobre la parte superior de la Fm Lucio López en perfiles de los ríos Saladillo y Carcarañá (Córdoba). El sedimento está compuesto por una arena fina a muy fina, de color amarillo parda a amarillo grisáceo, moderadamente seleccionada y friable. Localmente preserva la forma de dunas alargadas; en otros lugares se encuentra en estratos paralelos de poca potencia. Campos de dunas cercanos a Christophersen, San Eduardo, y Sancti Spiritu (Santa Fe) muestran un relieve interno que varía entre 2,5 y 5 m; en otros sectores la unidad se presenta como un manto de poco espesor (0,1 a 0,4 cm), formado por arena fina a muy fina y de color marrón grisáceo a marrón anaranjado, prácticamente suelta (Iriondo y Kröhling, 2007).

Arenas fluviales recientes (Kröhling, 1999a)

Son una serie de depósitos muy jóvenes de naturaleza predominantemente arenosa directamente vinculados al cauce del río Carcarañá. Corresponden a un depósito de cauce que ha rellenado paleocauces divagantes del río Carcarañá, que fueron labrados en su mayoría sobre la Fm Carcarañá. Estos depósitos son visibles en ambas barrancas del río y en contacto lateral erosivo con otras formaciones más antiguas. Su extensión lateral varía entre unas pocas decenas a varios centenares de metros. Localmente está cubierta por la arena presente y por otros depósitos de inundación. Está compuesta por arena fina a media y con poca cantidad de limo, de color pardo claro, prácticamente suelta a muy friable.

La columna estratigráfica representativa del Bloque de San Guillermo (Figura 4.11) fue confeccionada en base a una perforación exploratoria profunda (101,5 m b.b.p.) ejecutada en dicha localidad ubicada al norte de la zona de estudio de este trabajo, de gran importancia en la Pampa Norte (Kröhling e Iriondo, 2003).

En la perforación de San Guillermo, Kröhling e Iriondo (2003) señalan que se atravesó una columna cuaternaria de 60,30 m de potencia, integrada por 54 m de loess primario, con intercalaciones palustres (abarcando tres unidades formacionales), que sobreyace 6,30 m de limo arcilloso palustre en su parte inferior, en contacto sobre una formación marina miocena (Fm Paraná). Ésta última se inicia con un importante depósito de arenas cuarzosas amarillentas a grises (interpretada como facies de playa asociada a un mar somero), que apoyan sobre un paquete de pelitas verdes masivas y ocasionalmente laminadas, con niveles intercalados formados por arenas verdes a amarillentas, y que hacia abajo pasan a la típica facies de arcillas grises, verdes y azuladas conteniendo niveles fosilíferos, representativa de un ambiente marino somero.

Esta columna fue extrapolada por Kröhling e Iriondo (2003) para el Bloque de San Guillermo en base a una selección de datos de perforaciones existentes en reparticiones nacionales y provinciales y a correlaciones estratigráficas dentro y fuera del bloque. Dicho trabajo constituye la base estratigráfica más actualizada necesaria para trabajos hidrogeológicos en la región, aunque debe aclararse que se necesita una mayor densidad de puntos representativos de la columna cuaternaria conteniendo datos estratigráficos y sedimentológicos, particularmente del sector sur del Bloque de San Guillermo (área de estudio), basados ya sea en perforaciones de investigación como en estudios de prospección geofísica.

Es importante destacar que ambos autores interpretaron que el Bloque de San Guillermo constituye el límite occidental de las arenas que contienen al acuífero Puelche (o arenas Puelches como denominación de carácter local, que se correlacionarían con las que constituyen la Fm Ituzaingó), depositadas por el río Paraná desde el Mioceno tardío (Brunetto *et al.*, 2013). Las arenas que integran la columna estratigráfica en el Bloque de San Guillermo corresponderían a una facies de playa de la Fm Paraná, que se diferencian de las arenas de la Fm Ituzaingó, tanto en su génesis como en sus características sedimentológicas (Kröhling e Iriondo, 2003).

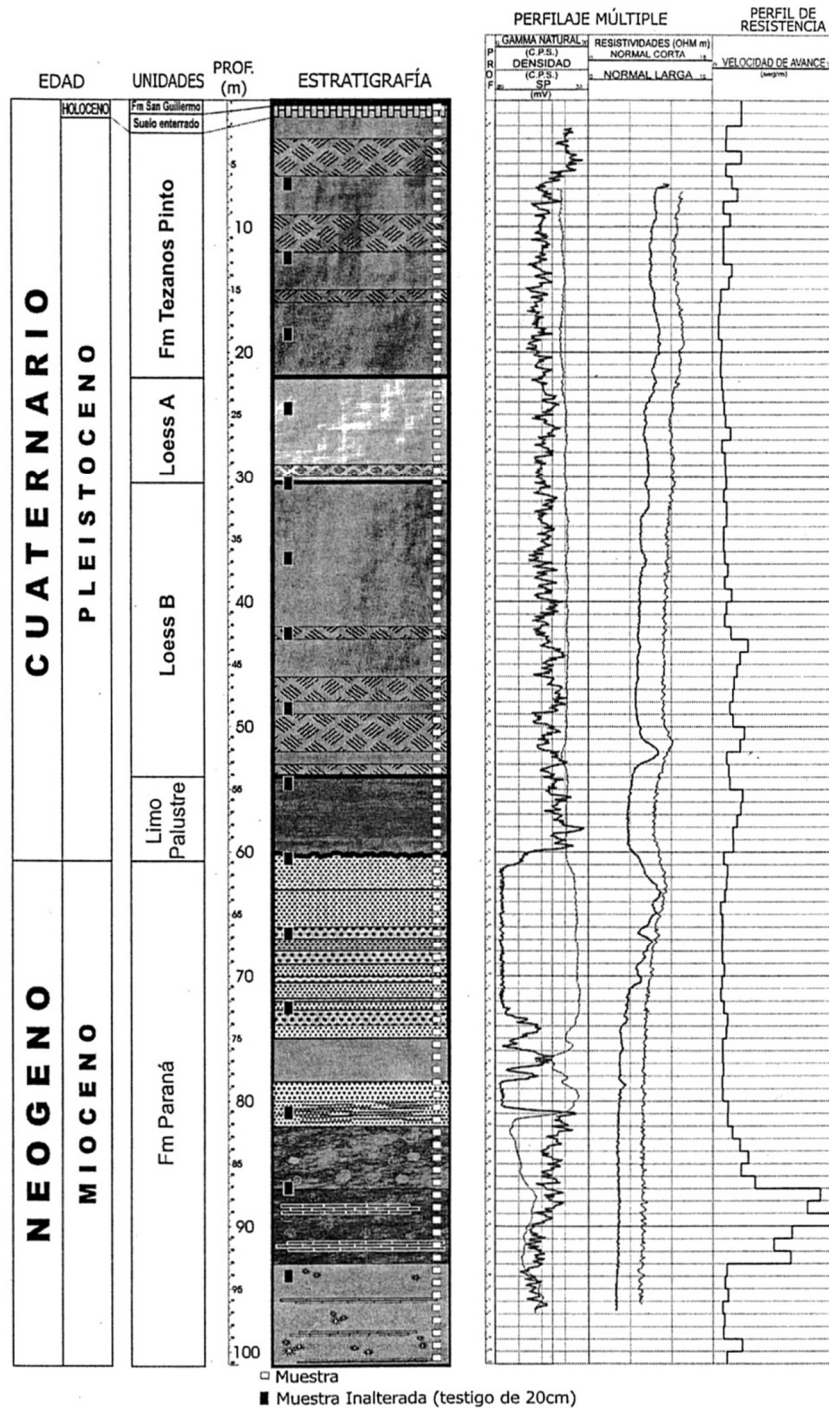


Figura 4.11 – Columna estratigráfica del Bloque de San Guillermo (tomado de Kröhling e Iriondo, 2003).

En la Figura 4.12 se presentan dos transectas de correlaciones estratigráficas a escala regional basadas en la interpretación de datos de perforaciones que realizaron Kröhling e Iriondo (2003), correspondiendo la Figura 4.13 a sondeos ubicados dentro del Bloque de San Guillermo mientras que la Figura 4.14 refiere a pozos practicados en localidades que se encuentran al este del citado bloque.

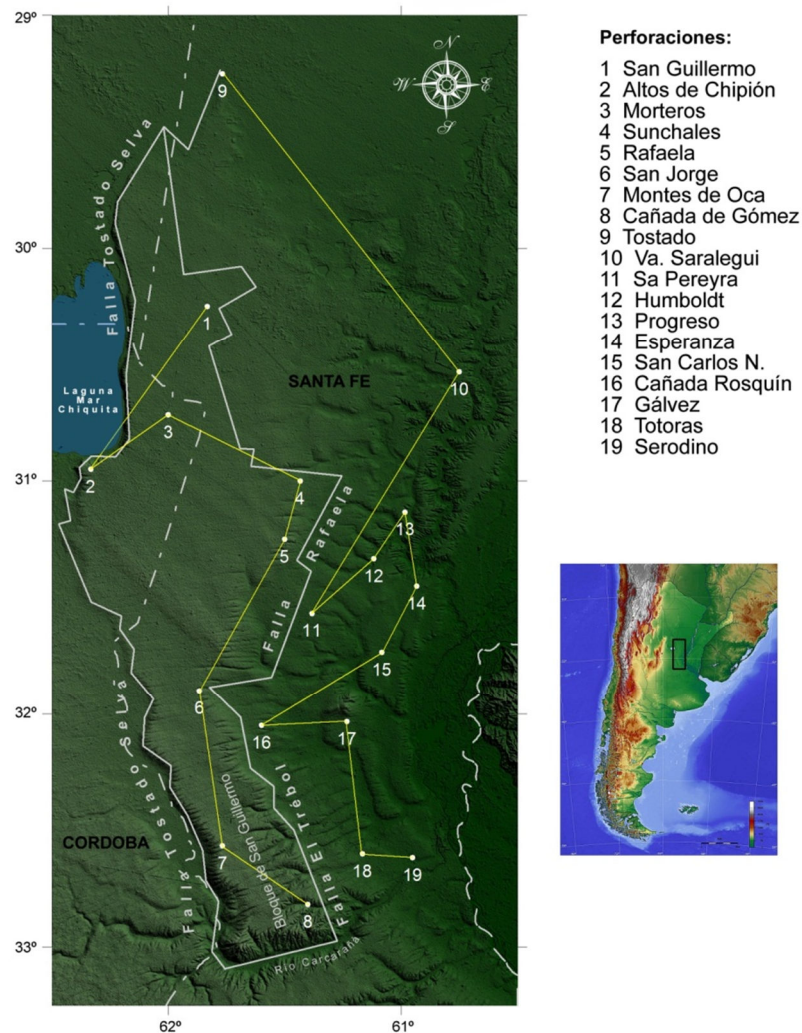


Figura 4.12 – Ubicación de las perforaciones y de las transectas de correlaciones estratigráficas P1-P8 y P9-P19 (basado en Kröhling e Iriondo, 2003).

Comparando los resultados de ambas transectas puede observarse que la unidad limosa palustre cuaternaria que aparece en la mayor parte de las perforaciones localizadas en el Bloque de San Guillermo (Figura 4.13), no se encuentra en el perfil que muestra la Figura 4.14. Esta unidad ha sido probablemente eliminada por erosión fluvial al este del citado bloque (Kröhling e Iriondo, 2003).

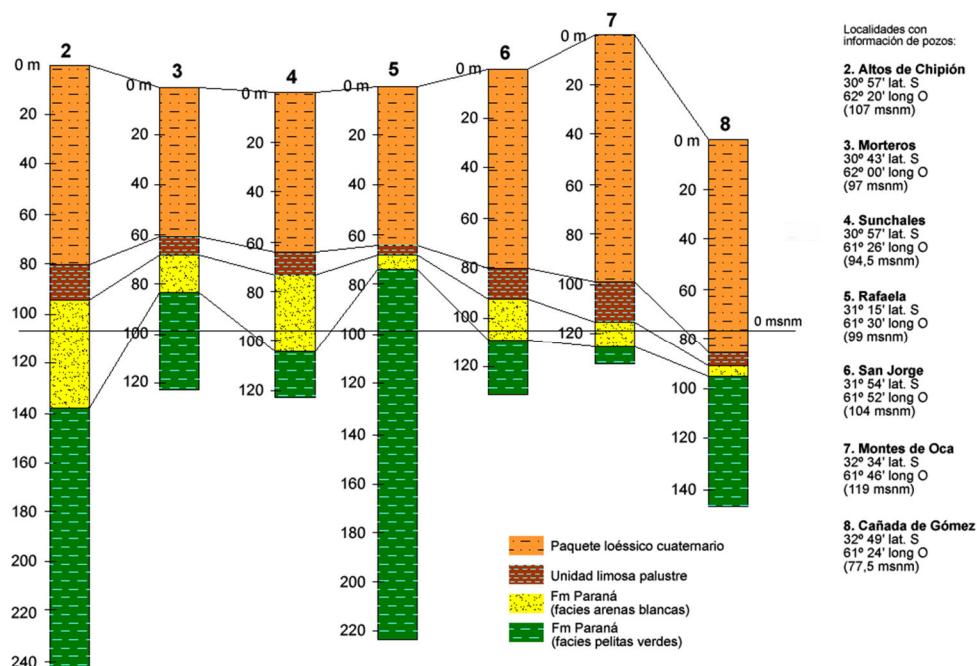


Figura 4.13 – Columnas estratigráficas complementarias del Bloque de San Guillermo (basado en Kröhling e Iriondo, 2003).

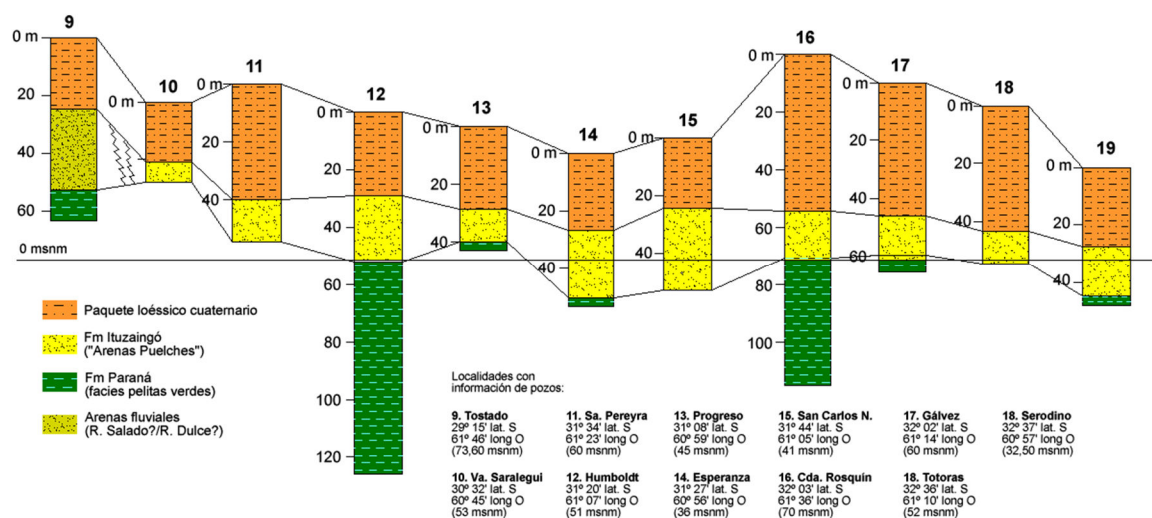


Figura 4.14 – Columnas estratigráficas complementarias al este del Bloque de San Guillermo (basado en Kröhling e Iriondo, 2003).

Aportan al conocimiento estratigráfico de la zona los resultados de otras observaciones de perfiles aflorantes (Kröhling, 1998b; 1999a; Kröhling y Orfeo, 2002; Kemp *et al.*, 2004), como los de la cantera Tortugas, localizada al este de la escarpa de la Falla Tostado- Selva (sur del Bloque San Guillermo), y la cantera Carcarañá, próxima a la UG Faja Fluvial del Carcarañá e inmediatamente al este de la Falla El Trébol. Ambas canteras se encuentran en cercanías de ambas localidades homónimas de la provincia de Santa Fe (figuras 4.15, 4.16 y 4.17).

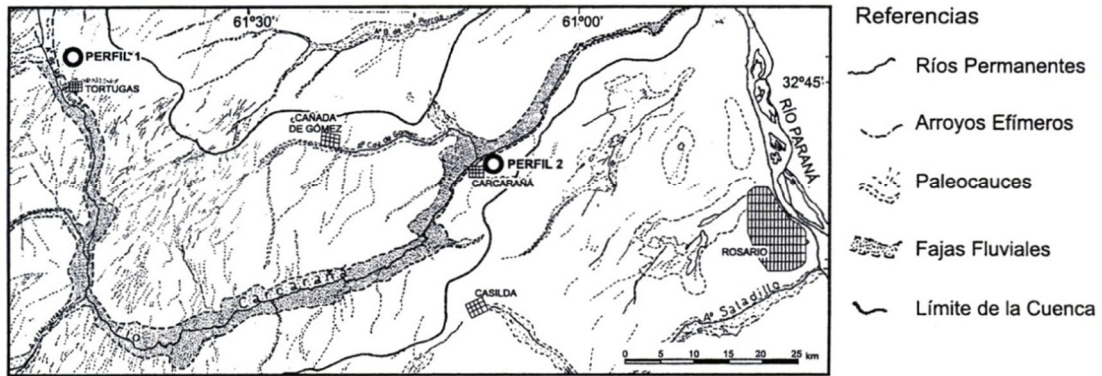


Figura 4.15 – Ubicación de los perfiles Tortugas y Carcarañá (tomado de Kröhling y Orfeo, 2002).

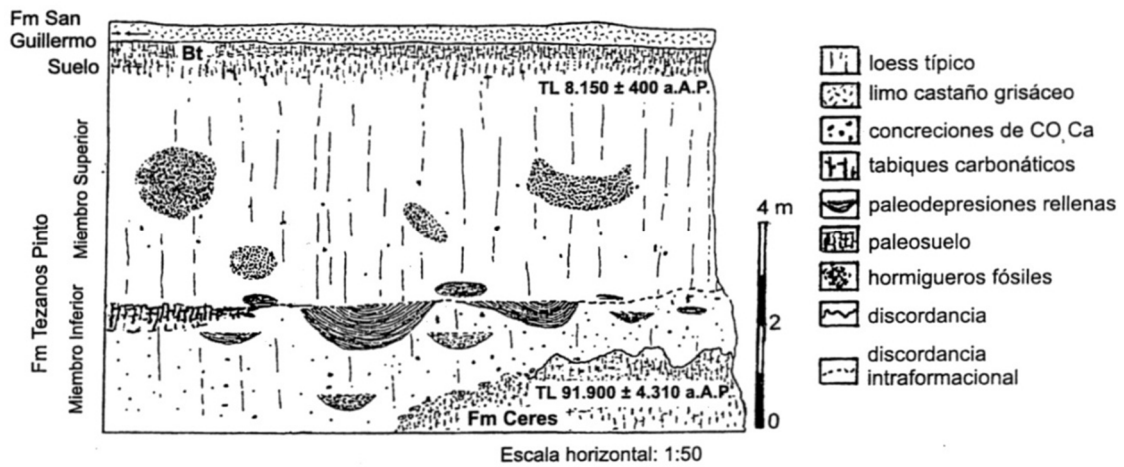


Figura 4.16 – Perfil norte de la cantera Tortugas (tomado de Kröhling, 1998b).

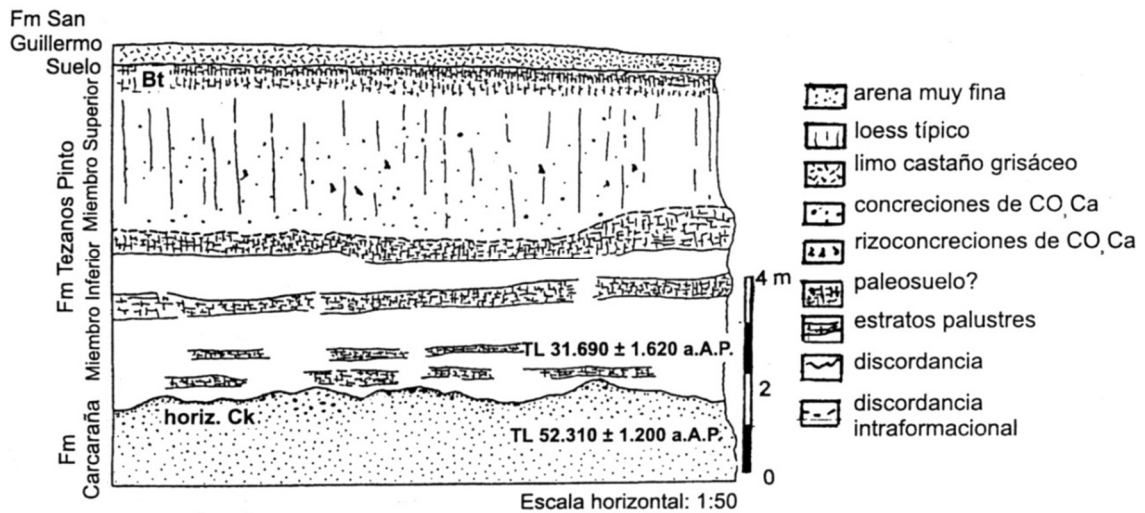


Figura 4.17 – Perfil sur de la cantera Carcarañá (tomado de Kröhling, 1998b).

Salvo la particularidad que presenta la estratigrafía del Bloque de San Guillermo, en el resto de la zona de estudio la secuencia estratigráfica puede resumirse en líneas generales y tomando como base las correlaciones estratigráficas a escala regional de Kröhling e Iriondo (2003), de arriba hacia abajo, de la siguiente manera:

- paquete loésico cuaternario (conteniendo intercalaciones palustres),
- arenas (facies de playa de la Formación Paraná y arenas del acuífero Puelche, pudiendo coexistir ambas en determinadas zonas -Mio-Plioceno /Pleistoceno inferior -), y
- facies pelítica de la Formación Paraná (Mioceno Medio – Tardío).

Con mayor detalle, la interpretación de los perfiles de perforaciones practicadas al este y al sur del Bloque de San Guillermo en el área de estudio señala la existencia de estratos predominantemente arcillosos (probablemente del Pleistoceno temprano) entre el paquete loésico cuaternario y las arenas correspondientes a Formación Paraná – Ituzaingó/Puelches (Kröhling, *com. pers.*).

Otro carácter distintivo en la estratigrafía de la zona de estudio lo constituyen el sector sudoeste en donde empieza tener influencia la zona de transición entre la FPL y el MAP, y el sector oeste afectado por los abanicos aluviales de los cursos serranos de la provincia de Córdoba (Iriondo y Kröhling, 2007; Kröhling y Carignano, 2014) .

4.3. HIDROGEOLOGÍA

Considerando el modelo hidrogeológico propuesto por Santa Cruz y Silva Busso (1999), los autores establecieron una subdivisión regional consistente en Subregiones Hidrogeológicas caracterizadas por su geomorfología, estratigrafía y litología, y de forma subordinada a las mismas, la hidráulica e hidrología de las unidades acuíferas contenidas, dejando en claro la diversidad de materiales y estructuras involucradas, resultante de la complejidad de la geología del subsuelo de la región Chacoparanense. Atendiendo a dicha clasificación, la zona de estudio se encuentra localizada, prácticamente, en la Subregión Hidrogeológica I o Subregión Río Paraná (Figura 4.18).

Los avances generados en el conocimiento estratigráfico, sedimentológico y morfoestructural en el este de la provincia de Córdoba y oeste de la provincia de Santa Fe por Iriondo, Kröhling y Brunetto, sintetizados en las páginas previas, sugieren que la extensión y características de esta Subregión Hidrogeológica deberían ser revisadas. El reconocimiento del Bloque de San Guillermo modifica sustancialmente esta clasificación, generando identidades estratigráficas en subsuelo para las regiones orientales y occidentales de Santa Fe, además del cambio sustancial en la calidad química de los acuíferos (Brunetto y Kröhling, *com. pers.*).

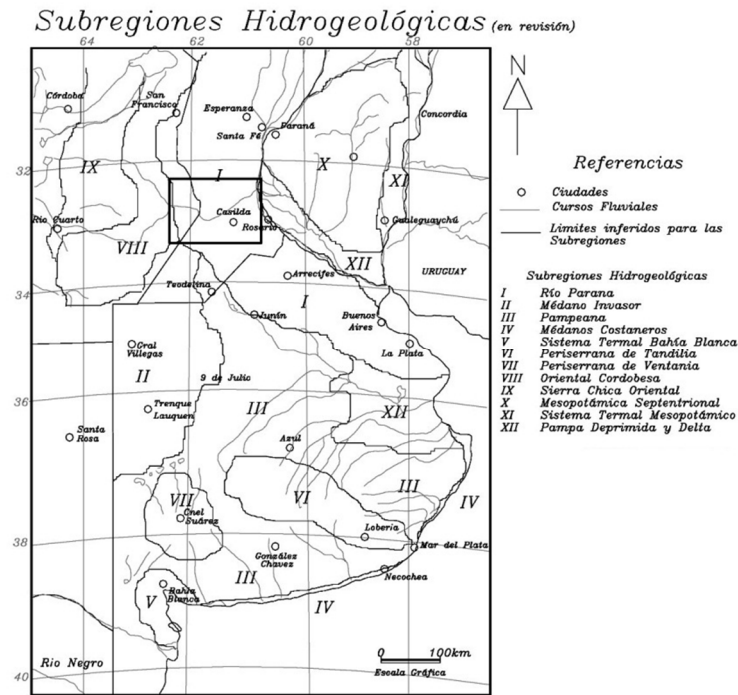


Figura 4.18 – Mapa de Subregiones Hidrogeológicas (tomado de Santa Cruz y Silva Busso, 1999). Se destaca en recuadro la zona de estudio

Los principales acuíferos de esta región se caracterizan, según Santa Cruz y Silva Busso (1999), por la estratigrafía e hidroestratigrafía que muestra la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 – Caracterización de la Subregión Hidrogeológica I (tomado de Santa Cruz y Silva Busso, 1999)

<i>Estratigrafía</i>	<i>Hidroestratigrafía</i>	<i>Acuíferos Principales</i>
Sedimentos Pampeanos	Epiparaneano	Acuífero Pampeano
Formación Puelches	Epiparaneano	Acuífero Puelches
Formación Paraná	Paraneano	Acuífero Paraná
Formación Olivos, Mariano Boedo	Hipoparaneano	Acuitardo
Basamento Cristalino	Basamento Hidrogeológico	Acuífugo

Desde el punto de vista del interés en investigaciones de aguas subterráneas en la región, el análisis se circunscribe, de acuerdo a esta clasificación, a las secciones Epiparaneana y Paraneana.

Cabe destacar que, en función de lo expresado anteriormente en el apartado 4.2 “Geología”, lo que se considera como Sedimentos Pampeanos o Formación Pampeana en la vasta bibliografía geológica existente, es hoy la columna representativa del paquete sedimentario cuaternario de la llanura pampeana, y el acuífero Pampeano no es más que el acuífero del citado paquete sedimentario.

Respecto a las arenas Puelches (en general correspondientes a la Fm Ituzaingó), su extensión areal y en profundidad en forma precisa en la zona de estudio se hace, cuanto menos, dificultosa teniendo en cuenta la escasa información disponible de perforaciones confiables. Cabe reiterar que Kröhling e Iriondo (2003) interpretaron que el Bloque Elevado de San Guillermo constituye el borde occidental de los depósitos de la Fm Ituzaingó, generada por el río Paraná desde el Mioceno tardío. Dichas arenas se distinguen de las arenas que componen la columna estratigráfica representativa del Bloque de San Guillermo, tanto en su génesis como en sus características sedimentológicas. Estas arenas corresponderían a una facies de playa de la Fm Paraná. Además, las arenas de la Fm Ituzaingó y las que suelen componer el techo de la Fm Paraná en el este de la provincia de Santa Fe forman un paquete que no ha sido diferenciado claramente en las perforaciones ejecutadas para explotación del agua subterránea, *dificultando la diferenciación de sus respectivos acuíferos, de comportamiento semiconfinado*. Las arenas mencionadas sobreyacen a la facies pelítica típica de la Formación Paraná en la zona de estudio.

En la provincia de Córdoba, las arenas que componen el cuerpo del paleo-abanico aluvial del río Tercero/Ctalamochita (Cuaternario Superior; Carignano y Kröhling, 2014; Carignano *et al.*, 2014) sobreyacen a lo que se interpreta como facies arenosa del techo de la Formación Paraná, encontrándose ambas en profundidad con límites inciertos. El citado paleo-abanico está construido por yuxtaposición, incisión y progradación de depósitos aluviales generados por el mismo río en diferentes estadios, y cuya posición estuvo fuertemente controlada por los cambios climáticos y por la actividad neotectónica. Los mega-abanicos del este de la provincia de Córdoba se formaron por acumulación de sedimentos aluviales y fluviales y a expensas de la removilización hídrica del loess que se acumuló en gran parte del área durante los períodos secos del Cuaternario Superior. En este ambiente geomorfológico, tanto en sentido vertical como lateral, las típicas facies fluviales alternan con facies netamente eólicas (Carignano *et al.*, 2014).

La recarga de los acuíferos del paquete sedimentario cuaternario y de las arenas Puelches se produce a partir de las precipitaciones, especialmente en las áreas interfluviales, y la descarga principal ocurre en los cursos de aguas principales. En la provincia de Córdoba hay recarga de cursos fluviales en áreas de menor precipitación (Santa Cruz y Silva Busso, 1999).

Observando en detalle los perfiles de algunas perforaciones practicadas al este del Bloque de San Guillermo en el área de estudio, entre las arenas Puelches y el paquete loésico cuaternario existen niveles arcillosos de características semiconfinantes (Filí y Tujchneider, 1977; Filí *et al.*, 1999; Auge

et al, 2002; Auge, 2004a; Tujchneider, 2005; Venencio, 2007). Sobre esto, y más en detalle, Díaz y Dalla Costa (2000) mencionan, en función a trabajos desarrollados en un área ubicada a pocos km al SE del área de estudio (zona limitada por las localidades de Godoy, Cañada Rica, La Vanguardia y Peyrano), que en la parte basal de la “Formación Pampa” (o sea, el paquete sedimentario cuaternario) se suele encontrar una capa de arcillas grises y blancuzcas, con espesores variables entre decímetros y más de 10 metros. Además, desde el enfoque del comportamiento hidrogeológico, Díaz y Dalla Costa (2000) expresan que:

Se comportan como acuífero, los limos de la Fm Pampa o Pampeano, las Arenas Puelches y las arenas grises de la Fm Paraná. Tienen carácter de acuitardo las arcillas basales del Pampeano, cuando su espesor es reducido y permite la transferencia vertical de agua, entre el Acuífero Pampeano y el Acuífero Puelche. Se comportan como acuicludo las arcillas basales del Pampeano cuando su potencia ronda los 10 metros o más, y constituyen para el Puelche una capa confinante, y las arcillas verdes basales de la Formación Paraná. (p. 162)

Además, Bojanich Marcovich y Risiga (1981) señalan que “en conjunto, toda la columna hidroestratigráfica involucrada constituye un sistema multicapa, de secciones predominantemente acuíferas, alternando con otras de carácter acuitardo o acuicludo, que pasan lateralmente desde condiciones semiconfinantes a confinantes” (citado en Díaz y Dalla Costa, 2000, p. 152).

Desde el punto de vista hidrogeológico, el paquete cuaternario contiene al acuífero libre en la parte superior y otros de baja a media productividad, de carácter semilibres a semiconfinados en la inferior (Auge *et al.*, 2002; Santa Cruz y Silva Busso, 1999). Las variaciones verticales de las conductividades hidráulicas dan lugar a horizontes más productivos que asemejan distintos acuíferos, *pero constituyen una sola unidad acuífera* (Filí y Tujchneider, 1977). Respecto a los cambios litológicos que presenta el paquete sedimentario cuaternario, Venencio (2007) aclara que:

(...) dan como resultado un medio anisotrópico tanto en sentido vertical como areal que originan acuíferos integrados por secuencias productivas separadas de otras de características acuitardas. A escasa profundidad se los encuentra con características freáticas y semiconfinadas. La complejidad litológica la cual no presenta una clara estratificación, a escala regional muestra un comportamiento simple pero a nivel local evidencia particularidades. (p. 38)

Iriondo (2011) distingue a grandes rasgos en el acuífero del citado paquete cuaternario, a la capa freática o “primera napa”, y las que se denominan habitualmente “segunda napa”, o con más

propiedad “segunda capa” o “segundo acuífero”, de mayor caudal que el anterior. La capa freática produce caudales bajos o muy bajos (aprox. 3 m³/h - Kreimer, 1969; Bitesnik, 1968 -) y de salinidad bastante elevada, a excepción de algunas zonas del sur de la provincia de Santa Fe. Se la utiliza para consumo del ganado y domiciliario en ciertos casos. La segunda capa es explotada para las redes urbanas de agua potable, sus caudales son mucho mayores (de 12 a 50 m³/h - Kreimer, 1969 -) y su calidad variable en las diferentes regiones de la provincia. Ello depende de la composición geológica de los terrenos que se extienden desde la superficie hasta aproximadamente cien metros de profundidad.

4.4. GEOMORFOLOGÍA

La zona de estudio pertenece a la Provincia Geomorfológica Pampa Norte (Iriondo, 1994, 2010), de particulares características geomorfológicas y estratigráficas durante el Cuaternario inferior y medio que la distinguen de las regiones aledañas. Para la región de estudio se sigue el mapeo geomorfológico jerarquizado de un área representativa del este de las Sierras Pampeanas, NE de Córdoba y oeste de Santa Fe (Brunetto *et al.*, 2014, 2017a) y que señala que las jerarquías mayores corresponden a: 1) *Sistema Planicie Fluvio-Eólica Central de Córdoba*, 2) *Sistema Planicie Loésica de Pampa Norte* y 3) *Sistema Fluvial del río Paraná*, según dominen los procesos aluviales/fluviales o los puramente eólicos. El área de estudio forma parte de los dos primeros sistemas, que están caracterizados por unidades loésicas que suavizan las formas menores del paisaje, principalmente elementos estructurales (escarpas, depresiones tectónicas), fluviales (valles, terrazas, cauces) y eólicos (campos de dunas más antiguos) - Brunetto *et al.* (2014) -.

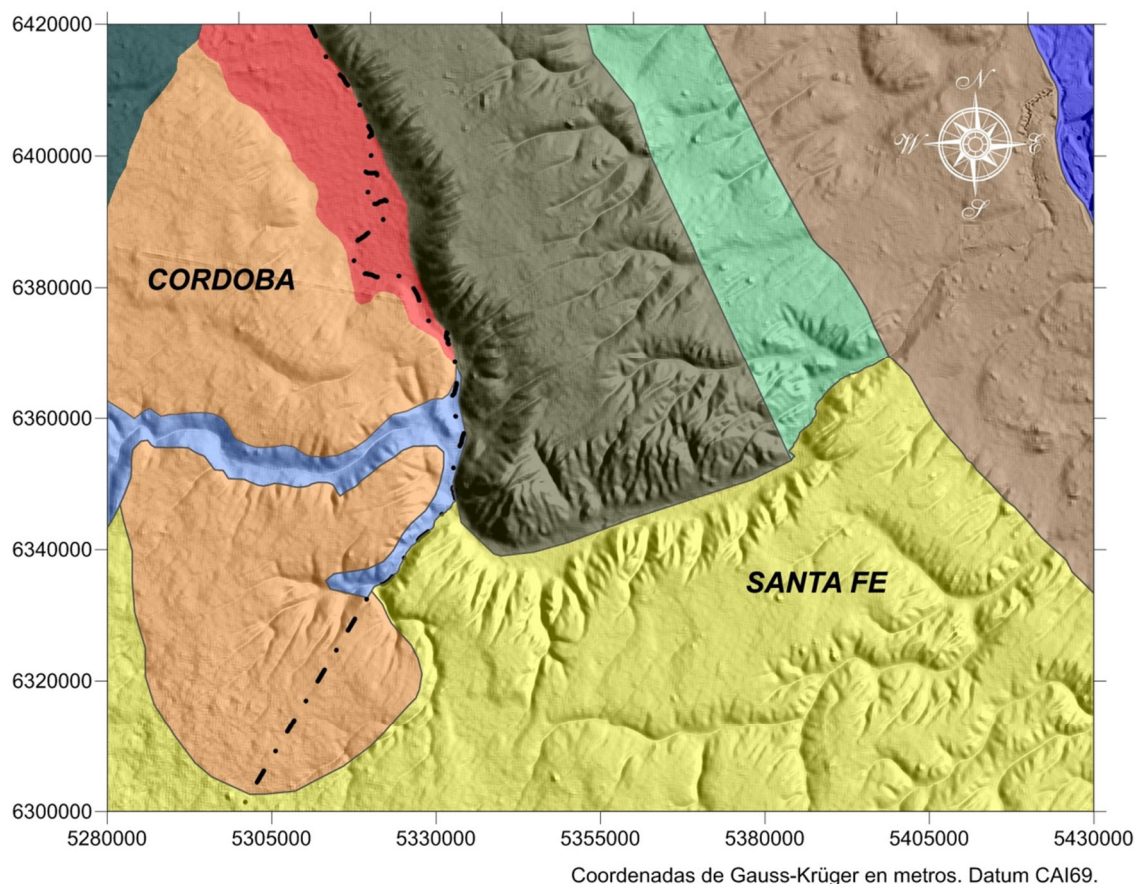
En las últimas etapas del Pleistoceno, la región en la que se enmarca el área de estudio sufrió una secuencia de episodios áridos y húmedos (Iriondo y Kröhling, 1996, 2007) que condicionaron la dinámica geomorfológica y, por consiguiente, los rasgos morfológicos que destacan a la región de estudio. El paisaje actual resulta fundamentalmente de la influencia del período húmedo correspondiente al Estadio Isotópico de Oxígeno (EIO) 3 (64–36 ka AP –miles de años antes del Presente-), en el que se labró la red fluvial actual de llanura, y de la actividad eólica durante los episodios secos del Pleistoceno tardío (ca. 30–10 ka) y del Holoceno tardío (3,5–1,4 ka), destacándose la generación de un manto de loess (Último Máximo Glacial) que suavizó las formas menores del paisaje (elementos estructurales, fluviales y eólicos), el desarrollo de campos de dunas (mayormente longitudinales y parabólicas) y la generación de numerosas cubetas de deflación, la mayoría de ellas actualmente ocupadas por lagunas (Iriondo y Kröhling, 1996, 2007; Carignano *et al.*, 2014). Desde el Plioceno, la región está controlada por deformaciones neotectónicas originadas en esfuerzos compresivos (Brunetto e Iriondo, 2007), que influyeron

significativamente en la configuración general del drenaje y en la dinámica hidrogeológica a través de la formación de altos estructurales (p. ej. Bloque de San Guillermo, Alto de Levalle, etc.) y de depresiones tectónicas (p. ej. Mar Chiquita, Curapaligüe-Saladillo - Carignano *et al.*, 2014 -).

La porción del área de estudio ubicada en la provincia de Córdoba comprende el sistema geomorfológico definidos por Carignano (1999) y Carignano *et al.* (2014) como Planicie Fluvioeólica Central de Córdoba, una extensa llanura formada por grandes paleoabanicos aluviales coalescentes generados por los ríos que tienen sus nacientes en las Sierras Grandes y descargan sus aguas hacia oriente. Esta planicie se caracteriza por un paisaje plano o casi plano dominado por la dinámica de los grandes ríos que han formado amplias llanuras aluviales donde se reconocen diversos tipos de canales, terrazas, lagunas semicirculares, así como llanuras de inundación abandonadas y una gran cantidad de paleocauces, entre otras formas fluviales, en respuesta a cambios en su dinámica durante el Cuaternario Tardío (Carignano, 1999; Kröhling, 1999a; Carignano *et al.*, 2014). En la parte distal de la planicie predominó la acumulación de limos eólicos sobre los fluviales, por lo que este sector se ha discriminado bajo la denominación de Unidad Geomorfológica (UG) Planicie loésica de Marcos Juárez-Corral de Bustos (Carignano *et al.*, 2014), atravesada por la faja fluvial actual del Carcarañá, que conforma otra unidad. La UG correspondiente al paleoabanico del río Tercero/Ctalamochita se extiende hasta la UG Depresión tectónica de la cañada de San Antonio (100 m s.n.m.), con la que limita por el oriente y la UG Planicie Loésica de Marcos Juárez-Corral de Bustos (110 m s.n.m.), ubicada al ESE, de la que está separada por el río Saladillo. En la zona sur, sureste y este, el paleoabanico está afectado por procesos de deflación que han generado dunas parabólicas con cubetas de deflación en su interior, y profundizando tramos de paleocauces, los que están ocupados por lagunas efímeras y bañados, muy condicionados por la posición de la freática (Figura 4.19).

La UG Planicie loésica de Marcos Juárez - Corral de Bustos presenta una red de paleovalles fluviales de dirección general SO-NE, siendo muchos de ellos la continuación del sistema de grandes paleocauces de los abanicos de los ríos Ctalamochita, Chocancharava y Popopis. En el sector NE, está limitada por la escarpa de la Falla San José del Salteño, que la conecta con la Depresión de San Antonio. Hacia el sur, se extiende hasta los valles actualmente ocupados por los arroyos de Las Tortugas y de Las Mojarras, prolongándose en la provincia de Santa Fe. Localmente pueden reconocerse en el fondo de los paleovalles segmentos de paleocauces, algunos diferenciables en imágenes satelitales a partir de la alineación de hoyas de deflación. En

general, los paleocauces se encuentran actualmente ocupados por cañadas (p. ej. cañada Santa Lucía) y las hoyas convertidas en lagunas temporarias (Kröhling, 1998).



Referencias

- Sistema Planicie Loésica de Pampa Norte**
- Subsistema Bloque Elevado de San Guillermo (BESG) (Iriondo y Kröhling, 2003)
 - Subsistema Terrazas fluviales del Pleistoceno Superior (Brunetto, 2017a)
 - Subsistema Planicie eólica-lagunar del Pleistoceno Superior (Brunetto, 2017a)
 - Subsistema Planicie eólica-lagunar del Pleistoceno Superior a Holoceno (Brunetto, 2017a)
- **Sistema Fluvial del río Paraná** (Brunetto *et al.*, 2014)
- Sistema Planicie Fluvio-Eólica Central de Córdoba**
- UG Planicie loésica de Marcos Juárez-Corral de Bustos (Carignano *et al.*, 2014)
 - UG Depresión tectónica de la Cañada San Antonio (Carignano *et al.*, 2014)
 - UG Paleobanico aluvial del río Citalamochita (Carignano *et al.*, 2014)
 - UG Fajas fluviales de los ríos Carcarañá, Saladillo y Tercero (Carignano *et al.*, 2014)

Figura 4.19 – Mapa Geomorfológico de la zona de estudio a nivel de Sistemas y Unidades Geomorfológicas (Fuente: Brunetto *et al.*, 2014, 2017a; Carignano *et al.*, 2014).

Dichos paleocauces de baja significancia morfológica constituyen un típico patrón colinear de dirección general SO-NE, descriptos por Pasotti y Canoba (1979) como paleocañadas, es decir, antiguas cañadas consecuentes generadas durante un periodo húmedo, que atraviesan de manera

ortogonal a bloques tectónicos menores de la región y que se presentan rectas, subparalelas y con un espaciamiento regular. El área sur de la UG Planicie Loésica de Marcos Juárez- Corral de Bustos comprende el límite transicional entre el MAP (al sur) y la FPL. En el paisaje se diferencian sectores planos horizontales (mantos de arena) a lomas arenosas de dirección principal SO-NE, cuyos bajos topográficos se presentan afectados por una mayor densidad de hoyas de deflación circulares a elipsoidales. Estas características son transicionales a la UG Planicie Eólica Arenosa del Sur (Carignano *et al.*, 2014), que se caracteriza por la presencia de grandes formas de deflación, campos de dunas y mantos de arena que se superponen a las geoformas fluviales de los ríos Popopis y Chocancharava conformando un complejo ambiente de interferencia eólico-fluvial.

El sector del límite interprovincial Santa Fe-Córdoba en el área de estudio pertenece a la UG Depresión tectónica de la cañada San Antonio (Kröhling, 1998; Carignano *et al.*, 2014). Presenta una dirección general NO-SE, con un ancho variable entre 7 y 21 km. Es una depresión lineal somera y relativamente ancha, de traza recta y bordes definidos, que funciona como colector local del escurrimiento superficial e hipodérmico de parte de la depresión. Su fondo plano tiene una pendiente de escaso gradiente hacia el sur (0,5‰) y está ocupado por una faja de bañados y pantanos bordeados por suelos salinos. La depresión es el colector del escurrimiento superficial del margen este de la provincia de Córdoba, con drenaje parcial hacia el río Carcarañá a través del arroyo de Las Tortugas. La depresión está limitada por los taludes de la escarpa de la Falla Tostado-Selva (el oriental) y a la escarpa de la Falla San José del Salteño -el occidental-. Su límite sur coincide con una fractura que se ubica a pocos kilómetros al norte de General Roca (Pasotti, 1987). El desnivel medido entre las partes más deprimidas de la depresión (74 m s.n.m.) y la cota máxima del Bloque San Guillermo junto a la escarpa del Sistema de Fallas Tostado-Selva en el área próxima a Gral. Roca, alcanza 50 m (Carignano *et al.*, 2014).

La topografía de la zona de estudio tiene como particularidad evidenciar la existencia de los distintos rasgos tectónicos que se encuentran en dicha zona. En el sector oeste, el fondo de la cañada de San Antonio, ubicada en la provincia de Córdoba, tiene como rumbo general 140° N y forma de amplia cuba, con una insignificante pendiente del fondo de la fosa evidenciada por el mayor espaciamiento entre las curvas de nivel, delimitando una zona de inundación y de bañados. Esto se mantiene hasta prácticamente llegar a la localidad de General Roca con un ancho de 11 km, en donde las isohipsas de 75 m a 85 m giran en ángulo recto hasta llegar al canal Aliviador Tortugas, pasando súbitamente a ser paralelas a la Falla de Tostado – Selva contra la que corre el arroyo de las Tortugas encerrado en un valle de unos 3 km de ancho (Pasotti y Castellanos, 1963).

El Subsistema Bloque Elevado de San Guillermo es la unidad morfoestructural principal en la región de estudio. Es una planicie prácticamente horizontal, muy suavemente ondulada y con muy leve pendiente general hacia el ENE, atravesada por cañadas o paleocauces de dirección principal OSO-ENE y SO-NE, siendo un área de erosión generalizada por acción de flujos no encauzados y por flujos encauzados de baja jerarquía con definición creciente hacia el este (talud de la Falla El Trébol). Actualmente las cañadas están ocupadas por pantanos temporarios. Escasas hoyas de deflación elipsoidales se encuentran alineadas en el fondo de las cañadas. Durante los períodos secos del Pleistoceno tardío y del Holoceno, esta región ha estado dominada por la acumulación de polvo eólico fino.

La principal estructura que limita al bloque por el oeste es el Sistema de Fallas Tostado-Selva, cuya edad máxima de los últimos movimientos corresponde al Pleistoceno Tardío (Brunetto *et al.*, 2014). La elevación del bloque por neotectónica produjo una significativa reorganización de las redes de drenaje del este de Córdoba y oeste de Santa Fe (Carignano, 1999; Kröhling, 1999; Brunetto e Iriondo, 2007) que fundamentalmente generó la interrupción del escurrimiento superficial hacia el este (Carignano *et al.*, 2014). Adosado al sector SO del Bloque de San Guillermo se encuentra el pequeño bloque denominado “Morrito” de Monasterio (Pasotti, 1974b). Tomando como base a la isohipsa 100 m, éste tiene unas dimensiones aproximadas de 10 km por 10 km. Culmina con una amplia área cerrada de cota 120 m de unos 7 km por 5 a 9 km, que encierra áreas también cerradas de cota 130 m s.n.m. La parte elevada es más bien plana, y es aquí donde se encuentra el punto más alto de la provincia de Santa Fe con una cota de 133,60 m. Desde el área encerrada por la cota 120 m, degrada con laderas cuyas pendientes varían entre 5 y 6,60 ‰ y que le dan morfología típica. Los desniveles máximos con respecto al cauce del río Carcarañá son de 74 m frente a San José de la Esquina, 63 m frente a Cruz Alta y 51 m con respecto a la cañada de San Ricardo, antes de la localidad homónima (Pasotti, 1974b).

La descripción geomorfológica correspondiente a la cuenca del río Carcarañá en la provincia de Santa Fe fue realizada por Kröhling (1999a), en donde definió ocho UG componiendo la Planicie Loésica de Pampa Norte y siguiendo una clasificación jerarquizada basada solamente en los procesos geomorfológicos de superficie que modelaron el paisaje de la cuenca en Santa Fe, sin tener en cuenta el análisis morfoestructural incorporado por Brunetto *et al.* (2014, 2017a). Dichas unidades son: UG Terrazas fluviales del río Carcarañá, UG Faja fluvial del río Carcarañá inferior, UG Valles fluviales de Villa Eloísa, UG Paleovalles fluviales de Cañada de Gómez, UG Planicie

antigua de Bustinza, UG Paleovalles fluviales de Beravebú, UG Paleocauces de Luis Palacios y UG Valle fluvial de Tortugas (Figura 4.20).

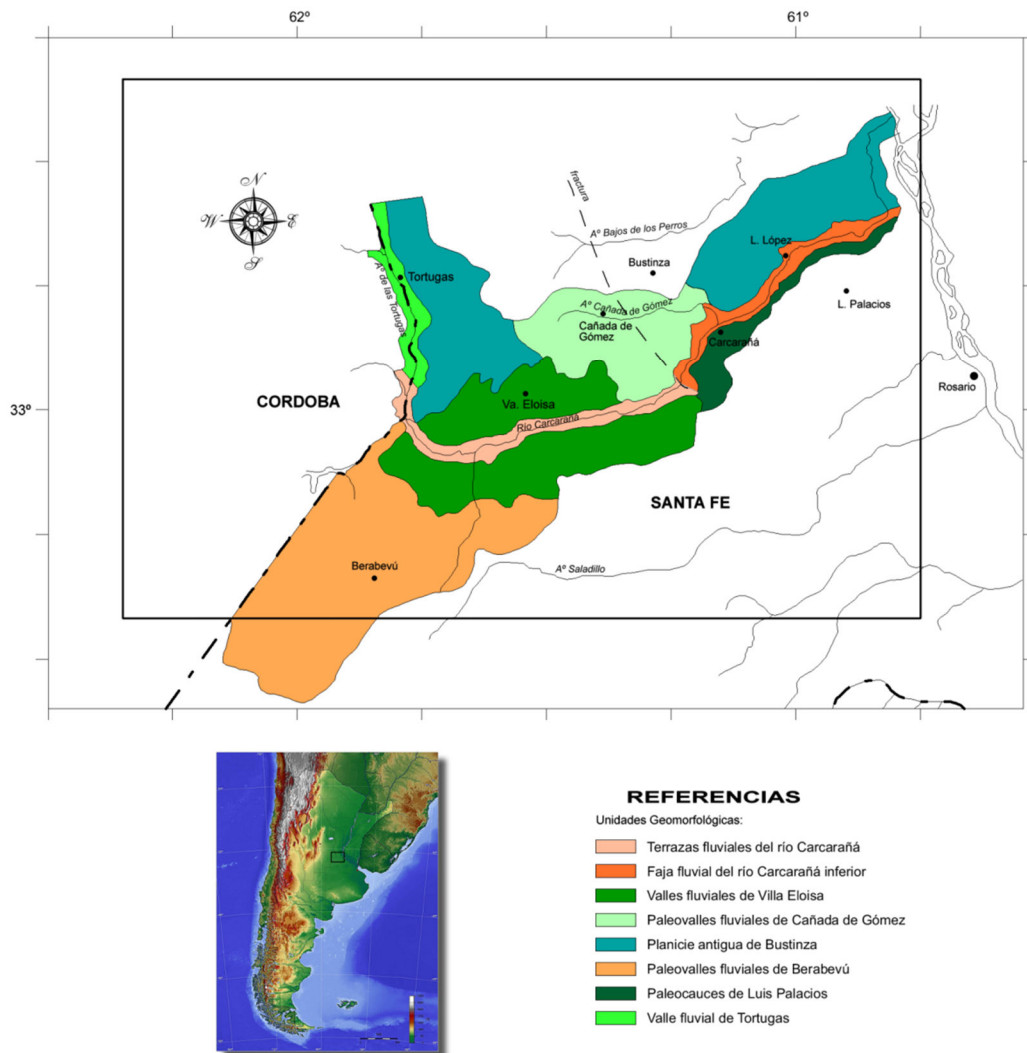


Figura 4.20 – Esquema geomorfológico de la cuenca del río Carcarañá en la provincia de Santa Fe en donde se muestra recuadrada el área de estudio (basado en Kröhling, 1999a).

Las UG: Terrazas fluviales del río Carcarañá, Faja fluvial del río Carcarañá inferior, Valles fluviales de Villa Eloísa y Valle fluvial de Tortugas son predominantemente de origen fluvial. La UG Planicie antigua de Bustinza está representada por una superficie que incluye paleovalles menores y paleocauces paralelos hacia el río Carcarañá, junto a hoyas de deflación. Otras UG presentan mayormente paleovalles y paleocauces fluviales (UG Paleovalles fluviales de Cañada de Gómez, Paleovalles fluviales de Beravebú y Paleocauces de Luis Palacios).

La zona de la provincia de Santa Fe comprendida entre la cuenca del río Carcarañá y el límite norte del área de estudio presenta un paisaje normal suavemente ondulado con una pendiente general hacia el este – noreste menor a 0,2%, y recortado por cañadas paralelas (Bajo del Árbol, Bajo Totoras, Bajo de los Leones, Las Estacas, Las Parejas Norte y Sur, Bajo Los Leones y otras

sin nombre). La orientación en sentido SO-NE, su trazado recto y su paralelismo, señalan claramente el control estructural ejercido por el sistema de fallas y fracturas transversales del basamento. Las pendientes llegan al 1% pero en general están por debajo del 0,5%. También se encuentran algunos arroyos con el mismo sentido de escurrimiento (Bajo de los Perros, Las Turbias y del Chupino). Algunas de estas cañadas y arroyos vuelcan sus aguas a la cañada de Carrizales, que junto con la de Arce representan fajas deprimidas intercaladas entre zonas topográficamente más altas.

Entre el río Carcarañá y el límite sur de la zona de estudio, se encuentran el arroyo Saladillo y la cañada Candelaria. Hacia estos cursos, inclusive el río Carcarañá, se destaca la presencia de pendientes bien manifiestas que originan un paisaje sumamente recortado, favoreciendo el proceso erosivo que caracteriza a los suelos que se encuentran en esta zona, y particularmente notorio bordeando al río Carcarañá y al arroyo Saladillo. Fuera de este ambiente y entre ambos cursos, se ha desarrollado un paisaje de lomas suavemente onduladas.

Al sur del río Carcarañá la topografía presenta también una zona plana con escasa pendiente hacia el ENE dada por el mayor espaciamiento que presentan las isohipsas y es solo alterada por la existencia de marcados cursos de agua como así también de cañadas y bajos en donde las curvas de nivel se aprietan evidenciando un escurrimiento superficial hacia aquellos, en general con fuerte control por fracturamiento.

4.5. EDAFOLOGÍA

Para la descripción y mapeo de los suelos que componen el área de estudio se tuvo como base la información en escala 1:500.000 de la plataforma GeoINTA (un sistema para consulta de mapas, imágenes y bases de datos georreferenciadas de proyectos y programas del INTA - GeoINTA, 2013 -), el Mapa de Suelos de la provincia de Santa Fe (INTA – MAG, 1981), y el Atlas de Suelos de la República Argentina (INTA, 1990; INTA-Aeroterra SA, 1995).

En la Figura 4.21 se observan las unidades cartográficas de los suelos presentes en la zona del modelo, y cuyas leyendas están compuestas por cuatro partes que describen los nombres del suelo a nivel de Orden, Gran Grupo, Subgrupo y número de unidad cartográfica.

A continuación se describen las principales unidades cartográficas de suelos del área de estudio. La descripción detallada de todas las unidades presentes en dicho área se presentan en el Anexo I.

pequeñas que se interconectan en periodos de lluvia de cierta magnitud, drenando normalmente los sectores. La unidad está compuesta por una asociación de Argiudoles típicos en los sectores bien drenados, de lomas planas extendidas y Argiudoles ácuicos en los sectores deprimidos del paisaje, teniendo éstos como limitaciones la menor permeabilidad y drenaje. Su mayor desarrollo comprende la UG Planicie Antigua de Bustinza (Kröhling, 1999a).

La unidad MIve-1 tiene su desarrollo en un paisaje suavemente ondulado con lomas planas y extendidas, y moderadamente bien drenado. Está compuesta por Argiudoles típicos y Argiudoles vérticos. Comprende el área SE de la cuenca del Carcarañá, incluyendo la UG Paleocauces de L. Palacios (Kröhling, 1999) y extendiéndose fuera de ella en el departamento San Lorenzo. Por el elevado contenido de materiales finos, estos suelos presentan problemas de permeabilidad, y en épocas de lluvias excesivas, los cultivos pueden sufrir asfixia por esa causa.

La unidad MIve-4 ocupa el centro del departamento San Lorenzo en un paisaje muy suavemente ondulado con lomas planas extendidas de relieve normal-subnormal y moderadamente bien drenadas, interrumpidas por planos bajos de relieve subnormal cóncavo, aledaños a vías de escurrimiento permanentes de lento drenaje. Se compone de una asociación de Argiudoles vérticos en los sectores de lomas y Natracualfes típicos en los planos bajos extendidos. La limitante de los Argiudoles vérticos es la permeabilidad lenta derivada del alto contenido de arcilla del horizonte Bt, haciéndolos relativamente impermeables en periodos de lluviosos, mientras que las limitaciones de los Natracualfes típicos es la sodicidad debida a su ubicación.

La unidad MIte-3 está compuesta por Argiudoles típicos presentando erosión hídrica actual. Ocupa altos suavemente ondulados y planos extendidos, áreas bien drenadas, con pendientes de hasta 2 % ubicadas a ambos márgenes de los cauces principales (río Carcarañá y arroyo Cañada de Gómez). Ello contribuye a que los suelos sean susceptibles a la erosión hídrica ligera o moderada no solo por la pendiente natural del terreno sino por el mal manejo de estos suelos. Dichos suelos forman el extremo sur del Bloque Elevado de San Guillermo, y particularmente se desarrollan en las pendientes laterales del valle del río Carcarañá y fondos de valles tributarios y en el talud asociado a la Falla El Trébol.

La unidad MIte-45 ocupa parte de las pendientes laterales del valle del río Carcarañá en la provincia de Córdoba, y en las pendientes vinculadas a las cañadas de San Antonio, Santa Lucía y Las Totoras, como así también a los arroyos Tortugas y Leones. Está conformada por Argiudoles

Las tierras de aptitud agrícola ocupan más del 75% de la superficie y predominan las de alta capacidad productiva, excepto en las fajas más erosionadas donde lo hacen las de capacidad productiva media. El uso actual mayoritario es agrícola, con alta proporción de soja seguida por trigo y maíz. También se utilizan para pasturas, especialmente de base gramínea y alfalfa. Los planos de inundación y terrazas de los arroyos son angostos y se utilizan para ganadería sobre pastos naturales (Giorgi *et al.*, 2005). En algunas terrazas del río Carcarañá se realiza agricultura.

En la Figura 4.23 se muestra el mapa de Capacidad Productiva de las tierras para uso agrícola para el sector del área de estudio en la provincia de Santa Fe, en donde se resaltan las siguientes categorías (Giorgi *et al.*, 2002):

A - aptitud productiva alta (riesgo productivo bajo)

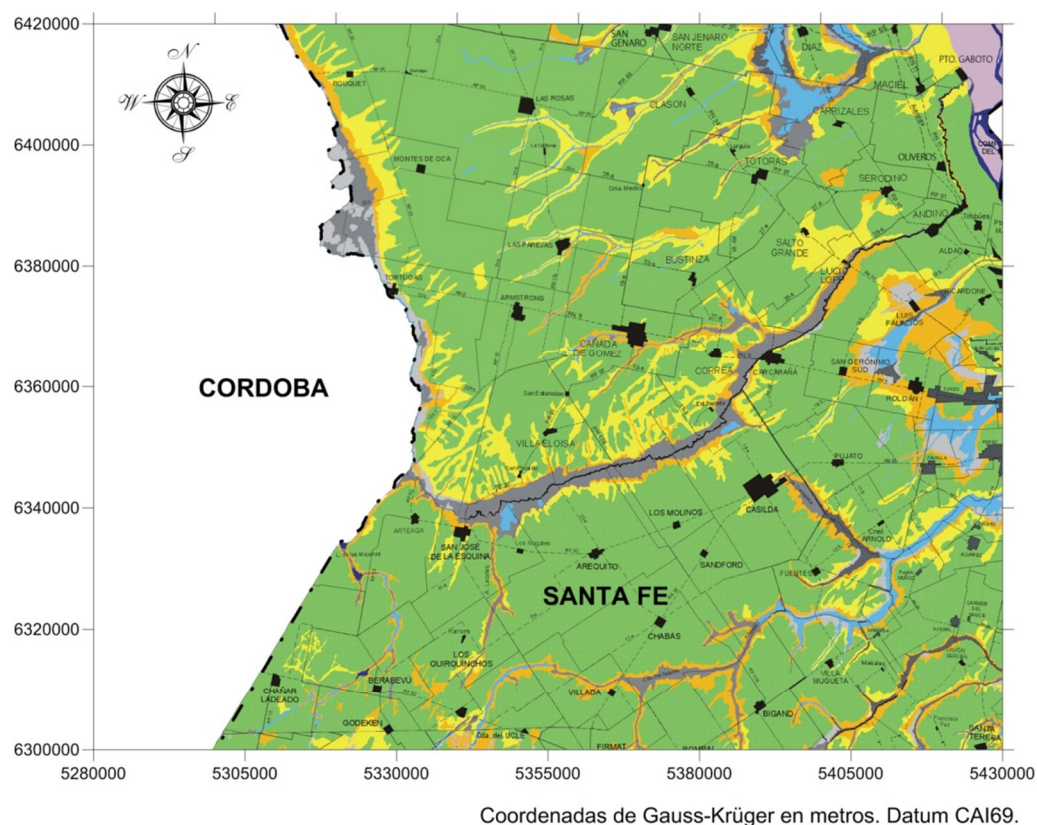
Son tierras sin riesgo de inundación/anegamiento o encharcamiento generalizado. Los suelos presentan pocas limitaciones y se admiten tierras con erosión ligera. Con manejo adecuado pueden obtenerse rendimientos altos y la falta de piso afecta sólo en caso excepcionales a la realización de las labores.

B1 - aptitud productiva media-alta

La forman tierras sin riesgo de inundación/anegamiento y con bajo riesgo de encharcamiento. Más del 30% de la superficie está ocupada por suelos con limitaciones moderadas (drenaje imperfecto, epipedones ócricos, erosión actual, etc.), y con manejo adecuado pueden obtenerse rendimientos medios a altos. Con baja frecuencia las labores no pueden realizarse oportunamente por falta de piso.

D y E - aptitud productiva muy baja o nula (riesgo muy alto)

El uso está normalmente restringido al aprovechamiento de los pastizales naturales. La categoría D la conforman áreas con riesgo de inundación y/o anegamiento moderado y encharcamientos frecuentes y prolongados. Más del 50% de la superficie que abarca esta categoría lo constituyen suelos con limitaciones muy severas (drenaje muy pobre, sodicidad y salinidad muy fuerte, epipedones ócricos, erosión actual, etc.). La categoría E son tierras con riesgo de inundación y/o anegamiento alto, y corresponde generalmente a sectores deprimidos donde se concentran las aguas durante períodos prolongados.



REFERENCIAS

- Límites de distritos
- - - Rutas principales
- - - - Rutas secundarias

CAPACIDAD PRODUCTIVA

- A Alta
- B1 Media - alta
- B2 Media - baja
- C Baja
- D Muy baja
- E Muy baja - anegable
- L Lagunas

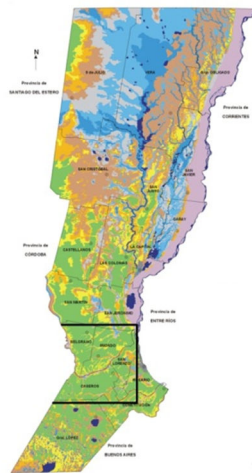


Figura 4.23 – Mapa de Capacidad Productiva de las tierras para uso agrícola correspondiente a la zona de estudio en la prov. de Santa Fe. Basada en información de INTA - CR Santa Fe - EEA Rafaela.

Con respecto al área de estudio en la provincia de Córdoba, ésta abarca las subzonas agroeconómicas VI-A (Húmeda subhúmeda del centro Este de producción agrícola ganadera) y una pequeña parte de la VI-B (Húmeda del Este de producción agrícola) (Figura 4.24). La característica sobresaliente de estas tierras es su importante grado de desarrollo, fertilidad y alta productividad, consecuencia de sus caracteres físico químicos intrínsecos y del régimen de precipitaciones lo que los hace los suelos tradicionalmente de mayor productividad de la

provincia. Su uso es prácticamente agrícola y los procesos erosivos pueden limitar la capacidad productiva de estas tierras (INTA – RIAP, s.f.; Ghida Daza y Sánchez, 2009).

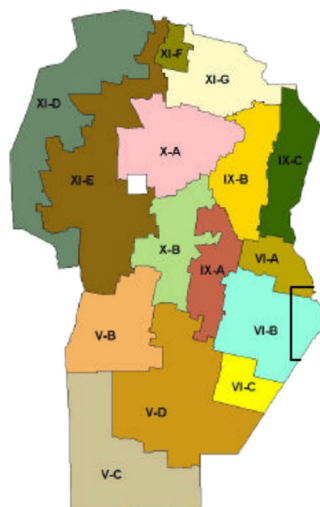


Figura 4.24 – Zonas y subzonas agroeconómicas de la provincia de Córdoba. Se muestra la zona de estudio correspondiente a la provincia. Fuente: INTA – RIAP.

4.6. DINÁMICA HÍDRICA SUPERFICIAL

De acuerdo a las denominaciones de las cuencas de la República Argentina adoptadas por la SSRH de la Nación (Giraut, M. *et al.*, 2002), la zona de estudio incluye principalmente la cuenca inferior del río Carcarañá, como así también parte de las cuencas de los arroyos Colastiné, Corralito y otros (al norte), y de los arroyos del SE de Santa Fe y N de Buenos Aires (al sur), como se observa en la Figura 4.25.

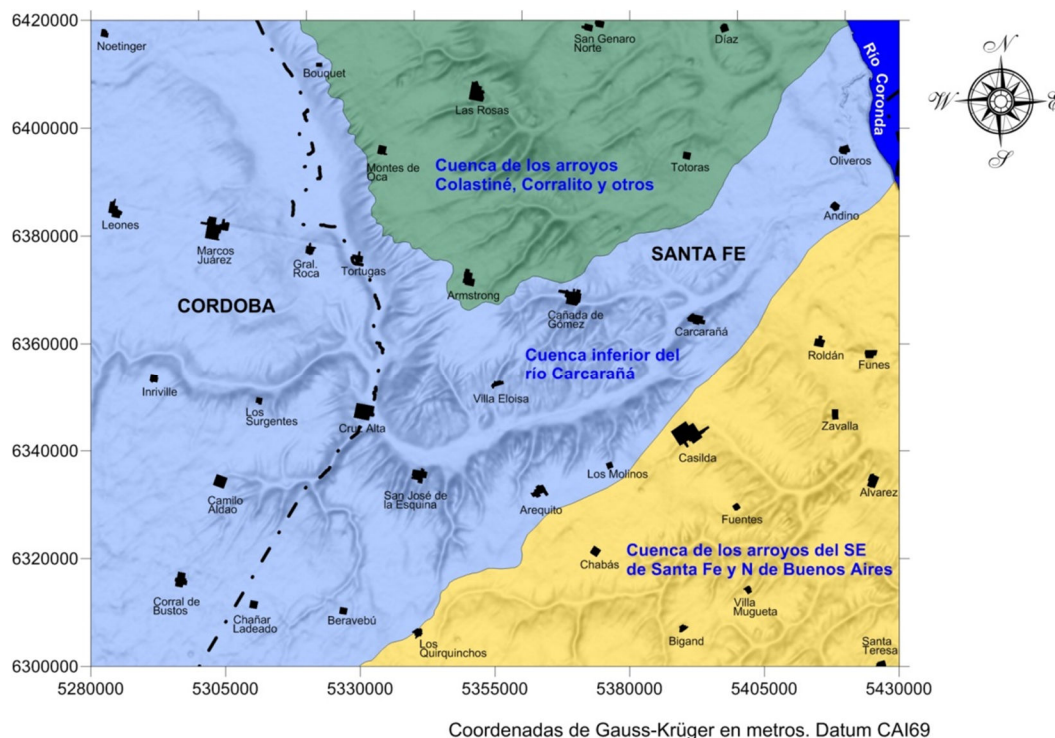


Figura 4.25 – Cuencas hidrográficas adoptadas por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (2002) que comprende el área de estudio.

ingresa en la provincia de Santa Fe en cercanías de la localidad de Cruz Alta, recibiendo los aportes del arroyo de las Tortugas en su margen izquierda, y del arroyo de las Mojarras en su margen derecha, ambos en el límite interprovincial entre Santa Fe y Córdoba.

El arroyo de las Tortugas vierte sus aguas en un retículo de cañadas de dibujo geométrico de rumbos generales SO-NE y NNO-SSE que ocupa el fondo de la Depresión de la cañada de San Antonio. Luego de la confluencia del Canal Litín-Tortugas con el Canal San Antonio, comienza el Canal Aliviador Tortugas, que ha sido trazado al este del curso del arroyo con el objeto de mitigar las inundaciones debidas a la escasa pendiente que presenta la depresión. Antes de desembocar en el río Carcarañá, tanto el canal aliviador como el arroyo de las Tortugas, reciben los aportes de las aguas que descienden por el talud de la Falla Tostado – Selva.

Después de pasar la localidad de Cruz Alta y bordear el denominado “Morrito” de Monasterio (Pasotti, 1974a, 1974b), en el que se observa un escurrimiento superficial sobre su margen izquierda en forma radial centrífuga correspondiente al de las aguas que bajan de dicha elevación, el río Carcarañá adquiere un rumbo general OSO-ENE circulando limitado por barrancas bien definidas con meandros muy divagantes en un fondo de valle mayor plano de 3.000 m de ancho. Lo hace con esta morfología hasta llegar al doble codo ubicado en cercanías de la localidad de Berreta (por control estructural vinculado a la Falla El Trébol), tras el cual sigue con rumbo SO-NE y circulando por una zona notablemente plana oriental al Bloque de Armstrong (San Guillermo). El cambio es neto y muy evidente pues el río circula encajado pero con ambas márgenes afectadas por una sucesión ininterrumpida de cárcavas que alcanzan un ancho de unos 200 m sobre ambas márgenes (Pasotti y Albert, 1991, 1995).

En el sector central de la cuenca del río Carcarañá, los afluentes mantienen una dirección de escurrimiento N-S y/o S-N, prácticamente normal al colector. El afluente principal sobre margen derecha es el arroyo Leones, con cabeceras en la divisoria de aguas entre las cuencas del río Carcarañá y del arroyo Saladillo (Fig. 4.26; Pasotti y Albert, 1995).

El afluente principal del río Carcarañá sobre su margen izquierda es el arroyo Cañada de Gómez. Su cuenca es la más meridional, la más profunda y la única que no presenta drenaje al ENE de todas las labradas por la acción regresiva de las aguas que descienden por el talud de la Falla El Trébol después de haber atravesado la planicie que caracteriza a la parte alta del Bloque de Armstrong (Pasotti, 1964). El arroyo Bajo de Perrone (o canal Los Chancheros) desemboca en el

arroyo Cañada de Gómez a la altura de la localidad homónima después de 15 km de recorrido y con rumbo NE. El tramo final del arroyo Cañada de Gómez se encuentra canalizado.

La cuenca del río Carcarañá limita al sur con la del arroyo Saladillo (límite sur del municipio de Rosario), que abarca aproximadamente unos 3.200 km². Los afluentes de primer orden del Saladillo presentan orientación SO-NE y OSO-ENE. El arroyo recibe varias cañadas, como la cañada Saladillo cercana a Bigand, y las cañadas Candelaria y Fuentes que se unen entre sí para confluir en el arroyo Saladillo, fuera de la zona del modelo, entre las localidades de Muñoz y Coronel Arnold, aproximadamente. El curso principal del arroyo Saladillo tiene una longitud de 150 km.

Todo el curso del río Carcarañá, con un ancho medio de 65 m, está limitado por barrancas de 3 a 4 m de altura. Entre las localidades de Cruz Alta y Carcarañá, sobre 98 km de recorrido, el río tiene un desnivel de 22,5 m (cotas 65 y 42,50 m) siendo su pendiente media igual a 0,23 m/km. Entre Carcarañá y la desembocadura en el Coronda, tras 70 km de recorrido, el río presenta un desnivel de 28 m (cotas 42,50 a 14,50 m) con una pendiente de 0,35 m/km (Soldano, 1947).

Los datos disponibles a través del Sistema Nacional de Información Hídrica (SNIH), dependiente de la SSRH de la Nación (SSRH, 2017a, 2017b), abarcan mediciones de caudales del río Carcarañá correspondientes a los períodos septiembre de 1980 a agosto de 2016 para la estación Pueblo Andino (provincia de Santa Fe), y los períodos enero de 1939 a mayo de 1948 y junio de 1952 a abril de 1954 para la estación de Cruz Alta (provincia de Córdoba). El derrame medio anual fue 2.863 hm³ para la primera estación, con un valor destacable de 5.109 hm³ en el año hidrológico 2001/2002, mientras que el correspondiente a la segunda estación fue de 748 hm³ para los años observados. En Pueblo Andino se registró un caudal medio anual promedio de 90,7 m³/s mientras que en Cruz Alta fue de 23,7 m³/s.

4.7. DINÁMICA HÍDRICA SUBTERRÁNEA

En este trabajo, siempre que se emplee la terminología “freatimetría” y asociadas (nivel freático, superficie freática, curva isofreática, etc.) se estarán refiriendo al acuífero libre o superior, mientras que “piezometría” y asociadas se relacionarán al acuífero semiconfinado o inferior.

En la región de estudio se ha trabajado con cuatro mapas freatimétricos que abarcan una parte importante del área de estudio, generadas por: Bitesnik (1968 y 1970), Kreimer (1969) y Venencio

(2007). En la Tabla 4.2 se describen las zonas de estudio comprendidas por cada freatimetría y períodos observados por los autores para su confección, mientras que en las figuras 4.27 y 4.28 se presentan los mapas freatimétricos correspondientes.

Tabla 4.2 – Freatimetrías existentes en la zona de estudio

Autor	Zona estudiada	Período observado
Bitesnik (1968)	región de Marcos Juárez (provincias de Córdoba y Santa Fe)	octubre a diciembre de 1965
Kreimer (1969)	zona de Firmat – Casilda – Cañada de Gómez (provincia de Santa Fe)	agosto a diciembre de 1966
Bitesnik (1970)	región de El Trébol (provincia de Santa Fe)	octubre a diciembre de 1966
Venencio (2007)	Cuenca baja del río Carcarañá (provincia de Santa Fe)	octubre de 2003 a febrero de 2004

La Figura 4.27 muestra los mapas freatimétricos de Bitesnik (1968, 1970) y Kreimer (1969) con los pozos censados (1.400 pozos destinados a diversos usos: doméstico, ganadero, industrial, etc.).

En las figuras puede apreciarse la correspondencia que existe entre la freatimetría y la topografía de las zonas analizadas. En el Bloque de San Guillermo se ubica una divisoria de aguas por la que el flujo subterráneo presenta direcciones de escurrimiento hacia el arroyo de las Tortugas y el canal Aliviador Tortugas al oeste, hacia el río Carcarañá al sur y hacia los cursos que descienden por el talud de la Falla de El Trébol al este (arroyos Cañada de Gómez y Bajo de los Perros, entre otros). En esa zona se observa un mayor gradiente freatimétrico en coincidencia con los lineamientos tectónicos que limitan el Bloque de San Guillermo. Fuera del bloque y al este del mismo, el área presenta una topografía mucho más plana horizontal y por consiguiente aumenta la separación entre curvas isofreáticas, definiendo una dirección de flujo subterráneo hacia el NE.

Como particularidad, la freatimetría refleja en la zona alledaña a la localidad de Cañada de Gómez una marcada deflexión hacia aguas arriba de las curvas isofreáticas, notoria en la Figura 4.27 a. Esto no solo es consecuencia del control ejercido por el arroyo homónimo, sino fundamentalmente por la acción de la batería de perforaciones que posee dicha localidad para la extracción de agua subterránea destinada para consumo.

La zona ubicada entre el río Carcarañá y el arroyo Saladillo presenta otra notoria divisoria de aguas (Figura 4.27 a). Es una zona más bien plana desde el punto de vista topográfico por lo que

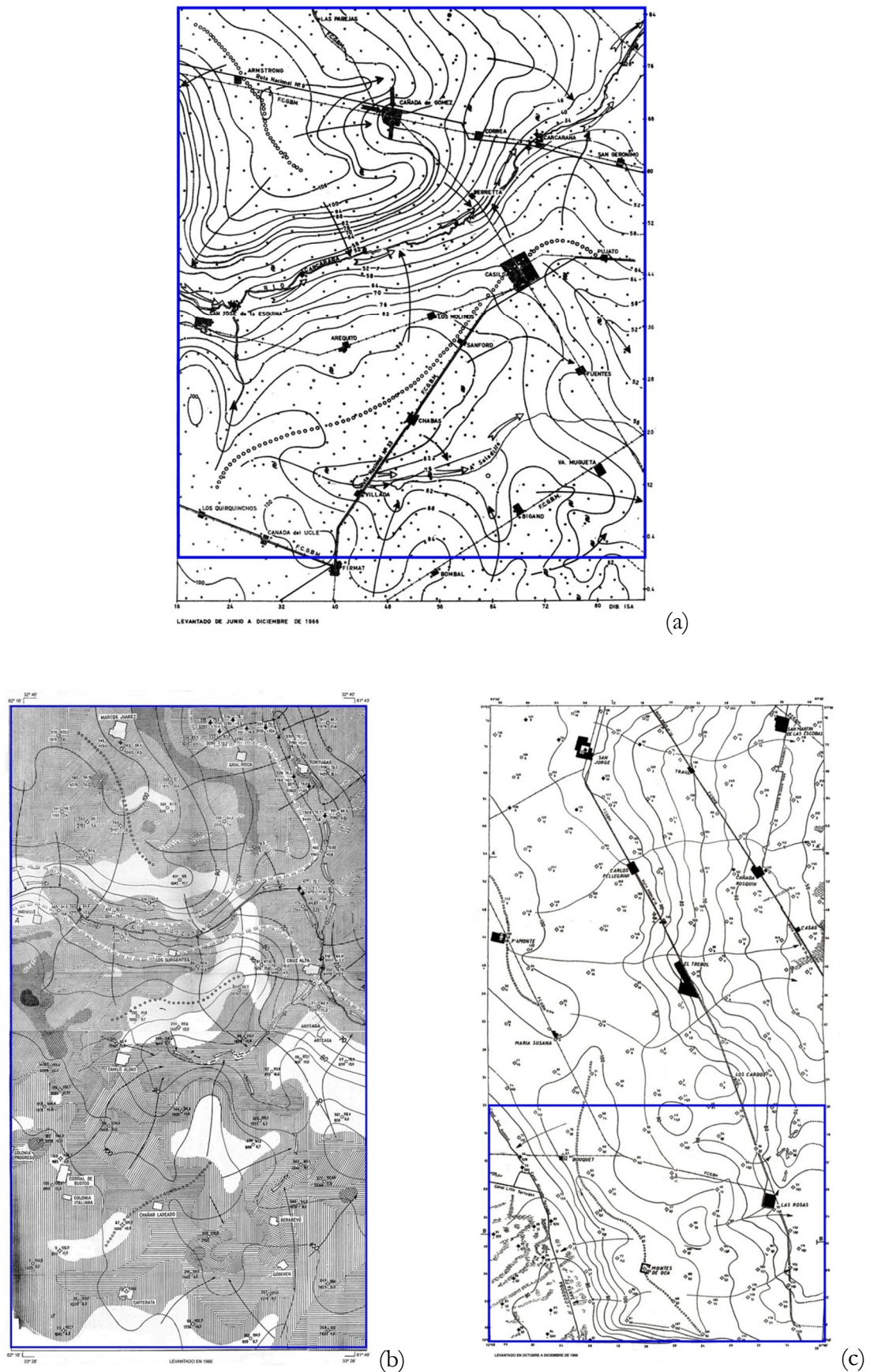


Figura 4.27 – Mapas freatemétricos: (a) Kreimer (1969), (b) Bitesnik (1968) y (c) Bitesnik (1970). En el mapa de Kreimer se muestra la ubicación de los pozos censados, mientras que en los de Bitesnik solo se presentan algunos pozos a modo indicativo. En los mapas se destaca recuadrada en azul el área correspondiente a la zona de estudio.

el escurrimiento subterráneo adquiere direcciones de flujo hacia ambos cursos de agua. Las curvas isofreáticas se encuentran espaciadas como consecuencia de lo inicialmente citado. El arroyo Leones, como así también las cañadas de las Mojaras, de las Totoras, Candelaria y Fuentes, también ejercen control sobre la dirección del flujo subterráneo. Vale destacar que los cursos de agua presentes en las freatimetrías citadas tienen carácter efluente respecto al acuífero libre.

En las figuras 4.27 y 4.28 se observa que, a pesar de los 40 años, no existen grandes diferencias entre ambos mapas freatimétricos.

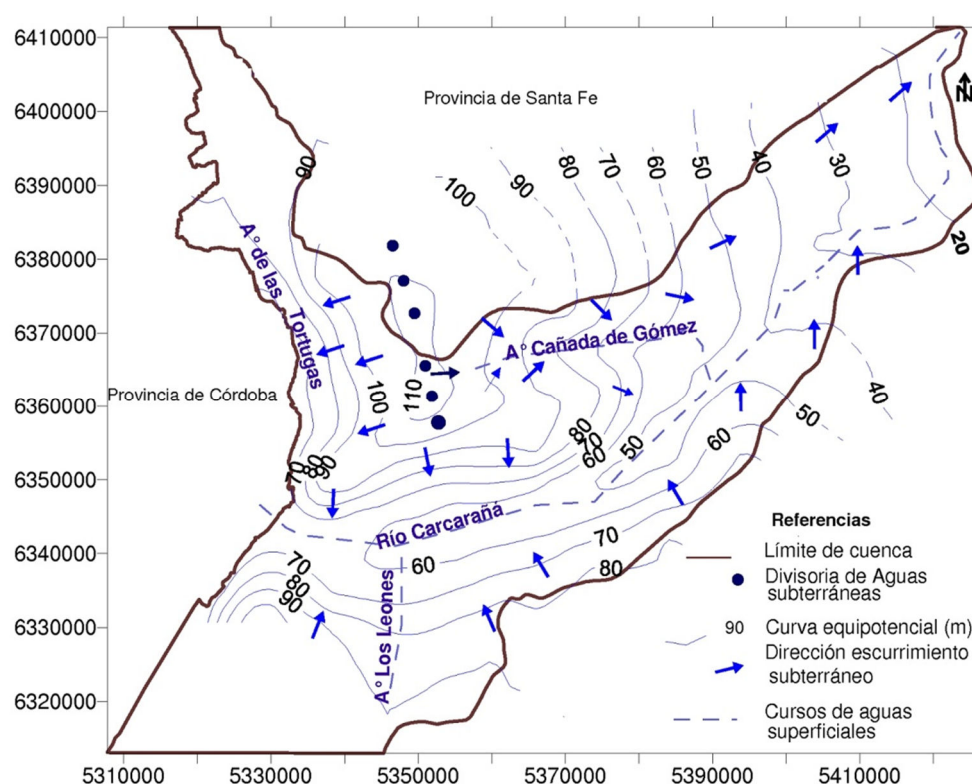


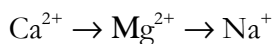
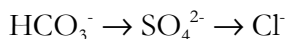
Figura 4.28 – Mapa freatimétrico de la cuenca del inferior río Carcarañá para diciembre de 2003 (tomado de Venencio, 2007).

4.8. HIDROQUÍMICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

Según Toth (2000), particularmente en la dirección del flujo regional, el total de sólidos disueltos aumenta, la facies aniónica evoluciona desde bicarbonatada a sulfatada y finalmente clorurada y el pH pasa de ácido a básico, entre otros. Es así que en las zonas de recarga domina la disolución de minerales mientras que en las de descarga se produce depósito y acumulación.

Si bien las reacciones y procesos químicos que se desarrollan son muy diversos, generalmente se observa que las aguas subterráneas que tienen menor tiempo de permanencia en el subsuelo son

corrientemente bicarbonatadas, predominando luego el sulfato, y finalmente las aguas más salinas son cloruradas (Custodio y Llamas, 1983). Es decir, que en la evolución normal de un agua en un acuífero de circulación regional van dominando sucesivamente los siguientes iones:



Con respecto a la zona de estudio que corresponde a la provincia de Santa Fe, Kröhling (1996) a través de un análisis de 50 muestras de aguas subterráneas del acuífero libre en la cuenca del río Carcarañá, determinó que en la composición catiónica prevalecen las aguas fuertemente sódico-potásicas en un 94%, correspondiendo el 6% restante a aguas predominantemente sódico-potásicas. En la composición aniónica predominan las aguas predominantemente bicarbonatadas (50%) y fuertemente bicarbonatadas (42%), algunas son del tipo intermedio – sin anión dominante (4%) y otras predominantemente sulfatadas (4%). Según su contenido salino, el análisis señaló que el 90% de las muestras son débilmente salinas, el 6% no salinas y el 4% moderadamente salinas. Estos resultados son comparables a los obtenidos por Gollán y Lachaga (1939) en la cuenca en Santa Fe.

Considerando los antecedentes de composición de las aguas del acuífero libre analizadas en estudios geoquímicos realizadas en áreas de la cuenca del río Ctalamochita – Carcarañá, desde la provincia de Córdoba, y desde la zona de recarga hacia la de descarga, se tienen aguas de evolución creciente en su composición hasta llegar a la llanura suroccidental cordobesa. Comparando la composición de las aguas en el SE de Córdoba (del tipo intermedio levemente sulfatado – clorurado sódico) con la composición de las aguas en la zona de estudio en Santa Fe, Kröhling (1996) observó una interrupción en la evolución antes citada.

Al analizar la composición iónica de las aguas del acuífero libre de la cuenca en la provincia de Santa Fe, Kröhling (1996) dedujo el predominio de aguas muy jóvenes, es decir, aguas del tipo bicarbonatadas sódicas de reciente infiltración, en la que dominan los iones HCO_3^- y Ca^{2+} . El aumento de los tenores de HCO_3^- señala la magnitud de la cantidad de agua meteórica infiltrada en la misma, inferida a partir del incremento en el promedio anual de precipitaciones en relación al que se registra en la zona contigua en la provincia de Córdoba. La concentración de SO_4^{2-} y Cl^- puede aumentar o éstos pueden precipitar a medida que el agua circula por el medio.

En el sector de la cuenca en la provincia de Córdoba, y complementando lo anteriormente citado, Bitesnik (1968) señala, como rasgo general, que en las zonas de recarga del acuífero libre se observa la menor concentración salina, aumentando hacia los bajos o zonas de descarga. Pero existe una anomalía al respecto en una zona importante de la cañada de San Antonio y el arroyo Tortugas, en donde la salinidad decrece. Esto puede deberse a los cambios en las características de los sedimentos presentes (aumento de salinidad en materiales pelíticos, y disminución ante la presencia de arenas).

En cuanto al acuífero semiconfinado de las arenas, Kreimer (1969) señala distintas características en cuanto a su aptitud. Desde la localidad de Inrville (prov. de Córdoba) hasta Villa Eloísa en Santa Fe, las aguas no son aptas por su elevada salinidad, en cambio desde Arequito hacia el este, pasando por Casilda, ya es prácticamente aprovechable en forma completa. Además sobre la línea Corral de Bustos – Los Quirquinchos – Firmat, los residuos salinos son muy elevados. Cuando se lo explota en forma conjunta con el o los acuíferos semiconfinados pertenecientes al paquete cuaternario, y considerando el acuífero como uno solo, Kreimer (1969) aclara que el comportamiento indica que mientras en Pujato (al este de la zona) la calidad es mediocre, en San José de la Esquina (al oeste) la calidad es mala. Para este acuífero unificado Kreimer (1969) califica las aguas como bicarbonatadas-sódicas, magnésicas-cálcicas en la provincia de Santa Fe.

En el sector del área de estudio correspondiente a la provincia de Córdoba, Bitesnik (1968) indica que el 100% de las muestras tomadas del acuífero semiconfinado dio salinidad elevada e inepta, y un 35% de dureza elevada. Además, expresa que la relación Mg^{2+} / Ca^{2+} es igual, o mayor el Mg^{2+} que el Ca^{2+} . Como, generalmente, en las aguas naturales la proporción de Ca^{2+} es mayor que la de Mg^{2+} , el autor interpreta que el acuífero se vincula con la existencia de sedimentos de origen marino.

5. MODELO CONCEPTUAL HIDROGEOLÓGICO

5.1. FUNDAMENTOS DEL MODELO CONCEPTUAL

El modelo conceptual hidrogeológico de un sistema acuífero es una representación descriptiva (frecuentemente a través de un diagrama simplificado), que incorpora una interpretación de los diversos factores (geológicos, hidrológicos, etc.) que participan en los procesos que condicionan el movimiento del flujo subterráneo en dicho sistema acuífero. Fundamentalmente, representa la hipótesis de funcionamiento del sistema desde un punto de vista cualitativo (Gómez *et al.*, 2012). La simplificación es necesaria ya que es imposible una reconstrucción completa del sistema acuífero. En general, resume las condiciones fundamentales de la dinámica de los flujos subterráneos en el subsuelo y sus vínculos con los cuerpos de agua superficiales y los aportes desde la atmósfera.

El modelo conceptual es muy importante en el desarrollo de un modelo hidrogeológico, ya que permite establecer las principales características del sistema real que serán tenidas en cuenta durante el proceso de modelación (SEA, 2012), siendo el paso previo a la implementación del modelo matemático.

Debido a la naturaleza física del flujo del agua subterránea, el modelo conceptual de un sistema hidrogeológico debe incluir como mínimo la caracterización de la geometría del acuífero, las características litoestratigráficas del sistema, los tipos de acuíferos involucrados, las entradas y salidas del sistema y la freaticimetría y/o piezometría (sentido del flujo). Para ello, es necesario la recopilación, procesamiento e integración de información de base para el desarrollo de un modelo conceptual (Tabla 5.1).

Finalmente, los aspectos a detallar en un modelo conceptual son los siguientes:

Marco Físico

- Tipo de acuífero (libre, confinado, semiconfinado)
- Características del medio (poroso, fracturado, etc.)
- Propiedades hidráulicas (conductividades hidráulicas, etc.)
- Régimen (estacionario, transitorio)
- Estado (saturado, no saturado)
- Geometría del acuífero (capas, espesores)

- Condiciones de contorno (nivel fijo, caudal fijo, mixto, etc.)
- Variabilidad propiedades (medio homogéneo o heterogéneo)

Acciones externas

- Naturales (zonas de recarga, tránsito y descarga)
- Artificiales (áreas de bombeo y de riego)

Tabla 5.1 – Materiales y datos relevantes a recopilar y/o procesar para la confección de un modelo conceptual hidrogeológico.

Ámbito	Información
Global	- Cartas topográficas - Imágenes satelitales - Modelos digitales de terreno (MDT) o de elevación (MDE) - Fotografías aéreas
Edafológico	- Cartas de suelo - Mapas de uso del suelo - Riego
Meteorológico	- Precipitación - Temperatura - Otras variables meteorológicas
Hidrológico	- Red de drenaje de cursos de agua - Caudales en cursos de agua naturales e hidrogramas - Batimetrías - Datos sedimentológicos del lecho de los cursos de agua
Geológico	- Cartas geológicas y perfiles geofísicos - Estudios estratigráficos - Geomorfología - Geología estructural
Hidrogeológico	- Ensayos hidráulicos - Tipos de acuíferos - Freatimetría y/o piezometrías - Extracciones de agua subterránea

5.2. MATERIAL ELABORADO PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL

5.2.1. Modelo Digital de Elevaciones

La elaboración del Modelo Digital de Elevaciones (MDE) se basó en los datos planialtimétricos obtenidos por la Misión Topográfica Radar del Trasbordador Espacial (SRTM) de la NASA versión 4 (CGIAR-CSI, 2008; Jarvis *et al.*, 2008). Dichos modelos están establecidos en proyección cartográfica equirrectangular elipsóidica (latitud – longitud), con el elipsoide WGS84 como superficie de referencia planimétrica. Las elevaciones están en metros y referidas al geoide EGM96.

Sobre el modelo SRTM inicial se efectuaron diferentes operaciones, tales como el relleno de vacíos de datos, la transformación al sistema cartográfico argentino Gauss-Krüger Faja 5 Datum CAI69, extracción del área correspondiente a la zona del modelo hidrogeológico y la aplicación de un filtro gaussiano de paso bajo con el objeto de atenuar los valores de los errores aleatorios presentes en los modelos SRTM, que se presentan con alta frecuencia espacial y que constituyen una fuente de ruido (Racca, 2008). Posteriormente se transformó el MDE resultante al formato GRID.

Dado que no hay coincidencia entre los geoides de referencia altimétrica correspondientes a los modelos SRTM y a las cartas topográficas del Instituto Geográfico Militar (IGM) (establecido en forma discreta por nivelación), se procedió a comparar las cotas de 155 puntos distribuidos en la zona de modelado, medidas en ambas fuentes respectivamente (IGM, 1920-1960) (Figura 5.1).

Esto arrojó como resultado que en el área del modelo hidrogeológico existe una separación altimétrica media entre ambos geoides de +2,45 metros, estando el geoide EGM96 por debajo del correspondiente a las cartas del IGM. A partir del archivo anteriormente citado, se generó un nuevo archivo en formato Grid, disminuyendo uniformemente los valores de las elevaciones SRTM en 2,45 m para aproximarlos a los del geoide de referencia del IGM.

Como resultado final de los procedimientos mencionados se obtuvo la planialtimetría del área correspondiente al modelo hidrogeológico a ser elaborado. En la Figura 5.2 se muestra el MDE obtenido.

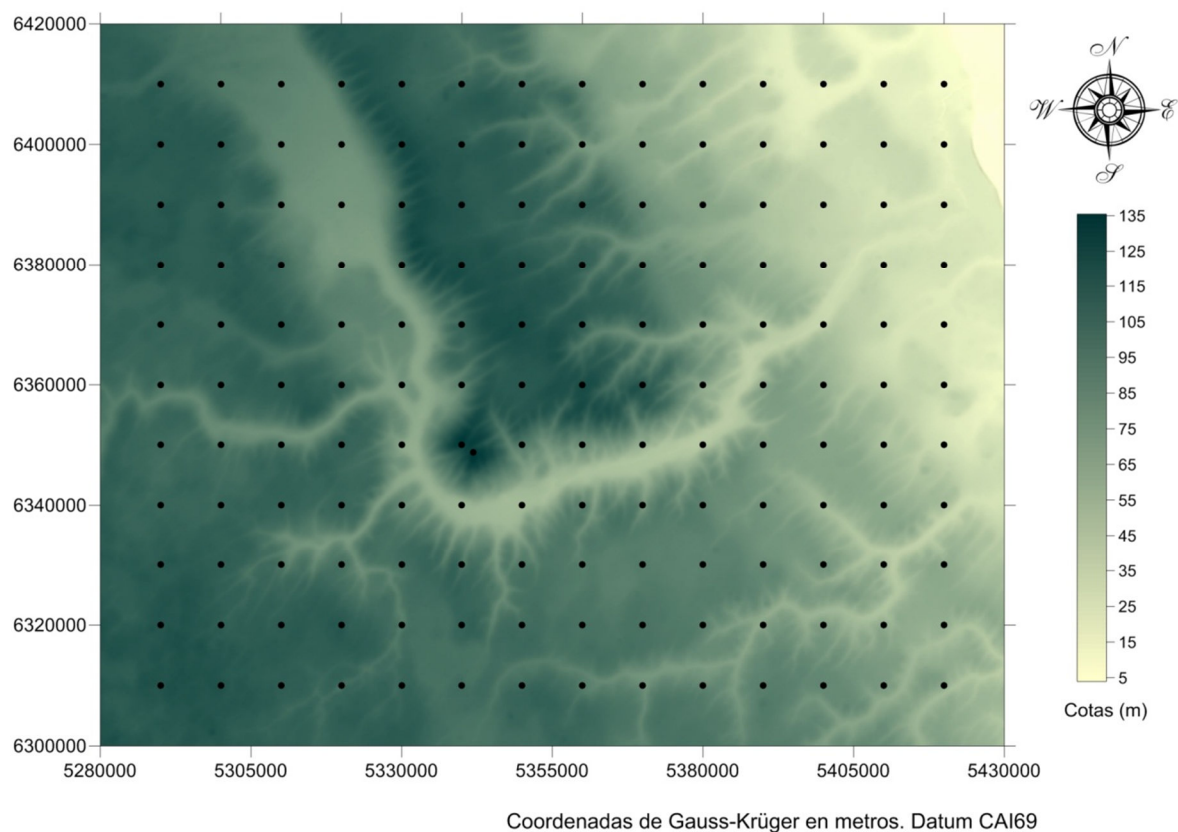


Figura 5.1 – Ubicación de los 155 puntos utilizados para determinar la diferencia de cotas entre geoides de referencia. De fondo se observa el MDE inicial.

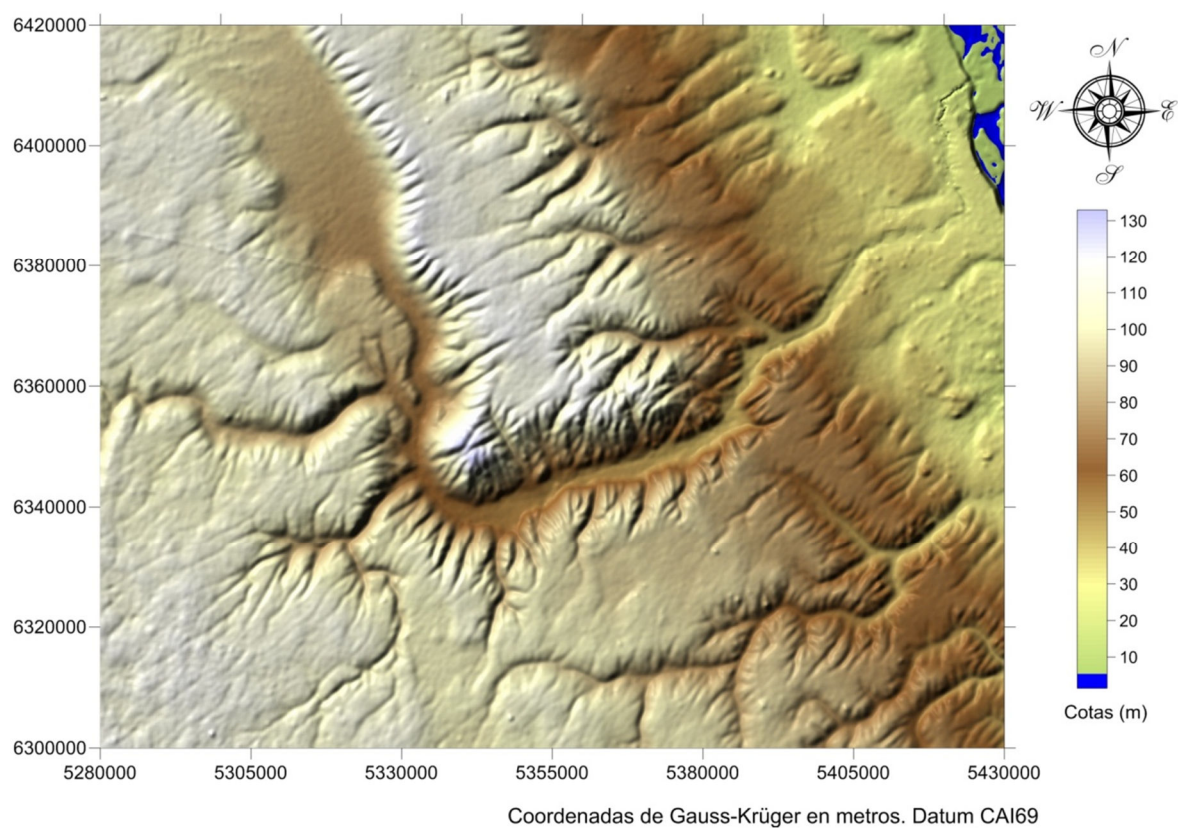


Figura 5.2 – Modelo Digital de Elevaciones definitivo correspondiente a la zona de modelación.

Se obtuvieron del mismo las curvas de nivel topográficas o isohipsas (Figura 5.3), como así también el modelo digital correspondiente a las pendientes derivadas (Figura 5.4). Para ambas figuras se eligieron las escalas de colores para las cotas con el objetivo de resaltar lo mejor posible la morfología del área de estudio.

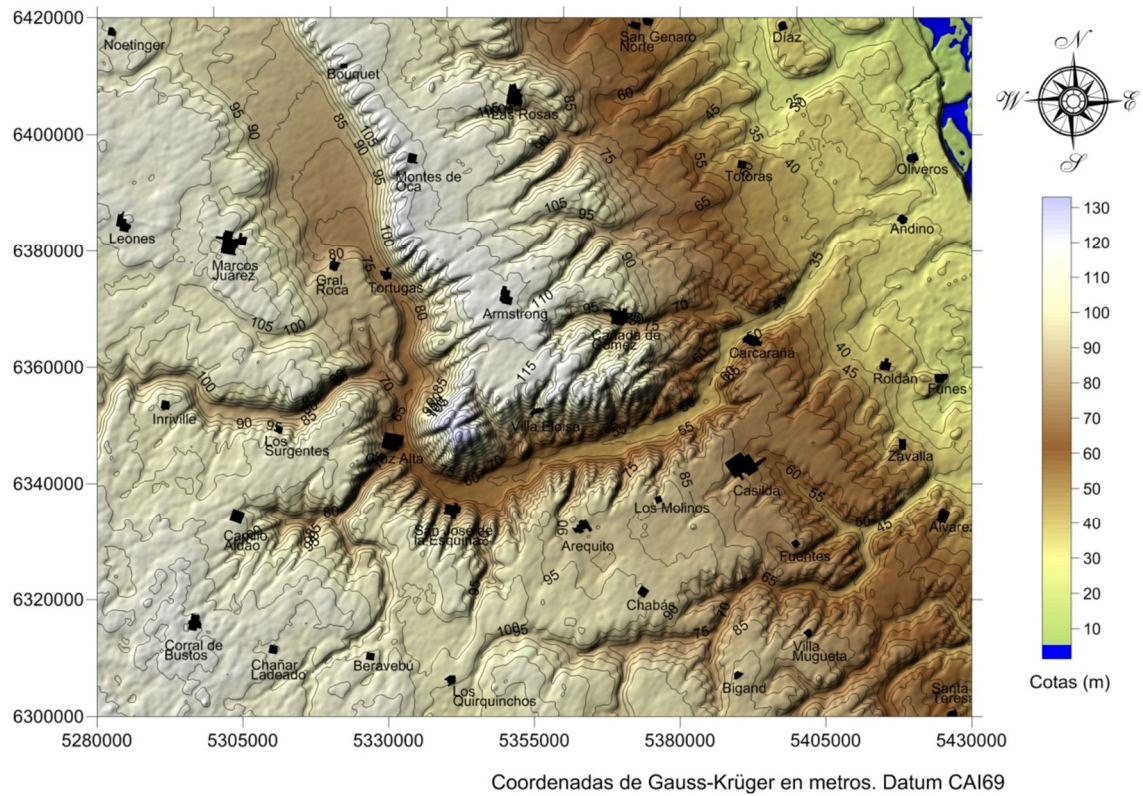


Figura 5.3 – Topografía de la zona de modelo expresada a través de las curvas de nivel (equidistancia 5 m) sobre el MDE SRTM (NASA).

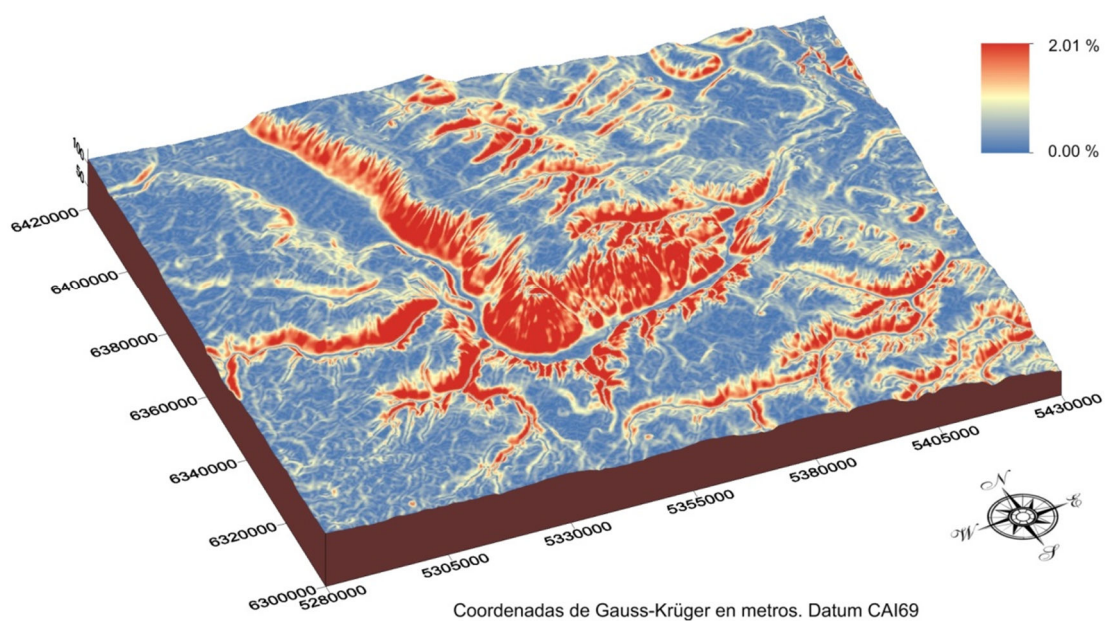


Figura 5.4 – Pendientes derivadas del MDE expresadas en porcentaje.

De la observación del MDE y de las figuras anteriores resulta evidente la identidad morfológica que adquiere el Bloque de San Guillermo en la zona de modelación. Las mayores pendientes del bloque se presentan asociadas a los límites oeste (talud de la Falla de Tostado – Selva) y sur (talud de la Falla del río Carcarañá). El desnivel entre las cotas que representan la superficie plana de la parte central del bloque (ca. 115 m s.n.m.) y el área situada al este está representado por un talud de pendiente de gradiente evidente pero de menor desnivel (figuras 5.3 y 5.4).

Al este del bloque sigue una planicie de pendiente regional SO-NE. Hacia al sur, la divisoria de aguas entre el arroyo Saladillo y el río Carcarañá está representada por una zona prácticamente plana. En lo que respecta a la zona ubicada al oeste y SO del área de estudio en la provincia de Córdoba, se observa una distribución de pendientes representativas de los diferentes ambientes geomorfológicos discriminados por Carignano *et al.* (2014): Depresión tectónica de la cañada de San Antonio, Planicie Fluvio-eólica central de Córdoba y Planicie loésica de Marcos Juárez-Corral de Bustos.

5.2.2. Red de drenaje

La red de drenaje de la zona de estudio se obtuvo del MDE empleando un software SIG. Fue necesario realizar una serie de pasos previos como el relleno de depresiones del MDE y la determinación de las direcciones de flujo y flujo acumulado. En las direcciones de flujo se define para una celda cualquiera del MDE a qué celda vecina fluirá el agua de manera natural, mientras que en la operatoria de flujo acumulado se cuenta en forma acumulativa las celdas que drenan naturalmente a cada celda de un curso de agua.

En primera instancia se obtuvieron cuatro redes de drenaje en función de distintos valores de umbral (U), representando éste el número mínimo de celdas de drenaje o de flujo acumulado a partir del cual se considera que inicia y forma un curso de agua (Figura 5.5). Cuanto más bajo sea el valor de U, las redes son más densas y se incluyen cauces por los que drenan bajos caudales, mientras que para valores altos de U se consideran cauces principales en lo que a escorrentía recibida se refiere (Saura *et al.*, 2000).

Para obtener la red de drenaje final más acorde a la realidad y al objetivo de la misma, se partió de la obtenida con el valor $U = 2000$ y luego se la ajustó a través del cotejo con cartas topográficas relevadas por el IGM (actualmente IGN) en escala 1:50.000 (Olaya Ferrero, 2004) e imágenes obtenidas por sensoramiento remoto como imágenes satelitales.

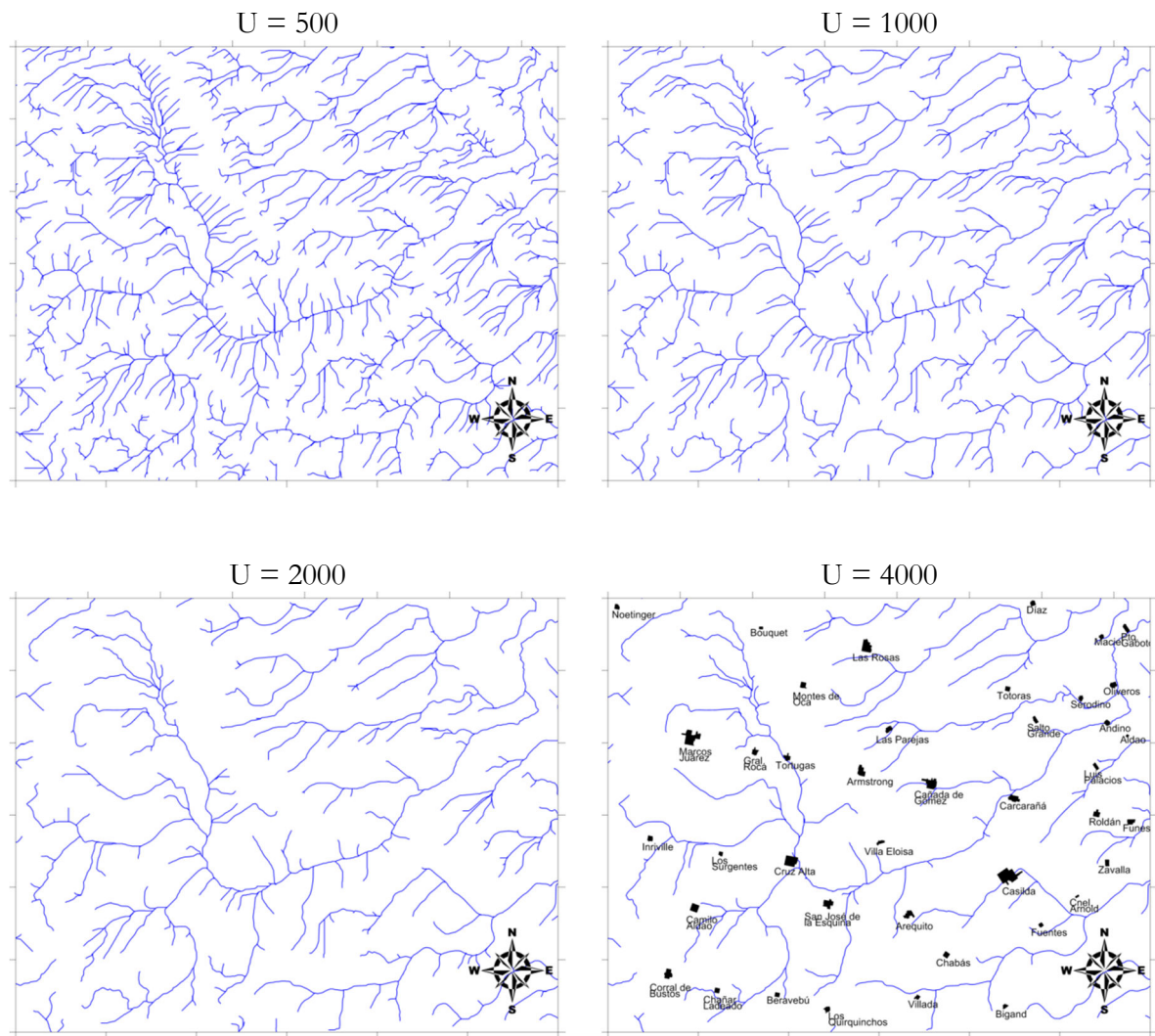
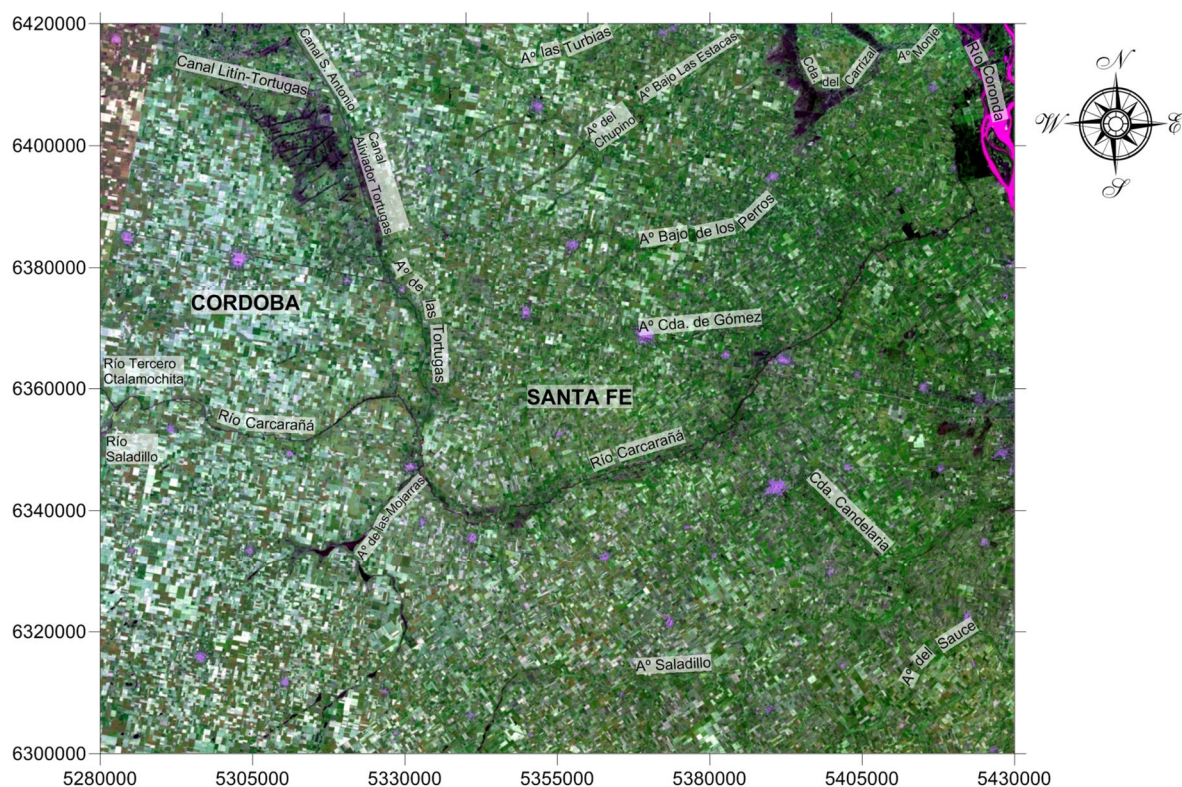


Figura 5.5 – Redes de drenaje obtenidas para distintos valores del umbral U.

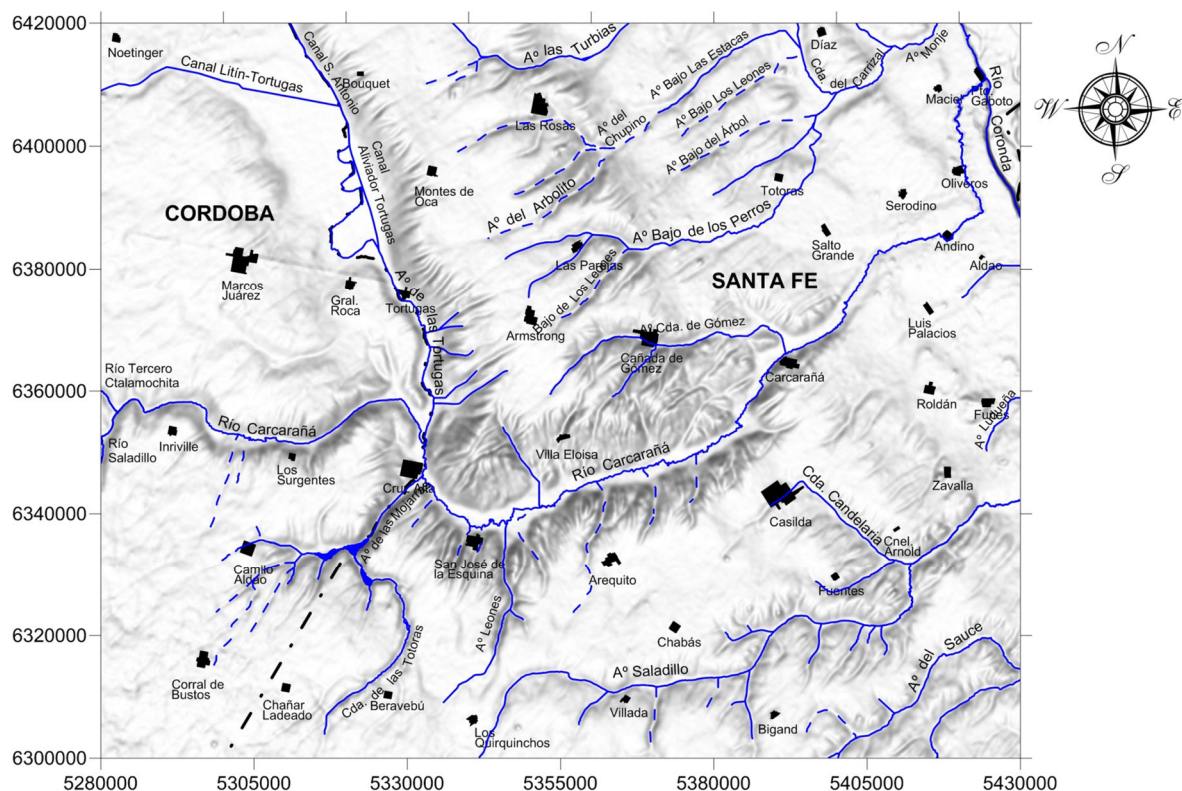
Esta etapa derivó en la eliminación y/o acotación en el recorrido de algunos cursos de la red, como así también en la distinción de cauces permanentes y transitorios.

Por último, se adaptó el recorrido de los cursos principales de la zona de estudio en función de la vectorización de los mismos a través de un software SIG y el empleo de imágenes satelitales Landsat 7 ETM+ (GLCF, 2008), trabajando con la composición de bandas en falso color compuesto RGB 351, imagen que fue tratada posteriormente con filtros de realce y retoque digital para resaltar los cursos de agua (Figura 5.6). La red de drenaje definitiva puede observarse en la Figura 5.7.



Coordenadas de Gauss-Krüger en metros. Datum CAI69

Figura 5.6 – Composición RGB 351 basada en bandas Landsat 7 ETM+.



Coordenadas de Gauss-Krüger en metros. Datum CAI69

Figura 5.7 – Red de drenaje de la zona de estudio en donde se consideran los cursos principales a fines del modelo.

5.2.3. Análisis estratigráfico

Teniendo por objetivo la elaboración del modelo conceptual hidrogeológico, fue necesario realizar un análisis lo más detallado posible de los antecedentes sobre la estratigrafía de la zona de estudio, principalmente considerando aquellos trabajos basados en la caracterización sedimentológica de testigos de perforaciones de investigación y de muestreos de perfiles aflorantes y en correlaciones estratigráficas regionales.

Inicialmente se analizó la recopilación de la información hidrogeológica generada por el Convenio realizado entre la Dirección Provincial de Obras Hidráulicas – Servicio Provincial de Agua Rural (DPOH-SPAR) y el Instituto Nacional del Agua – Centro Regional Litoral (INA-CRL) en el año 2002 (DPOH-INA, 2002). Como complemento se dispusieron de datos de perforaciones efectuadas por reparticiones nacionales y los correspondientes afloramientos y sondeos empleados en diversos trabajos de investigación, tanto en la provincia de Santa Fe como en la de Córdoba, pero siendo los de esta última muy escasos.

A pesar de contar con una buena cantidad de datos, es importante resaltar que dada la extensión de la zona de estudio (18.000 km²), los datos litológicos relacionados con la red de perforaciones para provisión de agua subterránea presentan una baja densidad, siendo algunas descripciones de difícil análisis. Por ello, la interpretación de la estratigrafía del área de estudio en este trabajo constituye una aproximación basada en los antecedentes existentes.

La metodología empleada partió de discriminar las perforaciones que poseen un análisis relativamente correcto de las columnas estratigráficas correspondientes a diversas localidades de ambas provincias. Luego se procedió a mapearlas y a correlacionarlas estratigráficamente. Fue importante el hecho de contar con datos de perforaciones en localidades ubicadas fuera de la zona de estudio, ya que de esta manera se obtuvo una mejor definición de la estratigrafía en los límites de dicha zona (Figura 5.8).

Como base del análisis estratigráfico y de las correlaciones estratigráficas se empleó el trabajo de Kröhling e Iriondo (2003), quienes reconocieron los conjuntos sedimentarios mayores dentro del Bloque de San Guillermo, a partir de la ejecución de una perforación de investigación a 100 m de profundidad y de la interpretación y posterior selección de perfiles de pozos previos. La columna estratigráfica cuaternaria representativa del Bloque de San Guillermo lo constituye la perforación de San Guillermo, compuesta por 54 m de loess primario cuaternario (discriminado en tres

unidades formacionales, conteniendo intercalaciones palustres), 6,3 m de espesor de limo palustre plástico cuaternario sobreyaciendo el paquete de arenas y pelitas intercaladas miocenas de la Fm Paraná (Kröhling e Iriondo, 2003).

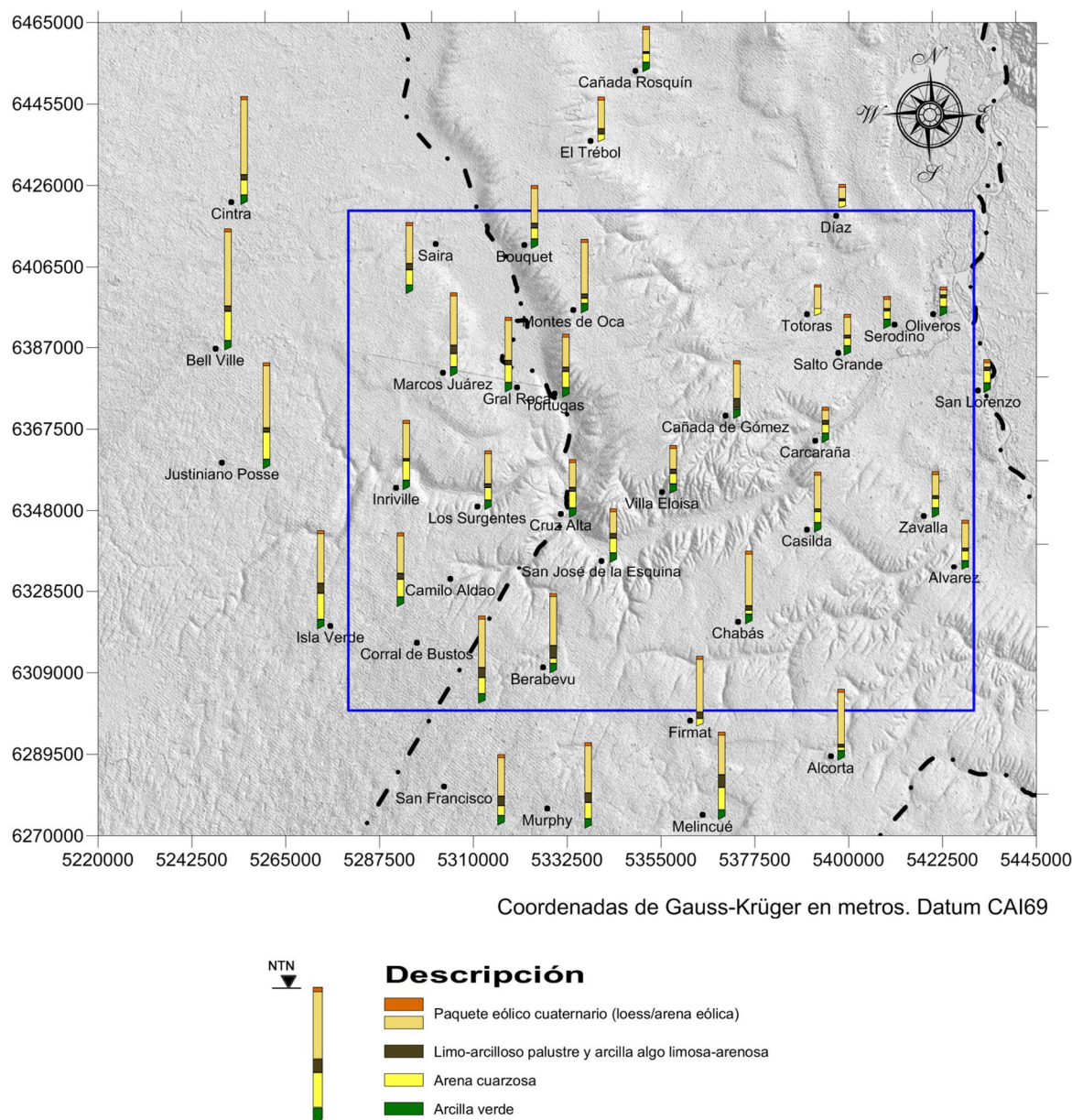


Figura 5.8 – Principales localidades con datos de perforaciones y descripción litológica resumida de las mismas. En azul la zona de estudio.

De acuerdo a los autores, la secuencia sedimentaria del área que se extiende al este del Bloque de San Guillermo está representada por una columna loésica cuaternaria de menor potencia, que descansa en discordancia sobre la Fm Ituzaingó (“arenas Puelches”) de edad Plioceno-Pleistoceno inferior y que hacia abajo pasa en discordancia a la facies péltica litoral de la Fm Paraná.

El Bloque de San Guillermo presenta la singularidad de no haber sido alcanzado o influido por las fajas y abanicos aluviales que dominaron la Pampa Norte durante el Cuaternario. También actuó como límite occidental de las migraciones del río Paraná, cuya Formación Ituzaingó/"arenas Puelches" no fueron sedimentadas en ese área. Esto se dedujo de la columna estratigráfica general, de las correlaciones estratigráficas dentro y fuera del bloque y de la geomorfología regional (Kröhling e Iriondo, 2003).

En líneas generales, se diferenciaron cuatro unidades o asociaciones litológicas principales para la conformación de la litoestratigrafía del modelo hidrogeológico, definidas a través de las descripciones estratigráficas de cada columna considerada, y apoyándose en datos de sedimentología recopilados. Estas unidades sobreyacen a las arcillas de la Fm Paraná, como se muestra esquemáticamente en la Figura 5.9.

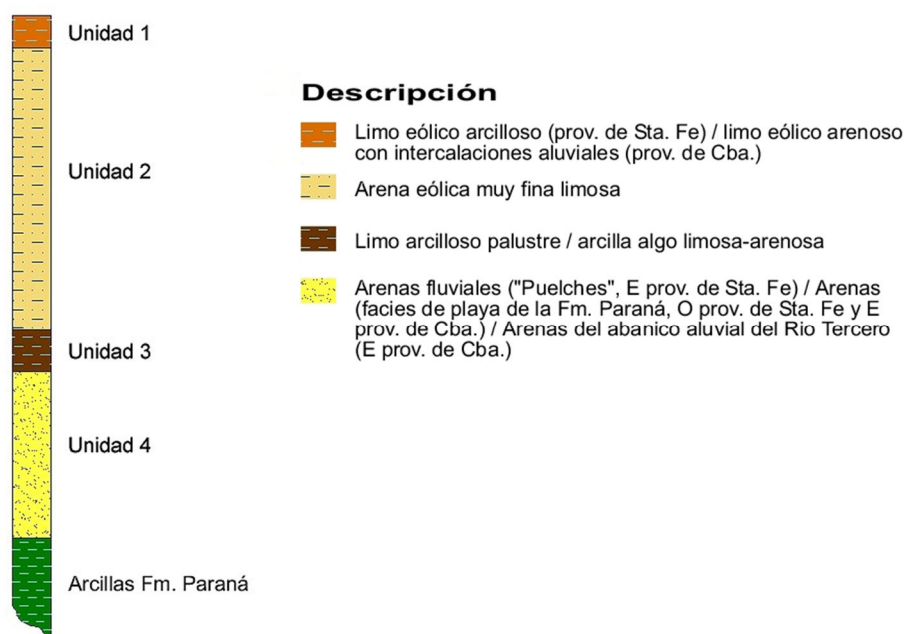


Figura 5.9 – Esquema general de las unidades litológicas adoptadas para la estratigrafía en la zona de estudio.

Las unidades 1 y 2 forman parte del paquete eólico cuaternario (loess/arena eólica) referido por Kröhling e Iriondo (2003). La primera unidad está constituida por un limo eólico arcilloso y poco arenoso (perteneciente a la Fm Tezanos Pinto, Iriondo, 1987; Kröhling 1999a), salvo en el SO de la cuenca en Santa Fe, donde el contenido de arena aumenta, mientras que en la provincia de Córdoba está conformada por un limo fino eólico arenoso y con presencia de arenas finas provenientes del abanico aluvial del río Tercero, formando parte también de la citada formación (Carignano, 1999). La unidad 2 está formada por una arena eólica muy fina limosa, algo arcillosa y permeable (correspondiente a la Fm Carcarañá, Kröhling, 1999a) y a unidades loésicas que

completan la columna. La unidad 3 comprende la unidad limo-arcillosa palustre definida por Kröhling e Iriondo (2003) en el Bloque de San Guillermo como así también arcillas algo plásticas, algunas veces con contenido de limo o arena, localizadas fuera del bloque citado anteriormente, y que aparecen en las descripciones de perforaciones en la zona del modelo. Esta unidad tiende a ser discontinua hacia el este de la zona de estudio (Kröhling e Iriondo, 2003; Tujchneider *et al.*, 2005). Las arenas cuarzosas que conforman la unidad 4 involucran tanto a las arenas que constituyen el acuífero Puelche como a las correspondientes a la facies de playa de la Formación Paraná (Kröhling e Iriondo, 2003) y a la arena que compone el paleo-abanico aluvial del río Tercero (Kröhling e Iriondo, 2003). Particularmente, el acuífero Puelche está constituido por arena cuarzosa fina bien seleccionada, de color amarillo claro con frecuentes segregaciones de óxidos de Fe, en estratos medianos y gruesos (Iriondo, 2011), mientras que la facies de playa de la Fm Paraná está conformada por arena cuarzosa muy fina a fina, amarillo pálido y moderadamente seleccionada (Kröhling e Iriondo, 2003). Las primeras tienen origen fluvial mientras que las segundas marino; de aquí las diferencias en salinidad de los respectivos acuíferos. La imposibilidad de demarcar con suficiente exactitud los dominios tanto areales como en profundidad de las arenas citadas anteriormente, teniendo en cuenta la escasa información precisa a nivel hidrogeológico en la región, hizo que se agruparan en la unidad 4.

Como el pasaje de arena a loess entre el MAP y la FPL es un pasaje gradual, representado en el campo por manchones de arena, en general de pocos cientos de metros cuadrados en una superficie en general loésica, resultó imposible mapear el límite entre aquellos a los efectos de incorporar esta particularidad al análisis estratigráfico en el sector SO del área de estudio.

En cada una de las columnas consideradas se determinaron las cotas que delimitan estas unidades y se procedió a realizar, posteriormente, un estudio 3D con el objetivo de obtener una mejor comprensión y aproximación del subsuelo en la zona de estudio. En trabajos de investigación realizados al norte de la zona de estudio (Brunetto e Iriondo, 2007), más precisamente en el sector norte del Bloque de San Guillermo, se comprobó la existencia de la Falla de Tostado – Selva a través de los rechazos de hasta 30 m observados en perforaciones realizadas a uno y otro lado de la misma.

A partir del MDE obtenido para la zona del modelo, se confeccionaron tres perfiles topográficos que incluyen localidades ubicadas dentro de la misma y cuyas trazas cruzan al Bloque de San Guillermo. Se ubicaron en ellos las columnas estratigráficas correspondientes a dichas localidades,

observándose en ambos perfiles una notoria diferencia en las cotas de techos y pisos de las unidades a ambos lados de las fallas Tostado – Selva, El Trébol y del río Carcarañá, considerando a estas atravesando totalmente en profundidad las unidades litológicas definidas (figuras 5.10, 5.11 y 5.12, en las que se observa en líneas de trazos las proyecciones de las cotas de techo y piso de la Unidad 3 hacia ambos lados de las fallas). A fines de la simplificación al indicar las trazas en corte de dichas fallas se evitó representar la dirección y ángulo de buzamiento de los respectivos planos de falla.

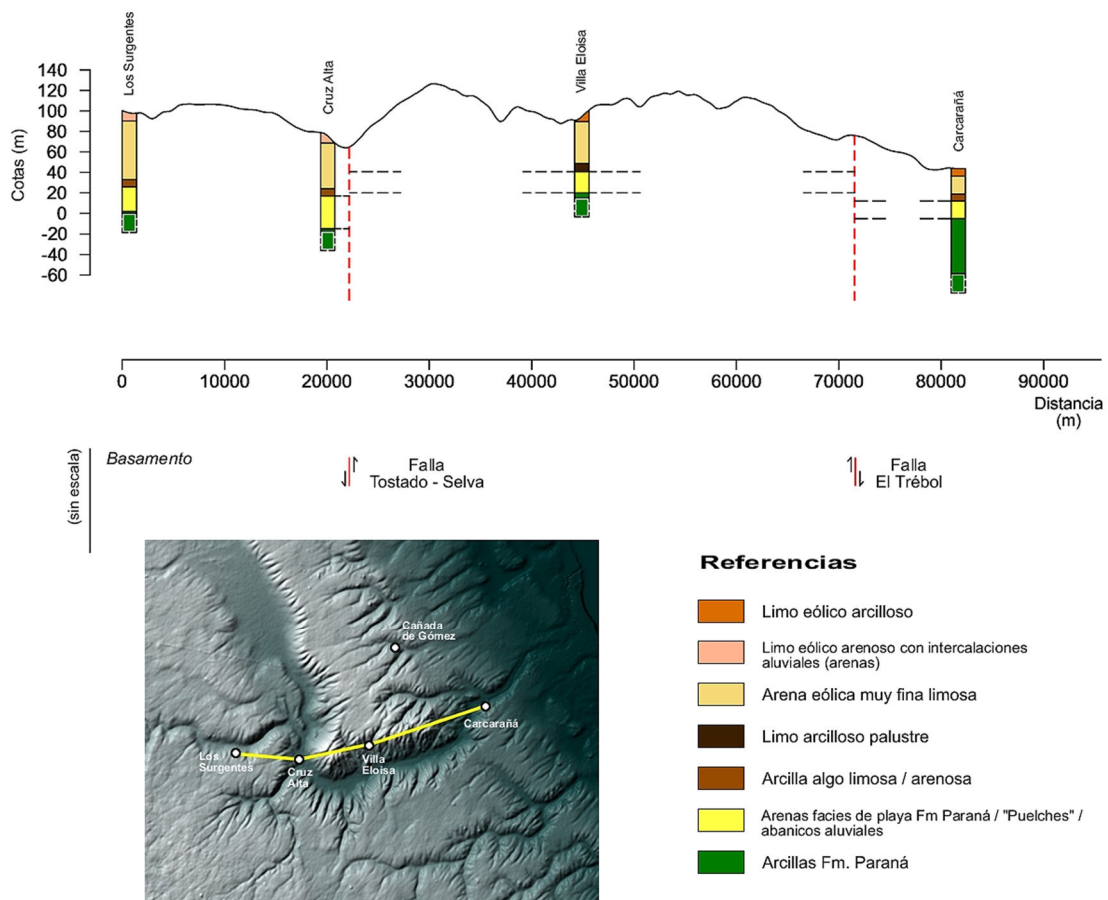


Figura 5.10 – Perfil Los Surgentes – Cruz Alta – Villa Eloísa – Carcarañá.

Dado que la zona del modelo presenta un fuerte control tectónico correspondiente al sector sur del Bloque de San Guillermo, se incorporó entonces para una primera etapa del análisis estratigráfico la ubicación de las fallas que lo delimitan a fin de reflejar la incidencia de estas en la estratigrafía y su posible manifestación en la distribución areal de las unidades litológicas consideradas. Dichas fallas se adoptaron en este paso con el posicionamiento definido anteriormente.

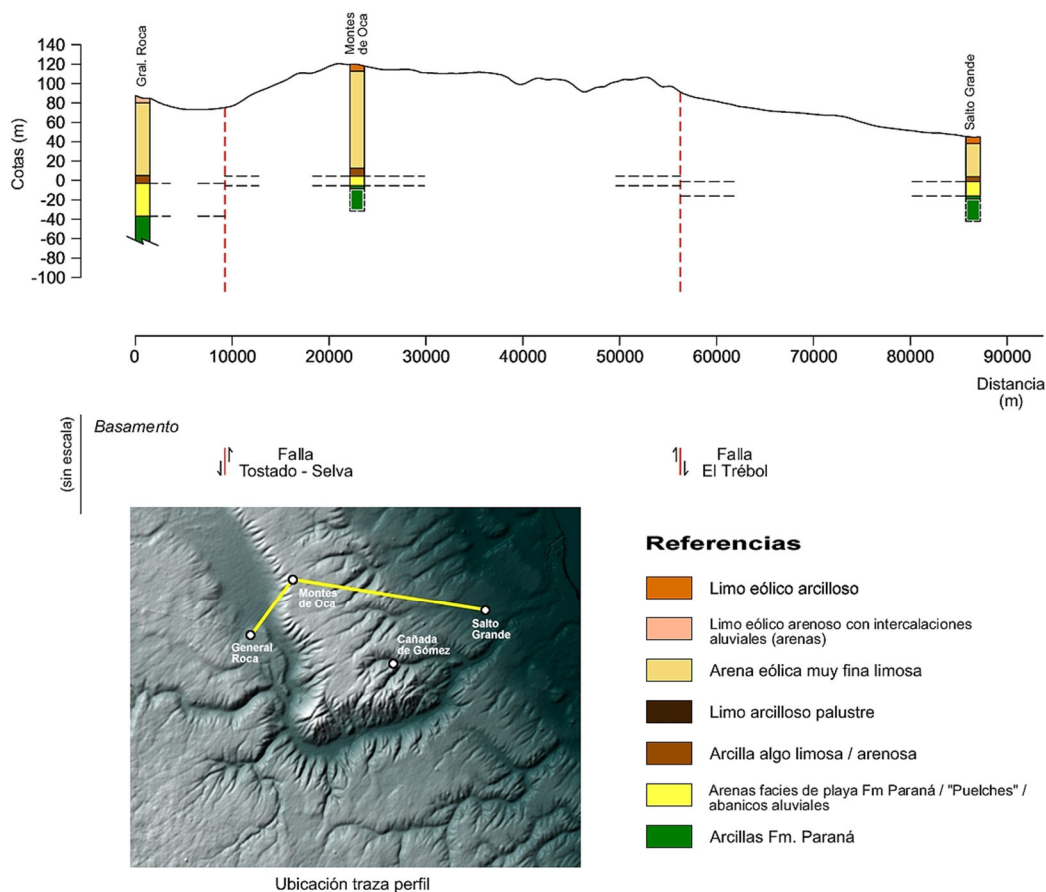


Figura 5.11 – Perfil General Roca – Montes de Oca – Salto Grande.

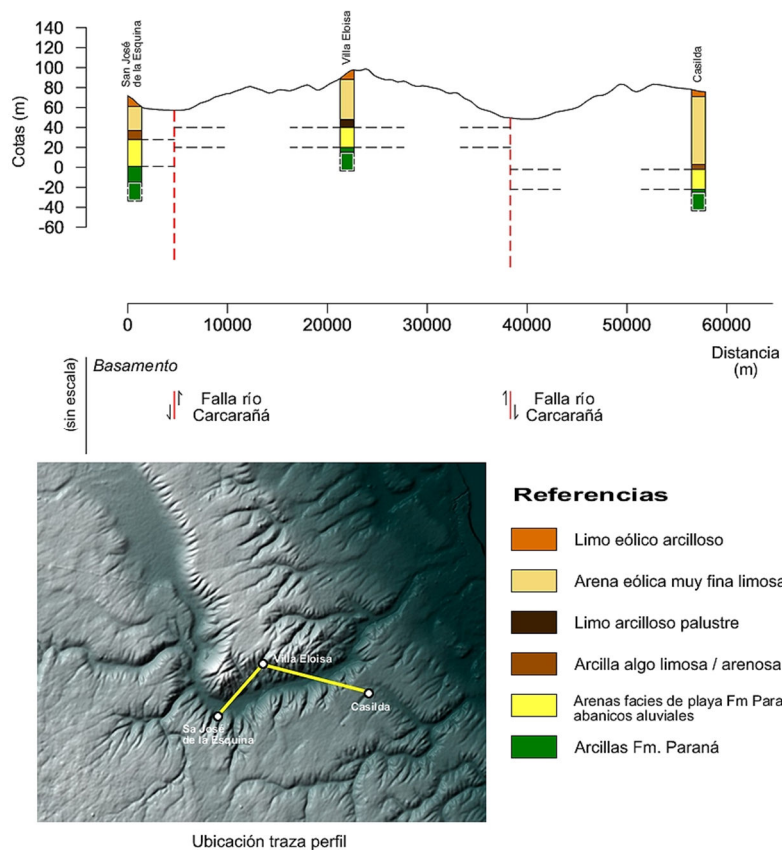


Figura 5.12 – Perfil San José de la Esquina – Villa Eloísa – Casilda.

Las superficies tridimensionales del techo y piso de las unidades litológicas obtenidas del estudio evidencian la existencia de diferencia de profundidades de estratos/unidades formacionales sobre las fallas que delimitan el bloque. A modo de ejemplo se presenta la superficie que define el techo de las arcillas de la Formación Paraná en la zona de estudio (figuras 5.13 y 5.14). En la primera de ellas se observan las cotas del techo de las localidades con datos disponibles situadas en la zona del modelo.

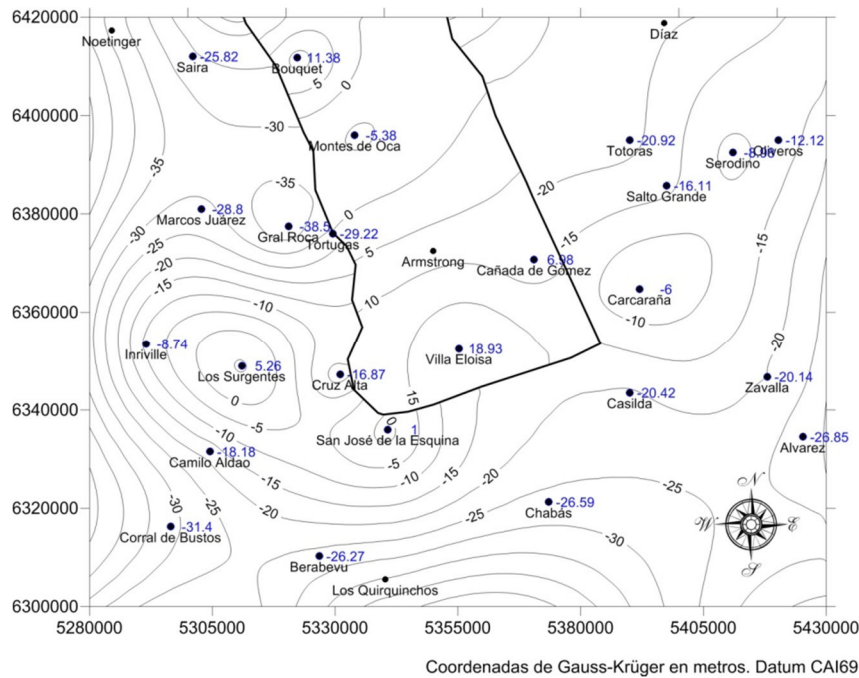


Figura 5.13 – Curvas de nivel (equidistancia 5 m) de la superficie del techo de las arcillas de la Fm Paraná, evidenciando la incidencia del Bloque de San Guillermo (líneas en trazo grueso) en los desniveles de estratos en el subsuelo de la zona de estudio. En color azul las cotas en localidades empleadas para su confección.

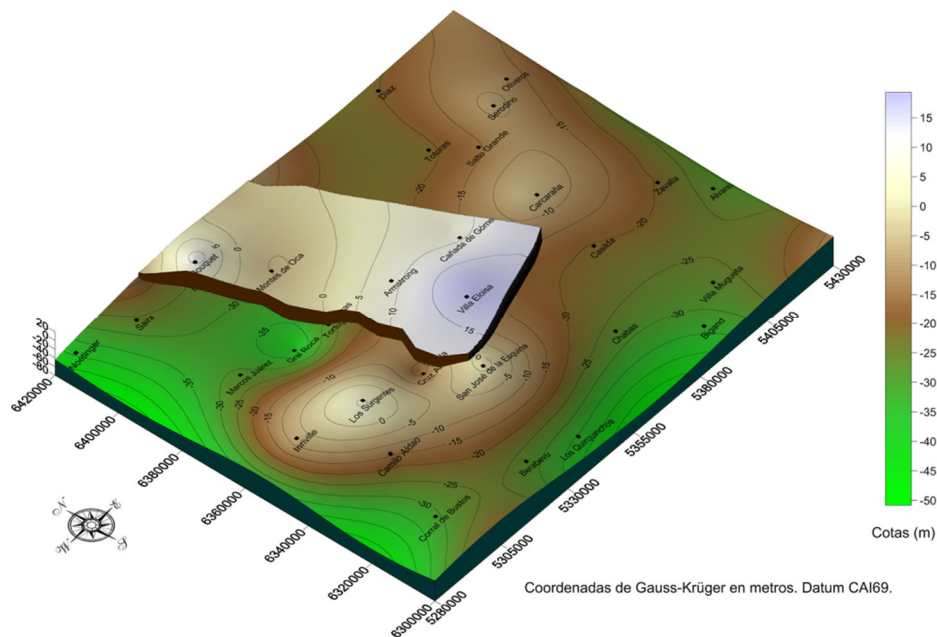


Figura 5.14 – Vista axonométrica de la superficie del techo de las arcillas de la Formación Paraná con las curvas de nivel (equidistancia 5 m). Puede observarse con claridad el bloque elevado. Localidades en proyección a modo de referencia.

En las figuras 5.15, 5.16 y 5.17 se presentan los perfiles geológicos obtenidos a través de las superficies tridimensionales citadas con anterioridad, pudiendo observar a ambos lados de las fallas, la diferencia de profundidades que presentan las unidades. Cabe aclarar que la geometría de las fallas citadas se presenta en forma esquemática con el único objetivo de resaltar las discontinuidades litológicas a cada lado de las estructuras tectónicas.

Una observación interesante que se desprende del análisis de las arenas que se encuentran en el Bloque de San Guillermo, figuras 5.15 y 5.16, es que la potencia de las mismas disminuye notoriamente cerca de la Falla El Trébol. Esto se observa en la litología de la perforación de la localidad de Cañada de Gómez (cercana a la falla) de una exigua potencia de arenas (3,20 m). Kreimer (1969) expresa su incertidumbre respecto al origen de las mismas al describirlas en su trabajo de la siguiente manera: “(...) Arena con arcilla que nosotros hemos tomado como Puelches pero con muchas dudas”. (1969, p. 15). También existe la posibilidad de que mientras se levantaba el Bloque, el sector elevado de éste pudo haber sufrido erosión variando los espesores, resultando de esta manera la escasa potencia de las arenas en Cañada de Gómez (Kröhling, *com. pers.*).

Con respecto a las fallas Tostado – Selva y río Carcarañá, las unidades mantienen prácticamente su potencia a cada lado de las mismas, no siendo esto tan evidente en la Falla El Trébol. Además, cabe recordar que, siguiendo a Kröhling e Iriondo (2003) el Bloque de San Guillermo constituye el borde occidental de las denominadas “arenas Puelches” depositadas por el río Paraná. No hay continuidad formacional debido a que las arenas cambian sus características sedimentológicas a ambos lados de la Falla de El Trébol (“arenas Puelches” al este y facies de playa de la Fm Paraná al oeste).

Por último, se llevó a cabo una segunda etapa de ajuste relacionada con la respuesta de los cuerpos sedimentarios considerados ante los efectos de la neotectónica. Brunetto *et al.* (2010), apoyándose en perforaciones y datos derivados de prospección geofísica, verificaron los efectos de fallamiento durante el Pleistoceno tardío en cercanías de la localidad santiagueña de Palo Negro, situada al norte del Bloque de San Guillermo. Los citados autores interpretaron que la escarpa de Falla de Tostado-Selva es el flanco visible de un pliegue monoclinal (Figura 5.18).

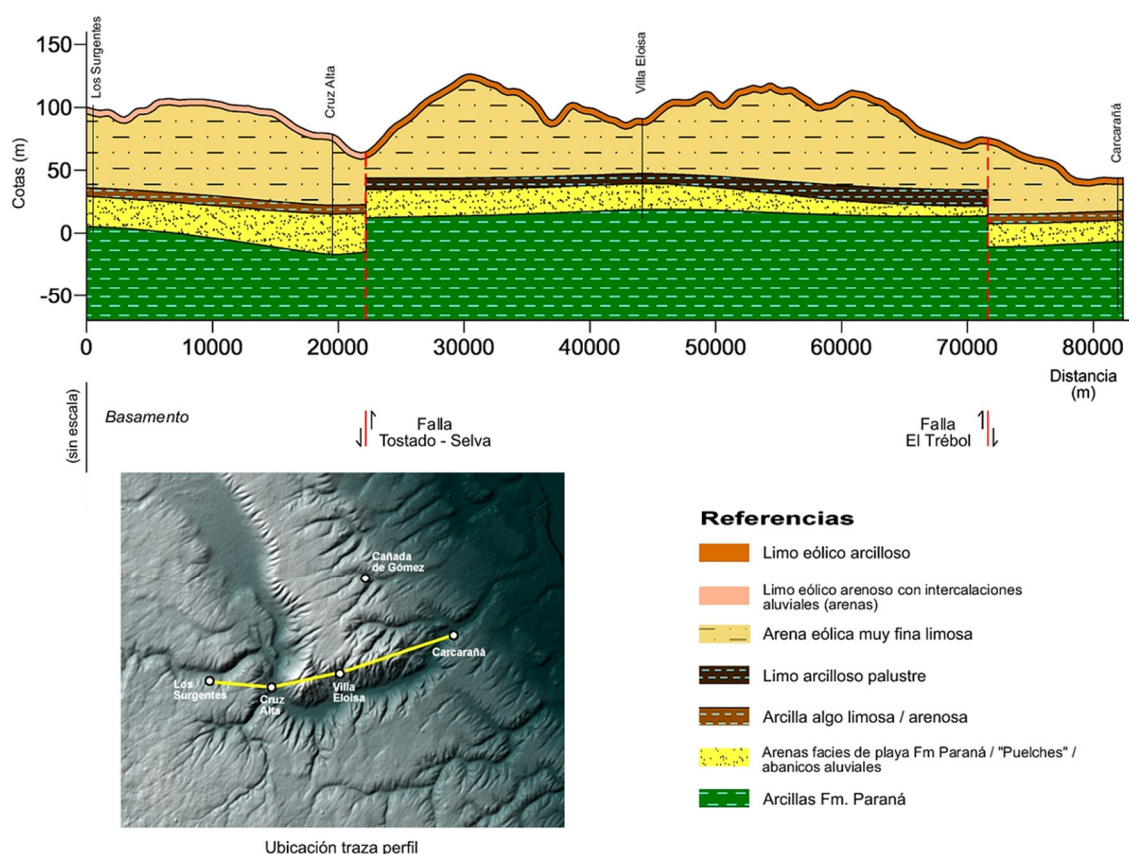


Figura 5.15 – Perfil Los Sargentos – Cruz Alta – Villa Eloísa – Carcarañá.

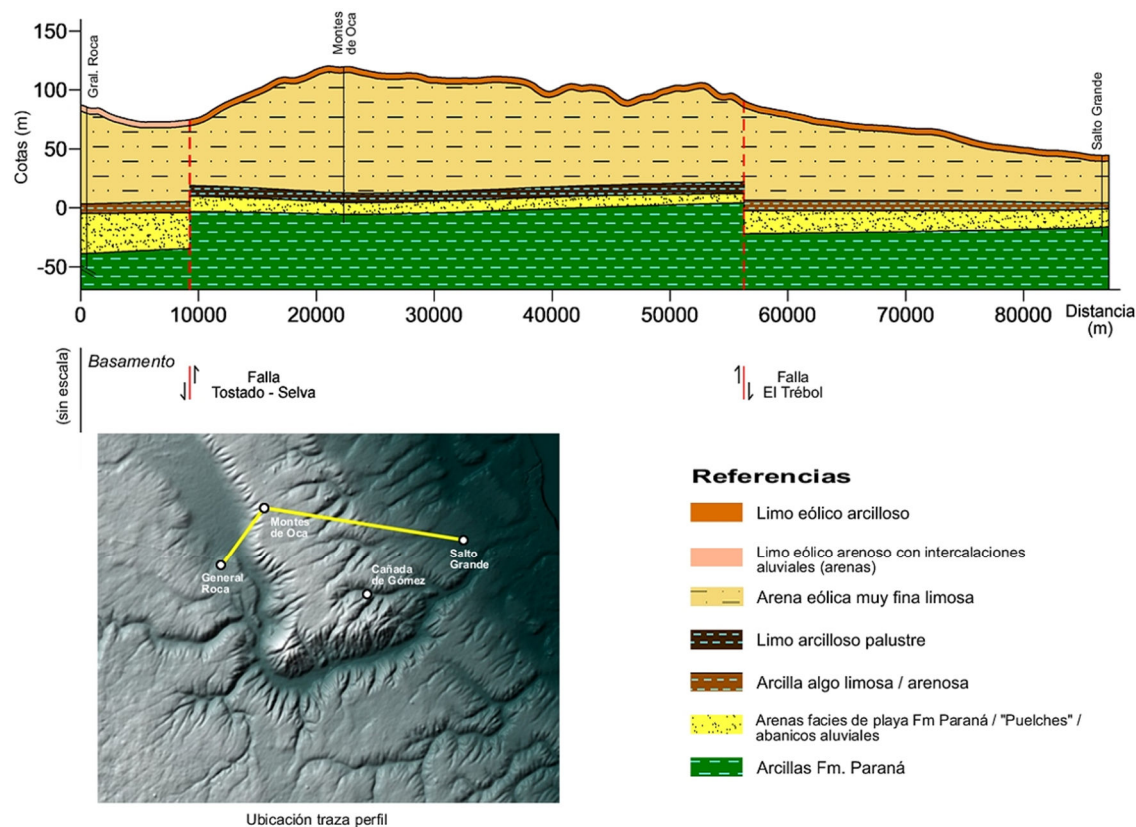


Figura 5.16 – Perfil General Roca – Montes de Oca – Salto Grande.

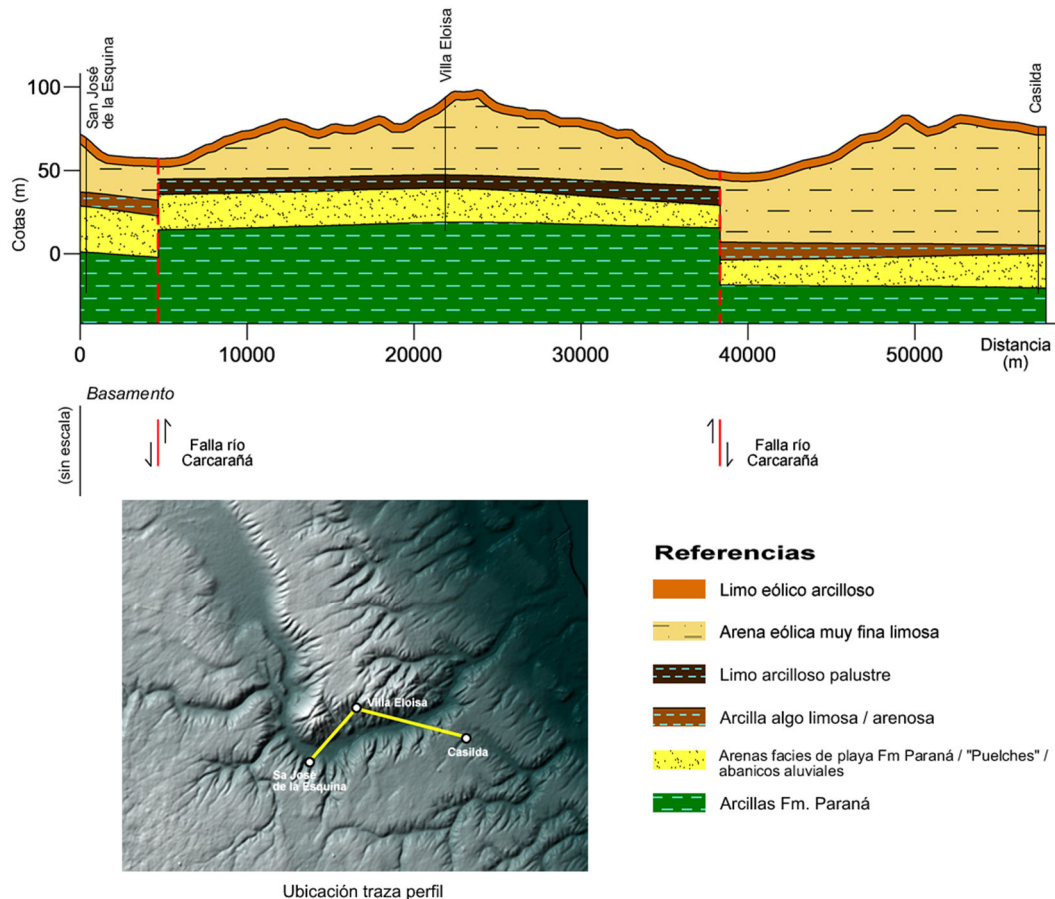


Figura 5.17 – Perfil San José de la Esquina – Villa Eloísa – Casilda.

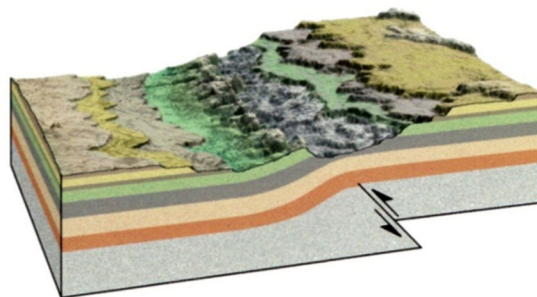


Figura 5.18 – Esquema de un pliegue monoclin. Los estratos se deforman ante el movimiento de la falla. (Tomado de Tarbuck y Lutgens, 2005).

Este plegamiento superficial de los sedimentos habría sido forzado por la reactivación, de la falla localizada en el basamento cristalino o bien en rocas sedimentarias muy consolidadas, en la parte inferior de la cuenca Chacoparanaense. La deformación plástica de los sedimentos habría ocurrido por propagación del desplazamiento en fallas ciegas (Brunetto *et al.*, 2010; Costa *et al.*, 2014).

A fines del modelo, y teniendo como sustento lo anteriormente citado, se interpretaron los resultados en la primera etapa considerando de esta manera una continuidad espacial de las cuatro unidades litológicas consideradas para la estratigrafía en la zona de estudio. Se presenta a

continuación el perfil geológico que tiene por traza las localidades de Los Surgentes, Cruz Alta, Villa Eloísa y Carcarañá (Figura 5.19).

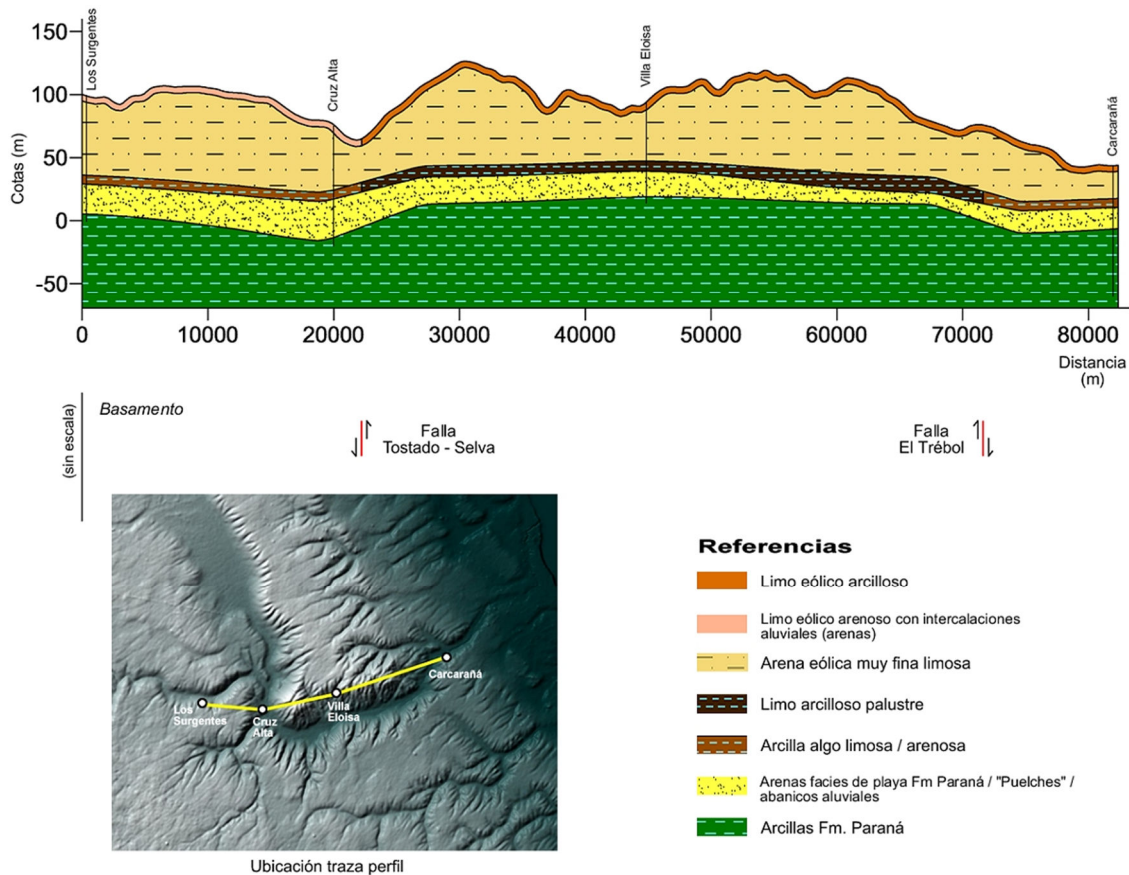


Figura 5.19 – Perfil Los Surgentes – Cruz Alta – Villa Eloísa – Carcarañá sintetizado (con la interpretación de la deformación plástica de los sedimentos por efectos de la neotectónica).

Finalmente, se hace notar la necesidad de contar con una mayor cantidad de datos litológicos a ambos lados de las fallas, ya sea de perforaciones de investigación profundas como de prospección geofísica, para obtener una mejor definición de los efectos que produjo la neotectónica en la continuidad estratigráfica del subsuelo en la zona de estudio.

5.2.4. Freatimetría base

El mapa freaticométrico base se basó en las descripciones hidrogeológicas realizadas por Bitesnik (1968, 1970) y Kreimer (1969). En la Figura 5.20 se muestran los límites de las zonas de estudios hidrogeológicos empleados en la confección del mapa freaticométrico base, las cuales cubren prácticamente el 70% del área de estudio. Los estudios citados se llevaron a cabo mediante trabajos de campo realizados de octubre a diciembre de 1965 para el primero de ellos, de octubre a diciembre de 1966 para el segundo y de agosto a diciembre de 1966 para el último. Las zonas de estudio de las freaticimetrías citadas presentan un fuerte control topográfico donde la morfología del acuífero libre casi no manifiesta distorsiones para diferentes escenarios normales (medios) o

como los producidos entre 1965 y 1966, con precipitaciones anuales de 625 y 580 mm, respectivamente. Es muy probable que las curvas isofreáticas "se empalmen" o exista un muy leve corrimiento de éstas, situación que puede revertirse para periodos muy marcados de déficit o excesos.

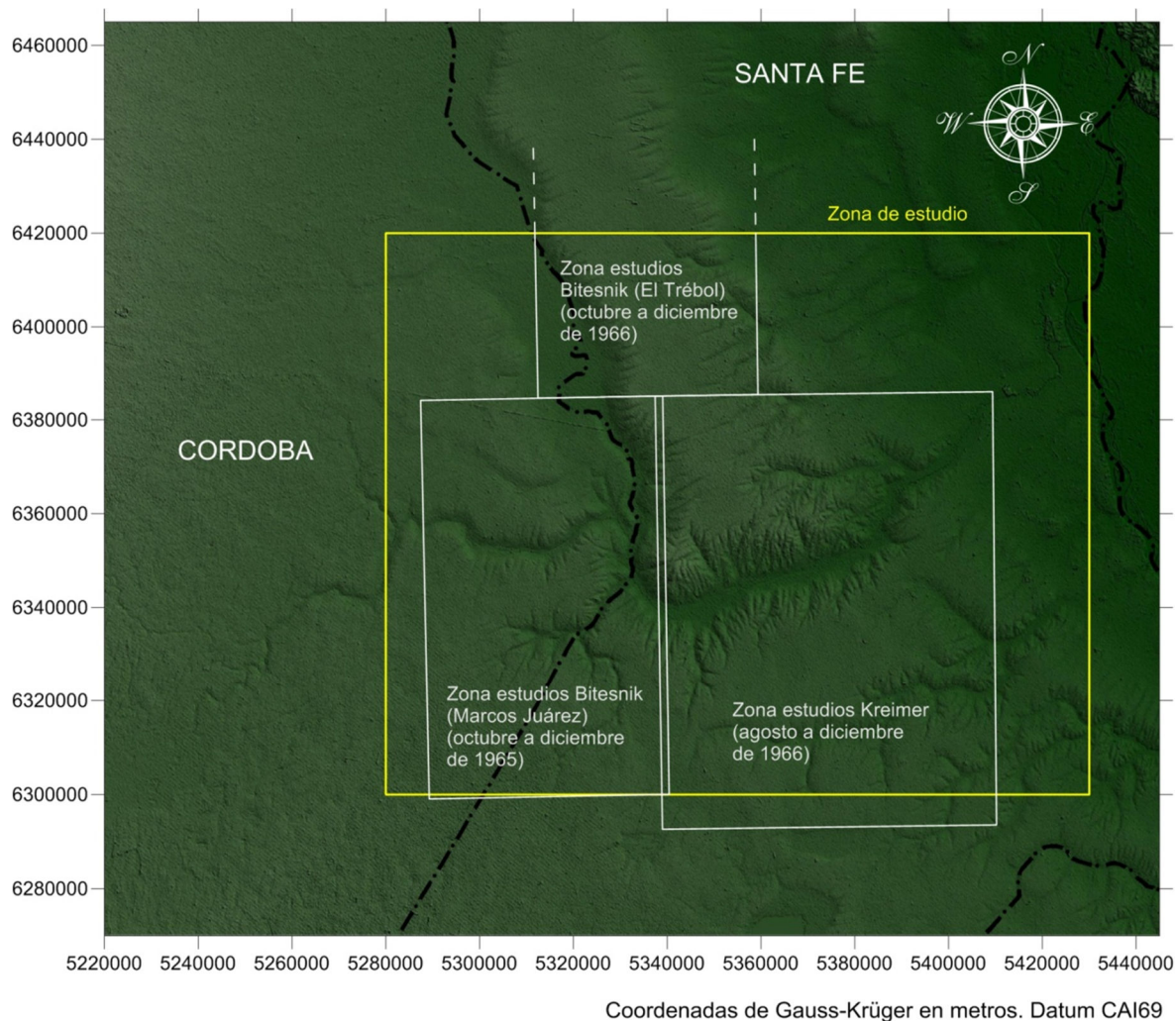


Figura 5.20 – Relación entre la zona de estudio y las correspondientes a los estudios hidrogeológicos de Bitesnik (1968, 1970) y Kreimer (1969).

Aprovechando la información cartográfica volcada en dichos mapas freatimétricos, se procedió a la rasterización y georreferenciación de los mismos en proyección Gauss-Krüger Faja 5 Datum CAI69 empleando las coordenadas geográficas y proyectuales existentes en dichos mapas, y ajustando el trabajo mediante el empleo de diversos puntos de control como cruces de rutas, vías de ferrocarril y localidades, lo más uniformemente distribuidos en la zona de estudio. Una vez terminada esta etapa, se vectorizaron las curvas isofreáticas que figuran en la cartografía.

En los trabajos de Bitesnik (1968, 1970) y Kreimer (1969) existen datos de algunos pozos y perforaciones realizados en el acuífero libre y en el semiconfinado, y censados por los autores.

Estos informes contienen el número de pozo, su ubicación, el propietario, la cota de boca de pozo a nivel del terreno natural, y el nivel freático o piezométrico. Una vez localizada en la carta topográfica correspondiente a la cuadrícula de 4 km de lado del sistema de coordenadas de proyección Gauss-Krüger que contiene al pozo, el sistema de ubicación de éste que adoptaron los autores fue dividir dicha cuadrícula en cuatro cuadrantes denominados a, b, c y d según el sentido de las agujas del reloj, y a su vez estos cuatro en otros tantos más pequeños y con el mismo criterio que los primeros. Para clarificar el procedimiento, se muestra en la Figura 5.21 la ubicación de un pozo genérico, en este caso el Pozo 733 del trabajo de Kreimer (1969). Como etapa final, se ajustó el delineado de las curvas isofreáticas a través de la ubicación en la zona de estudio de casi 220 pozos de los trabajos hidrogeológicos de referencia, valiéndose para ello de cartas topográficas del IGM en escala 1:50.000 (IGM, 1920-1960).

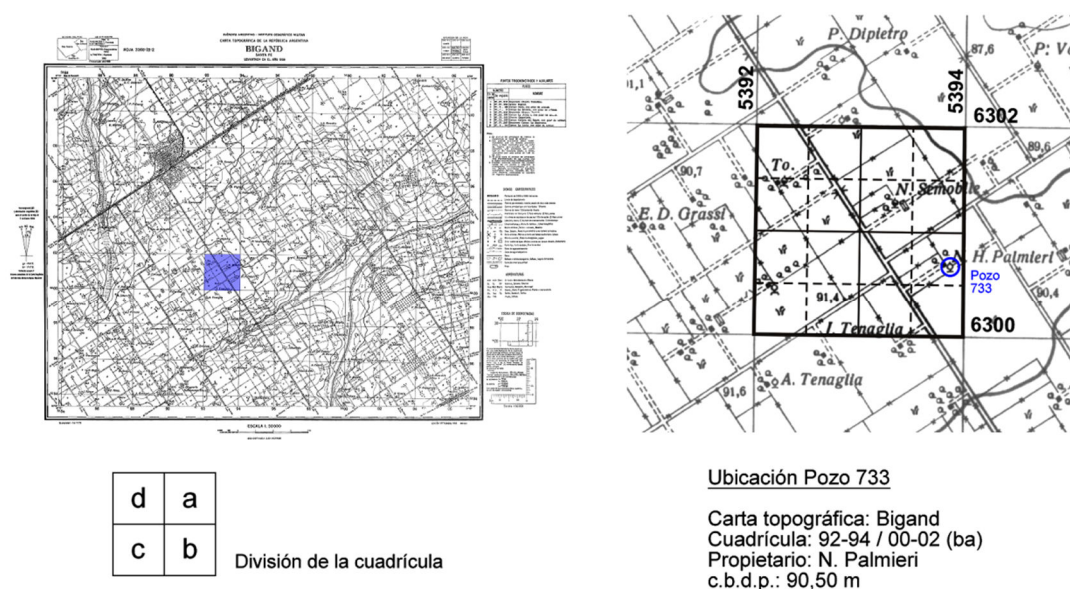


Figura 5.21 – Sistema de ubicación de pozos empleado en los trabajos hidrogeológicos de Bitesnik (1968, 1970) y Kreimer (1969). En color azul se destaca en la carta topográfica de Bigand la cuadrícula que contiene el pozo, la cual se observa en detalle a la derecha de la figura. Coordenadas de Gauss-Krüger de la cuadrícula en km.

La cota de nivel freático en cada pozo fue obtenida a través de la cota de boca de pozo y la profundidad en la que se encontró la superficie freática. Si bien no se describe en los estudios cómo se obtienen las cotas de boca de pozo, se supuso en primera instancia que habían sido calculadas empleando las cartas topográficas del IGM, hipótesis que se verifica durante la etapa de ubicación de los pozos.

En la Figura 5.22 se presenta la freatimetría obtenida para el año 1966, con una equidistancia de 6 m, mientras que en la Figura 5.23 se muestra la freatimetría junto a los pozos empleados en la etapa de ensamblaje. En ambas figuras se demarca en líneas de trazos las zonas de estudio unificadas de Kreimer (1969) y Bitesnik (1968, 1970).

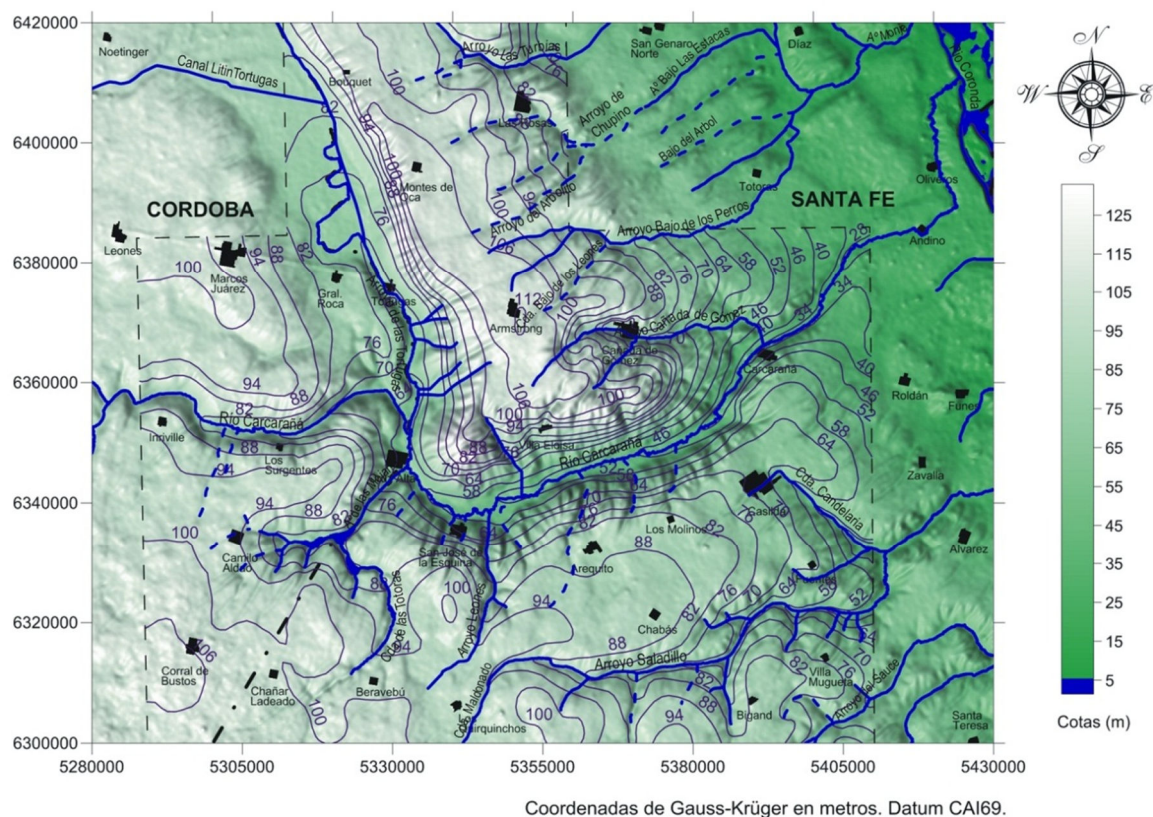


Figura 5.22 – Freatimetría para el año 1966 superpuesta a la superficie topográfica (cotas en m s.n.m.). En líneas azules los cursos de agua y en líneas de trazos las zonas de estudio unificadas de Kreimer (1969) y Bitesnik (1968, 1970).

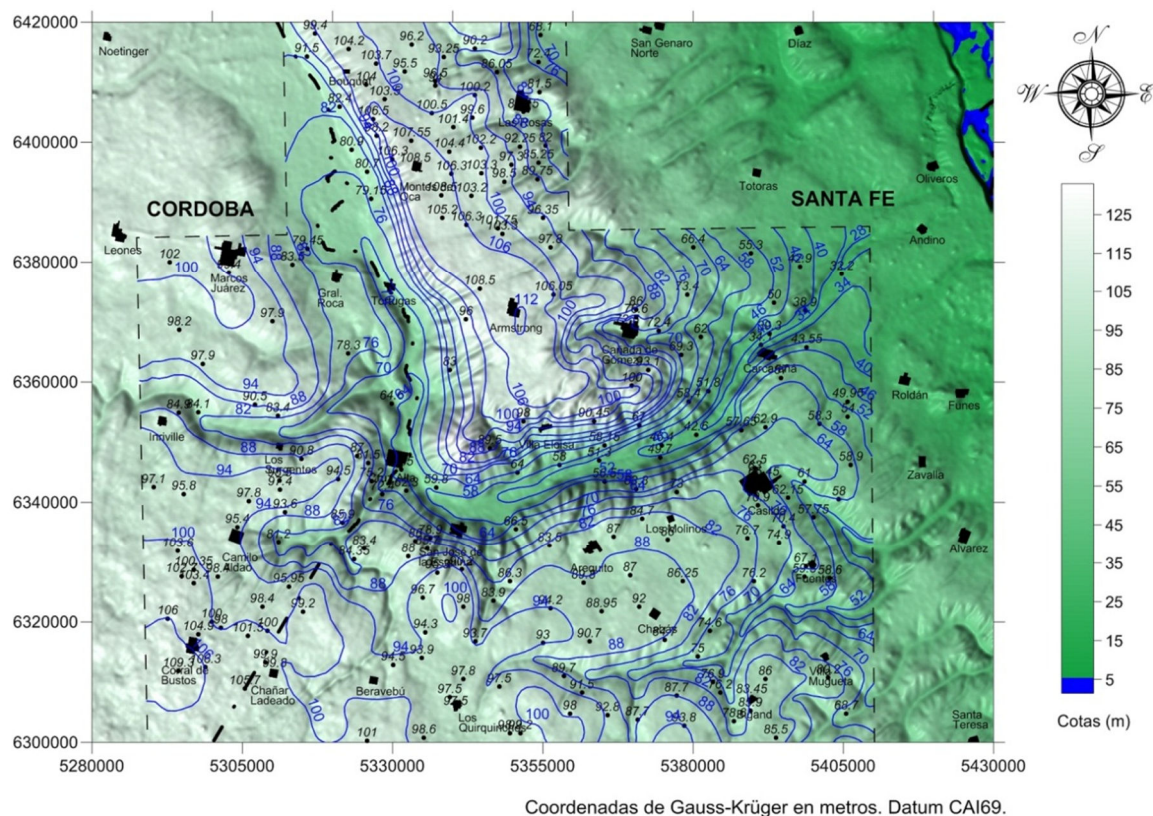


Figura 5.23 – Freatimetría para el año 1966 superpuesta a la superficie topográfica (cotas en m s.n.m.) y los pozos empleados en la construcción. En líneas de trazos las zonas de estudio unificadas de Kreimer (1969) y Bitesnik (1968, 1970).

Por otra parte, Venencio (2007) elaboró un mapa freaticométrico del acuífero libre de la cuenca del río Carcarañá en la prov. de Santa Fe a través de mediciones de la profundidad del nivel freático llevadas a cabo entre los meses de octubre de 2003 y febrero de 2004 con una equidistancia entre curvas isofreáticas de 10 m y que se asocia temporalmente a diciembre de 2003 (Figura 4.28). Además, Venencio (2007) llevó a cabo mediciones prácticamente mensuales de la profundidad del acuífero libre entre los años 2000 y 2004 en cuatro estaciones de monitoreo, tres de las cuales se emplazan en la cuenca inferior del río Carcarañá, en las localidades de Villa Eloísa (Ea. San Jorge), en Correa en el Establecimiento Agrícola-Ganadero La Silesia (Ea. La Silesia) y en Pueblo Andino (Ea. Andino), ver Figura 5.24 y Tabla 5.2. La cuarta estación se sitúa en el exterior a la cuenca, a 7 km aproximadamente al SE de su límite, en la Ea. García Fuentes perteneciente a la localidad de Luis Palacios, de tal manera de comparar sus resultados con respecto a los de la cuenca. Además, incluyó en su estudio la información proveniente de la Estación Experimental Agropecuaria (EEA) Oliveros del INTA. La ubicación de las estaciones se muestra en la Figura 5.24 y en la Tabla 5.2. Las cuatro estaciones de monitoreo se encuentran ubicadas en la zona de estudio del presente trabajo.

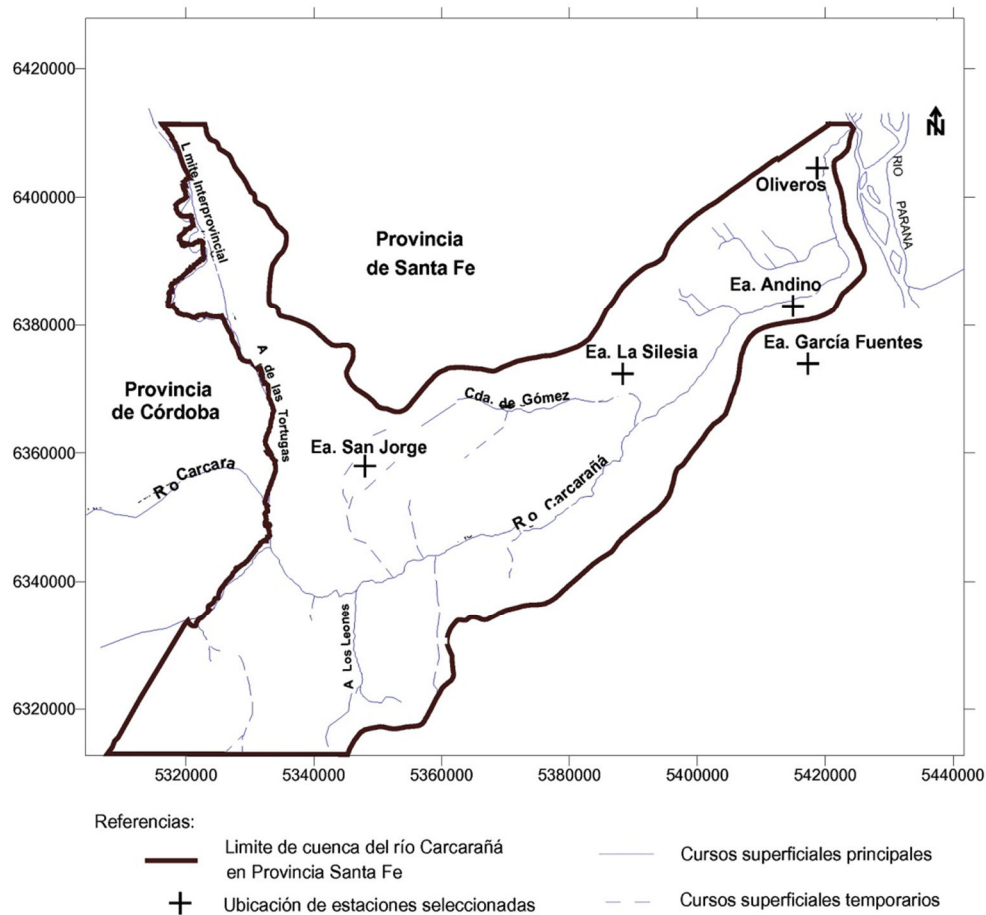


Figura 5.24 – Estaciones de monitoreo en la cuenca del río Carcarañá en la prov. de Santa Fe empleadas por Venencio (2007).

Tabla 5.2 – Estaciones de monitoreo de la freaticimetría (tomado de Venencio, 2007)

Sitio de Emplazamiento	Localidad	Coordenadas Y (m)	Coordenadas X (m)	Cota (m)
Ea. San Jorge	Villa Eloísa	5347976,3	6358023,4	111,00
Ea. La Silesia	Correa	5388251,2	6372421,8	58,25
Ea. Andino	Pueblo Andino	5414895,5	6382936,9	32,00
Ea. García Fuentes	Luis Palacios	5417361,5	6373998,3	30,00

Las freaticimetrías de todos los autores citados, y correspondientes a los años 1966 y 2003, son bastantes similares a escala global.

El mapa freaticimétrico correspondiente a la Figura 5.22 se utilizará en la etapa de calibración del modelo hidrogeológico.

5.2.5. Mapa de zonas de recarga

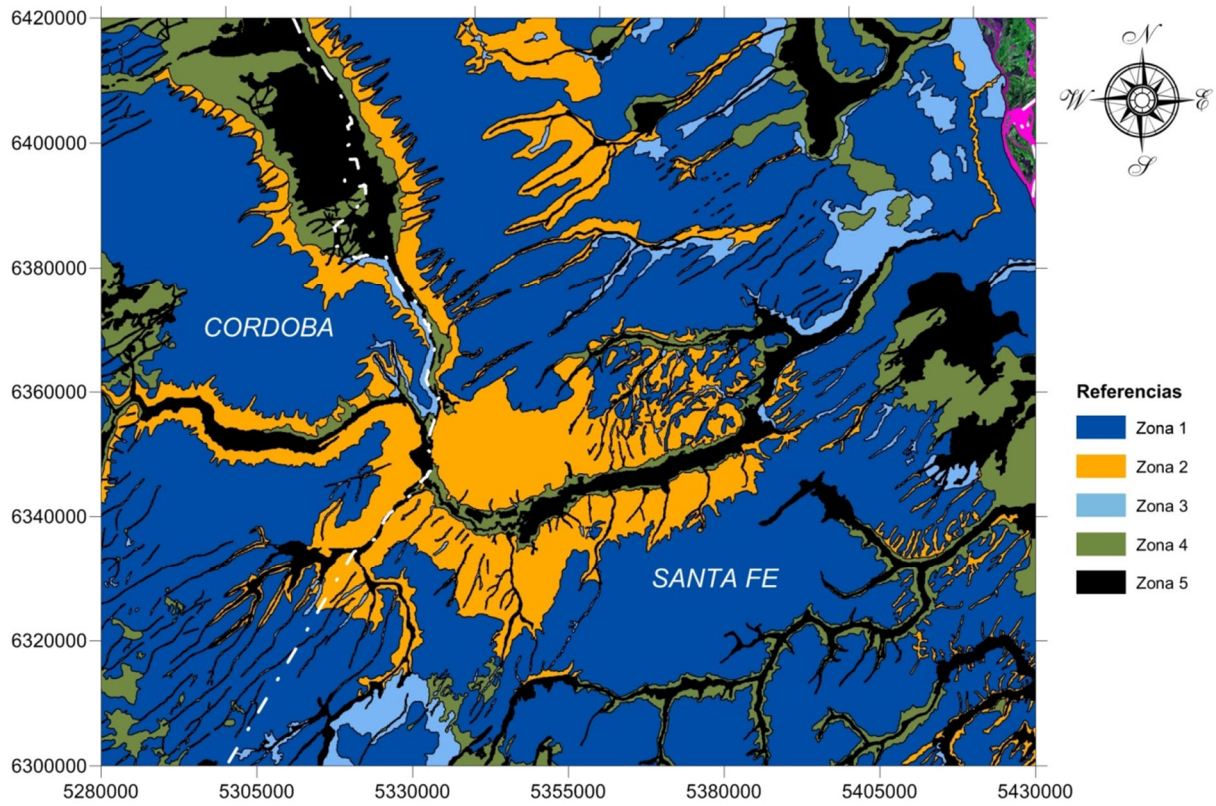
El mapa de zonas de recarga se confeccionó a partir de un mosaico aerofotográfico compuesto por 49 fotocartas de suelos en escala 1:50.000, digitalizadas y georreferenciadas en proyección Gauss-Krüger faja 5 Datum CAI69. Además, se tomó como base la información brindada por las Cartas de Suelos de INTA (INTA, 1974-1988), como así también las correcciones de las mismas llevadas a cabo por dicho instituto (Tosolini -INTA-, *com. pers.*).

Teniendo en cuenta las características físicas y químicas de los distintos tipos de suelos existentes en el área, sus texturas, la topografía y la intensidad de los procesos erosivos que los afectan (factores que son considerados de las Cartas de Suelos y de las respectivas capacidades de uso de los suelos involucrados, ver Anexo II), se distinguieron en el área de estudio cinco zonas. Las mismas están constituidas por unidades cartográficas de suelos en función de los condicionantes que presentan para el escurrimiento superficial y el drenaje interno.

Cabe destacar que en el empleo de las capacidades de uso de los suelos como herramienta de ayuda para la demarcación de las zonas de recarga se prestó atención a la incidencia de ciertos factores relacionados con la dinámica de escurrimiento superficial y subterráneo que están expresados en la simbología de las capacidades de uso de los suelos (Anexo II).

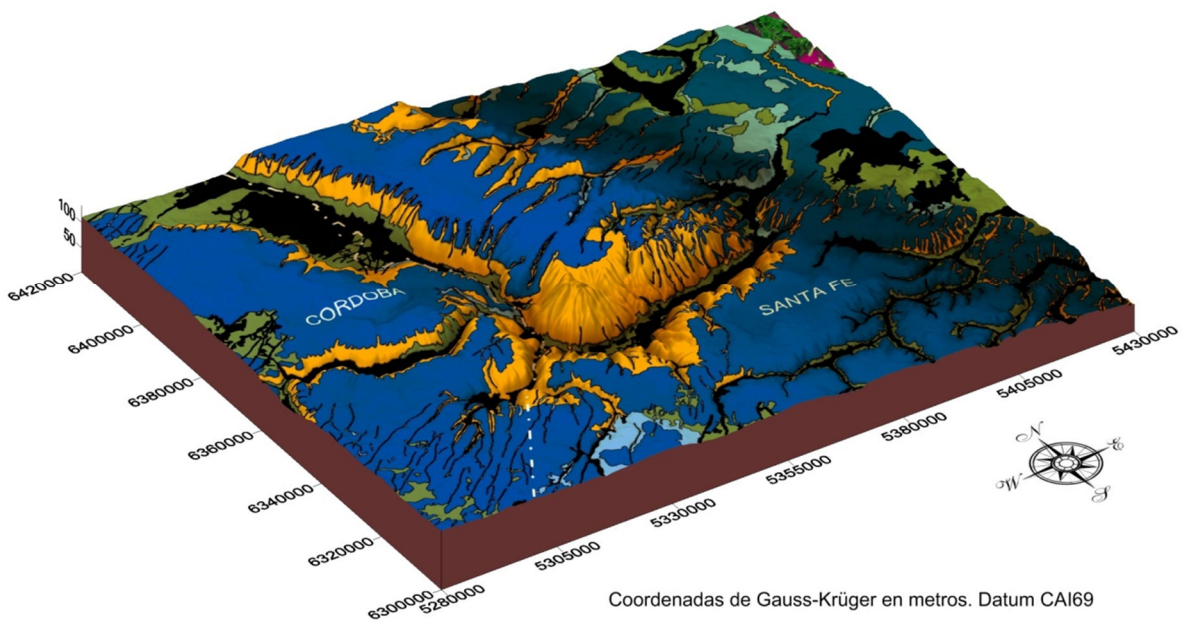
Los límites de cada zona de recarga se efectuó a través de un proceso de vectorización mediante un programa de soporte SIG, y cuyo resultado final se presentan en la Figura 5.25. En la Figura 5.26 se muestra el modelo digital de elevaciones superpuesto con el mapa de zonas de recarga. En

dicha figura puede apreciarse claramente la Zona 2 asociada a las mayores pendientes del terreno, generados por deformación tectónica o por acción fluvial.



Coordenadas de Gauss-Krüger en metros. Datum CAI69

Figura 5.25 – Mapa de zonas de recarga.



Coordenadas de Gauss-Krüger en metros. Datum CAI69

Figura 5.26 – Vista tridimensional con las zonas de recarga.

La descripción de cada zona es la siguiente:

Zona 1

Conformadas por Argiudoles típicos, con una baja proporción en el total de Argiudoles ácuicos y Argiudoles vérticos. Comprende suelos profundos, moderadamente bien drenados a bien drenados, ocupando relieves con bajas pendientes relativas a suavemente ondulados y con nula a ligera erosión. La textura de los suelos de esta zona es, predominantemente, franco limosa con un horizonte de textura franco arcillo limosa intercalado. Cartográficamente la integran los suelos con Capacidades de Uso I-1, I-1/2 y I-2.

Zona 2

Prácticamente comprendida por Argiudoles típicos, con una baja proporción de Argiudoles ácuicos y suelos con alto contenido de Sodio y/o Sales Solubles (Nátricos). Son suelos con pendientes suaves a moderadamente pronunciadas, con erosión laminar y en surcos moderada a severa, y con ligera a moderada salinidad y/o alcalinidad. Predomina la textura franco limosa con un horizonte de textura franco arcillo limosa intercalado. Cartográficamente la integran los suelos con Capacidades de Uso IIe, IIs, IIIe y IIIs.

Zona 3

Integrada por Argiudoles típicos y Argiudoles ácuicos, y con presencia de Argialboles y suelos con alto contenido de Sodio y/o Sales Solubles (Nátricos). Comprende suelos de relieve llano, con pendientes largas y de gradientes bajos, en general, que presentan imperfecto a pobre drenaje interno, y donde la lenta eliminación del agua hace que se encuentren excesivamente húmedos durante algún período significativo del año, pero no en forma permanente. Se incluyen además sectores cóncavos alargados que reciben excesos de agua provenientes de las áreas contiguas más elevadas. En algunos casos se presenta una ligera a moderada salinidad y/o alcalinidad. La textura de los suelos que conforman esta zona es mayormente franco limosa con intercalación de horizontes de textura franco arcillo limosa y arcillo limosa. Cartográficamente la integran los suelos con Capacidades de Uso IIw, IIws, IIIs y IIIw.

Zona 4

Conformada por un predominio de Argialboles y suelos con alto contenido de Sodio y/o Sales Solubles (Nátricos) y baja presencia de Argiudoles típicos y Argiudoles ácuicos. Comprende suelos excesivamente húmedos, de relieve con bajas pendientes relativas y poco permeables, con

drenaje interno pobre asociados con suelos afectados y moderada a fuertemente por salinidad y/o alcalinidad. También se encuentran en esta zona los suelos con pendiente pronunciada y severa erosión laminar y en surcos, asociados también a suelos con moderada a fuerte salinidad y/o alcalinidad. Predomina la textura franco limosa con intercalación de horizontes de textura franco arcillo limosa y arcillo limosa. Cartográficamente la integran los suelos con Capacidades de Uso IIIws, IVws y IVes.

Zona 5

Conformada prácticamente por suelos que constituyen Complejos Indeterminados. Son suelos que ocupan terrenos casi con bajas pendientes relativas con drenaje interno pobre o impedido, tienen excesiva humedad por anegamiento y sufren frecuentes inundaciones por desborde de los cursos de agua o bien por la acumulación de las aguas de escurrimiento superficial provenientes de áreas aledañas más elevadas que hace que el agua permanezca sobre o cerca de la superficie por largo tiempo. A su vez son fuertemente afectados por salinidad y/o alcalinidad. También se encuentran en esta zona los suelos ubicados en pendientes muy pronunciadas y con grave erosión laminar y en surcos, asociados también a suelos con fuerte salinidad y/o alcalinidad. La textura de los suelos es franco limosa y subsuperficialmente franco arcillo limosa a arcillo limosa y arcillosa. Cartográficamente la integran los suelos con Capacidades de Uso VIws, VIIws, VIII y VIes.

En la Tabla 5.3 se presenta un resumen de las características más relevantes de cada una de las zonas de recarga consideradas.

5.2.6. Cuantificación de las recargas

5.2.6.1. *Datos meteorológicos disponibles*

Teniendo como fuentes al CIM-SMN e INTA, se recopilaron los datos meteorológicos de diversas estaciones ubicadas en la zona de estudio y alrededores, para el período de tiempo comprendido entre el 01/01/1962 y el 31/07/2012, y correspondientes a diversas variables involucradas en distintos tipos de estudios de evapotranspiración potencial (Figura 5.27).

Los datos recopilados de CIM-SMN fueron diarios y algunos horarios, mientras que los del INTA fueron diarios. También se contó con el registro histórico de precipitaciones de una importante estancia agropecuaria (Ea. La California) cercana a la Agencia de Extensión Rural (AER) Las Rosas, perteneciente al INTA.

Tabla 5.3 – Características de las zonas de recarga

Zona	Tipo de suelo	Textura	Topografía y/o erosividad	Drenaje, salinidad/alcalinidad	Capacidades de uso
1	Argiudoles típicos, con una baja proporción en el total de Argiudoles ácuicos y Argiudoles vérticos	Franco limosa con un horizonte de textura franco arcillo limosa intercalado	Relieves llanos a suavemente ondulados y con nula a ligera erosión	Suelos profundos, moderadamente bien drenados a bien drenados	I-1, I-1/2 y I-2
2	Argiudoles típicos, con una baja proporción de Argiudoles ácuicos y suelos con alto contenido de Sodio y/o Sales Solubles (Nátricos)	Franco limosa con un horizonte de textura franco arcillo limosa intercalado	Relieves con pendientes suaves a moderadamente pronunciadas, con erosión laminar y en surcos moderada a severa	Drenaje restringido por ligera a moderada salinidad y/o alcalinidad	IIe, IIs, IIIe y IIIs
3	Argiudoles típicos y Argiudoles ácuicos, y con presencia de Argialboles y suelos con alto contenido de Sodio y/o Sales Solubles (Nátricos)	Franco limosa con interc. de horizontes de textura franco arcillo limosa y arcillo limosa	Suelos de relieve llano, con pendientes largas y gradientes bajos, en general, como así también sectores cóncavos alargados que reciben excesos de agua provenientes de los sectores contiguos más elevados. Nula a ligera erosión	Drenaje interno imperfecto a pobre; en algunos casos se presenta una ligera a moderada salinidad y/o alcalinidad	IIw, IIws, IIIs y IIW
4	Predominio de Argialboles y suelos con alto contenido de Sodio y/o Sales Solubles (Nátricos) y baja presencia de Argiudoles típicos y Argiudoles ácuicos	Franco limosa con interc. de horizontes de textura franco arcillo limosa y arcillo limosa	Suelos excesivamente húmedos, de relieve llano y poco permeables	Drenaje interno pobre asociados con suelos afectados moderada a fuertemente por salinidad y/o alcalinidad	IIIws, IVws y IVes
5	Suelos que constituyen los Complejos Indeterminados, casi en su totalidad	Franco limosa y subsuperf. franco arcillo limosa a arcillo limosa y arcillosa	Comprende suelos que ocupan terrenos casi llanos, como así también suelos ubicados en pendientes muy pronunciadas y con grave erosión laminar y en surcos	Drenaje interno pobre o impedido, fuertemente afectados por salinidad y/o alcalinidad	VIws, VIIws, VIII y VIes

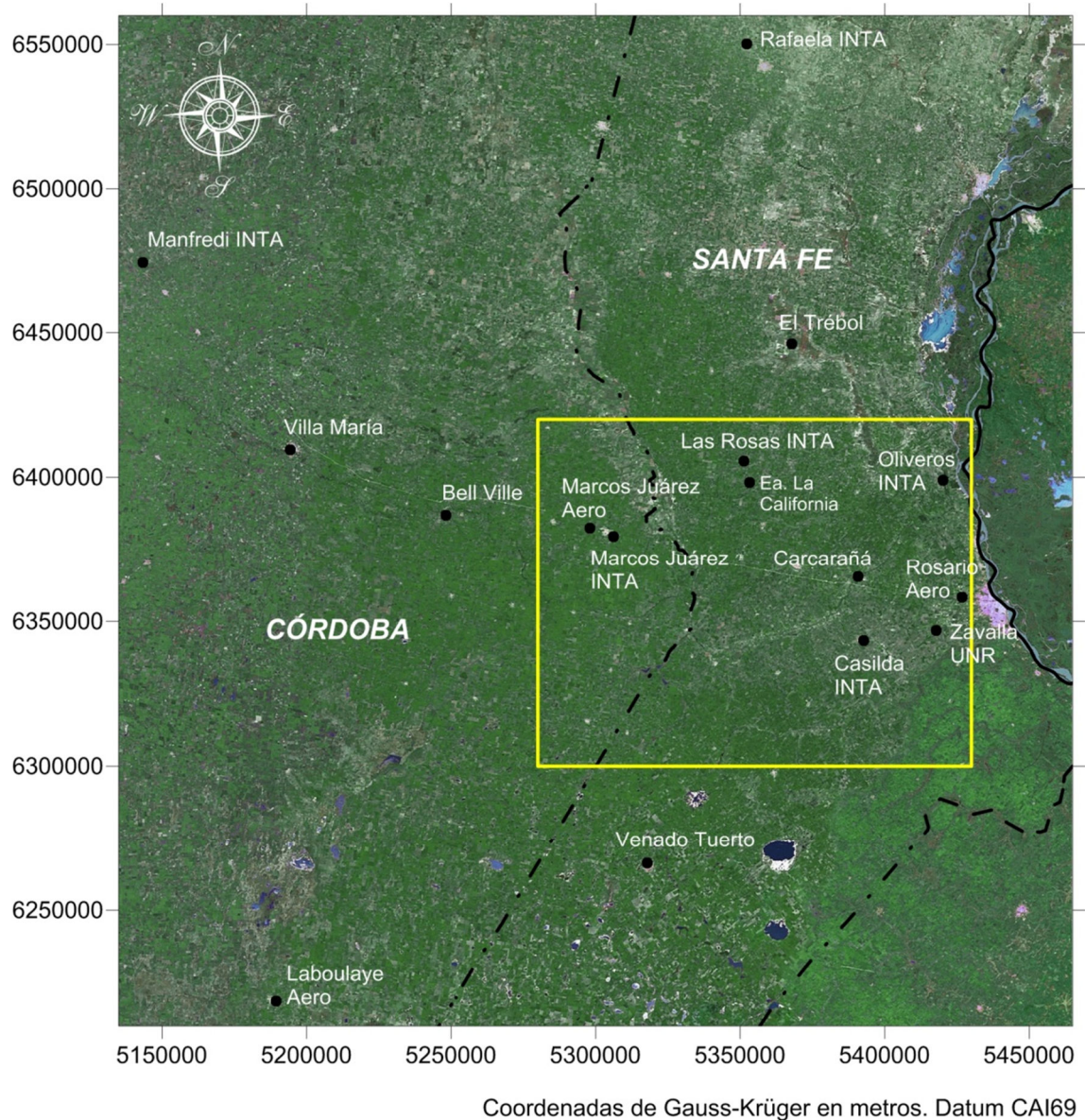


Figura 5.27 – Ubicación de las estaciones meteorológicas de las que se recabaron datos. En línea continua amarilla la zona de estudio.

Posteriormente se procesaron los datos mediante programas desarrollados dentro de las actividades de esta tesis y en lenguaje Fortran (Adams *et al.*, 1992; Chivers y Sleightholme, 2006), que permitieron trasladar las variables a valores diarios y cotejando éstos cuando se dispuso, para una misma estación, de datos provenientes de ambas fuentes de origen para la búsqueda de datos equívocos y para verificar coincidencias. También, mediante dichos programas, se distinguieron las fechas en las que faltaban datos en cada una de las variables analizadas y para cada estación en particular.

Las Tablas 5.4 y 5.5 brindan un resumen de las estaciones y variables analizadas para cada una de las fuentes de datos.

Tabla 5.4 – Estaciones y variables meteorológicas procesadas – CIM-SMN.

Variables	Unidad	Dato	Estaciones
Precipitación	mm	diario	Bell Ville
Temperatura máxima del aire	°C	diario	Carcarañá
Temperatura mínima del aire	°C	diario	Casilda
Temperatura media del aire	°C	diario	El Trébol
Punto de rocío	°C	horario	Laboulaye Aero
Humedad relativa	%	horario	Manfredi INTA
Velocidad del viento a 10m	km/h	horario	Marcos Juárez Aero
Tensión de vapor	hPa	horario	Marcos Juárez INTA
Presión atmosférica	hPa	horario	Oliveros INTA
Heliofanía efectiva	h	diario	Rosario Aero
			Venado Tuerto
Heliofanía relativa	%	diario	Villa María
			Zavalla (UNR)

Tabla 5.5 – Estaciones y variables meteorológicas procesadas – INTA.

Variable	Unidad	Dato	Estaciones
Precipitación	mm	diario	Casilda ⁽¹⁾ Manfredi Marcos Juárez Las Rosas ⁽²⁾ Oliveros Rafaela Zavalla (UNR)
Temperatura máxima del aire	°C	diario	
Temperatura mínima del aire	°C	diario	
Temperatura media del aire	°C	diario	
Punto de rocío	°C	diario	
Humedad relativa	%	diario	
Velocidad del viento a 2m	km/h	diario	
Velocidad del viento a 10m	km/h	diario	
Tensión de vapor	hPa	diario	
Heliofanía efectiva	h	diario	
Heliofanía relativa	%	diario	
Radiación global	MJ/m ²	diario	

(1) precipitaciones diarias de 1961 en adelante, salvo mensuales para los años 1978 y 1994.

(2) precipitaciones diarias desde 1975 en adelante.

Se eligieron las localidades de Marcos Juárez, Oliveros y Casilda (con apoyo de la estación UNR Zavalla) como representativas para el presente estudio, por ser las que presentan las series de datos más completas en el período de tiempo 01/01/1962 – 31/07/2012 y por estar además ubicadas en la zona de estudio.

Dado que las series diarias de precipitaciones en Casilda presentaban ausencia de datos para los años 1978 y 1994, se procedió a cotejar mediante el Método de Doble Masas los datos recopilados con los de la estación Zavalla (UNR). Los estudios fueron diarios, mensuales y anuales en el período 1973 – 2011. Para los estudios mensuales y anuales se consideraron para Casilda los datos mensuales obtenidos de esta estación, mientras que para el estudio diario se consideraron lluvias diarias nulas en Casilda para los años faltantes. En la Figura 5.28 se presentan los resultados de dicho estudio.

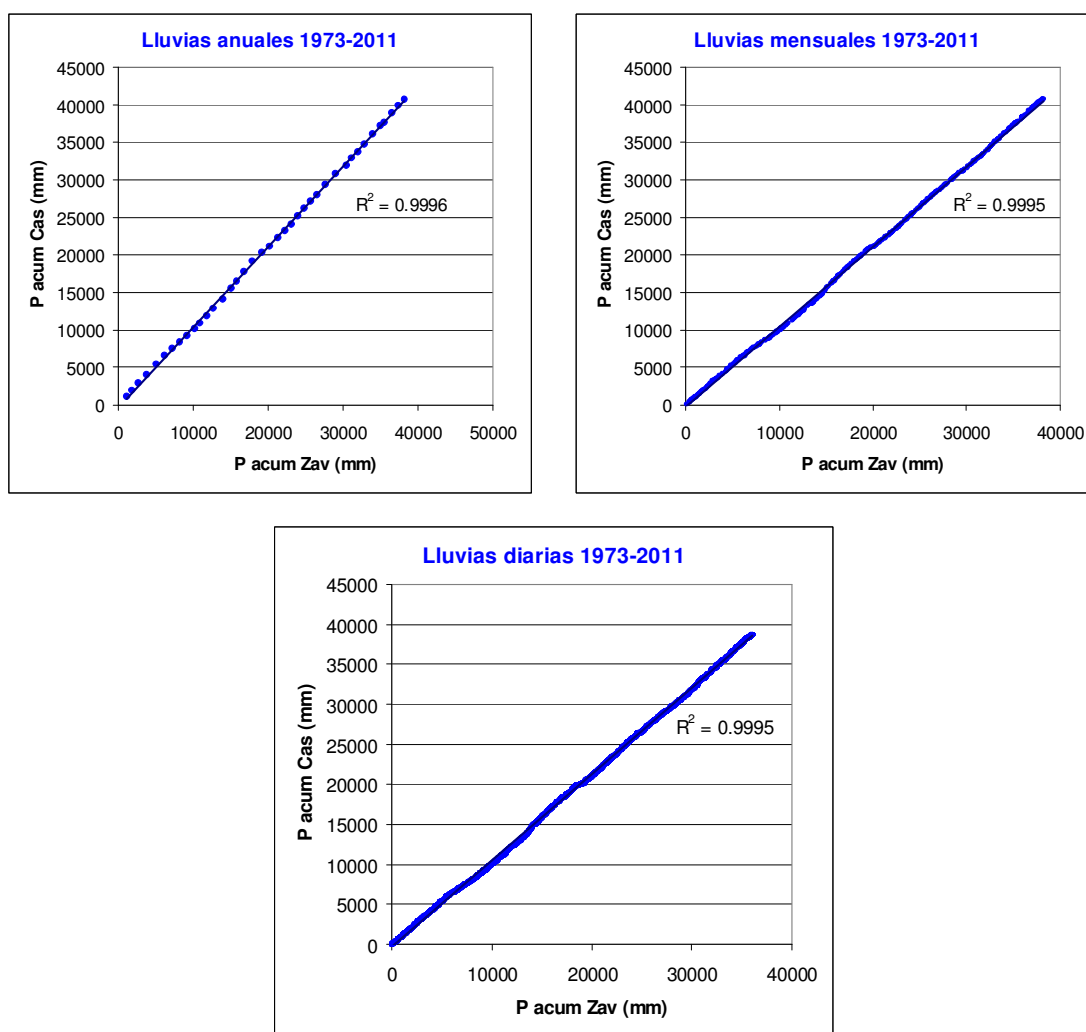


Figura 5.28 – Resultados del Método de Doble Masa para las estaciones Casilda y Zavalla (UNR).

La Figura 5.28 muestra una muy buena correlación en los tres estudios, por lo que se consideraron las lluvias diarias de la estación Zavalla (UNR) para suplir los datos faltantes en la estación Casilda para los años 1978 y 1994.

Como las estaciones del CIM-SMN no disponen de los datos de velocidad del viento a 2 metros sobre la superficie, se calcularon a partir de las observadas a 10 metros de altura empleando la Ecuación 5.1 (Allen *et al.*, 2006) y haciendo $z = 10$ m:

$$u_2 = u_z \frac{4,87}{\ln(67,8 z - 5,42)} \quad (5.1)$$

donde:

u_2	velocidad del viento a 2 m sobre la superficie (m s^{-1})
u_z	velocidad del viento medida a z m sobre la superficie (m s^{-1})
z	altura de medición sobre la superficie (m)

Una vez concluida esta etapa se procedió, cuando fue posible, al relleno de datos faltantes en algunas de las variables meteorológicas mediante métodos de regresión lineal en función de los datos disponibles de estaciones cercanas, y trabajando con aquellas que dieron el valor más alto del coeficiente de determinación R^2 .

En la Tabla 5.6 se muestran a modo de ejemplo los valores de R^2 correspondientes a cinco variables analizadas entre las estaciones INTA Oliveros y Rosario Aero.

Tabla 5.6 – Coeficiente de determinación entre la Estación INTA Oliveros y Rosario Aero.

Variable	R^2	Período
Temperatura Máxima del aire	0,978	01/01/1962 a 31/05/1964
Temperatura Mínima del aire	0,963	01/02/1963 a 30/09/1966
Temperatura Media del aire	0,960	01/10/1963 a 28/01/1965
Punto de rocío	0,973	01/07/1979 a 31/01/1981
Velocidad del viento a 2m	0,959	01/01/1962 al 31/07/1962

Para un lapso de tiempo de 50 años (años 1962 a 2011), la Figura 5.29 muestra la precipitación total anual para las localidades de Oliveros y Marcos Juárez (localidades extremas de la zona de estudio en dirección E-O), mientras que en la Figura 5.30 se presenta la media mensual de precipitaciones para dichas ciudades, incorporando además las localidades de Casilda y Las Rosas (en ésta última, las precipitaciones hasta 1974 corresponden a la Ea. La California).

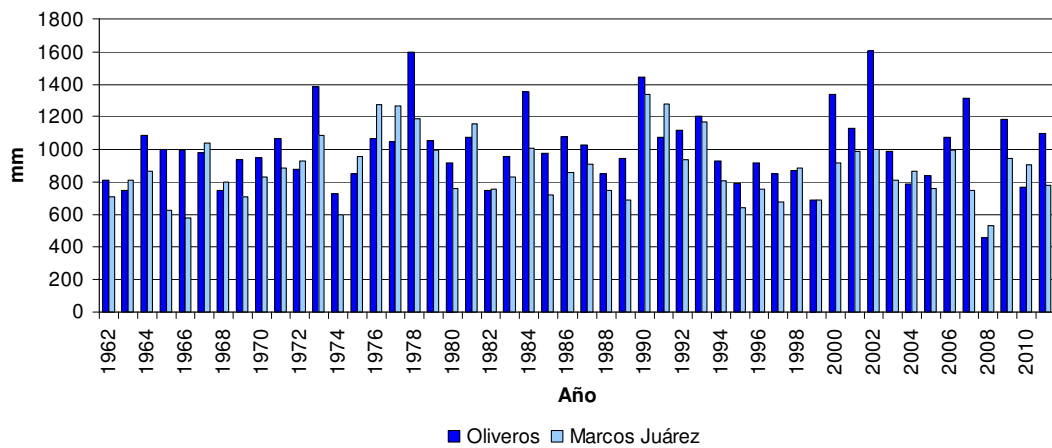


Figura 5.29 – Precipitación anual (1962 – 2011) para Oliveros y Marcos Juárez.

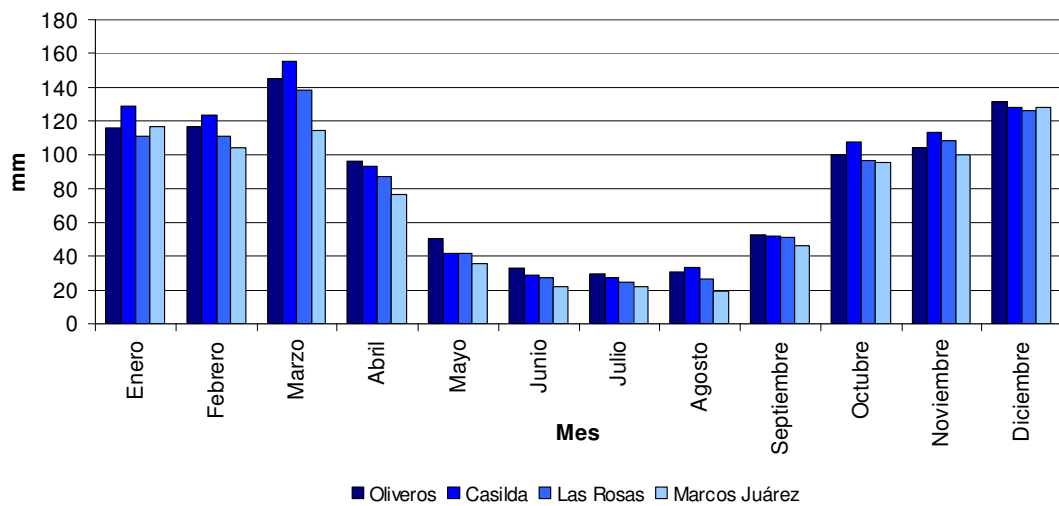


Figura 5.30 – Precipitación promedio mensual (1962 – 2011) para Oliveros, Casilda, Las Rosas y Marcos Juárez.

En general, la estación de Oliveros registra mayores precipitaciones que la estación Marcos Juárez. La estación Oliveros registró durante el período de 1962 a 2011 la precipitación anual máxima de 1606 mm en el año 2002 y una mínima es de 453 mm en el 2008. En cuanto a la precipitación media mensual, las mayores lluvias se registran durante los meses de verano, en contraposición de lo que ocurre en los meses de invierno.

En las figuras 5.31 y 5.32, y para el mismo período de 50 años (1962 – 2011), se muestra para las tres localidades a considerar la variabilidad observada en el registro de las temperaturas máximas y mínimas promedio mensuales.

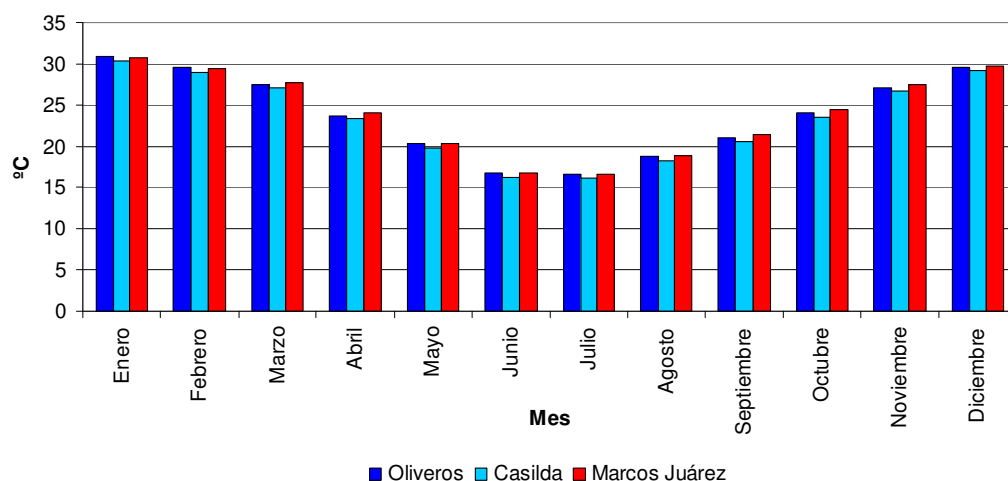


Figura 5.31 – Temperatura máxima promedio mensual (1962 – 2011) para Oliveros, Casilda y Marcos Juárez.

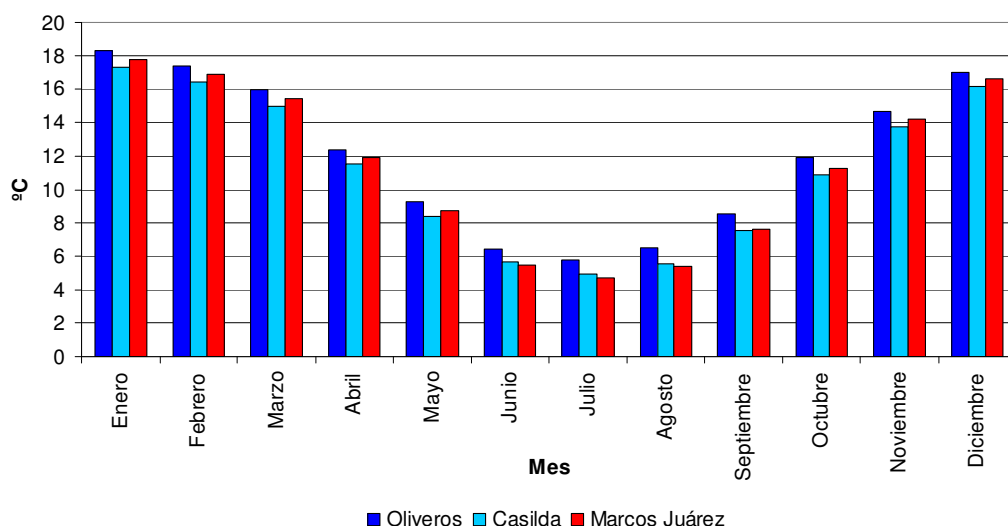


Figura 5.32 – Temperatura mínima promedio mensual (1962 – 2011) para Oliveros, Casilda y Marcos Juárez.

5.2.6.2. Cálculo de evapotranspiraciones

El concepto de evapotranspiración potencial (ETP) fue introducido independientemente por Penman (1948) y Thornthwaite (1948), definiendo a la ETP como la máxima evaporación posible en un tiempo dado, cuando el suelo se encuentra en su contenido óptimo de humedad, sin limitante en el suministro hídrico y cubierto totalmente con un cultivo verde de baja altura, con un albedo entre 0,22 y 0,25. En dicha definición la tasa de evapotranspiración no está relacionada a un cultivo específico, derivando en conceptos confusos al respecto.

Por este motivo se introdujo el concepto de evapotranspiración de la superficie de referencia, denominada evapotranspiración del cultivo de referencia o evapotranspiración de referencia (ET_0), definiendo (Allen *et al.*, 2006) dicho cultivo como:

(...) un cultivo hipotético con una altura asumida de 0,12 m, con una resistencia de la superficie de 70 s/m y un albedo de 0,23, lo que asemeja a la evaporación que ocurre en una superficie extensa de grama verde de altura uniforme, creciendo activamente y bien regada. (p. xiii)

El concepto de una superficie de referencia fue introducido con el fin de evitar la necesidad de definir los parámetros únicos de evapotranspiración para cada cultivo y etapa de crecimiento. Los valores de evapotranspiración de los diferentes cultivos se relacionan con la ET_O por medio de los coeficientes de cultivo (Allen *et al.*, 2006).

De los diversos métodos existentes para el cálculo de la ET_O , y tras una reunión de expertos en 1990, se recomienda adoptar para su cálculo el método combinado de Penman-Monteith de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) según la publicación FAO-56 (método FAO-56 P-M), ya que los valores obtenidos por dicho método son más consistentes con datos reales del uso de agua de diversos cultivos en todas las regiones y climas (Allen *et al.*, 2006). La ecuación utiliza datos climáticos de radiación solar, temperatura del aire, humedad y velocidad del viento (Ecuación 5.2).

$$ET_O = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \quad (5.2)$$

donde:	ET_O	evapotranspiración de referencia (mm d^{-1})
	R_n	radiación neta en la superficie del cultivo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)
	R_a	radiación extraterrestre (mm d^{-1})
	G	flujo del calor del suelo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)
	T	temperatura media del aire a 2 m de altura ($^{\circ}\text{C}$)
	u_2	velocidad del viento a 2 m sobre la superficie (m s^{-1})
	e_s	presión de vapor de saturación (kPa)
	e_a	presión real de vapor (kPa)
	$e_s - e_a$	déficit de presión de vapor (kPa)
	Δ	pendiente de la curva de presión de vapor ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$)
	γ	constante psicrométrica ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$)

Se distinguen en este trabajo dos períodos de estudio para los que fue necesario realizar el cálculo de evapotranspiraciones: el primero desde el 01/01/1962 hasta el 31/12/1966 (empleado en la etapa de calibración del modelo en régimen estacionario), y el segundo desde el 01/01/1967 hasta

el 31/07/2012. El motivo de estos estudios fue que la implementación del cálculo de ET_o por el método de FAO-56 P-M no fue factible llevarla a cabo en el primero de los períodos mencionados anteriormente dada la falta de datos, en algunos lapsos de tiempo, de algunas variables meteorológicas necesarias para el cálculo de ET_o . La velocidad del viento u_2 fue la variable que presentó menor cantidad de datos para el período en cuestión, ya que no se dispuso por casi un año de datos en la localidad de Oliveros, de todo el período en Casilda y de tres meses en Marcos Juárez. En cambio sí pudieron desarrollarse los cálculos pertinentes de la ET_o para el segundo de los períodos.

A pesar de ser la velocidad del viento u_2 la variable que presenta la menor sensibilidad en la ecuación del método de FAO-56 P-M (Howard y Lloyd, 1979; Gong, *et al.*, 2006), para el estudio en el período correspondiente a la calibración en régimen estacionario se optó (en primera instancia) no rellenar los datos faltantes por ningún método estadístico, sino que, apoyado en diversos estudios existentes como los de Xu y Singh (2002), Lu *et al.* (2005), Yoder *et al.* (2005), Alexandris *et al.* (2008), Almorox *et al.* (2008), Ocampo *et al.*, (2009), Ocampo y Rivas (2010), Sánchez Martínez y Carvacho Bart (2011), Fisher y Pringle III (2013), Tabari *et al.* (2013), Soriano Soto *et al.* (2012), entre otros, se llevó a cabo un estudio de diversos métodos de estimación de ETP y ET_o en el período 1970-2009 con el objetivo de elegir aquel que tuviera el mejor ajuste al método de FAO-56 P-M y que involucrara menor cantidad de variables con datos disponibles, ver Anexo III. Finalmente, el método adoptado fue el de Hargreaves-Samani (1985). En las figuras 5.33 y 5.34 se muestran los valores de evapotranspiración mensual obtenidos para los períodos considerados en las localidades de Oliveros, Casilda y Marcos Juárez.

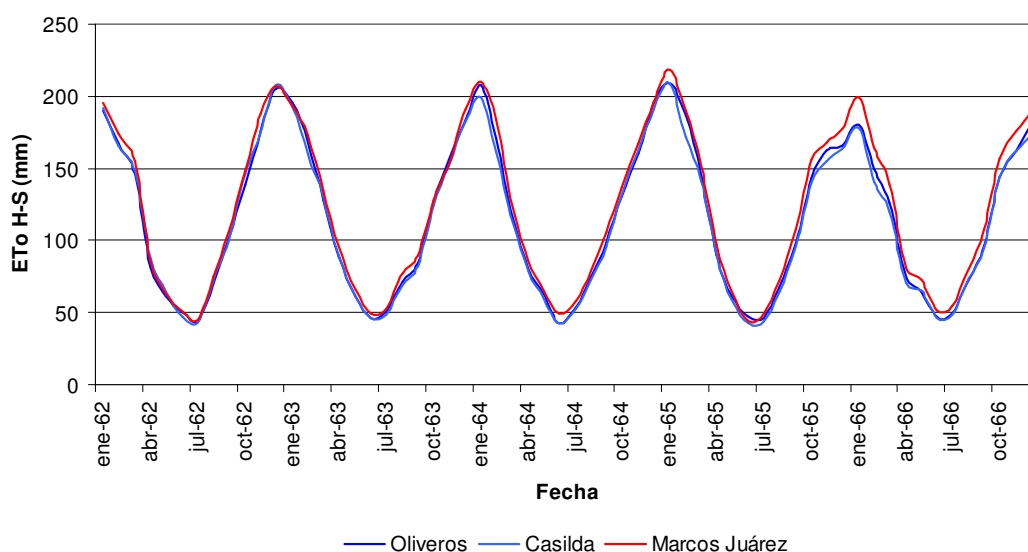


Figura 5.33 – Valores mensuales de ET_o (01/1962 al 12/1966).

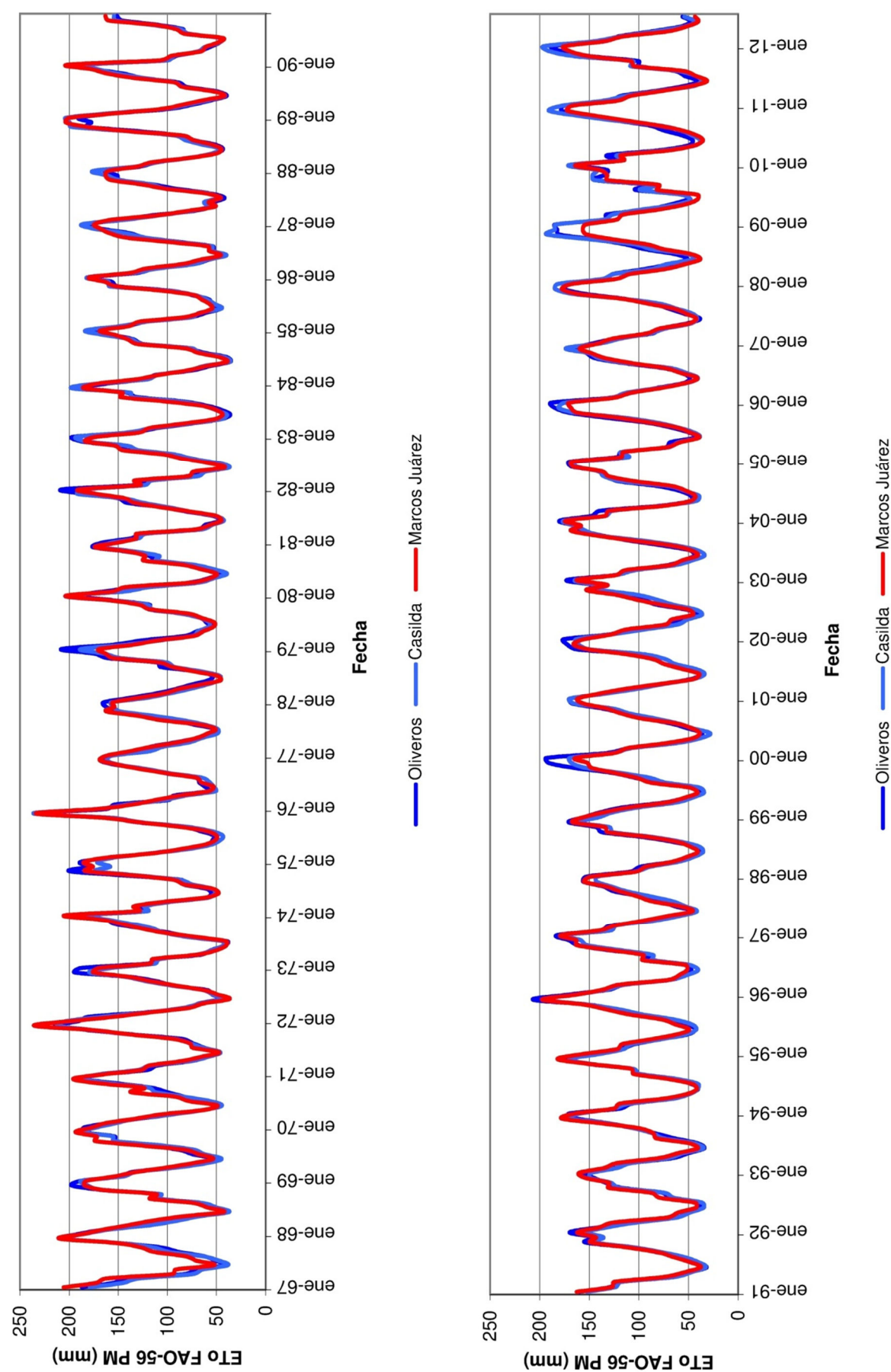


Figura 5.34 – Valores mensuales de ET₀ (01/1967 al 07/2012).

Se observa en las figuras que los máximos valores de evapotranspiración se dan en los meses estivales, mientras que los mínimos en los meses invernales, adoptando un comportamiento periódico en el tiempo.

La Figura 5.35 muestra la diferencia mensual de ET_O entre Marcos Juárez y Oliveros (localidades más extremas en dirección E-O en la zona de estudio), donde se observa un comportamiento cíclico de las diferencias de ET_O entre ambas localidades. Actualmente estamos transitando un período en donde las evapotranspiraciones potenciales en Marcos Juárez son mayoritariamente inferiores a las que se dan en Oliveros.

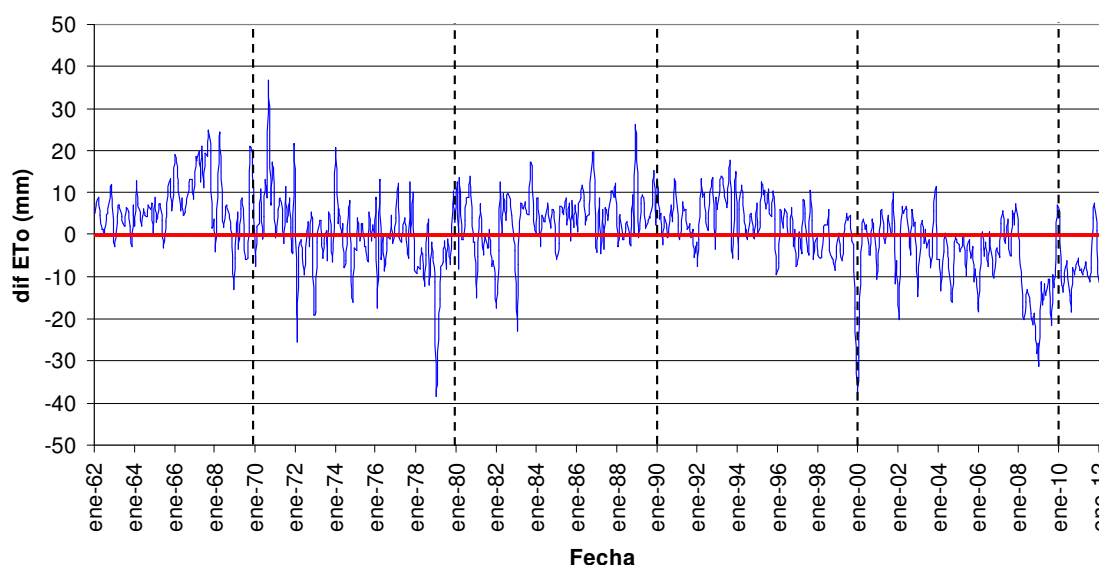


Figura 5.35 – Diferencia de valores mensuales de ET_O entre Marcos Juárez y Oliveros (01/1962 al 07/2012).

5.2.6.3. *Cálculo de balances hídricos*

El método de balance hídrico propuesto por Thornthwaite y Mather -TM- (1955, 1957) es uno de los más usados, y las variables involucradas en el mismo se encuentran relacionadas a través de la Ecuación (5.3):

$$P = ETR + Q + D \pm \Delta Alm \quad (5.3)$$

donde:	P	precipitación
	ETR	evapotranspiración real
	Q	escurrimiento superficial
	D	drenaje de agua hacia abajo de la zona radicular del cultivo (percolación)
	ΔAlm	variación del almacenamiento de agua en el suelo

Originalmente propuesta para paso mensual, TM (1957) incorporan ejemplos de balance a paso diario, ya que de esta manera se obtiene una mejor resolución de las recargas en el tiempo debido a la incidencia en el estudio del balance de la variación temporal de las precipitaciones dentro de cada mes (Steenhuis y Van der Molen, 1986). Varios autores han llevado a cabo estudios aplicando el método de TM a paso diario, pudiendo citar entre ellos a Botey *et al.* (2011), Botey y Moreno (2012), Westenbroek *et al.* (2010) y Alí (2011).

La metodología TM utilizada para el cálculo de los balances hídricos de este trabajo fue modificada de acuerdo a la propuesta por Scozzafava y Tallini (2001), empleando el método del número de curva (CN) del Servicio de Conservación de Suelos del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA – SCS), actualmente Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS), para el cálculo del escurrimiento superficial provocado por un evento aislado, y que tiene en cuenta el tipo de suelo, el uso del mismo, la pendiente del terreno y la condición de humedad del suelo previa al evento.

Estudios de balance hídrico aplicando simultáneamente el método de TM y el método del CN han sido llevado a cabo por varios autores, entre ellos Blanco Andray *et al.* (1998), París *et al.* (2003), Zimmermann (2003, 2006), Marzoratti *et al.* (2006), Westenbroek *et al.* (2010), Alí (2011) y Ares *et al.* (2012).

Particularmente, Scozzafava y Tallini (2001) plantean a través del método del CN calcular primero el escurrimiento superficial y luego restar este valor a la lluvia total del evento, obteniendo una lluvia ficticia $P_f = P - Q$, y a la que se le aplican las ecuaciones correspondientes al balance hídrico. De esta manera, los excedentes calculados corresponden a la infiltración neta.

Para efectuar dichos estudios de balance hídrico se programó, en el contexto de este trabajo, una planilla de cálculo que realiza un balance hídrico seriado (BHS) aplicando el método exponencial a paso diario utilizando el procedimiento de TM combinado con el del CN, y teniendo de datos las precipitaciones y evapotranspiraciones potenciales diarias en el período de estudio. En el método exponencial, y durante el período seco, la pérdida de agua sigue una ley exponencial negativa, reflejando la dificultad que presentan los cultivos de extraer agua del suelo a medida que éste se vaya secando, dificultando de esta manera al cultivo llegar a la evapotranspiración (Almorox, 2010).

La planilla posee un módulo inicial destinado a la determinación de la Capacidad de Agua Disponible (CAD) para el cultivo y que es la cantidad de agua que puede retener el suelo entre los valores de Capacidad de Campo (CC) y de Punto de Marchitez Permanente (PMP). La CAD es el agua que dispone el cultivo para su crecimiento.

Para ello se implementó un modelo de suelo edáfico estructurado en cuatro horizontes, caracterizados cada uno por los datos de espesor y las humedades correspondientes a la CC y al PMP expresadas en volumen (Figura 5.36).

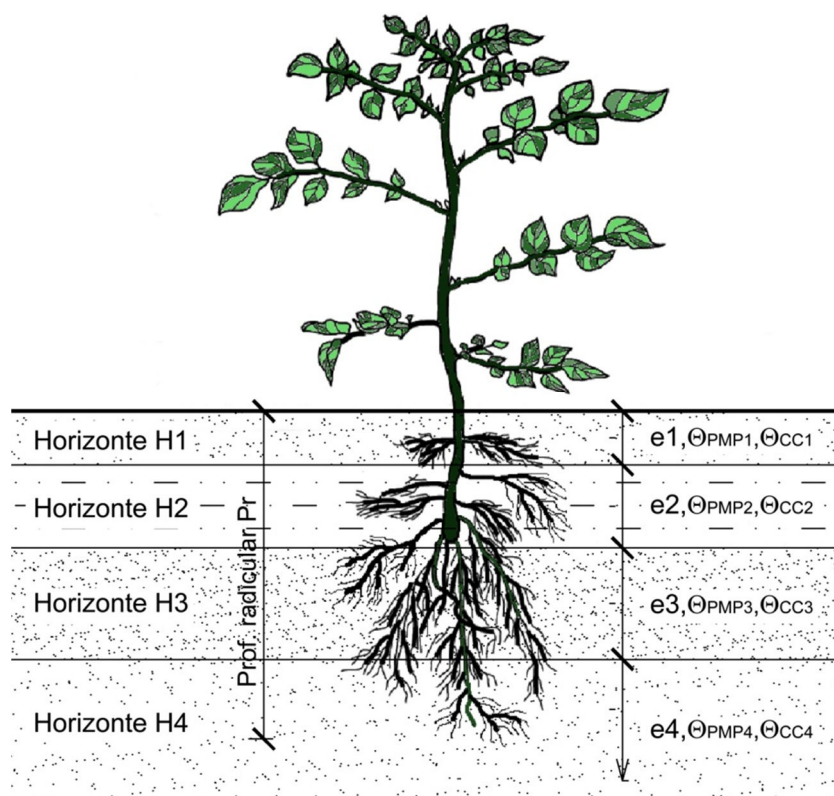


Figura 5.36 – Modelo de suelo implementado en el programa y datos requeridos para cada horizonte.

En los suelos que presentan importantes contenidos de sales, éstas retienen parte del agua, y las raíces de los cultivos deben efectuar un mayor esfuerzo para extraerla. Para incorporar este efecto en el programa, y en aquellos suelos que lo requieran, se considera afectar a la lluvia ficticia P_f de un porcentaje de retención por salinidad, quedando el resto disponible para el balance hídrico.

Se necesita ingresar, además, el valor de la profundidad radicular efectiva del cultivo. El programa calcula automáticamente, en función de los espesores de los horizontes cargados, las profundidades radiculares parciales correspondientes al modelo de suelo considerado.

El programa calcula la Capacidad de Agua Disponible CAD mediante la Ecuación (5.4):

$$CAD = \sum_{i=1}^4 (\theta_{CC_i} - \theta_{PMP_i}) \times Pr_i \times f \quad (5.4)$$

donde:	CAD	capacidad de agua disponible (mm)
	θ_{CC_i}	humedad de la capacidad de campo de cada horizonte ($m\ m^{-1}$)
	θ_{PMP_i}	humedad del punto de marchitez permanente de cada horizonte ($m\ m^{-1}$)
	Pr_i	profundidad radicular efectiva en cada horizonte (cm)
	f	factor de conversión de unidades ($f = 10$)

Los datos de humedades de CC y de PMP de cada horizonte fueron calculados previamente mediante funciones de pedotransferencia incluidas en el programa SOILPAR (Acutis y Donatelli, 2003). Este programa permite determinar las propiedades agrohidrológicas de los suelos, previo ingreso de datos provenientes de las descripciones analíticas de series de suelos que se encuentran en las Cartas de Suelos de INTA. Dichos valores calculados se contrastaron posteriormente con datos brindados por la bibliografía existente, como Rawls *et al.* (1982).

Luego se ingresan en la planilla de cálculo los datos relacionados al método del CN, como ser el número de curva CN_{II} y el coeficiente de abstracción inicial λ . El CN_{II} se obtiene de tablas en función del Grupo Hidrológico de Suelo (GHS), uso y cobertura del suelo, condición previa de humedad media o promedio y $\lambda = 0,20$. La planilla ofrece la posibilidad de elegir entre dos valores de λ (0,20 o 0,05), ya que para simulaciones continuas puede llegar a ser más apropiado, incrementando el escurrimiento directo para precipitaciones pequeñas (Westenbroek *et al.*, 2010; Woodward *et al.*, 2003). Si se elige $\lambda = 0,05$, la planilla recalcula automáticamente el valor de CN_{II} (Hawkins *et al.*, 2010), ya que éste corresponde a un valor de $\lambda = 0,20$, como se citó anteriormente.

Para la elección de los números de curva correspondientes a condiciones de suelo seco y húmedo en función de la condición de humedad antecedente (CN_I y CN_{III} , respectivamente), se adoptó el criterio de la precipitación de los 5 días previos al evento considerado.

Las fórmulas utilizadas para el cálculo de los números de curva CN_I y CN_{III} son las siguientes (ecuaciones 5.5 y 5.6):

$$CN_I = \frac{4,2 CN_{II}}{10 - 0,058 CN_{II}} \quad (5.5)$$

$$CN_{III} = \frac{23 CN_{II}}{10 + 0,13 CN_{II}} \quad (5.6)$$

Para iniciar el BHS se necesita cargar en la planilla de cálculo el almacenamiento inicial al principio del período de estudio.

Como se citara anteriormente, al trabajar con la lluvia ficticia P_f los excedentes determinados por el balance hídrico constituyen las recargas a considerar para el acuífero. La planilla brinda los valores diarios de recarga, como así también los valores mensuales y anuales.

A continuación se muestra en la Figura 5.37 un esquema resumido de los alcances y datos involucrados en la planilla de cálculo programada.

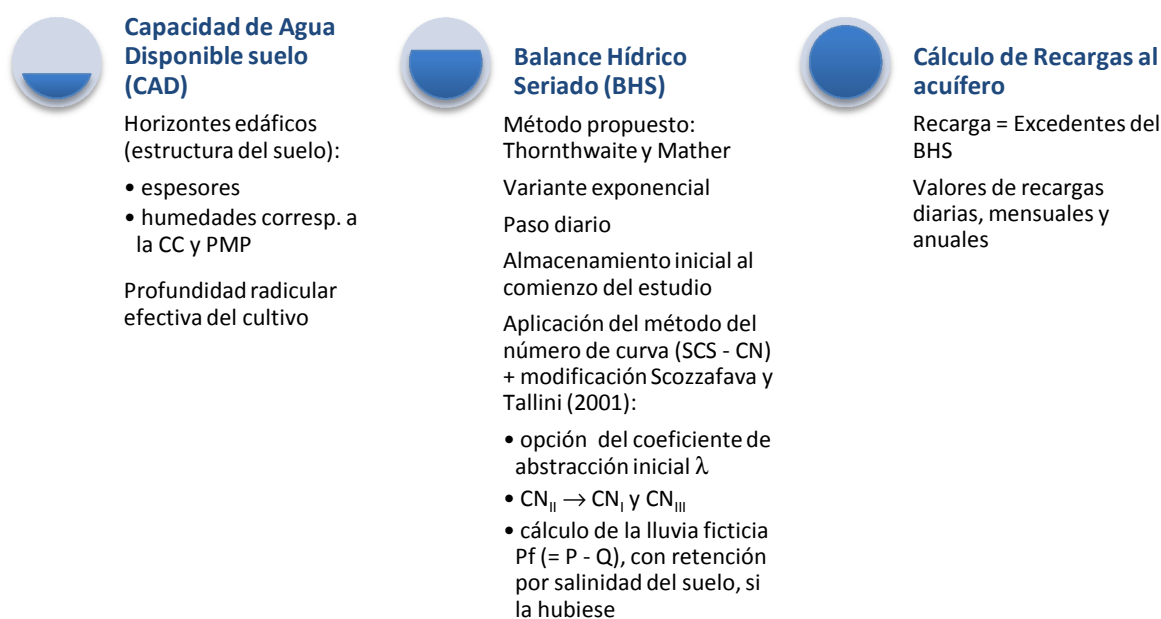


Figura 5.37 – Esquema simplificado de la estructura de la planilla de cálculo destinada a la realización de los Balances Hídricos Seriados a paso diario.

5.2.6.3.1. Determinación de los balances hídricos en las zonas de recarga

En la Figura 5.38 se observan las cinco zonas de recarga definidas en su momento. Dado que las estaciones meteorológicas adoptadas para los estudios de balance hídrico fueron Oliveros,

Casilda (ambas en la provincia de Santa Fe) y Marcos Juárez (provincia de Córdoba), se dividió la zona de estudio en áreas de influencia aplicando el método de los polígonos de Thiessen.

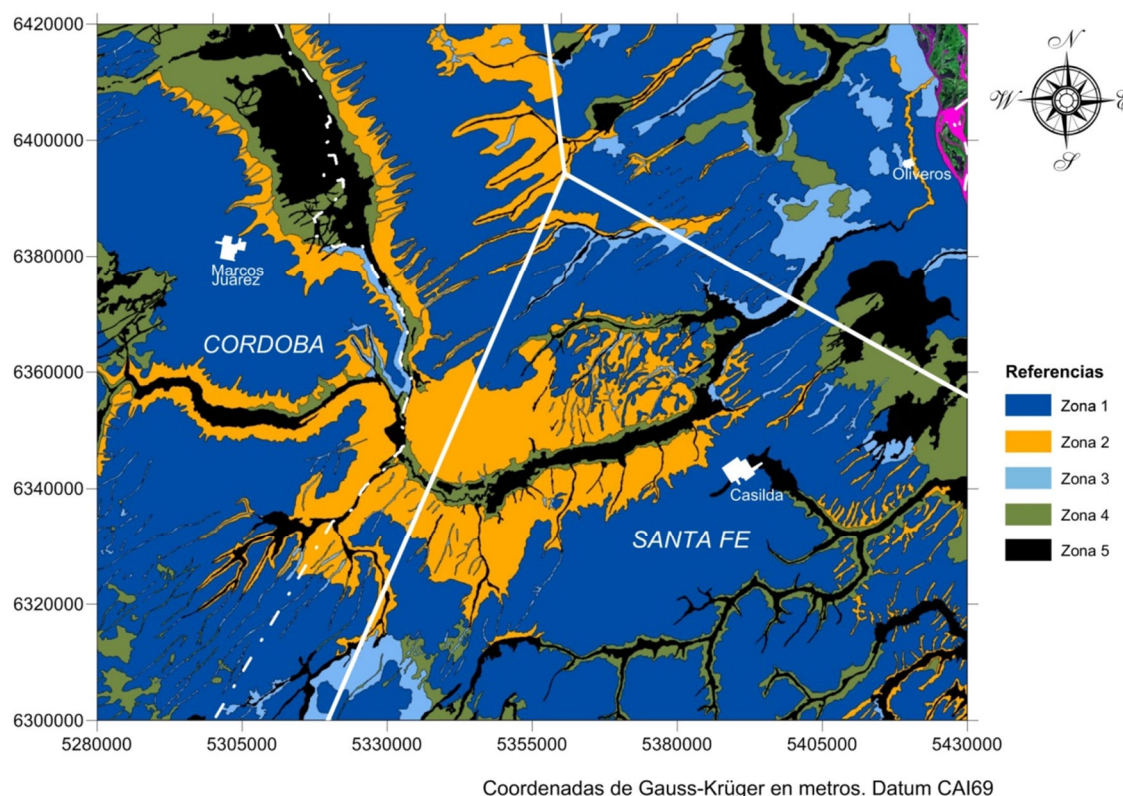


Figura 5.38 – Zonas de recarga. División de la zona de estudio en tres sectores de acuerdo con qué estación meteorológica se trabaje (Oliveros, Casilda o Marcos Juárez).

De esta manera la zona de estudio quedó dividida en tres Sectores de Estudios de Balance Hídrico (SEBH), donde se emplearon las precipitaciones y evapotranspiraciones potenciales diarias de Oliveros, Casilda y Marcos Juárez, según corresponda.

Para el cálculo de las CAD fue necesario analizar cuáles son las series, asociaciones y complejos de suelos con mayor presencia areal en cada una de los tres SEBH y cómo estaban distribuidos en los mismos. Una vez terminado este análisis, se cruzaron los datos recopilados y se confeccionó en cada SEBH un perfil edáfico representativo para cada una de las zonas de recarga. Los horizontes que conformaron cada uno de los perfiles citados estuvieron definidos por sus espesores, texturas y humedades correspondientes a la CC y PMP. Luego, a través del dato de la profundidad radicular efectiva de los cultivos predominantes en cada zona de recarga, se obtuvieron los valores de la CAD para cada una de ellas.

Posteriormente, y aplicando el método del CN-SCS, se determinaron los Grupos Hidrológicos de Suelos (GHS) a los cuales pertenecían los perfiles edáficos representativos definidos anteriormente, basándose para dicha clasificación en las características texturales de los mismos.

Teniendo en cuenta esto y en función del tipo de cultivos y el uso del suelo, se determinaron los números de curva CN_{II} para cada zona de recarga (Forestieri, *et al.*, 2013; Luque *et al.*, 1979; USDA-NRCS, 2002, 2004, 2009; Riccardi *et al.*, 2008).

Una característica importante en la zona 2 de recarga es la presencia de erosión en el suelo debida a que es la zona que presenta el mayor gradiente de pendiente topográfica del área de estudio. A partir de los datos brindados por el MDE, se realizó un análisis estadístico de las pendientes topográficas de cada SEBH. Un resumen de los resultados obtenidos se muestra en la Tabla 5.7.

Tabla 5.7 – Pendientes topográficas de cada SEBH, en %.

Variable estadística	Sector de Estudio de Balance Hídrico (SEBH)		
	Oliveros	Casilda	Marcos Juárez
Mínimo	0,004	0,001	0,001
Máximo	1,955	2,008	1,941
3 ^{er} cuartil	0,646	1,032	0,883
Moda (rango i/% del total)	0 < i < 0,005 / 59%	0,5 < i < 1,0 / 49%	0,5 < i < 1,0 / 49%

Si bien existe una expresión matemática que relaciona el número de curva CN con la pendiente topográfica (Neitsch *et al.*, 2005; Huang *et al.*, 2006; Hawkins *et al.*, 2009) (Ecuación 5.7), dicha fórmula es aplicable solo cuando la pendiente es superior al 5%, que es la pendiente máxima considerada asumida por el método del SCS para no modificar el CN que se obtiene de las tablas mencionadas con anterioridad (Ritzema, 2006; Huang *et al.*, 2006; Hawkins *et al.*, 2009).

$$CN_{II\alpha} = \frac{1}{3} (CN_{III} - CN_{II}) (1 - 2 e^{-13,86 \alpha}) + CN_{II} \quad (5.7)$$

donde: $CN_{II\alpha}$ número de curva CN_{II} ajustado por la pendiente
 α pendiente topográfica ($m \ m^{-1}$)

Sin embargo, Luque *et al.* (1979) consideraron en su trabajo la incidencia de la pendiente en el valor del CN_{II} , aumentando éste a medida que crece la pendiente topográfica, por lo que se adoptó este criterio para los CN_{II} de la zona 2 de recarga, en función del rango de pendiente que adopta la moda en cada una de los SEBH.

En la Tabla 5.8 se muestran los valores de las variables citadas anteriormente de cada una de las cinco zonas de recarga y por cada SEBH.

Tabla 5.8 – Variables edáficas y de escurrimiento superficial consideradas para cada zona de recarga.

SEBH Oliveros					
Variable	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5
Horizonte H1:					
textura	FL	FL	FL	FL	FL
espesor (cm)	20	20	30	25	25
CC (m m ⁻¹)	0,38	0,37	0,37	0,35	0,35
PMP (m m ⁻¹)	0,21	0,19	0,19	0,17	0,16
Horizonte H2:					
textura	FAL-AL-FAL	FAL-AL	FAL/AL-FAL	AL-FAL	AL-FAL
espesor (cm)	80	85	80	75	70
CC (m m ⁻¹)	0,43	0,44	0,43	0,44	0,44
PMP (m m ⁻¹)	0,26	0,28	0,26	0,28	0,26
Salinidad considerada	-	-	Ligera a moderada	Moderada a fuerte	Fuerte
GHS	C	C	D	D	D
Pr (cm)	70	70	65	65	45
CN _{II}	72	78	77	80	84
SEBH Casilda					
Variable	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5
Horizonte H1:					
textura	FL	FL	FL	FL	FL
espesor (cm)	20	10	25	30	25
CC (m m ⁻¹)	0,37	0,36	0,38	0,35	0,35
PMP (m m ⁻¹)	0,18	0,18	0,20	0,16	0,16
Horizonte H2:					
textura	FAL	FAL	AL	FAL-AL	AL-FAL
espesor (cm)	70	60	65	65	70
CC (m m ⁻¹)	0,40	0,37	0,45	0,40	0,44
PMP (m m ⁻¹)	0,23	0,20	0,28	0,23	0,26
Salinidad considerada	-	-	Ligera a moderada	Moderada a fuerte	Fuerte
GHS	C	C	D	D	D
Pr (cm)	70	70	65	65	45
CN _{II}	72	78	77	80	84

Tabla 5.8 – Variables edáficas y de escurrimiento superficial consideradas para cada zona de recarga (Cont.).

SEBH Marcos Juárez					
Variable	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5
Horizonte H1:					
textura	FL	FL	FL	FL	FL
espesor (cm)	20	15	20	20	25
CC (m m-1)	0,39	0,39	0,38	0,38	0,37
PMP (m m-1)	0,20	0,20	0,19	0,19	0,20
Horizonte H2:					
textura	FAL	FAL	FAL	FAL	FAL
espesor (cm)	50	50	55	60	50
CC (m m-1)	0,37	0,37	0,37	0,37	0,38
PMP (m m-1)	0,20	0,20	0,20	0,20	0,21
Salinidad considerada	-	-	Ligera a moderada	Moderada a fuerte	Fuerte
GHS	C	C	D	D	D
Pr (cm)	45	45	40	40	35
CN _{II}	67	73	73	80	84

Por último se efectuaron los balances hídricos seriados para todas las zonas de recarga del área de estudio para el período de tiempo comprendido por la etapa de calibración en régimen estacionario (01/01/1962 a 31/12/1966).

Para los balances hídricos, el almacenamiento inicial del suelo se obtuvo mediante cotejos de precipitaciones y evapotranspiraciones potenciales en el año previo (1961) a valores mensuales de tal manera de comenzar el balance en una fecha donde se conociera el almacenamiento: al final de un período húmedo en donde el almacenamiento fuese la CAD (el suelo a capacidad de campo) o bien al inicio de un período seco con un almacenamiento igual a cero.

5.2.6.4. *Cálculo de las recargas*

Para el estudio en régimen estacionario, el valor de la recarga para cada una de las zonas se adoptó el promedio anual de las recargas obtenidas en el BHS para los cinco años que abarca el período de estudio. En las figuras 5.39 a 5.41 se observan, a modo de ejemplo, los valores de recargas y precipitaciones diarios, mensuales y anuales para la zona 1 de recarga en el período de estudio para las localidades de Oliveros, Casilda y Marcos Juárez.

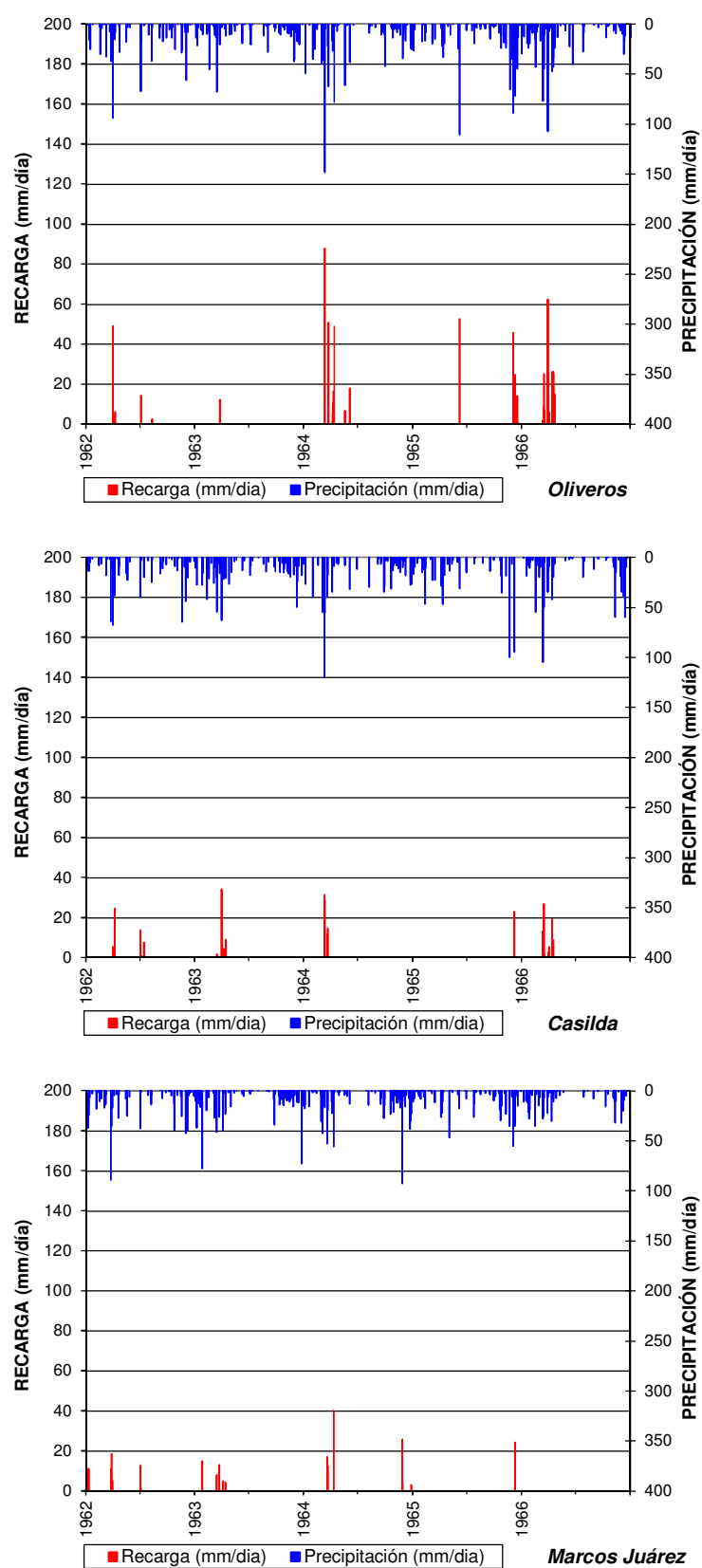


Figura 5.39 – Recargas y precipitaciones diarias en la zona 1 de recarga.

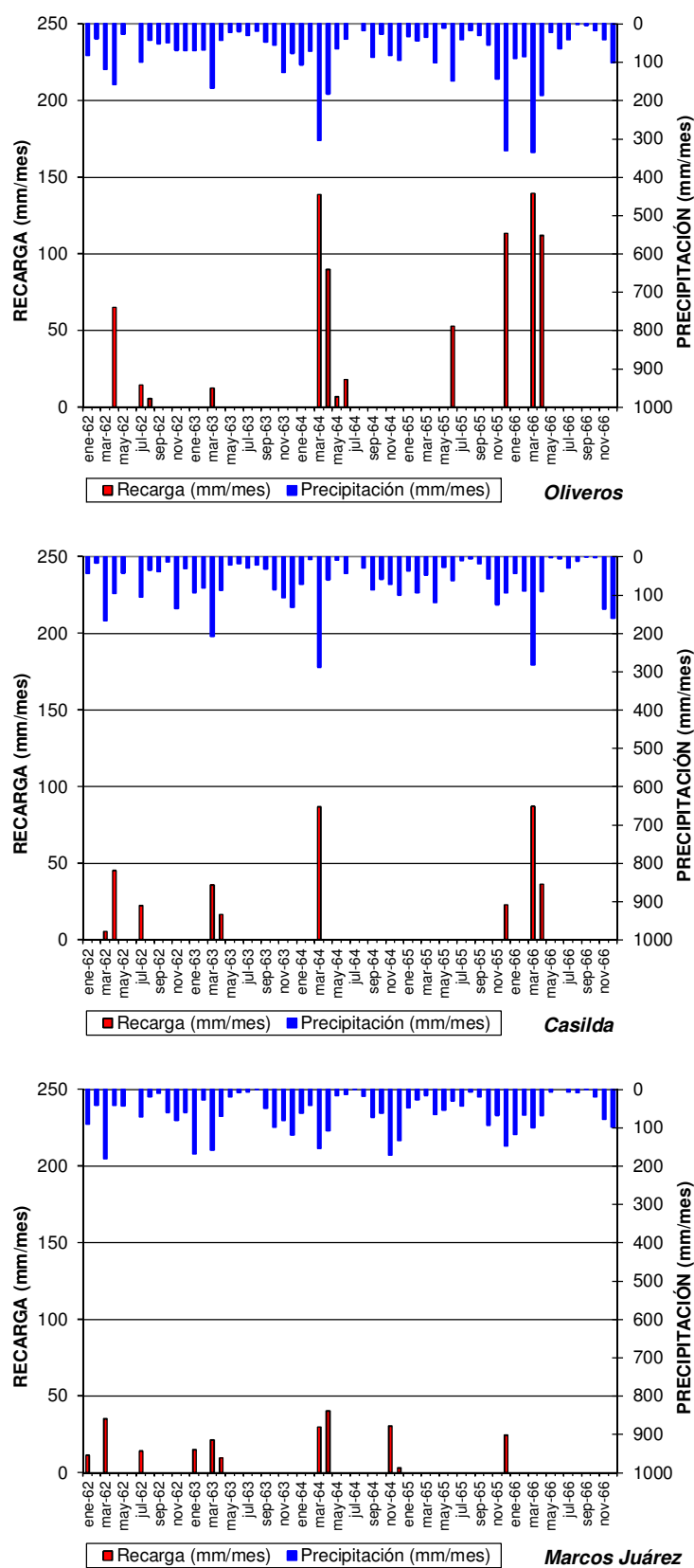


Figura 5.40 – Recargas y precipitaciones mensuales en la zona 1 de recarga.

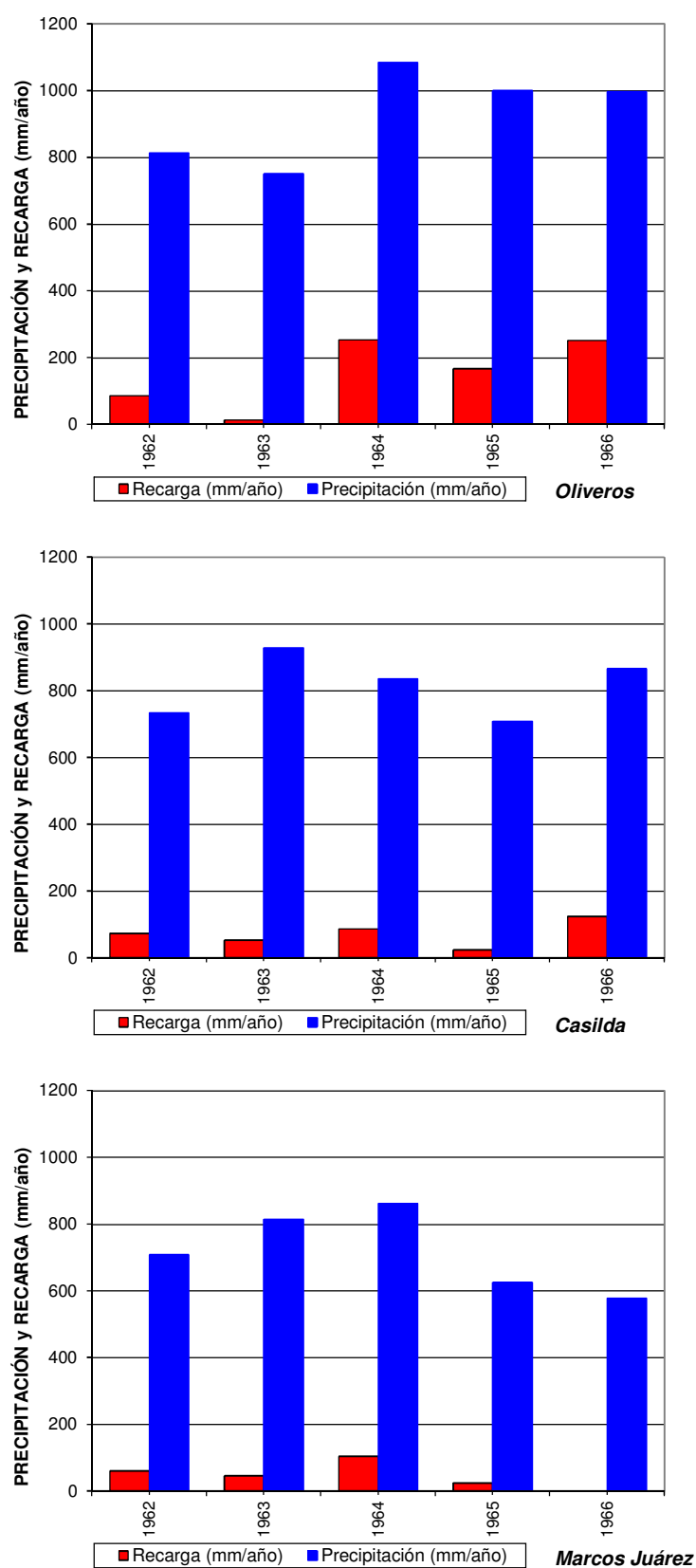


Figura 5.41 – Recargas y precipitaciones anuales en la zona 1 de recarga.

En la Tabla 5.9 se muestra, para cada zona de recarga, los valores de recarga finales a considerar en la etapa de calibración en régimen estacionario.

Tabla 5.9 – Recargas estimadas en régimen estacionario.

Localidad	Recarga (mm/año)				
	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5
Oliveros	153,5	130,3	117,1	87,2	54,6
Casilda	71,6	58,9	53,7	31,0	20,3
Marcos Juárez	46,7	42,1	38,2	17,0	5,1

5.2.7. Captación de agua mediante bombeo para consumo en localidades

La zona de estudio se caracteriza por ser una zona de las más productivas y activas de ambas provincias. Su principal recurso es la agricultura, que se desarrolla en forma masiva, ubicándose en segundo término la ganadería. En los últimos tiempos, se ha convertido en una zona de alta producción agrícola con un crecimiento en detrimento de la ganadera y con una sobreexplotación del suelo con prácticas intensivas de dobles cultivos anuales, como por ejemplo trigo y soja (Venencio, 2007).

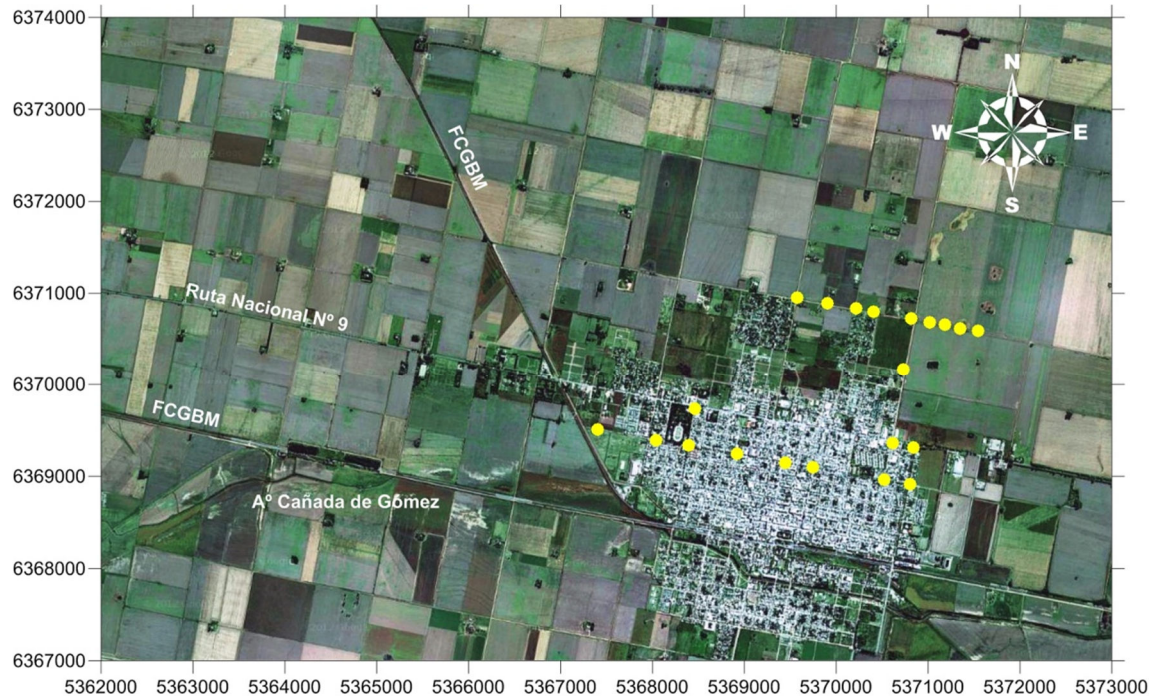
En esta amplia zona se desarrolla prácticamente toda la gama de actividades que hacen a la vida humana: agricultura, ganadería, comercio, industria, asistencia sanitaria, etc. En las partes más altas se practica casi exclusivamente la agricultura, mientras que en las más bajas predomina la ganadería, alternando ambas en los sectores intermedios que actúan como zona de transición (Pasotti y Albert, 1995).

Hacia fines de 1966, tanto los centros urbanos como los establecimientos industriales y rurales de la zona, explotaban exclusivamente los recursos hídricos subterráneos para los distintos usos.

Atendiendo a lo expresado en el apartado 4.3 acerca de la particularidad en cuanto al comportamiento hidrogeológico a nivel local que adquiere el paquete sedimentario cuaternario, Kreimer (1969) expresa que la capa más explotada era la freática, y solo los centros urbanos con características industriales como Cañada de Gómez y Casilda, donde existían servicios de Obras Sanitarias de la Nación (OSN) (hoy Aguas Santafesinas SA -ASSA-), explotaban, además, otros acuíferos.

En Cañada de Gómez, OSN a través de una batería de pozos (Figura 5.42), explotaban el primer y segundo acuífero semiconfinado del paquete cuaternario con caudales de 12 a 50 m³/h pero

teniendo mucho cuidado para evitar la intrusión y mezcla de las aguas de fondo altamente salinas (acuífero semiconfinado de las arenas), hecho provocado posiblemente por roturas del estrato semiconfinante (Kreimer, 1969).



Coordenadas de Gauss-Krüger en metros. Datum CAI69

Figura 5.42 – Pozos de bombeo (círculos amarillos) en Cañada de Gómez durante el año 1966.

La Figura 5.43 muestra los volúmenes mensuales obtenidos en Cañada de Gómez a través de los pozos de bombeo durante el año 1966, mientras que la Figura 5.44 muestra los volúmenes anuales extraídos en cada uno de los pozos.

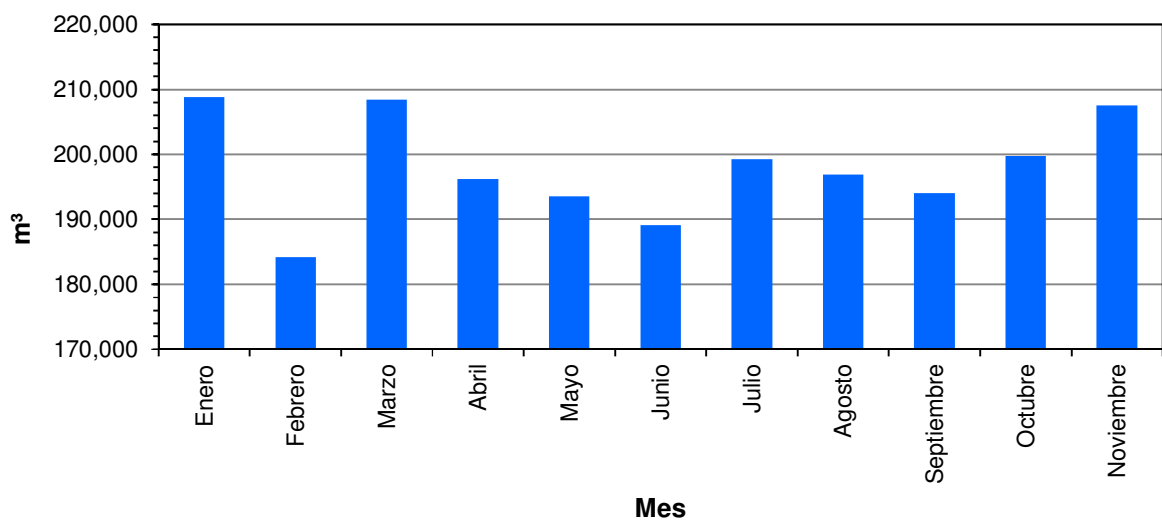


Figura 5.43 – Volúmenes obtenidos por extracción por bombeo en Cañada de Gómez durante el año 1966.

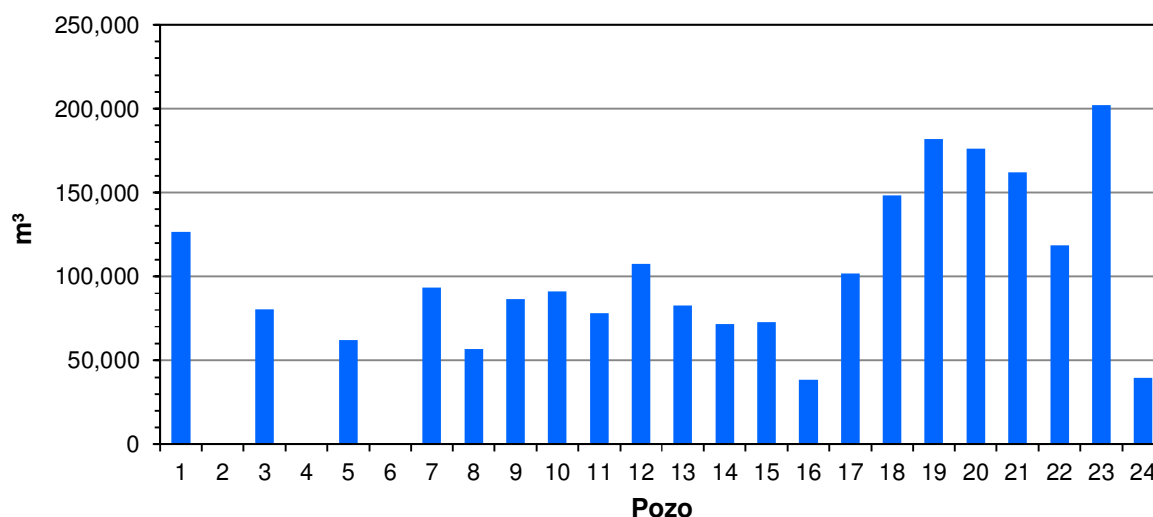


Figura 5.44 – Volúmenes anuales por pozo de bombeo en Cañada de Gómez (año 1966).

En Casilda, OSN explotaba de manera conjunta el segundo acuífero semiconfinado del paquete cuaternario y el semiconfinado de las arenas (de buena calidad), obteniendo buenos caudales de extracción.

Con respecto a la provincia de Córdoba, no hay datos precisos de extracción. Bitesnik (1968) expresa que en la región comprendida por el área de estudio, hacia fines de 1965 cada habitante se proveía de agua por medio de perforistas locales, produciendo en los núcleos poblados contaminación por materia orgánica en la capa en explotación, que se encontraban comunicada con pozos negro y perforaciones.

Las perforaciones profundas y no contaminadas, en general, fueron efectuadas por reparticiones oficiales, pero ninguna con el fin de abastecer el consumo humano.

La totalidad de los pozos, excepto los que suministran agua para riego (comunales) y los que emplea la industria, eran utilizados para dotar de agua a los pobladores urbanos o rurales, en donde el caudal extraído por pozo no llegaba, generalmente, a 3 m³/h. Vale destacar que el empleo de agua para riego producía en los núcleos urbanos una salinización progresiva en el suelo debido a su alta mineralización (Bitesnik, 1968).

5.2.8. Parámetros hidráulicos

La recopilación de la información hidrogeológica originada por el Convenio DPOH-SPAR y el INA-CRL (DPOH-INA, 2002) define para algunas localidades de la provincia de Santa Fe

(Figura 5.45) valores de conductividades hidráulicas derivados de ensayos de bombeos realizadas en el paquete sedimentario cuaternario (o Fm Pampeana). Dado que se trata de una recopilación, las perforaciones que figuran en la misma fueron ejecutadas por diversas empresas, no pudiendo constatar y/o verificar las metodologías empleadas en los ensayos como para garantizar la calidad de la información brindada de las conductividades hidráulicas calculadas, por lo que en este trabajo se consideran como un valor orientativo en la etapa de calibración.

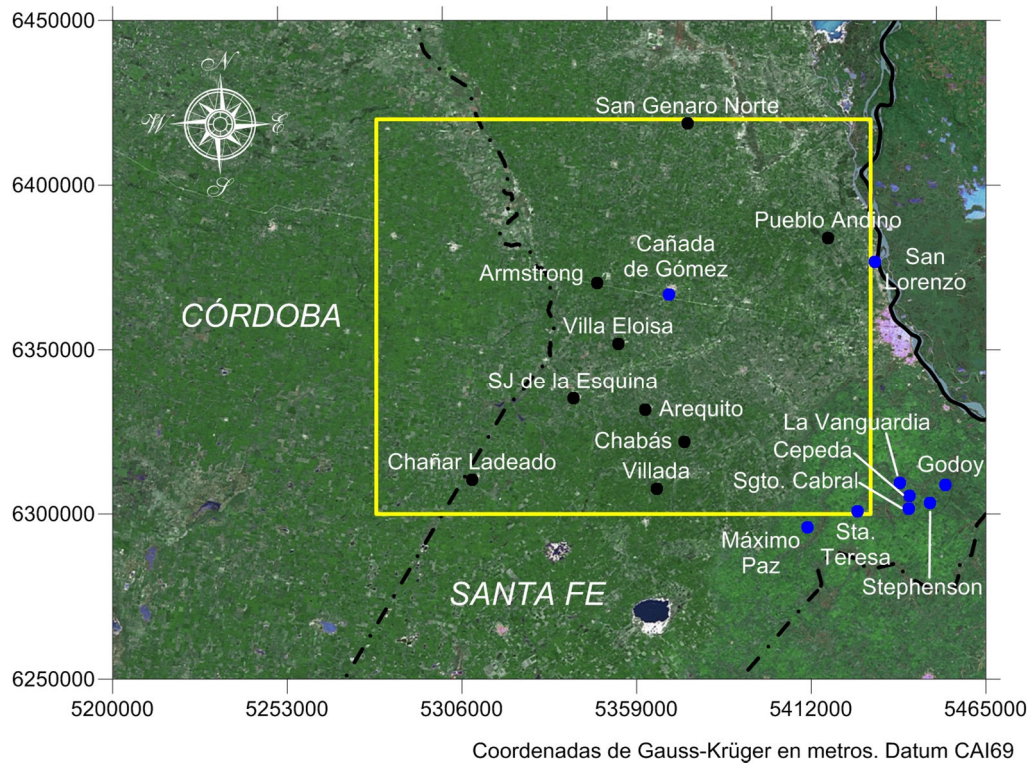


Figura 5.45 – Datos de conductividades hidráulicas. Los puntos negros corresponden a la recopilación hidrogeológica del Convenio DPOH-SPAR e INA-CRL (2002), mientras que los puntos azules corresponden a datos de trabajos de investigación.

En la Tabla 5.10 se adjuntan los valores de conductividad hidráulica k y coeficiente de almacenamiento S correspondientes a distintas localidades de la zona de estudio.

Esta recopilación no dispone de información acerca de la longitud de los filtros empleados en las perforaciones, por lo que a pesar de existir datos de transmisividades obtenidos de ensayos de bombeo efectuados en otras localidades ubicadas dentro de la zona de estudio, al no disponer de los datos de filtros no fue posible calcular la conductividad hidráulica.

Además, diversos trabajos de investigación aportaron también datos de conductividades hidráulicas, como los realizados por Filí *et al.* (1999), Mauro y Sánchez (1999), Tomás *et al.* (1999), Pérez *et al.* (2000) y Tujchneider *et al.* (2005) en localidades pertenecientes a la provincia de Santa

Fe, ver Figura 5.45. La Tabla 5.11 presenta un resumen de los valores de conductividades hidráulicas horizontales (k_h) y verticales (k_v) reportados en dichos trabajos.

Tabla 5.10 – Conductividades hidráulicas y coeficientes de almacenamiento (Fuente: Convenio DPOH-SPAR e INACRL, 2002).

Localidad	k (m/d)	S
Arequito	5,40	s/d
Armstrong	4,80	$7,26 \times 10^{-2}$
Chabás	2,65	$3,33 \times 10^{-3}$
Chañar Ladeado	3,15	$1,32 \times 10^{-3}$
Pueblo Andino	1,84	$2,81 \times 10^{-3}$
San Genaro Norte	2,16-3,09	$12,24-0,84 \times 10^{-3}$
San José de la Esquina	2,90	$1,6 \times 10^{-2}$
Villa Eloísa	4,03	$1,86 \times 10^{-3}$
Villada	12,91	$6,19 \times 10^{-3}$

s/d: sin datos disponibles

Tabla 5.11 – Conductividades hidráulicas prov. de Santa Fe por diferentes autores.

	Fuente de datos	Localidades de estudio	k_h (m/d)	k_v (m/d)
Acuífero sedimentario cuaternario (o Formación Pampeana)	Tujchneider <i>et al.</i> (2005)	Máximo Paz, Santa Teresa, Cepeda y Godoy	4	s/d
	Mauro y Sánchez (1999)	San Lorenzo	5	1
	Pérez <i>et al.</i> (2000)	Cañada de Gómez	2	s/d
Acuitardo semiconfinante	Tomás <i>et al.</i> (1999)	Santa Teresa, Cepeda, Sargento Cabral, Stephenson, Godoy y La Vanguardia	s/d	0,006 a 0,202
	Tujchneider <i>et al.</i> (2005)	San Francisco, Rafaela, Esperanza, Recreo	0,005	0,005
	Mauro y Sánchez (1999)	San Lorenzo	1	0,2
Acuífero arenas “Puelches” y de la Fm Paraná	Tujchneider <i>et al.</i> (2005)	Máximo Paz, Santa Teresa, Cepeda y Godoy	17,5 a 27	s/d
	Tomás <i>et al.</i> (1999)	Santa Teresa, Cepeda, Sargento Cabral, Stephenson, Godoy y La Vanguardia	11,7 a 41,4	s/d
	Mauro y Sánchez (1999)	San Lorenzo	22	7

s/d: sin datos

Además, en base a datos de perforaciones con descripción confiable, Filí y Tujchneider (1977) expresan que en el paquete loésico cuaternario pueden encontrarse valores de conductividades hidráulicas entre 1 y 10 m/d.

Auge (2004b) brinda valores de conductividades hidráulicas verticales según la granulometría del sedimento, tomando para limos y limos arcillosos valores de 0,001 a 0,01 m/d y para arcillas y arcillas limosas valores menores a 0,001 m/d.

Tomás *et al.* (1999), en estudios llevados a cabo en el sur de la provincia de Santa Fe (departamento Constitución), determinaron para el acuitardo valores de transmisividad vertical (lo que sería el coeficiente de goteo o conductancia hidráulica del acuitardo) que se encuentran entre 1×10^{-3} y $6,1 \times 10^{-2}$ 1/d, con un valor de 4×10^{-3} 1/d como el que representa con mayor grado de veracidad los parámetros formacionales del acuitardo, mientras que Tujchneider *et al.* (2005) brindan para éste valores de transmisividad vertical entre 6×10^{-4} y 6×10^{-2} 1/d en un sector del SE de la provincia de Santa Fe. Sobre la determinación de la transmisividad vertical del acuitardo, Auge (2004b) aclara que no es fácil de determinar, y que los valores a través de ensayos hidráulicos pueden resultar mucho más altos que los reales.

Para la provincia de Córdoba se reportan conductividades hidráulicas para los sedimentos cuaternarios entre 10^{-2} y 10 m/d, en donde los valores más bajos suelen asociarse con potencias muy importantes de sedimentos, a veces de varias decenas de metros (Blarasin *et al.*, 2000).

5.3. DESCRIPCIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL DE FUNCIONAMIENTO

Con respecto a la litoestratigrafía del área de estudio se reconocieron cuatro unidades o asociaciones litológicas principales, las cuales fueron descritas detalladamente en el apartado 5.2.3 “Análisis estratigráfico”. La unidad 1 (unidad superior) se la asocia a la Fm Tezanos Pinto (Iriondo, 1987; Kröhling 1999a; Carignano, 1999), y está conformada por un limo eólico arcilloso y poco arenoso, con excepción del SO de la cuenca en Santa Fe, donde el contenido de arena aumenta. En la provincia de Córdoba la constituye un limo fino eólico arenoso con presencia de arenas finas de origen aluvial. La unidad 2 subyace la anterior y corresponde a una arena eólica muy fina limosa, algo arcillosa y permeable (Fm Carcarañá, Kröhling, 1999a) y a unidades loésicas que completan la columna. La unidad 3, de edad cuaternaria, está constituida en la zona de estudio por arcillas algo plásticas, algunas veces con contenido de limo o arena, con excepción de la unidad limo-arcillosa palustre encontrada en el Bloque de San Guillermo (Kröhling e Iriondo, 2003). Subyaciendo ésta se encuentra la unidad 4 conformada por arena cuarzosa fina bien seleccionada, de color amarillo claro, en estratos medianos y gruesos (Iriondo, 2011) correspondiente a las arenas “Puelches” de origen fluvial, arena cuarzosa muy fina a fina, amarillo pálido y moderadamente seleccionada asociadas a la facies de playa de la Formación Paraná de

origen marino (Kröhling e Iriondo, 2003), y las que constituyen los depósitos de abanicos aluviales de ríos procedentes de las sierras de Córdoba (Kröhling e Iriondo, 2003). Las cuatro unidades descritas sobreyacen a las arcillas de la Fm Paraná.

Teniendo en cuenta la dinámica hídrica subterránea del sistema acuífero en estudio, las unidades 1 y 2 alojan el acuífero libre, el cual presenta una dirección de escurrimiento regional aproximada de oeste a este, en correspondencia con la geomorfología de la zona y hacia el río Paraná. Dicho acuífero recibe en forma directa la recarga debida a las precipitaciones, dándose las mayores magnitudes en las zonas topográficamente más altas. La descarga del acuífero libre se da, principalmente, en el valle del río Paraná y en los cursos de agua superficiales desarrollados en estas dos unidades los cuales tienen, prácticamente, un comportamiento efluente respecto al acuífero libre.

En las arenas de la unidad 4 se encuentran, fundamentalmente, el acuífero Puelche (de origen fluvial), y el de la Formación Paraná (de origen marino). Teniendo en cuenta la escasa información precisa a nivel hidrogeológico en la región, fue imposible demarcar con suficiente precisión los dominios tanto areales como en profundidad de las arenas involucradas en cada uno de los dos acuíferos, lo que hizo que se agruparan en esta cuarta unidad. El escurrimiento subterráneo es, como el del acuífero libre, hacia el valle del río Paraná donde se produce la descarga.

El acuífero libre está conectado hidráulicamente con los de las arenas a través de la unidad 3, la cual, desde un punto de vista hidrogeológico responde como un acuitardo y confiere a los acuíferos inferiores Puelche y de la Formación Paraná el carácter de semiconfinados. El flujo a través del acuitardo es fundamentalmente vertical descendente, siendo el acuífero libre el que recarga a los inferiores, pero pudiendo el flujo ser también de sentido ascendente en las zonas de descarga (Auge, 2004b; Auge *et al.*, 2002).

Las arcillas de la Fm Paraná constituyen el basamento del modelo, considerado para la etapa de conceptualización como impermeable.

Diversas localidades ubicadas en la zona de estudio tienen sus pozos de extracción para la provisión de agua para consumo ubicados en los acuíferos citados anteriormente, por lo que el

funcionamiento de esas perforaciones se considera como descargas por extracción para el modelo.

En la Figura 5.46 puede observarse un diagrama de bloque que representa el modelo conceptual de funcionamiento del sistema acuífero heterogéneo, anisótropo y constituido por 4 unidades, detallado anteriormente.

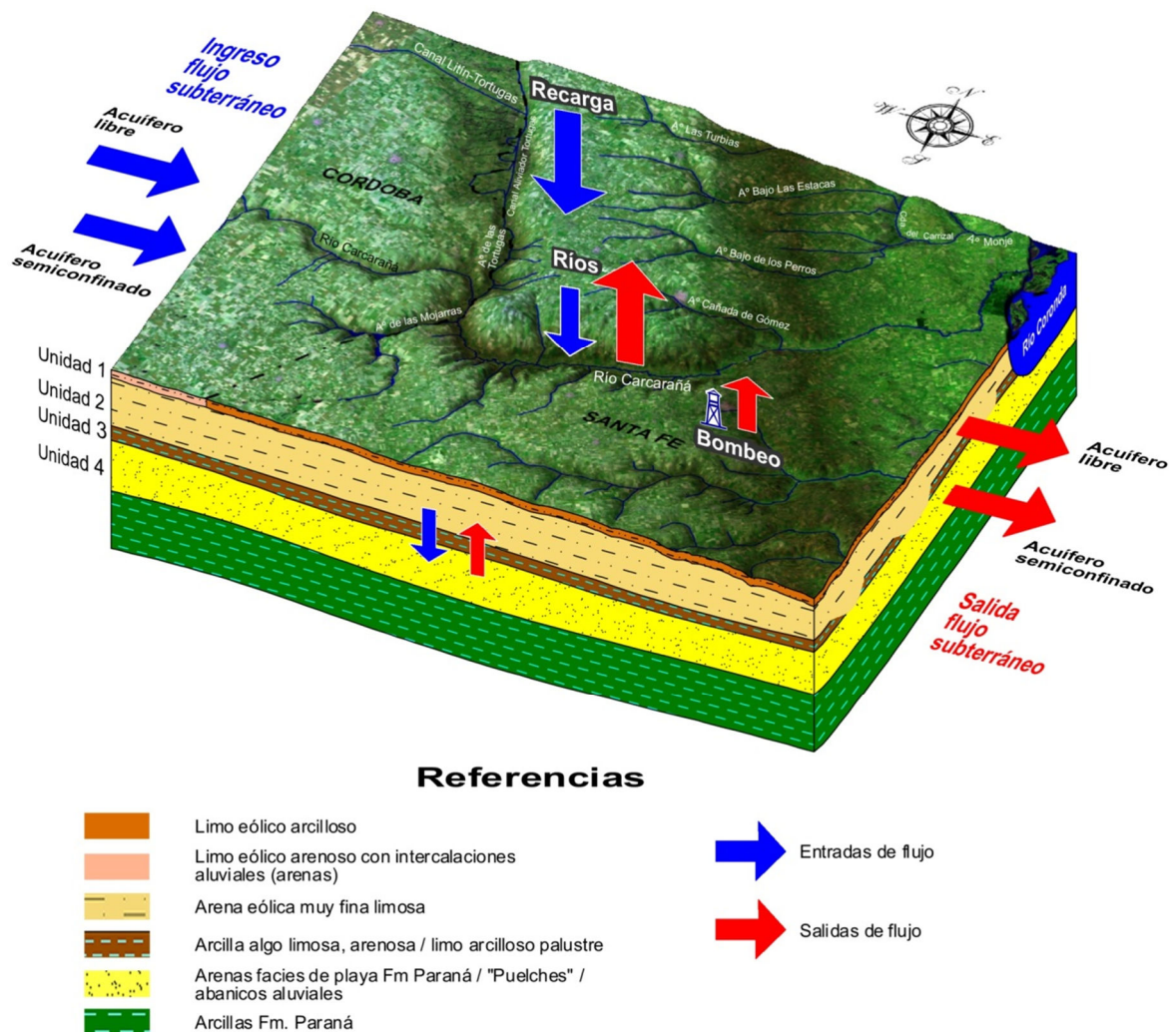


Figura 5.46 – Esquema del Modelo Conceptual de funcionamiento del sistema acuífero.

6. MODELO NUMÉRICO

En este capítulo se valida el modelo conceptual de funcionamiento del sistema acuífero mediante la modelación numérica. Cuanto más sólido sea el modelo conceptual, los resultados que se obtengan del proceso de simulación serán mucho más confiables.

Para lograr el modelo numérico fue necesario seguir una serie de pasos, a saber:

- Implementar la estructura del modelo: para ello se definió el dominio del mismo, tipo de acuífero y su discretización espacial, se precisaron las condiciones de contorno (límites, cursos de agua), fuentes y sumideros (zonas de recarga, pozos de extracción por bombeo), y se zonificaron los distintos parámetros hidráulicos.
- Definir la estrategia de calibración a seguir en el proceso de simulación.
- Analizar los resultados de la simulación para evaluar la bondad del ajuste, como ser freaticimetrías, piezometrías, parámetros calibrados, residuos, flujos y balances de masas.
- Efectuar un análisis de sensibilidad del modelo para saber la respuesta del mismo ante la incertidumbre de parámetros que condicionan o controlan la dinámica del flujo subterráneo.

El desarrollo de los pasos enunciados se presenta a continuación.

6.1. ESTRUCTURA DEL MODELO NUMÉRICO

6.1.1. Dominio del modelo y discretización espacial

El área de estudio está delimitada por las coordenadas $X=6.300.000$ m al sur, $X=6.420.000$ m al norte, $Y=5.280.000$ m al oeste y $Y=5.430.000$ m al este según el sistema cartográfico argentino Gauss-Krüger Faja 5 Datum CAI69, totalizando una superficie de 18.000 km^2 . Éste área incluye a la zona de modelación propiamente dicha, la cual quedará delimitada por las condiciones de contorno externas o perimetrales.

Se adoptó una discretización en planta utilizando celdas cuadradas de 500 m de lado, quedando conformada una grilla rectangular de 240 filas y 300 columnas.

En la Figura 6.1 puede observarse dicha grilla, teniendo como fondo una imagen satelital del área de estudio.



Figura 6.1 – Discretización en planta del área de estudio.

En profundidad, el sistema acuífero se consideró en primera instancia conformado por cuatro capas, de acuerdo a la estratigrafía obtenida a partir de los antecedentes en la zona de estudio (Figura 6.2). El límite superior corresponde a la superficie topográfica mientras que el techo de las arcillas de la Fm Paraná constituye la base del modelo numérico, considerada como superficie impermeable o de no flujo. En la Figura 6.3 se muestran dos perfiles transversales del modelo con direcciones norte-sur y este-oeste, pasantes por la localidad santafesina de Villa Eloísa.

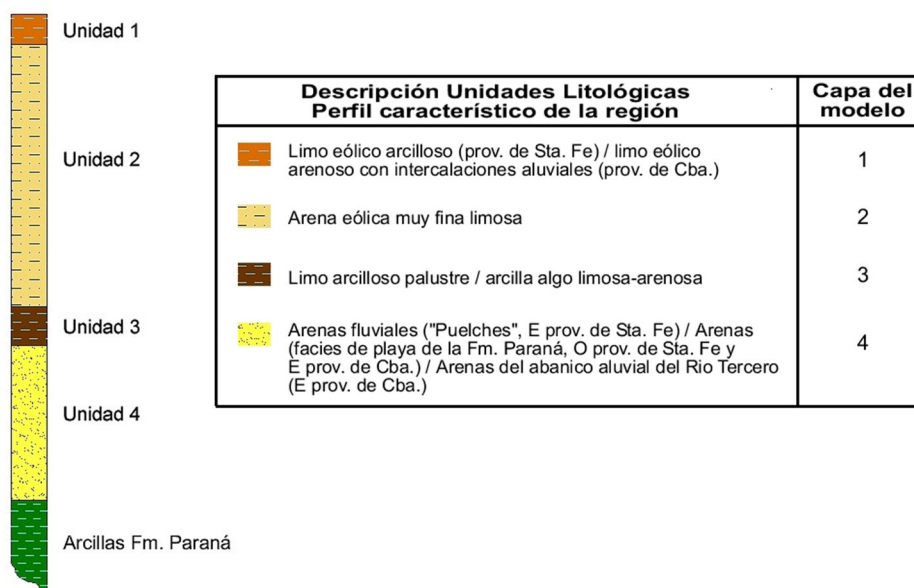


Figura 6.2 – Asignación de capas a las unidades litológicas.

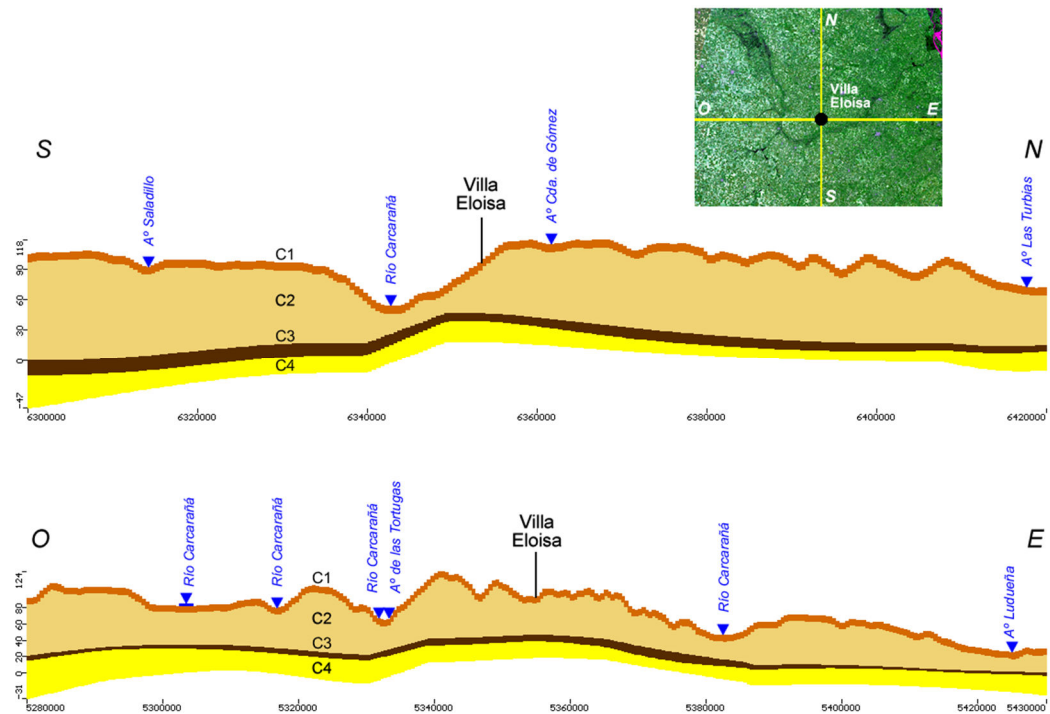


Figura 6.3 – Perfiles transversales del modelo pasantes por Villa Eloísa (prov. de Santa Fe).

La Figura 6.4 muestra la extensión de la zona no saturada o la profundidad de la superficie freática, obtenida al restar los archivos de extensión .grd correspondientes al MDE y a la superficie freática. Ésta se encuentra más profunda en las zonas topográficas más altas mientras que en las zonas más bajas se localiza más próxima a la superficie. Mientras las zonas en color celeste indican que la superficie freática se encuentra en la capa 1 (espesor 7 m), en tonos de verde se destacan aquellas que están por debajo de aquella. En color azul la superficie freática adquiere posiciones por sobre la superficie topográfica. Esta particularidad puede tener varios motivos: la superficie freática se ubica en sectores de bajos, lagunas y zonas anegadizas; diferencias entre las cotas reales topográficas y las que brinda el MDE respecto a las obtenidas para la superficie del acuífero libre, y a errores de interpolación, principalmente en los puntos situados en los límites de la zona de estudio. Vale destacar que las zonas azules representan apenas el 0,53% de la superficie total del área de estudio.

Es decir, la superficie freática se encuentra ubicada en la capa superior y el resto en la capa situada inmediatamente por debajo (capas 1 y 2, respectivamente). Si bien el software Visual MODFLOW contempla este caso, la presencia de situaciones de secado y rehumedecimiento de celdas complican la solución numérica; por ello es recomendable que la superficie del acuífero libre esté completamente contenida en una sola capa. Por lo tanto una solución al problema fue adoptar un modelo numérico tricapa unificando las capas 1 y 2 del modelo inicialmente

presentado, y trabajar con una conductividad hidráulica equivalente (ponderados en profundidad) en las zonas celestes y con el correspondiente a la capa 2 para las zonas de tonalidades verdosas.

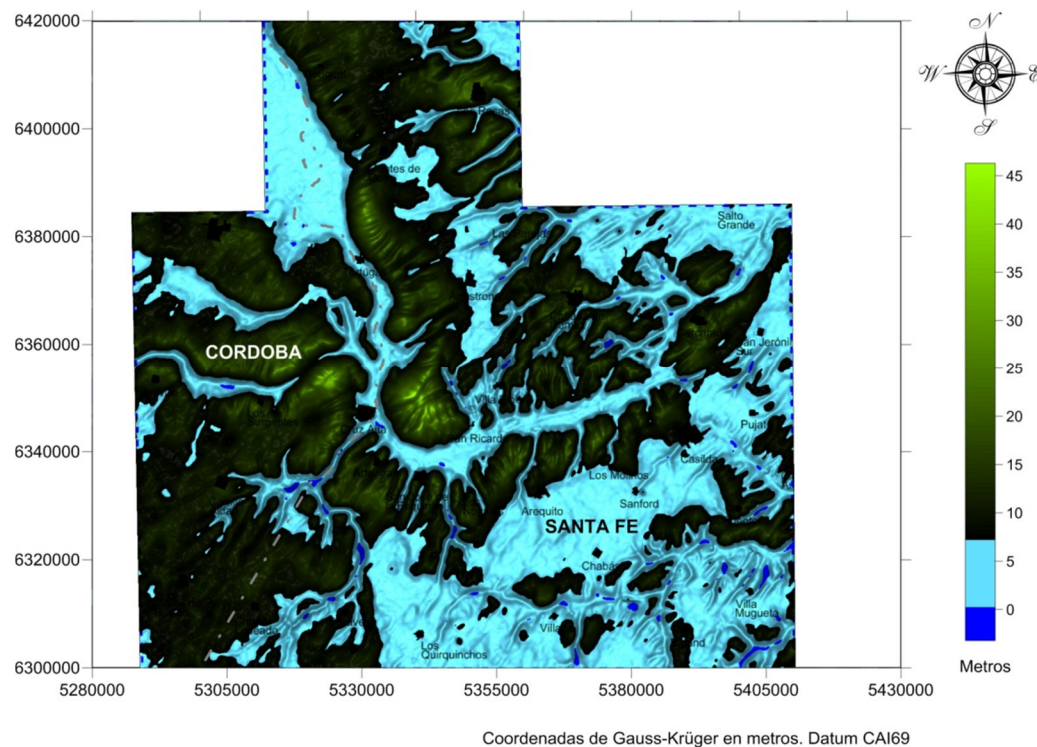


Figura 6.4 – Profundidad de la superficie freática respecto a la topográfica. El nivel freático en los sectores en color azul está por encima de la superficie del terreno, en celeste está en la capa superior y en verde cuando está en capas más profundas.

Entonces, en el modelo tricapa propuesto, la capa 1 (capa superior) constituye el paquete eólico cuaternario (con intercalaciones palustres) albergando al acuífero libre (más arenoso en la provincia de Córdoba), y la capa 3 (la más inferior) comprende a las arenas que alojan, principalmente, el acuífero Puelche y la Fm Paraná. Entre ambas capas se ubica la capa 2 (formada por limos arcillosos palustres y arcillas algo limosas) que corresponde al acuitardo y que controla la conexión hidráulica entre los acuíferos.

Cada una de las superficies que conforman el nivel del terreno y los pisos de cada capa corresponde a un archivo de extensión .grd que fue generado en el estudio llevado a cabo en el apartado 5.2.3 “Análisis estratigráfico”. Estos archivos fueron importados en el Visual MODFLOW para el armado tridimensional del sistema acuífero.

Para reducir probables problemas de convergencia durante las etapas de calibración, todas las celdas debe estar en contacto geométrico con todas las celdas adyacentes pertenecientes a la misma capa (SEA, 2012). Para garantizar este requisito fue necesario desarrollar un programa en lenguaje Fortran (Adams *et al.*, 1992; Chivers y Sleightholme, 2006), el cual compara las cotas de

techo y piso entre una celda genérica y sus adyacentes, modificando luego las cotas de piso hasta lograr suficiente contacto. El programa se ejecutó por capas.

Respecto a los límites de la zona de modelación, en la Figura 6.5 se presentan los límites teniendo como base el MDE confeccionado para el área de estudio. Los límites de la zona de modelación involucran el 82% de la zona de estudio, y donde cada una de las capas tiene 59.305 celdas activas y 12.695 inactivas.

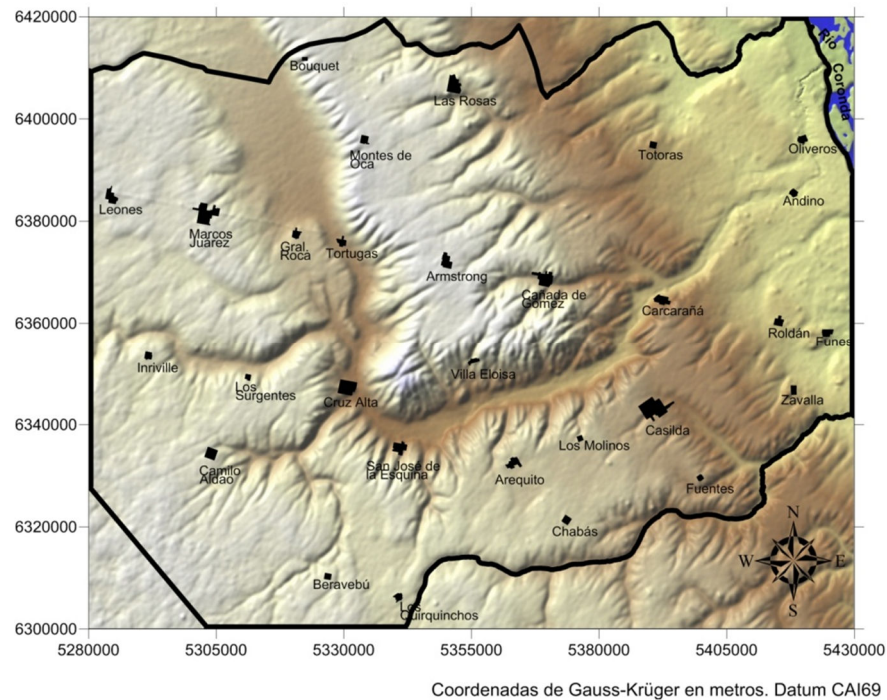


Figura 6.5 – Límites de la zona de modelación superpuestos al MDE. Se muestran, además, diversas localidades situadas en dicha zona.

6.1.2. Condiciones de contorno

6.1.2.1. Límites de la zona de modelación

Las condiciones de contorno en los límites de la zona del modelo fueron las siguientes:

- ❖ *Capa 1: acuífero libre (Figura 6.6)*
- Tramos AB y BC: flujo nulo
- Tramo CD: tipo río (A° Monje y cañada del Carrizal)
- Tramo DE: tipo río (A° Bajo Las Estacas)
- Tramo EF: carga hidráulica constante (o nivel fijo)

- Tramo FG: tipo río (A° Las Turbias)
- Tramo GH: flujo nulo
- Tramo HI: tipo río (Canal Litín Tortugas)
- Tramo IJKL: para este tramo se partió de considerar inicialmente una condición de contorno de carga hidráulica constante, para luego implementar una condición de carga hidráulica general asociada al caudal obtenido con la condición inicial.
- Tramo LM: tipo río (A° Saladillo)
- Tramo MA: carga hidráulica constante (o nivel fijo)

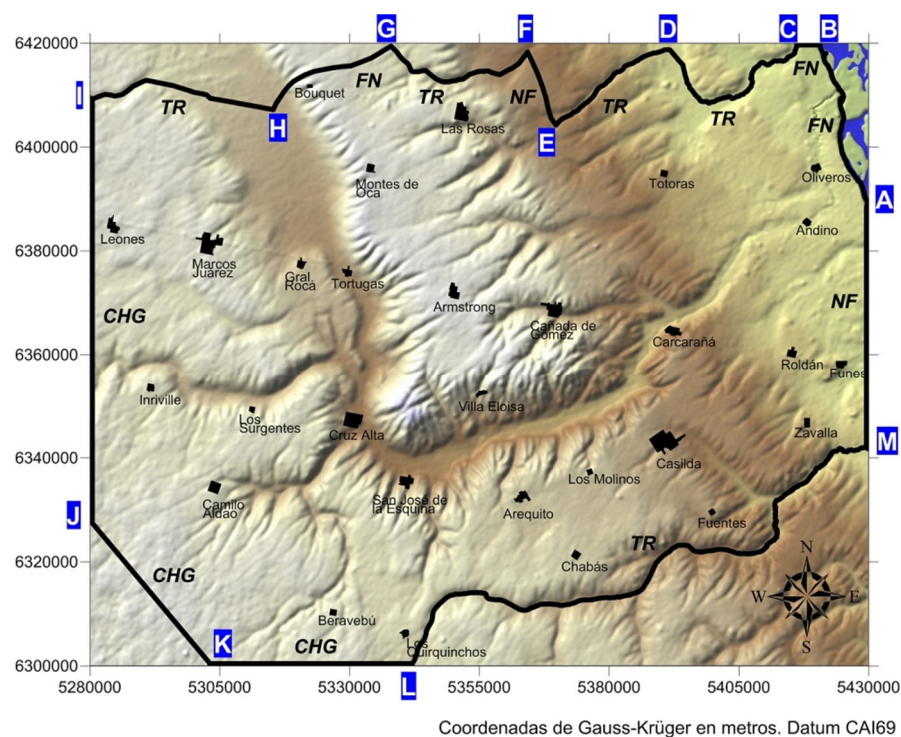


Figura 6.6 – Condiciones de contorno en los límites de la zona de modelación para la Capa 1 (NF: nivel fijo, FN: flujo nulo, CHG: carga hidráulica general, TR: tipo río).

❖ *Capa 2: acuitardo*

En esta capa se consideró una condición de contorno de flujo nulo en todo el límite de la zona de modelación.

❖ *Capa 3: acuífero semiconfinado (Figura 6.7)*

- Tramo AB: tipo río (río Coronda). Físicamente, este río está en contacto con las 3 capas.
- Tramo BE: flujo nulo

- Tramo EF: carga hidráulica constante (o nivel fijo)
- Tramo FI: flujo nulo
- Tramo IJKL: se partió inicialmente de considerar una condición de contorno de carga hidráulica constante, para luego implementar una condición de carga hidráulica general asociada al caudal obtenido con la condición inicial.
- Tramo LM: flujo nulo
- Tramo MA: carga hidráulica constante (o nivel fijo)

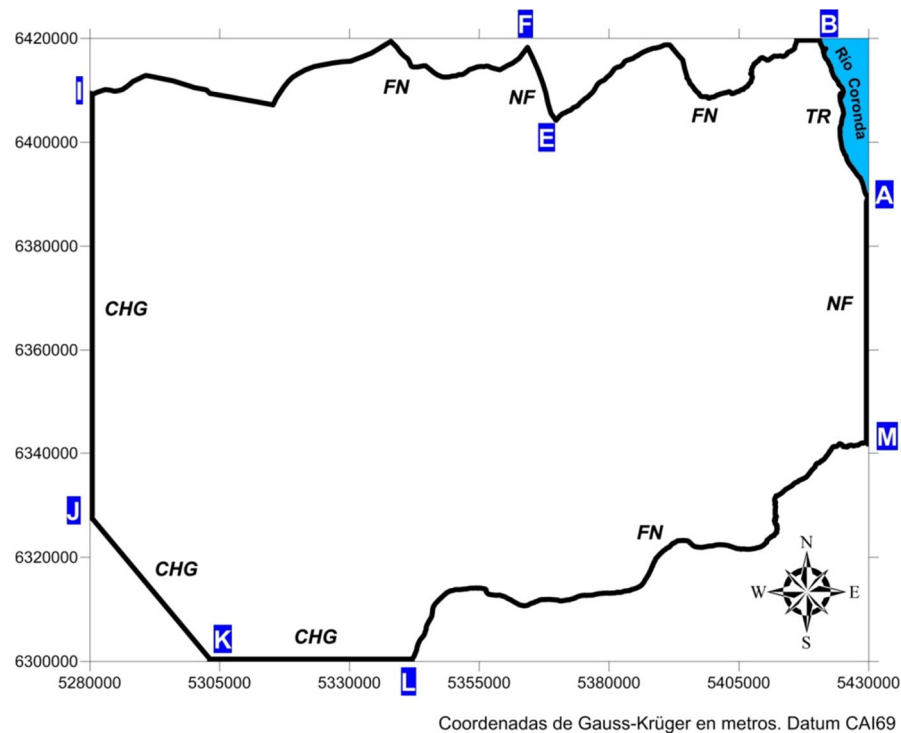


Figura 6.7 – Subdivisión en tramos para la definición de las condiciones de contorno en los límites de la zona de modelación para la Capa 3 (NF: nivel fijo, FN: flujo nulo, CHG: carga hidráulica general, TR: tipo río).

Para materializar en el modelo numérico las condiciones de contorno de carga hidráulica constante (o nivel fijo), tipo río y de carga hidráulica general se emplearon, respectivamente, los módulos Constant Head (CHD), River (RIV) y General Head Boundary (GHB) que forman parte del paquete Visual MODFLOW.

6.1.2.2. Cursos de agua

La zona de estudio tiene una gran cantidad de cuerpos de agua superficiales (ríos, arroyos, bajos, etc.). Mientras algunos de ellos forman parte de las condiciones de contorno que definen los límites de la zona de modelación, el resto constituyen condiciones de contorno interiores. Salvo el

río Coronda, que en profundidad está en contacto con las tres capas del modelo, el resto se encuentran en la capa 1.

En el modelo se empleó el módulo River (RIV) del Visual MODFLOW. Cada curso se dividió en diversos tramos que se vectorizaron sobre un mapa base de la red de drenaje oportunamente confeccionada. Para cada uno de los tramos definidos, se ingresaron la cota del pelo de agua y la cota de fondo con una variación lineal decreciente hacia aguas abajo, además del ingreso del parámetro de conductancia C que el programa calcula mediante la Ecuación (6.1).

$$C = \frac{K \times L \times W}{M} \quad (6.1)$$

donde:	C	conductancia (m^2/d)
	K	conductividad hidráulica vertical del material del lecho (m/d)
	L	longitud del curso en la celda (m)
	W	ancho del curso en la celda (m)
	M	espesor del material del lecho del río (m)

El módulo RIV asocia estas variables a cada una de las celdas que conforman la traza del curso de agua en cuestión a través del parámetro que define como conductancia.

Los parámetros empleados para las condiciones de River se describen a continuación.

- Las cotas de pelo de agua se adoptaron de la superficie freática sobre la traza de los cursos. Cada curso quedó dividido, entonces, en “ n ” tramos entre curvas isofreáticas, teniendo para cada tramo una cota de pelo de agua en cada extremo del mismo, una agua arriba y otra agua abajo.
- De varios de los cursos de agua presentes, se contó con información de diversos proyectos de canalización y estudios hidráulicos para construcciones de puentes, entre otros, realizados por el MASPyMA y reparticiones anteriores (MASPyMA, 1936-2011), como así de otros ministerios y reparticiones previas a ésta, e información bibliográfica (Soldano, 1947; Pasotti y Albert, 1995), obteniendo datos de cotas y pendientes del fondo del lecho y de secciones transversales de los cursos.

- Como los datos del pelo de agua y del fondo provienen de distintas fuentes, para compatibilizar la información (solo en el río Carcarañá), se comprobó por medio de un programa simple redactado en lenguaje Fortran el perfil longitudinal adoptado para dicho curso, a través del cálculo de tirantes de agua suponiendo flujo uniforme y condiciones de aguas medias.
- Para el resto de los cursos (de menor jerarquía que el río Carcarañá) se disponían para varios de ellos de perfiles longitudinales, por lo que directamente se consideraron “n” tramos de cotas de fondo promedio y tirante constante, teniendo en cuenta cuando los proyectos indicaban cambios en las medidas de la sección transversal.
- Los valores de la conductividad hidráulica del lecho de los cursos de agua se adoptaron en función de los sedimentos que conforman los mismos y en los cursos de mayor recorrido se consideró una disminución de las conductividades hidráulicas hacia aguas abajo, y que origina una mayor impermeabilización del lecho.

En la Figura 6.8 se observan los cursos de agua implementados en el modelo, mientras que la Figura 6.9 muestra el perfil longitudinal obtenido del río Carcarañá, curso principal de la zona de estudio.

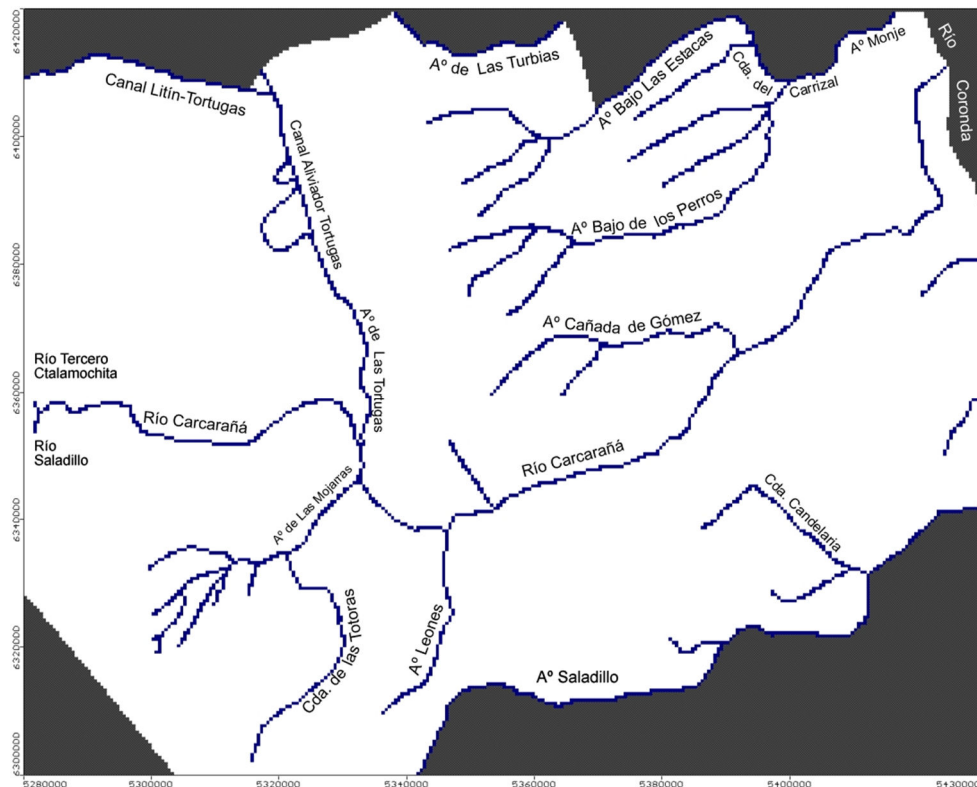


Figura 6.8 – Cursos de agua implementados en el modelo.

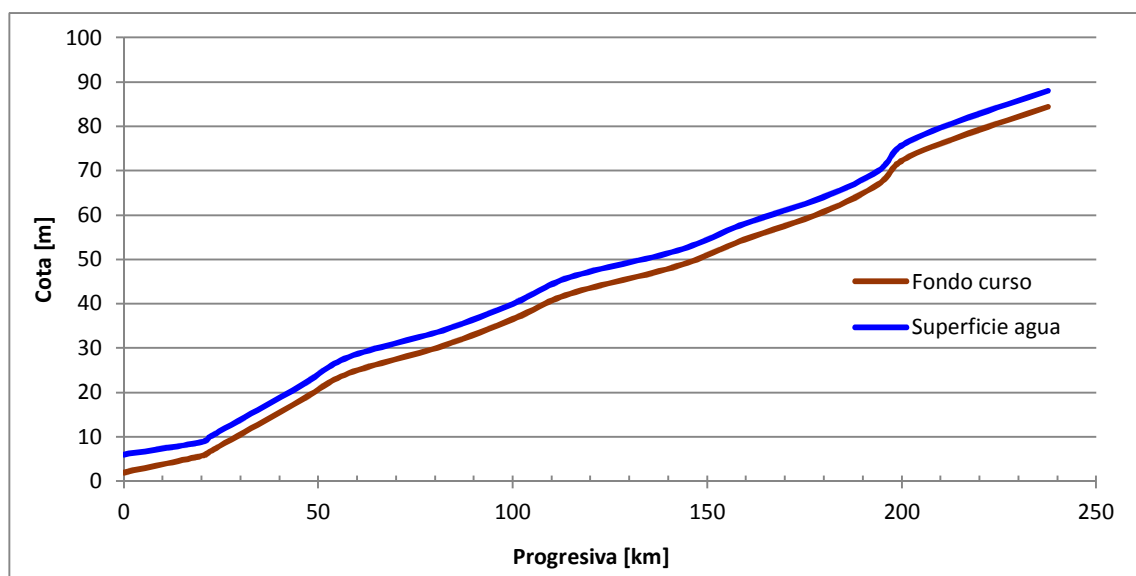


Figura 6.9 – Perfil longitudinal obtenido del río Carcarañá.

En la Tabla 6.1 se presenta un resumen de las variables hidráulicas y geométricas asociadas a cada uno de los cursos considerados.

Tabla 6.1 – Variables hidráulicas y geométricas consideradas para los cursos de agua. (K) conductividad hidráulica vertical del material del lecho, (W) ancho del curso en la celda, (M) espesor del material del lecho del río y (C_{500}) Conductancia.

Curso	K (m/d)	W (m)	M (m)	C_{500} (m ² /d)
A° Bajo de los Perros	0,010	4	0,1	200
A° Bajo del Árbol	0,010	2	0,1	100
A° Bajo del Chupino	0,010	7	0,1	350
A° Bajo Las Estacas	0,010	7	0,1	350
A° Bajo Los Leones	0,010	2	0,1	100
A° Cañada de Gómez	0,010	20	0,2	500
	0,010	16	0,2	400
	0,010	10	0,2	250
	0,015	9	0,2	338
	0,015	4	0,1	300
	0,015	3	0,1	225
	0,015	2	0,1	150
A° de las Mojaras	0,010	6	0,1	300
	0,020	6	0,1	600
A° de las Tortugas	0,050	20	0,2	2500
A° de Las Turbias	0,010	6	0,1	300
	0,010	3	0,1	150
A° del Arbolito	0,010	3	0,1	150
A° Leones	0,010	5	0,1	250
A° Ludueña	0,010	10	0,1	500

Tabla 6.1 – Variables hidráulicas y geométricas consideradas para los cursos de agua. (K) conductividad hidráulica vertical del material del lecho, (W) ancho del curso en la celda, (M) espesor del material del lecho del río y (C_{500}) Conductancia (Cont.).

Curso	K (m/d)	W (m)	M (m)	C_{500} (m ² /d)
A° Monje	0,010	15	0,1	750
A° Saladillo	0,010	15	0,1	750
	0,020	15	0,1	1500
A° San Lorenzo	0,010	500	0,1	500
Bajo de Los Leones	0,010	2	0,1	100
Bajo del Chupino	0,010	1	0,1	50
Canal Aliviador Tortugas	0,050	20	0,2	2500
Canal Las Parejas	0,010	2	0,1	100
Canal Litín-Tortugas	0,020	15	0,1	1500
Canal Sec. Los Chancheros	0,015	20	0,1	1500
Cda. Candelaria	0,010	4	0,1	200
Cda. de las Totoras	0,010	4	0,1	200
Cda. del Carrizal	0,010	15	0,1	750
Río Carcarañá	0,050	55	0,2	6875
	0,100	55	0,2	13750
	0,200	55	0,2	27500
Río Coronda	1,000	350	0,3	583333
Río Saladillo	0,200	50	0,2	25000
Río Tercero-Ctalamochita	0,200	50	0,2	25000

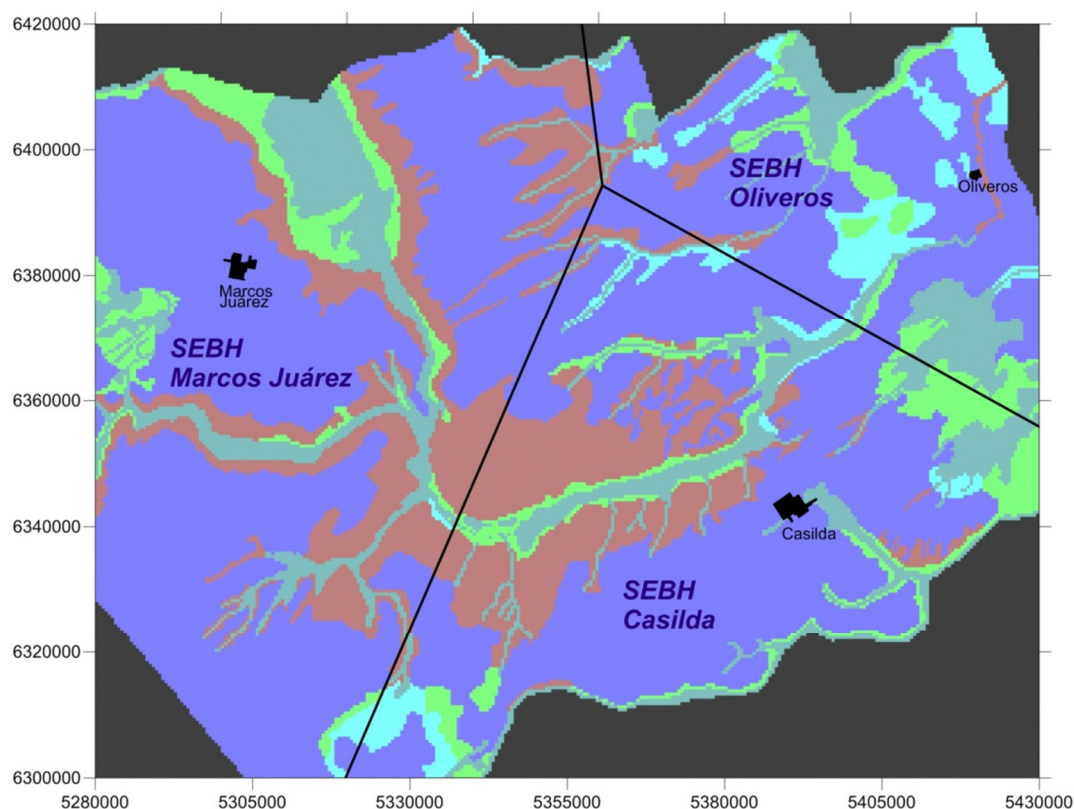
En el proceso de vectorización de los cursos de agua, la longitud L en cada celda adquirió diversos valores, pero en alguna celda al menos tomó valores cercanos al ancho o largo de la misma (500 m). A los efectos de hacer una comparación de valores de conductancia C entre los cursos, se consideró el cálculo de la conductancia C_{500} obtenida para una longitud L=500 m.

6.1.3. Fuentes y sumideros

6.1.3.1. Zonas de recarga

En la Figura 5.38 se muestran las cinco zonas de recarga definidas en la zona de estudio, las que a su vez se subdividieron en tres sectores (SEBH) que se asocian a las estaciones climáticas de las localidades de Oliveros, Casilda y Marcos Juárez. La demarcación de estas zonas en el Visual MODFLOW puede observarse en la Figura 6.10 junto con los valores de recarga asociados a cada una de las zonas y sectores.

Es importante destacar que las recargas se aplican en la primer capa del modelo.



Referencias

	<u>SEBH Oliveros</u>	<u>SEBH Casilda</u>	<u>SEBH Marcos Juárez</u>
Zona 1	 153,5 mm/año	 71,6 mm/año	 46,7 mm/año
Zona 2	 130,3 mm/año	 58,9 mm/año	 42,1 mm/año
Zona 3	 117,1 mm/año	 53,7 mm/año	 38,2 mm/año
Zona 4	 87,2 mm/año	 31,0 mm/año	 17,0 mm/año
Zona 5	 54,6 mm/año	 20,3 mm/año	 5,1 mm/año

Figura 6.10 – Zonas de recarga y valores estimados para la calibración.

6.1.3.2. Pozos de bombeo

Los pozos definidos en el modelo corresponden a los que se emplean para satisfacer la demanda de las cuatro localidades más pobladas de la zona de modelación. Esto se efectuó en función de algunos datos recopilados, como ser cantidad de pozos relevados, caudales mensuales extraídos, y horas de funcionamiento diario de las bombas. En algunos casos, fue necesario adoptar el criterio de obtener el caudal diario de bombeo en función de la población obtenida de los datos censales y de una dotación estimada por habitante de 350 lts/hab/d.

Esta elección se basó en los datos de Censos de Población llevados a cabo en nuestro país entre los años 1960 y 1970 realizados por la Dirección Nacional de Estadística y Censos (DNEC, s.f.) y

el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INDEC, s.f.). Finalmente se seleccionaron las localidades de Cañada de Gómez, Casilda, Carcarañá y Las Rosas.

Para la localidad de Cañada de Gómez se contó con datos de los 21 pozos en actividad, por lo que se incorporaron de manera individual en el modelo. Para el resto de las localidades, cuando no fue posible recabar datos suficientes, se confeccionó un único pozo ficticio en cada una de ellas.

En el Visual MODFLOW la incorporación de pozos de bombeo se realizó mediante la importación de un archivo .xls en el que figuraron los nombres de pozos, sus ubicaciones en planta, el posicionamiento en profundidad del o los filtros (si hubieron más de uno) y los caudales de bombeo. En la Figura 6.11 se observan los pozos correspondientes a la localidad de Cañada de Gómez una vez importado el archivo citado anteriormente, mientras que la Tabla 6.2 muestra los datos necesarios de cada pozo para la confección del archivo de importación.

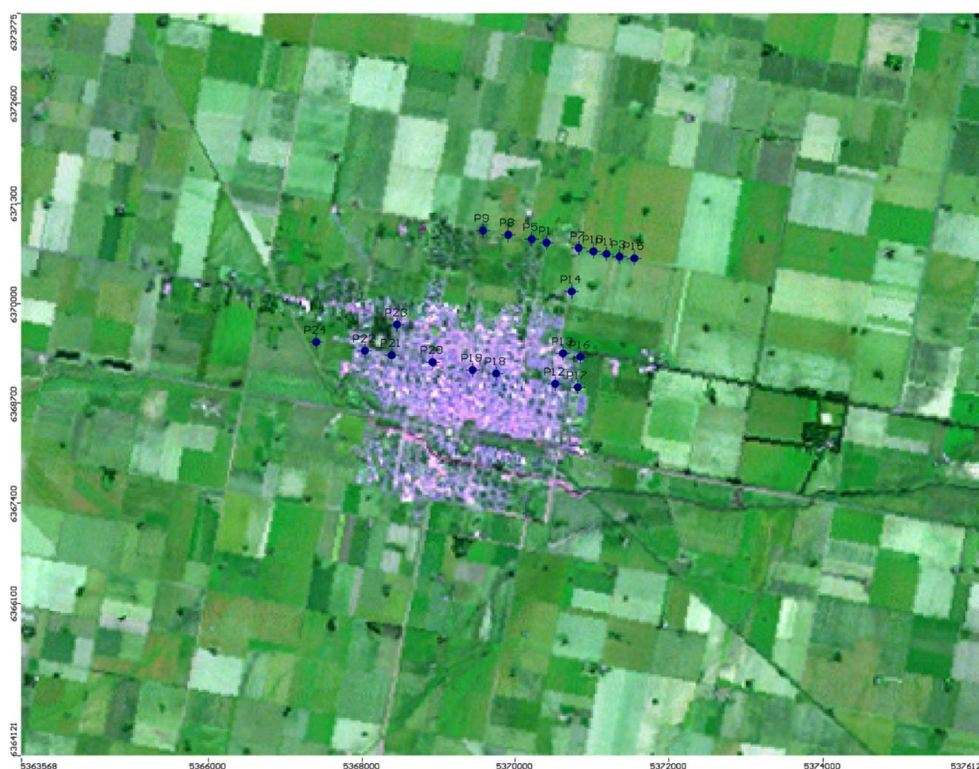


Figura 6.11 – Pozos de bombeo en Cañada de Gómez.

Tabla 6.2 – Información de los pozos de bombeo (año 1966).

Nombre del pozo	Coordenadas GKf5_CAI69		Filtros				Caudal de bombeo (m³/d)
			ID	Cota superior (m)	Cota inferior (m)	Capa de ubicación	
Y (m)	X (m)						
P1	5370405	6370797	1	78,0	49,5	1	-379
P3	5371347	6370617	1	75,5	52,0	1	-240
P5	5370214	6370838	1	73,5	49,5	1	-186
P7	5370816	6370726	1	75,9	50,8	1	-280
P8	5369907	6370893	1	77,1	52,1	1	-169
P9	5369575	6370951	1	78,0	52,5	1	-259
P10	5371016	6370683	1	76,6	54,2	1	-273
P11	5371183	6370655	1	76,1	53,7	1	-233
P12	5370520	6368962	1	66,0	43,0	1	-322
P13	5370613	6369360	1	66,0	45,0	1	-247
P14	5370733	6370168	1	67,0	48,0	1	-215
P15	5371545	6370591	1	70,0	50,6	1	-218
P16	5370838	6369315	1	72,2	43,0	1	-115
P17	5370805	6368917	1	70,0	40,7	1	-305
P18	5369748	6369096	1	61,4	42,2	1	-444
P19	5369444	6369150	1	61,9	42,9	1	-544
P20	5368923	6369243	1	59,3	44,0	1	-528
P21	5368395	6369337	1	68,5	44,0	1	-485
P22	5368039	6369390	1	66,1	46,5	1	-355
P23	5368462	6369734	1	66,6	46,9	1	-605
P24	5367406	6369506	1	54,7	39,3	1	-119
P_Cas	5390574	6345277	1	25	12	1	-10000
P_Cas	5390574	6345277	2	0	-14	3	-10000
P_LR	5351510	6406510	1	71	57	1	-3122
P_Carc	5392365	6364700	1	35	23	1	-2671

Debido a la falta de datos, no se consideraron reducciones del caudal de bombeo por pérdidas en las cañerías de distribución de agua y cloacas, como así también la incidencia de los pozos absorbentes presentes en la zona de modelación.

6.1.4. Parámetros hidráulicos y zonificación

Para la capa 1 o superior del modelo tricapa planteado para el estudio, se presentaba en el apartado 6.1.1 “Dominio del modelo y discretización espacial” la necesidad de calcular para determinadas zonas de dicha capa una conductividad hidráulica equivalente ponderado en profundidad (zonas celestes de la Figura 6.4). Para ello fue necesario analizar la variación en el área de estudio del espesor de la capa 2 del modelo numérico inicial de cuatro capas, y cuyos resultados se muestran en la Figura 6.12. En esta figura se observa que aproximadamente un 95% del área de estudio presenta espesores de la capa 2 mayores a 15 m, y casi el 85% espesores superiores a los 30 m, llegando a sobrepasar los 100 m, aproximadamente, en algunos sectores.

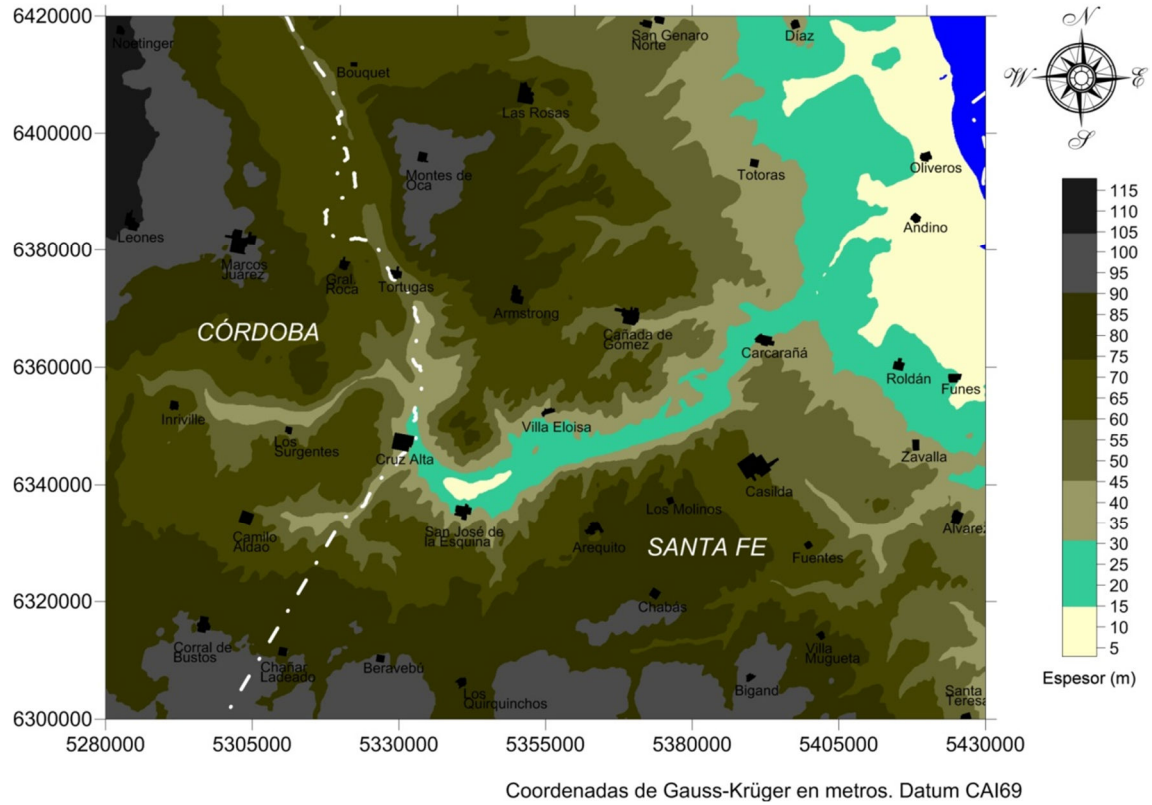


Figura 6.12 – Espesor de la capa 2 (modelo de cuatro capas) en el área de estudio.

El valor de conductividad equivalente para las zonas celestes se calcula a través de la Ecuación (6.2).

$$k_{\text{equiv}} = \frac{k_{\text{capa 1}} \times \text{esp}_{\text{capa 1}} + k_{\text{capa 2}} \times \text{esp}_{\text{capa 2}}}{\text{esp}_{\text{capa 1}} + \text{esp}_{\text{capa 2}}} \quad (6.2)$$

donde k es la conductividad hidráulica (m/d) y esp es el espesor (m). En los subíndices se especifica a qué capa corresponde.

La Ecuación 6.2 involucra tres variables: las conductividades hidráulicas de las capas 1 y 2, y el espesor de la capa 2 (se recuerda que el espesor de la capa 1 se consideró de 7 m constante en toda la zona de estudio). Todas estas variables corresponden al modelo numérico de cuatro capas.

La diferencia entre las litologías de las capas 1 y 2 no es tan marcada como la que hay entre estas capas y las dos restantes que las subyacen (capas 3 y 4). A continuación se muestra en la Tabla 6.3 las descripciones litológicas resumidas de las cuatro capas de acuerdo a lo analizado en el apartado 5.2.3 “Análisis estratigráfico”.

Tabla 6.3 – Resumen Unidades Litoestratigráficas (modelo inicial de cuatro capas).

Capa	Litología	Formaciones asociadas
1	<u>Prov. de Santa Fe:</u> limo eólico arcilloso <u>Prov. de Córdoba:</u> limo eólico arenoso con intercalaciones aluviales (arenas)	Fm Tezanos Pinto
2	Arena eólica muy fina limosa	Fm Carcarañá + unidades loésicas cuaternarias subyacentes
3	Arcilla algo limosa/arenosa, y limo arcilloso palustre en el Bloque de San Guillermo	Perteneciente al paquete sedimentario cuaternario
4	Arenas	Facies de playa Fm Paraná/"Puelches"/abanicos aluviales

Teniendo en cuenta que la conductividad hidráulica de la capa 1 sería algo menor que la correspondiente a la capa 2 (de acuerdo a las litologías involucradas), y que en casi el 85% de la zona de estudio el espesor de la capa 2 supera cuatro veces el espesor de la capa 1, la conductividad hidráulica equivalente de la capa resultante de unificar las capas 1 y 2 tenderá a tomar valores cercanos a la conductividad hidráulica de la capa 2.

Luego, se propuso en el modelo numérico tricapa que la capa 1 adquiriera valores de conductividad hidráulica acorde a sedimentos de litología arena eólica muy fina limosa, pero más arcillosa en la provincia de Santa Fe y algo más arenosa del lado de la provincia de Córdoba. Además, en la capa 2, se adoptaron valores para el Bloque de San Guillermo, distinguiéndolo del resto de la capa.

Los parámetros hidráulicos iniciales propuestos para la calibración del modelo hidrogeológico, y cuyos valores fueron cargados en el Visual MODFLOW, se presentan en la Tabla 6.4.

Tabla 6.4 – Parámetros hidráulicos iniciales adoptados para la calibración del modelo.

Capa	Acuífero	Zonificación	$k_x=k_y$ (m/d)	k_z (m/d)	S_s (1/m)	S_y (-)
1	Libre	Prov. de Santa Fe	5	0,5	$1,5 \times 10^{-3}$	0,10
		Prov. de Córdoba	7	0,7	2×10^{-3}	0,15
2	Acuitardo	Bloque de SG	0,005	0,0005	1×10^{-3}	0,07
		Resto de la capa	0,003	0,0003	2×10^{-3}	0,05
3	Semiconfinado	Toda la capa	30	10	$1,5 \times 10^{-4}$	0,25

donde: k_x y k_y conductividades hidráulicas horizontales ($k_x=k_y$)
 k_z conductividad hidráulica vertical

S_s	coeficiente de almacenamiento específico
S_y	rendimiento específico (o specific yield)

Estos valores se adoptaron en función de los datos recopilados y expuestos en el apartado 5.2.8 “Parámetros hidráulicos” o extraídos de la bibliografía especializada según la litología.

La Figura 6.13 muestra, la zonificación y valores de las conductividades hidráulicas adoptadas para cada capa del modelo, como estimaciones previas.

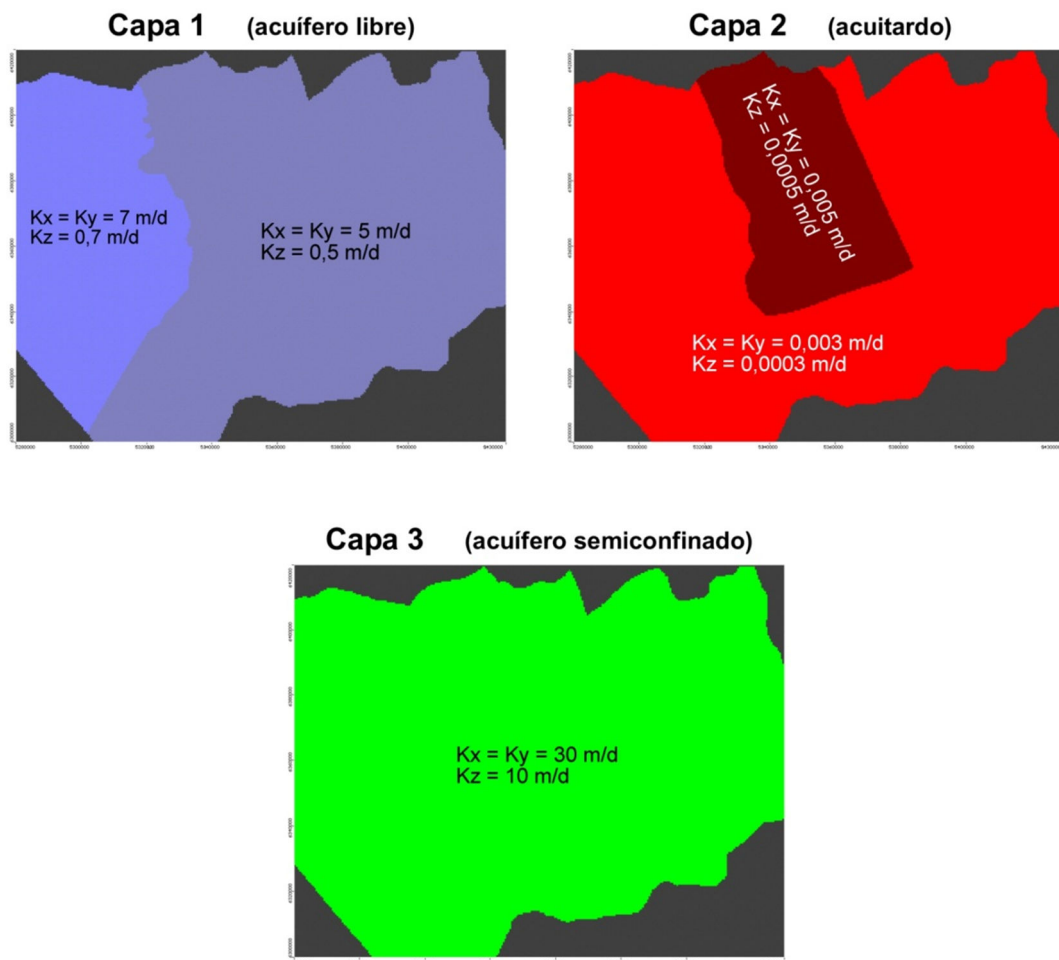


Figura 6.13 – Zonificación y valores de las conductividades hidráulicas para la calibración en régimen estacionario del modelo. En color gris se muestran las celdas inactivas.

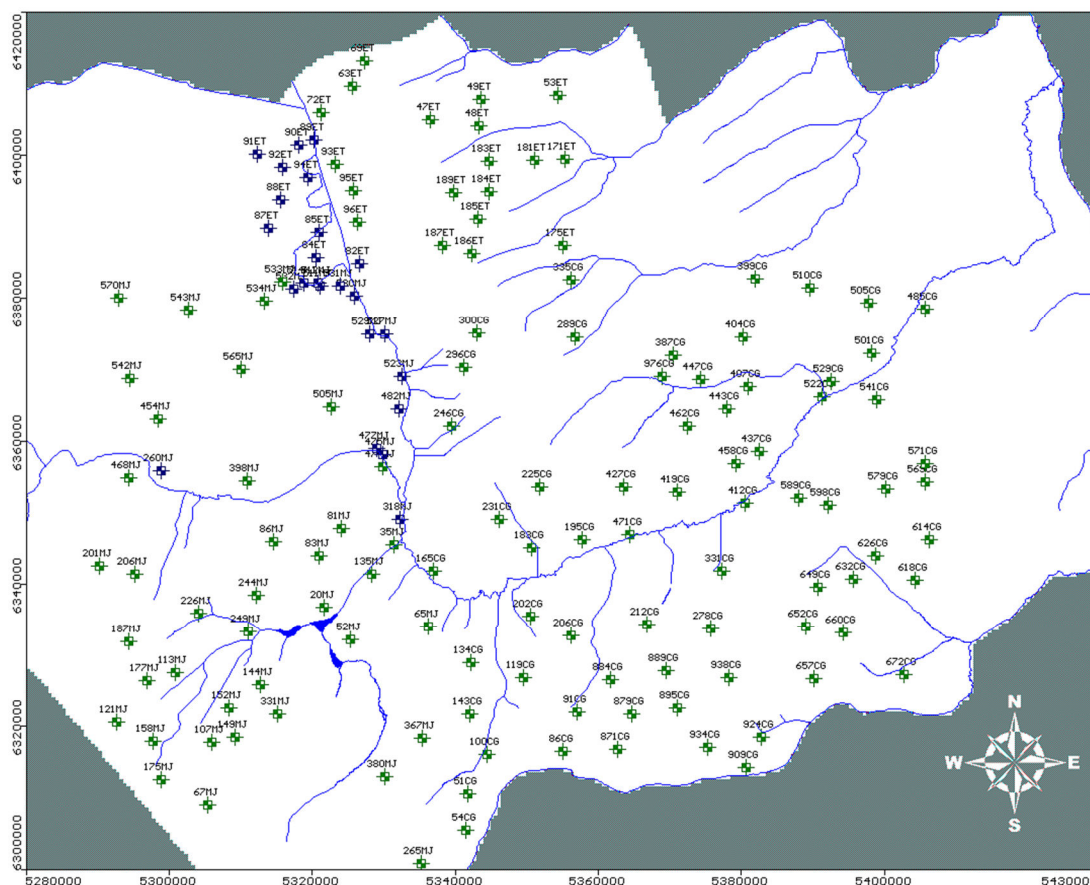
6.2. ESTRATEGIA DE LA CALIBRACIÓN

El proceso de calibración consistió en modificar los valores de los parámetros intervinientes en el modelo numérico con el objetivo de lograr un ajuste aceptable entre los datos de niveles freáticos y piezométricos observados y los simulados por el modelo. Además, debido a la falta de datos medidos de volúmenes de entradas y salidas del modelo, se tuvo presente el balance de masas especialmente en los valores de flujos bases de los cursos de agua de la zona de modelación.

El proceso de calibración se debe realizar no solo en forma cuantitativa a través de la evaluación de determinados estadísticos elegidos para tal fin, sino que también debe contemplarse un análisis cualitativo, comparando y verificando la consistencia de mapas freaticos y/o piezométricos, la dirección de los flujos, etc., entre el modelo conceptual propuesto y los resultados del modelo numérico empleado (SEA, 2012).

Para este trabajo se adoptó la calibración manual a través del método de prueba y error, basado en la modificación de los parámetros y que se lleva a cabo en las sucesivas corridas del modelo hasta lograr un ajuste satisfactorio.

Para ello es necesario incluir en el modelo los pozos de observación en ambos acuíferos (125 en el acuífero libre y 24 en el semiconfinado), como puede apreciarse en la Figura 6.14.



Coordenadas de Gauss-Krüger en metros. Datum CAI69.

Figura 6.14 – Pozos de observación. En color verde los correspondientes al acuífero libre (capa 1) y en color azul los del acuífero semiconfinado (capa 3).

Los parámetros de calibración seleccionados para lograr un ajuste aceptable fueron las conductividades hidráulicas de los sedimentos correspondientes a las tres capas del modelo (el

parámetro que presenta mayor incertidumbre debido a los escasos datos de ensayos de bombeo), y las conductancias y niveles de pelo de agua de los ríos y arroyos.

La calibración se realizó en régimen estacionario para el año 1966, asociada a la freatimetría base oportunamente presentada y a los niveles piezométricos observados, por lo que tanto el tiempo como el coeficiente de almacenamiento no intervienen en las ecuaciones de flujo.

6.3. RESULTADOS

Durante las primeras ejecuciones del modelo en la etapa de calibración, se observó una particularidad en un sector ubicado al este de la zona de estudio, y al norte y al sur del río Carcarañá hacia el río Coronda, en donde la superficie freática se ubicaba bastante por encima de la superficie topográfica. En la Figura 6.15 se muestra la situación planteada en donde se aprecia el sector con el problema citado y las alturas sobre la superficie topográfica que alcanzaban los niveles freáticos.

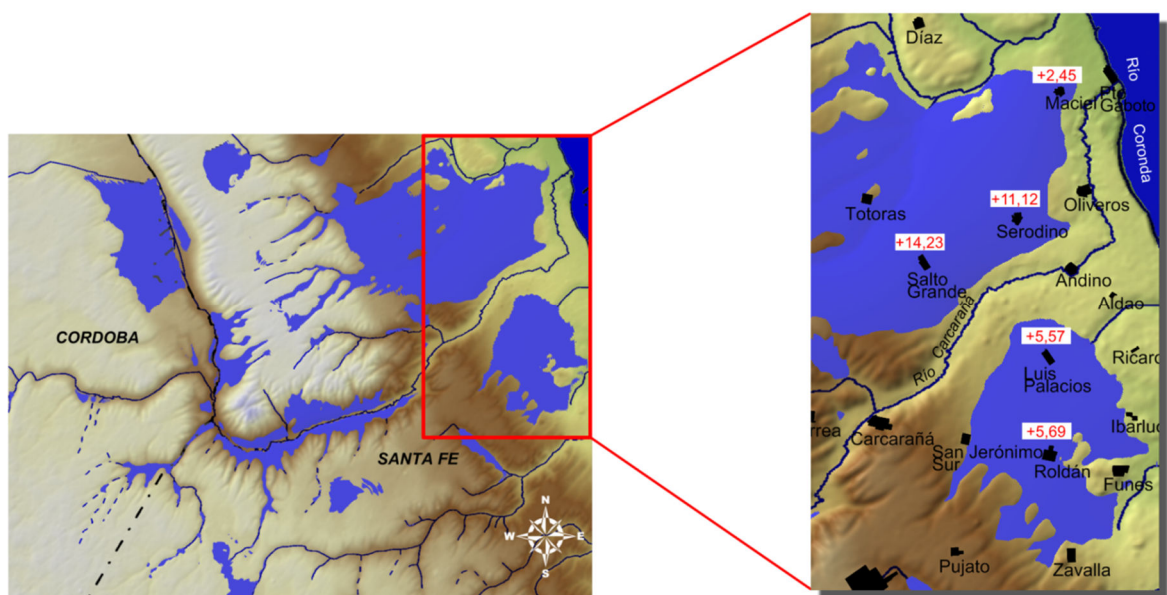


Figura 6.15 – Sector donde los niveles freáticos están por encima de la superficie topográfica. En el zoom y en números de color rojo se muestran las diferencias de cotas entre la superficie del acuífero libre y la topográfica en algunas localidades de la zona afectada.

Se realizó particularmente para esa zona un análisis de sensibilidad trabajando con las conductividades hidráulicas de las capas y conductancias de los cursos de agua presentes en esa zona, en particular los de mayor incidencia en cuanto a su interacción con el acuífero como los ríos Carcarañá y Coronda, y dejando invariables las recargas calculadas previamente y aplicadas en la capa superior del modelo, como se detallara con anterioridad.

En función de las características sedimentológicas de las formaciones involucradas, se llegó durante el análisis de sensibilidad a trabajar con rangos ilógicos de valores de conductividades hidráulicas y conductancias, sin que el acuífero libre se mostrara sensible a los valores manejados, manteniéndose los niveles freáticos siempre por sobre la superficie topográfica. Algunas de las localidades afectadas fueron Maciel, Serodino, Salto Grande, Luis Palacios y Roldán.

Fue entonces necesario considerar el replantear el modelo conceptual inicialmente propuesto, por lo que se llevó a cabo una revisión de los datos recopilados con el objetivo de encontrar la solución al inconveniente vinculado a la no evacuación del agua que ingresa por recarga, y considerando a ésta como variable inamovible para la etapa de calibración.

Observando varias imágenes satelitales de la zona, y para diversas épocas del año, se comprobó la existencia de muchas líneas de flujo interrumpidas (pequeñas lagunas ocupando paleocauces) y donde se evacúa agua, ya sea por encadenamiento entre ellas mediante flujo mantiforme en épocas húmedas, o bien por evaporación cuando luego de las lluvias dichas lagunas quedan aisladas o en épocas secas. Cabe resaltar la alineación SO-NE de dichas lagunas en su dirección de escurrimiento cuando se conectan entre sí (figuras 6.16 y 6.17). Se trata de lagunas ocupando antiguas hoyas de deflación generadas en un período seco del Cuaternario Superior y orientadas siguiendo el rumbo de paleocauces (Pasotti, 1974a; Kröhling, 1999a).

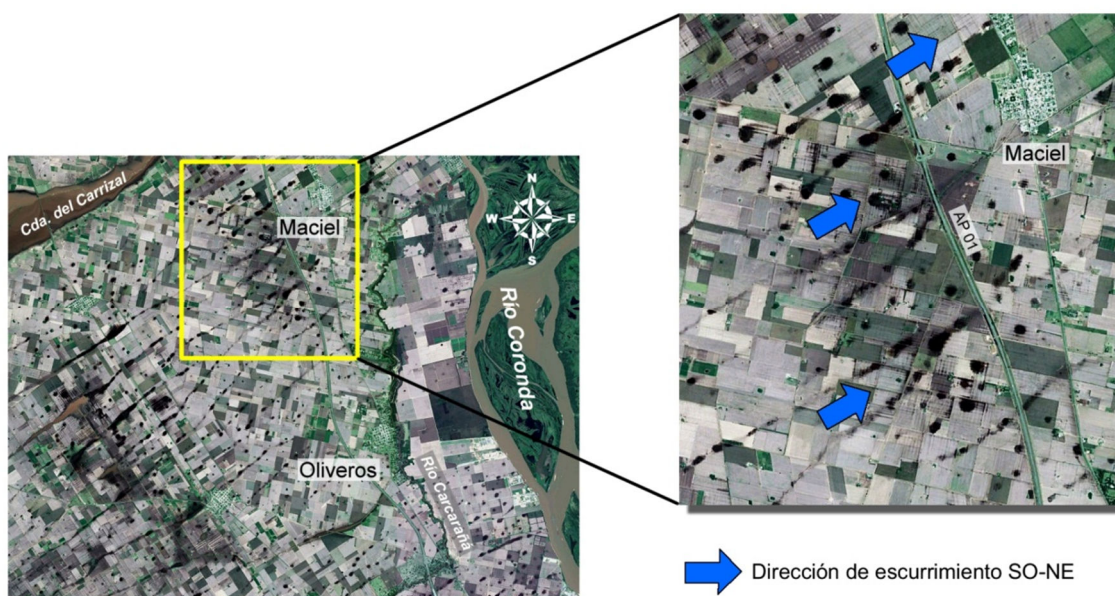


Figura 6.16 – Ubicación de las lagunas alineadas en la dirección SO-NE y su interconexión en eventos lluviosos como el que se muestra (observar el desborde de la cañada del Carrizal). Fecha imagen satelital: 03/11/2013.



Figura 6.17 – En la foto superior pueden observarse las lagunas alineadas y aisladas que en eventos lluviosos se conectan entre sí originando líneas de flujo longitudinales en dirección y sentido SO-NE, como se observa en la foto inferior a través de las flechas. (Fuente: www.flickr.com, fotógrafo: F. Mori®).

Estas salidas importantes de agua del sistema por escurrimiento directo a través de esas líneas de flujo, o bien por evaporación a través de las lagunas aisladas, no estaban siendo modeladas en el modelo numérico vertical 1D de recarga ni en el modelo conceptual adoptado inicialmente.

Luego, en función de las particularidades encontradas hasta aquí durante la etapa de simulación, se reformuló entonces el modelo conceptual, observándose en la Figura 6.18 el finalmente adoptado.

Conjuntamente a lo anterior, se ajustaron los escurrimientos directos en los BHS del SEBH Oliveros y del sector este del SEBH Casilda (denominado sub Sector de Estudio de Balance Hídrico -sSEBH- Roldán). De esta manera se reflejó esa salida de agua no contemplada hasta el momento, lo que tuvo como consecuencia que los niveles freáticos estuvieran por debajo de la superficie topográfica en esa zona.

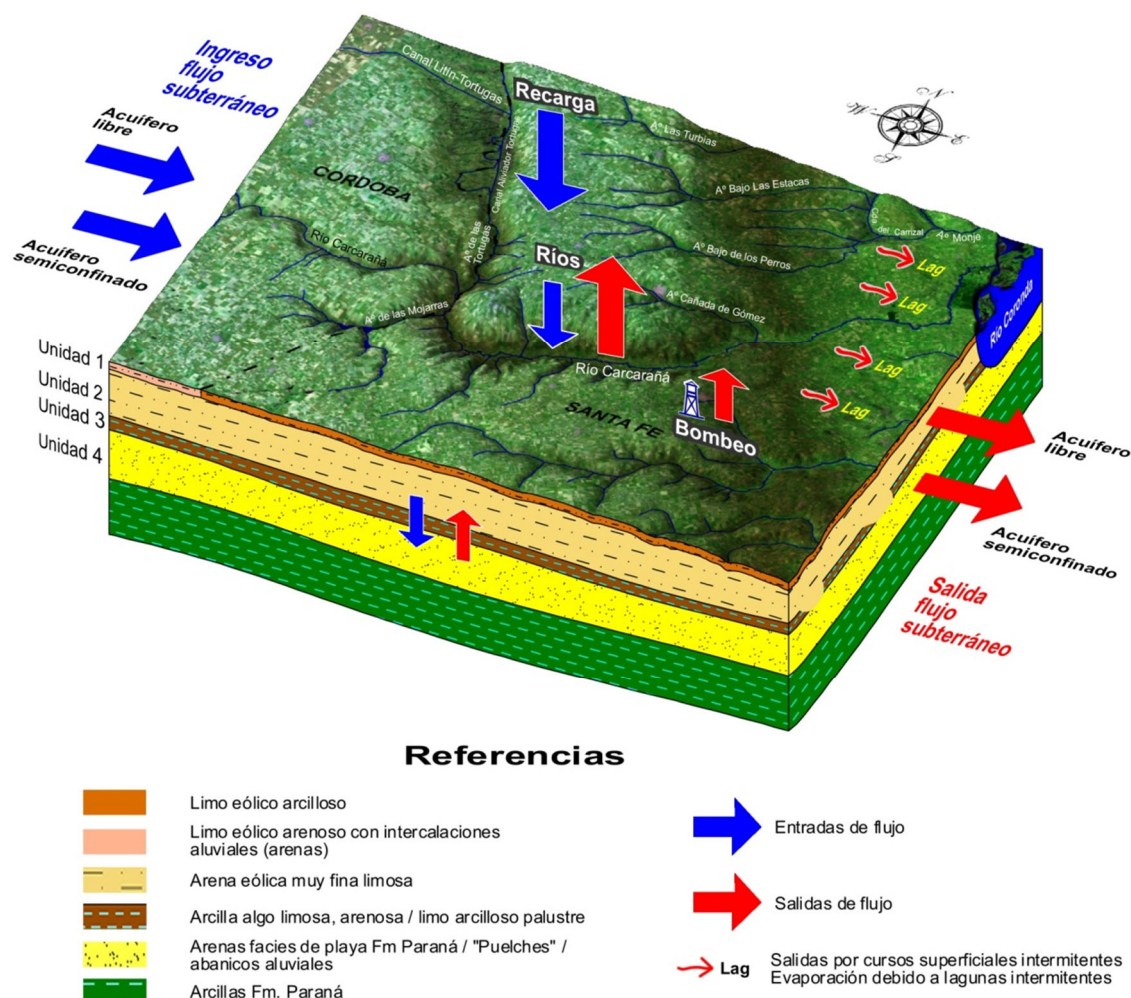
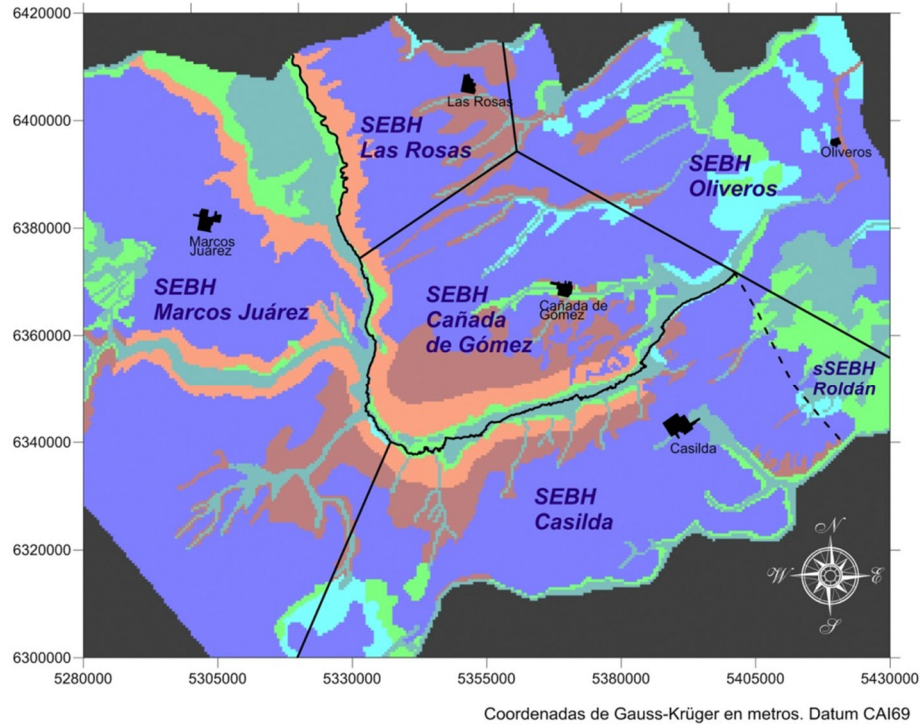


Figura 6.18 – Esquema reformulado del Modelo Conceptual de funcionamiento del sistema acuífero.

La estructura numérica del modelo y el esquema del modelo conceptual de funcionamiento del sistema acuífero en estudio partió de respetar el principio de Parsimonia, es decir, comenzar con un modelo simple e ir agregando complejidad al mismo a medida que sea necesario, buscando un equilibrio entre el nivel de detalle considerado y los objetivos de la modelación en cuestión. Se evidenció con las sucesivas etapas de calibración que al dividir una zona de estudio tan extensa como la presente en tres SEBH (Oliveros, Casilda y Marcos Juárez), no se lograban resultados satisfactorios de la freaticimetría calculada en la zona del Bloque de San Guillermo. Esto hizo que fuera necesaria la búsqueda de datos meteorológicos correspondientes a otras localidades o estaciones meteorológicas, a los fines de mejorar los resultados en esta zona. Es así que se incorporaron dos SEBH más a las tres que se tenía, siendo ellas los SEBH Cañada de Gómez y Las Rosas, calculándose en ambos los correspondientes BHS.

Finalmente, el proceso de calibración se desarrolló con cinco SEBH y un sSEBH. Además, se incorporó una nueva zona de recarga asociada a la zona de recarga 2 (denominada Zona 2p), la

cual tuvo en cuenta aquellos sectores de la misma que presentan una pendiente topográfica más extendida y de mayor gradiente a las pendientes del resto de la zona, originando un escurrimiento directo mayor. Los dominios y valores de recarga para cada una de las zonas de recarga se pueden observar en la Figura 6.19 y en el Anexo IV se presentan las curvas de recarga zonales.



Referencias

<u>SEBH Oliveros</u>		<u>SEBH Casilda</u>		<u>SEBH Marcos Juárez</u>	
Zona 1	47,1 mm/año	71,6 mm/año		46,7 mm/año	
Zona 2	37,9 mm/año	58,9 mm/año		42,1 mm/año	
Zona 2p	----	40,7 mm/año		25,7 mm/año	
Zona 3	29,2 mm/año	53,7 mm/año		38,2 mm/año	
Zona 4	18,2 mm/año	31,0 mm/año		17,0 mm/año	
Zona 5	10,5 mm/año	20,3 mm/año		5,1 mm/año	

<u>SEBH Cda. de Gómez</u>		<u>SEBH Las Rosas</u>		<u>sSEBH Roldán</u>	
Zona 1	97,3 mm/año	71,5 mm/año		42,9 mm/año	
Zona 2	74,3 mm/año	56,2 mm/año		----	
Zona 2p	42,5 mm/año	31,5 mm/año		----	
Zona 3	69,5 mm/año	53,6 mm/año		35,5 mm/año	
Zona 4	41,7 mm/año	37,5 mm/año		18,7 mm/año	
Zona 5	23,9 mm/año	22,9 mm/año		10,3 mm/año	

Figura 6.19 – Sectores y sub Sectores de Balance Hídrico (SEBH y sSEBH, respectivamente) considerados para la etapa de calibración y valores de recarga adoptados para las zonas de recarga (período analizado 1962-1966).

6.3.1. Parámetros hidráulicos calibrados

Teniendo presente que el sistema acuífero comprende en su totalidad rocas sedimentarias y sedimentos, no se consideró una relación de anisotropía fija para todos los sedimentos involucrados en las tres capas durante el proceso de calibración, debido a las hipótesis aplicadas y explicadas anteriormente, donde se evidencian claros procesos de erosión y posterior sedimentación, con probables zonas de granulometría mixta entre estratos involucrados. Pero sí se consideró que al ser unidades sedimentarias, en su propia génesis se evidencia la anisotropía ya que presentan ordenamiento, por lo que siempre se mantuvo la relación de conductividades hidráulicas horizontales y verticales $k_x = k_y > k_z$. Cabe señalar que los ensayos de bombeo no suelen brindar información acerca de los valores de la conductividad hidráulica vertical k_z .

En la Figura 6.20 se muestran las nuevas zonificaciones de las conductividades hidráulicas para cada una de las capas del modelo y los valores calibrados.

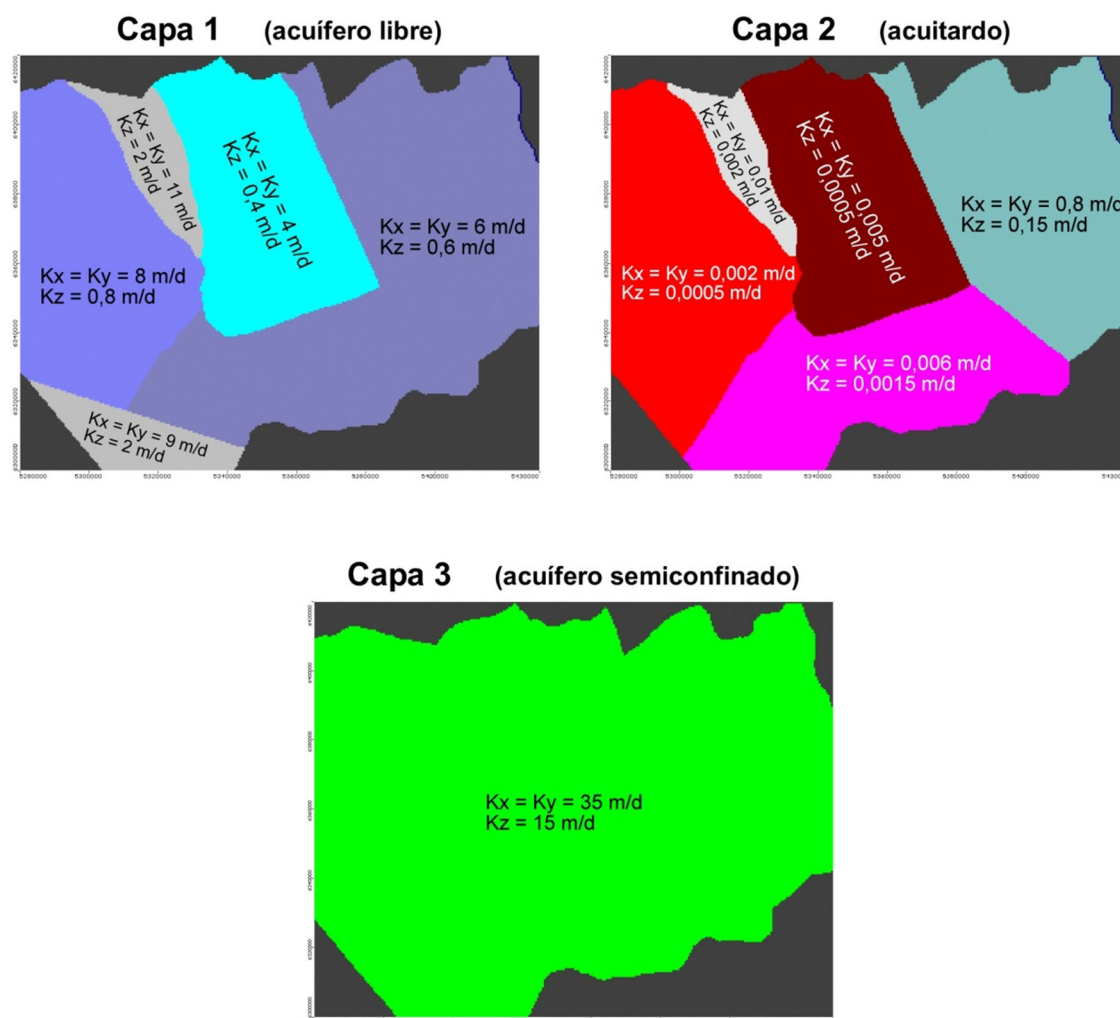


Figura 6.20 – Zonificación de las conductividades hidráulicas y valores calibrados.

En la capa 1, si bien la cantidad de datos de ensayos de bombeo con los que se cuenta no es numerosa, los valores calibrados son similares a los obtenidos en campo y en los trabajos de investigación de referencia, como así también a los valores propuestos para la calibración.

Se incorporaron tres zonas más a las dos originales: una que comprende el Bloque de San Guillermo, otra a la Depresión de la cañada de San Antonio (Córdoba) y una que comprende el extremo SO del modelo. El sector del Bloque de San Guillermo se incorporó por ser una unidad muy destacada y distintiva desde el punto de vista morfoestratigráfico en la zona de estudio. Los valores de conductividades hidráulicas obtenidos en el Bloque de San Guillermo durante la calibración son similares a los de datos de ensayos de bombeo en localidades ubicadas en el mismo.

Con respecto al sector que abarca la Depresión de la cañada de San Antonio, se obtuvieron valores de conductividades hidráulicas mayores a las obtenidas en la zona aledaña en la provincia de Córdoba y con distinta relación de anisotropía. Este podría vincularse con una unidad arenosa fluvial hallada en una perforación de investigación efectuada en dicha depresión (Carignano *et al.*, 2014) y confirmada por estudios geoelectricos (Kröhling, *com. pers.*). Además, el levantamiento del Bloque de San Guillermo transformó en receptor de algunos de los materiales de la zona distal del paleo-abanicos aluvial del río Tercero. Esto permite inferir una mayor presencia de sedimentos de granulometría arenosa en la parte superior de la columna sedimentaria cuaternaria de la Depresión de la cañada de San Antonio, respecto a la columna cuaternaria superior del Bloque de San Guillermo, con mayor contenido de sedimentos limo-arcillosos.

El sector ubicado en el extremo SO del modelo se incorporó a fines de reflejar la zona de transición entre el MAP y la FPL, que se da en ese sector.

La capa 2 quedó sectorizada en cinco zonas, destacándose la correspondiente a la Depresión de la cañada de San Antonio, y una subdivisión en la provincia de Santa Fe. Con respecto a la primera, nuevamente se repite lo expresado en la capa 1 respecto a los valores de conductividades hidráulicas calibradas. A partir de antecedentes geológicos se interpreta que la columna sedimentaria acuitardo – arenas de la Fm Paraná habría sido erosionada allí por acción fluvial en algunas fases del Cuaternario superior. Esta inferencia radica en la existencia de depósitos fluviales a pocas decenas de profundidad (Kröhling, *in prep.*), siguiendo un gran paleocauce de dirección N-S, muy probablemente asociado al río Dulce.

En la provincia de Santa Fe, vale destacar que el acuitardo tiende a ser discontinuo y más permeable a medida que nos acercamos al este del modelo (Kröhling e Iriondo, 2003; Tujchneider *et al.*, 2005), probablemente por la acción erosiva del antiguo río Paraná en ese sector.

En cuanto a las conductancias de los cursos de agua presentes en el modelo, se presentan los valores calibrados en la Tabla 6.5.

Tabla 6.5 – Valores calibrados de las conductancias de los cursos de agua.

Curso	C ₅₀₀ (m ² /d)	Curso	C ₅₀₀ (m ² /d)
A° Bajo de los Perros	200	A° Monje	750
A° Bajo del Árbol	100	A° Saladillo	750
A° Bajo del Chupino	350		1.500
A° Bajo Las Estacas	350	A° San Lorenzo	500
A° Bajo Los Leones	100	Bajo de Los Leones	150
A° Cañada de Gómez	500	Bajo del Chupino	50
	400	Canal Aliviador Tortugas	2.500
	250	Canal Las Parejas	100
	338	Canal Litín-Tortugas	1.500
	300	Canal Sec, Los Chancheros	1.500
	225	Cda. Candelaria	150
	150	Cda. de las Totoras	600
A° de las Mojaras	300	Cda. del Carrizal	750
	600	Río Carcarañá	13.750
	200		27.500
A° de las Tortugas	2500		55.000
A° de Las Turbias	300	Río Coronda	1.166.667
	150		
A° del Arbolito	150	Río Saladillo	25.000
A° Leones	250	Río Tercero-Ctalamochita	25.000
A° Ludueña	500		

6.3.2. Ajuste de los niveles

En la Figura 6.21 se muestran los niveles freáticos observados y calculados para la capa 1 (acuífero libre), mientras que en la Figura 6.22 se presentan los niveles piezométricos observados y calculados para la capa 3 (acuífero semiconfinado). En ambas gráficas puede observarse que la mayoría de los puntos se encuentra en la franja del intervalo de 95%. Considerando la calidad de la información freaticimétrica y piezométrica disponible para el presente trabajo, los valores obtenidos para los 125 pozos de observación del acuífero libre y para los 24 del acuífero semiconfinado indican un excelente ajuste.

Para cuantificar la bondad del ajuste se emplearon cuatro estadísticos, como ser el residuo medio absoluto (RMA), el coeficiente de determinación (R^2), la raíz del residuo cuadrático medio normalizado (RRCMN) y el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (E) (ver Anexo V). Los valores obtenidos de dichos estadísticos se resumen en la Tabla 6.6.

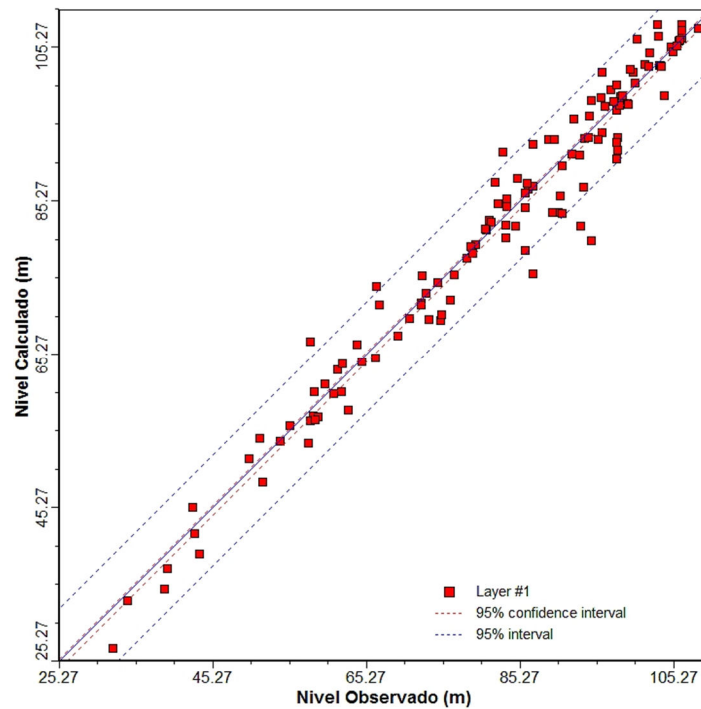


Figura 6.21 – Niveles freáticos Observados vs. Calculados para 1966 (Ac. Libre, capa 1).

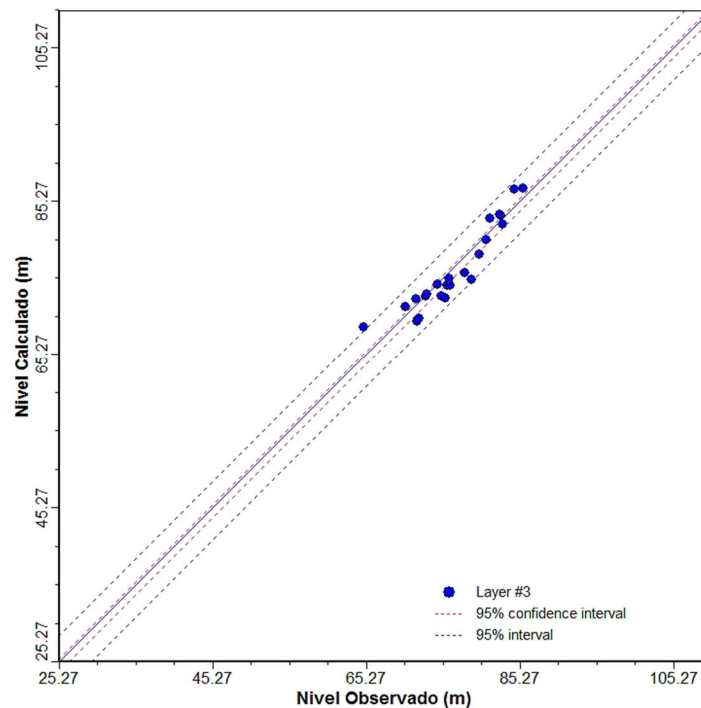


Figura 6.22 – Niveles piezométricos Observados vs. Calculados para 1966 (Ac. Semiconfinado, capa 3).

Tabla 6.6 – Estadísticos del ajuste

Estadístico	Capa 1 (acuífero libre)	Capa 3 (acuífero semiconfinado)
RMA (m)	2,64	1,52
R ² (adim)	0,96	0,89
RRCMN (%)	4,85	8,97
E (adim)	0,96	0,87

En cuanto al RMA, considerando la hipótesis de obtener valores menores a 3 m en función de los errores inevitables que suelen cometerse a la hora de obtener las lecturas de profundidades en los pozos, se observa que en ambos acuíferos los valores conseguidos son satisfactorios. Los valores de R² y E también brindan excelentes resultados. En cuanto al RRCMN, si bien los valores obtenidos son aceptables para ambos acuíferos, se obtuvo un mejor ajuste en el acuífero libre que en el semiconfinado debido a que el rango de valores observados de lecturas es mayor en el primero que en el segundo (108,5 a 32,2 m vs. 85,7 a 64,9 m).

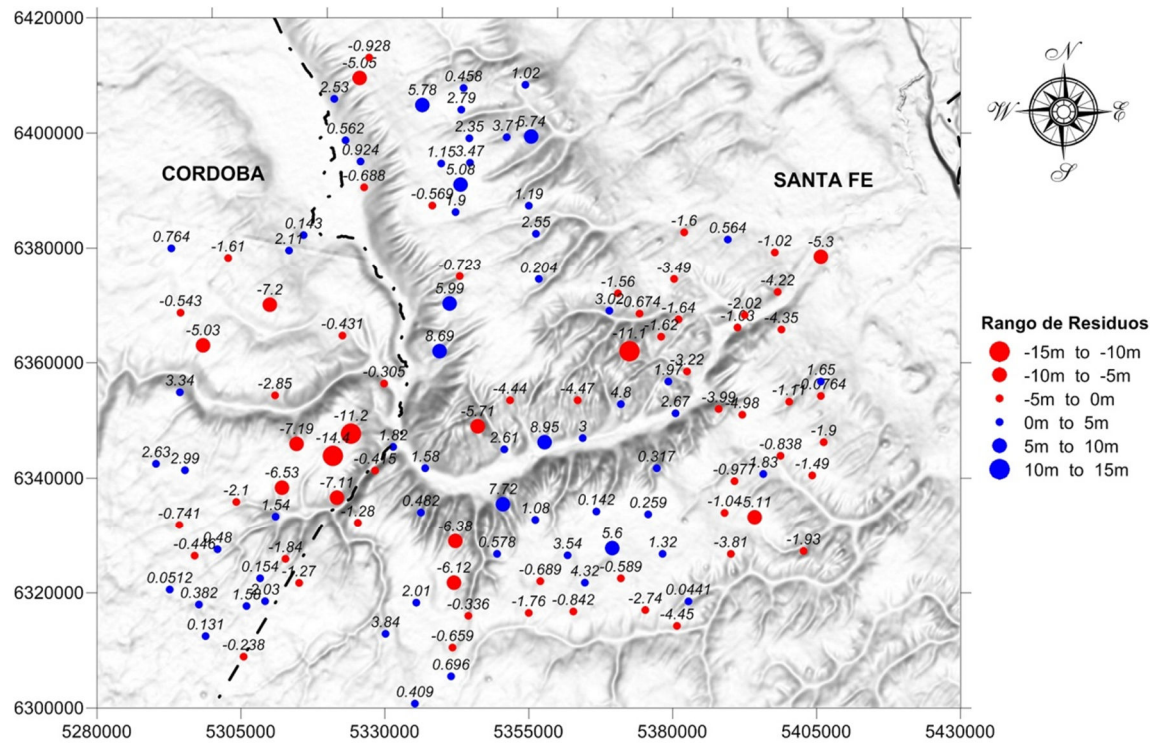
6.3.3. Mapa de residuos

La Figura 6.23 muestra el mapa de residuos obtenidos luego de la calibración para la capa 1 (acuífero libre), recordando que se entiende por residuo a la diferencia entre las cotas freáticas/piezométricas, calculadas y observadas en cada uno de los pozos de observación considerados (Ecuación 6.3).

$$R_i = H_{\text{calc}_i} - H_{\text{obs}_i} \quad (6.3)$$

donde: R_i residuo (m)
 H_{calc_i} cota freática/piezométrica calculada (m)
 H_{obs_i} cota freática/piezométrica observada o medida (m)

En la Figura 6.23 se observa que la mayoría de los residuos se ubica en el rango -5 a +5 m, mostrando más específicamente la Figura 6.24 que aproximadamente el 65% de los residuos se halla en el rango -2,87 a +2,87 m, y casi el 41% entre -1,44 y +1,44 m. Esto indica el buen ajuste alcanzado teniendo en cuenta los ± 3 m de error adoptado, como se expresara anteriormente.



Coordenadas de Gauss-Krüger en metros. Datum CAI69
Figura 6.23 – Mapa de residuos para el acuífero libre (capa 1).

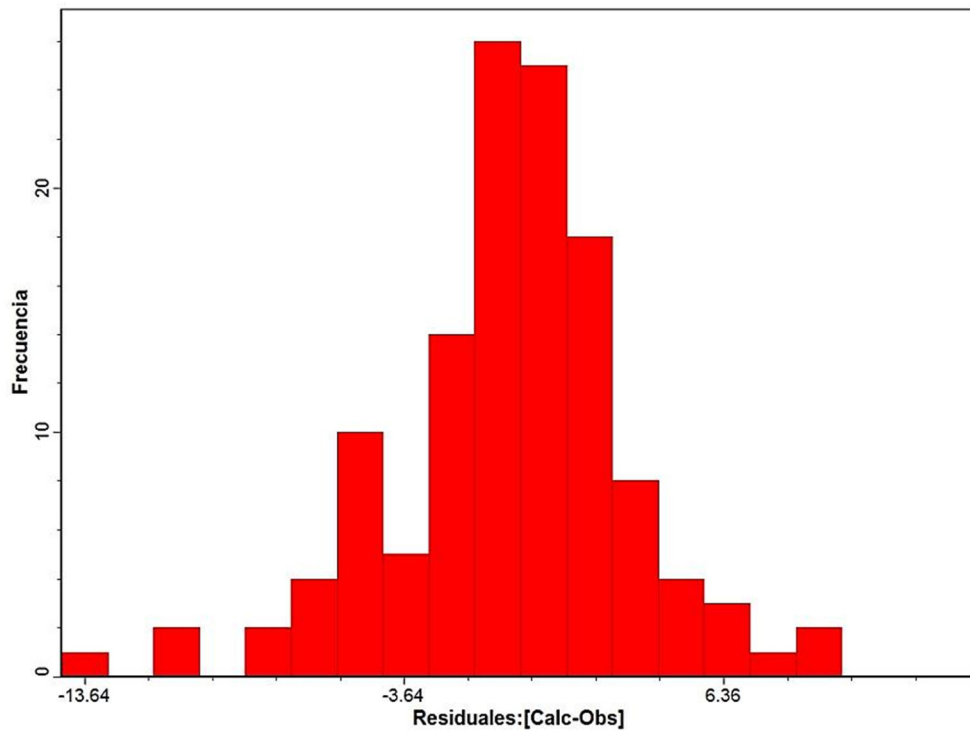


Figura 6.24 – Histograma de residuos para el acuífero libre (capa 1).

Para la capa 3 del acuífero semiconfinado, se presentan también los mapas e histograma de residuos en las figuras 6.25 y 6.26. La Figura 6.25 muestra que la generalidad de los residuos se sitúa en el rango +2 a -2 m, y entre los rangos -4 a -2 m y +2 a +4 m, mientras que la Figura 6.26

indica que el 75% de los residuos se halla en el rango -2,40 a +1,20 m, también con valores inferiores a los ± 3 m, mostrando un buen ajuste.

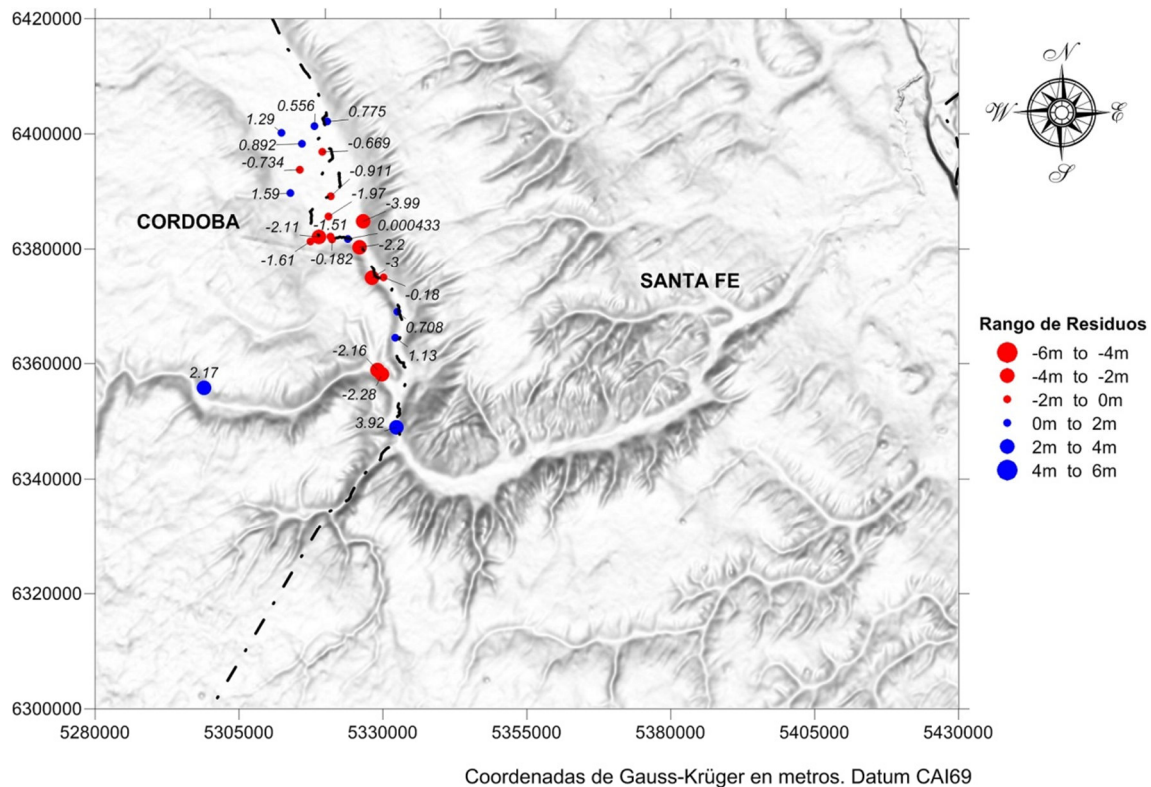


Figura 6.25 – Mapa de residuos para el acuífero semiconfinado (capa 3).

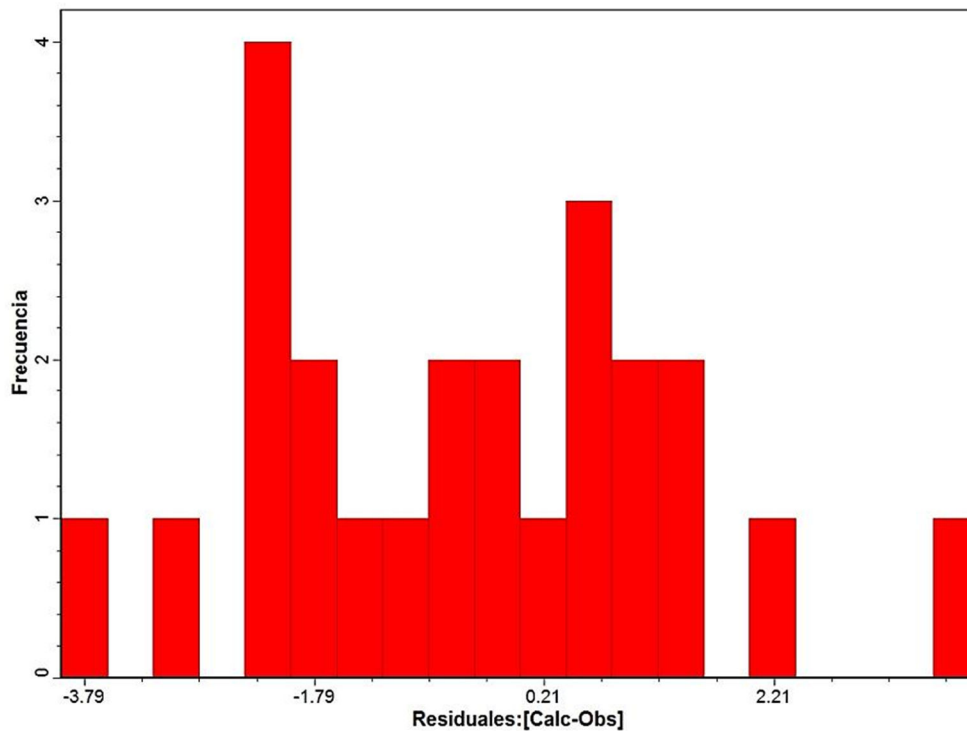


Figura 6.26 – Histograma de residuos para el acuífero semiconfinado (capa 3).

6.3.4. Superficies freaticométrica y piezométrica. Direcciones de flujo

Dada las características geomorfológicas y fundamentalmente topográficas de la zona de estudio, el modelo representa apropiadamente el patrón de flujo que muestra la freaticimetría base y confirma el modelo conceptual hidrogeológico presentado.

En la Figura 6.27 se muestra la freaticimetría obtenida para el acuífero libre luego de la calibración, conjuntamente con la freaticimetría base. Si bien la superficie freaticométrica simulada del acuífero libre mantiene relación con la superficie topográfica, las principales diferencias entre ambas freaticimetrías se evidencia en las mayores curvaturas de las curvas isofreáticas que conforman la freaticimetría base u observada.

Se verifica la dirección de escurrimiento regional aproximada de oeste a este presentada en el modelo conceptual, en relación con la geomorfología y geología de la zona y hacia el río Paraná, mientras que de la interpretación de la freaticimetría obtenida se confirma que los cursos de agua presentes en la zona de estudio adquieren un comportamiento mayormente efluente en la misma.

Igualmente, se reflejan correctamente las distintas divisorias de aguas subterráneas presentes entre cursos de agua como así también diversas particularidades, como la presencia de varios domos en la superficie freática y especialmente en los bordes oeste, sur – oeste y sur de las condiciones de contorno en los límites del modelo.

En la Figura 6.28 se observan los vectores de flujo resultantes de la simulación superpuestos a la freaticimetría obtenida, corroborando la dirección de escurrimiento de oeste a este y hacia los cursos de agua, denotando su comportamiento fundamentalmente efluente.

La Figura 6.29 muestra en mayor detalle una zona que involucra un tramo del río Carcarañá en la provincia de Santa Fe, y a las localidades de Villa Eloísa, Arequito y Los Molinos, y en donde puede apreciarse el comportamiento efluente del río, y que los vectores de flujo se mantienen siempre perpendiculares a las equipotenciales (curvas isofreáticas).

Particularmente en los bordes donde aparecen los tres domos anteriormente citados en la superficie freática, hay vectores que indican la salida de flujo del sistema.

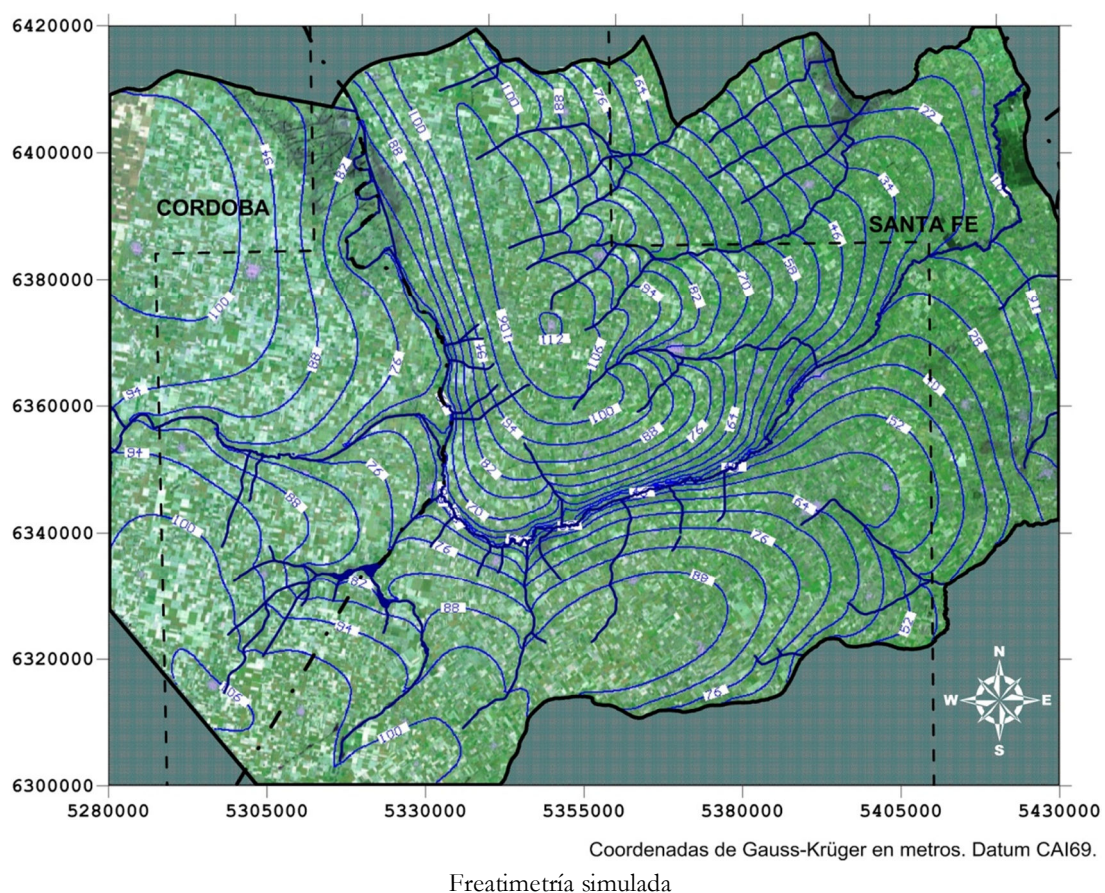
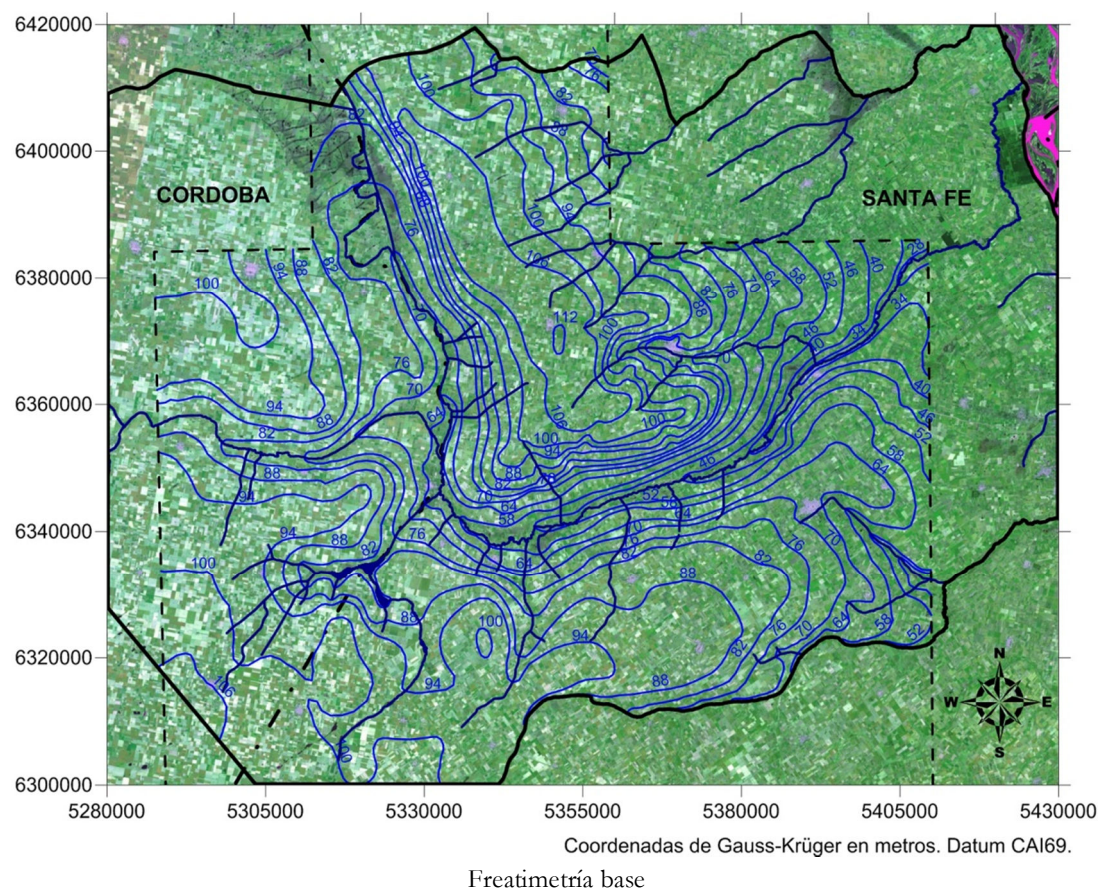


Figura 6.27 – Freatimetría base correspondiente a 1966 (construida a partir de Kreimer, 1969 y Bitesnik, 1968, 1970) y simulada para el acuífero libre (capa 1). En línea de trazos se marca la zona de relevamiento hidrogeológico.

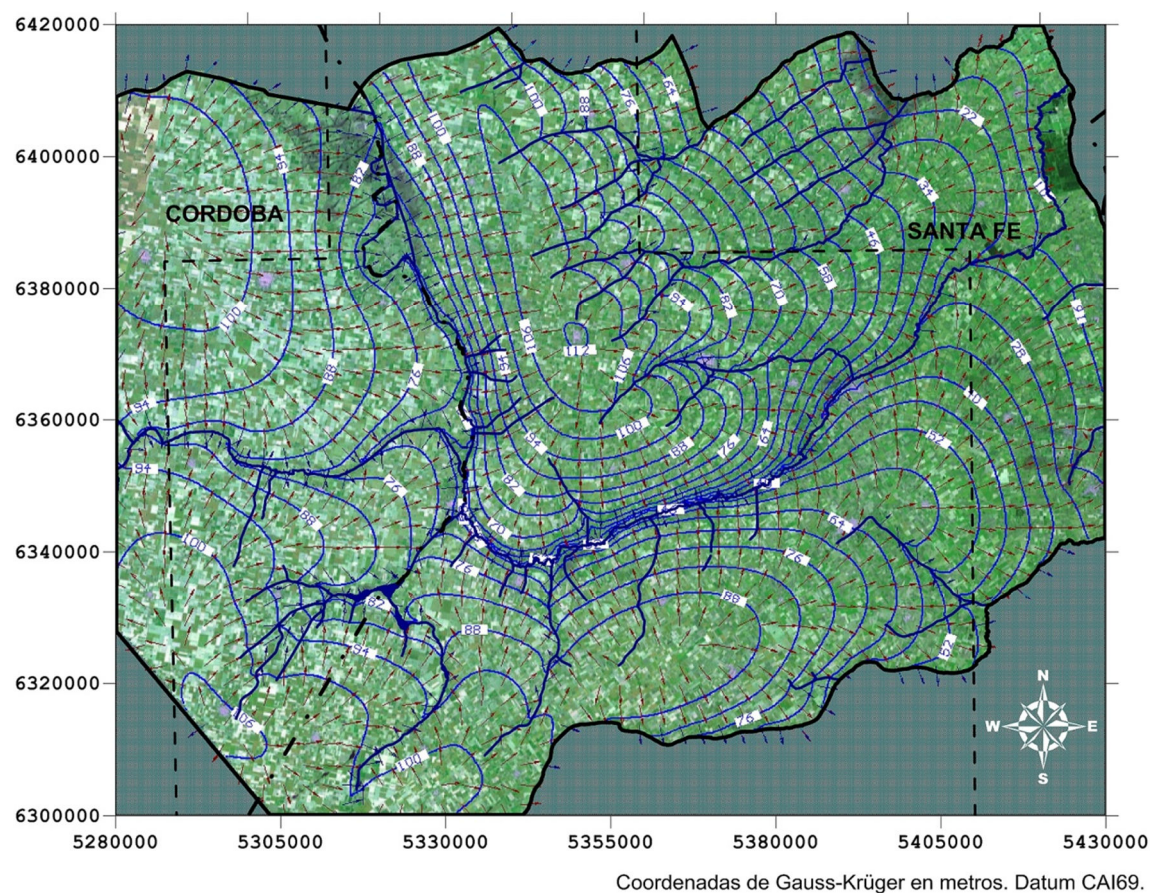


Figura 6.28 – Vectores de flujo para el acuífero libre (capa 1).

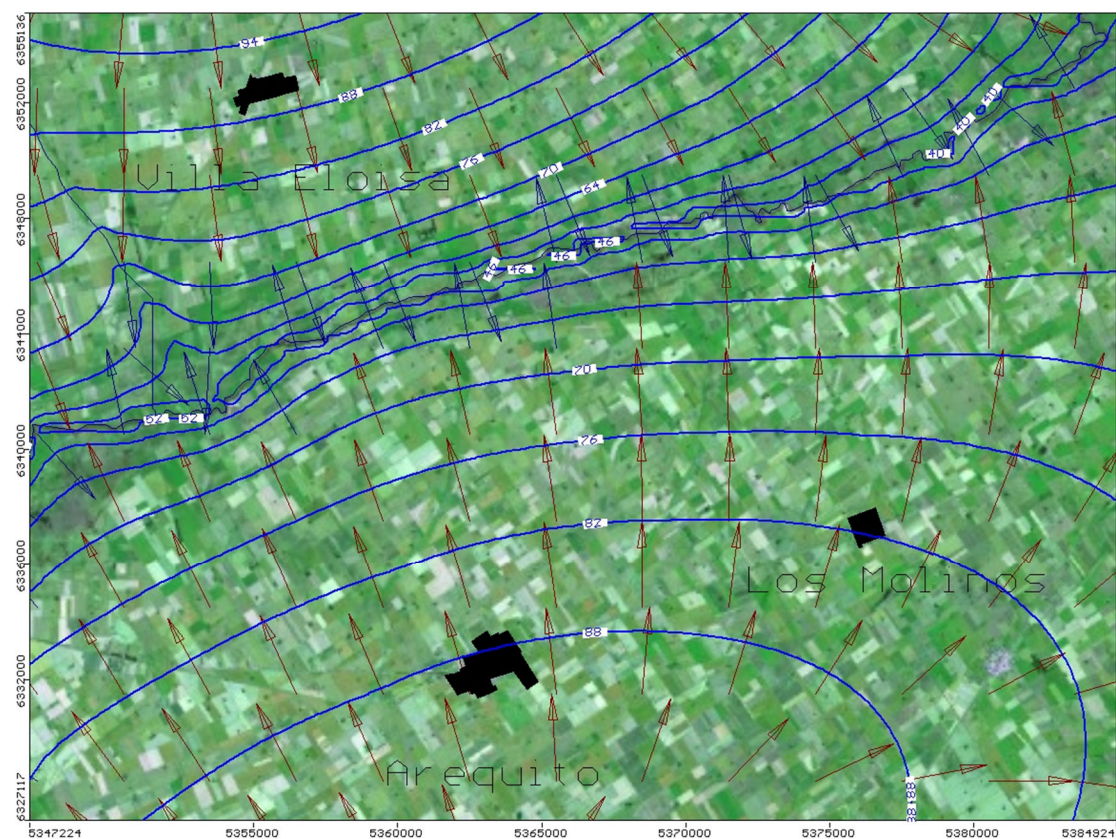


Figura 6.29 – Comportamiento efluente del río Carcarañá en zona aledaña a las localidades de Villa Eloísa, Arequito y Los Molinos (prov. de Santa Fe).

Comparando la piezometría (Figura 6.30) y vectores de flujo (Figura 6.31) del acuífero semiconfinado con los del acuífero libre, se observa una clara similitud en cuanto a las formas de las curvas isopiezas y los patrones de flujo, estando la superficie piezométrica del acuífero semiconfinado mayormente por debajo, lo que indica la posible existencia de un flujo vertical descendente.

De dicha comparación, se ratifica lo expresado en el modelo conceptual acerca de que, fundamentalmente, el acuífero semiconfinado, además del ingreso de caudal desde el oeste, está siendo recargado por el acuífero libre desde las partes altas y a través del acuitardo, teniendo como descarga final el río Coronda y el borde este hacia el río Paraná. Además, se observan en la Figura 6.31 vectores de flujo en el acuífero semiconfinado con dirección hacia algunos cursos de agua como, por ejemplo, el río Carcarañá, el arroyo de las Tortugas y el arroyo Saladillo.

Aparecen también los tres domos sobre los bordes oeste, sur – oeste y sur de las condiciones de contorno.

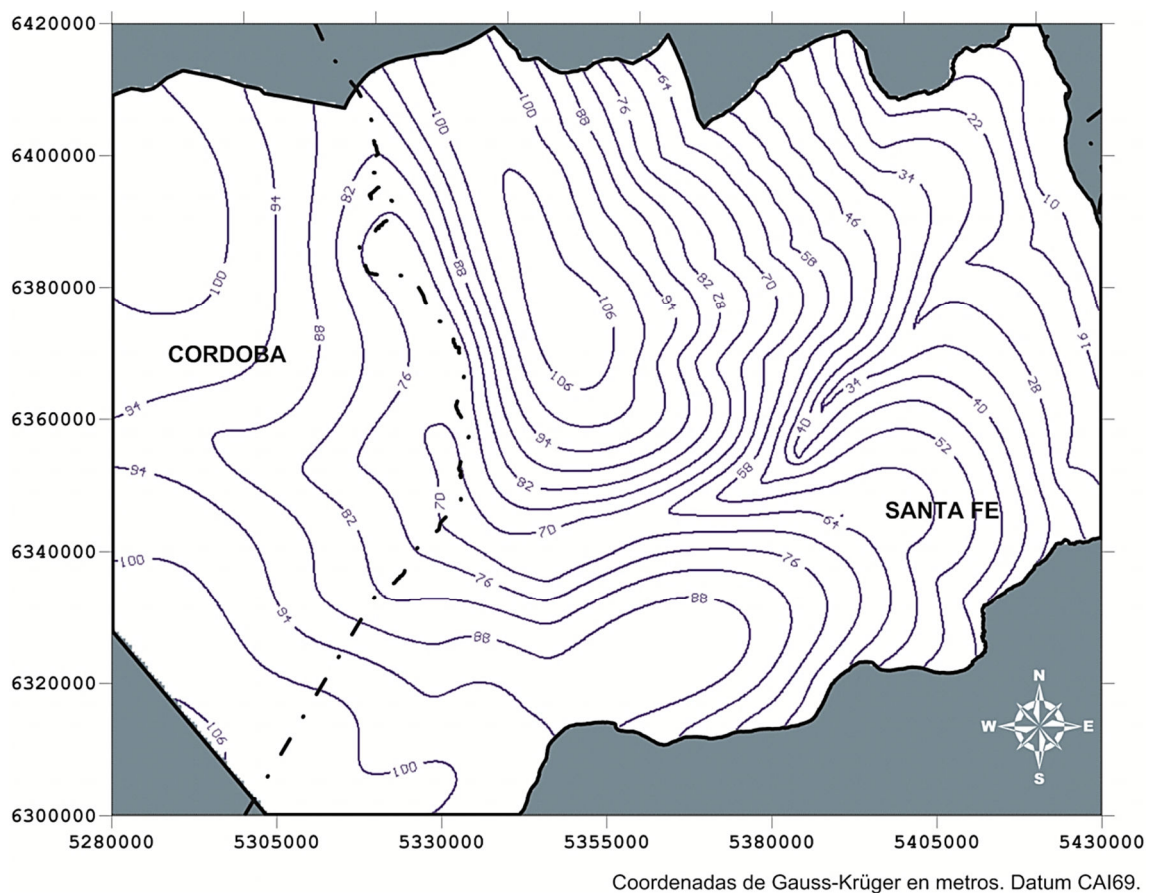


Figura 6.30 – Piezometría simulada para el acuífero semiconfinado (capa 3).

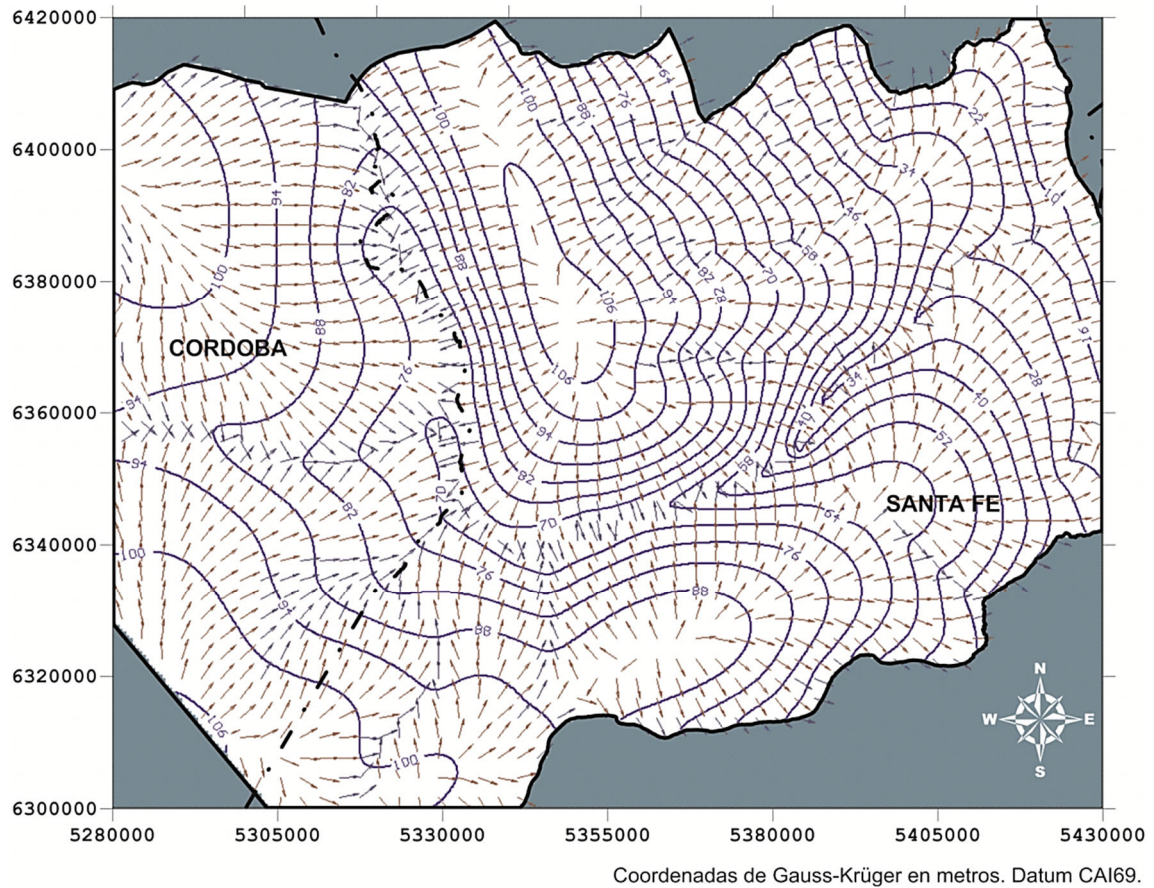


Figura 6.31 – Vectores de flujo para el acuífero semiconfinado (capa 3).

Si bien los vectores de flujo marcan en algunos sectores salidas del sistema (básicamente a través de los domos), mayoritariamente se tiene ingreso de flujo al mismo través del flujo regional.

Las zonas donde el acuífero libre tenga una relación hidráulica favorable (mayor cota del nivel freático respecto al piezométrico) definirá sectores de recarga del acuífero semiconfinado, y cuando esta relación se revierta las zonas se convertirán de descarga (Toth, 1970, 2000; Auge *et al.*, 2002; Auge, 2004b), ver Figura 6.32.

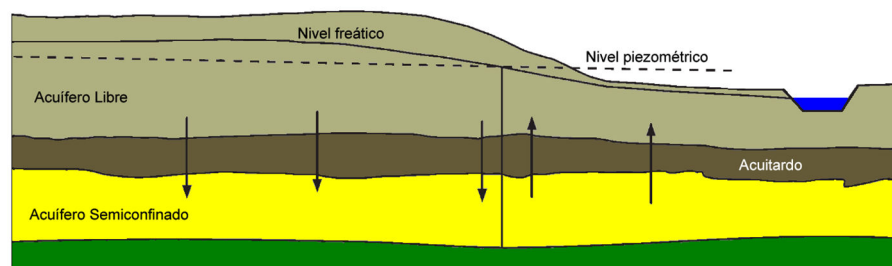


Figura 6.32 – Esquema conceptual natural entre los acuíferos libre y semiconfinado (modificado de Auge, 2004b).

En la Figura 6.33 se distinguen las zonas de recarga y descarga del acuífero semiconfinado. Se observa que la descarga regional, no solo ocurre hacia los ríos Coronda y Paraná de manera

directa, sino a través del caudal base de los cursos de agua y arroyos situados al oeste de la Falla El Trébol y a su prolongación hacia el sur de dicho lineamiento. El acuífero semiconfinado aporta a través del paquete sedimentario cuaternario que oficia como unidad de tránsito (Auge *et al.*, 2002).

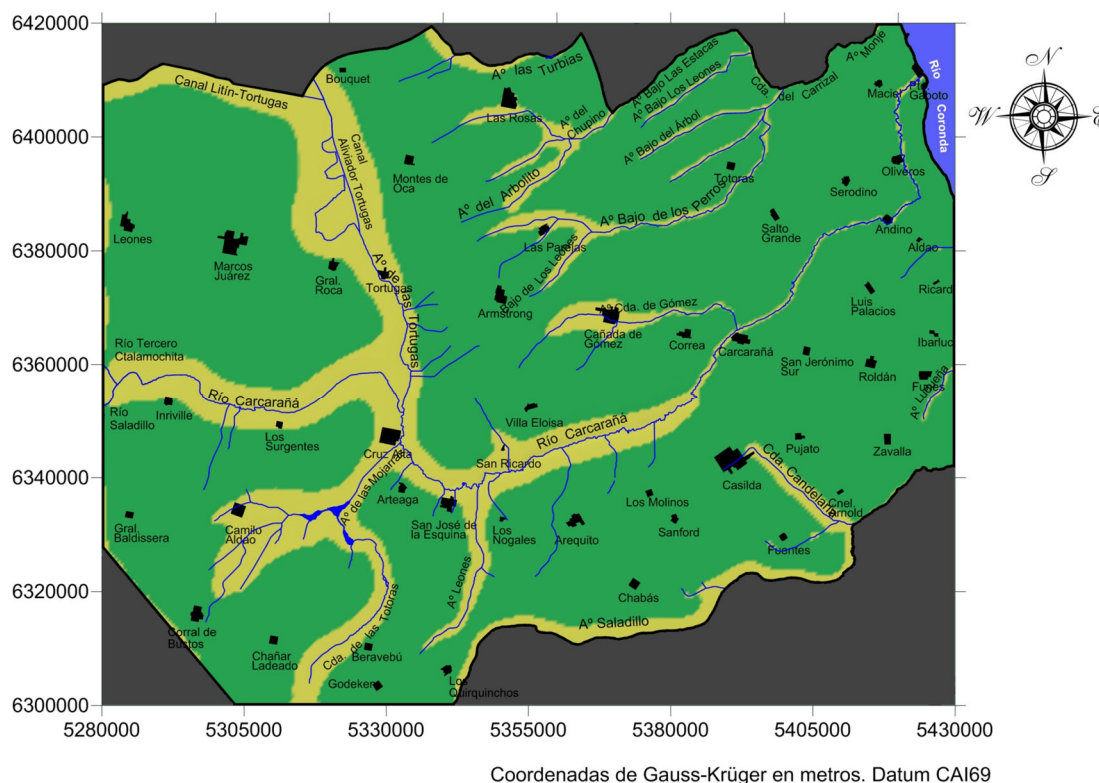


Figura 6.33 – Sectores de recarga (verde) y descarga (amarillo) del acuífero semiconfinado.

En la Figura 6.34 se muestra un corte transversal del modelo de dirección N-S pasante por la localidad de Marcos Juárez, observándose cómo mayormente el acuífero semiconfinado es recargado a través del acuitardo desde el acuífero libre con dirección de flujo descendente que atraviesa el acuitardo casi de forma vertical, y la inversión de la dirección y sentido de flujo en la zona próxima al río Carcarañá, aportando el acuífero semiconfinado a su caudal base. En el borde izquierdo de la figura existe una salida localizada de flujo del sistema motivada por el funcionamiento de los domos ubicados sobre el borde sudoeste del modelo, tanto en el acuífero libre como en el semiconfinado. El canal Litín-Tortugas también recibe aportes no solo del acuífero libre sino también del semiconfinado, como se aprecia en la figura. Además, algunos brazos del A° de las Mojarras tienen un comportamiento influente – efluente respecto al acuífero libre. En éstos es interesante observar cómo las líneas de flujo intermedias o profundas del acuífero semiconfinado van desde la zona de recarga a la de descarga en el río Carcarañá, pasando por los brazos del A° de las Mojarras sin intercambio de flujo con los mismos.

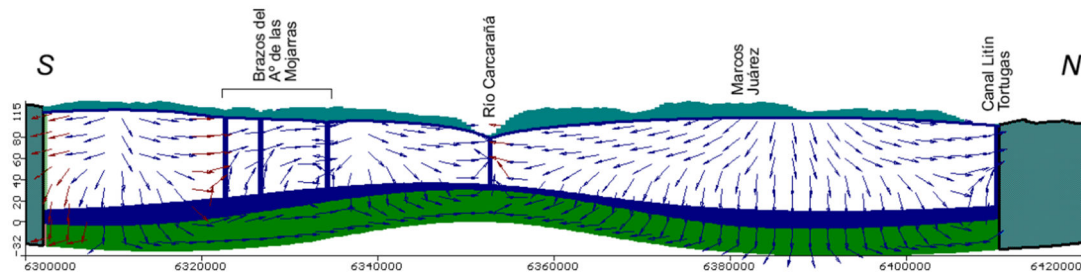


Figura 6.34 – Freatimetría y direcciones de flujo en un corte transversal dirección N-S a la altura de la localidad de Marcos Juárez.

La Figura 6.35 muestra un corte transversal en la dirección E-O pasante por la localidad de General Roca, con la misma dinámica de escurrimiento subterráneo entre los acuífero libre – acuitardo – acuífero semiconfinado, involucrando al arroyo Tortugas y al río Carcarañá, y otros cursos menores. En el borde izquierdo de la figura se observa también una salida de flujo del sistema por la condición de contorno impuesta en el modelo debido al funcionamiento de los domos ubicados sobre el borde oeste del modelo en ambos acuíferos.

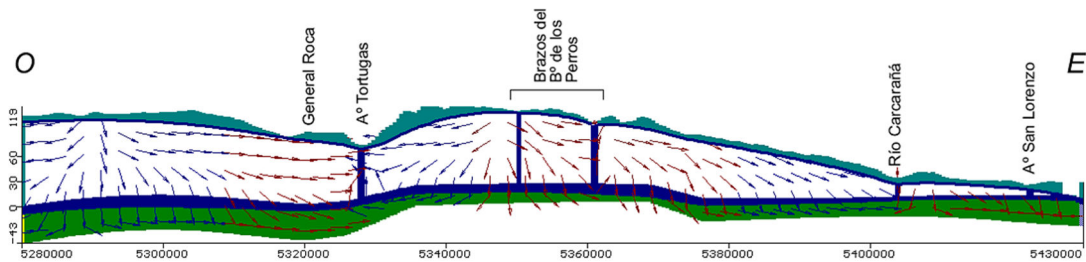


Figura 6.35 – Freatimetría y direcciones de flujo en un corte transversal dirección O-E a la altura de la localidad de General Roca.

6.3.5. Balance de masas

Se presenta en la Figura 6.36 el balance de masas global para el sistema acuífero y en la Figura 6.37 se presenta un esquema del balance sobre la zona de estudio.

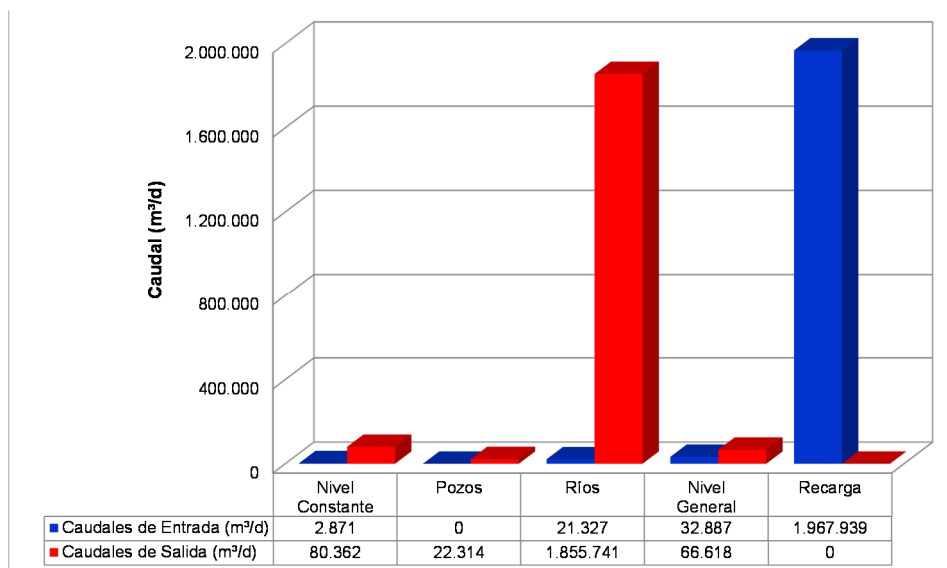


Figura 6.36 – Balance de masas global del sistema acuífero.

Se observa con claridad que prácticamente la totalidad de la recarga que ingresa al sistema sale del mismo a través del caudal base de los cursos de agua.

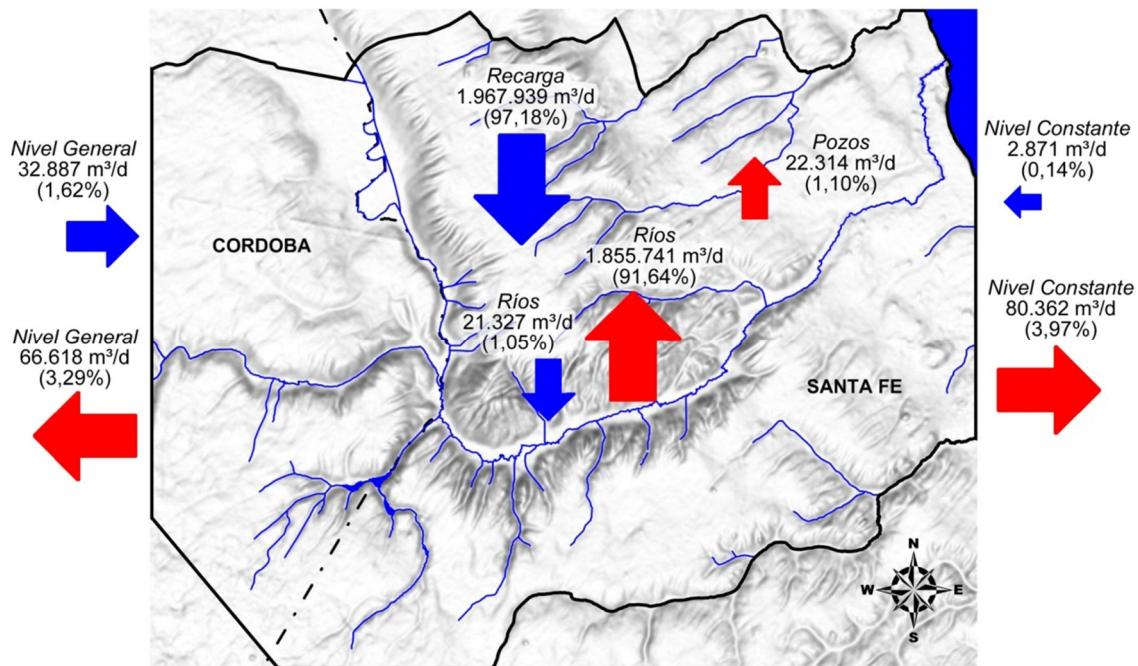


Figura 6.37 – Esquema del balance de masas global del sistema acuífero (expresado en caudales y porcentajes). Las flechas de color rojo indican salidas de flujo del sistema, mientras que las de color azul representan entradas al mismo.

El caudal extraído de los pozos de bombeo ($22.314 \text{ m}^3/\text{d}$) es bajo y es posible discriminarlos en $13.687 \text{ m}^3/\text{d}$ proveniente del acuífero libre y $8.627 \text{ m}^3/\text{d}$ del semiconfinado. Cabe recordar que se incorporaron solo las extracciones de cuatro de las localidades con mayor población, y que entre todas ellas se encuentra, aproximadamente, el 50% de las extracciones de todas las localidades ubicadas en la zona de modelación. Es decir, que aun considerando la totalidad de localidades, los caudales extraídos por bombeo son pocos significantes en el balance de masas global.

La condición de borde este del modelo es prácticamente de salida de flujo del sistema, como se planteó en el modelo conceptual. Con respecto a la incidencia de las condiciones de contorno de un modelo hidrogeológico en el proceso de modelación, Anderson y Woessner (1992) indican que son ampliamente responsables de cómo será el flujo en el sistema, y que constituirán las mayores fuentes de error en el proceso de modelación. Es así que en dicho borde hay una pequeña entrada de flujo (un 3,6% del de salida) que puede atribuirse a la materialización de la condición de borde (nivel constante), dado que en esa zona del modelo no se contaba con datos de freaticimetría, por lo que los niveles utilizados para la implementación de la condición de contorno se obtuvieron de análisis propios, construyendo una probable freaticimetría en la zona

extrapolando los datos de la freatimetría base y del nivel de la superficie del río Paraná hacia el este de la zona de estudio, y relacionándolos con la superficie topográfica en dicho sector del modelo. Similar efecto se observa en el borde oeste del modelo.

A través del modelo numérico, y como consecuencia del funcionamiento del sistema acuífero, fue posible determinar los flujos entrantes y salientes por cada capa, además del intercambio de los mismos entre ellas (Figura 6.38).

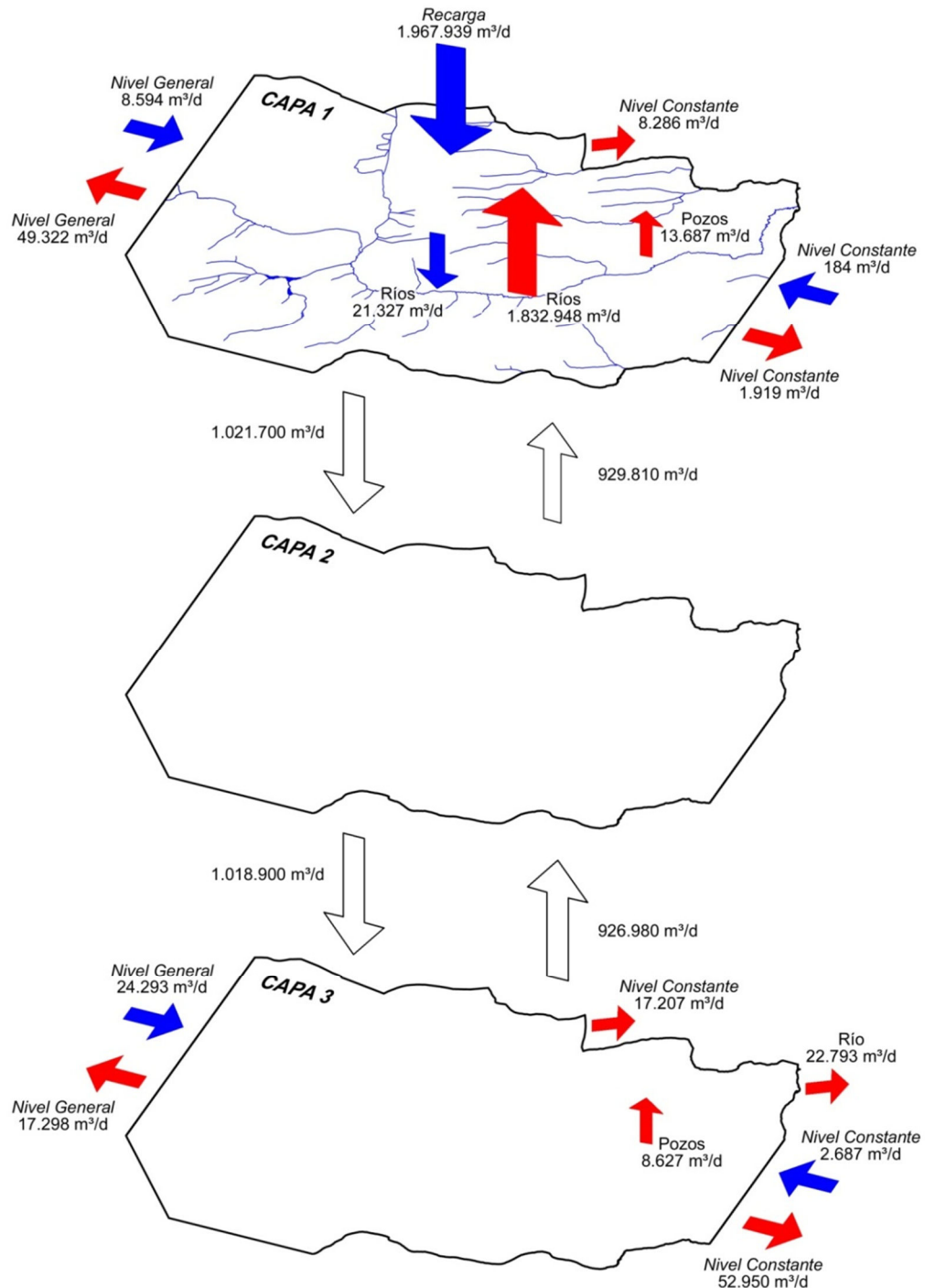


Figura 6.38 – Balance de masas por capas y condición de contorno. Las flechas de color rojo indican salidas de flujo del sistema, las de color azul representan entradas al mismo y las de color blanco flujos internos entre capas.

Es interesante notar el bajo caudal saliente por la condición de borde este en la capa 1 correspondiente al acuífero libre. Esto puede deberse a que en la planicie adyacente al borde este prácticamente ya no quedan cursos de agua importantes en el sistema, como bien puede observarse en la figura, por lo que prácticamente la totalidad de la recarga se derivó a conformar el caudal base de la casi totalidad de los cursos de agua que quedaron al oeste de la zona en consideración.

La Figura 6.39 muestra el balance de masas para los principales cursos de agua en la zona de estudio, donde puede corroborarse una vez más el carácter efluente que adquieren los mismos.

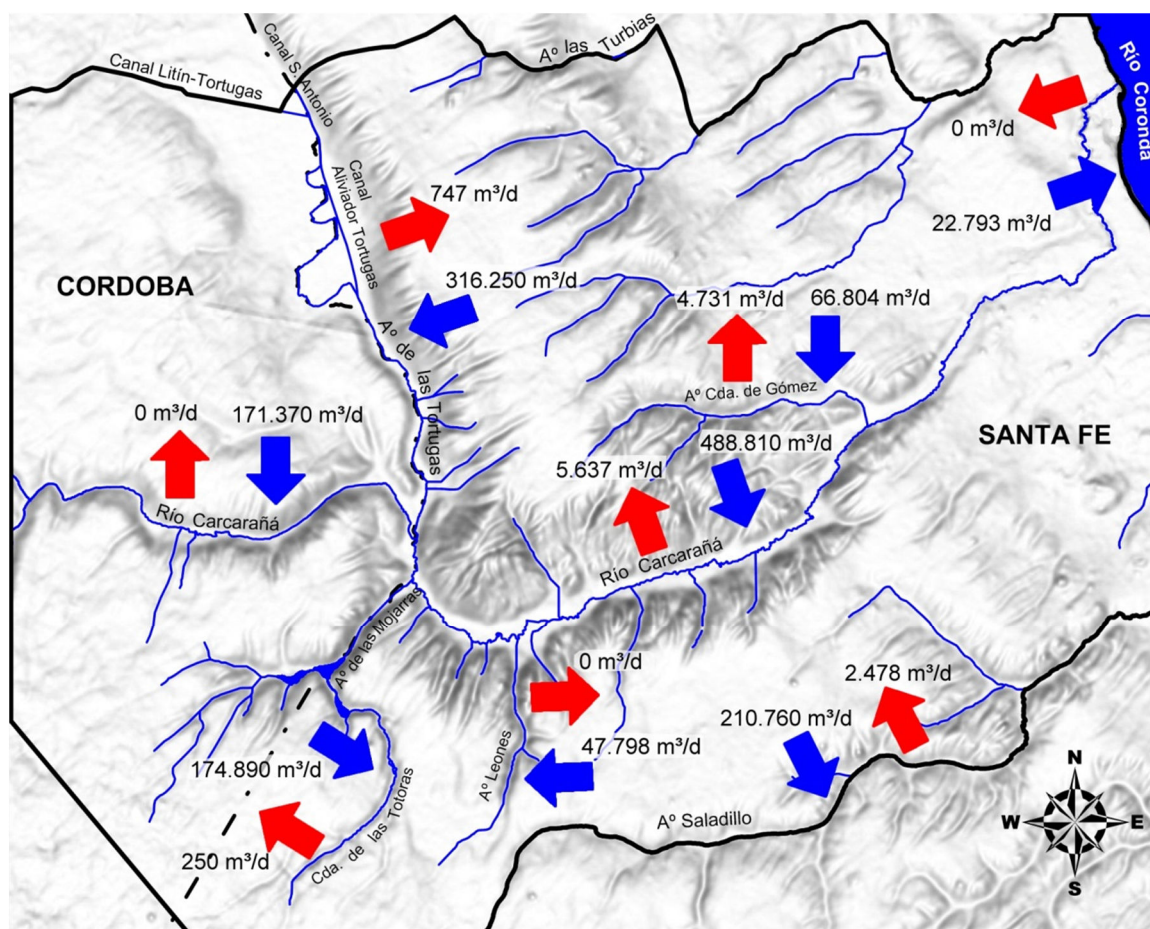


Figura 6.39 – Balance de masas correspondientes a los principales cursos de agua. Las flechas de color rojo indican salidas de flujo del curso, mientras que las de color azul representan entradas al mismo.

El resto de los cursos de agua del área de estudio tienen un ingreso de flujo global de 356.260 m³/d y un egreso de 7.483 m³/d, manteniéndose el comportamiento efluente respecto al sistema acuífero.

6.3.6. Caudales base de cursos de agua

A partir del balance de masas es posible determinar el caudal base en la zona de estudio de los principales cursos de agua presentes en la misma y que se presentan en la Tabla 6.7.

Es importante aclarar que los caudales base obtenidos de la modelación se deben exclusivamente al balance de masas correspondiente a la zona de modelación. Solo se obtendrá el caudal base real en aquellos cursos cuya cuenca total esté totalmente dentro de los límites de dicha zona.

En el área de modelación se encuentran la cuenca completa del arroyo Cañada de Gómez, poco menos de la mitad de la cuenca del arroyo Saladillo, aproximadamente, y gran parte de la cuenca del arroyo Tortugas (con su canal aliviador y el canal Litín Tortugas).

Los caudales base obtenidos en la simulación son satisfactorios, no solo por estar cerca de los valores reales sino también por la relación que guardan entre sí los caudales base de los tres cursos en cuestión (Zimmermann, *com. pers.*; SSRH, 2017a, 2017b).

Tabla 6.7 – Caudales base de los principales cursos de agua

Curso	Q _{base} (m ³ /s)	Q _{base} medido	
		Q (m ³ /s)	Fuente
Río Carcarañá en prov. de Santa Fe	14,52	51,10 20-40	SSRH (2017b) Zimmermann, <i>com. pers.</i>
Río Carcarañá en prov. de Córdoba	1,98	16,10	SSRH (2017b)
Río Coronda	0,26	s/d	s/d
A° Cañada de Gómez	0,72	< 1-5	Zimmermann, <i>com. pers.</i>
A° de las Tortugas Canal Aliviador Tortugas Canal Litín-Tortugas	3,65	4,77 1-5	SSRH (2017b) Zimmermann, <i>com. pers.</i>
A° Saladillo Cda. Candelaria	2,41	4,40 1-5	SSRH (2017b) Zimmermann, <i>com. pers.</i>
A° de las Mojaras	2,02	s/d	s/d
A° Leones	0,55	s/d	s/d
Resto cursos de agua	4,04	---	---

Las cuencas del arroyo de las Mojaras y del arroyo Leones también se encuentran en su totalidad dentro del área del modelo, pero no se tienen datos de caudales base calculados reales de los mismos como para cotejar.

6.4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

El análisis de sensibilidad es el proceso mediante el cual, a través del cambio de un solo parámetro (dentro de un rango de variación razonable y realista), se analizan la modificación en los resultados del modelo respecto a aquel obtenido con el modelo calibrado. El propósito de esta actividad es analizar la sensibilidad de los resultados de las simulaciones con el modelo por la incerteza cuantitativa de los parámetros y poder así determinar cuáles parámetros son los que tienen mayor incidencia en los resultados. Aquellos en que el modelo se muestre menos sensible requerirán de una futura caracterización y determinación más exhaustiva, contrariamente a aquellos en que el modelo se muestra más sensible.

El análisis de sensibilidad se realizó de forma manual cambiando un solo parámetro por vez, y ejecutando el modelo, obteniendo nuevos valores de niveles freáticos y piezométricos, como así también de flujos para posteriormente evaluar los resultados del modelo a través de estadísticos.

Los parámetros elegidos para este análisis fueron las conductividades hidráulicas y las recargas, haciéndolas variar dentro un rango porcentual de $\pm 20\%$ con un incremento $\Delta\% = 10\%$ y el estadístico adoptado para evaluar los cambios fue el RMA.

Con respecto a las conductividades hidráulicas se procedió, en un primer estudio general, a analizar los errores en los niveles por capa del modelo provocado por el cambio de las conductividades hidráulicas de cada capa en cuestión, para luego realizar un segundo análisis de sensibilidad más local o particular basado el estudio de tres zonas geográficas específicas del modelo.

Las figuras 6.40 y 6.41 muestran para los acuíferos libre y semiconfinado, respectivamente, los valores obtenidos del RMA para las variaciones de las conductividades hidráulicas de las 3 capas del modelo y de la recarga.

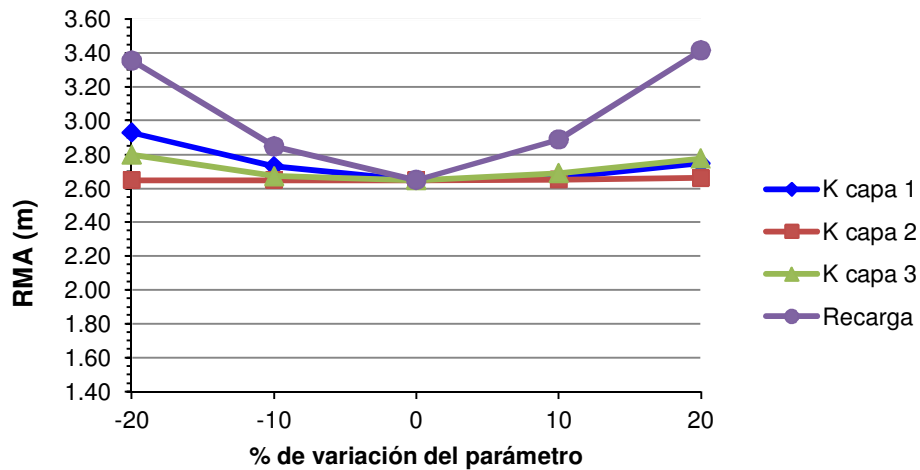


Figura 6.40 – Acuífero libre. Análisis de sensibilidad de los niveles respecto a las conductividades hidráulicas y de la recarga.

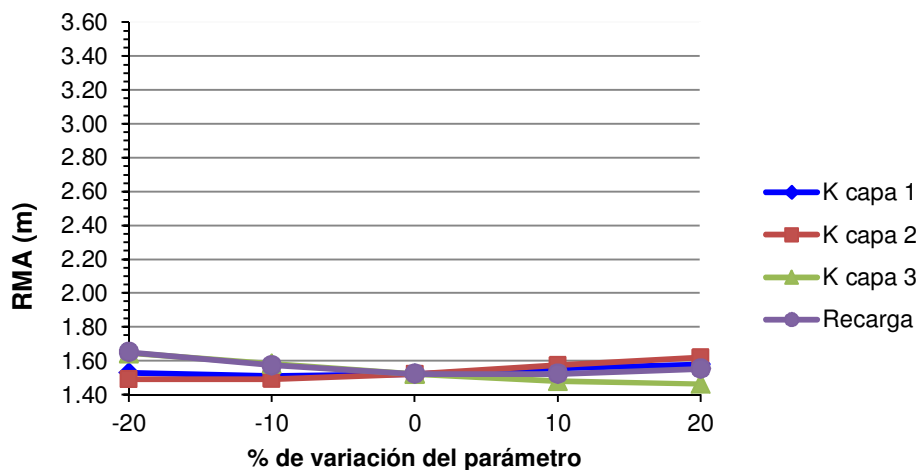


Figura 6.41 – Acuífero semiconfinado. Análisis de sensibilidad de los niveles respecto a las conductividades hidráulicas y de la recarga.

La Figura 6.40 muestra que la recarga es el parámetro donde el modelo se mostró más sensible, a diferencia de la consistencia que presentaron las conductividades del acuitardo (capa 2) respecto a la respuesta del modelo ante su variabilidad. Las conductividades hidráulicas del acuífero libre (capa 1) fueron un poco más consistentes que las del semiconfinado (capa 3), aunque a partir de valores mayores a los de calibración, los resultados en ambos fueron prácticamente iguales.

Con respecto al acuífero semiconfinado (Figura 6.41) los resultados fueron distintos a los obtenidos para el acuífero libre ya que el modelo se mostró sensible para cada uno de los cuatro parámetros. Una disminución del 10% en las conductividades hidráulicas de la capa 1 da lugar a una disminución del RMA obtenido para la situación calibrada, no así para otros incrementos o decrementos. En cuanto a la conductividad hidráulica de la capa 2, toda disminución aplicada a dicho parámetro redujo el RMA, no así para todo incremento de la misma. Un comportamiento

totalmente opuesto ocurrió para la conductividad hidráulica de la capa 3. Respecto a la recarga, todo aumento o disminución de la misma arrojó mayores valores del RMA, por lo que los valores de recarga empleados durante el proceso de calibración están muy cerca de los óptimos.

Es importante recordar para el acuífero semiconfinado la ubicación de los pozos de observación, ya que prácticamente se encuentran todos localizados en la cañada de San Antonio. Por ello se planteó realizar un análisis de sensibilidad más local en la Depresión de la cañada de San Antonio, en el resto de la zona de estudio correspondiente a la provincia de Córdoba y en el Bloque de San Guillermo (Figura 6.42). Esto se llevó a cabo variando las conductividades hidráulicas de las capas 1 y 2. El criterio de esta elección se basa en la nula o escasa información de ensayos de bombeo y la consecuente obtención de datos de conductividad hidráulica en la provincia de Córdoba y del acuitardo en la zona de estudio.

En la provincia de Córdoba, y para el acuífero libre como el semiconfinado, el modelo se mostró poco sensible para las conductividades hidráulicas de las capas 1 y 2, en donde una disminución de las mismas mejoró algo los valores del RMA (mejor capa 1 que capa 2). El comportamiento de la conductividad hidráulica de la capa 3 demostró mayor sensibilidad, evidenciando que el valor de la conductividad hidráulica calibrada está cercano a la óptima. Para el acuífero semiconfinado el modelo también fue muy sensible a la variabilidad de la conductividad hidráulica de la capa 3 y muy poco sensible para el resto de las capas, cuyas variaciones en los valores del RMA son menores a 0,05 m.

En la cañada de San Antonio el modelo se comportó para el acuífero libre muy poco sensible tanto para las conductividades hidráulicas de las capas 1 y 2, a diferencia de la capa 3 donde el modelo fue notoriamente más sensible. Para el acuífero semiconfinado el modelo fue muy sensible a las conductividades hidráulicas de las tres capas, siendo el comportamiento de las capas 1 y 2 muy similares. Al decrecer los valores de conductividades hidráulicas respecto a los de calibración el RMA mejora. Las conductividades hidráulicas de la capa 3 se comportaron de manera opuesta a las anteriores.

En el Bloque de San Guillermo el modelo se comportó de manera insensible a la conductividad hidráulica de la capa 2, a diferencia de las capas 1 y 3. Al disminuir los porcentajes de variabilidad de la conductividad hidráulica de la capa 1, empeoraron los valores obtenidos del RMA, a diferencia de si aumentan. Para el acuífero semiconfinado, el modelo se comportó de manera casi

insensible a las conductividades hidráulicas de las capas 1 y 2, cuyos comportamientos son muy similares, a diferencia de la incidencia de la conductividad hidráulica de la capa 3, donde el modelo se mostró mucho más sensible.

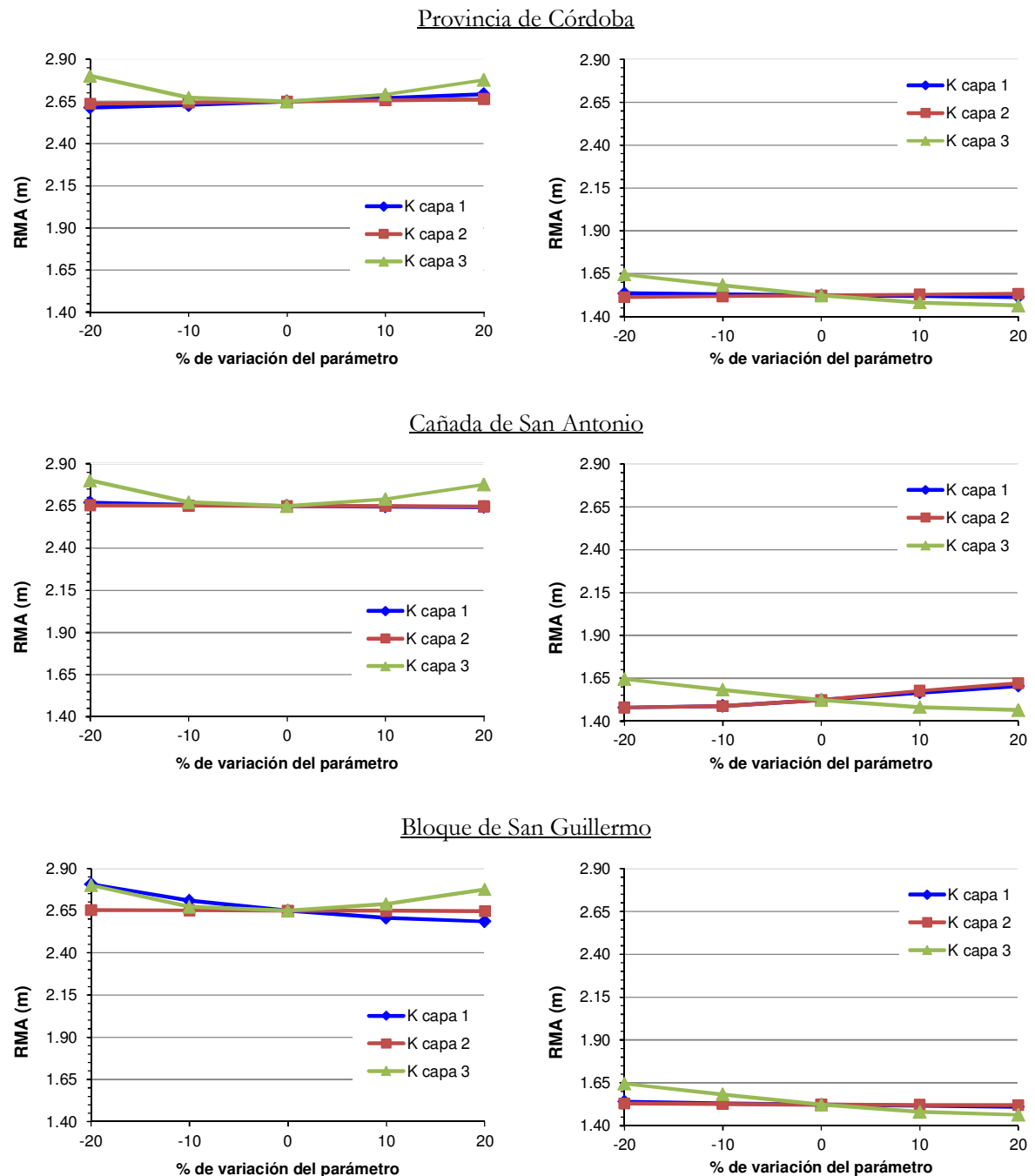


Figura 6.42 – Análisis de sensibilidad de las conductividades hidráulicas del acuífero libre (columna izquierda) y semiconfinado (columna derecha) en la provincia de Córdoba, cañada de San Antonio y del bloque de San Guillermo.

A través del balance de masas se analizó la relación entre la recarga y los flujos salientes (fundamentalmente) y entrantes del sistema acuífero hacia y desde los cursos de agua. El análisis

de sensibilidad de las recargas se realiza dentro un rango porcentual de $\pm 20\%$ con un $\Delta\% = 10\%$ y teniendo como objetivo evaluar las variaciones de flujo sistema acuífero-río. Esto se hizo en forma porcentual respecto a los obtenidos durante la calibración, y a través de la relación existente entre los flujos entrantes y salientes de los cursos de agua.

La Figura 6.43 muestra que a medida que disminuyeron las recargas aplicadas en el modelo, los flujos salientes desde el sistema acuífero hacia los cursos de agua disminuyeron. Mientras un 20% de disminución de las recargas implicó, aproximadamente, un 18% menos de salida de flujo del sistema hacia los cursos y un 80% más de ingreso al mismo, un aumento de las recargas del orden del 20% significó, aproximadamente, un 19% más de salida de flujo y un 36% menos de ingreso al sistema.

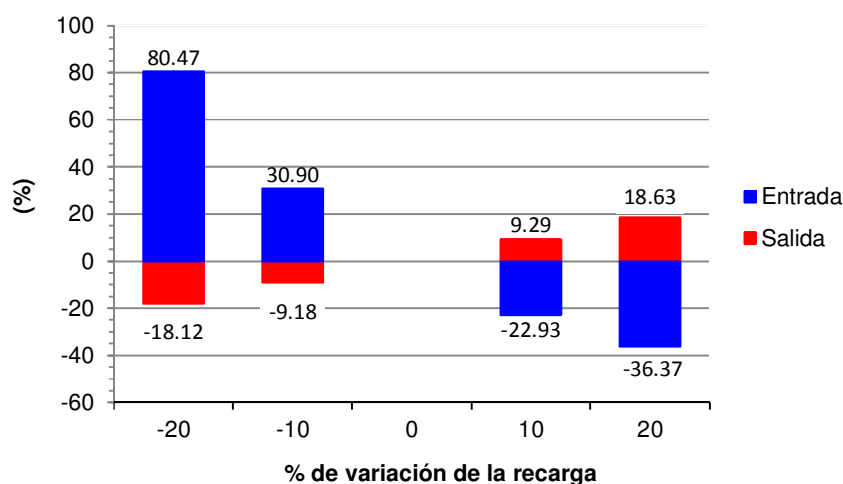


Figura 6.43 – Variación porcentual de los flujos entrantes y salientes del sistema acuífero hacia los cursos de agua respecto a los obtenidos durante la calibración al variar la recarga.

En la Figura 6.44 se observa para los cursos de agua la relación flujo entrante (Q_E) vs. flujo saliente (Q_S) en función de la variación de las recargas.

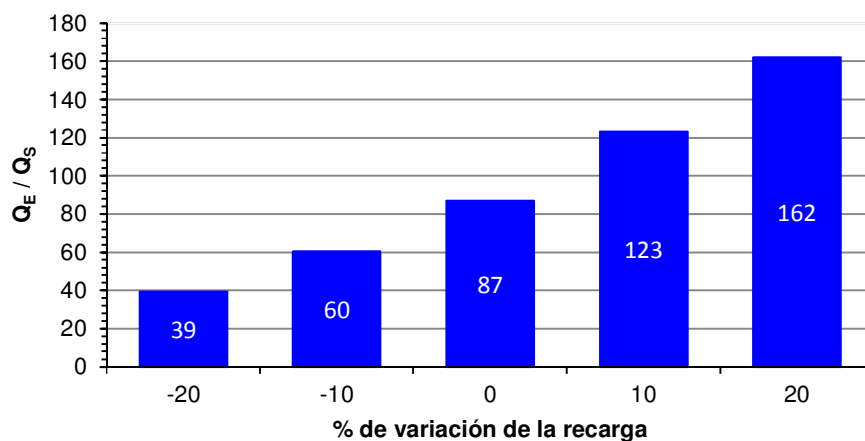


Figura 6.44 – Relación del flujo entrante respecto del saliente en los cursos de agua debido a la variabilidad de la recarga.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

De este trabajo se pueden destacar las siguientes conclusiones,

- Se definió un modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico regional del sistema acuífero en la cuenca inferior del río Carcarañá, el cual fue validado mediante la simulación numérica de flujo de agua subterránea.
- El modelo geológico del subsuelo del sistema acuífero estudiado, se definió en base a la estratigrafía y sedimentología como a los procesos geológicos intervinientes en la génesis de los sedimentos. El modelo quedó constituido por cuatro unidades, cada una de ellas heterogénea tanto en horizontal como en vertical.
- Se obtuvo un mapa de recargas de detalle para el área de estudio. Para el cálculo del valor de la recarga se desarrolló un programa de balance hídrico seriado que contempla las distintas variables involucradas, pudiendo obtener valores de recarga diarios, mensuales y anuales.
- La freaticimetría obtenida mediante la calibración en estado estacionario fue satisfactoria, reproduciendo los patrones de la dinámica de escurrimiento del flujo subterráneo inferidas por la freaticimetría base.
- El modelo numérico quedó definido por tres capas. A pesar de existir heterogeneidades en la conductividad hidráulica de las formaciones, principalmente en la primera y última capa (acuífero libre y semiconfinado, respectivamente), la zonificación de la conductividad hidráulica en la capa 1 y 2 es variable definida por la geología-estructura, y en cambio en la tercer capa es tratada como una única zona de conductividad hidráulica. En cada zona de conductividad hidráulica esta propiedad es homogénea tanto horizontal como vertical y con anisotropía en vertical ($k_x=k_y \neq k_z$).
- Los parámetros hidráulicos obtenidos para las tres capas del modelo mediante el proceso de calibración, resultaron semejantes y en el orden de los valores referenciales, ya sea que fueran obtenidos a través de ensayos de bombeo como de trabajos a escala local realizados en la

zona de estudio. Para algunos de ellos fue importante considerar los antecedentes geológicos recientes de las unidades que componen el modelo conceptual.

- La bondad del ajuste entre valores freáticos y piezométricos, observados y calculados, se efectuó a través del cálculo de cuatro estadísticos y los resultados obtenidos fueron muy buenos. El RMA en el acuífero libre fue de 2,64 m y en el semiconfinado de 1,52 m, por debajo de los 3 m adoptados como margen de error en los valores observados en campo, y el coeficiente E para el acuífero libre arrojó un valor de 0,96 contra 0,87 para el acuífero semiconfinado. De igual manera, los mapas de residuos muestran un excelente ajuste.
- Del balance de masas global del sistema acuífero, se evidencia que prácticamente la totalidad de la recarga que ingresa al sistema se destina a conformar el caudal base de los cursos de agua, por lo que éstos representan una importante salida de flujo del sistema.
- El comportamiento de los cursos de agua es efluente respecto al sistema, ya que extraen del mismo $1.855.741 \text{ m}^3/\text{d}$ y aportan solo $21.327 \text{ m}^3/\text{d}$.
- Mediante el balance de masas se analizó el flujo entre las capas. En la zona de estudio se evidencian flujos ascendentes y descendentes a través del acuitardo, provenientes de ambos acuíferos, evidenciando la conexión hidráulica entre ellos. Los cursos de agua reciben la descarga del acuífero semiconfinado, observándose en el modelo numérico el flujo ascendente desde dicho acuífero hacia el libre debido a una diferencia piezométrica positiva y de éste hacia los cursos de agua. La descarga regional, no solo se da hacia el río Coronda y Paraná de manera directa, sino a través del caudal base de los cursos de agua y arroyos, al cual el acuífero semiconfinado contribuye, a través del acuitardo, y teniendo al paquete sedimentario cuaternario como unidad de tránsito.
- Los caudales base de los cursos de agua obtenidos por el modelo numérico dieron valores coherentes, no solo porque los valores obtenidos están próximos a los caudales reales aproximados obtenidos a través de consultas personales, sino también en la relación que guardan entre ellos.
- El análisis de sensibilidad efectuado a nivel general en el modelo indicó que, haciendo variar las conductividades hidráulicas de las tres capas del modelo y las recargas, esta última fue el

parámetro donde el modelo se mostró más sensible, al mismo tiempo que los mayores valores del RMA para dichos parámetros correspondieron al acuífero libre, indicando esto que el modelo numérico requiere una mejor definición en las conductividades hidráulicas y valoración de las recargas en el acuífero libre que en el semiconfinado a fin de disminuir los valores del RMA. El análisis de sensibilidad efectuado a nivel local (provincia de Córdoba, Depresión de la cañada de San Antonio y Bloque de San Guillermo), indicó que el modelo se mostró sensible a la conductividad hidráulica del acuífero semiconfinado, y en menor grado para las del acuífero libre y del acuitardo. Durante el proceso de calibración se llegó a la conclusión de que para mejorar el ajuste de los residuos en el acuífero semiconfinado en dicha cañada, los sedimentos presentes en ambas capas debían ser más permeables y/o manejar otras relaciones de anisotropía. Esto llevó a buscar más información de antecedentes de trabajos sobre esta zona en particular, la cual validó dicha hipótesis debido a la referencia del hallazgo de una unidad arenosa fluvial a partir de una perforación de investigación efectuada en dicha depresión del acuífero libre, como así también a procesos erosivos de origen fluvial que habrían erosionado parte del acuitardo .

- A través de un análisis de sensibilidad de la recarga para evaluar la interacción sistema acuífero – cursos de agua, se evidenció que al disminuir las recargas un 20%, las salidas de flujo del sistema hacia los cursos decrecen un 18%, aproximadamente, y el sistema acuífero tiene un 80% más de ingreso desde los cursos de agua. Por el contrario, un aumento de las recargas del orden del 20% significa, aproximadamente, un 19% más de salida de flujo y un 36% menos de ingreso desde los cursos de agua. Se observa un claro comportamiento influente de los cursos de agua en el primer caso, y efluente en el segundo.

RECOMENDACIONES

Con el objetivo de mejorar este trabajo y robustecer los modelos geológico, hidrogeológico y numérico se recomiendan las siguientes actividades,

- Ampliar el conocimiento geológico e hidrogeológico de la provincia de Córdoba correspondiente a la zona de estudio y del sector este de la misma en la provincia de Santa Fe, teniendo de apoyo datos de perforaciones profundas confiables en su descripción geológica, que brinden caracterización formacional de los sedimentos involucrados y ubicación de acuíferos. Además, es necesario contar con datos de ensayos de bombeo a la hora de tener

referencias de conductividades hidráulicas, las cuales no pudo contarse para el presente trabajo.

- Mejorar el conocimiento de las heterogeneidades litológicas de carácter acuitado que se encuentran a nivel local en las capas del modelo. Para ello será necesario implementar una base de datos de perforaciones profundas confiables, y proyectar la realización de nuevas estratégicamente distribuidas en la zona, especialmente cerca de centros urbanos. Éstas deberán ser efectuadas por personal idóneo, tarea en las cuales el rol del geólogo será fundamental a la hora de identificar y describir las distintas formaciones geológicas. La ubicación de los distintos acuíferos que se encuentren y un análisis hidroquímico detallado adquirirán principal importancia para poder plantear un plan de gestión de uso del agua y explotación sustentable de los acuíferos que sean aptos para consumo y riego complementario para agricultura en períodos de sequía.
- Implementar en la zona de estudio una red de frentímetros para tener de esta manera un mejor conocimiento de la respuesta del acuífero libre en relación a los eventos de lluvias.
- Generar para la zona de estudio una base de datos sistematizada de variables meteorológicas para la elaboración de los balances hídricos, teniendo como fuente organismos oficiales y privados, como estancias, teniendo la precaución para éstas de contar con personal calificado a la hora de llevar a cabo las lecturas. Si bien las reparticiones oficiales como el INTA, por ejemplo, están instalando cada vez más estaciones meteorológicas remotas, la extensión de la zona es amplia y es necesario contar con la mayor cantidad posible de fuentes de datos distribuidas en ella, para reducir al mínimo el problema que conlleva la variabilidad espacial, como es el caso de las precipitaciones.
- Dada la importancia que tiene la recarga en este estudio hidrogeológico, se aconseja implementar en el área de estudio (cuenca inferior del río Carcarañá y aledaños) una red de lisímetros para cuantificar las evapotranspiraciones y ajustar la metodología de cálculo para los balances hídricos que tendrán como objetivo el cálculo de recargas.
- Incorporar el cálculo de la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c) empleando el coeficiente de cultivo (K_c), a los efectos de distinguir el tipo de cultivo y anexarle a los balances hídricos las estrategias de rotación de especies durante el año.

- Llevar a cabo mediciones de infiltración en campo que sirvan de apoyo al cálculo de recargas a través de los balances hídricos.
- Ajustar los valores del CN en función de caudales aforados y volúmenes medidos para distintos eventos, y realizar con ellos un mapa zonal con el soporte que brinda la Geomática.
- Realizar aforos de los cursos de aguas, particularmente en épocas de estiaje para obtener así caudales bases reales, y así poder contrastarlos con los que calcule el modelo numérico.
- Considerando este trabajo como una primera etapa, se propone continuar el mismo y llevar a cabo una modelación en régimen transitorio, incorporando las captaciones por bombeo realizadas para consumo en las localidades de la zona de estudio, con el objeto de analizar la variabilidad temporal de las recargas y calibrar los distintos coeficientes de almacenamiento, pudiendo llegar durante el proceso, incluso, a tener que ajustar los modelos conceptual y numérico obtenidos en el presente trabajo, ayudando así a disminuir la incertidumbres involucradas durante el proceso de construcción de los citados modelos.
- Evaluar el impacto en el sistema acuífero de las obras de acueductos en ambas provincias, algunos de los cuales ya se encuentran operativos y otros en ejecución de las primeras etapas constructivas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acutis, M. y Donatelli, M. (2003). SOILPAR 2.00: software to estimate soil hydrological parameters and functions. Short communication. *Europ. J. Agronomy*, 18, 373-377.
- Adams, J. C., Brainerd, W. S., Martin, J. T., Smith, B. T. y Wagener, J. L. (1992). *Fortran 90 Handbook. Complete ANSI/ISO Reference*. New York, NY: Intertext Publications, McGraw-Hill Book Company.
- Alexandris, S., Stricevic, R. y Petkovic, S. (2008). Comparative analysis of reference evapotranspiration from the surface of rainfed grass in central Serbia, calculated by six empirical methods against the Penman-Monteith formula. *European Water*, 21/22, 17-28.
- Ali, A. (2011). *General Purpose Water Accounting Reports: Groundwater methodologies*. Sydney, Australia: NSW Office of Water.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. y Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. FAO Publicación Serie Riego y Drenaje 56. Roma, Italy: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Almorox, J. (2010). *Balance Hídrico*. [Apunte del curso "Climatología aplicada a la Ingeniería y Medioambiente"]. Ingeniería Agroforestal. Departamento de Edafología, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.
- Almorox, J., Hontoria, C. y Benito, M. (2008). Comparación de algunos métodos de estimación de la evapotranspiración en Uruguay. *Ingeniería Química Uruguay*, 33, 4-9.
- Anderson, M. P. y Woessner, W. W. (1992). *Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport* (Vol. 4). San Diego, CA: Academic Press Elsevier.
- Andriani, J. (2009). Constantes hídricas de los principales suelos agrícolas del sur de Santa Fe. *Para mejorar la producción*, 41, 51-54.
- APSF. (1996). *Estudios hidrogeológicos Ciudad de Cañada de Gómez – Informe*. Santa Fe. Argentina: Aguas Provinciales de Santa Fe.
- Ares, M. G., Chagas, C. y Varni, M. (2012). Predicción de la escorrentía y estimación de la humedad antecedente en una cuenca aforada. *Ciencia del Suelo* 30(2), 151-160.
- Auge, M. (2004a). *Regiones Hidrogeológicas. República Argentina y provincias de Buenos Aires, Mendoza y Santa Fe. La Plata, Rep. Argentina*. La Plata, Argentina: FCEN.
- Auge, M. (2004b). Vulnerabilidad de acuíferos. *Revista Latino-Americana de Hidrogeología*, 4, 85-103.
- Auge, M., Wetten, C., Baudino, G., Bonorino, G., Gianni, R., González, N., Grizinik, M., Hernández, M., Rodríguez, J., Sisul, A., Tineo, A. y Torres, C. (2006). Hidrogeología de Argentina. *Boletín Geológico y Minero*, 117(1), 7-23.
- Baraquet, M., Liendo, G., Alvarez, J., Guillén, N. y García, C. M. (2017). *Análisis de incertidumbre relacionada a la extrapolación de curvas altura-caudal (H-Q)*. Ponencia presentada en el VIII Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos, Córdoba, Argentina.
- Barchiesi, G., Díaz Lozada, J. M., Caminal, F., Herrero, H., García, M., Cossavella, A., Castello, E., Romagnoli, M. y Portapila, M. (2013). *Cuantificación y Caracterización del Esguerrimiento en la Cuenca del río Carcarañá*. Ponencia presentada en el VI Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos, Santa Fe, Argentina.

- Basile, P., Riccardi, G., Zimmermann, E., Stenta, H., Bussi, P. y Mangiamelli, P. (2013). Aprovechamiento del río Carcarañá-Tercero como vía fluvial navegable. Parte I: Diseño del sistema de transporte y de la vía fluvial. *Revista Cuadernos del CURIHAM*, 19, 51-69.
- Bellon, C. A., Calcagno, J. E., Ipucha Aguerre, J., Prego, A. J., Quevedo, C. V. y Tallarico, L. A. (1958). *La erosión del suelo en la cuenca occidental del Carcarañá*. Publicación N° 57. Instituto de Suelos y Agrotecnia. Buenos Aires, Argentina: INTA.
- Bianchi, A. R. y Cravero, S. A. C. (2010). *Atlas Climático Digital de la República Argentina*. Estación Experimental Agropecuaria Salta, Centro Regional Salta Jujuy. Salta, Argentina: INTA.
- Bitesnik, H. O. (1968). Descripción Hidrogeológica de la región de Marcos Juárez (provincias de Córdoba y Santa Fe). *Boletines del Instituto Nacional de Geología y Minería*, 115, pp. varias. Buenos Aires, Argentina: Instituto Nacional de Geología y Minería.
- Bitesnik, H. O. (1970). Descripción Hidrogeológica de la región de El Trébol (provincia de Santa Fe). *Boletines de la Dirección Nacional de Geología y Minería*, 120, pp. varias. Buenos Aires, Argentina: Dirección Nacional de Geología y Minería.
- Blanco Andray, A., Martínez Ramírez, S. y Cisneros Cisneros, C. (1998). Un modelo de balances hídricos para cuencas hidrográficas: discusión, propuesta y aplicaciones. *Temas de Ciencia y Tecnología*, 6, 11-20.
- Blarasin, M., Cabrera, A. y Degiovanni, S. (2000). *Hidrogeología regional: el agua subterránea como recurso fundamental del sur de la provincia de Córdoba, Argentina*. Ponencia presentada en el I Congreso Mundial Integrado de Aguas Subterráneas, XI de la Asociación Brasileira de Aguas Subterráneas (ABAS) y V de la Asociación Latinoamericana de Hidrología Subterránea para el desarrollo (ALHSUD). Fortaleza, Brasil.
- Blarasin, M., Cabrera, A. y Matteoda, E. (2014). *Aguas subterráneas de la Provincia de Córdoba*. Río Cuarto, Argentina: UniRío Editora. Disponible en: <https://www.unrc.edu.ar>.
- Bojanich, E. y Risiga, A. H. (1975). *Contribución al conocimiento de la geohidrología de la Provincia de Santa Fe*. Ponencia presentada en el II Congreso Iberoamericano de Geología Económica (5, pp. 37-59). Buenos Aires, Argentina.
- Bojanich, E. y Risiga, A. H. (1981). Aguas Subterráneas de la Provincia de Santa Fe. En GAEA (Eds.), *Estudios de Geografía de la provincia de Santa Fe. Homenaje al Dr. Alfredo Castellanos*. Serie Especial 9 (pp. 71-101). GAEA, Sociedad Argentina de Estudios Geográficos.
- Botey, R. y Moreno, J. V. (2012). *Metodología para estimar la humedad del suelo mediante un balance hídrico exponencial diario (Balance Hídrico 2)*. Área de Climatología y Aplicaciones Operativas (AEMET). Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Madrid, España.
- Botey, R., Pérez-Arias, J. y Moreno, J. V. (2011). Estimación del contenido de agua del suelo mediante el balance hídrico exponencial diario y comparación con medidas in situ en un typic haploxeralf en la zona centro (Madrid - España). *Estudios en la Zona no Saturada del Suelo*, 10, 303-308.
- Brunetto, E. e Iriondo, M. (2007). Neotectónica en la Pampa norte (Argentina). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 20 (1-2), 17-29.
- Brunetto, E., Iriondo, M., Zamboni, L. y Gottardi, G. (2010). Quaternary deformation around the Palo Negro area, Pampa Norte, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, 29, 627-641.

- Brunetto, E., Noriega, J. I. y Brandoni, D. (2013). Sedimentología, Estratigrafía y Edad de la Formación Ituzaingó en la provincia de Entre Ríos, Argentina. En: Brandoni, D., Noriega, J. I. (Eds.), *El Neógeno de la Mesopotamia argentina*, Publicación Especial 14 (pp. 7-21). Buenos Aires: Asociación Paleontológica Argentina.
- Brunetto, E., Kröhling, D. y Francisconi, C. (2014). *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*. Ponencia presentada en el XIX Congreso Geológico Argentino, Córdoba, Argentina.
- Brunetto, E., Sobrero, F. S. y Gimenez, M. E. (2017a). Quaternary deformation and stress field in the Río de la Plata Craton (Southeastern South America). *Journal of South American Earth Sciences*, en prensa.
- Brunetto, E., Krohling, D., Zalazar, M. C. y Francisconi, M. C. (2017b). Analysis of the interaction between neotectonic and surface processes in a low-land intracratonic setting of South America. *Quaternary International*, 438, 141-159.
- Burgués, M., Romagnoli, M., Portapila, M. y Saavedra, I. (2014). *Análisis de sensibilidad de parámetros de calibración de SWAT vinculados al uso de fertilizantes en la sub-cuenca del Arroyo Cañada de Gómez, Santa Fe*. Ponencia presentada en el II Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras, Santa Fe, Argentina.
- CAAS. (1973). *Llanura Pampeana (provincias de Córdoba y Santa Fe) - Hidrogeología. Recursos de agua subterránea y su aprovechamiento en la llanura pampeana y en el valle del Conlara (provincias de Córdoba, Santa Fe, San Luis; República Argentina)* (Vol. 2). Convenio Argentino-Alemán de Aguas Subterráneas.
- Carignano, C. A. (1999). Late Pleistocene to recent climate change in Córdoba Province, Argentina: Geomorphological evidence. *Quaternary International* 57/58. INQUA/Elsevier Science Ltd. pp 117-134.
- Carignano, C. A., Kröhling, D., Degiovanni, S. y Cioccale, M. A. (2014). Capítulo: Geomorfología. En R. Martino y A. Guerreschi (Eds.), *Relatorio del XIX Congreso Geológico Argentino – Geología y Recursos Naturales de la Provincia de Córdoba* (pp. 747-821). Córdoba: Asociación Geológica Argentina (AGA).
- Castellanos, A. (1918). Observaciones preliminares sobre el Pleistoceno de la provincia de Córdoba. *Boletín de la Academia Nacional de Ciencias de Córdoba*, 23, 232-254.
- Castellanos, A. (1928). Notas críticas sobre el Puelchense de los sedimentos Neógenos de la Argentina. *Revista de la Universidad Nacional de Córdoba*, año XV, 5-6.
- Castellanos, A. (1936). Breve reseña sobre estratigrafía pampeana de Santa Fe. En *Sus amigos a Lucas Kraglievich – In Memoriam*, 27-36. Buenos Aires.
- Castellanos, A. (1974). Las ingresiones y regresiones marinas en el Terciario y Cuartario de la Argentina. *Boletines de la Filial Rosario de la Sociedad Argentina de Estudios Geográficos GAEA*, 8, 4-7.
- Castellarín, J., Sánchez, J., Herrera, L., Casiello, F., Venencio, M. del V. y Papa, J. C. (2013). Caracterización de la sostenibilidad socio-productiva y ambiental en áreas representativas de la cuenca del río Carcarañá, en el sur de la provincia de Santa Fe. En: Nilda González, Eduardo E. Kruse, María Marta Trovatto y Patricia Laurencena (Eds.), *Agua subterránea recurso estratégico - Tomo I* (pp. 330-333). La Plata: EULP.
- CGIAR-CSI (2008). *SRTM 90m Digital Elevation Data Version 4*. CGIAR Consortium for Spatial Information. Consultative Group on International Agricultural Research. Disponible en: <http://srtm.csi.cgiar.org/>

- Chivers, I. D. y Sleightholme, J. (2006). *Introduction to Programming with Fortran (with Coverage of Fortran 90, 95, 2003, and 77)*. London: Springer-Verlag.
- CIM. *Centro de Información Meteorológica*. Servicio Meteorológico Nacional. Secretaría de Planeamiento, Ministerio de Defensa, Argentina.
- Costa, C. H., Massabie, A. C., Sagripanti, G. I., Brunetto, E. y Coppolecchia, M. (2014). Capítulo: Neotectónica. En R. Martino y A. Guerreschi (Eds.), *Relatorio del XIX Congreso Geológico Argentino – Geología y Recursos Naturales de la Provincia de Córdoba* (pp. 725-746). Córdoba: Asociación Geológica Argentina (AGA).
- Cravero, S. A. C., Bianchi, C. L., Elena, H. J. y Bianchi, A. R. (2017). *Clima de la Argentina Mapas digitales mensuales de precipitaciones y precipitación menos evapotranspiración potencial: adenda del Atlas Climático digital de la República Argentina*. Salta: INTA.
- CURIHAM (2011). *Desarrollo de tecnología de gestión para la identificación y evaluación de conflictos relacionados con la gestión sustentable del recurso hídrico*. Proyecto de investigación ING339. CURIHAM, FCEIA, UNR. Rosario, Argentina.
- Custodio, E. y Llamas, M. R. (1983). *Hidrología subterránea*. Tomos I y II (2ª Ed.). Barcelona: Omega S.A.
- Damiano, F. y Taboada, M. (2000). Predicción del agua disponible usando funciones de pedotransferencia en suelos agrícolas de la región pampeana. *Ciencia del Suelo* 18(2), 77-88.
- Díaz Lozada, J. M., García, C. M., Herrero, H., Barchiesi, G., Romagnoli, M., Portapila, M., López, F., Castelló, E., Cosavella, A. y Brarda, J. P. (2015). Cuantificación del escurrimiento superficial de la cuenca del Río Carcarañá. *Revista Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, UNC*, 2(1), 59-72.
- Díaz, E. L. y Dalla Costa, O. A. (2000). El aporte de la prospección eléctrica al estudio hidrogeológico para el abastecimiento de agua potable al sur de la provincia de Santa Fe. República Argentina. En Olmo M. Alarcón; J. A. López Geta, *Actualidad de las Técnicas Geofísicas aplicadas en Hidrogeología* (pp. 151-156). Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.
- DNEC. (s.f.). *Censo Nacional de Población 1960. Tomo IV Zona central – Córdoba y Santa Fe*. Poder Ejecutivo Nacional. Secretaría de Estado y Hacienda. Dirección Nacional de Estadística y Censos. Argentina, 1-286.
- DPOH-INA (2002). *Recopilación de información hidrogeológica provincia de Santa Fe*. Convenio DPOH-SPAR e INA-CRL. Argentina.
- FCEIA-CIFASIS (2015). *Evaluación de los efectos del uso intensivo del suelo sobre el recurso hídrico en la cuenca baja del río Carcarañá*. Proyecto de investigación ING493. Escuela de Ingeniería Civil/CIFASIS, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, UNR.
- Filí, M. F., Díaz, E. L. y Dalla Costa, O. C. (1999). *Modelo Hidrogeológico conceptual de la relación entre los acuíferos Pampeano y Puelche en un sector del sur de la Provincia de Santa Fe. República Argentina*. Ponencia presentada en el II Congreso Nacional de Hidrogeología, Santa Fe, Argentina.
- Filí, M. F. y Tujchneider, O. C. (1977). Características geohidrológicas regionales del subsuelo de la provincia de Santa Fe (Argentina). *Revista de la Asociación de Ciencias Naturales del Litoral*, 8, 105-113.
- Fisher, D. K. y Pringle III, H. C. (2013). Evaluation of alternative methods for estimating reference evapotranspiration. *Agricultural Sciences*, 4(8A), 51-60.
- Forestieri, C., Navarro, R., Ruggeri, P., Martín, S., Salama, V. y Policardo, G. (2013). *Implementación de medidas no estructurales en la cuenca del arroyo Ludueña - Ley 13.246*. Ponencia presentada en el XXIV Congreso Nacional del Agua, San Juan, Argentina.

- Frenguelli, J. (1928). Sobre un perfil geológico del río Carcarañá. *Publicaciones de la Facultad de Ciencias de la Educación, Sección de Historia y Geografía* 11(3), 101–130.
- Gardiol, M. R. (2015). Análisis de datos e información proporcionados por productores agropecuarios afectados por las crecidas del arroyo Las Turbias (Santa Fe). *Contribuciones Científicas GAEA*, 27, 109-117.
- GeoINTA. (2013). *Suelos de la República Argentina. Escala: 1:500.000*. Visor GeoINTA. Disponible en: <http://visor.geointa.inta.gob.ar/>
- GeoINTA. (2017). *Suelos de la provincia de Córdoba. Escala: 1:50.000*. Visor GeoINTA. Disponible en: <http://visor.geointa.inta.gob.ar/>
- Ghida Daza, C. y Sánchez, C. (2009). Zonas Agroeconómicas Homogéneas Córdoba. *Estudios socioeconómicos de la sustentabilidad de los sistemas de producción y recursos naturales*, 10. Buenos Aires: INTA.
- Giannini, F., Córdoba, M. A. y Mari, N. A. (2015). *Análisis multivariado de atributos de la calidad de agua del recurso hídrico subterráneo: agua para riego y consumo humano en la provincia de Córdoba*. Ponencia presentada en el XXV Congreso Nacional del Agua. Paraná, Entre Ríos, Argentina.
- Giorgi, R., Tosolini, R., Sapino, V., Villar, J., León, C. y Chiavassa, A. (2002). *Capacidad productiva de las tierras de la provincia de Santa Fe para uso agrícola y pasturas de alfalfa*. INTA – CR Santa Fe - Estación Experimental Agropecuaria Rafaela.
- Giorgi, R., Tosolini, R., Sapino, V., Villar, J., León, C. y Chiavassa, A. (2005). Zonificación agroeconómica de la provincia de Santa Fe. Delimitación y descripción de las zonas y subzonas agroeconómicas. *Publicación Miscelánea, 110*. Rafaela: INTA – CR Santa Fe - Estación Experimental Agropecuaria Rafaela. Disponible en <http://www.inta.gov.ar/rafaela>
- Giraud, L., Valdivia, C., Villarreal, R., Pons, D. y Alaniz, E. (2017). *Plan de adaptación de la subcuenca del arroyo Tortugas ante un escenario de cambio climático*. Ponencia presentada en el XXVI Congreso Nacional del Agua. Córdoba, Argentina.
- Giraut, M. A., Ludueña, S. G., Postiglioni, A. S., Rey, C., Dente, V. y Sol, I. (2002). *Atlas digital de los recursos hídricos superficiales de la República Argentina*. [CD-Rom]. Buenos Aires: SSRH – INA.
- GLCF (2008). *GeoCover collection* [en línea]. Global Land Cover Facility. Institute for Advanced Computer Studies and Department of Geography. University of Maryland. College Park, MD. Disponible en <http://www.landcover.org>.
- GSF (2018). *Acueductos*. Gobierno de Santa Fe. Disponible en <https://www.santafe.gov.ar>.
- Golin, A. S., Burgués, M. y Portapila, M. (2010). *Análisis y puesta en operación del modelo SWAT, para la predicción del impacto de prácticas agrícolas en cantidad de agua y sedimentos a nivel de cuenca*. Ponencia presentada en el I Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras. Azul, Buenos Aires, Argentina.
- Gollán, J. (h) y Lachaga, D. A. (1939). *Aguas de la Provincia de Santa Fe. Primera contribución a su conocimiento*. Publicación Técnica 12. Instituto Experimental de Investigación y Fomento Agrícola Ganadero. Departamento de Química Agrícola y Edafología, pp. 1-384.
- Gómez M. E. (1995). La formación pampeana en la llanura cordobesa. Delimitación de la línea de costa (primera aproximación) de la ingresión del entrerriano. *Publicaciones de ASAGAI*, Publicación Especial III, 232-254.

- Gómez, A., Vives, L., Rodríguez, L. y Cota, S. D. S. (2012). Importancia de la formulación del régimen temporal de flujo en el modelo numérico del Sistema Acuífero Guaraní. *Boletín Geológico y Minero*, 123 (3), 267-280.
- Gong, L., Xu, C., Chen, D., Halldin, S. y Chen, Y. D. (2006). Sensitivity of the Penman–Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in the Changjiang (Yangtze River) basin. *Journal of Hydrology*, 329, 620-629.
- Hämmerly, R. del C. (2001). *Modelación de la evapotranspiración con métodos de balance de agua*. Tesis Doctoral, Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina.
- Harbaugh, A. W. (2005). *MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey modular ground-water model – the Ground-Water Flow Process*. (USGS Techniques and Methods 6-A16). Reston, VA: USGS.
- Hargreaves, G. H. y Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Eng. in Agric.*, 1(2), 96-99.
- Hawkins, R. H., Ward, T. J., Woodward, D. E. y Van Mullem, J. A. (2009). *Curve Number Hydrology: State of the Practice*. Reston, VA: American Society of Civil Engineers.
- Hawkins, R. H., Ward, T. J., Woodward, D. E. y Van Mullem, J. A. (2010). *Continuing evolution of rainfall-runoff and the Curve Number precedent*. Ponencia presentada en el 2nd Joint Federal Interagency Conference, Las Vegas, NV, USA.
- Herrero, H., Díaz Lozada, J. M., García, C. M., Szupiany, R., Best, J. y Pagot, M. (2017). *Influencia de la diferencia de densidad de los tributarios en la hidrodinámica de una confluencia en curva*. Ponencia presentada en el VIII Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos. Córdoba, Argentina.
- Howard, K. W. F. y Lloyd, J. W. (1979). The sensitivity of parameters in the Penman evaporation equations and direct recharge balance. *Journal of Hydrology*, 41, 329-344.
- Huang, M., Gallichand, J., Wang, Z. y Goulet, M. (2006). A modification to the Soil Conservation Service curve number method for steep slopes in the Loess Plateau of China. *Hydrol. Process*, 20, 579-589.
- IGM. (1920-1960). *Colección: Cartas Topográficas y Planchetas de la República Argentina, escala 1:50.000*. Buenos Aires: Autor.
- IGN. (2011). *SIG-250. Sistema de Información Geográfica. Escala: 1:250.000* [en línea]. Instituto Geográfico Nacional. Argentina. Disponible en <http://www.ign.gob.ar/sig250>
- INDEC. (s.f.). *Censo Nacional de Población, Familias y Viviendas 1970*. Instituto Nacional de Estadística y Censos. Buenos Aires, Argentina, 1-112.
- INTA. *Sistema de Información y Gestión Agrometeorológica SIGA*. Disponible en: <http://siga.inta.gob.ar/#/>
- INTA. (1974-1988). *Colección: Cartas de Suelos de la República Argentina. Escala 1:50.000*. Buenos Aires, Rafaela y Córdoba: Autor.
- INTA. (1985a). *Técnicas de Conservación de Suelos. Prácticas conservacionistas para el Sector Este de la cuenca del Río Carcarañá*. Serie: Suelos y Agroclimatología 3. Marcos Juárez, Córdoba: Autor.
- INTA. (1985b). Aptitud de los suelos de la provincia de Santa Fe. *Publicación Miscelánea*, 32, 1-46.
- INTA. (1990). *Atlas de Suelos de la República Argentina escala 1:500.000 y 1:1.000.000*. Buenos Aires: Autor.

- INTA-RIAP. (s.f.). *Boletín informativo de la provincia de Córdoba*. Boletín Año I – N° 1. Red de Información Agroeconómica de la región Pampeana (RIAP).
- INTA-Aeroterra SA. (1995). *Atlas de Suelos de la República Argentina*. [CD Rom]. Buenos Aires: Fundación ArgenINTA.
- INTA-MAG. (1981). *Mapa de suelos de la Provincia de Santa Fe. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria* (Tomo 1). Rafaela y Castelar: Autores.
- Iriondo, M. (1987). Geomorfología y Cuaternario de la Provincia de Santa Fe (Argentina). *D'Orbignyana*, 4, 1-54.
- Iriondo, M. (1990). Map of the South American plains - Its present state. In J. Rabassa (Ed.) *Quaternary of South America and Antarctic Peninsula*, 6 (pp. 297-308). Rotterdam: A.A. Balkema Publishers.
- Iriondo, M. (1991). El Holoceno en el Litoral. *Comunicaciones del Museo Provincial de Ciencias Naturales "Florentino Ameghino"* (Nueva Serie), 3 (1), 1-40.
- Iriondo, M. (1994). Los climas cuaternarios de la región pampeana. *Comunicaciones del Museo Provincial de Ciencias Naturales "Florentino Ameghino"* (N: S), 4(2), 1-48.
- Iriondo, M. (2010). *Geología del Cuaternario en Argentina*. Museo Provincial de Ciencias Naturales "Florentino Ameghino". Corrientes, Argentina: Ediciones Moglia.
- Iriondo, M. (2011). *Aguas superficiales y subterráneas de la Provincia de Santa Fe*. Serie Libros 3. Santa Fe, Argentina: Museo Provincial de Ciencias Naturales "Florentino Ameghino".
- Iriondo, M. y Kröhling, D. (1995). El Sistema Eólico Pampeano. *Comunicaciones del Museo Provincial de Ciencias Naturales "Florentino Ameghino"*, Nueva Serie, 5(1), 1-68.
- Iriondo, M. y Kröhling, D. (1996). *Los sedimentos eólicos del noreste de la llanura pampeana (Cuaternario superior)*. Ponencia presentada en el XIII Congreso Geológico Argentino y III Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Buenos Aires, Argentina.
- Iriondo, M. y Kröhling, D. (2007). Geomorfología y sedimentología de la cuenca superior del río Salado (sur de Santa Fe y noroeste de Buenos Aires, Argentina). *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis*, 14 (1), 65-87.
- Iriondo, M., Brunetto, E. y Kröhling, D. (2009). Historical climatic extremes as indicators for typical scenarios of Holocene climatic periods in the Pampean plain. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 283, 107-119.
- Iriondo, M. y Mannavella, C. (1990). Facies sedimentarias de la Formación Tezanos Pinto en el centro de la provincia de Santa Fe. En: Zarate, M. (Ed.), *International Symposium on Loess, Properties, Chronology and Palaeoclimatic significance of loess* (pp. 74-77). Mar del Plata: INQUA.
- Jarvis A., Reuter, H. I., Nelson, A. y Guevara, E.. (2008). *Hole-filled seamless SRTM data V4*. International Centre for Tropical Agriculture (CIAT). Disponible en: <http://srtm.csi.cgiar.org>.
- Kemp, R. A., Toms, P. S., King, M. y Kröhling, D. M. (2004). The pedosedimentary evolution and chronology of Tortugas, a Late Quaternary type-site of the northern Pampa, Argentina. *Quaternary International*, 114, 101-112.
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B. y Rubel, F. (2006). World Map of Köppen-Geiger Climate Classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15 (3), 259-263.

- Kreimer, R. (1969). Descripción Hidrogeológica de la zona de Firmat - Casilda y Cañada de Gómez. *Boletines de la Dirección Nacional de Geología y Minería*, 117, pp. varias. Buenos Aires: Dirección Nacional de Geología y Minería.
- Kröhling, D. (1996). Caracterización Geoquímica de las aguas de la cuenca del Río Carcarañá, Provincia de Santa Fe. *Com. Mus. Cs. Naturales "Florentino Ameghino", Nueva Serie*, 5(2), 1-10.
- Kröhling, D. (1998a). *Geomorfología y Geología del Cuaternario de la cuenca del río Carcarañá, desde la confluencia de los ríos Tercero y Cuarto, provincias de Sta. Fe y Córdoba*. Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.
- Kröhling, D. (1998b). Excursion Guide No. 2: North Pampa (Carcarañá river basin, Santa Fe province). In: Iriondo, M., Kröhling, D., Orfeo, O., Carignano, C. y Cioccale, M (Eds.), *International Joint Field Meeting "Loess in Argentina: Temperate and Tropical"*. INQUA, PASH, CLIP, UNER), 33 pp.
- Kröhling, D. (1999a). Upper Quaternary geology of the lower Carcarañá Basin, North Pampa, Argentina. *Quaternary International*, 57/58, 135-148.
- Kröhling, D. (1999b). Sedimentological maps of the typical loessic units in North Pampa, Argentina. *Quaternary International*, 62, 49-55..
- Kröhling, D. y Carignano, C. A. (2014). Capítulo: La Estratigrafía de los depósitos sedimentarios Cuaternarios. En R. Martino y A. Guerreschi (Eds.), *Relatorio del XIX Congreso Geológico Argentino – Geología y Recursos Naturales de la Provincia de Córdoba* (pp. 673-724). Córdoba: Asociación Geológica Argentina (AGA).
- Kröhling, D. e Iriondo, M. (2003). El loess de la pampa norte en el bloque de San Guillermo. *AAS Revista*, 10(2), 137-150.
- Kröhling, D. y Orfeo, O. (2002). Sedimentología de unidades loésicas (Pleistoceno tardío – Holoceno) del centro-sur de Santa Fe. *AAS Revista*, 9(2), 135-154.
- Lu, J., Sun, G., McNulty, S. y Amatya, D. M. (2005). A Comparison of Six Potential Evapotranspiration Methods for Regional Use in the Southeastern United States. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)*, 41(3), 621-633.
- Luque, J. A., Paoloni, J. D. y Bonorino, G. A. (1979). *Estudio Hidrológico e hidrogeológico de la cuenca del río Sauce Grande*. Serie Hidrológica N° 3. Departamento de Ciencias Agrarias y Departamento de Ciencias Naturales. Universidad Nacional del Sur. 64 pp.
- Marelli, H., De Mir, B.M., Arce, J. y Lattanzi, A. (1984). Evaluación de la erosión hídrica en suelo labrado. *Ciencia del Suelo*, 2(1), 69-77.
- Marzoratti, M., Ares, G., Varni, M. y Entraigas, I. (2006). *Caracterización espacio temporal de suelos, usos y precipitación para la realización de un balance hídrico diario de la cuenca del arroyo del Azul, Argentina*. Ponencia presentada en el VIII Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea, Asunción, Paraguay.
- MASPyMA (1936-2011). *Colección: Proyectos y obras hidráulicas realizadas en cursos de agua de las provincias de Santa Fe y Córdoba*. Santa Fe: Autor.
- Mauro, E. R. y Sánchez, J. C. (1999). *Acuífero Puelche: intrusión salina de fondo en San Lorenzo. Modelización y reversión por efecto de barrera hidráulica negativa*. Ponencia presentada en el II Congreso Nacional de Hidrogeología, Santa Fe, Argentina.

- Mazza, G. (1962). Recursos hidráulicos superficiales. *Evaluación de los Recursos Naturales de la Argentina (primera etapa)*, 4(1), 209-232. Buenos Aires: Consejo Federal de Inversiones.
- Molinero, J. y Samper, F. J. (2000). Coherencia de los modelos de flujo subterráneo y los modelos hidroquímicos de mezcla de aguas: aplicación a la isla de Åspö (Suecia). *Boletín Geológico y Minero*, 111(4), 27-48.
- Montico, S., Bonel, B., Dileo, N., Vilche, M. S. y Denoia, J. (2006). Balance de agua y energía en la cuenca del arroyo Ludueña, Argentina. *Revista Ciencia e Investigación Agraria*, 33(3), 225-236.
- Nash, J. E. y Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models, I, A discussion of principles. *J. Hydrol.*, 10, 282-290.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R. y Williams, J. R. (2005). *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation*. Temple, TX: Agricultural Research Service and Texas A&M University.
- Ocampo, D. y Rivas, R. (2010). *Comparación de métodos de estimación de la evapotranspiración a escala local en zonas de clima húmedo y árido*. Ponencia presentada en el I Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras. Azul, Buenos Aires, Argentina.
- Ocampo, D., Rivas, R. y Schirmbeck, J. (2009). *Aptitud de diferentes métodos de estimación de la evapotranspiración: aplicación en una zona de clima templado. Aportes de la Hidrología al conocimiento de los recursos hídricos*. Ponencia presentada en el VI Congreso Argentino de Hidrogeología, Santa Rosa, La Pampa, Argentina.
- Olaya Ferrero, V. (2004). *Hidrología Computacional y Modelos Digitales del Terreno. Teoría, práctica y filosofía de una nueva forma de análisis hidrológico*. pp 1-365.
- Paris, M., D'Elia, M., Pérez, M. y Tujchneider, O. (2003). Análisis estocástico de variables hidrometeorológicas para la estimación de recarga de acuíferos. *Boletín Geológico y Minero*, 114(2), 193-202.
- Pasotti, P. (1956). Los Estudios Geológicos de Ameghino. En *Homenaje a Florentino Ameghino en el centenario de su natalicio (1854 – 1954)*, 12-31. Rosario: Asociación Cultural de Conferencias - Sociedad Argentina de Estudios Geográficos GAEA Filial Rosario.
- Pasotti, P. (1963). Algunos rasgos morfológicos de la llanura cordobesa entre la dislocación de San José del Salteño y el meridiano 62°45' W. *Separata del Boletín de Estudios Geográficos*, 41(10).
- Pasotti, P. (1964). La cuenca del arroyo Cañada de Gómez (Prov. de Santa Fe). *Publicaciones del Instituto de Fisiografía y Geología "Dr. Alfredo Castellanos"*, 10(48), 1-72.
- Pasotti, P. (1966). Geomorfología de las Cañadas de Rosquín y de Carrizales y zonas aledañas. *Publicaciones del Instituto de Fisiografía y Geología "Dr. Alfredo Castellanos"*, 10(50), 1-76.
- Pasotti, P. (1968). Evidencias morfológicas del levantamiento de la "Pampa levantada" en un sector de la llanura santafecino-bonaerense. *Publicaciones del Instituto de Fisiografía y Geología "Dr. Alfredo Castellanos"*, 10(53), 1-32.
- Pasotti, P. (1969). Interpretación de algunos rasgos morfológicos en el oriente de la llanura pampeana en la provincia de Santa Fe (Sector oriental). *Notas del Instituto de Fisiografía y Fisiografía*, 3, 1-15.
- Pasotti, P. (1974a). La Neotectónica en la llanura pampeana. Fundamentos para el mapa neotectónico. *Publicaciones del Instituto de Fisiografía y Geología "Dr. Alfredo Castellanos"*, 11(58), 1-23.

- Pasotti, P. (1974b). El morrito de Monasterio, rasgo excepcional en el relieve de la provincia de Santa Fe. *Boletines de la Filial Rosario de la Sociedad Argentina de Estudios Geográficos GAEA*, 8, 1-3.
- Pasotti, P. (1987). Contribución al conocimiento de la llanura pampeana: "La Cañada de San Antonio". *Anales Academia Nacional de Geografía*, 11, 37-54.
- Pasotti, P. y Albert O. A. (1991). El río Carcarañá en territorio santafesino. *Publicaciones del Instituto de Fisiografía y Geología "Dr. Alfredo Castellanos"*, 12(67), 1-36.
- Pasotti, P. y Albert O. A. (1995). Estudio de la cuenca hidrográfica del río Carcarañá. *Publicaciones del Instituto de Fisiografía y Geología "Dr. Alfredo Castellanos"*, 12(69), 1-187.
- Pasotti, P. y Canoba, C. (1979). Estudio de la llanura pampeana con imágenes Landsat. *Publicaciones del Instituto de Fisiografía y Geología "Dr. Alfredo Castellanos"*, 12(63), 1-23.
- Pasotti, P y Castellanos, A. (1963). El relieve de la llanura santafesina-cordobesa comprendida entre los paralelos 32° y 33°30' S y desde 62°45' W hasta el río Paraná. *Publicaciones del Instituto de Fisiografía y Geología Dr. "Alfredo Castellanos"*, 9(48), 1-79.
- Penman, H. L. (1948). Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 193(1032), 120-145.
- Pérez, M., Filí, M., Tujchneider, O., D'Elia, M. y Paris, M. (2000). *Planificación de la explotación de las aguas subterráneas en áreas urbanas de llanura*. Ponencia presentada en el I Congreso Mundial Integrado de Aguas Subterráneas, XI de la Asociación Brasileira de Aguas Subterráneas (ABAS) y V de la Asociación Latinoamericana de Hidrología Subterránea para el desarrollo (ALHSUD), Fortaleza, Brasil.
- Racca, J. M. (2008). *Manejo y utilización de los modelos digitales de elevación SRTM en estudios fisiográficos y cartografía*. Ponencia presentada en el X Congreso Argentino y VII Latinoamericano de Agrimensura, Área Temática III: Asuntos Universitarios. Investigación científica y desarrollo tecnológico, Santa Fe, Argentina.
- Rawls, W. J., Brakensiek, D. L. y Saxton, K. E. (1982). Estimation of Soil Water Properties. *Transactions of the ASAE*, 25(5), 1316-1320 & 1328. Michigan: American Society of Agricultural Engineers.
- Riccardi, G., Basile, P., Zimmermann, E., Stenta, H., Bussi, P., Mangiameli, P., y Pesci, M. (2013a). *Diseño de presas de navegación en el estudio de prefactibilidad para el aprovechamiento del río Carcarañá como vía fluvial navegable*. Ponencia presentada en el VI Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos, Santa Fe, Argentina.
- Riccardi, G., Basile, P., Zimmermann, E., Stenta, H., Bussi, P., Mangiameli, P., y Pesci, M. (2013b). Aprovechamiento del río Carcarañá-Tercero como vía fluvial navegable. Parte II: Diseño hidráulico de presas de navegación. *Revista Cuadernos del CURIHAM*, 19, 71-85.
- Riccardi, G., Stenta, y Rentería, J. (2008a). La determinación de la distribución areal del aporte de escurrimiento superficial en cuencas de llanura. En G. Riccardi, P. Basile, R. Zimmermann, H. Stenta, C. Scuderi, J. Rentería, y M. García (Eds.), *Modelación de procesos hidrológicos asociados al escurrimiento superficial en áreas de llanura* (pp. 21-38). Rosario, Argentina: UNR Editora.
- Riccardi, G., Zimmermann, E., Basile, P., Stenta, H., Scuderi, C., García, M. y Rentería, J. (2008b). El modelado de escurrimiento superficial en cuencas del sur de la provincia de Santa Fe. En G. Riccardi, P. Basile, R. Zimmermann, H. Stenta, C. Scuderi, J. Rentería, y M. García (Eds.), *Modelación de procesos hidrológicos asociados al escurrimiento superficial en áreas de llanura* (pp. 3-20). Rosario: UNR Editora.

- Ritzema, H. P. (2006). *Drainage Principles and Applications*. Publication 16 (3ª Ed.). Wageningen: ILRI (International Institute for Land Reclamation and Improvement).
- Rodriguez, L. (2005). Modelando la interacción entre las aguas subterráneas y superficiales de Santa Fe. *Revista ConCIENCIA*, 11(14), 16-17.
- Rohli, R. V. y Anthony J. Vega, A. J. (2015). *Climatology* (3ª Ed.). Burlington, MA: Jones & Bartlett Learning.
- Rubel, F., y Kottek, M. (2010). Observed and projected climate shifts 1901-2100 depicted by world maps of the Köppen-Geiger climate classification. *Meteorologische Zeitschrift*, 19(2), 135-141.
- Sánchez Martínez, M. y Carvacho Bart, L. (2011). Comparación de ecuaciones empíricas para el cálculo de la evapotranspiración de referencia en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, 50, 171-186.
- Santa Cruz, J. N. y Silva Busso, A. (1999). *Escenario hidrogeológico general de los principales acuíferos de la Llanura Pampeana y Mesopotamia meridional argentina*. Ponencia presentada en el II Congreso Argentino de Hidrogeología y IV Seminario Hispano-Argentino sobre temas actuales de la hidrología subterránea (Actas 1: 461-471), Santa Fe, Argentina..
- Saura, S., Gómez Plaza, A. y Castillo, V. M. (2000). Extracción automatizada de la red de drenaje a partir de modelos digitales de elevaciones. *Rev. C. & G.*, 14 (3-4), 25-37.
- Scozzafava, M. y Tallini, M. (2001). Net Infiltration in the Gran Sasso Massif of central Italy using the Thornthwaite water budget and curve-number method. *Hydrogeology Journal*, 9(5), 461-475.
- Scuderi, C., Stenta, H., Riccardi, G., Zimmermann, E., Basile, P., García, M. y Rentería, J. (2008). Uso de imágenes satelitales y SIG en la generación de mapas de CN y evaluación de la agregación espacial de este parámetro mediante modelación. En G. Riccardi, P. Basile, R. Zimmermann, H. Stenta, C. Scuderi, J. Rentería, y M. García (Eds.), *Modelación de procesos hidrológicos asociados al escurrimiento superficial en áreas de llanura* (pp. 77-95). Rosario: UNR Editora.
- SEA. (2012). *Guía para el uso de modelos de aguas subterráneas en el SELA*. Chile: Autor.
- Soldano, F. A. (1947). Capítulo VIII: El Sistema Tercero-Cuarto-Carcarañá. En F. A. Soldano (Ed.), *Régimen y aprovechamiento de la Red Fluvial Argentina. Parte 1: El río Paraná y sus tributarios* (219-248). Buenos Aires: Címera.
- Soriano Soto, M. D., Pons Martí, V., García-España Soriano, L. y Llinares Palacios, J. (2012). *Comparación de los valores obtenidos en zonas contrastadas climáticamente en la península ibérica utilizando diferentes modelos para el cálculo de la evapotranspiración*. En Asociación Española de Climatología (Ed.), Ponencia presentada en el VIII Congreso Internacional "Cambio Climático. Extremos e impactos" (pp. 651-658), Salamanca, España.
- SSRH (2017a). *Base de Datos Hidrológica Integrada BDHI*. Subsecretaría de Recursos Hídricos. Ministerio del Interior, Obras Públicas y Vivienda. <https://www.mininterior.gov.ar/obras-publicas/rhbase.php>
- SSRH (2017b). *Red Hidrológica Nacional - Publicaciones Hidrometeorológicas 2016 - Edición 2017*. Ministerio del Interior, Obras Públicas y Vivienda. Secretaría de Obras Públicas. Subsecretaría de Recursos Hídricos. Buenos Aires. Argentina. Disponible en: <https://www.mininterior.gov.ar/obras-publicas/hidro-publicaciones.php>
- Stappenbeck, R. (1926). *Geología e Hidrología de aguas subterráneas de la pampa*. (E. G. Rohn, Trad., 1938, Rosario, Argentina), pp. 1-450.

- Steenhuis, T. S. y van der Molen, W. H. (1986). The Thornthwaite-Mather procedure as a simple engineering method to predict recharge. *Journal of Hydrology*, 84, 221-229.
- Steinbach, H. S. y Alvarez, R. (2007). ¿Afecta el sistema de labranza las propiedades físicas de los suelos de la Región Pampeana?. *Informaciones Agronómicas*, 33, 7-12.
- Stenta, H., Riccardi, G. y Basile, P. (2016). Modelación distribuida del escurrimiento superficial en la cuenca del río Tercero –Carcarañá. *Aqua-LAC*, 8(1), 44-57.
- Stenta, H., Riccardi, G., Basile, P. y Trivisonno, F. (2014). *Implementación de un modelo matemático distribuido de escurrimiento superficial en la cuenca del río Tercero – Carcarañá*. En Venturini V. et al. (Eds.), Ponencia presentada en el II Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras, Santa Fe, Argentina.
- Tabari, H., Grismer, M. E. and Trajkovic, S. (2013). Comparative analysis of 31 reference evapotranspiration methods under humid conditions. *Irrig. Sci.* 31, 107-117.
- Tarbut, E. y Lutgens, F. (2005). *Ciencias de la Tierra. Una introducción a la Geología Física* (8ª Ed.). Madrid: Pearson Educación.
- Thornthwaite, C. W. (1948) An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, 38(1),55-94.
- Thornthwaite, C. W. y Mather, J. R. (1955). The Water Balance. *Publications in Climatology*, 8(1), 1-104.
- Thornthwaite, C. W. y Mather, J. R. (1957). Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. *Publ. Climatol.*, 10(3), 1-127.
- Tomás, J. R., Dalla Costa, O. A. y Filí, M. F. (1999). *Determinación de parámetros hidráulicos formacionales del Acuífero Puelche en un sector del sur de la provincia de Santa Fe. Argentina*. Ponencia presentada en el II Congreso Nacional de Hidrogeología, Santa Fe, Argentina.
- Tosolini, R. y Sapino, V. (2014). *Suelos de la Provincia de Santa Fe 1:50.000*. GeoINTA. Portal de Datos de INTA. Disponible en: <http://visor.geointa.inta.gob.ar/>
- Tóth, J. (1970). A conceptual model of the groundwater regime and the hydrogeologic environment. *Journal of Hydrology*, 10(2), 164-176.
- Tóth, J. (2000). Las aguas subterráneas como agente geológico: causas, procesos y manifestaciones. *Boletín Geológico y Minero*, 111(4), 9-26.
- Tujchneider, O., Paris, M., Pérez, M. y D'Elia, M. (2005). Singularidad constitutiva de sistemas geohidrológicos de llanura y gestión de los recursos hídricos subterráneos. *Revista Latinoamericana de Hidrogeología*, 5, 117-121.
- USDA-NRCS. (2002). Chapter 8: Land Use and Treatment Classes. In USDA-NRCS, *National Engineering Handbook, title 210-VI. Part 630 Hydrology*. Washington, DC: Authors.
- USDA-NRCS. (2004). Chapter 9: Hydrologic Soil-Cover Complexes. In USDA-NRCS, *National Engineering Handbook, title 210-VI. Part 630 Hydrology*. Washington, DC: Authors.
- USDA-NRCS. (2009). Chapter 7: Hydrologic Soil Groups. In USDA-NRCS, *National Engineering Handbook, title 210-VI. Part 630 Hydrology*. Washington, DC: Authors.
- Venencio, M. del V. (2007). *La Recarga Natural al Acuífero Libre y su Vinculación con la Variabilidad Climática Regional*. Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.

- Venencio, M. del V. y García, N. O. (2005). Impacto de las sequías en la recarga natural al acuífero libre. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 10(1), 1-12.
- Venencio, M. del V. y García, N. O. (2006). *El comportamiento espacial y temporal de la precipitación y el acuífero libre en la región santafesina y su relación con el cambio climático*. Ponencia presentada en el VIII Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea, Asunción, Paraguay.
- Venencio, M. del V. y García, N. O. (2007). *Interannual predictability of the precipitation and water table level at Santa Fe Province (Argentina)*. Ponencia presentada en el IUGG XXIV General Assembly, Perugia, Italy.
- Venencio, M del V. y Manavella, C. H. (1999). *Contaminación del acuífero libre por hidrocarburos en el área urbana de la localidad de Díaz-provincia de Santa Fe*. Ponencia presentada en el II Congreso Argentino de Hidrogeología - IV Seminario Hispano-Argentino sobre temas actuales de la hidrología subterránea, Santa Fe, Argentina.
- Venencio, M. del V. y Sosa, D. C. (2014). *Asociación del agua subterránea con las actividades productivas en la Provincia de Santa Fe (Parte 2)*. Ponencia presentada en el II Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras, Santa Fe, Argentina.
- Venencio, M. y Varni, M. (2003). *Estimación de la Recarga y del Almacenamiento Específico a Través del Análisis de Registros de Nivel Freático. (TC23)*. Ponencia presentada en el III Congreso Argentino de Hidrogeología y I Seminario Hispano-latinoamericano sobre temas actuales de la Hidrología Subterránea (pp. 153-160). Rosario, Santa Fe, Argentina.
- Vives, L., Mancino, C. y Scioli, C. (2012). *Modelo conceptual y numérico del flujo de agua subterránea de la cuenca del río Matanza-Riachuelo – Informe final*. Proyecto de Aguas Subterráneas en la Cuenca Matanza Riachuelo. Azul, Argentina: IHLLA.
- Waterloo Hydrogeologic Inc. (2015). *Visual MODFLOW v.2011.1 User's Manual*. Waterloo, Ontario, Canada: Author.
- Weir, E., Arce, E. y Arce, J. (2004). *Evapotranspiración de referencia en pasturas en Marcos Juárez, prov. de Córdoba*. Ponencia presentada en la X Reunión argentina y IV latinoamericana de Agrometeorología, Mar del Plata, Argentina.
- Westenbroek, S. M., Kelson, V. A., Dripps, W. R., Hunt, R. J. y Bradbury, K. R. (2010). *SWB – A modified Thornthwaite Soil Water Balance code for estimating ground-water recharge*. (USGS Techniques and Methods 6-A31). Reston, VA: USGS.
- Woodward, D. E., Hawkins, R. H., Jiang, R., Hjelmfelt, A.T., y Van Mullem, J. A. (2003). *Runoff Curve Number method - Examination of the initial abstraction ratio*. En ASCE (Ed.), Ponencia presentada en el World Water and Environmental Resources Congress 2003, Philadelphia, USA.
- Xu, C.-Y. y Singh, V. P. (2002). Cross Comparison of Empirical Equations for Calculating Potential Evapotranspiration with Data from Switzerland. *Water Resources Management*, 16(3), 197–219.
- Yoder, R. E., Odhiambo, L. O. y Wright, W. C. (2005). Evaluation of methods for estimating daily reference crop evapotranspiration at a site in the humid southeast United States. *Applied Engineering in Agriculture*, 21(2), 197-202.
- Zimmermann E. (2003). *Aproximación bayesiana para estimación de ocurrencias de lluvia aplicada a balances hídricos seriados*. Ponencia presentada en el III Congreso Argentino de Hidrogeología y I Seminario Hispano-latinoamericano sobre técnicas actuales en Hidrología Subterránea. Asociación Internacional de Hidrogeólogos Grupo Argentino (Tomo 1, pp. 1-10), Rosario, Argentina.

- Zimmermann, E. (2006). Bayesian approach to daily rainfall modelling to estimate monthly net infiltration using the Thornthwaite water budget and Curve Number methods. *Hydrogeology Journal*, 14, 648-656.
- Zimmermann, E. D. y Basile, P. A. (2008). Uso de funciones de pedotransferencia para la estimación de parámetros hidráulicos en suelos limosos (Llanura Argentina). *Boletín Geológico y Minero*, 119(1), 71-80.
- Zimmermann, E. D., Scuderi, C. M., Riccardi, G. A., Stenta, H. R., Basile, P. A., García, M. L. y Rentería, J. P. (2008). Asignación de parámetros hidráulicos de suelos utilizando funciones de pedotransferencia con información de las cartas de suelo del INTA. En G. Riccardi, P. Basile, R. Zimmermann, H. Stenta, C. Scuderi, J. Rentería, y M. García (Eds.), *Modelación de procesos hidrológicos asociados al escurrimiento superficial en áreas de llanura* (pp. 145-156). Rosario: UNR Editora.
- Zucarelli, A. y Paris, M. (2015). *Regiones pluviométricas homogéneas en la provincia de Santa Fe (Argentina)*. Ponencia presentada en el XXV Congreso Nacional del Agua. Paraná, Entre Ríos, Argentina.
- Zuliani, S. y Costanzo, M. (2007). Los sistemas productivos predominantes en el área de Carcarañá. Sur de Santa Fe. *Revista Agromensajes*, 23, 17-19.

ANEXOS

I. ANEXO I – MAPA DE SUELOS: UNIDADES CARTOGRÁFICAS

La Figura I.1 muestra en escala 1:500.000 las unidades cartográficas de los suelos presentes en la zona del modelo, y cuyas leyendas están compuestas por cuatro partes que describen los nombres del suelo a nivel de Orden, Gran Grupo, Subgrupo y número de unidad cartográfica (Figura I.2).

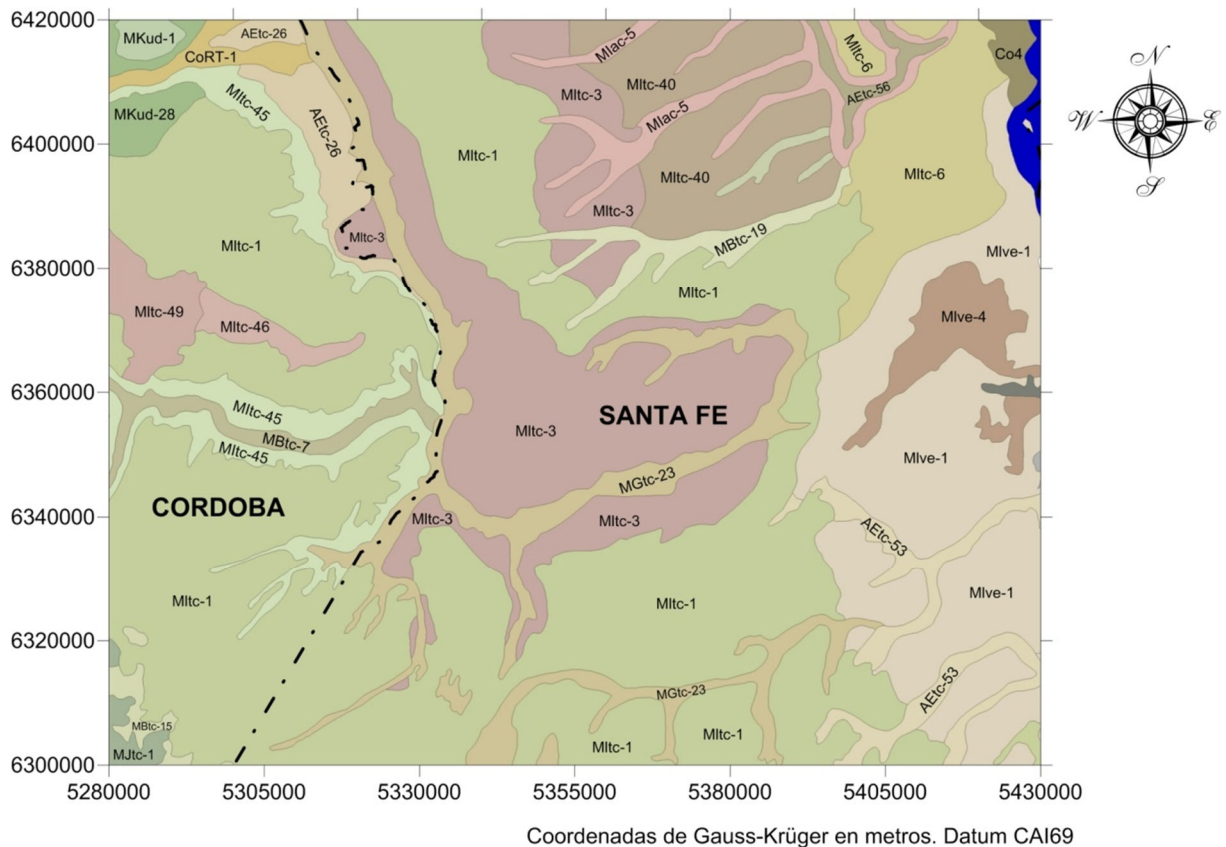


Figura I.1 – Mapa de suelos del área de estudio.

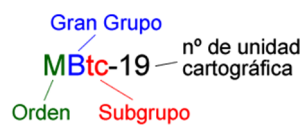


Figura I.2 – Leyenda unidad cartográfica.

La unidad Mltc-1 comprende planicies altas, bien drenadas y suavemente onduladas con red de avenamiento bien definida. Donde el paisaje es más ondulado presenta signos de erosión hídrica. Esta unidad está compuesta por Argiúdoles típicos, con una gran aptitud para la agricultura. Estos suelos presentan un horizonte B2t con mayor porcentaje de arcilla que dificulta la normal infiltración del agua de lluvia. Esta unidad de suelos en general se desarrolla en los sistemas geomorfológicos: Planicie Fluvioeólica Central de Córdoba y Planicie Loésica de Pampa Norte.

La unidad MItc-3 está compuesta por Argiudoles típicos presentando erosión hídrica actual. Ocupa altos suavemente ondulados y planos extendidos, áreas bien drenadas, con pendientes de hasta 2% ubicadas a ambos márgenes de los cauces principales (río Carcarañá y arroyo Cañada de Gómez). Ello contribuye a que los suelos sean susceptibles a la erosión hídrica ligera o moderada no solo por la pendiente natural del terreno sino por el mal manejo de estos suelos. Dichos suelos forman el extremo sur del Bloque Elevado de San Guillermo, y particularmente se desarrollan en las pendientes laterales del valle del río Carcarañá y fondos de valles tributarios y en el talud asociado a la Falla El Trébol.

La unidad MItc-6 corresponde a planicies altas muy extendidas y bien drenadas superficialmente. La planicie se presenta interrumpida por ejes de avenamiento, o cauces de escurrimiento temporario, de orientación OSO-ENE dispuestos en forma paralela, compuestos por una sucesión de cubetas pequeñas que se interconectan en periodos de lluvia de cierta magnitud, drenando normalmente los sectores. La unidad está compuesta por una asociación de Argiudoles típicos en los sectores bien drenados, de lomas planas extendidas y Argiudoles ácuicos en los sectores deprimidos del paisaje, teniendo éstos como limitaciones la menor permeabilidad y drenaje. Su mayor desarrollo comprende la UG Planicie Antigua de Bustinza (Kröhling, 1999a).

La unidad MItc-40 comprende una zona de transición de planos altos a planos bajos, ubicada al este del Bloque de San Guillermo y al este de la Falla El Trébol. La componen una asociación de Argiudoles típicos en las partes más altas y mejor drenadas del relieve, Argiudoles ácuicos en las partes intermedias y Argialboles típicos en las depresiones, donde el drenaje es sensiblemente inferior al de las anteriores disposiciones del paisaje. Las limitaciones de la unidad son la permeabilidad lenta en los Argiudoles ácuicos y el drenaje imperfecto en los Argialboles típicos.

La unidad MItc-45 ocupa parte de las pendientes laterales del valle del río Carcarañá en la provincia de Córdoba, y en las pendientes vinculadas a las cañadas de San Antonio, Santa Lucía y Las Totoras, como así también a los arroyos Tortugas y Leones. Está conformada por Argiudoles típicos ubicados en zonas de media loma y con limitaciones debidas a erosión hídrica actual, y Natracualfes típicos localizados en pies de pendiente y con limitaciones debidas a erosión hídrica actual y sodicidad.

La unidad MItc-46 ocupa una franja de dirección ONO-ESE en la provincia de Córdoba, en un paisaje que se hace muy plano y ligeramente deprimido con pendientes comprendidas entre 0 a

0,5%. Está compuesta por Argiudoles típicos en los planos ligeramente deprimidos, y Argialboles típicos en las microdepresiones, teniendo ambos al drenaje como limitante.

La unidad MI_{tc}-49 se emplaza en los bajos y líneas de escurrimiento que se ubican al oeste de la unidad anteriormente descripta. La componen Argiudoles típicos en sectores altos, Natralboles típicos y Argialboles típicos en áreas intermedias, y Natracualfes típicos en planos deprimidos. Los limitantes son el drenaje y la sodicidad.

La unidad MJ_{tc}-1 se encuentra en lomas casi planas de la provincia de Córdoba y en el SO de la zona de estudio. Está conformada por Hapludoles típicos, bien drenados y sin limitantes.

La unidad MI_{ac}-5 comprende pendientes muy suaves, principalmente en zonas de influencias de arroyos o vías de escurrimiento bien marcadas, asociadas a la red de la cañada Carrizales. Está compuesta por una asociación de Argiudoles ácuicos dominantes y ubicados en las posiciones intermedias del paisaje, Argialboles típicos en las depresiones extendidas y cubetas que forman las vías de escurrimiento temporario, y Argiudoles típicos ubicados en los sectores ligeramente más altos y mejor drenados. Tiene como limitantes el drenaje imperfecto en los Argiudoles ácuicos, el anegamiento en los Argialboles típicos y la permeabilidad lenta en los Argiudoles típicos.

La unidad MI_{ve}-1 se desarrolla en un paisaje suavemente ondulado con lomas planas y extendidas, y moderadamente bien drenado. Está compuesta por Argiudoles típicos y Argiudoles vérticos. Comprende el área SE de la cuenca del Carcarañá, incluyendo la UG Paleocauces de L. Palacios (Kröhling, 1999) y extendiéndose fuera de ella en el departamento San Lorenzo. Por el elevado contenido de materiales finos, estos suelos presentan problemas de permeabilidad, y en épocas de lluvias excesivas, los cultivos pueden sufrir asfixia por esa causa.

La unidad MI_{ve}-4 ocupa el centro del departamento San Lorenzo en un paisaje muy suavemente ondulado con lomas planas extendidas de relieve normal-subnormal y moderadamente bien drenadas, interrumpidas por planos bajos de relieve subnormal cóncavo, aladaños a vías de escurrimiento permanentes de lento drenaje. Se compone de una asociación de Argiudoles vérticos en los sectores de lomas y Natracualfes típicos en los planos bajos extendidos. La limitante de los Argiudoles vérticos es la permeabilidad lenta derivada del alto contenido de arcilla del horizonte Bt, haciéndolos relativamente impermeables en períodos de lluviosos, mientras que las limitaciones de los Natracualfes típicos es la sodicidad debida a su ubicación.

La unidad MBtc-7 ocupa en general el fondo del valle del río Carcarañá en la provincia de Córdoba. La conforman Natralboles típicos al pie de pendiente y con erosión hídrica actual y drenaje como limitantes, Argiudoles típicos en las pendientes medias bajas, teniendo como limitación la erosión hídrica actual y suelos aluviales indiferenciados localizados en las terrazas y con drenaje y sodicidad como limitantes.

La unidad MBtc-15 se ubica en bajos y planicies anegables vinculadas a un área de la Planicie Arenosa Eólica del SE de Córdoba. La integran Natralboles típicos en los bajos, y Argiudoles típicos y Argialboles típicos en las planicies anegables. Tiene como limitante el drenaje deficiente y la sodicidad.

La unidad MBtc-19 se encuentra en sectores aledaños a las cañadas de Carrizales y de Arce, en la provincia de Santa Fe. Es un área plana baja extendida y de drenaje dificultoso con numerosas vías de escurrimiento sin una dirección definida. Está compuesta por un complejo de Natralboles típicos en sectores de pendientes muy suaves, Argiudoles ácuicos en sectores altos y planos y Natracualfes típicos en sectores bajos del relieve. Las principales limitaciones están representadas por la presencia de sodio en los Natralboles típicos y Natracualfes típicos, y el drenaje imperfecto de los Argiudoles ácuicos.

La unidad MKud-1 se desarrolla en un paisaje de lomas casi planas y en los cauces o vías de drenaje que las cruzan. Se la encuentra en la provincia de Córdoba, en el NO de la zona del modelo. La componen Argiustoles údicos, con drenaje moderado y ligera erosión hídrica.

La unidad MKud-28 se encuentra en la misma zona, ocupando sectores con drenaje deficiente y sodicidad como limitantes. Está compuesta por Argiustoles údicos, Argialboles típicos y Natracualfes típicos.

La unidad AEtc-26 ocupa amplios sectores dentro de la Depresión de la cañada de San Antonio, cercanos al arroyo de las Tortugas, como así también los planos bajos ubicados en sectores topográficamente algo más elevados dentro de la gran depresión, y las vías de escurrimiento dentro de ésta. La integran un complejo de Natracualfes típicos en áreas anegables y con limitaciones de sodicidad, drenaje y salinidad, y Natracuoles típicos en áreas muy anegables, con limitaciones de sodicidad y drenaje.

La unidad AEtc-53 se encuentra en las áreas de influencia del arroyo Saladillo y comprende planos bajos extendidos de lento drenaje y está integrada por un complejo de Natracualfes típicos que se hallan en las terrazas de inundación del arroyo, Natracuoles típicos en posiciones ligeramente más elevadas y Argiudoles vérticos en los sectores mejor drenados, representados por pequeñas lomadas. Los limitantes de esta unidad son la sodicidad en los Natracualfes típicos, el anegamiento y el lento drenaje de los Natracuoles típicos, y la permeabilidad lenta de los Argiudoles vérticos.

La unidad AEtc-56 se ubica en planos bajos muy extendidos correspondientes a las cañadas de Carrizales y del Arce, de escurrimiento difícil y con serios problemas de drenaje interno. La integran Natracualfes típicos y Natralboles típicos. Tiene como limitante la salinidad, el anegamiento y la sodicidad.

La unidad MGtc-23 corresponde a planos bajos extendidos aledaños a vías de escurrimiento de cauce elaborado. Ocupa los planos de terrazas fluviales del río Carcarañá desde la desembocadura del arroyo Cañada de Gómez (Falla El Trébol) hacia el oeste, así como las de este arroyo, del de los Leones, del arroyo de las Totoras, del arroyo Saladillo y del arroyo de las Tortugas, en la provincia de Santa Fe. Está representada por un complejo de Natracuoles típicos en las medias lomas bajas y pies de lomas, Natracualfes típicos en áreas más anegables que las anteriores, y Argiudoles ácuicos en las áreas más elevadas. Las limitaciones principales de los suelos están dadas por su imperfecto drenaje, pobre permeabilidad y lento a muy lento escurrimiento del exceso de agua. Además, la presencia del ión sodio acentúa estas limitaciones en gran parte de la unidad.

La unidad CoRT-1 se localiza en sectores de planos aluviales de la provincia de Córdoba, en el NO de la zona de estudio. La integran complejos indiferenciados con baja retención de humedad y clima como limitantes.

La unidad Co4 corresponde a vías de escurrimiento de la provincia de Santa Fe. Tiene como limitantes la susceptibilidad a inundación o anegamiento, salinidad y sodicidad.

II. ANEXO II – CLASIFICACIÓN DE LAS TIERRAS POR SU CAPACIDAD DE USO

Para clasificar las unidades cartográficas de las Cartas de Suelos por su potencialidad de uso, el INTA ha adoptado el sistema generado por el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos de América llamado Capacidad de Uso de las tierras, adaptado a la República Argentina (INTA, 1974-1988).

Esta clasificación evalúa cada tipo de suelo en función de sus propiedades físicas y químicas, su susceptibilidad a la erosión, y su comportamiento frente a diversas condiciones climáticas y de gradiente de pendiente.

Este sistema de clasificación permite por lo tanto, estimar la capacidad del terreno para su empleo bajo usos agrícolas sin especificar sistemas o prácticas de cultivos determinados.

Si bien este sistema comprende tres grandes categorías (clase, subclase y unidad de capacidad de uso), en las Cartas la presentación adoptada agrupa los suelos a nivel de clases y subclases debido a que en el estudio de reconocimiento de suelos de la región en estudio se ha utilizado la escala reducida (1:50.000).

El sistema de clasificación distingue ocho clases (señaladas con los números romanos I a VIII) que indican un aumento progresivo de las limitaciones que presentan los suelos para el desarrollo de los cultivos. Las cuatro primeras clases incluyen los suelos aptos para los cultivos agrícolas. La clase I requiere poco o ningún tratamiento de manejo o conservación especial. Las clases II, III y IV necesitan grados crecientes de cuidado y protección. Las clases V a VII por lo general no son aptas para los cultivos y precisan cuidados progresivamente más intensos, aun cuando se destinen para pasturas o forestación. Finalmente la clase VIII no tiene aplicación agrícola ni ganadera; sólo sirve para la recreación o para conservación de la fauna silvestre.

Las subclases informan sobre los tipos principales de limitaciones de las clases. La mayoría de las clases admiten hasta cuatro subclases, que se designan agregando las letras minúsculas "e", "w", "s" o "c" a continuación del número de la clase. Por ejemplo: IIe.

La subclase "e" – erosión – está integrada por suelos en los cuales la susceptibilidad a la erosión es el problema o peligro dominante para su uso. Este peligro latente, así como el daño que pudo

haber sufrido el suelo en el pasado por un proceso erosivo, son los factores que determinan la inclusión de los suelos en esta subclase.

La subclase "w" – exceso de agua – está constituida por suelos en los cuales dicho exceso es el riesgo o limitación dominante. Los criterios para determinar cuáles suelos pertenecen a esta subclase son: drenaje pobre, humedad excesiva, capa de agua alta (freática o suspendida) y anegabilidad.

La subclase "s" – limitaciones del suelo dentro de la zona radical – incluye suelos que presentan problemas de escasa profundidad, baja capacidad de retención de humedad, salinidad o alcalinidad y bajo nivel de fertilidad difícil de corregir.

La subclase "c" – limitación climática – está compuesta por suelos en los cuales el clima (temperatura y falta de humedad) es la mayor limitación.

Con frecuencia, ciertos suelos ofrecen dos limitaciones. Por ejemplo: "es" o "ws", sobre todo en el caso de complejos y asociaciones de suelos. En la agrupación de suelos con dos limitaciones – peligro de erosión e impedimentos en la zona radical – "e" precede a "s". Asimismo, la restricción por exceso de agua, "w", antecede a limitaciones en la zona radical "s".

En la clase I no hay subclases: sólo admite subgrupos basados en distintas condiciones naturales de drenaje e indicados por un número arábigo. Por ejemplo, la clase I-1 es un subgrupo de la clase I que incluye suelos bien drenados. Otros subgrupos son I-2 (moderadamente bien drenado), I-1/2 (moderadamente bien a bien drenados) y I-1/3 (bien a algo excesivamente drenados).

La clase V sólo admite las subclases "w", "s" y "c" porque los suelos que comprende no tienen problemas de erosión o son poco susceptibles a ella. No obstante, estos suelos son aptos para pasturas, forestación y también pueden ser utilizados como campos naturales de pastoreo y refugio de la fauna silvestre.

A continuación se brinda una breve descripción de las distintas clases de capacidades de uso:

Clase I

Los suelos de esta clase tienen pocas limitaciones para su uso. Son aptos para producir una amplia variedad de plantas, pudiendo usarse para cultivos labrados y pasturas como campos naturales de pastoreo y para forestación y recreo.

Ocupan generalmente los relieves llanos (algunos suelos de permeabilidad rápida pueden ser incluidos en la clase I, aunque tengan pendientes suaves), por lo tanto el peligro de erosión es reducido. Son suelos profundos, bien drenados, con buena capacidad de retención de agua, bien provistos de elementos nutritivos y responden a la aplicación de fertilizantes y no se hallan expuestos a inundaciones. En general son productivos y se adaptan al cultivo intensivo.

Los suelos de la clase I sólo requieren prácticas comunes de manejo para mantener su productividad, tanto en lo referente a su fertilidad como a su estructura.

Clase II

Los suelos de Clase II presentan ligeras limitaciones que reducen la elección de los cultivos o requieren moderadas prácticas de conservación. Corresponden a suelos planos con ligeras pendientes. Son suelos profundos a moderadamente profundos de buena permeabilidad y drenaje, presentan texturas favorables, que pueden variar a extremos más arcillosos o arenosos que la clase anterior.

Las limitaciones más corrientes son:

- pendientes suaves,
- susceptibilidad moderada a la erosión eólica o hídrica y efectos adversos debidos a una erosión anterior,
- profundidad del suelo, menor que la ideal,
- condiciones desfavorables de estructura y laboreo,
- salinidad y/o alcalinidad ligera o moderada (pero corregible),
- perjuicios ocasionados por inundaciones,
- exceso de humedad, corregible por medio de drenaje,
- limitaciones climáticas leves para el uso y manejo del suelo.

Estas limitaciones pueden presentarse solas o combinadas.

Clase III

Los suelos de la Clase III presentan moderadas limitaciones en su uso y restringen la elección de cultivos, aunque pueden ser buenas para algunos de ellos.

La topografía varía de plana a moderadamente inclinada, dificultando severamente el regadío; la permeabilidad varía de lenta a muy rápida.

Las limitaciones más corrientes para esta Clase se refieren a:

- pendientes moderadamente pronunciadas;
- alta susceptibilidad a la erosión hídrica o eólica, o graves efectos adversos de una erosión anterior;
- inundaciones frecuentes que dañan a los cultivos;
- permeabilidad lenta del subsuelo;
- exceso de humedad o cierto estancamiento de agua después de instaladas obras de avenamiento;
- escasa profundidad del suelo que limita el desarrollo radical y el almacenamiento de agua;
- baja fertilidad (difícil de corregir);
- salinidad y/o alcalinidad moderadas;
- condiciones climáticas ligeramente adversas.

Los suelos de esta clase requieren prácticas moderadas de conservación y manejo.

Clase IV

Los suelos de la Clase IV presentan severas limitaciones de uso y restringen la elección de cultivos. Estos suelos al ser cultivados, requieren cuidadosas prácticas de manejo y conservación, más difíciles de aplicar y mantener que las de la Clase III.

Las limitaciones más usuales para esta Clase se refieren a:

- pendientes pronunciadas;
- gran susceptibilidad a la erosión hídrica o eólica;
- graves consecuencias de la erosión anterior;
- escasa profundidad del suelo;
- inundaciones frecuentes que dañan a los cultivos

- humedad excesiva, con peligro de estancamiento de agua después de la instalación de obras de avenamiento;
- fuerte salinidad o alcalinidad sódica;
- factores climáticos moderadamente adversos.

Clase V

Los suelos de esta clase están limitados en su uso y generalmente no adecuados para los cultivos. Tienen poco o escaso riesgo de erosión, pero tienen otras limitantes difíciles de resolver. Son suelos planos o casi planos, pero con problemas de humedad, están frecuentemente inundados, son pedregosos, tienen limitaciones climáticas o alguna combinación de estos.

Suelos de esta clase son:

- suelos de riberas de cursos de agua sujetas a frecuentes inundaciones, que imposibilitan la producción normal de cultivos labrados;
- suelos de relieve casi llano pero con un período de crecimiento inadecuado a la producción normal de cultivos labrados;
- suelos de relieve llano y casi llano con piedras o rocas;
- áreas encharcadas donde el drenaje para la producción de plantas cultivadas no es factible, pero donde los suelos son capaces de producir vegetación herbácea o arbórea.

Las limitaciones más corrientes en esta clase son:

- Inundaciones frecuentes en tierras bajas.
- Suelos casi planos con limitaciones climáticas que impiden la producción normal de cultivos.
- Suelos planos o casi planos pedregosos.
- Suelos mal drenados y donde el drenaje no es factible.

Clase VI

Los suelos de la Clase VI corresponden a suelos inadecuados para los cultivos y su uso está limitado para pastos y forestales. Los suelos tienen limitaciones continuas que no pueden ser corregidas, tales como: pendientes muy pronunciadas susceptibles a severa erosión, efectos de erosión antigua, pedregosidad excesiva, zona radical poco profunda, excesiva humedad, baja retención de humedad, alto contenido de sales.

Clase VII

Son suelos con limitaciones muy severas que lo hacen inadecuados para los cultivos y su uso queda reducido casi exclusivamente al pastoreo, forestación o conservación de la fauna.

Las limitaciones permanentes, no corregibles, son:

- pendientes muy pronunciadas;
- erosión;
- suelos someros;
- piedras;
- exceso de humedad;
- sales o alcalinidad sódica;
- clima desfavorable.

Algunos de estos suelos requieren mejoras y plantaciones para protección de los mismos.

Clase VIII

Corresponde a suelos sin valor agrícola, ganadero ni forestal. Su uso está limitado solamente para la vida silvestre, recreación y protección de cuencas hidrográficas.

Las limitaciones no corregibles, tienen como causales:

- erosión actual o peligro de erosión;
- clima riguroso;
- exceso de humedad;
- piedras;
- escasa capacidad de retención de humedad;
- salinidad o alcalinidad sódica.

III. ANEXO III – ESTUDIO DE EVAPOTRANSPIRACIONES POR DIVERSOS MÉTODOS

Para la etapa de calibración en régimen estacionario (años 1962 a 1966) no fue posible calcular la ET_o por el método de FAO-56 P-M (Ecuación III-1) debido a la falta de datos de algunas variables meteorológicas en ciertos lapsos de tiempo, alguno considerable como la velocidad del viento a 2 m de altura u_2 . Por este motivo se buscó determinar, entre otros métodos de estimación de ETP y ET_o , aquel que tuviera el mejor ajuste al método de FAO-56 P-M, siendo éste el recomendado como el único método estándar para la definición y el cálculo de la evapotranspiración de referencia (Allen *et al.*, 2006).

- FAO-56 Penman-Monteith (P-M) (2006)

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \quad (III-1)$$

donde:	ET_o	evapotranspiración de referencia (mm d ⁻¹)
	R_n	radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m ⁻² d ⁻¹)
	R_a	radiación extraterrestre (mm d ⁻¹)
	G	flujo del calor del suelo (MJ m ⁻² d ⁻¹)
	T	temperatura media del aire a 2 m de altura (°C)
	u_2	velocidad del viento a 2 m sobre la superficie (m s ⁻¹)
	e_s	presión de vapor de saturación (kPa)
	e_a	presión real de vapor (kPa)
	$e_s - e_a$	déficit de presión de vapor (kPa)
	Δ	pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C ⁻¹)
	γ	constante psicrométrica (kPa °C ⁻¹)

Algunos de los métodos evaluados fueron los siguientes:

- Priestley – Taylor (P-T) (1972)

$$ET_o = 1,26 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_n - G}{\lambda} \quad (III-2)$$

donde:	ET_o	evapotranspiración de referencia (mm d ⁻¹)
	Δ	pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C ⁻¹)
	γ	constante psicrométrica (kPa °C ⁻¹)
	R_n	radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m ⁻² d ⁻¹)
	G	flujo del calor del suelo (MJ m ⁻² d ⁻¹)
	λ	calor latente de vaporización (MJ kg ⁻¹)

- *Hargreaves - Samani (H-S) (1985)*

$$ET_o = 0,0023 (T_{\max} - T_{\min})^{0,5} (T_{\text{med}} + 17,8) \frac{R_a}{2,45} \quad (\text{III-3})$$

donde: ET_o evapotranspiración de referencia (mm d^{-1})
 $T_{\max}$ temperatura máxima diaria del aire ($^{\circ}\text{C}$)
 $T_{\min}$ temperatura mínima diaria del aire ($^{\circ}\text{C}$)
 T_{med} temperatura media diaria del aire ($^{\circ}\text{C}$), calculada como $(T_{\max} + T_{\min})/2$
 R_a radiación extraterrestre ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)

- *Turc (1961)*

$$ET_o = \alpha [(23,9001 R_s) + 50] \left(\frac{T_{\text{med}}}{T_{\text{med}} + 15} \right) \quad \text{si } HR > 50\% \quad (\text{III-4})$$

$$ET_o = \alpha [(23,9001 R_s) + 50] \left(\frac{T_{\text{med}}}{T_{\text{med}} + 15} \right) \left[1 + \left(\frac{50 - HR}{70} \right) \right] \quad \text{si } HR < 50\% \quad (\text{III-5})$$

donde: ET_o evapotranspiración de referencia (mm d^{-1})
 α constante ($= 0,01333$)
 R_s radiación solar o de onda corta ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)
 T_{med} temperatura media diaria del aire ($^{\circ}\text{C}$), calculada como $(T_{\max} + T_{\min})/2$
 HR humedad relativa (%)

- *Thornthwaite (Th) (1948)*

$$ETP = ETP_{sc} \left(\frac{N}{12} \right) \left(\frac{dm}{30} \right) \quad (\text{III-6})$$

donde: ETP evapotranspiración potencial mensual (mm mes^{-1})
 N cantidad máxima de horas de sol
 dm cantidad de días de cada mes
 ETP_{sc} evapotranspiración potencial sin corregir (mm mes^{-1})

La ETP_{sc} puede ser calculada mediante las siguientes expresiones:

$$ETP_{sc} = 16 \left(\frac{10 T_a}{I} \right)^a \quad (\text{III-7})$$

$$a = 0,49239 + 1792 \times 10^{-5} I - 771 \times 10^{-7} I^2 + 675 \times 10^{-9} I^3 \quad (\text{III-8})$$

$$I = \sum_{m=1}^{12} \left(\frac{T_m}{5} \right)^{1,514} \quad (\text{III-9})$$

donde: T_a temperatura media diaria ($^{\circ}\text{C}$)
 a exponente como función del índice de calor anual
 I índice de calor anual obtenido de los índices de calor mensuales

1) Comparación entre métodos

El estudio de comparación entre métodos de estimación de ETP o ET_o , según el caso (ETP/ET_o de aquí en más), fue de 1970 a 2009, y se efectuó en las localidades de Oliveros y Casilda (prov. de Santa Fe) y Marcos Juárez (prov. de Córdoba). Los estudios presentados a continuación corresponden al efectuado en la primera de las localidades citadas, ya que los correspondientes a las localidades restantes tienen un comportamiento similar.

A los efectos de comparar resultados, los valores de evapotranspiración son expresados en mm mes^{-1} . Dado lo extenso del período de estudio, y para mayor claridad en la presentación de las gráficas comparativas, se analizó el período 1970-2009 dividido en 4 décadas: de 1970 a 1979, de 1980 a 1989, de 1990 a 1999 y de 2000 a 2009.

En las Figura III.1 a III.4 se presentan para la localidad de Oliveros los valores de evapotranspiración mensual calculados por los distintos métodos respecto al FAO-56 P-M.

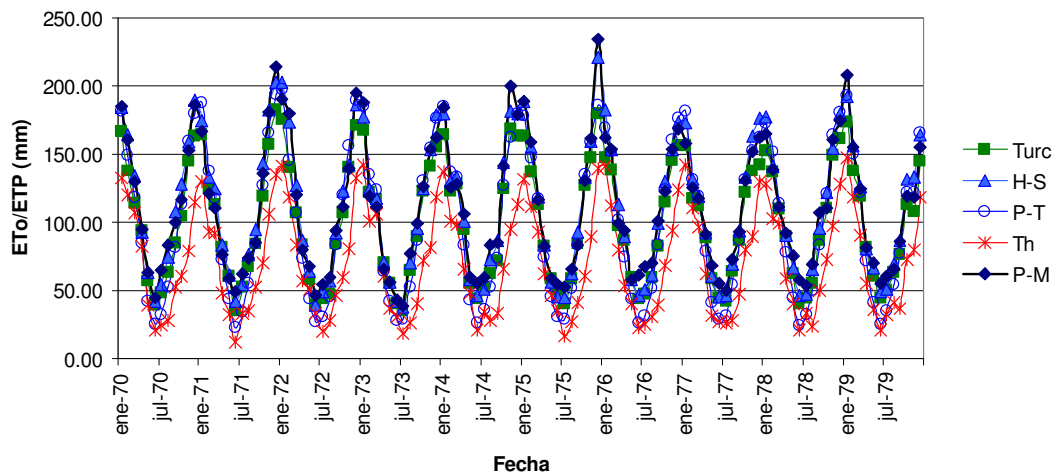


Figura III.1 – ET_o/ETP mensuales en el período 1970-1979. Turc (1961), H-S: Hargreaves - Samani (1985), P-T: Priestley – Taylor (1972), Th: Thornthwaite (1948), P-M: FAO-56 Penman-Monteith (2006).

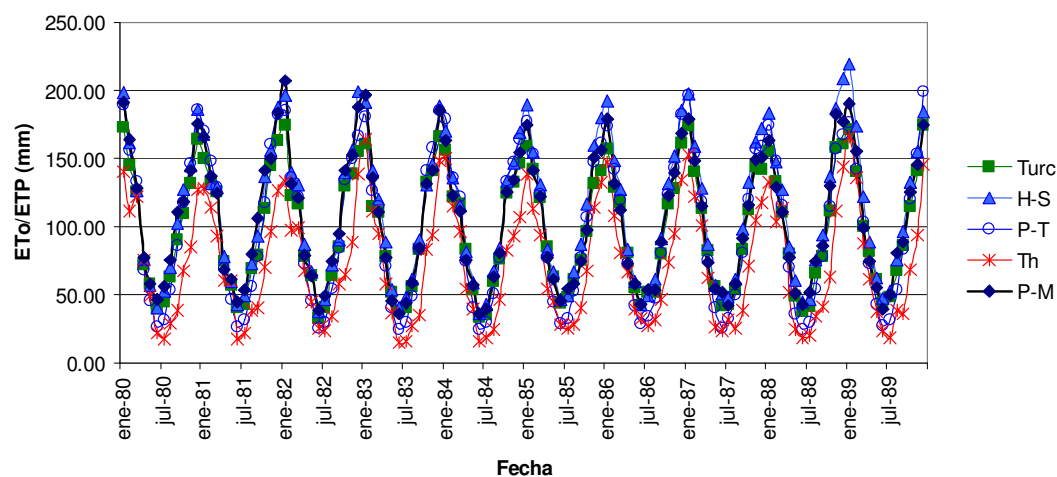


Figura III.2 – ET₀/ETP mensuales en el período 1980-1989. Turc (1961), H-S: Hargreaves - Samani (1985), P-T: Priestley – Taylor (1972), Th: Thornthwaite (1948), P-M: FAO-56 Penman-Monteith (2006).

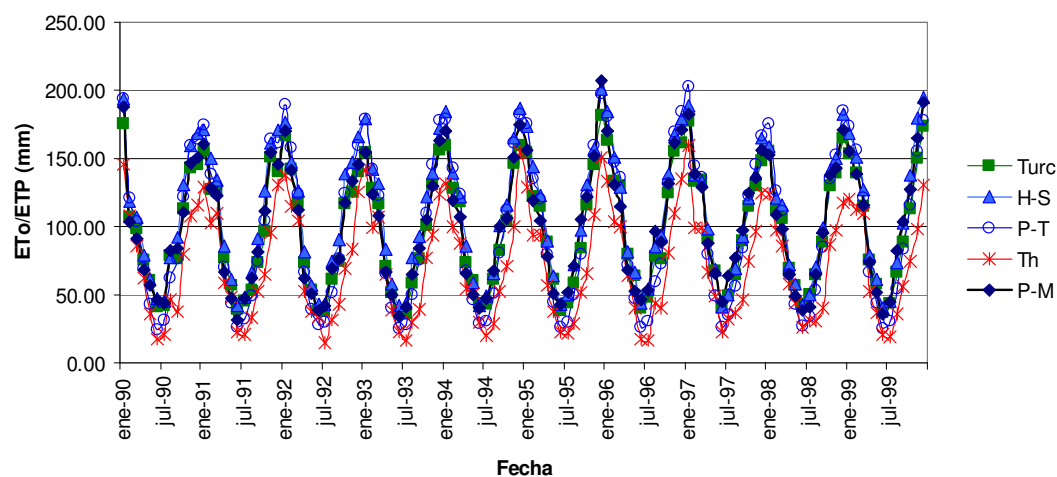


Figura III.3 – ET₀/ETP mensuales en el período 1990-1999. Turc (1961), H-S: Hargreaves - Samani (1985), P-T: Priestley – Taylor (1972), Th: Thornthwaite (1948), P-M: FAO-56 Penman-Monteith (2006).

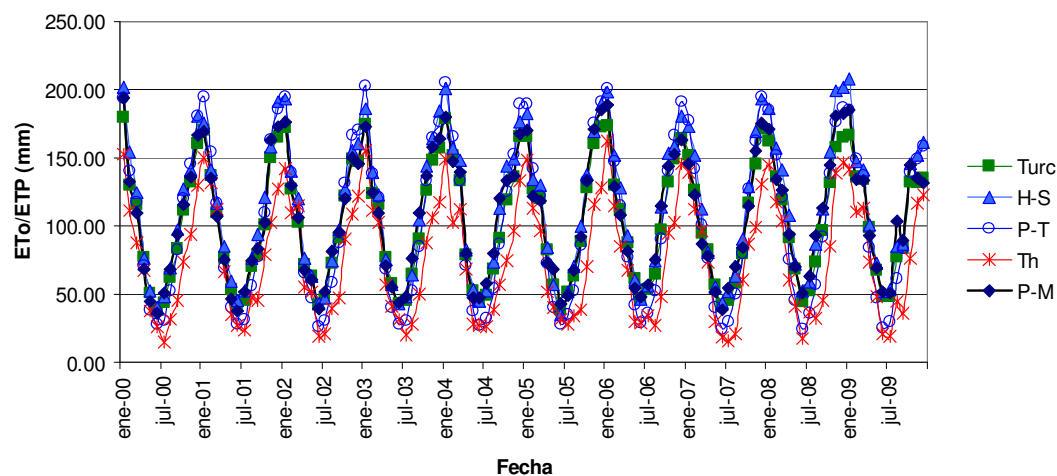


Figura III.4 – ET₀/ETP mensuales en el período 2000-2009. Turc (1961), H-S: Hargreaves - Samani (1985), P-T: Priestley – Taylor (1972), Th: Thornthwaite (1948), P-M: FAO-56 Penman-Monteith (2006).

Se observa que en los meses estivales se ubican los máximos valores de evapotranspiración, y en los meses invernales los mínimos, y de manera cíclica. En las figuras anteriores se advierte que desde 1970 hasta aproximadamente 1985 los métodos de H-S, P-T y Turc se acercan a los valores obtenidos a través del método de P-M, pero destacando que H-S es el que mejor respeta los valores máximos y mínimos, ya que P-T subestima los mínimos y Turc los máximos. El método de Th subestima en forma general los valores de evapotranspiración.

A partir de 1985 hasta 2009, el método de Turc es el que mejor se acercaría al de P-M. El método de H-S comienza a sobreestimar los máximos mientras que el de P-T sobreestima los máximos y subestima los mínimos. El método de Th sigue subestimando los valores de P-M.

Para tener una idea de cómo fueron variando en el tiempo los valores de evapotranspiración mensual calculados por los métodos citados, para las décadas extremas del estudio de comparación (períodos 1970-1979 y 2000-2009) se efectuó un análisis estadístico. Se calcularon los coeficientes de determinación (R^2) a través de análisis de regresión simple de cada método respecto al estándar FAO-56 P-M (figuras III.5 y III.6), como así también el cálculo del coeficiente de eficiencia (E) (Nash y Sutcliffe, 1970) que se presenta en la Tabla III.1.

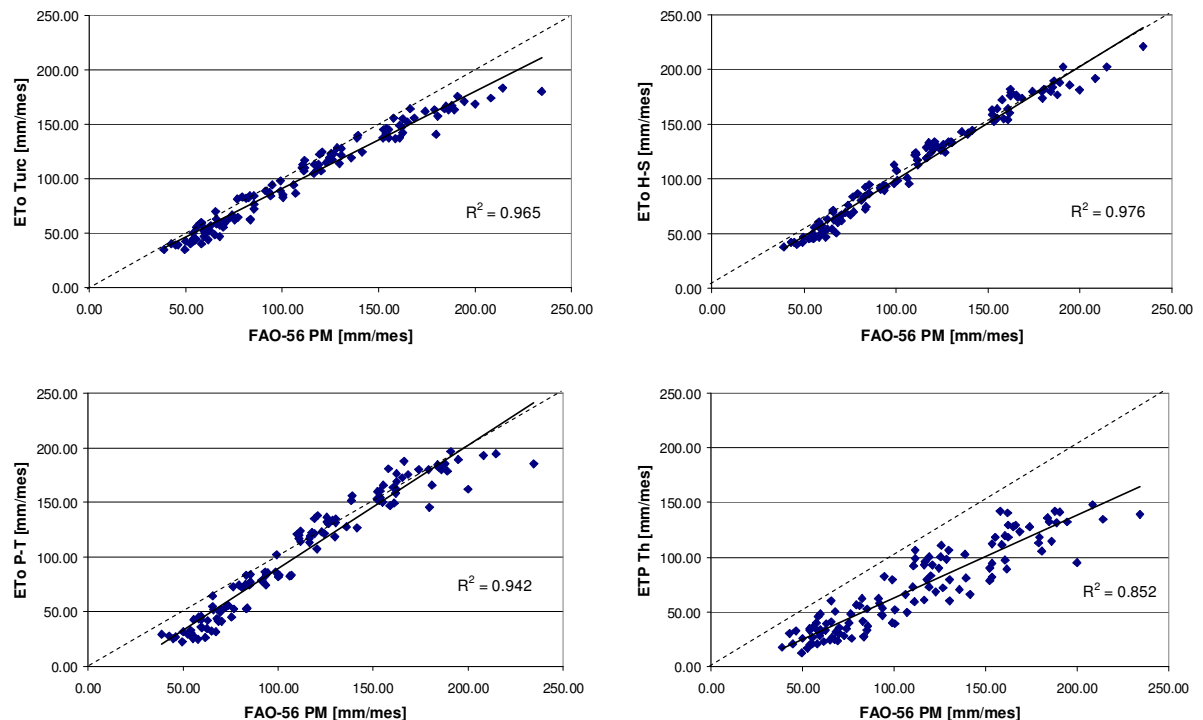


Figura III.5 – Rectas de regresión de cada método respecto al de FAO-56 P-M (período 1970-1979). La línea de trazos corresponde con la recta de ajuste perfecto. Turc (1961), H-S: Hargreaves - Samani (1985), P-T: Priestley – Taylor (1972), Th: Thornthwaite (1948), P-M.

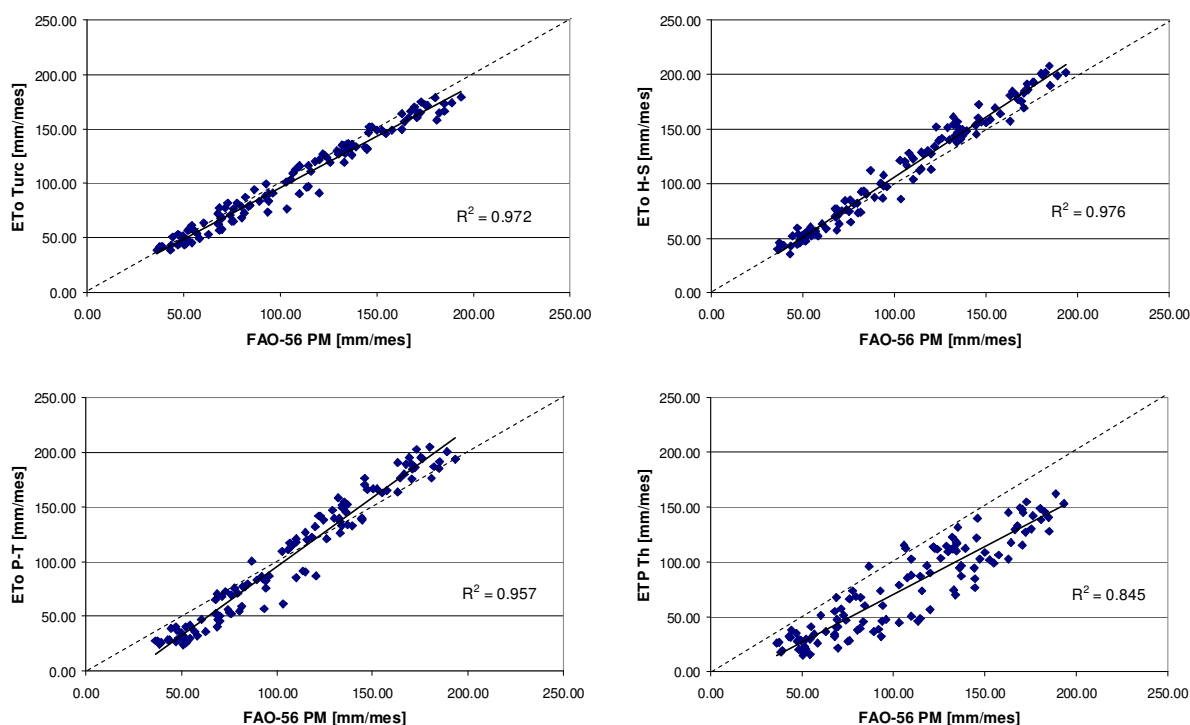


Figura III.6 – Rectas de regresión de cada método respecto al de FAO-56 P-M (período 2000-2009). La línea de trazos corresponde con la recta de ajuste perfecto. Turc (1961), H-S: Hargreaves - Samani (1985), P-T: Priestley – Taylor (1972), Th: Thornthwaite (1948), P-M.

Tabla III.1 – Valores de E y R^2 para los períodos 1970-1979 y 2000-2009.

	E		R^2	
	1970 - 1979	2000 - 2009	1970 - 1979	2000 - 2009
Turc	0,91	0,96	0,97	0,97
H-S	0,97	0,93	0,98	0,98
P-T	0,87	0,86	0,94	0,96
Th	0,13	0,39	0,85	0,84

En el período 1970-1979 se observa que el método de H-S brinda el mejor ajuste ($R^2 = 0,98$) y presentando a su vez el mayor coeficiente de eficiencia ($E = 0,97$).

El período 2000-2009 tiene a los métodos de Turc, H-S y P-T con buenos ajustes ($R^2 = 0,97$; $0,98$ y $0,96$, respectivamente), pero teniendo el método de Turc el de mayor coeficiente de eficiencia ($E = 0,96$).

El método de Th es el que peor ajusta.

Haciendo un análisis extendido, para cada década de estudio se calcularon los valores totales anuales, el valor promedio anual de ETP/ETo y las diferencias porcentuales respecto al método estándar (tablas III.2 a III.5), con la finalidad de evidenciar las variaciones interanuales.

Tabla III.2 – Valores totales anuales de ETP/ETo en mm (período 1970-1979).

	Penman-Monteith	Turc	Hargreaves-Samani	Priestley-Taylor	Thornthwaite
1970	1382.25	1218.63	1393.54	1222.17	860.73
1971	1335.41	1242.13	1373.34	1243.48	841.67
1972	1336.31	1196.51	1344.32	1219.83	851.05
1973	1240.67	1180.95	1248.56	1208.67	833.98
1974	1407.87	1251.21	1364.27	1237.26	840.02
1975	1388.22	1242.32	1361.71	1237.02	854.28
1976	1311.22	1180.91	1311.15	1193.77	831.62
1977	1277.21	1173.23	1305.02	1199.49	871.26
1978	1316.00	1199.88	1300.34	1216.84	854.40
1979	1298.32	1174.29	1308.01	1179.82	850.11
Promedio	1329.35	1206.01	1331.03	1215.84	848.91
Dif. respecto a P-M (%)		-9	0	-9	-36

Tabla III.3 – Valores totales anuales de ETP/ETo en mm (período 1980-1989).

	Penman-Monteith	Turc	Hargreaves-Samani	Priestley-Taylor	Thornthwaite
1980	1342.21	1216.58	1341.55	1240.33	884.49
1981	1315.98	1191.52	1303.78	1214.35	867.95
1982	1340.71	1200.05	1360.68	1205.48	874.28
1983	1245.45	1172.01	1300.25	1204.23	882.89
1984	1162.33	1138.34	1241.00	1177.51	843.59
1985	1212.22	1168.96	1330.74	1183.80	880.73
1986	1224.06	1169.15	1322.88	1189.43	882.14
1987	1228.61	1187.38	1354.20	1208.49	876.65
1988	1275.69	1181.19	1397.24	1170.83	857.62
1989	1278.47	1229.97	1411.49	1207.89	912.95
Promedio	1262.57	1185.52	1336.38	1200.23	876.33
Dif. respecto a P-M (%)		-6	6	-5	-31

Tabla III.4 – Valores totales anuales de ETP/ETo en mm (período 1990-1999).

	Penman-Monteith	Turc	Hargreaves-Samani	Priestley-Taylor	Thornthwaite
1990	1172.61	1156.64	1280.51	1171.74	864.43
1991	1159.72	1142.51	1308.91	1168.21	870.31
1992	1159.23	1147.26	1291.57	1184.49	848.77
1993	1124.02	1119.56	1286.05	1164.39	853.60
1994	1200.15	1181.83	1315.30	1206.03	883.63
1995	1260.37	1209.27	1345.31	1221.36	862.55
1996	1285.54	1253.50	1374.84	1257.16	886.00
1997	1304.39	1241.03	1305.84	1248.27	907.78
1998	1166.07	1182.80	1259.92	1194.32	840.30
1999	1287.15	1212.09	1361.26	1205.63	868.11
Promedio	1211.93	1184.65	1312.95	1202.16	868.55
Dif. respecto a P-M (%)		-2	8	-1	-28

Tabla III.5 – Valores totales anuales de ETP/ETo en mm (período 2000-2009).

	Penman-Monteith	Turc	Hargreaves-Samani	Priestley-Taylor	Thornthwaite
2000	1215.98	1185.62	1314.07	1201.27	873.54
2001	1218.71	1199.80	1316.18	1229.33	946.67
2002	1225.04	1208.03	1299.35	1231.12	921.20
2003	1270.62	1224.57	1331.41	1241.33	908.12
2004	1337.77	1269.28	1395.09	1281.84	913.91
2005	1293.79	1255.41	1341.05	1269.17	897.60
2006	1316.97	1272.68	1414.96	1288.18	941.06
2007	1177.43	1170.13	1313.39	1204.93	884.13
2008	1424.13	1299.29	1528.02	1289.12	969.60
2009	1321.44	1258.92	1404.65	1250.46	922.30
Promedio	1280.19	1234.37	1365.82	1248.68	917.81
Dif. respecto a P-M (%)		-4	7	-2	-28

En el período 1970-1979 se observa que el valor promedio anual que presenta el método de H-S tiene una diferencia nula respecto al calculado para el método de P-M, mientras que los calculados por los métodos de Turc y P-T tienen ambos una subestimación del 9%. El método de Th es el que más se aleja del método estándar con una subestimación del 36%.

Para las décadas posteriores, las tendencias presentadas por los métodos de H-S, Turc y P-T se van revirtiendo, llegando a fines de 2010 con el método de H-S sobrestimando en un 7% , P-T y Turc subestimando en 2 y 4%, respectivamente, siempre respecto a los valores promedios anuales para cada período considerado. El método de Th se aparta del método estándar con una subestimación del 28%.

Para reflejar esto más claramente, se calcularon para cada década de estudio los valores anuales acumulados de evapotranspiración como así también las sobre/bajo estimaciones acumuladas anuales respecto al método FAO-56 P-M (figuras III.7 y III.8). Se consideró para el año 1970 la incidencia de los valores anuales de evapotranspiración de 3 años anteriores para la tendencia previa al inicio. La lectura de las figuras refleja lo anteriormente citado.

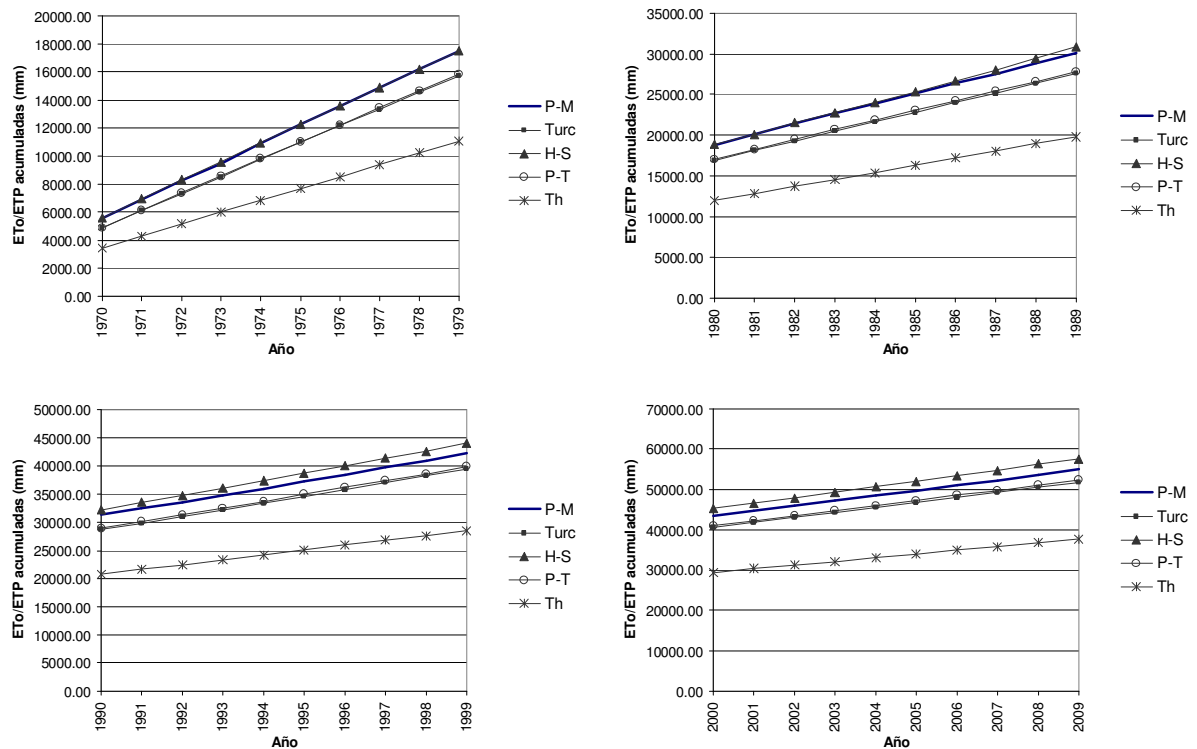


Figura III.7 – ETP/ETo acumuladas anuales. Turc (1961), H-S: Hargreaves - Samani (1985), P-T: Priestley – Taylor (1972), Th: Thornthwaite (1948), P-M: FAO-56 Penman-Monteith (2006).

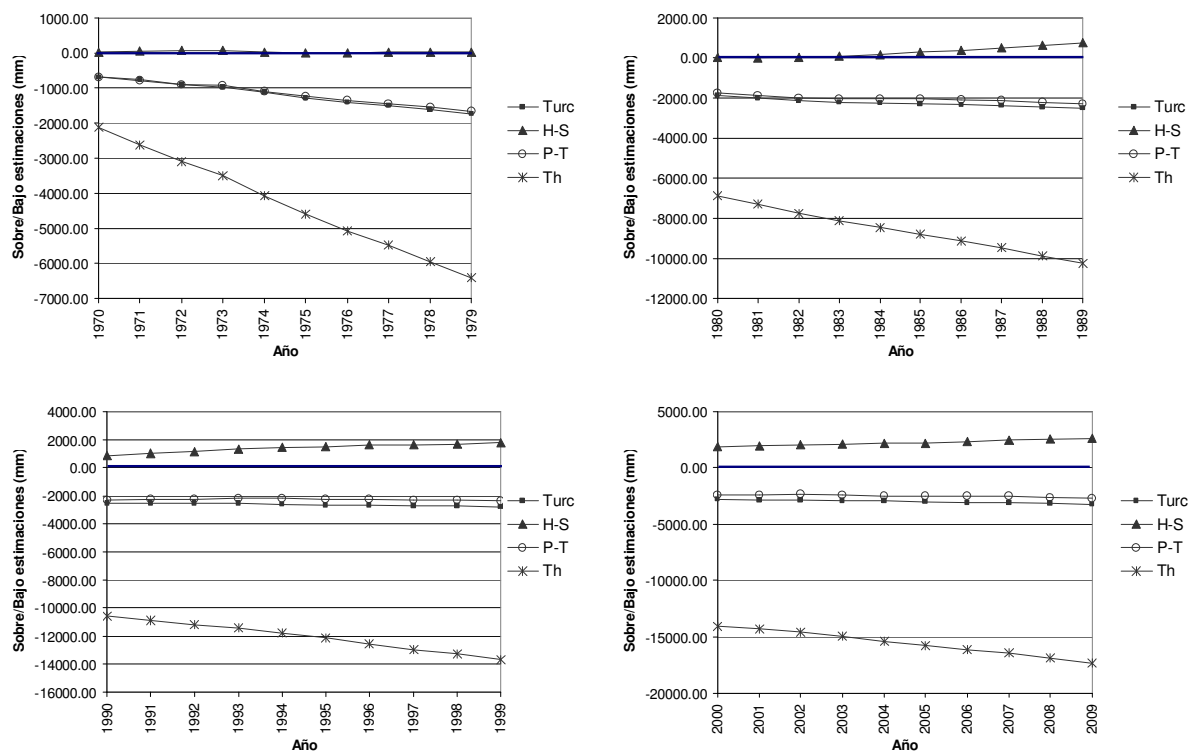


Figura III.8 – Sobre/Bajo estimaciones acumuladas anuales de los diversos métodos de cálculo de ETP/ETo respecto a FAO-56 PM. Turc (1961), H-S: Hargreaves - Samani (1985), P-T: Priestley – Taylor (1972), Th: Thornthwaite (1948), P-M).

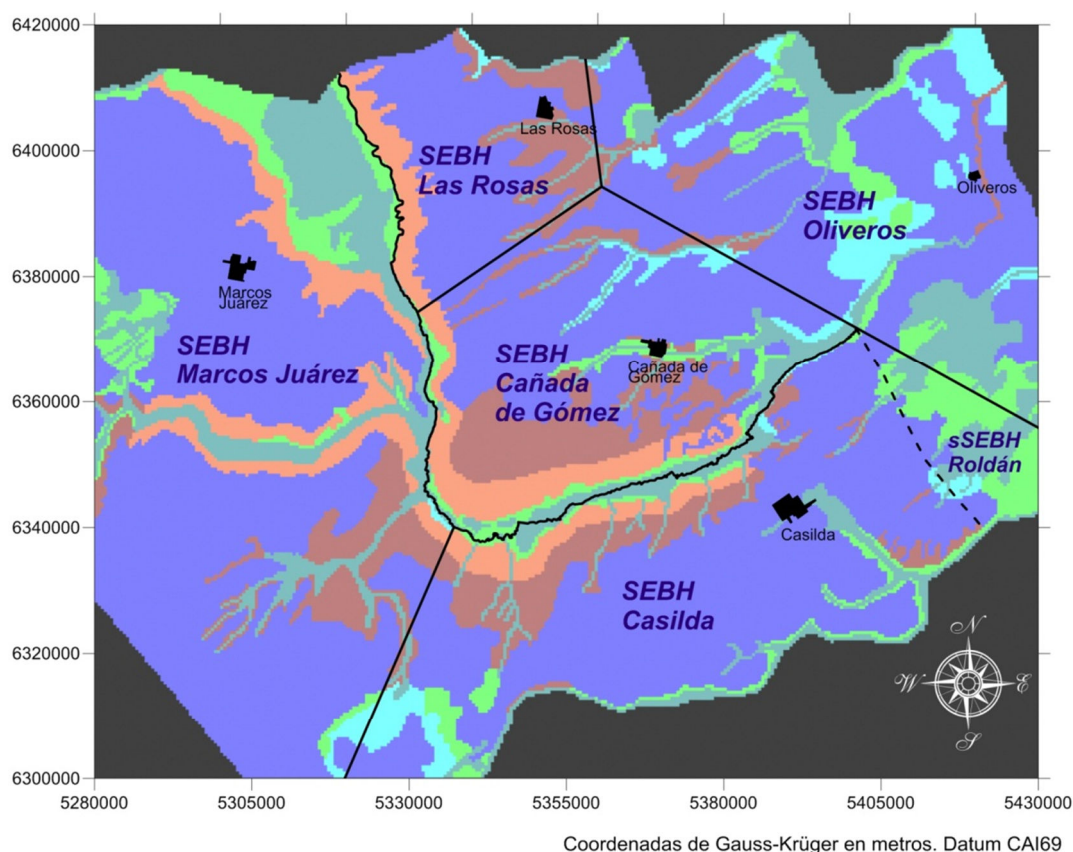
2) Conclusiones sobre la comparación entre métodos

En cuanto a la aplicación de los distintos métodos de estudio de ETP/ET_o respecto a la calculada por el método FAO-56 P-M puede decirse que:

- a) El método de Thornthwaite subestima la evapotranspiración respecto al método FAO-56 P-M en todo el período estudiado, presentando el peor ajuste con los valores más bajos de E y R², especialmente en el coeficiente de eficiencia.
- b) El método de Hargreaves-Samani es el que mejor se acerca en la década 1970-1979 al método FAO-56 P-M, con diferencia prácticamente nula en valores promedios anuales y con los mejores valores de ajuste, tanto en los coeficientes E y R². Estas consideraciones se van revirtiendo progresivamente hacia adelante en el tiempo, ya que el método de Hargreaves-Samani comienza a sobreestimar la evapotranspiración ya en la década del '80, a pesar de tener altos valores de los coeficientes E y R².
- c) En el período estudiado, los métodos de Turc y de Priestley-Taylor tienen ambos altos valores de los coeficientes E y R². Ambos subestiman la evapotranspiración, pero con tendencia decreciente desde 1970 hacia 2010, siendo ambos métodos los que mejor se acercan a los valores de referencia calculados por el método FAO-56 P-M, especialmente en las dos últimas décadas del estudio.

IV. ANEXO IV – BALANCES HÍDRICOS: ANÁLISIS ZONAL DE PRECIPITACIONES Y RECARGA

Las zonas de recarga y límites de los SEBH en el área de estudio considerados para el cálculo de los balances hídricos seriados se muestran en la Figura IV.1 a través de un esquema de colores, a los efectos de guía.



Referencias

Zona 1		Zona 2 pte.		Zona 4	
Zona 2		Zona 3		Zona 5	

Figura IV.1 – Mapa de zonas de recarga y límites de los SEBH considerados en el área de estudio.

Para el estudio en régimen estacionario, se presentan a continuación los valores de recargas y precipitaciones diarios, mensuales y anuales para las cinco zonas de recarga en el período de estudio para los SEBH de Oliveros, Casilda, Cañada de Gómez, Marcos Juárez y Las Rosas, y el sSEBH de Roldán (figuras IV.2 a IV.34).

SEBH Oliveros

- Zona 1 de recarga

R = 47,1 mm/año

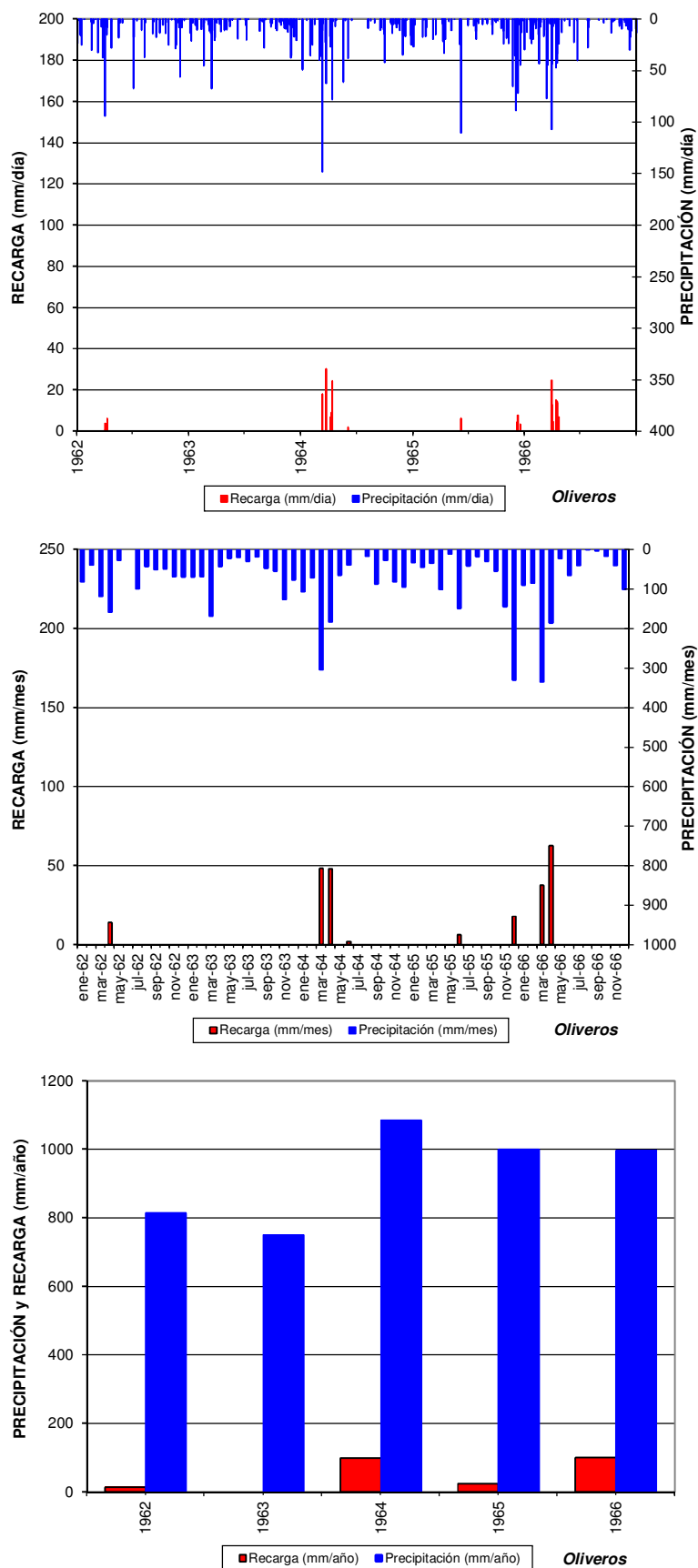


Figura IV.2 – Recargas y precipitaciones diarias, mensuales y anuales en la zona 1 de recarga (Oliveros).

- Zona 2 de recarga $R = 37,9 \text{ mm/año}$

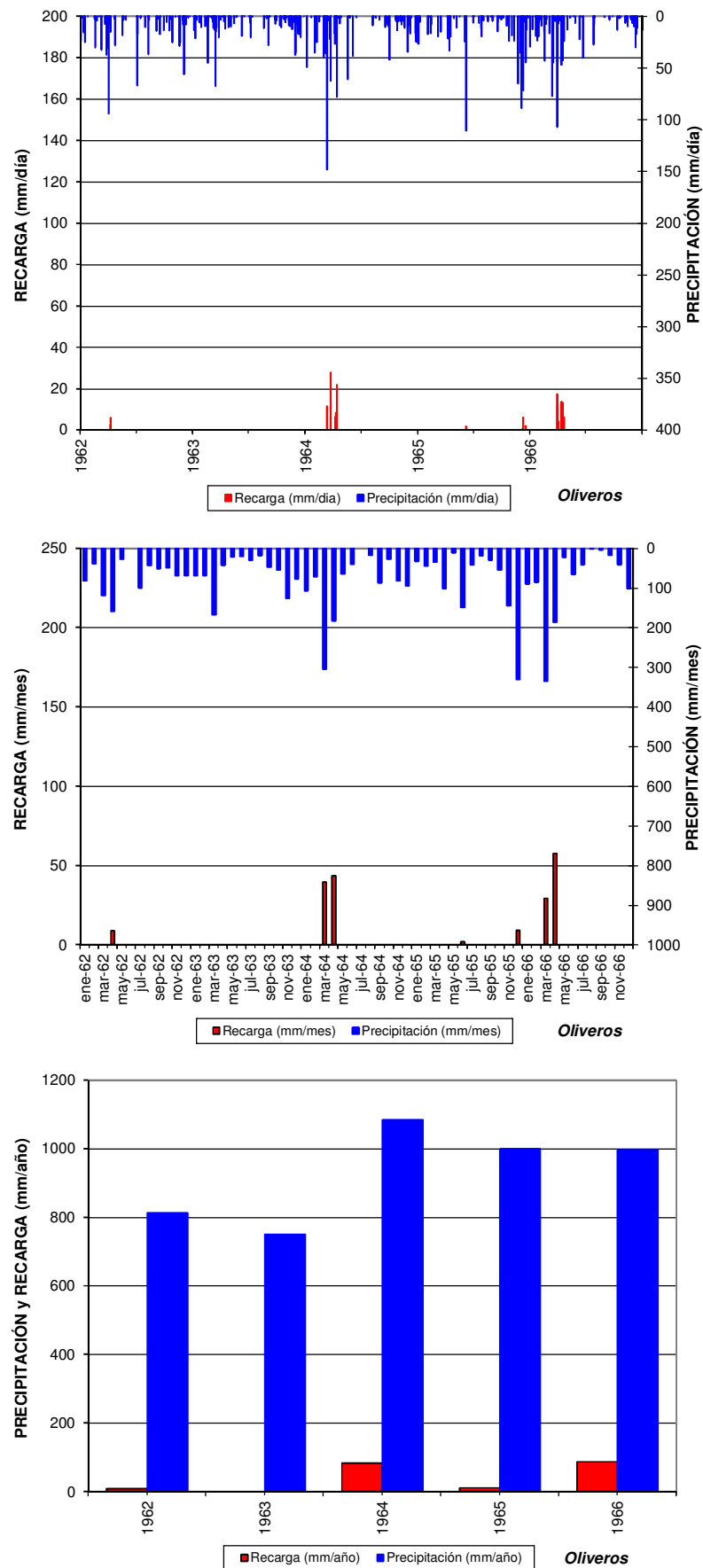


Figura IV.3 – Recargas y precipitaciones diarias, mensuales y anuales en la zona 2 de recarga (Oliveros).

- Zona 3 de recarga $R = 29,2 \text{ mm/año}$

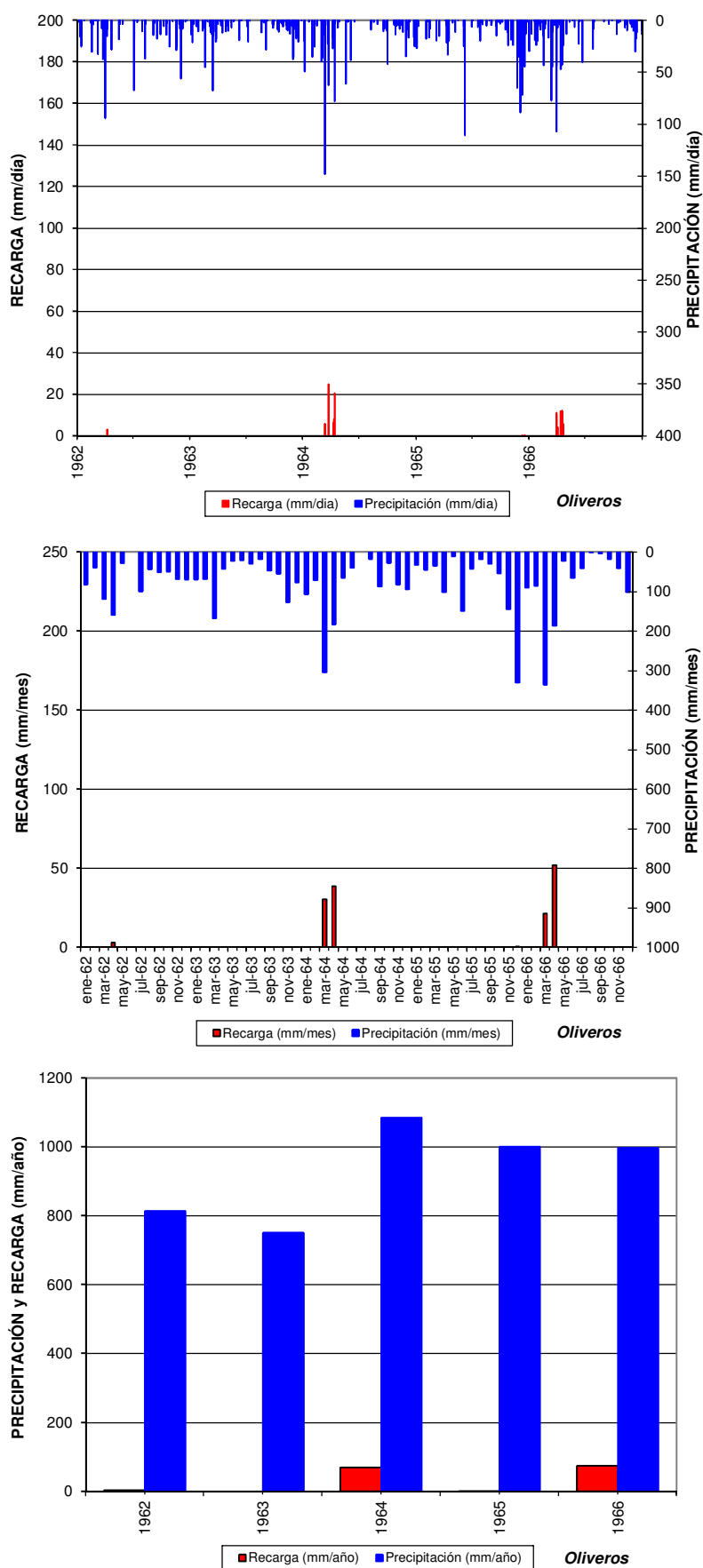


Figura IV.4 – Recargas y precipitaciones diarias, mensuales y anuales en la zona 3 de recarga (Oliveros).

- Zona 4 de recarga $R = 18,2 \text{ mm/año}$

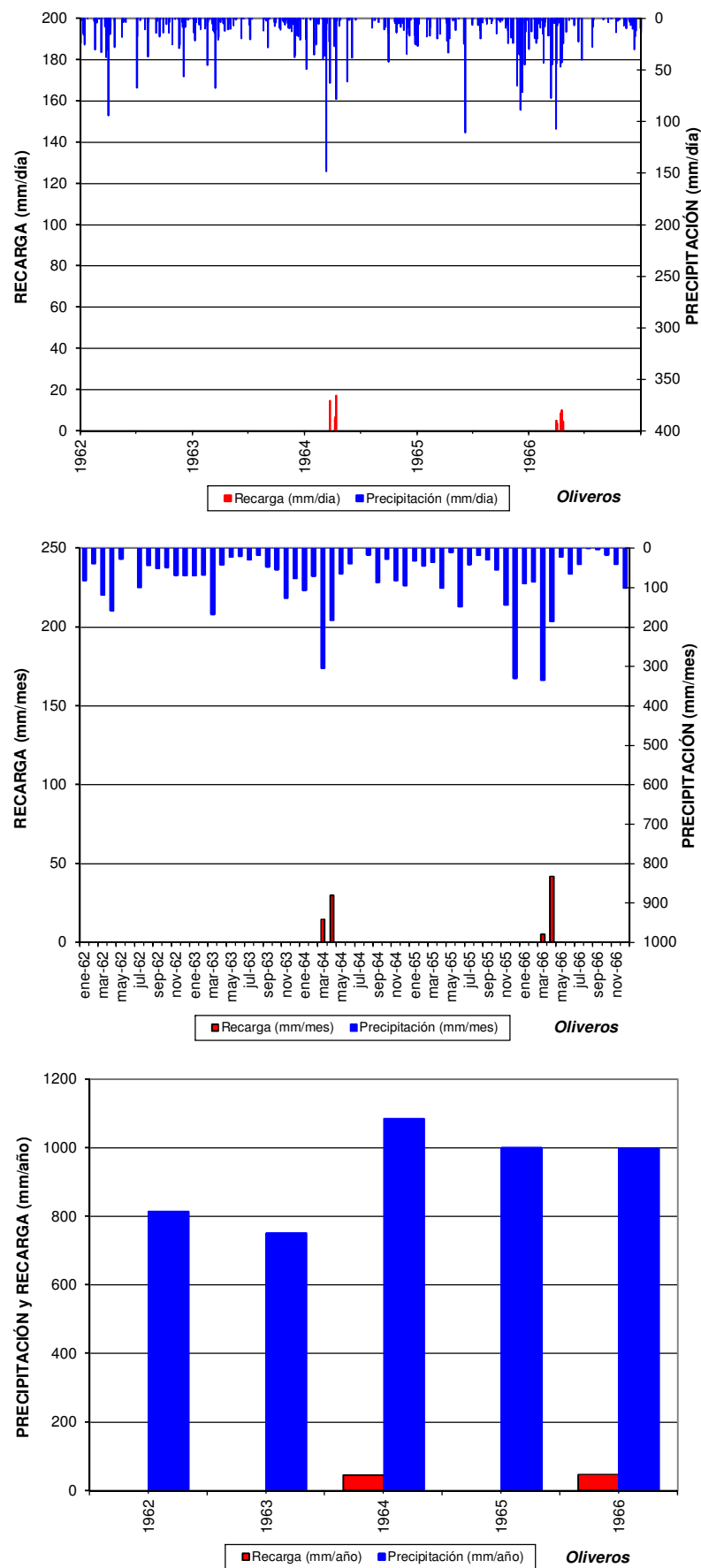


Figura IV.5 – Recargas y precipitaciones diarias, mensuales y anuales en la zona 4 de recarga (Oliveros).

- Zona 5 de recarga $R = 10,5 \text{ mm/año}$

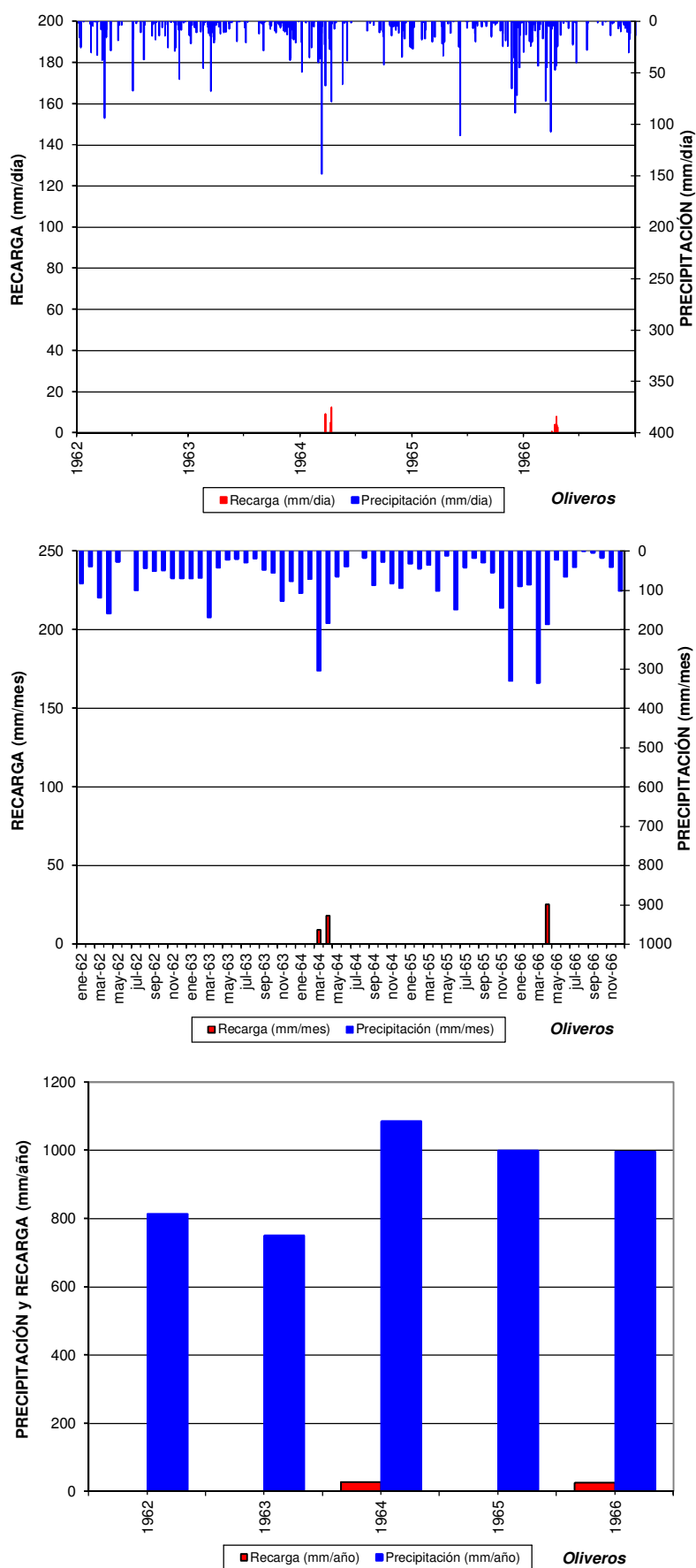


Figura IV.6 – Recargas y precipitaciones diarias, mensuales y anuales en la zona 5 de recarga (Oliveros).

SEBH Casilda

- Zona 1 de recarga $R = 71,6 \text{ mm/año}$

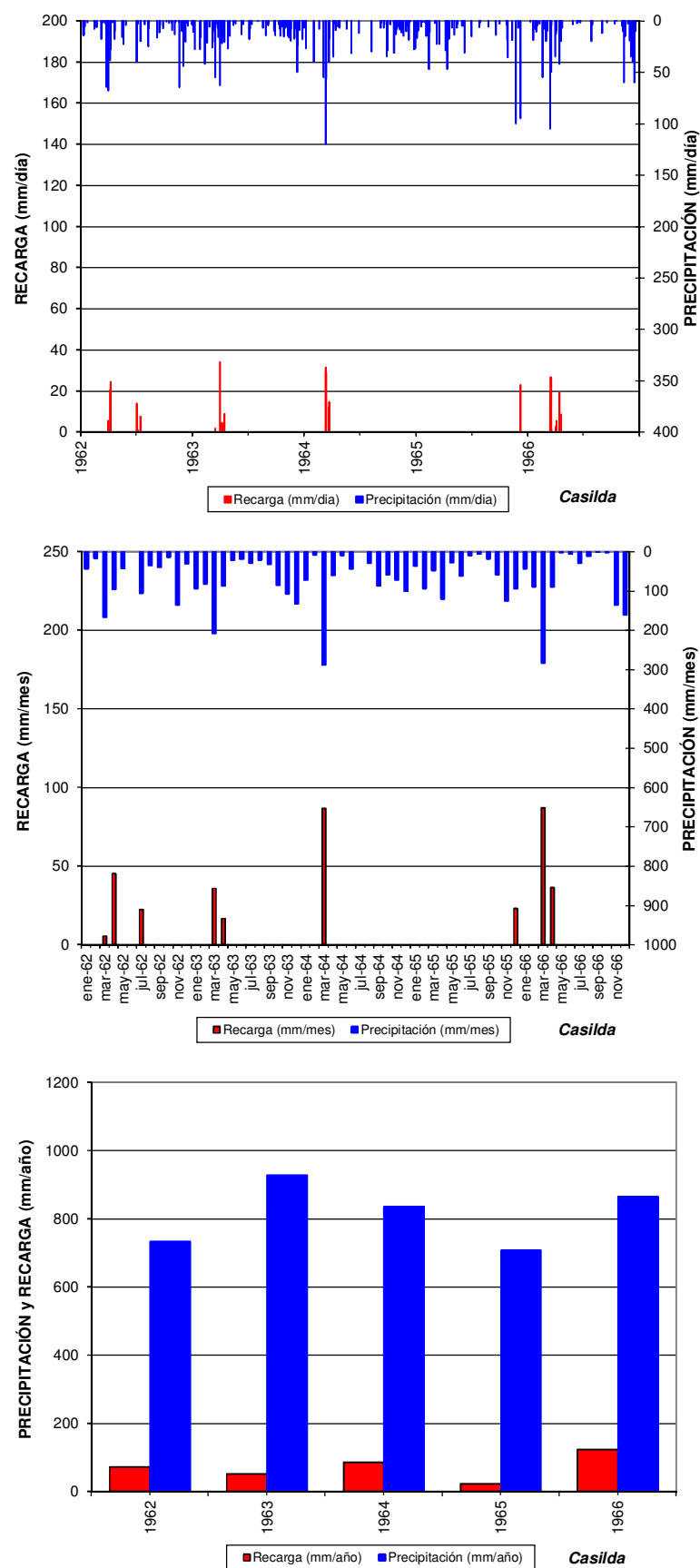


Figura IV.7 – Recargas y precipitaciones diarias, mensuales y anuales en la zona 1 de recarga (Casilda).

- Zona 2 de recarga $R = 58,9 \text{ mm/año}$

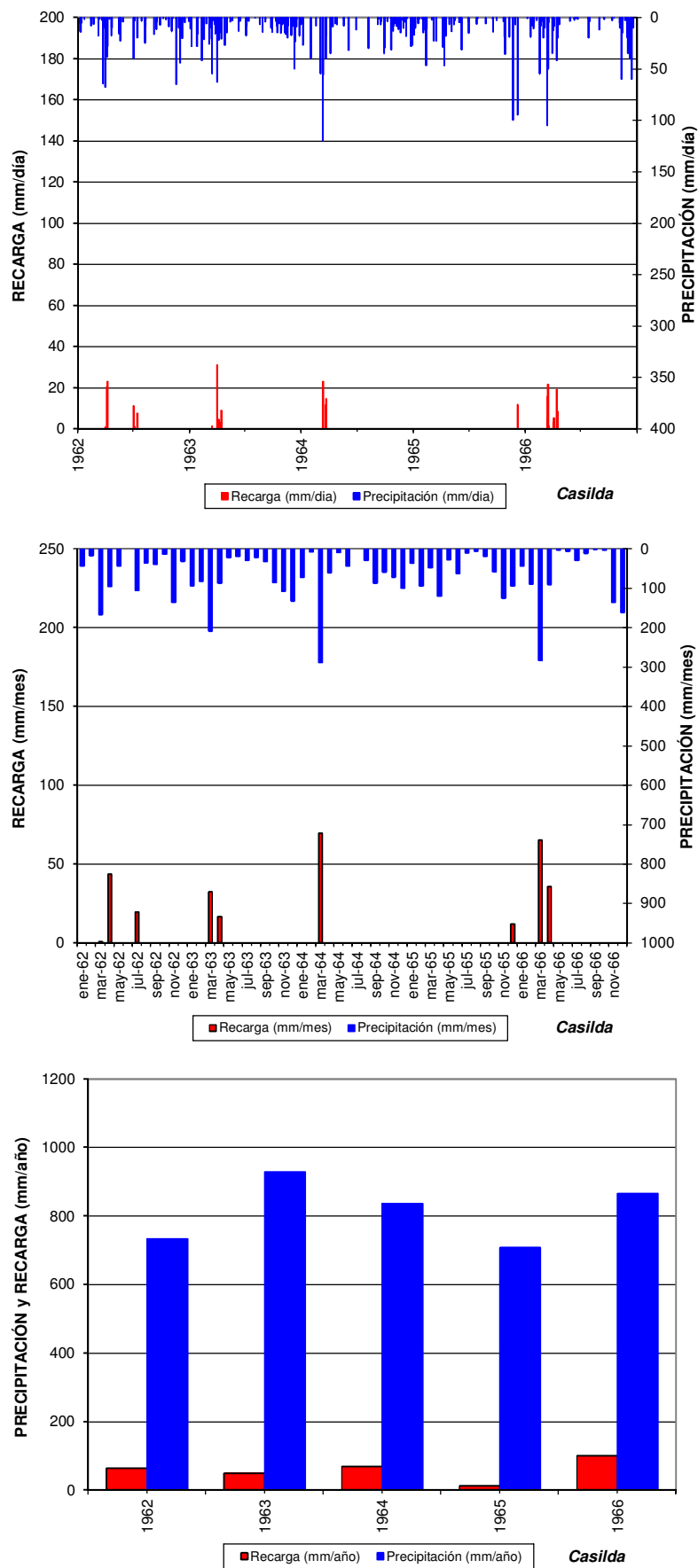


Figura IV.8 – Recargas y precipitaciones diarias, mensuales y anuales en la zona 2 de recarga (Casilda).

- Zona 2 (mayor pte.) de recarga $R = 40,7 \text{ mm/año}$

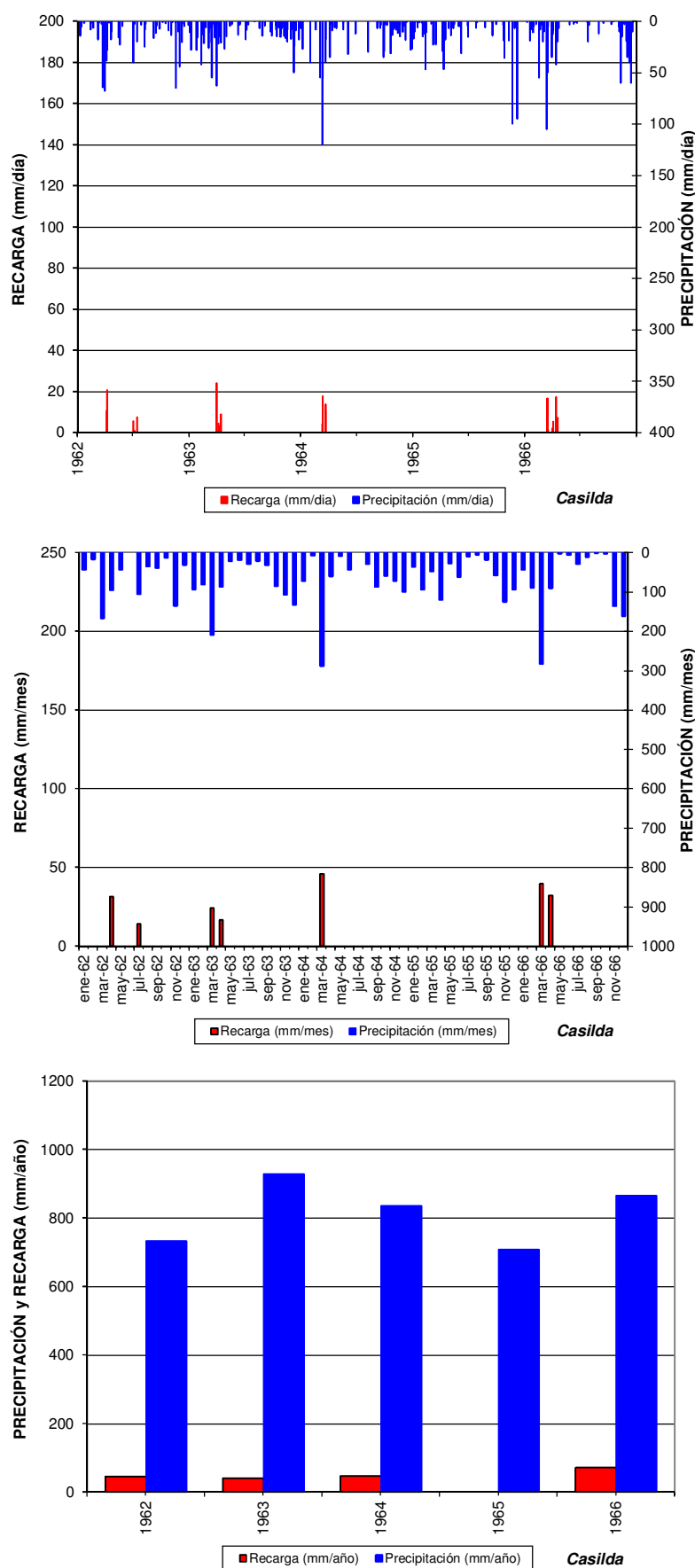


Figura IV.9 – Recargas y precipitaciones diarias, mensuales y anuales en la zona 2 (mayor pte.) de recarga (Casilda).

- Zona 3 de recarga $R = 53,7 \text{ mm/año}$

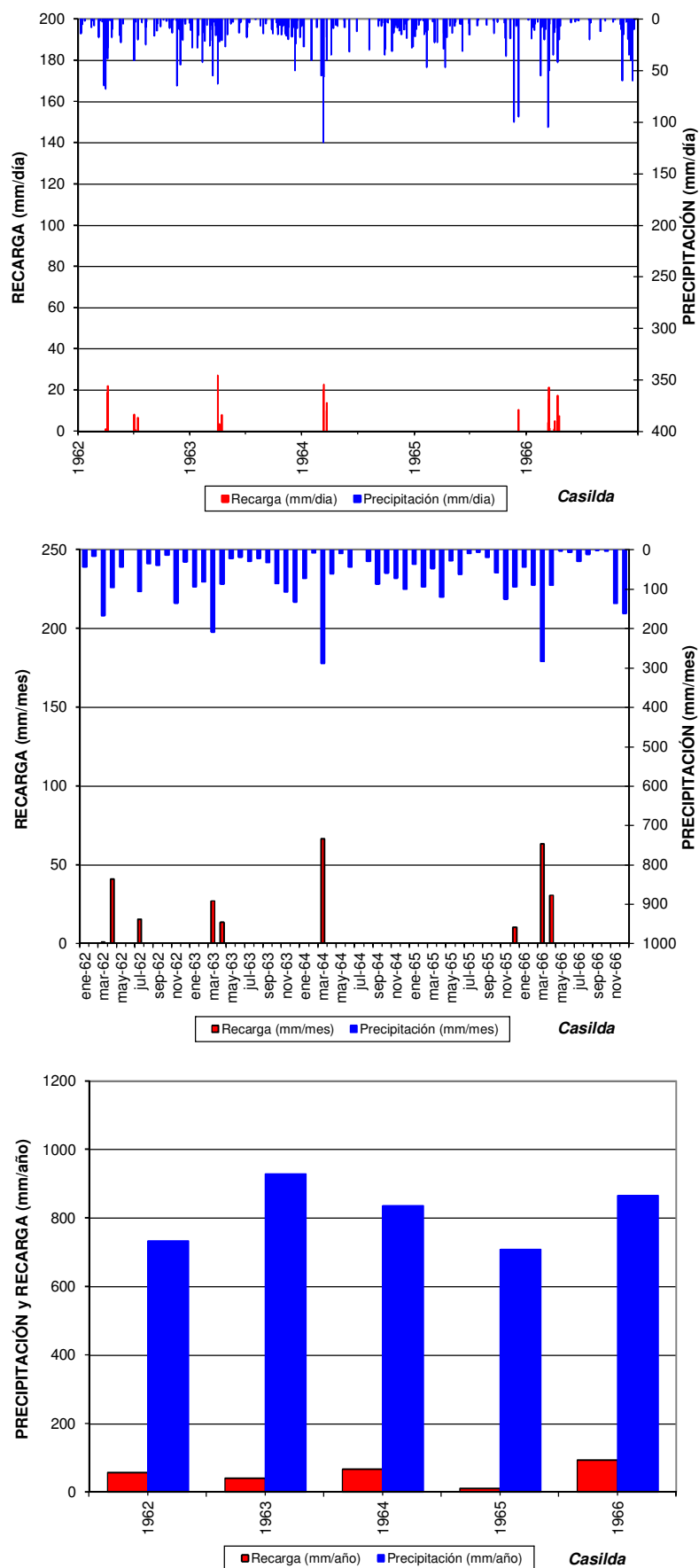


Figura IV.10 – Recargas y precipitaciones diarias, mensuales y anuales en la zona 3 de recarga (Casilda).

- Zona 4 de recarga $R = 31,0 \text{ mm/año}$

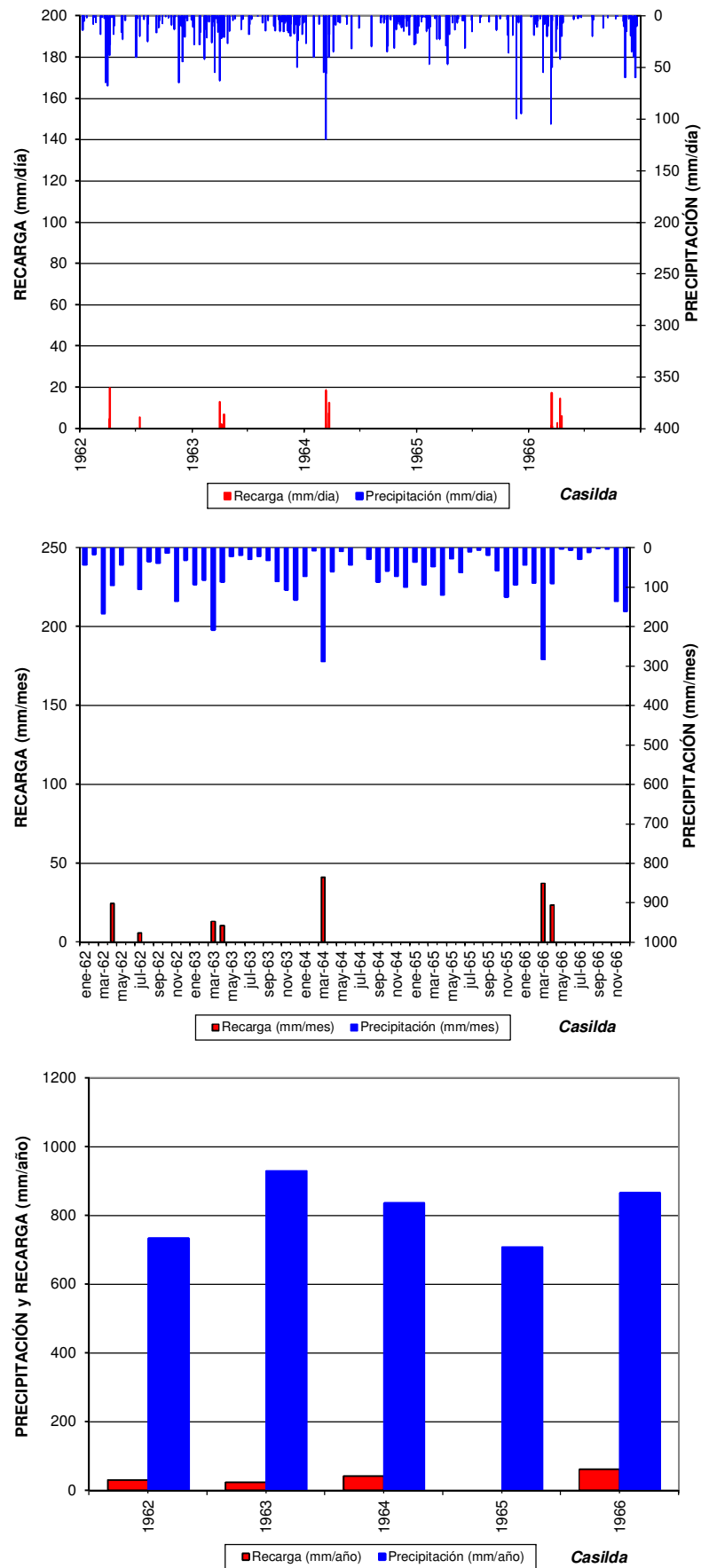


Figura IV.11 – Recargas y precipitaciones diarias, mensuales y anuales en la zona 4 de recarga (Casilda).

- Zona 5 de recarga $R = 20,3 \text{ mm/año}$

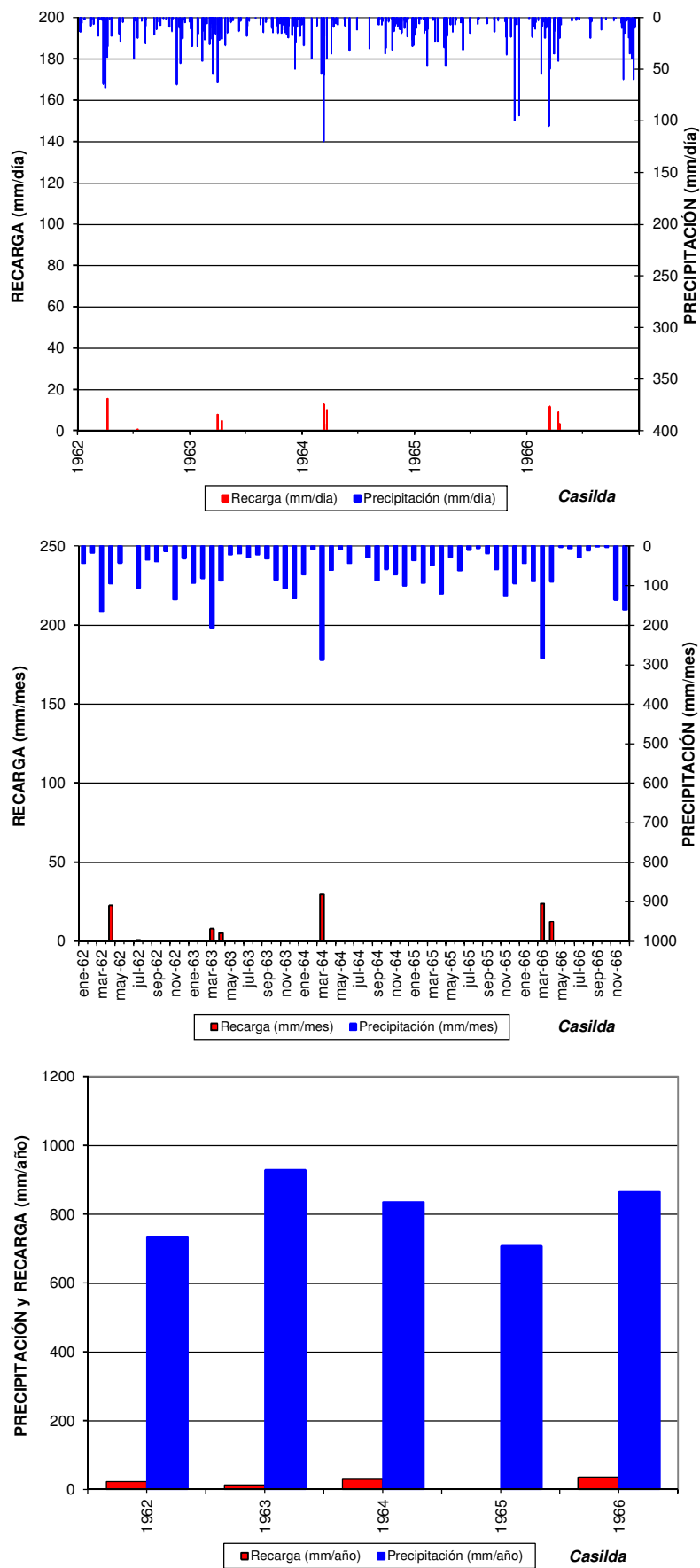


Figura IV.12 – Recargas y precipitaciones diarias, mensuales y anuales en la zona 5 de recarga (Casilda).

SEBH Cañada de Gómez

- Zona 1 de recarga $R = 97,3 \text{ mm/año}$

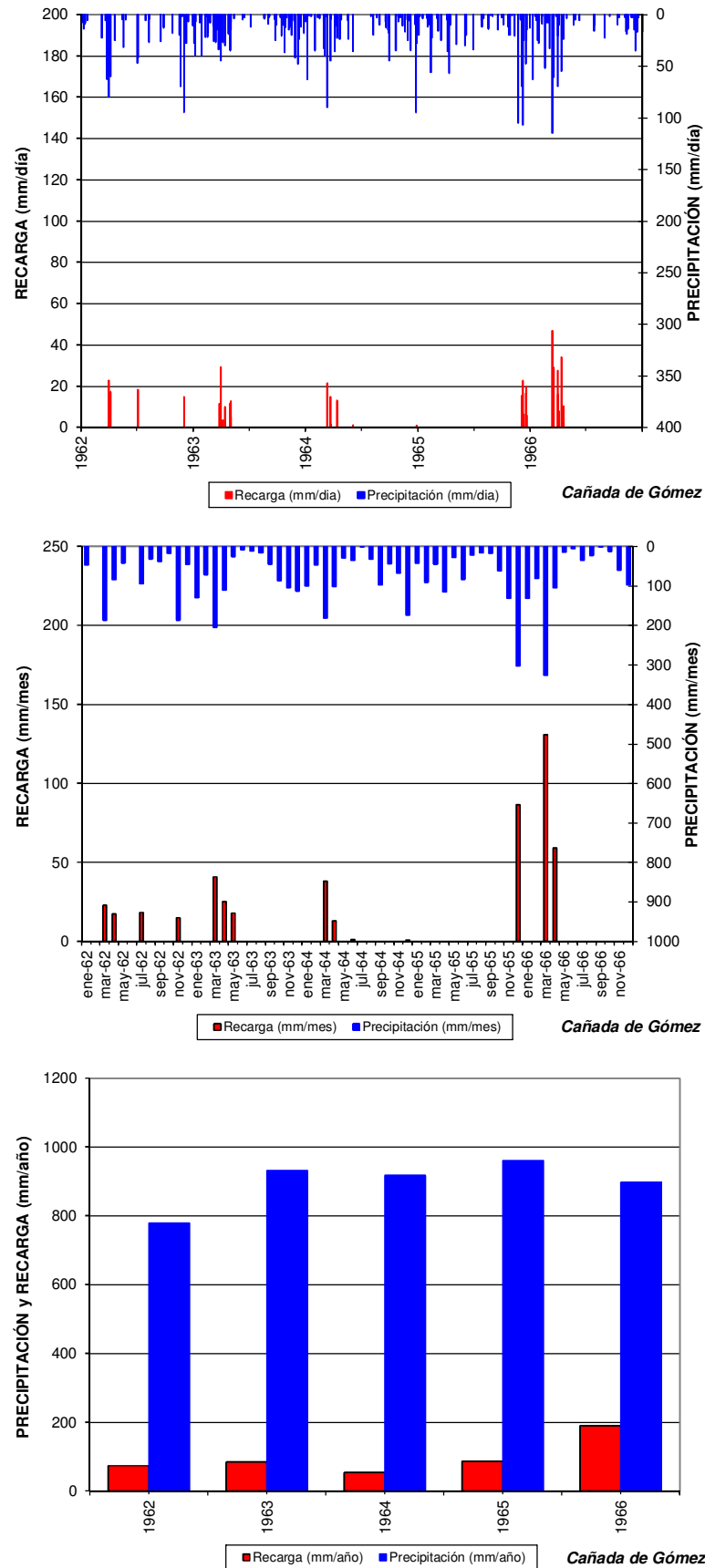


Figura IV.13 – Recargas y precipitaciones diarias, mensuales y anuales en la zona 1 de recarga (Cañada de Gómez).

- Zona 2 de recarga $R = 74,3 \text{ mm/año}$

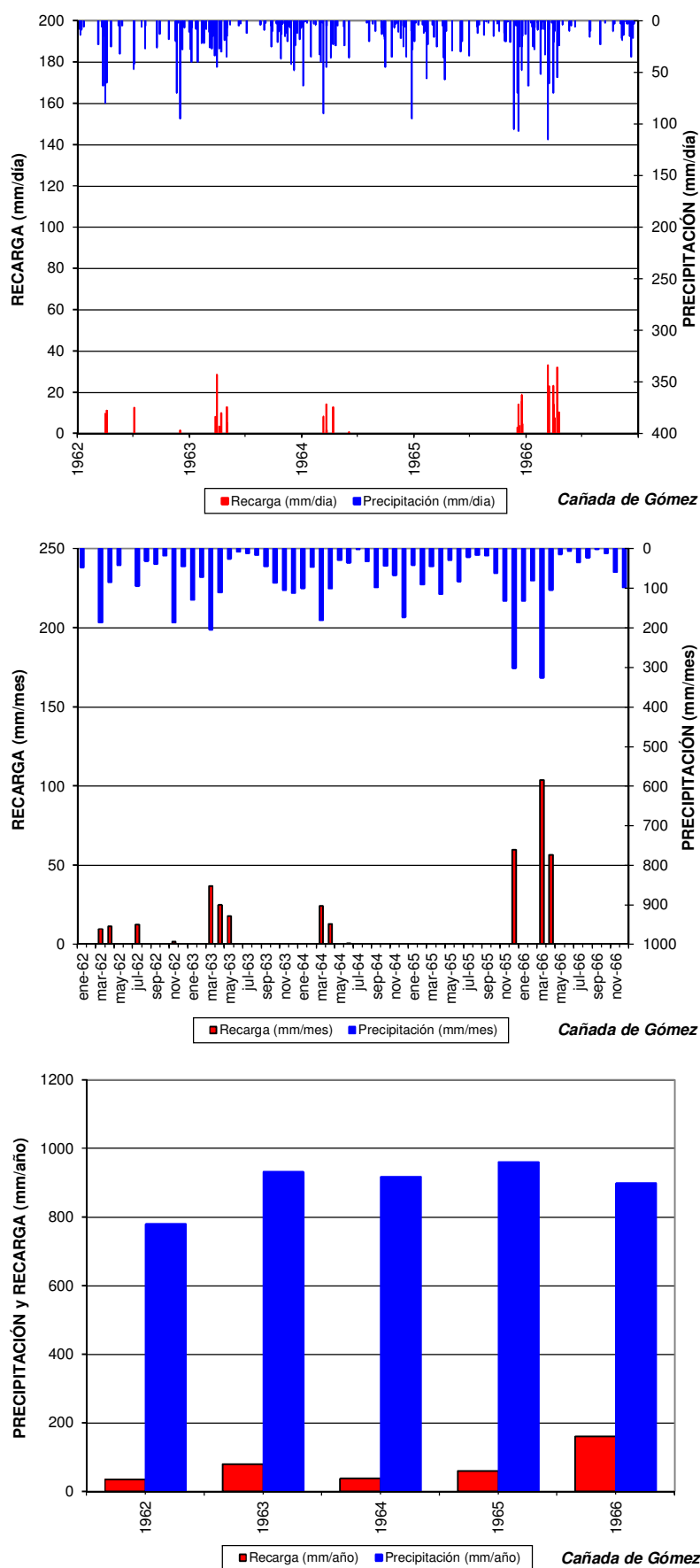


Figura IV.14 – Recargas y precipitaciones diarias, mensuales y anuales en la zona 2 de recarga (Cañada de Gómez).

- Zona 2 (mayor pte.) de recarga $R = 42,5 \text{ mm/año}$

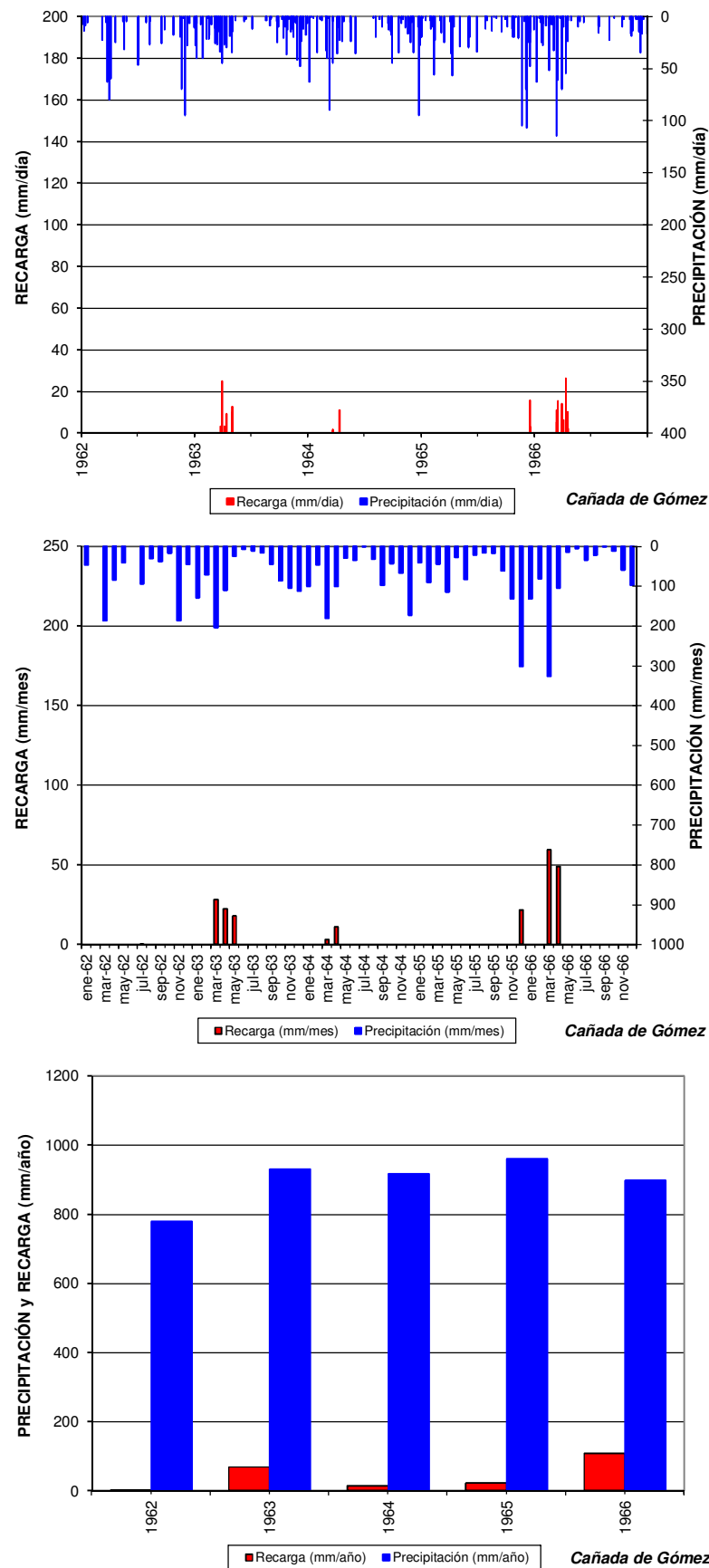


Figura IV.15 – Recargas y precipitaciones diarias, mensuales y anuales en la zona 2 (mayor pte.) de recarga (Cañada de Gómez).

- Zona 3 de recarga $R = 69,5 \text{ mm/año}$

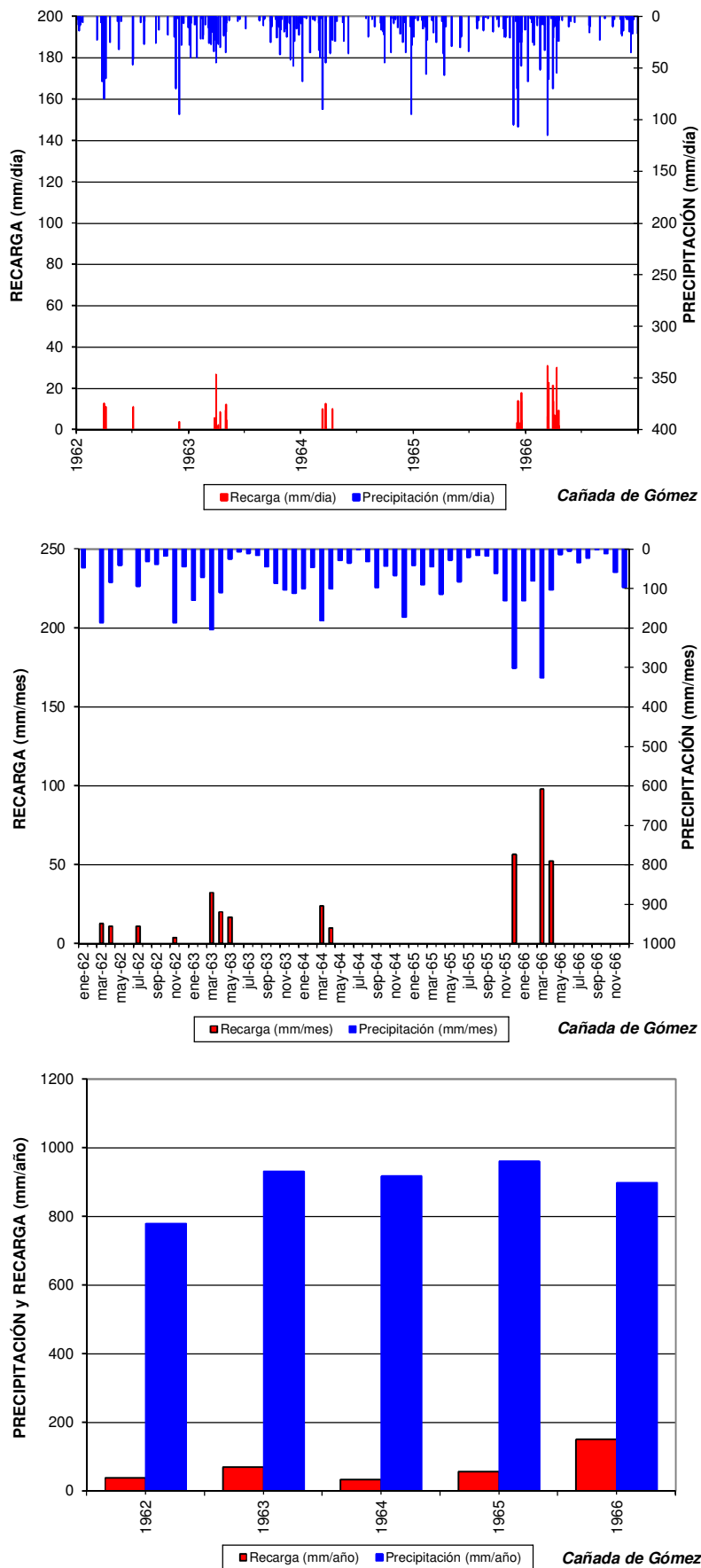


Figura IV.16 – Recargas y precipitaciones diarias, mensuales y anuales en la zona 3 de recarga (Cañada de Gómez).

- Zona 4 de recarga $R = 41,7 \text{ mm/año}$

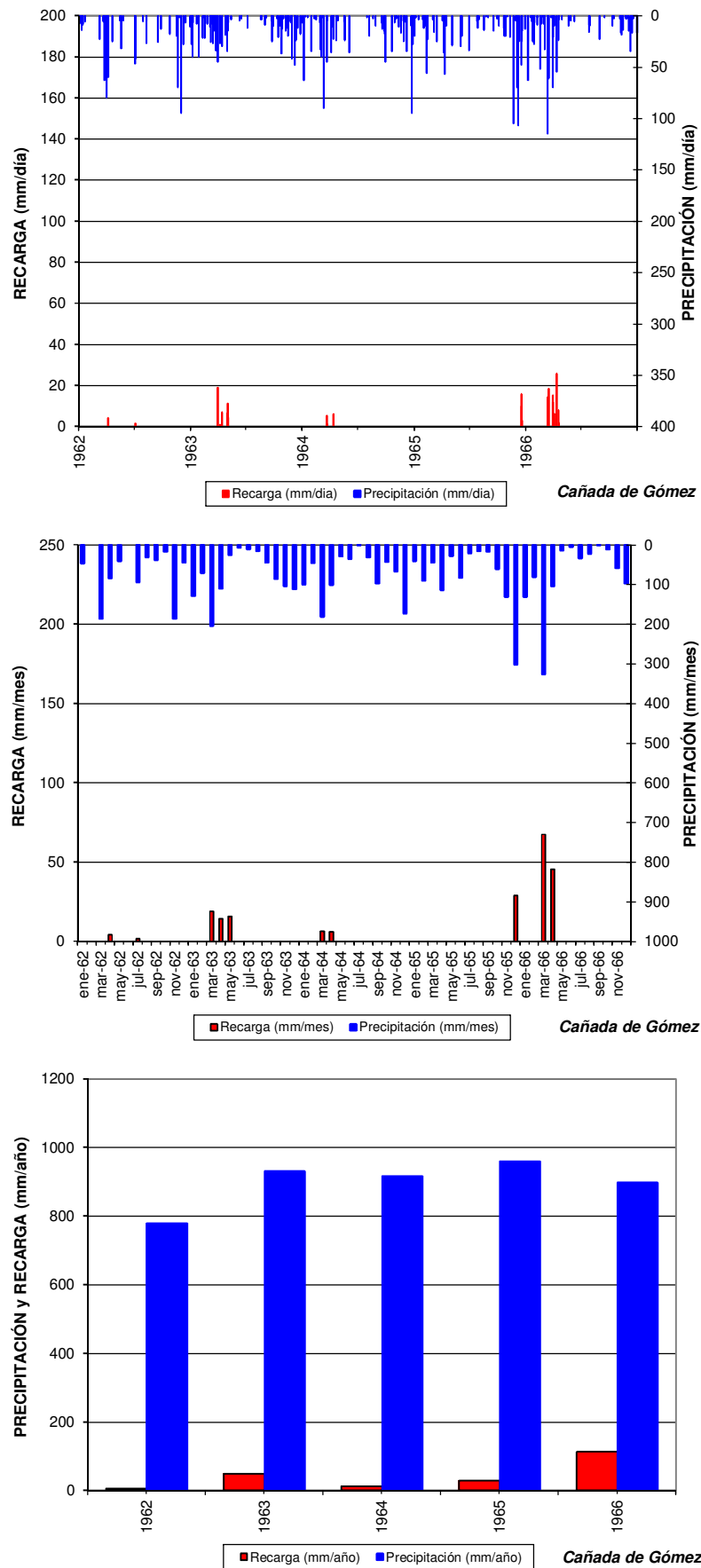


Figura IV.17 – Recargas y precipitaciones diarias, mensuales y anuales en la zona 4 de recarga (Cañada de Gómez).

- Zona 5 de recarga $R = 23,9 \text{ mm/año}$

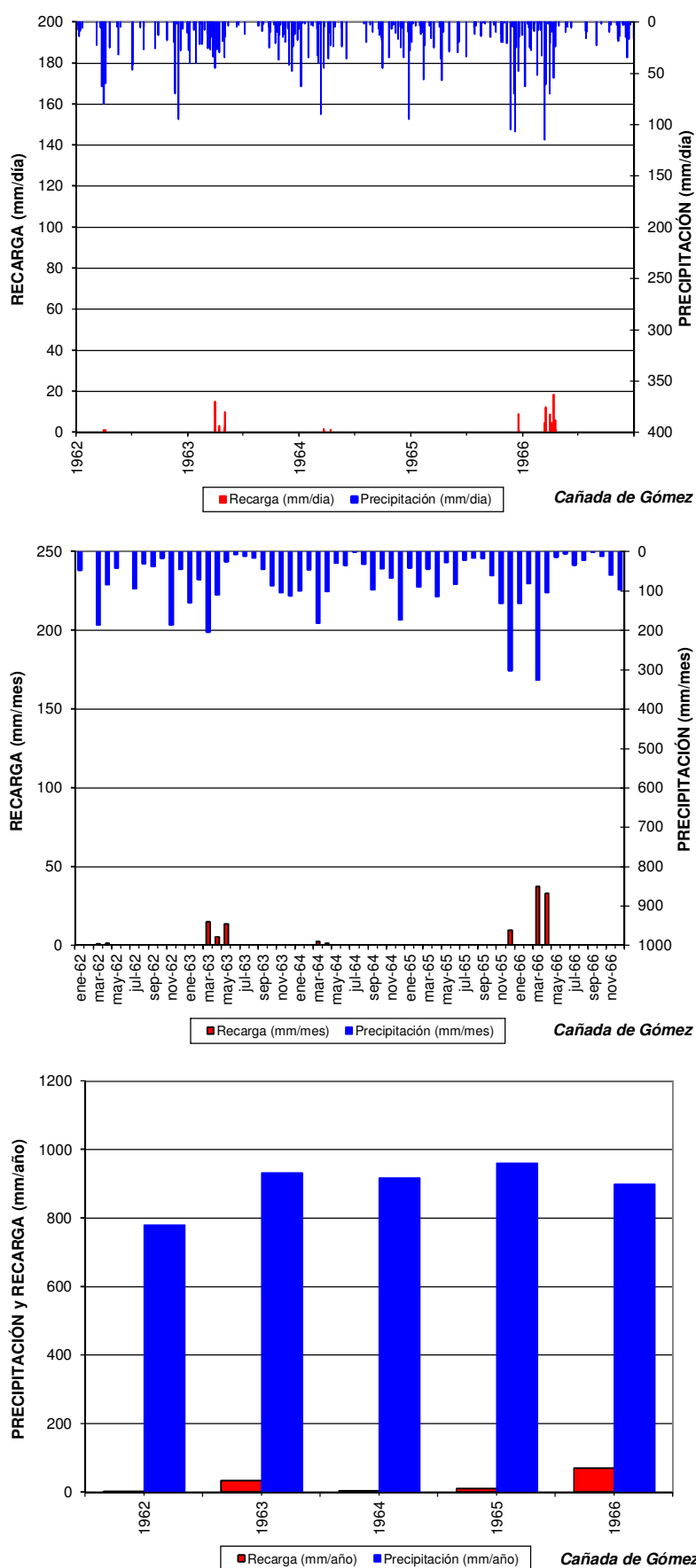


Figura IV.18 – Recargas y precipitaciones diarias, mensuales y anuales en la zona 5 de recarga (Cañada de Gómez).

SEBH Marcos Juárez

- Zona 1 de recarga R = 46,7 mm/año

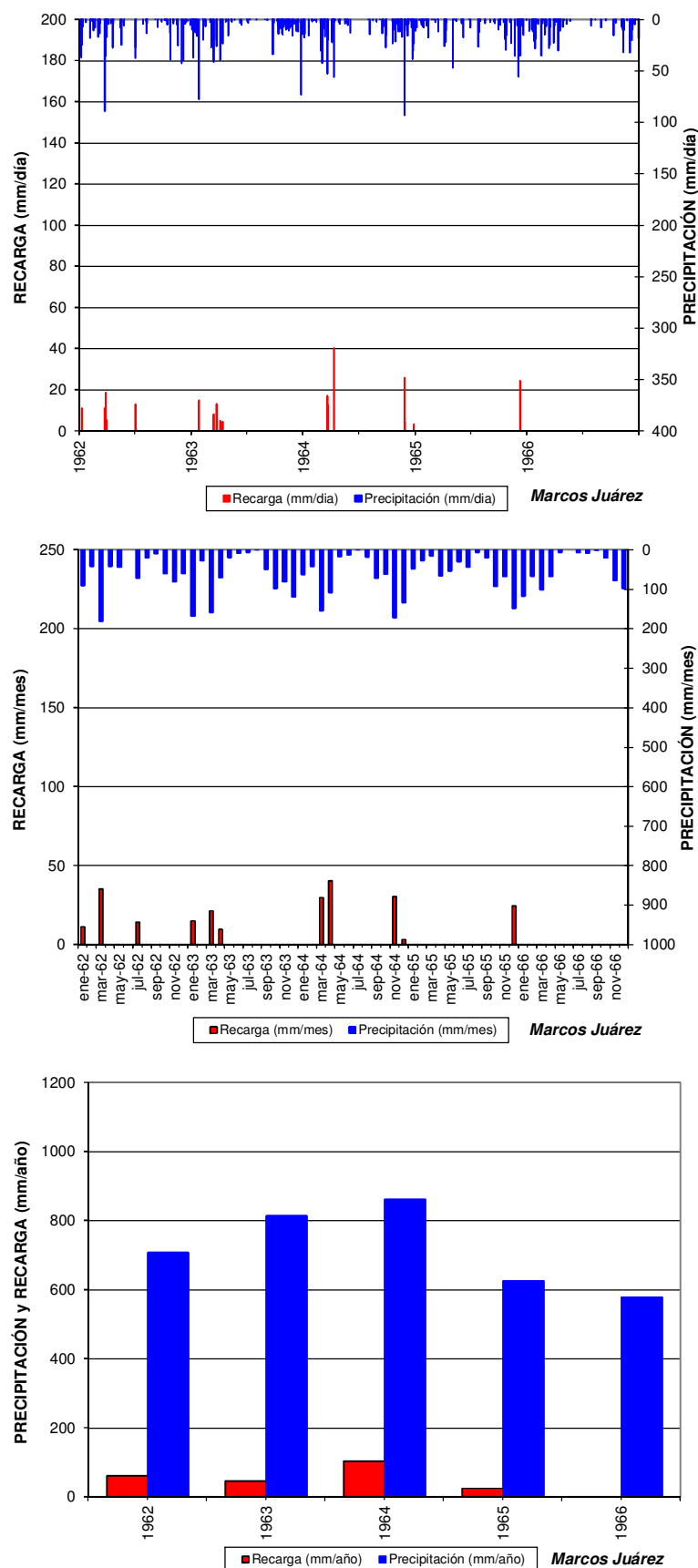


Figura IV.19 – Recargas y precipitaciones diarias, mensuales y anuales en la zona 1 de recarga (Marcos Juárez).

- Zona 2 de recarga $R = 42,1 \text{ mm/año}$

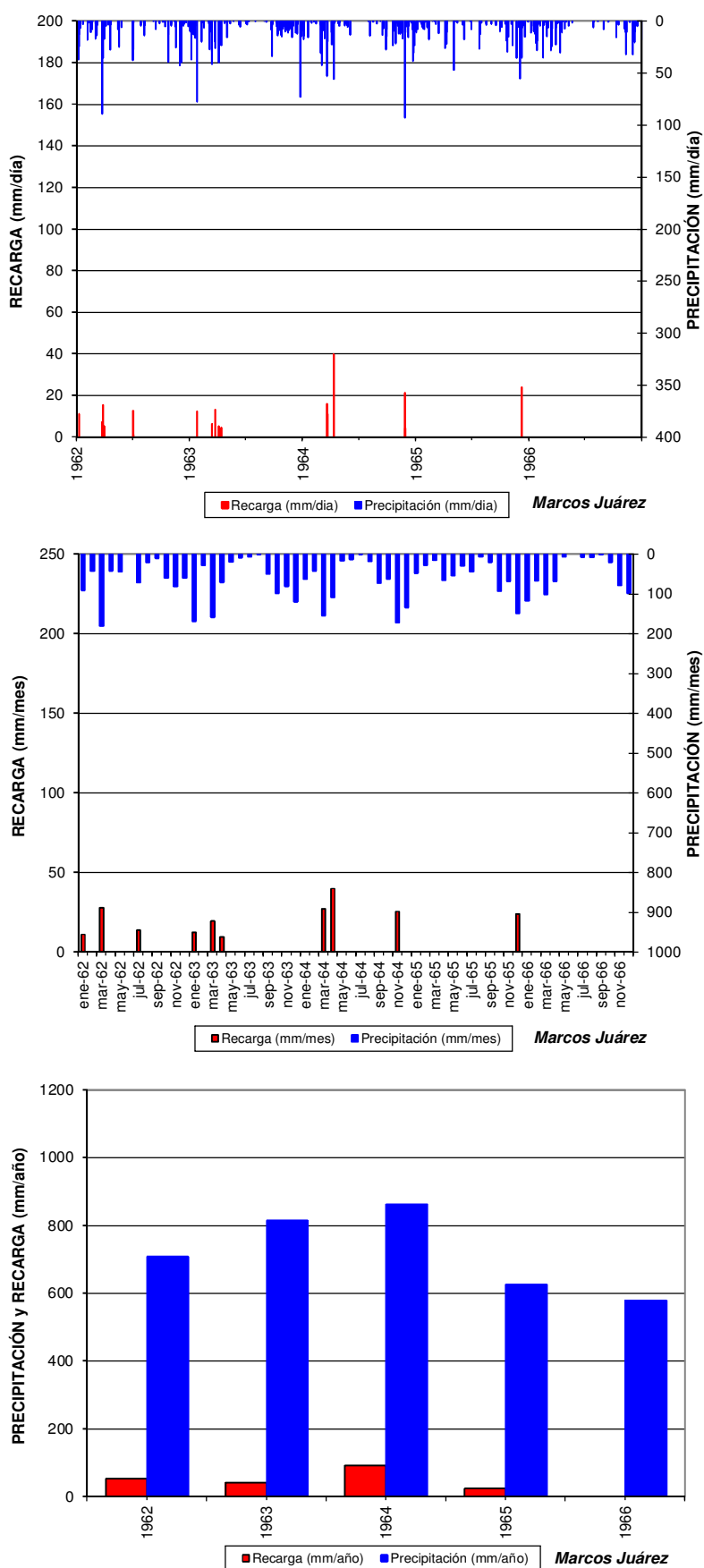


Figura IV.20 – Recargas y precipitaciones diarias, mensuales y anuales en la zona 2 de recarga (Marcos Juárez).

- Zona 2 (mayor pte.) de recarga $R = 25,7 \text{ mm/año}$

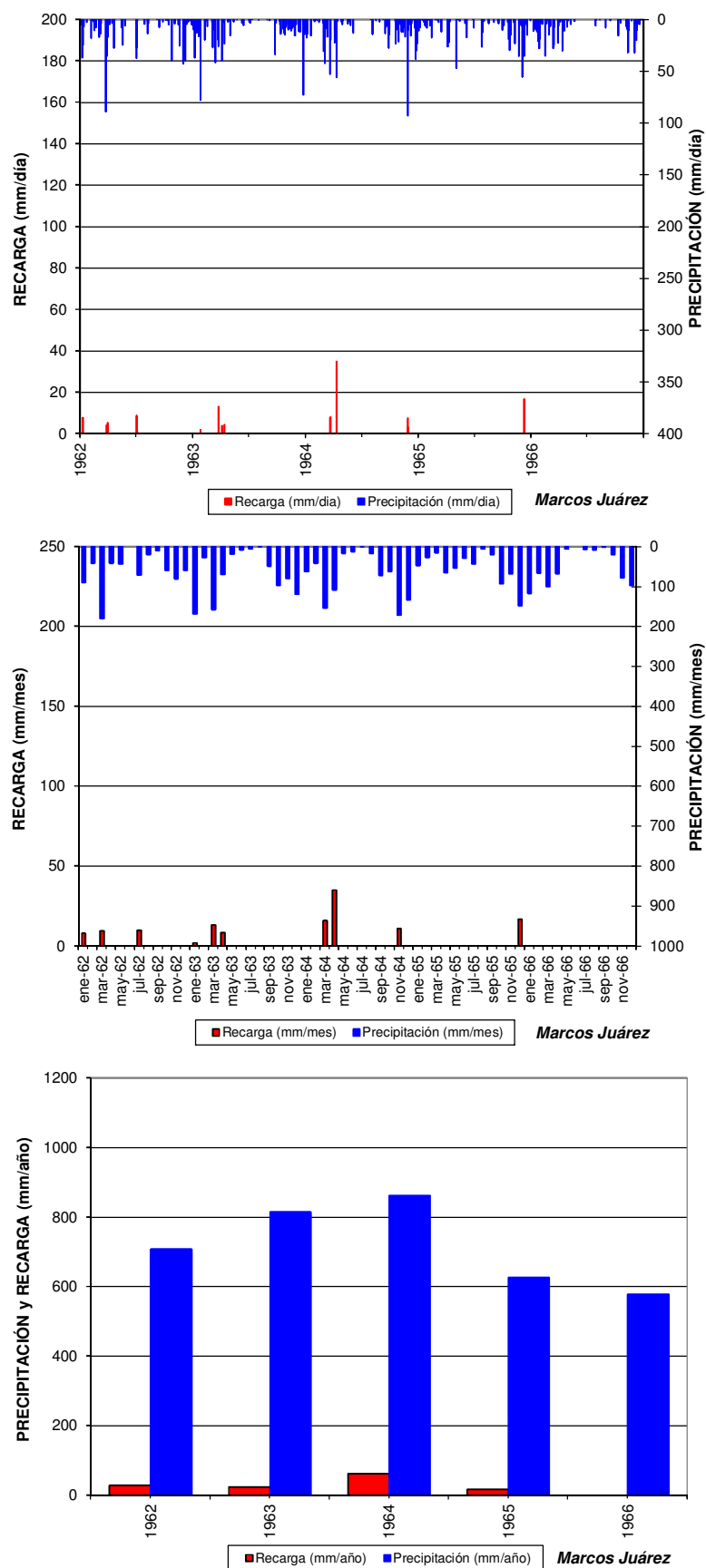


Figura IV.21 – Recargas y precipitaciones diarias, mensuales y anuales en la zona 2 (mayor pte.) de recarga Marcos Juárez.

- Zona 3 de recarga $R = 38,2 \text{ mm/año}$

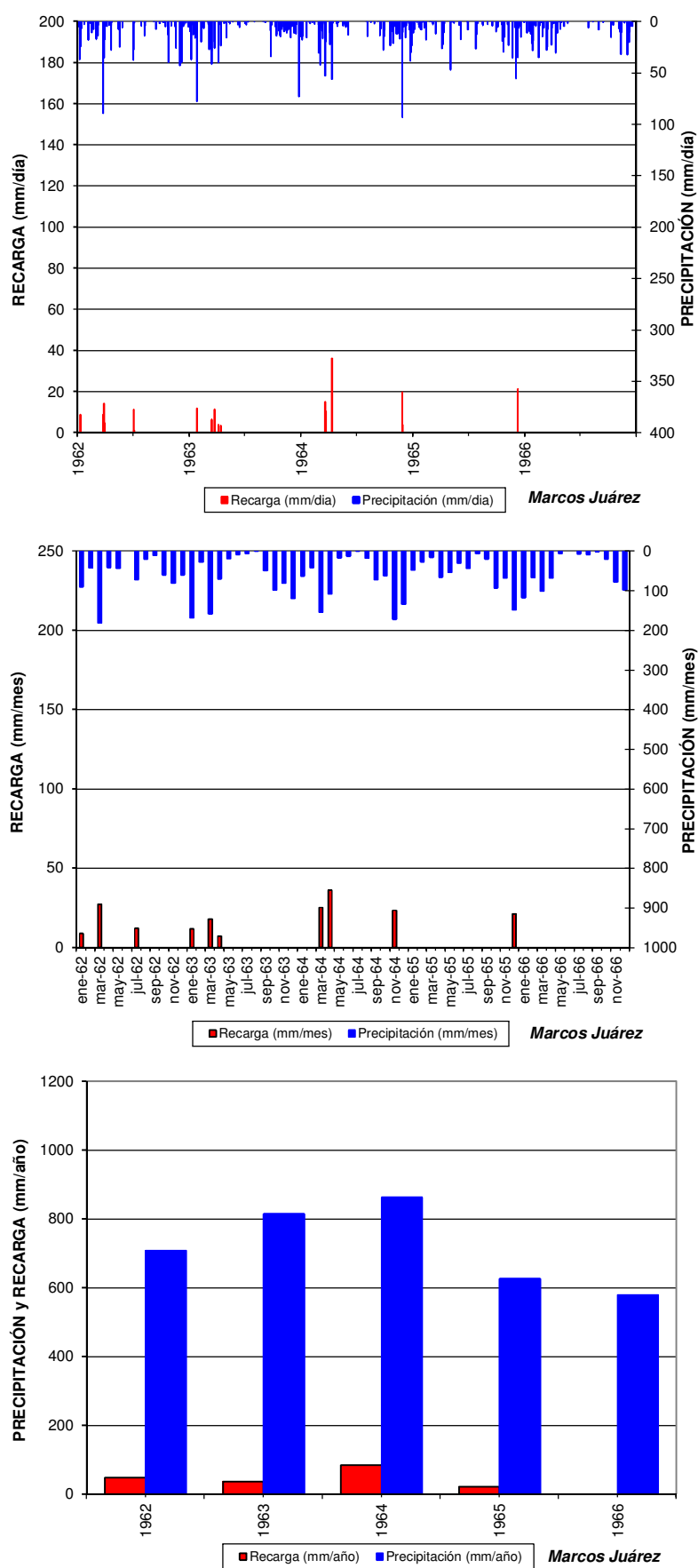


Figura IV.22 – Recargas y precipitaciones diarias, mensuales y anuales en la zona 3 de recarga (Marcos Juárez).

- Zona 4 de recarga $R = 17,0 \text{ mm/año}$

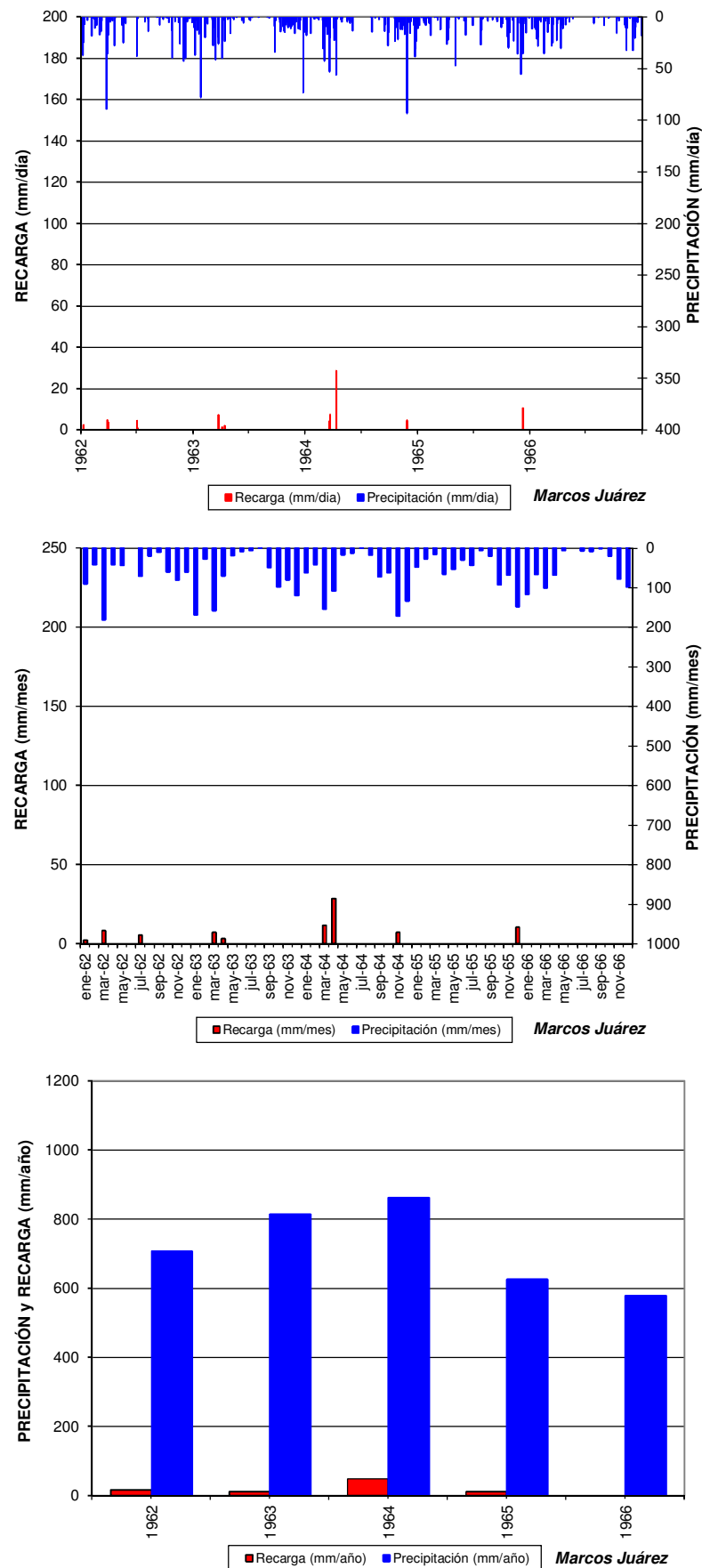


Figura IV.23 – Recargas y precipitaciones diarias, mensuales y anuales en la zona 4 de recarga (Marcos Juárez).

- Zona 5 de recarga $R = 5,1 \text{ mm/año}$

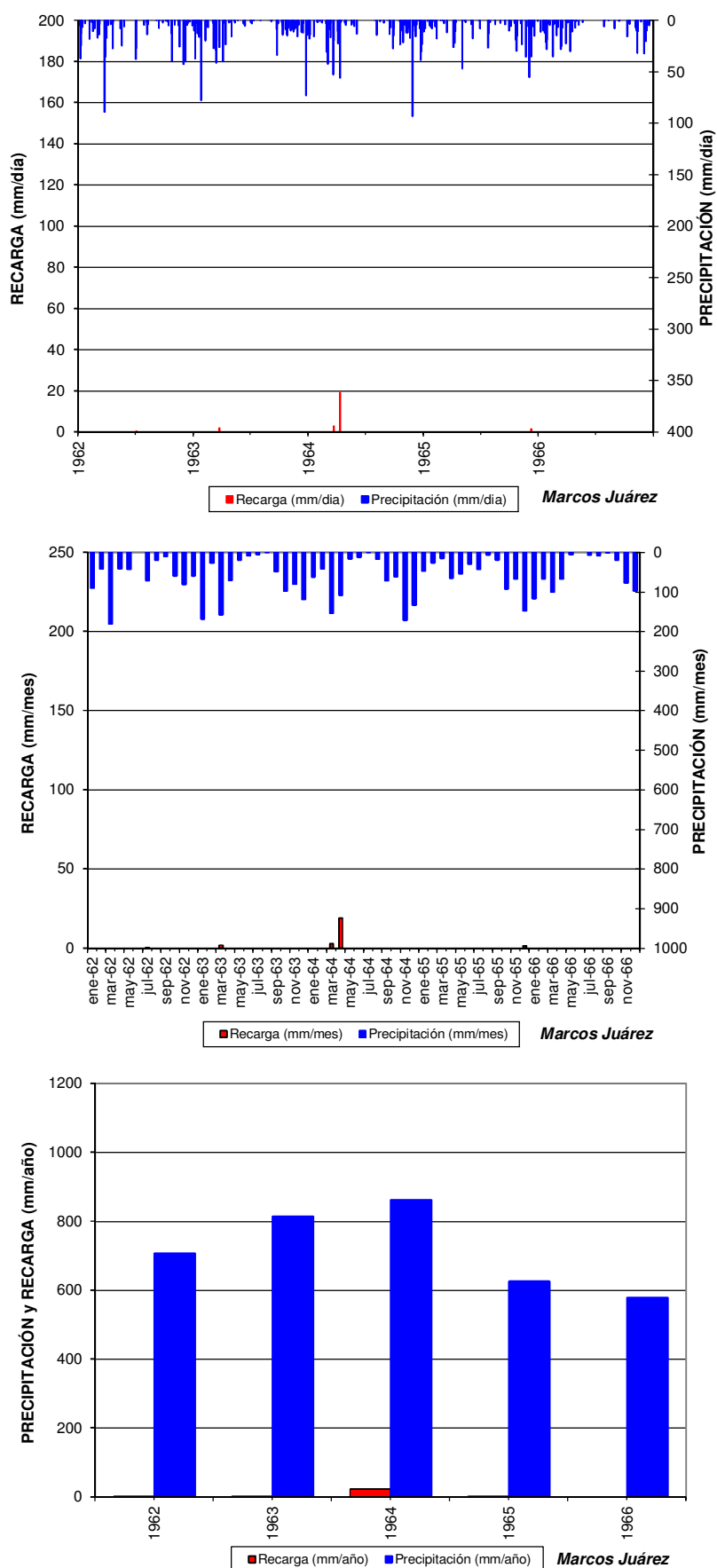


Figura IV.24 – Recargas y precipitaciones diarias, mensuales y anuales en la zona 5 de recarga (Marcos Juárez).

SEBH Las Rosas

- Zona 1 de recarga $R = 71,5 \text{ mm/año}$

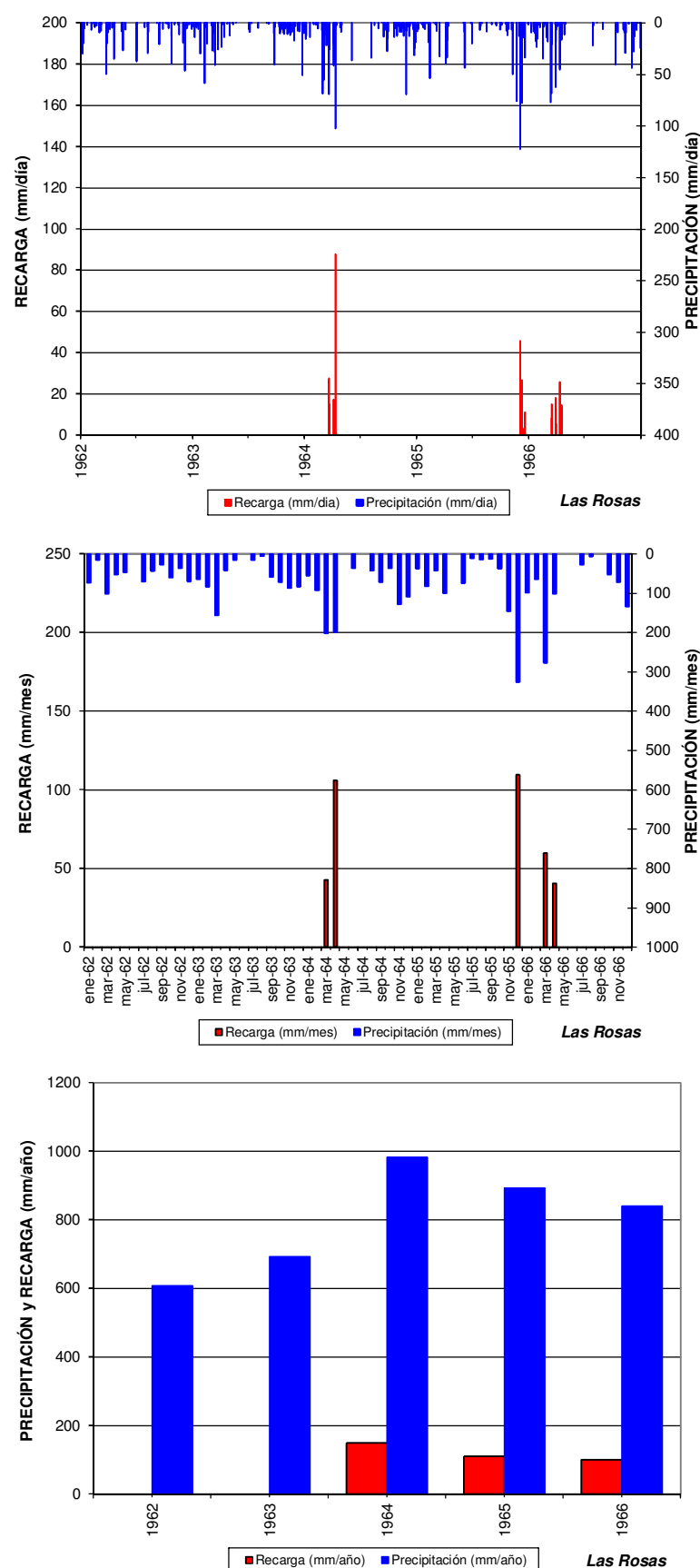


Figura IV.25 – Recargas y precipitaciones diarias, mensuales y anuales en la zona 1 de recarga (Las Rosas).

- Zona 2 de recarga $R = 56,2 \text{ mm/año}$

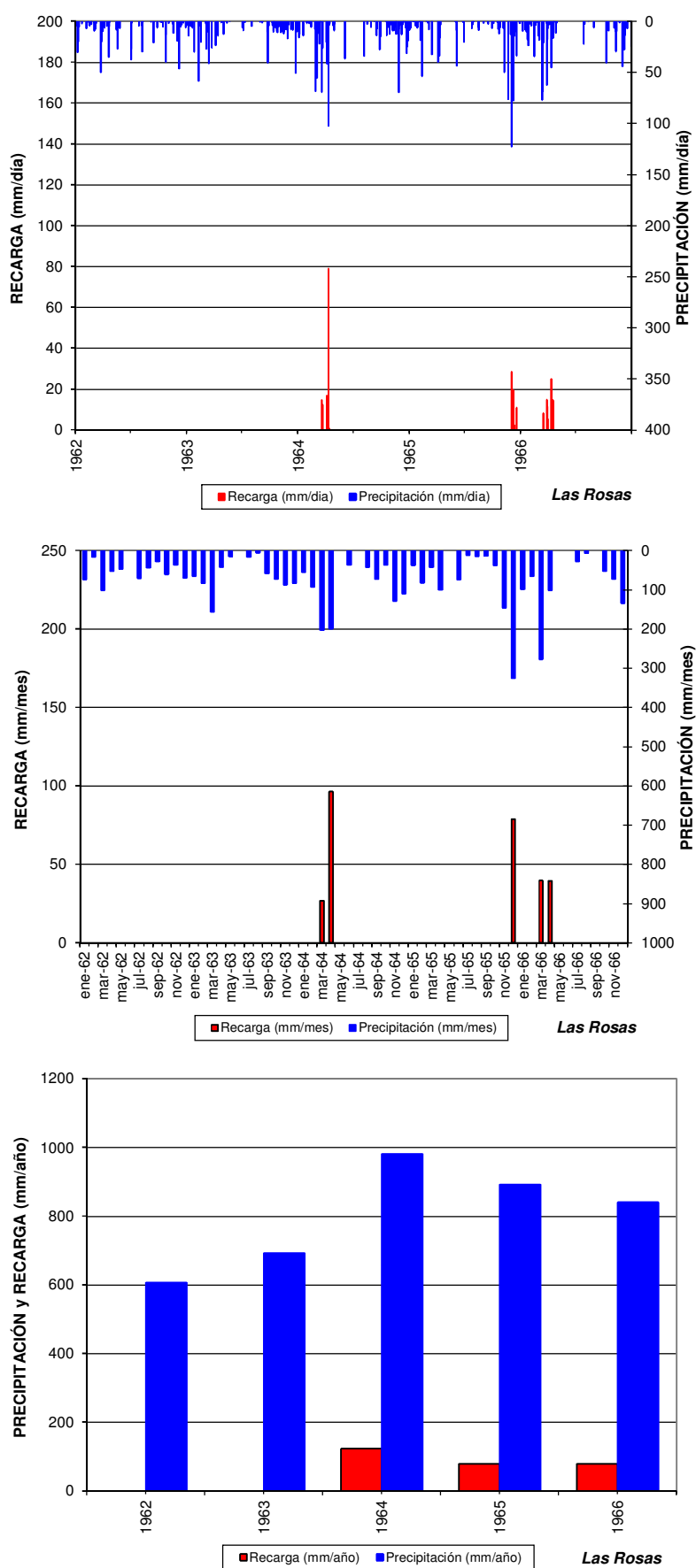


Figura IV.26 – Recargas y precipitaciones diarias, mensuales y anuales en la zona 2 de recarga (Las Rosas).

- Zona 2 (mayor pte.) de recarga $R = 31,5 \text{ mm/año}$

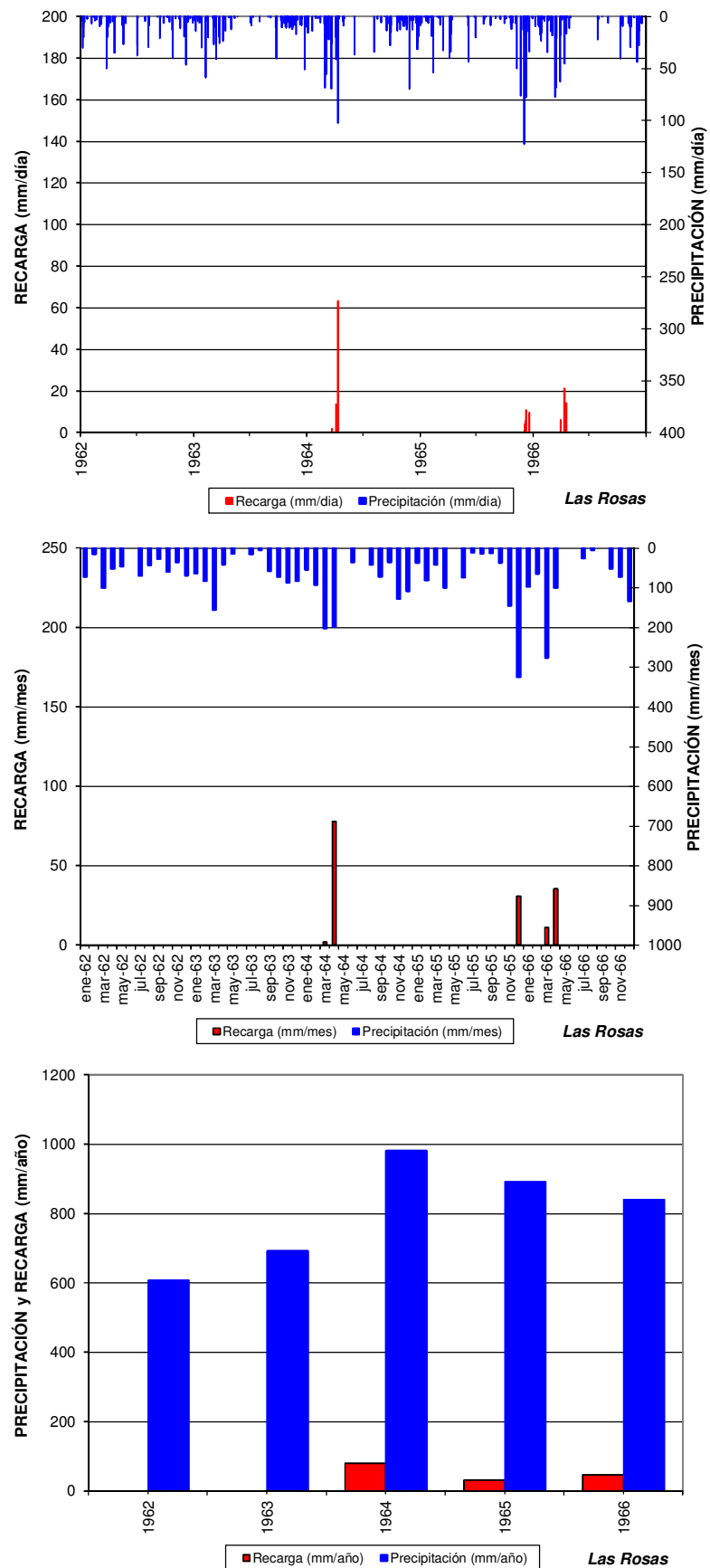


Figura IV.27 – Recargas y precipitaciones diarias, mensuales y anuales en la zona 2 (mayor pte.) de recarga (Las Rosas).

- Zona 3 de recarga $R = 53,6 \text{ mm/año}$

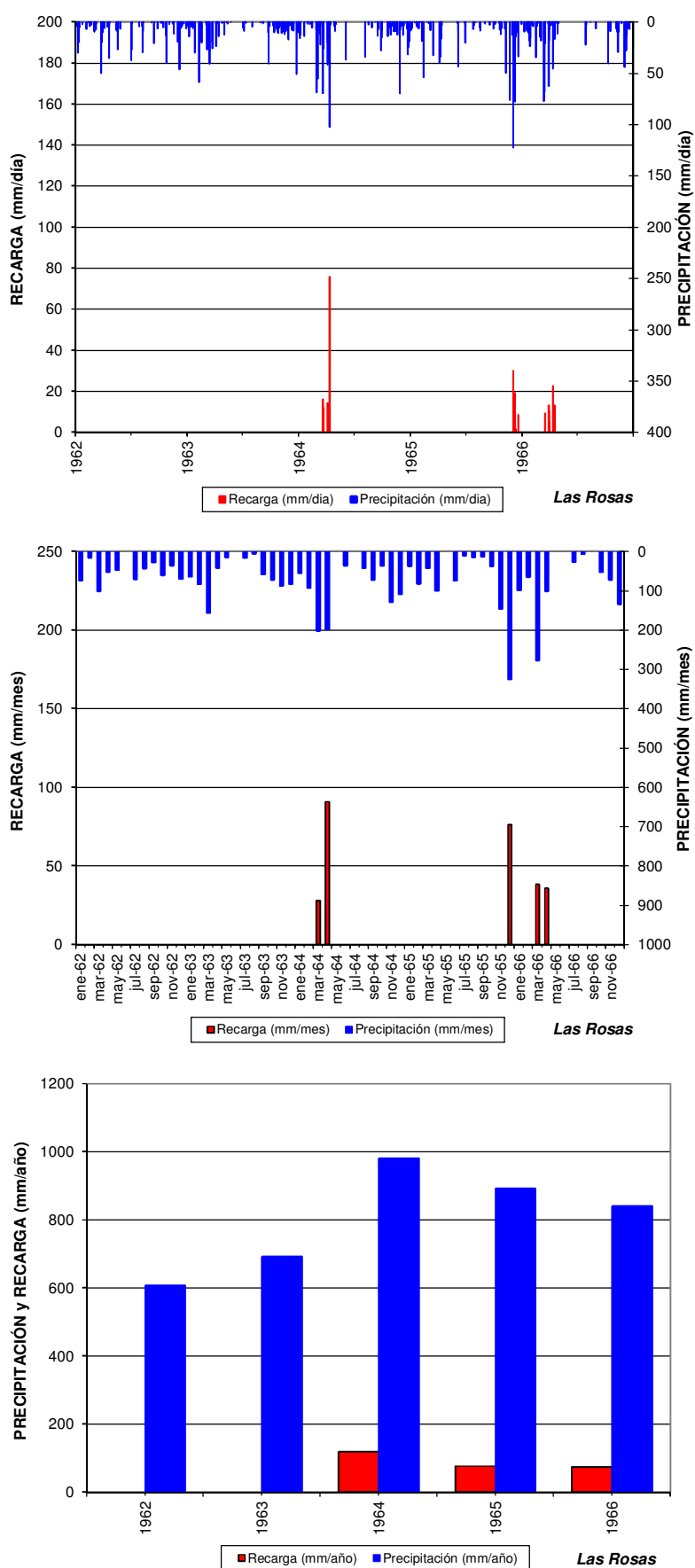


Figura IV.28 – Recargas y precipitaciones diarias, mensuales y anuales en la zona 3 de recarga (Las Rosas).

- Zona 4 de recarga $R = 37,5 \text{ mm/año}$

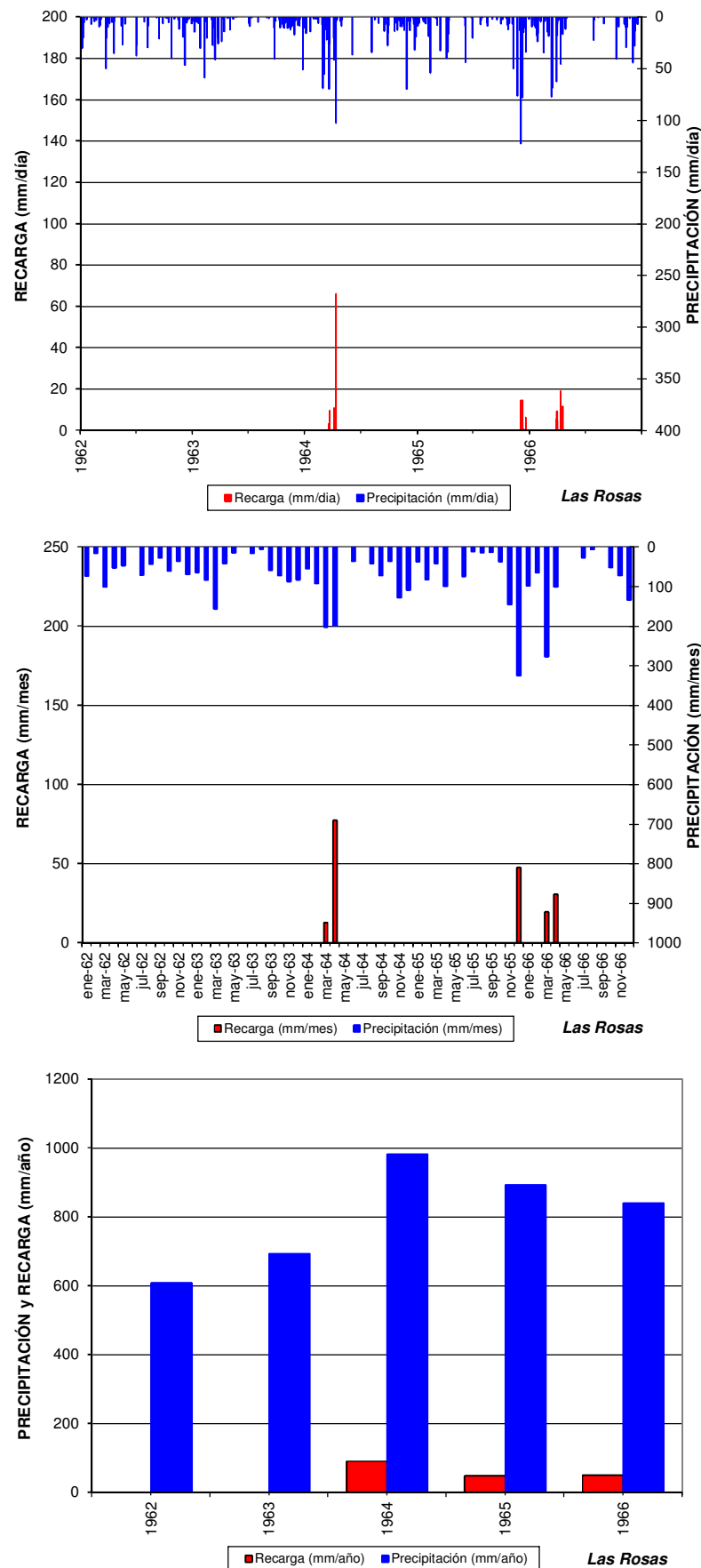


Figura IV.29 – Recargas y precipitaciones diarias, mensuales y anuales en la zona 4 de recarga (Las Rosas).

- Zona 5 de recarga $R = 22,9 \text{ mm/año}$

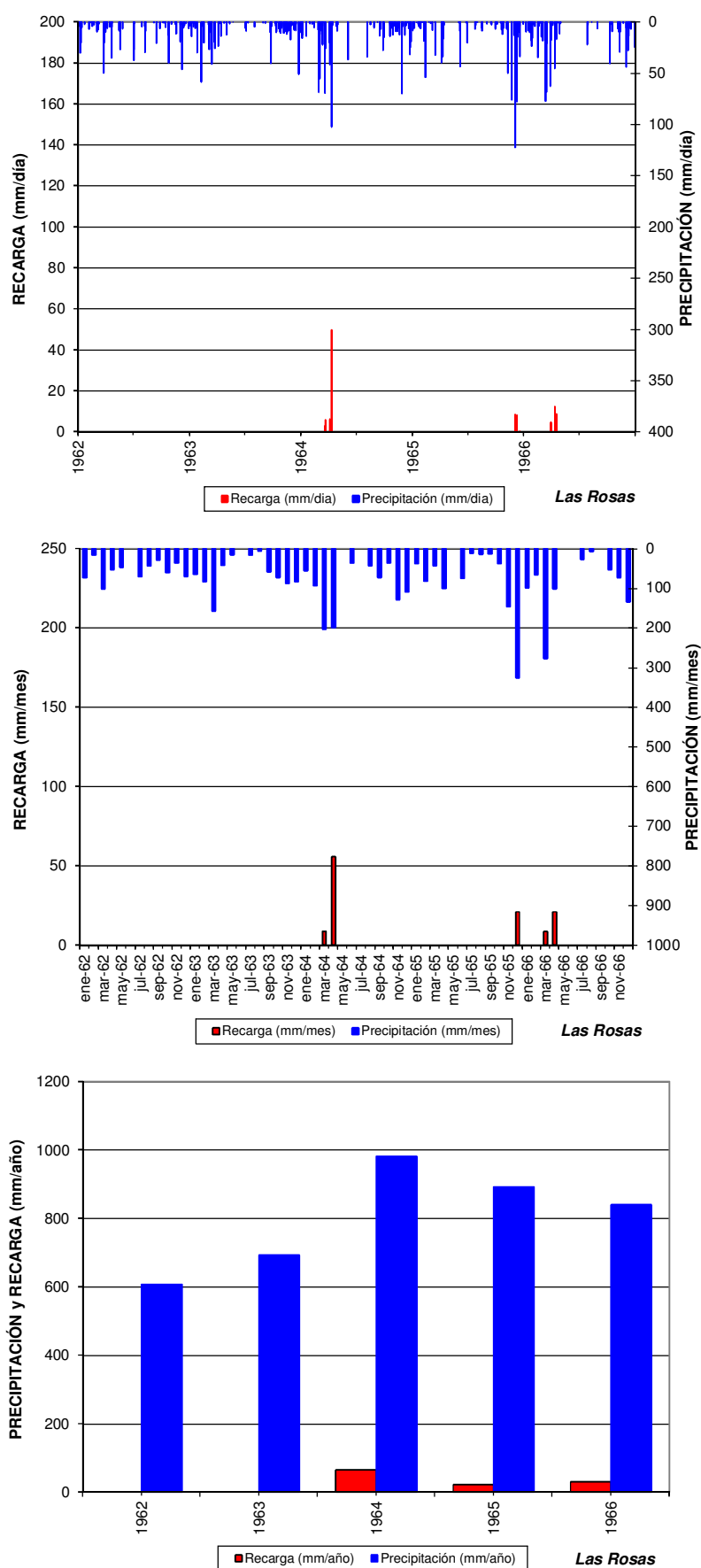


Figura IV.30 – Recargas y precipitaciones diarias, mensuales y anuales en la zona 5 de recarga (Las Rosas).

sSEBH Roldán

- Zona 1 de recarga $R = 42,9 \text{ mm/año}$

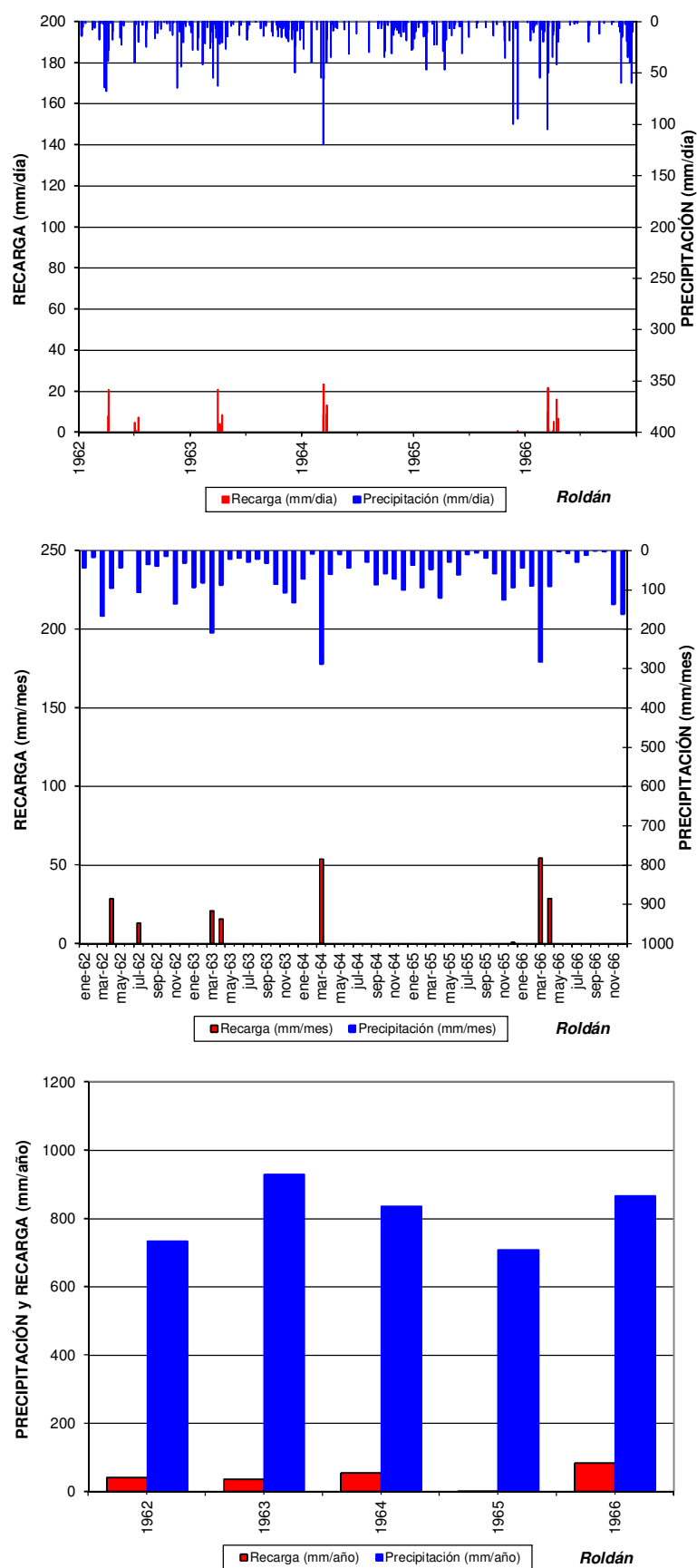


Figura IV.31 – Recargas y precipitaciones diarias, mensuales y anuales en la zona 1 de recarga (Roldán).

- Zona 3 de recarga $R = 35,5 \text{ mm/año}$

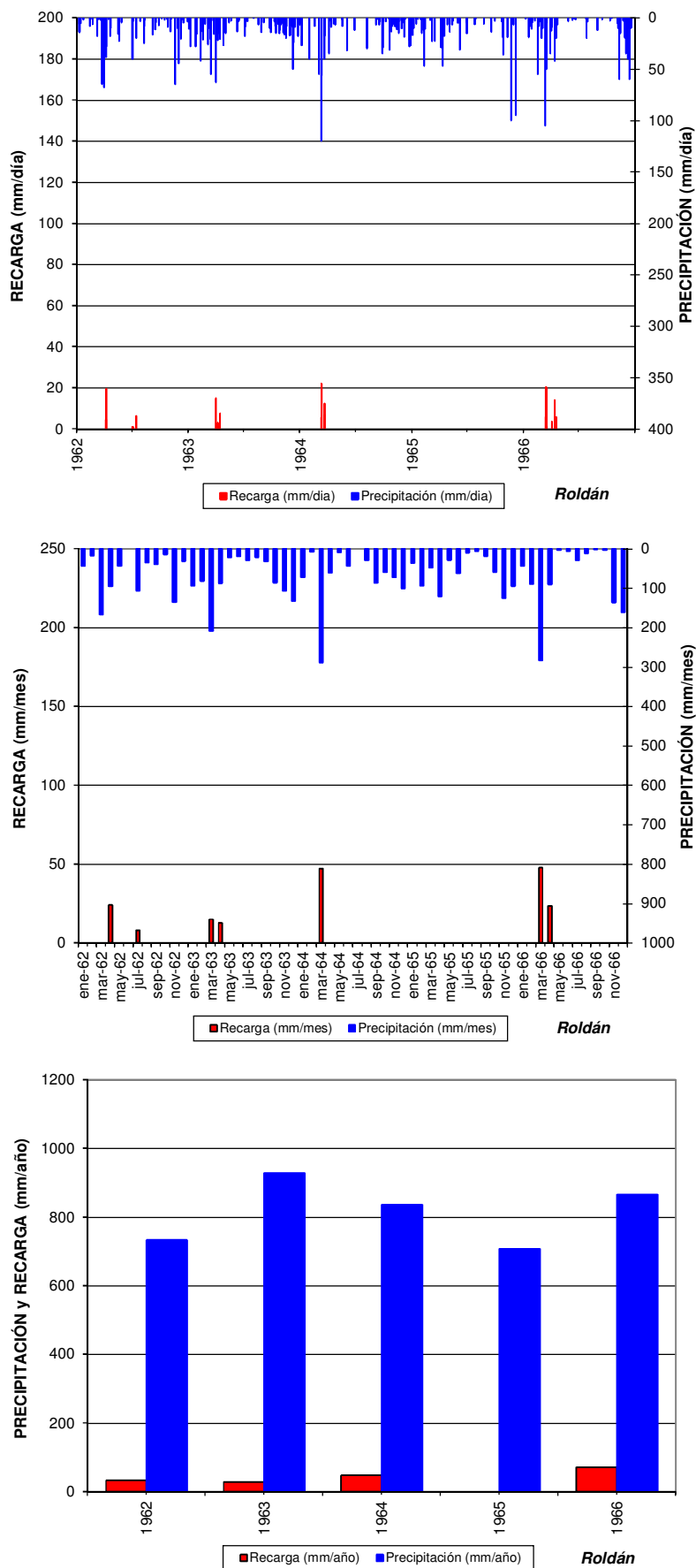


Figura IV.32 – Recargas y precipitaciones diarias, mensuales y anuales en la zona 3 de recarga (Roldán).

- Zona 4 de recarga $R = 18,7 \text{ mm/año}$

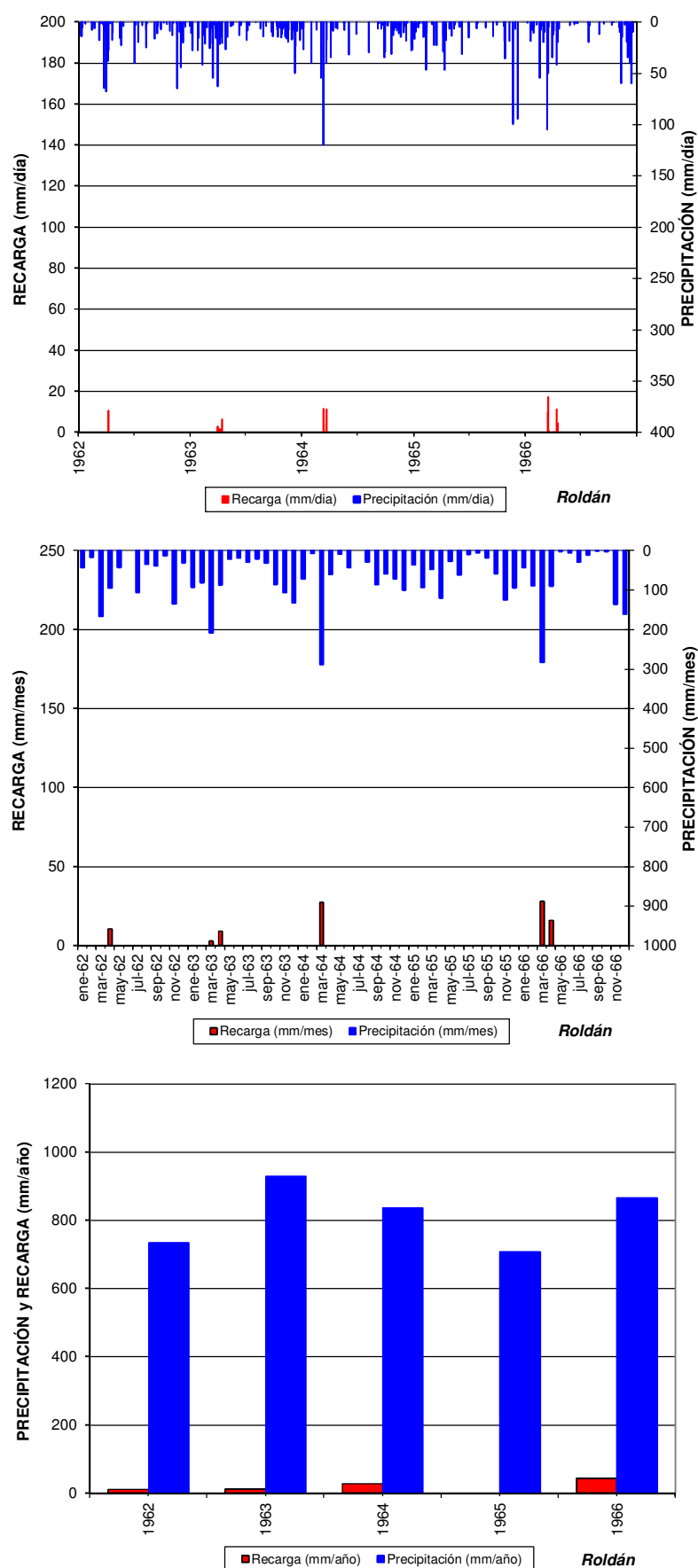


Figura IV.33 – Recargas y precipitaciones diarias, mensuales y anuales en la zona 4 de recarga (Roldán).

- Zona 5 de recarga $R = 10,3 \text{ mm/año}$

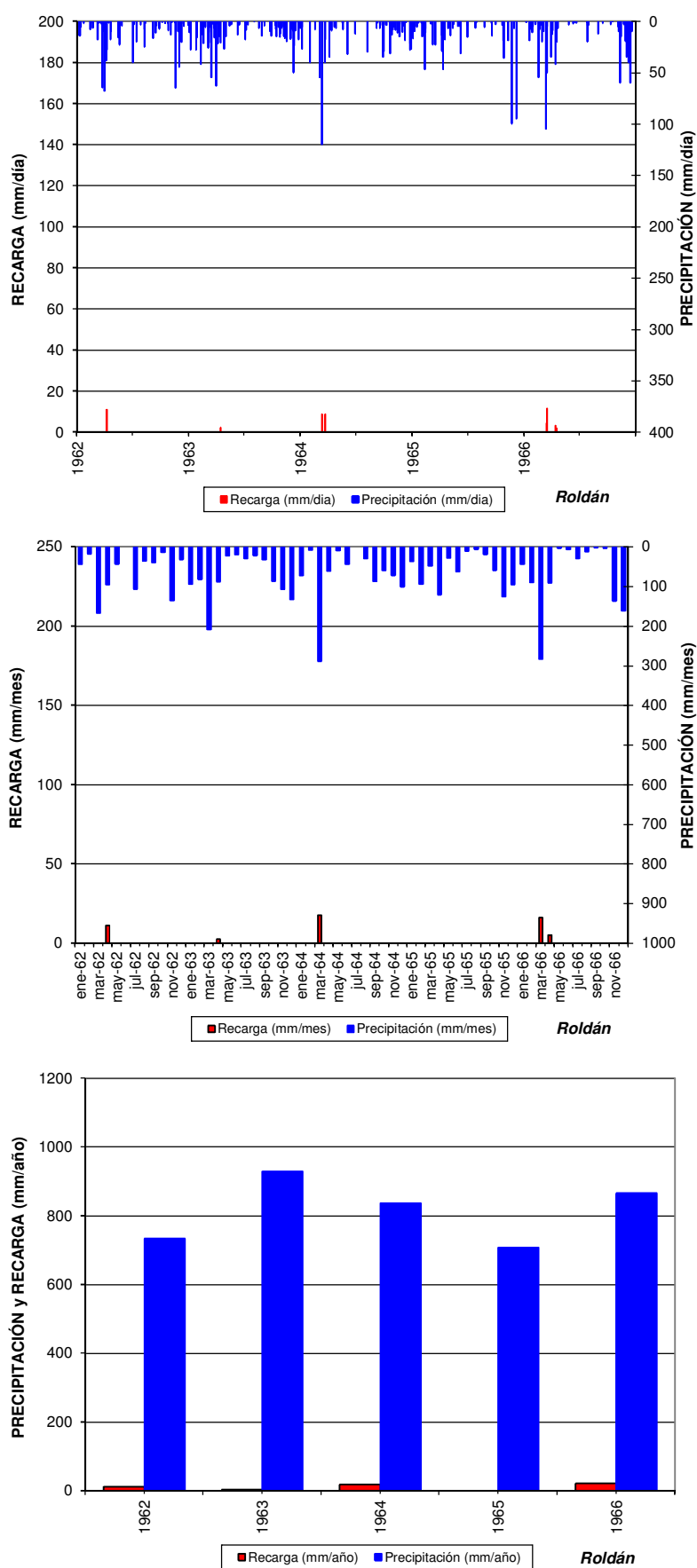


Figura IV.34 – Recargas y precipitaciones diarias, mensuales y anuales en la zona 5 de recarga (Roldán).

V. ANEXO V – ESTADÍSTICOS UTILIZADOS PARA EVALUAR LA BONDAD DEL AJUSTE

Los estadísticos empleados para cuantificar la bondad del ajuste entre valores freáticos y piezométricos, observados y calculados, fueron los siguientes (ecuaciones V-1 a V-4).

- el residuo medio absoluto (RMA)

$$|\overline{\text{RMA}}| = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |R_i| \quad , \quad R_i = H_{\text{calc}, i} - H_{\text{obs}, i} \quad (\text{V-1})$$

donde: $H_{\text{calc}, i}$ valor nivel calculado i
 $H_{\text{obs}, i}$ valor nivel observado i

- el coeficiente de determinación (R^2)

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (H_{\text{obs}, i} - \overline{H_{\text{obs}}}) (H_{\text{calc}, i} - \overline{H_{\text{calc}}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (H_{\text{obs}, i} - \overline{H_{\text{obs}}})^2 \sum_{i=1}^n (H_{\text{calc}, i} - \overline{H_{\text{calc}}})^2}} \right)^2 \quad (\text{V-2})$$

- la raíz del residuo cuadrático medio normalizado (RRCMN)

$$\text{RRCM} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i^2} \quad (\text{V-3})$$

$$\text{RRCMN} = \frac{\text{RRCM}}{(H_{\text{obs}})_{\text{máx}} - (H_{\text{obs}})_{\text{mín}}}$$

- el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (E)

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (H_{\text{obs}, i} - H_{\text{calc}, i})^2}{\sum_{i=1}^n (H_{\text{obs}, i} - \overline{H_{\text{obs}}})^2} \quad (\text{V-4})$$