



TESIS DOCTORAL

ESTUDIO DE LA INTERACCIÓN ENTRE LA HIDROLOGÍA, EL CLIMA, EL USO DEL SUELO Y LA TOMA DE DECISIONES AGRONÓMICAS EN LA LLANURA PAMPEANA MEDIANTE MODELACIÓN NUMÉRICA

AUTOR

DR. ING. PABLO EZEQUIEL GARCÍA

DIRECTOR DE TESIS

DR. ÁNGEL N. MENÉNDEZ – FIUBA.

JURADO DE TESIS

DRA. LORENA FERREIRA - SMN

DRA. LETICIA RODRÍGUEZ - UNL

DR. CARLOS MARCELO DI BELLA - CONICET / FAUBA

DR. GABRIEL VÁZQUEZ AMÁBILE - UNLP

LUGAR DE TRABAJO

PROGRAMA HIDRÁULICA COMPUTACIONAL – SUBGERENCIA LABORATORIO DE HIDRÁULICA
– INSTITUTO NACIONAL DEL AGUA
LABORATORIO DE MODELACIÓN MATEMÁTICA – DEPARTAMENTO HIDRÁULICA –
FACULTAD DE INGENIERÍA – UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES

FACULTAD DE INGENIERÍA – UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES

BUENOS AIRES, MARZO DE 2021

*Somos una familia rara. En este país donde las cosas se hacen por obligación o fanfarronería,
nos gustan las ocupaciones libres, las tareas porque sí.*

*Tenemos un defecto: nos falta originalidad. Casi todo lo que decidimos hacer está inspirado -
digamos francamente, copiado- de modelos célebres. Si alguna novedad aportarnos es siempre
inevitable.*

*Hacemos cosas, pero contarlo es difícil porque falta lo más importante, la ansiedad y la
expectativa de estar haciendo las cosas, las sorpresas tanto más importantes que los resultados,
los fracasos en que toda la familia cae al suelo como un castillo de naipes y durante días enteros
no se oyen más que deploraciones y carcajadas. Contar lo que hacemos es apenas una manera
de rellenar los huecos inevitables*

“Simulacros”

Julio Cortázar

Agradecimientos

Cuando uno comienza el largo y apasionante camino del doctorado, siempre fantasea con el momento de estar escribiendo los agradecimientos. Se ve como un momento lejano e inalcanzable cuando aparecen las siempre bienvenidas dificultades.

Soy de los que creen que el doctorado es un proceso grupal. Personalmente tuve la dicha de estar acompañado por un gran equipo académico y profesional. Y ni les cuento a nivel personal. A todos ellos van mis agradecimientos.

En tren de individualizar los reconocimientos, quisiera empezar por mi Director, Ángel Menéndez. Gracias Ángel por confiar siempre en mí, por darme absoluta libertad en el desarrollo de esta tesis y por marcar hacia donde debíamos ir cuando el camino se volvía incierto.

Un agradecimiento enorme para todo el equipo que formó parte de los proyectos en los que se desarrolló esta Tesis. Un dream team. Para los futboleros, algo así como el Barcelona de Pep Guardiola o el San Lorenzo de Eduardo Bauzá. A Guillermo Podestá, gracias por tu generosidad, por dar vivo testimonio de lo que es trabajar en grupo, por tu infinita paciencia y por los churros en 'La Giralda'. A Federico Bert, gracias por estar siempre empujando, por tu humildad y por inculcarme lo importante que es tener clara la historia que uno quiere contar en un trabajo. Todo lo que presento en esta Tesis no lo podría haber hecho sin contar con valiosos compañeros de trincheras: Santiago Rovere, Guillermo García, Federico Schmidt, Andrew Verdin y Poonam Arora y Joaquín López Laxagüe. Grandes profesionales. Y mejores personas. Todo fue más fácil con ustedes.

No puedo escribir estos agradecimientos sin resaltar al padre del modelo numérico utilizado, Nicolás Badano. Un crack de la modelación. Y una persona muy generosa. Dejó sólidas bases a partir de las cuales pude seguir construyendo.

Quisiera, también, realizar un especial reconocimiento a Esteban Jobbágy, Jorge Mercau y Marcelo Nosetto. Ellos son los que sentaron bases y desarrollaron ideas, algunas de las cuales esta Tesis intentó profundizar.

Imposible olvidarme de todo el equipo del Programa de Hidráulica Computacional del Instituto Nacional del Agua. Mariano Re, Emilio Lecertúa, Martín Sabarots, Leandro Kazimierski, Santiago Guizzardi, Nicolás Ortiz, Mayra Morale y Lucas Bindelli. Gracias por el apoyo constante, por enseñarme numerosas herramientas que engalanaron esta Tesis y por hacer del trabajo cotidiano un placer.

Gracias también a los cuatro jurados por el esfuerzo y la dedicación puesto en la lectura de esta Tesis y por hacer valiosos comentarios y aportes a la misma. Agradezco también a la Comisión de Seguimiento que tuve durante todo el doctorado, especialmente a Marcelo Uriburu Quirno; y el constante apoyo recibido desde la Subsecretaría de Investigación y Doctorado, sobre todo de parte de Cristina Vázquez y Verónica Marchat.

No quiero olvidarme de agradecer a las autoridades del Instituto Nacional del Agua (Raúl Lopardo, Julio De Lio y Pablo Spalletti) por darme el espacio y el tiempo para que pudiera dedicarme a esta investigación.

Entrando al plano personal, empiezo agradeciendo a mis viejos, Hugo y Liliana, y a mis hermanos, Juan, Nacho, Inés y Ana (a los que se agregaron Andrea y Juan Pedro), por su amor incondicional y por ser el eterno refugio donde puedo recargar fuerzas y energías, curar heridas y compartir sin tapujos miedos y alegrías. Gracias a mis cuatro abuelos, que ya sea desde el cielo o la tierra me acompañan con sus cálidas miradas. Gracias a Gabriela por el incondicional apoyo (táctico y amoroso!) en todos estos años, sin ella hubiese sido imposible esta aventura académica. Al resto de mi familia y a mis amigos, gracias por ser un sostén imprescindible en mi vida.

Gracias a mis dos soles, mis tesoros más preciados, Benito y Fede. Todo se arregla con una sonrisa de ustedes. Todo tiene sentido con una sonrisa de ustedes.

A La Renga, AC/DC, Los Redondos, Pearl Jam, The Clash, Divididos, The Rolling Stones, Sumo, David Bowie, Hermética, The Beatles, Talking Heads, Khruangbin, La Vela Puerca, Pulp, Primal Scream, Beirut, La Covacha, Te Kinks, Zumbadores, The Smiths y tantos otros artistas. Gracias por ser la banda de sonido de incontables noches de escritura donde la soledad y la música fueron fieles aliados.

A Dios, por este regalo infinito que acá llamamos vida.

A las llanuras, por ser una fuente inagotable de misterio y magia.

Estudio de la interacción entre la hidrología, el clima, el uso del suelo y la toma de decisiones agronómicas en la llanura pampeana mediante modelación numérica

Resumen

A lo largo de la historia, el agua y la agricultura han estado estrechamente vinculadas. La mayor parte de los alimentos del mundo proviene de la agricultura de secano que depende de la humedad del suelo proveniente casi exclusivamente de la precipitación. En las próximas décadas, la producción agrícola tendrá lugar en el contexto de un clima cambiante, esperando importantes cambios en la frecuencia y severidad de inundaciones y sequías. La agricultura de secano seguirá siendo particularmente vulnerable a los excesos y déficit de las precipitaciones. Esto hace que sea imprescindible desarrollar estrategias sólidas para limitar pérdidas ambientales y económicas asociadas a eventos extremos y cambios regionales del clima.

Comprender los vínculos entre los agroecosistemas, el agua y la producción de alimentos es importante para pensar estrategias de manejos por parte de los productores agrícolas en las condiciones actuales y futuras. Para eso es necesario seguir profundizando el conocimiento del funcionamiento de los agroecosistemas y su interrelación con la disponibilidad del agua. La producción de información relevante para la toma de decisiones de los productores requiere una comprensión exhaustiva e integradora, no solo de los vínculos físicos y biológicos entre los cultivos y el agua, sino también de los contextos económicos y sociales en los que toman las decisiones.

Esta tesis tiene como objetivo avanzar en la caracterización de los vínculos entre la hidrología, el clima, el uso del suelo y la toma de decisiones agronómicas en una subcuenca del río Salado del Sur en la llanura pampeana, una de las principales regiones productoras de cereales y semillas oleaginosas del mundo, utilizando como principal herramienta de análisis la modelación numérica.

Study of the interaction between hydrology, climate, land use, and agronomic decision making in the Argentine Pampas plain using numerical modeling

Abstract

Throughout history, water and agriculture have been closely linked. Most of the world's food arise from rainfed agriculture, which depends on soil moisture almost exclusively due to precipitation. In the coming decades, agricultural production will take place in the context of a changing climate, awaiting major changes in the frequency and severity of floods and droughts. Rainfed agriculture will continue to be particularly vulnerable to excesses and deficits in rainfall. This makes it essential to develop sound strategies to limit environmental and economic losses associated with extreme events and regional climate changes.

Understanding the links between agroecosystems, water, and food production is important to think about productive strategies by agricultural producers in current and future conditions. For this, it is necessary to continue deepening the knowledge on the functioning of agroecosystems and their interrelation with the availability of water. Producing information relevant to producers decision-making requires a comprehensive and inclusive understanding, not only of the physical and biological links between crops and water, but also of the economic and social contexts in which they take decisions.

This thesis aims to advance in the characterization of the links between hydrology, climate, land use, and agronomic decision-making in a sub-basin of the South Salado River in the Pampas plain, one of the main cereal and oilseed productive regions of the world, using numerical modeling as the main tool for analysis.

Tabla de contenido

Capítulo 1 Introducción	12
Capítulo 2 La cuenca del río Salado	18
2.1 Indicadores cuantitativos.....	35
2.2 Conclusiones del capítulo	38
Capítulo 3 Comportamiento hidrológico de cuencas de llanuras	39
3.1 Definición de llanura, su origen y su clasificación.....	40
3.2 Comportamiento Hidrológico de las llanuras de agradación	43
3.3 Conclusiones del capítulo	45
Capítulo 4 Modelo Hidrológico	46
4.1 Software <i>MIKE SHE</i>	47
4.2 Modelo hidrológico de SA1.....	49
4.3 Calibración y verificación del modelo	53
4.4 Conclusiones del capítulo	62
Capítulo 5 Análisis de la evolución hídrica histórica. Influencia de los cambios en el uso del suelo y las precipitaciones	63
5.1 Evolución del uso del suelo.....	65
5.2 Análisis de las precipitaciones	69
5.3 Ensayos	70
5.4 Dinámica de niveles freáticos y caudales.....	70
5.5 Evolución de áreas inundadas	73
5.6 Análisis de efectos	78
5.7 Conclusiones del capítulo	80
Capítulo 6 Implicancias espaciales y temporales de diferentes estrategias de uso de suelo en el agua subterránea.....	81
6.1 Ensayos numéricos: resultados y discusión	84
6.2 Impacto del uso del suelo en la dinámica de los niveles freáticos.....	84
6.3 Impacto espacial del uso del suelo en la profundidad de napa	87
6.4 Impacto de la variabilidad climática en la dinámica del nivel freático	94
6.5 Conclusiones del capítulo	95
Capítulo 7 Sistema de Modelación Integrada (SMI) para evaluar el impacto hidrológico, económico y productivo de diferentes manejos agrícolas.	97

7.1	Zona de estudio (o subcuenca A de la cuenca del río Salado)	98
7.2	Sistema de modelación integrada	100
7.2.1	Descripción general	100
7.2.2	Componentes del Sistema de Modelación Integrada	102
7.2.2.1	Modelo hidrológico de la subcuenca A.....	102
7.2.2.1.1	Calibración del modelo hidrológico	102
7.2.2.2	Modelo Pampas: modelo basado en agentes de decisiones del uso del suelo y producción agrícola	113
7.2.2.2.1	El entorno espacial del Modelo Pampas: definición de campos sintéticos	115
7.2.2.2.2	Implementación del Modelo Pampas en la subcuenca A: suelos representativos.....	115
7.2.2.3	Generador climático espacial estocástico.....	116
7.2.2.4	Modelos de simulación de cultivos.....	117
7.2.2.4.1	Simulaciones de cultivos para generación de inputs del MIKE SHE	117
7.2.2.4.2	Simulaciones de cultivos para el Modelo Pampas	118
7.2.2.5	Ajuste de los rindes y beneficios de los cultivos por efecto de la profundidad freática	120
7.2.2.6	Cálculos económicos	122
7.2.2.6.1	Costos de entrada y precios de commodities.....	122
7.2.3	Flujo de información entre componentes del Sistema de Modelación Integral	122
7.3	Validación del Sistema de Modelación Integral	123
7.3.1	Ensayos combinando diferentes usos del suelo y escenarios climáticos	124
7.3.2	Ensayos con el precio de los granos	129
7.4	Explotación del SMI	132
7.4.1	¿Cómo cambiará el riesgo de inundación y sequía bajo diferentes climas futuros si se continúa con el manejo agrícola actual?.....	133
7.4.2	¿Se puede reducir el riesgo de inundaciones y sequías en el futuro mediante el manejo del uso del suelo?	138
7.5	Conclusiones del capítulo	142
	Capítulo 8 Conclusiones generales	144
	Referencias	150

Capítulo 1

Introducción

*Quién dio con la palabra pampa,
con esa palabra infinita que es como un sonido y su eco?
Sé nomás que es quichua,
que su equivalencia primitiva es la de la llanura y que parece silabeada por el pampero*

“El tamaño de mi esperanza”

Jorge Luis Borges

A lo largo de la historia, el agua y la agricultura han estado estrechamente vinculadas. La mayor parte de los alimentos del mundo proviene de la agricultura de secano que depende de la humedad del suelo proveniente casi exclusivamente de la precipitación (de Fraiture and Wichelns, 2010). La agricultura de secano tiene el potencial de aumentar la producción de alimentos y reducir las necesidades de riego, pero requiere mecanismos para reducir los riesgos inherentes, por ejemplo, aquellos asociados con un clima cambiante (de Fraiture and Wichelns, 2010).

La variabilidad y el cambio climático tienen serias implicancias para el suministro y la demanda de agua en la agricultura (de Fraiture and Wichelns, 2010). En las próximas décadas, la producción agrícola tendrá lugar en el contexto de un clima cambiante, esperando importantes cambios en la frecuencia y severidad de inundaciones y sequías (IPCC, 2007; de Fraiture and Wichelns, 2010; Iglesias et al., 2011). La agricultura de secano seguirá siendo particularmente vulnerable a los excesos y déficit de las precipitaciones. Esto hace que sea imprescindible desarrollar estrategias sólidas para limitar pérdidas ambientales y económicas asociadas a eventos extremos y cambios regionales del clima.

Comprender los vínculos entre los agroecosistemas, el agua y la producción de alimentos es importante para pensar estrategias de manejos por parte de los productores agrícolas en las condiciones actuales y futuras (Boelee, 2011; Zipper et al., 2018). Para eso es necesario seguir profundizando el conocimiento del funcionamiento de los agroecosistemas y su interrelación con la disponibilidad del agua. La producción de información relevante para la toma de decisiones de los productores requiere una comprensión exhaustiva e integradora, no solo de los vínculos físicos y biológicos entre los cultivos y el agua, sino también de los contextos económicos y sociales en los que toman las decisiones (Garcia et al., 2019; Zhao et al., 2019; Maydana et al., 2020).

Esta Tesis tiene como objetivo avanzar en el conocimiento y comprensión de los vínculos entre el clima, la hidrología, el uso de la tierra y la toma de decisiones agrícolas en las grandes llanuras de la región pampeana. Para esto se desarrolló un Sistema de Modelación Integrado con el fin de explorar las interacciones bidireccionales entre aguas superficiales y subterráneas, escenarios climáticos plausibles y decisiones individuales y colectivas sobre el uso del suelo.

La llanura pampeana, ubicada en el centro este de Argentina, es una de las principales zonas productoras de cereales y oleaginosas del mundo (Calviño and Monzón, 2009). La mayor parte de la llanura pampeana tiene una topografía extremadamente plana con pendientes regionales menores a 0.1% (Jobbágy et al., 2008). En dichas llanuras se presentan una topografía muy plana, con una red de drenaje poco desarrollada, lo que limita la evacuación horizontal de los

excedentes de agua; el agua subterránea se encuentra típicamente cerca de la superficie y estrechamente acoplada al agua superficial (Kruse and Ainchil, 2017). Además, en estas regiones, tanto la humedad del suelo como la producción de cultivos, dependen no solamente de las precipitaciones, sino también de las napas freáticas (Heuvelmans, 2010; Mercau et al., 2016).

Las llanuras pampeanas muestran un fuerte acoplamiento entre el clima, el uso del suelo y el agua subterránea. Como se mencionó anteriormente, este vínculo inusual se debe a la topografía extremadamente plana, que se encuentra solo en pocos lugares del mundo, como partes de la cuenca del Mississippi, el centro de Canadá, Hungría y Siberia occidental (Jobbágy et al., 2008). Este entorno único, por lo tanto, ofrece la oportunidad de simular y estudiar los vínculos y retroalimentaciones entre los procesos hidrológicos y de los ecosistemas. A su vez, esta región ha mostrado en las últimas décadas una significativa variabilidad en las precipitaciones y marcados cambios en el uso del suelo, lo que hace de esta zona un laboratorio natural para estudiar y cuantificar el impacto de dichos cambios en la evolución histórica de las aguas subterráneas y la dinámica de las inundaciones en la región (Viglizzo et al., 2009; Aragón et al., 2010; García et al., 2018).

La región pampeana muestra una marcada variabilidad climática en escalas que van de años a décadas, siendo el fenómeno *El Niño-Oscilación Sur (ENSO)* el principal factor de variabilidad inter-anual de la precipitación (Ropelewski and Halpert, 1987; Grimm et al., 2000; Lovino et al., 2018). El área también ha mostrado una considerable variabilidad de precipitación en escalas plurianuales (Castañeda and Barros, 1994; Berbery et al., 2006; Seager et al., 2010). Las tendencias de cambio a escala decadal en las lluvias sobre la región se encuentran entre las más intensas registradas a nivel mundial durante el siglo XX (Giorgi, 2002). Desde la década de 1970 se ha observado un aumento sostenido de las precipitaciones anuales, especialmente en primavera y verano (Rusticucci and Penalba, 2000; Vargas et al., 2002; Liebmann et al., 2004; Haylock et al., 2006).

En las últimas décadas los cultivos se han expandido a lo largo de la llanura pampeana, desplazando pastizales y pasturas (Manuel-Navarrete et al., 2009; Viglizzo et al., 2011). Como los cultivos ocupan los campos sólo durante algunos meses y tienen raíces menos profundas, consumen anualmente menos agua que las pasturas o pastizales (Nosetto et al., 2015). Además, la técnica de cultivo denominada “*siembra directa*”, práctica muy común en la región para evitar la erosión del suelo (Trigo et al., 2009), deja a éste sin alteraciones (más compacto) y con una cobertura de rastrojo, reduciendo la evaporación desde el suelo (Sinclair et al., 2007). Estos cambios en el uso del suelo y en las técnicas de cultivo traen aparejados una mayor recarga del agua subterránea, con el consecuente aumento en el nivel de las napas (Viglizzo et al., 2009; Contreras et al., 2011).

Existe una fuerte asociación entre la lluvia, la profundidad del nivel freático y la extensión de área de los cuerpos de agua (lagunas, bajos inundados) que determinan la magnitud y los impactos de las inundaciones (Kruse, 2001; Kruse et al., 2006; Kuppel et al., 2015; Kruse and Ainchil, 2017; Vercelli et al., 2019). Las observaciones históricas de napas freáticas y los resultados de diversas modelaciones hidrológicas en regiones de la llanura pampeana sugieren que la combinación de aumentos en las precipitaciones y cambios en el uso del suelo desde la década de 1970 han inducido un aumento progresivo en los niveles freáticos que, a su vez, trajo aparejado un

aumento en el riesgo de inundaciones (García et al., 2018). Es parte de los objetivos de esta Tesis cuantificar el impacto de cada uno de estos factores en la evolución de los niveles freáticos observados en la zona de interés.

Las interacciones entre el clima, la hidrología y los cultivos implican relaciones complejas, no lineales y bidireccionales (Khan et al., 2009; Laio et al., 2009; Zipper et al., 2018). Por ejemplo, una napa cercana a la superficie puede tener impactos positivos o negativos en los cultivos dependiendo de su profundidad. Recíprocamente, los cultivos pueden tener un fuerte efecto en la cantidad y calidad del agua subterránea, ya que la vegetación influye en la recarga del agua subterránea a través de la evapotranspiración y el drenaje (Seyfried et al., 2005; Santoni et al., 2010).

Las napas poco profundas (generalmente menores a los 5 m de profundidad) pueden afectar y, recíprocamente, verse afectadas por los cultivos y pasturas anuales que dominan el uso del suelo en la región pampeana. Las napas freáticas pueden tener impactos nulos, positivos o negativos en los cultivos según su profundidad (Nosetto et al., 2009; Zipper et al., 2015; Mercau et al., 2016). Si la napa freática es profunda, el agua subterránea no es accesible a las raíces y, por lo tanto, no influye en el crecimiento y/o rendimiento de los cultivos. Si la napa está más cerca de la superficie (1,5-2,5 m), el agua subterránea puede alcanzar la zona radicular mediante el ascenso capilar y así proporcionar hasta el 50% de los requerimientos de agua de un cultivo (Ayars et al., 2009). Este "subsidio de agua subterránea" (Mejia et al., 2000; Lowry and Loheide, 2010; Li et al., 2019) ayuda a estabilizar los rendimientos de los cultivos de secano cuando la precipitación es escasa (Jobbágy and Jackson, 2004; Nosetto et al., 2009; Portela et al., 2009; Mercau et al., 2016). Si la napa está muy cerca de la superficie, profundidades menores a 1,5 m, el efecto positivo del agua subterránea en los rendimientos se revierte y se produce una limitación en la actividad de las raíces, la disponibilidad de nutrientes y el establecimiento de la planta (Kahlownd and Azam, 2002; Zipper et al., 2015). Las napas cercanas a la superficie también impiden el acceso de la maquinaria agrícola y reducen la tierra disponible para el cultivo (Viglizzo and Frank, 2006). Finalmente, cuando las napas alcanzan la superficie, se pueden desencadenar importantes inundaciones con considerables impactos sociales y económicos (Nosetto et al., 2009; García et al., 2018).

Recíprocamente, el uso del suelo puede tener fuertes efectos en la dinámica del agua subterránea. La vegetación ejerce un fuerte control sobre el equilibrio hídrico y las variables hidrológicas clave, influyendo tanto en la recarga como en la descarga del agua subterránea (Seyfried et al., 2005; Santoni et al., 2010; Mercau et al., 2015). Las llanuras pampeanas han experimentado cambios importantes en el uso del suelo, motorizados por la interacción de varios factores, entre los que se destacan la variabilidad climática, las innovaciones tecnológicas y contextos económicos favorables (Schnepf et al., 2001; Lamers et al., 2008; Barsky and Gelman, 2009; Eakin and Wehbe, 2009). En resumen, los cambios recientes en el uso del suelo en la llanura pampeana pueden haber tenido fuertes implicaciones para la recarga de agua subterránea, el aumento de la napa freática y la frecuencia e impactos de las inundaciones y sequías (Nosetto et al., 2012; García et al., 2018).

Los flujos horizontales de agua subterránea entre campos con diferentes profundidades freáticas pueden inducir vínculos entre campos adyacentes (Portela et al., 2009). Cuando los cultivos

absorben agua subterránea aumentan la profundidad freática pudiendo desencadenar flujos laterales provenientes del entorno circundante. Del mismo modo, las napas muy someras (por ejemplo, como resultado de un largo barbecho) pueden generar flujos de agua subterránea hacia las áreas circundantes. Debido a estos flujos laterales, el uso del suelo dentro de un campo puede influir en las napas freáticas en las áreas adyacentes; de manera similar, el nivel freático en un campo también puede depender del uso del suelo en áreas cercanas. En consecuencia, los riesgos de inundación o sequía que enfrenta un productor agrícola están influenciados no solo por sus propias decisiones de uso del suelo, sino también por las de otros productores de campos adyacentes.

Las implicaciones del agua subterránea compartida van más allá de las interdependencias espaciales: cuando las estrategias de uso del suelo de un productor impactan la disponibilidad de agua subterránea en campos adyacentes, los resultados económicos de los diversos campos se vuelven interdependientes. Esta situación, en la que las decisiones de uno influyen en los riesgos físicos y financieros que enfrentan los demás y viceversa, puede considerarse como un *“dilema de bienes comunes”* (o *“commons dilemma”*) (Hardin, 1968; Ostrom, 2000). La interdependencia en los problemas ambientales puede requerir la cooperación entre las personas y, finalmente, la coordinación entre las acciones de todos (cuando hay más de una opción disponible) antes de que los beneficios colectivos puedan realizarse plenamente. Típicamente, el dilema de bienes comunes se debe al uso excesivo del agua subterránea para obtener ganancias individuales a costa de crear una escasez para el colectivo (esto es típico en zonas de riego). Sin embargo, en el caso de la pampa argentina, es la sub utilización del agua subterránea lo que resulta en un dilema. Estudios previos postulan que los cambios recientes en el uso del suelo en las Pampas han aumentado el nivel promedio de agua subterránea en casi 2 m (Nosetto et al., 2012) en lo que ya era una cuenca de aguas poco profundas, lo que podría aumentar el riesgo de inundación. El cambio en el uso del suelo fue motivado principalmente por la ganancia económica para el individuo, mientras que las consecuencias ambientales y las potenciales pérdidas son asumidas por todos los que producen y habitan en la cuenca, lo que genera un dilema de bienes comunes tradicionales. Por lo expuesto anteriormente, es claro que un manejo eficaz de las aguas subterráneas para mitigar riesgos y/o capitalizar oportunidades requiere la acción coordinada de varios productores.

La mitigación de los riesgos de inundación y sequía a menudo implica el desarrollo de infraestructura costosa (por ejemplo, canales, embalses) (INA, 2012). Sin embargo, es interesante estudiar el potencial del manejo del uso del suelo para gestionar, en complemento con las obras de infraestructura, los riesgos mencionados (García et al., 2017). Idealmente, en este manejo del uso del suelo los productores tendrían como objetivo mantener el nivel freático a una profundidad que permita el acceso al agua subterránea por parte de los cultivos, brindando protección contra la escasez de precipitaciones, pero no tan superficial como para que los riesgos de inundación puedan aumentar significativamente (Mercau et al., 2016). Entrevistas con productores de la región pampeana muestran una idea de que el agua subterránea tiende a manejarse a sí misma al tener generalmente niveles similares al comienzo de cada ciclo de cultivo, independientemente de la lluvia ocurrida durante el ciclo anterior (Arora et al., 2015; Arora et al., 2016). En consecuencia, muchos productores tienden a ignorar las variaciones del nivel freático asociadas con las opciones de cultivo implementadas en sus campos. Desafortunadamente, el

concepto de agua subterránea como un recurso común en zonas de llanuras ha recibido limitada atención, posiblemente porque se necesitan antecedentes básicos de las ciencias físicas para profundizar en el mismo (Arora et al., 2016). Esta Tesis tiene también como objetivo producir algunos de los antecedentes requeridos.

Por todo lo expuesto anteriormente, la región pampeana es un entorno único para simular y estudiar los vínculos y retroalimentaciones entre procesos hidrológicos, clima, agroecosistemas y toma de decisiones debido a: (i) el fuerte acoplamiento entre el clima, las aguas superficiales y subterráneas en paisajes sedimentarios muy planos, (ii) las interacciones entre aguas subterráneas poco profundas y cultivos y (iii) los cambios observados en el uso del suelo que, junto con una fuerte variabilidad climática, modulan la recarga de aguas subterráneas, la profundidad freática y la frecuencia de inundaciones.

Para lograr estos objetivos, se utilizó como principal herramienta la modelación numérica, utilizando un modelo hidrológico distribuido espacialmente, continuo en el tiempo, que simula la mayoría de los procesos presentes en el ciclo hidrológico, incluyendo la evapotranspiración (ET), el flujo superficial en lámina y encauzado, el flujo en la zona no saturada y el flujo subterráneo (DHI, 2012b). Utilizando como base este modelo hidrológico, se desarrolló luego un Sistema de Modelación Integrada (SMI) para describir las interacciones y retroalimentaciones recíprocas entre escenarios climáticos plausibles, decisiones individuales de uso del suelo, la dinámica de las napas freáticas y los impactos emergentes de estas interacciones en el uso regional del suelo, la producción agrícola y los riesgos de inundaciones y sequías (García et al., 2019). Se acoplaron a este Sistema de Modelación, entre otros modelos, un modelo basado en agentes de decisiones de uso del suelo y producción agrícola, un generador climático espacial y un modelo de simulación de cultivos (García et al., 2019).

Esta tesis se realizó en el marco de los Proyectos *“From farm-level management to governance of landscapes: Climate, water and land use decisions in the plains of Southern South America”*, financiado por el *Inter-American Institute for the Global Change Research (IAI)* durante el período 2012/2014, *“From farm management to governance of landscapes: climate, water and land use decisions in the Argentine Pampas”*, financiado por la *National Science Foundation (NSF)* de los Estados Unidos durante el período 2013/2018 y del Proyecto Interno del Instituto Nacional del Agua *“Modelación combinada de la hidrología, el uso del suelo y la toma de decisiones para la agricultura de la zona pampeana”*. En dichos proyectos se trabajó en colaboración con las siguientes Instituciones: Universidad de Miami (EEUU), Universidad de Colorado (EEUU), Universidad de Illinois (EEUU), Universidad de Pennsylvania (EEUU), Manhattan College (EEUU), Grupo de Estudios Ambientales (GEA) perteneciente a la Universidad de San Luis (Argentina), Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires (FIUBA) (Argentina), Argonne National Laboratory (EEUU), National Center for Atmospheric Research (NCAR) (EEUU), Asociación Argentina de Consorcios Regionales (AACREA) (Argentina), Servicio Meteorológico Nacional (SMN) (Argentina), Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) (Argentina) e Instituto Nacional del Agua (INA) (Argentina).

Capítulo 2

La cuenca del río Salado

*Era en la infancia, en juncos y rocíos,
cuando lo vi pasar, arrodillado.
Mojaba soles y castillos fríos
en retazos de tiempo, lloviznado.
¡Ay!, ya sé que mi jugo enamorado
fue de tiempo mejor,
tiempo de ríos.*

*Su ir hacia Dios y al mar y a su destino.
Su núcleo persistente, navegante,
las raíces de sal, su ángel marino,
la serpiente escondida y el diamante*

*Siete vertientes para su almirante
sepultado en un cofre cristalino.
Tiempo de ríos.*

“La balada del río Salado”
Vicente Barbieri

La cuenca del río Salado del Sur, ubicada mayormente en la Provincia de Buenos Aires, Argentina, posee una gran extensión, abarcando actualmente (trasvases mediante) un área aproximada de 170.000 km². La ubicación de la cuenca se muestra en la Figura 2.1. La topografía de la zona es muy plana, con muy bajas pendientes regionales, del orden de 0,1%. La cuenca presenta un comportamiento clásico de cuenca de llanura, con un balance de agua preponderantemente vertical, y una estrecha relación entre la dinámica de la napa freática y la generación de excedentes.

Siendo tan extensa, la cuenca del Salado no es homogénea. Puede considerarse dividida en tres regiones hídricas (Figura 2.1): la región Salado – Vallimanca – Las Flores (99.000 km²), la región Noroeste (66.000 km²) y la región de las Lagunas Encadenadas (11.000 km²). De estas, solo la primera drena directamente hacia el río Salado. La región Encadenadas del Oeste en rigor constituye un sistema endorreico, cuyo punto de concentración es el Lago Epecuén, pero, como mecanismo de alivio para épocas de grandes excedentes hídricos, fue conectada a la cuenca del Salado por un conjunto de canales y estaciones de bombeo (Halcrow and Partners, 1999; Badano, 2010).

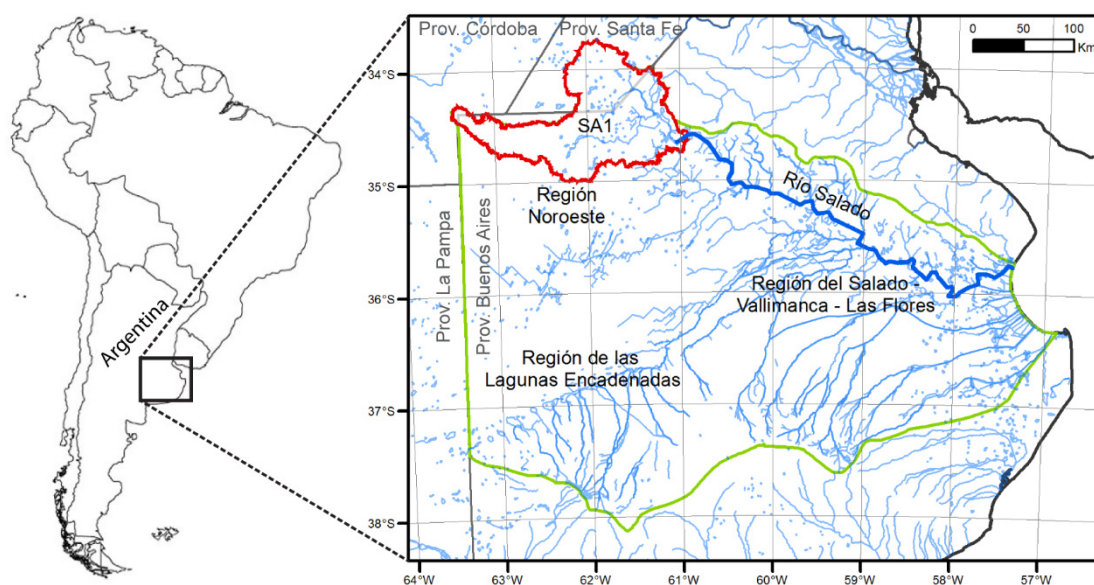


Figura 2.1. Zona de estudio. Cuenca del río Salado (línea verde) y Subcuenca A1 (línea roja).

La región Noroeste no posee un sistema natural de drenaje superficial bien desarrollado, ya que se trata de una zona geomorfológicamente joven (Fidalgo, 1983). No obstante, se han construido varios canales de drenaje, entre los que se destaca el Jaureche-Mercante-República de Italia, que conecta el complejo lagunar Hinojo-Las Tunas al río Salado (Halcrow and Partners, 1999), y más recientemente el canal de la Cañada de las Horquetas, que hace lo propio con las lagunas La Salada, Mar Chiquita y de Gómez (LHA-INA, 2012)(Figura 4.2). Dada la escasez de una buena red de drenaje, y que allí se encuentran las pendientes más bajas de la cuenca, la región Noroeste es la que presenta las características más marcadas de cuenca de llanura (Badano, 2010).

Como resultado de los condicionantes topográficos y de la variabilidad climática, en la cuenca del Salado se reportan inundaciones y sequías desde las épocas coloniales (Figura 2.2 y Figura 2.3). Los eventos de inundación fueron muy frecuentes durante la última parte del siglo XIX y comienzos del siglo XX. Por el contrario, durante el período 1930–1950 ocurrieron severas sequías (Herzer, 2003; Seager et al., 2010). A partir de 1970 se inició un período húmedo, observándose importantes inundaciones en 1980, 1991-1993, 2000-2001, 2012-2013, 2014 y 2015 (Herzer, 2003; Kuppel et al., 2015), aunque hubo eventos menores en 1977, 1978, 1985, 1986, 1992, 1998, 2016 y 2017, en general confinados a cierta porción de la cuenca (Sallies, 1999; Scarpati et al., 2002; Vercelli et al., 2019) (Figura 2.4 y Figura 2.5). Durante este período húmedo se registró un incremento en las precipitaciones totales anuales de la franja oeste de la Provincia de Buenos Aires, pasando de 600-700 milímetros en la década de 1970 a alrededor de 1000-1100 milímetros en la actualidad (Herzer, 2003). Este aumento en las precipitaciones, junto con el cambio del uso del suelo en la llanura pampeana, produjo un gradual ascenso de la napa freática.



a) Sequía de la Laguna Las Flores Grande. Vista desde el puente Romero (Abril de 2009).



b) Sequía de la Laguna Las Flores Grande. Vista hacia el puente Romero (Enero de 2009).



c) Crecida de la Laguna Las Flores Grande (2013).



d) Crecida de la Laguna Las Flores Grande (2013).

Figura 2.2. Efectos de la variabilidad climática en la laguna Las Flores Grande.
(Fuente: [panoramio.com/user/3663208](https://www.panoramio.com/user/3663208)).



a) Bajante del río Salado en el cruce con la Ruta Nacional N°3



b) Crecida del río Salado en el cruce con la Ruta Nacional N°3

Figura 2.3. Distintas condiciones hidrológicas del río Salado en el cruce con la Ruta Nacional N°3



a) Inundaciones en campos del partido de Azul (1980).



b) Inundaciones en campos del partido de Azul (1980).



c) Inundaciones en campos del partido de Azul (1980).



d) Inundaciones en campos del partido de Las Flores (1980).



e) Inundaciones en campos del partido de Las Flores (1980).

Figura 2.4. Inundaciones en la cuenca del río Salado en 1980. (Colección personal del fotógrafo Jorge Quiroga).



a) Inundaciones en campos del partido de Pehuajó (2012).



b) Inundaciones en campos del partido de Nueve de Julio (2012).



c) Inundaciones en campos del partido de General Belgrano (2015). (Fotografía provista por la Sociedad de Fomento Rural de General Belgrano).



d) Inundaciones en campos del partido de General Belgrano (2015).). (Fotografía provista por la Sociedad de Fomento Rural de General Belgrano).



e) Inundaciones en campos del partido de General Paz (2015). (Fuente: minutouno.com).



f) Inundaciones en campos del partido de General Paz (2015). (Fuente: minutouno.com).



g) Inundaciones en campos del partido de General Paz (2015). (Fuente: minutouno.com).



h) Inundaciones en campos del partido de Pehuajó (2016). (Fuente: telam.com.ar).



i) Inundaciones en campos del partido de Junín (2017). (Fuente: infobae.com).

Figura 2.5. Inundaciones en diferentes partidos pertenecientes a la cuenca del río Salado en los años 2012, 2015, 2016 y 2017.

Las inundaciones en la cuenca del Salado no se limitan exclusivamente a la zona rural. También continúan siendo un problema recurrente las inundaciones en zonas urbanas. Esto se debe a varias causas, entre las que se destacan: el desborde de alguna laguna cercana, las crecientes y consecuentes desbordes de los ríos y arroyos, o la escorrentía superficial proveniente de cuenca

arriba (Badano, 2010). A modo ilustrativo, la Figura 2.6 muestra la inundación sufrida por la ciudad de Olavarría en 1980, mientras que la Figura 2.7 presenta inundaciones en diversas ciudades pertenecientes a la cuenca del río Salado en 1993, 2001 y 2015.



a) Vista aérea de la inundación de la ciudad de Olavarría (1980).

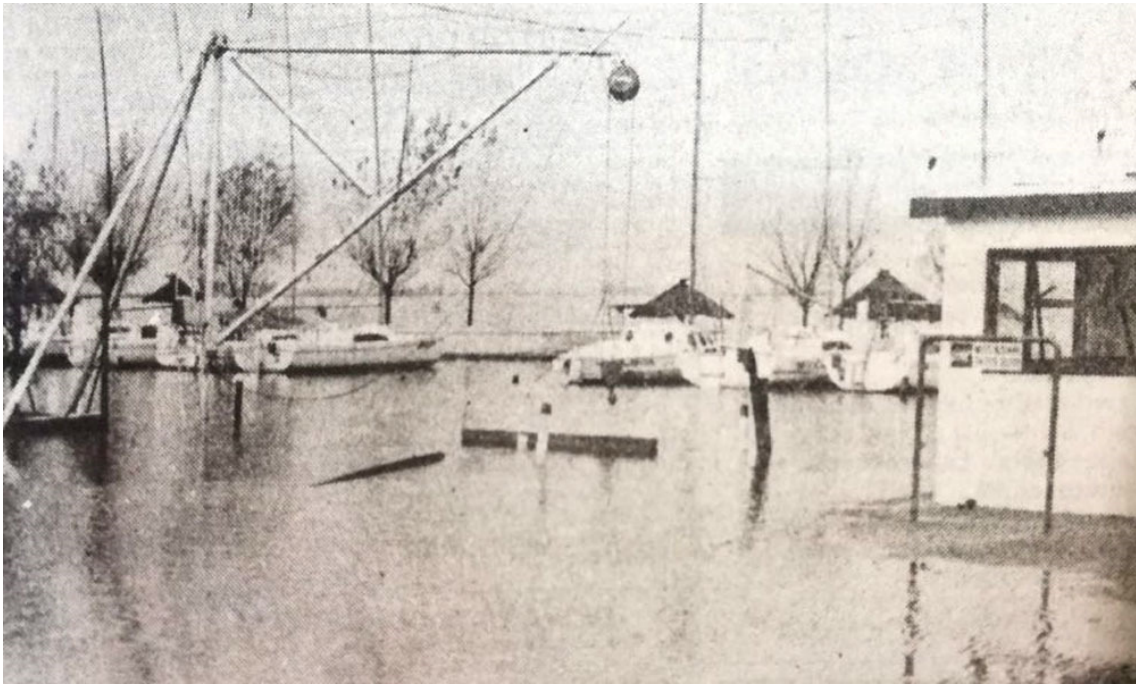


b) Inundación de la ciudad de Olavarría (1980).



c) Inundación de la ciudad de Olavarría (1980).

Figura 2.6. Imágenes de la inundación de la ciudad de Olavarría en 1980. (Colección Personal del fotógrafo Amílcar Abel Merlos).



a) Inundación de la ciudad de Junín (1993). (Fuente: laverdadonline.com).



b) Inundación de la ciudad de Junín (1993). (Fuente: laverdadonline.com).



c) Inundación de la ciudad de Chascomús (2001). (Fuente: Rotary Club Chascomús)



d) Inundación de la ciudad de General Belgrano (2015). (Fotografía provista por la Sociedad de Fomento Rural de General Belgrano).

Figura 2.7. Inundaciones en diferentes ciudades pertenecientes a la cuenca del río Salado.

Como respuesta a las inundaciones, en los últimos años de la década del '90 se encargó a Halcrow & Partners la realización del Plan Maestro Integral de la Cuenca del Salado (PMI), concluido en 1999. El objetivo era realizar por primera vez una planificación integrada a escala de cuenca de posibles medidas para paliar los problemas hídricos de la misma. Este estudio fue el primero en basarse en herramientas de modelación numérica para el diagnóstico de la situación hídrica y la evaluación de posibles alternativas de solución. En el estudio se plantearon distintas medidas estructurales, consistentes básicamente en la excavación de nuevos canales de drenaje y la ampliación de los existentes, la generación de reservorios en lagunas existentes, y la construcción de diversas obras de control (Badano, 2010).

En el año 2005, el Ministerio de Asuntos Agrarios de la Provincia de Buenos Aires y la Dirección Provincial de Saneamiento y Obras Hidráulicas encargó a la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Avellaneda, el Plan de Desarrollo Integral del Río Salado: Estudio de Impacto Ambiental, Social y Territorial (en adelante PDIRS). El mismo tuvo como objetivo realizar un diagnóstico sobre las causas y los efectos de inundaciones en la cuenca, el análisis y actualización de las conclusiones del PMI, la evaluación de las obras en construcción y de las nuevas obras planificadas, y el desarrollo de nuevas alternativas de drenaje. En este estudio se utilizó por primera vez un modelo hidrológico integrado superficial-subterráneo y distribuido en el espacio para el diagnóstico y la toma de decisiones. Una parte de la presente tesis doctoral utiliza una versión mejorada por Badano (2010) de dicho modelo.

Ambos estudios, el PMI y el PDIRS, centraban sus propuestas de reducción del riesgo de inundaciones básicamente en medidas estructurales, sin considerar medidas de mitigación a partir de diferentes estrategias de consumo de agua por parte de cultivos.

Con mayor o menor celeridad, las obras definidas en el PMI, con las adecuaciones propuestas en el PDIRS, vienen siendo ejecutadas. Actualmente los trabajos se centran en el dragado y adecuación del cauce del río Salado (Figura 2.8).



a) Dragado del río Salado a la altura del partido de General Belgrano. (Fuente: construir.com.ar)



b) Dragado del río Salado a la altura del partido de General Belgrano (2018).
(Fuente: agrochivilcoy.com).

Figura 2.8. Dragado y adecuación del cauce del río Salado.

Como se mencionó anteriormente, además del aumento en las precipitaciones, a partir de la última década del siglo XX se registró en la llanura pampeana un fuerte aumento del área destinada a cultivos agrícolas anuales en detrimento de áreas destinadas a ganadería (Manuel-Navarrete et al., 2009; Viglizzo et al., 2011). Desde la década de 1980, y especialmente desde la de 2000, la soja se convirtió en el cultivo más importante de la región (Reboratti, 2010; Bert et al., 2011a; Delvenne et al., 2013). Alrededor de la mitad del área agrícola en las Pampas Argentinas está cultivada actualmente con soja (Agroindustria, 2018). Debido a su menor evapotranspiración y su sistema radicular de menor tamaño comparado con las pasturas (e.g., Nosetto et al., 2012), este cambio en el uso del suelo debe estar influyendo en la elevación de las napas y el aumento de la frecuencia de los eventos de inundación, tal como lo muestran los registros históricos de napas en la zona y estudios precedentes (Viglizzo et al., 2009; Contreras et al., 2011).

2.1 Indicadores cuantitativos

Gran parte del estudio desarrollado en la presente tesis se localiza en la zona norte de la región Noroeste, aguas arriba de la ciudad de Junín (donde se encuentran las nacientes del río Salado), conocida como Subcuenca A1 (de acá en adelante denominada SA1). En la Figura 2.1 se muestra un esquema de la cuenca, con sus regiones y cursos de agua, donde se ubica la subcuenca SA1.

Esta tiene un área aproximada de 14.500 km², y una extensión de alrededor de 230 km en la dirección este-oeste y 140 km en la dirección norte-sur. La zona oeste de SA1 presenta dunas transversales, las cuales obstruyen fuertemente la evacuación de las aguas superficiales (Viglizzo et al., 1997; Viglizzo et al., 2009). Los partidos que componen la SA1 son: Colón, General Arenales, Florentino Ameghino, General Pinto, General Viamonte, General Villegas Junín, Leandro N. Alem, Lincoln (todos estos pertenecientes a la Provincia de Buenos Aires), General López (perteneciente a la Provincia de Santa Fe) y Presidente Roque Sáenz Peña (perteneciente a la Provincia de Córdoba), tal como se muestra en la Figura 2.9.

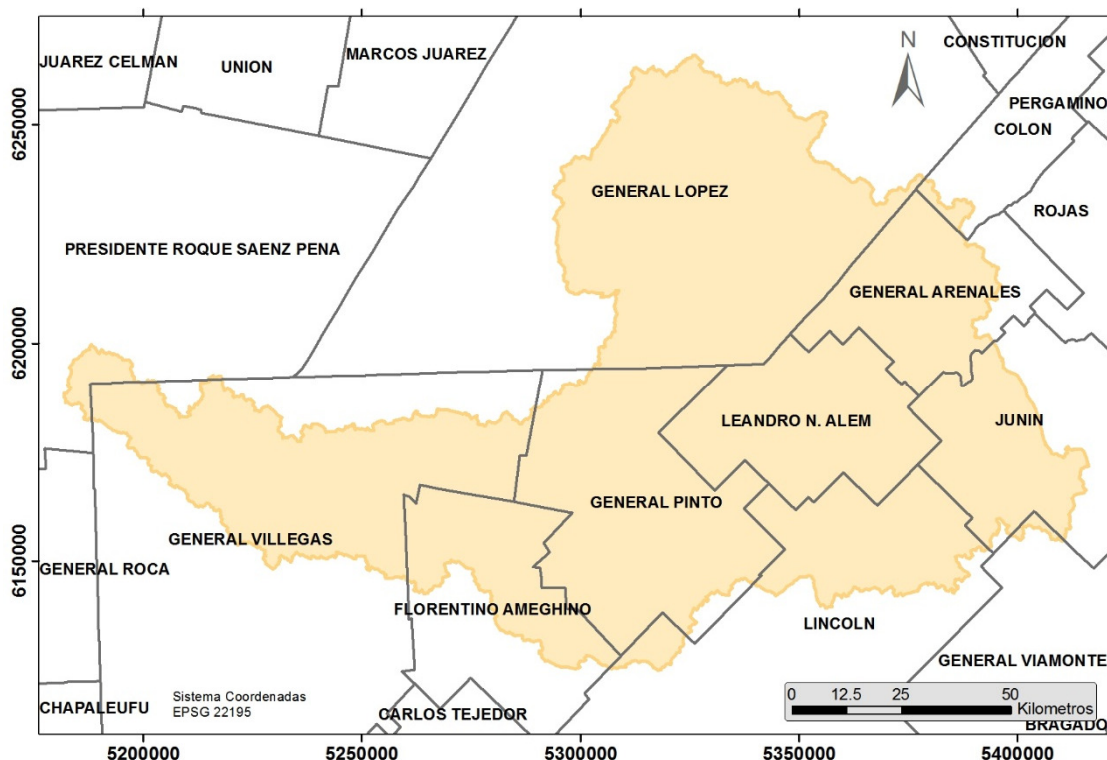


Figura 2.9. Departamentos pertenecientes a la Subcuenca A1.

La SA1, en concordancia con el resto de la llanura pampeana, ha visto aumentada significativamente el área destinada a la agricultura (Manuel-Navarrete et al., 2009; Viglizzo et al., 2011). El porcentaje del área con cultivos anuales en la SA1 creció desde 28% en 1970 a 40% en la campaña 2004, alcanzando en la actualidad aproximadamente el 60% (Agroindustria, 2018). En la Figura 2.10 se observa la evolución de los porcentajes de los cultivos más importantes (maíz, trigo, girasol y soja) para el período 1970-2018. Aproximadamente a partir de 1990 se empezó a desarrollar en la llanura pampeana lo que se denomina “*doble cultivo*”, que hace referencia a la implementación de dos cultivos distintos en un mismo período agrícola, que suele ir de mayo de un año a junio del año siguiente. Dado que la base de datos del Ministerio de Agroindustria de la República Argentina solo informa superficie total cultivada, para construir la figura se asumió que desde el año 1990 hasta el año 2000 hubo una transición, al final de la cual todo el trigo cultivado está seguido por un cultivo de soja ‘tardía’ o ‘de segunda’ (García et al., 2018).

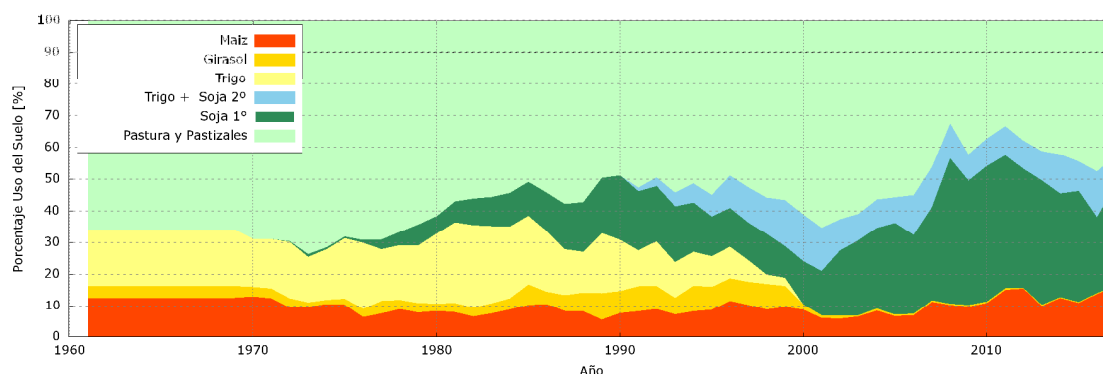


Figura 2.10. Evolución histórica del uso del suelo para la SA1.

Como se mencionó en el Capítulo 1, la llanura pampeana mostró en las últimas décadas un importante cambio en las precipitaciones. La Figura 2.11 muestra la serie temporal de precipitaciones anuales promediadas sobre la SA1 para el período 1960-2004, durante el cual tuvo lugar un aumento significativo, tal como se observa a simple vista. Esta serie se obtuvo ponderando, mediante polígonos de Thiessen, las series de precipitaciones en los pluviómetros ubicados dentro o en las inmediaciones del área de estudio (Figura 2.12). La base de datos surgió de estudios previos (Halcrow and Partners, 1999; UTN-FRA, 2007; García et al., 2017). Los datos están disponibles simultáneamente desde 1911 hasta 2004, ya que luego gran parte de esas estaciones fueron dadas de baja.

En la misma Figura 2.11 se representa la recta de tendencia (línea roja), que resulta positiva con una tasa de 7,73 mm/año. La precipitación anual promedio en la SA1 para el período 1911-2004, representada en línea verde en la misma figura, fue de 930 mm. Se observa que: i) en el período 1960-1980 se registraron 15 años donde llovió menos que el promedio; ii) en el período 1980-2004 no se superó el promedio en solo 7 años; y iii) los años 1993, 2001 y 2002, en los cuales la zona sufrió fuertes inundaciones, fueron los de mayores precipitaciones anuales registradas.

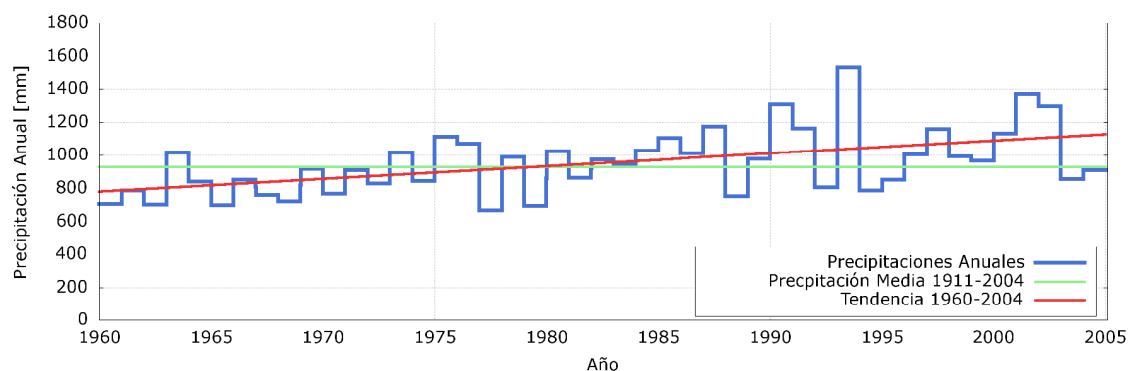


Figura 2.11. Evolución de las precipitaciones medias anuales durante 1960-2004, indicando la tendencia en dicho periodo (línea roja) y la precipitación media anual del periodo 1911-2004 (línea verde).

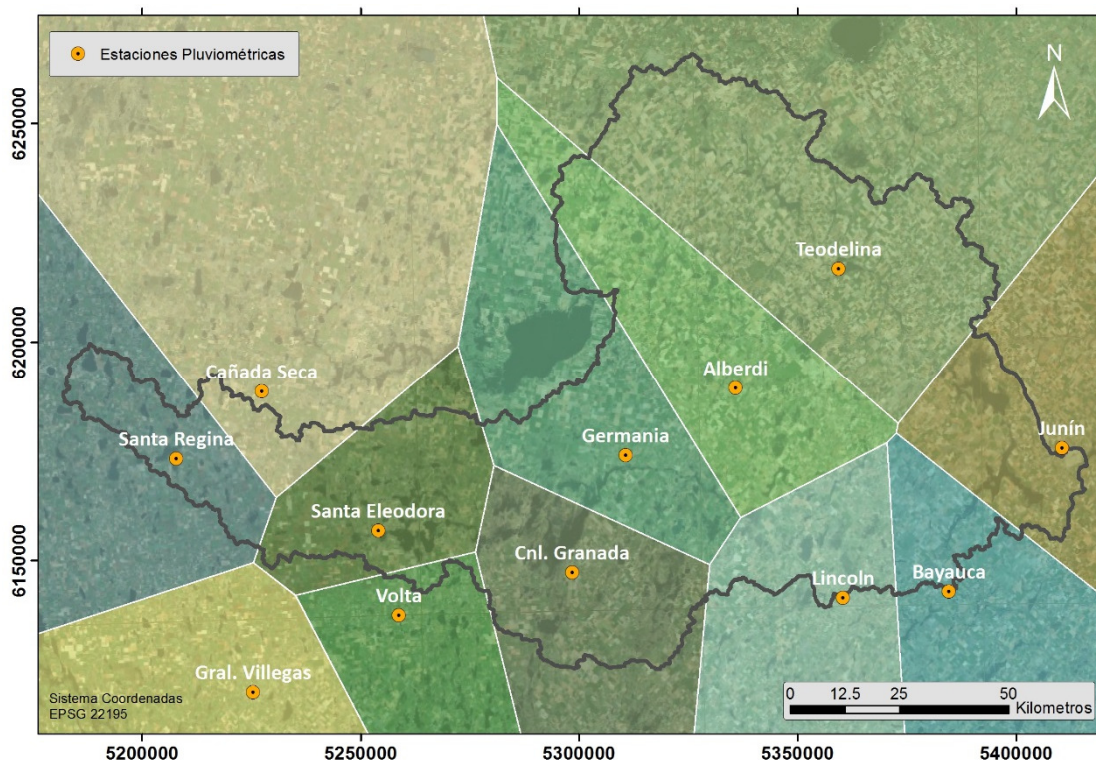


Figura 2.12. Estaciones pluviométricas (círculos naranjas) y sus respectivos polígonos de Thiessen asociados.

2.2 Conclusiones del capítulo

La cuenca del río Salado se ofrece como un laboratorio natural para poder estudiar los vínculos y retroalimentaciones entre los procesos hidrológicos y ambientales. Por otra parte, esta región, que ha mostrado marcados cambios en las precipitaciones y el uso del suelo, presenta una oportunidad única para entender el rol individual que juegan el clima y el uso de la tierra en los sistemas hidrológicos de llanura, como así también la dinámica del agua subterránea y de las inundaciones. Es también una zona propicia para ensayar diferentes estrategias de manejo agronómico y analizar el impacto hidrológico y económico de las mismas. La herramienta utilizada para estos estudios es la modelación numérica, cuya implementación se describe en el Capítulo 4.

Capítulo 3

Comportamiento hidrológico de cuencas de llanuras

*Solo un inmenso mar pudo detener su geografía inconmensurable.
Un límite de barrancas profundas, de duras rocas golpeadas por oleajes sin tregua.
Altas peñas mangruyando siglos de soledad azul y furias blancas.
Todo esto fue necesario para fijar la frontera de esa llanura infinita que los criollos llamamos
con el nombre más indiano, más hermoso: PAMPA.*

“Elogio de la Pampa”
Atahualpa Yupanqui

La hidrología se desarrolló históricamente estudiando los procesos de flujo del agua en cuencas de drenaje bien definidas, asumiendo la presencia de altas pendientes y constituidas en general por rocas de baja permeabilidad. En contraposición a estos supuestos están las condiciones de las grandes llanuras, que cuentan con pendientes topográficas muy bajas y desarrolladas en terrenos de sedimentos no consolidados, donde generalmente el escurrimiento superficial es insignificante (Kruse and Ainchil, 2017).

3.1 Definición de llanura, su origen y su clasificación

Independientemente de las condiciones hidrológicas, la denominación de llanura lleva implícito un carácter morfológico (Kruse and Ainchil, 2017). Iriondo (1986) define a la llanura como “un área de la superficie de la Tierra con relieve general pequeño o nulo, donde los elementos topográficos locales son más significativos para la dinámica del ambiente que la pendiente regional”. Los procesos morfogenéticos en las llanuras suelen crear geoformas, como por ejemplo dunas de arena, albardones, dolinas, bajos, etc. Estas formas locales, en un contexto de bajas pendientes generales de la superficie, ejercen una influencia sustantiva sobre los procesos hidrológicos y de formación del paisaje dentro de la llanura, a pesar de su reducido tamaño (Badano, 2010).

Una primera clasificación de las llanuras puede realizarse en función del mecanismo tectónico que le dio origen. Las llanuras se originan a partir de movimientos tectónicos epirogénicos (desplazamientos verticales que afectan una extensión considerable de la corteza terrestre) (Iriondo, 1986). En base al sentido de los mencionados desplazamientos las llanuras pueden clasificarse en llanuras de agradación (si el desplazamiento tiene tendencia al hundimiento) o en planicies estructurales (si el desplazamiento es de elevación) (Ver Figura 3.1). En las llanuras de agradación, el descenso tectónico de la zona respecto al entorno favorece la sedimentación generalizada de material de zonas aledañas, y es por esto que se las suele denominar también llanuras sedimentarias (Halcrow and Partners, 1999). Las características resultantes de este tipo de llanuras están determinadas principalmente por factores climáticos pues la sedimentación se produce mayormente por procesos eólicos y procesos asociados al flujo de agua generado por precipitaciones (Iriondo, 1986; Badano, 2010). La llanura pampeana, donde se encuentra la cuenca del río Salado se corresponde con este tipo de llanura.

En las planicies estructurales, además de las características climáticas, son fundamentales las características de la roca preexistente puesto que el principal proceso de formación es la meteorización de la plataforma de roca elevada por causas tectónicas (Iriondo, 1986).

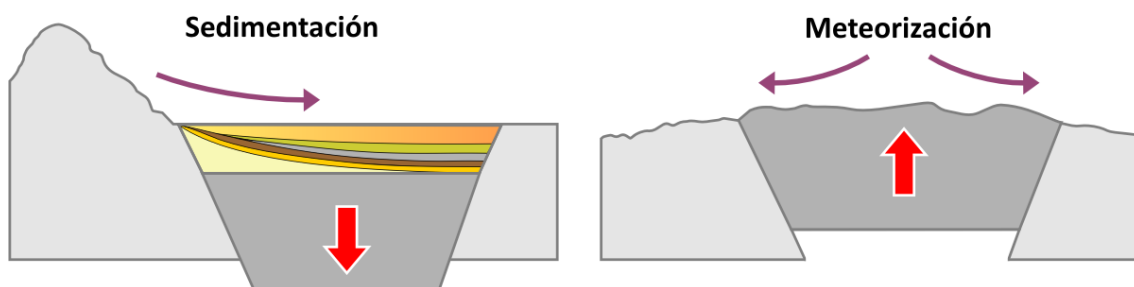


Figura 3.1. Llanuras de agradación y planicies estructurales. Tomada de Badano (2010).

Las llanuras de agradación también pueden clasificarse en virtud de los mecanismos de sedimentación que les dieron origen. Iriondo (1986) define que las llanuras de agradación pueden ser eólicas, glaciales, lacustres, aluviales o litorales. Las características de cada una de ellas se encuentran descriptas en Badano (2010) y se transcriben a continuación:

- Las llanuras eólicas se constituyen a partir de sedimentos medianos y finos acarreados por el viento en climas áridos y semiáridos. Su dinámica depende del régimen de vientos y de la humedad relativa del ambiente. Existen dos divisiones marcadas dentro de las llanuras eólicas: las llanuras de arena y las llanuras de loess.
 - Las llanuras de arena se producen por la acumulación de sedimentos transportados por arrastre y saltación. Ocurren en climas áridos o donde existen condiciones locales de aridez. Se caracterizan por la existencia de dunas de distintos tipos.
 - Las llanuras de loess están originadas por acumulación de polvo transportado en suspensión por el viento y depositado en forma de manto en regiones de clima semiárido. Esta forma de sedimentación no genera geoformas propias sino que reproduce las irregularidades topográficas subyacentes. Están constituidas en una alta proporción por limos gruesos, con poca cantidad de materiales de otras granulometrías.
- Las llanuras glaciales son formadas por sedimentos transportados y depositados por el hielo. Están formadas por depósitos heterogéneos, que constituyen formas variadas, con un relieve pronunciado. Pueden dividirse en llanuras de till y de acarreo glacial.
- Las llanuras lacustres se forman a partir de sedimentos depositados en cuerpos de agua, incluyendo lagos, lagunas, pantanos y salinas. Se constituyen de sedimentos finos y muy finos, generalmente estratificados en capas delgadas. Son llanuras extremadamente planas, sin relieves locales. Pueden clasificarse en llanuras lacustres clásticas, salinas y llanuras palustres.

- Las llanuras aluviales se forman a partir de sedimentos transportados y depositados por corrientes fluviales. Son frecuentes en climas húmedos y semiáridos, donde la precipitación es suficientemente elevada para producir escorrentías de cierta magnitud. Los procesos actuantes tienden a producir un relieve local poco pronunciado, incluyendo cauces, albardones y derrames. Pueden distinguirse dos tipos principales: las fajas aluviales y los abanicos aluviales.
 - Las fajas aluviales son superficies largas y estrechas, dentro de las cuales divaga una corriente fluvial, labrando sus formas sobre sus propios sedimentos. Es necesario para su formación la presencia de bloques tectónicos basculados, que mantengan el río en una estrecha franja e impidiéndole cambiar de dirección.
 - Los abanicos aluviales se forman a partir de una corriente de agua que pasa de estar confinada a divagar libremente, produciendo un abanico de sedimentos, como cauces abandonados, lóbulos de derrame, áreas de bañados, etc., producto de los sucesivos cambios de dirección del curso. Los sedimentos en los abanicos son más heterogéneos que en el caso de las fajas.
- Las llanuras litorales aparecen en la zona de contacto entre el océano y los continentes. Están constituidas en su mayor parte por sedimentos medianos. Sus geoformas típicas son las playas, los canales de marea y los deltas, entre otros. Pueden clasificarse en llanuras de oleaje, llanuras de marea y deltas.

Las clasificaciones anteriores se presentan en forma de diagrama en la Figura 3.2.

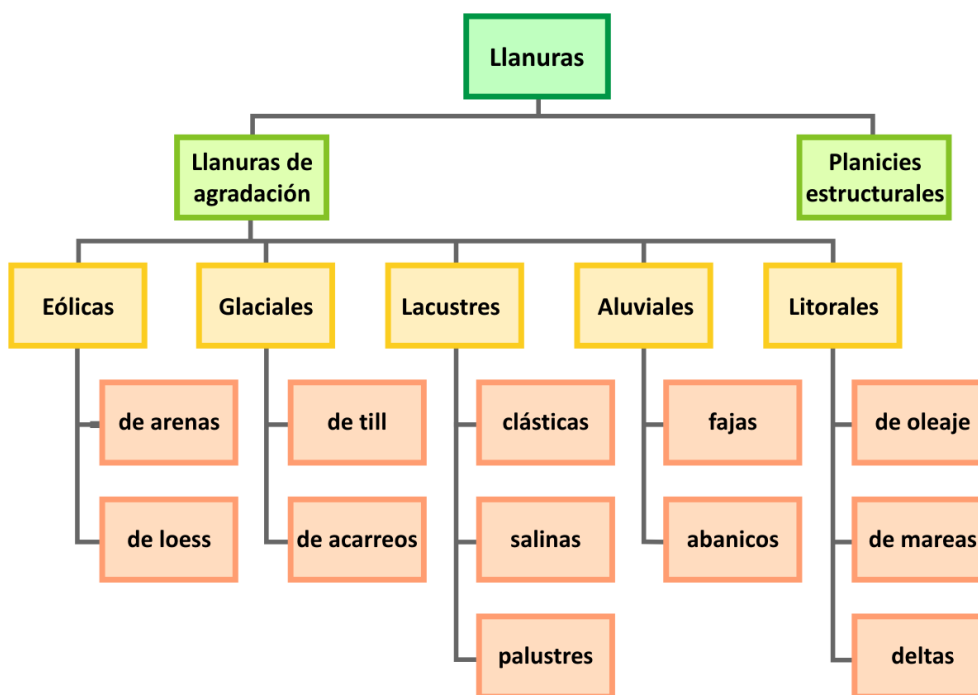


Figura 3.2. Clasificación de llanuras. Adaptada de Badano (2010).

3.2 Comportamiento Hidrológico de las llanuras de agradación

Las características geomorfológicas de las llanuras condicionan los procesos hidrológicos y los modelos conceptuales para describirlos (Zimmermann, 1999). El desarrollo de la Hidrología Clásica, se realizó adoptando el concepto de Cuenca Hidrográfica convencional; esto es que puede definirse un área de aporte, que existe una red de drenaje desarrollada y organizada y que se puede identificar cada componente de la red con un orden de jerarquía (Zimmermann, 1999). Estos sistemas se denominan “Sistemas hidrológicos Típicos (SHT)” (Figura 3.3). En contraposición los sistemas hidrológicos de llanuras se caracterizan por poseer pendientes topográficas pequeñas, dificultades para generar una red de drenaje integrada y definir el área de aporte, presentar sectores con divisorias de aguas difusas, varios puntos de salida y, dadas las bajas pendientes regionales, las consecuencias de los forzantes pluviales se dan en términos de acumulaciones (Zimmermann, 1999; Bertoni and Ganancias, 2010; Kruse and Ainchil, 2017).

Por lo expresado anteriormente, a los sistemas hidrológicos de llanura se los suele denominar “Sistemas Hidrológicos No Típicos (SHNT)” (Figura 3.3) (Caamaño Nelli et al., 1979; Fertonani and Prendes, 1983; Sallies, 1999) o bien “Regiones Hídricas Superficiales”. Ferreiro (1983) define: *“Una región hídrica es un territorio geográfico caracterizado por un tipo de escurrimiento hídrico superficial homogéneo a través del cual es impracticable la delimitación de cuencas o subcuencas hídricas superficiales a la escala de trabajo encarado”*. El término cuenca, sin embargo, se suele utilizar en la práctica, sobre todo para referirse a las regiones hídricas extensas delimitadas por divisorias más marcadas (Badano, 2010). A continuación se discuten una serie de características hidrológicas correspondientes a las grandes llanuras.

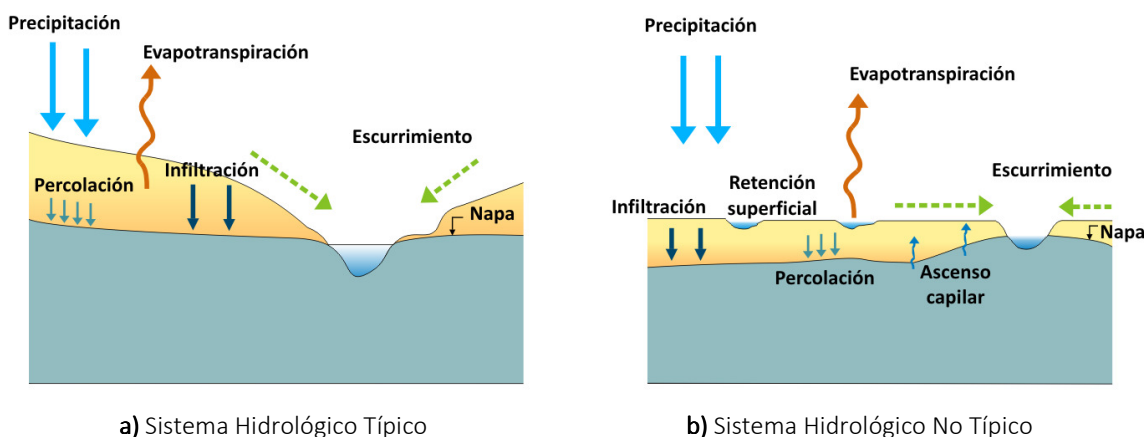


Figura 3.3. Esquemas representativos de diferentes Sistemas Hidrológicos. Adaptada de Badano (2010).

Una de las principales características de la hidrología de llanura es la baja energía morfológica del terreno (Usunoff, 2002; Kruse and Ainchil, 2011), lo cual hace que la energía hídrica se disipe a través de movimientos verticales del agua. Al ser muy bajas las pendientes presentes en las llanuras, los gradientes hidráulicos superficiales y subterráneos que se pueden llegar a desarrollar son considerablemente bajos, dando lugar a flujos horizontales del agua en el suelo muy lentos (Badano, 2010). Esto se traduce en la dificultad de moverse horizontalmente del agua que se infiltra en el terreno, acumulándose hasta lograr un equilibrio entre la evapotranspiración y la

infiltración a través de la zona no saturada. (Fuschini Mejía, 1994; Badano, 2010); esto implica, como se mencionó anteriormente, que el balance de agua en el suelo es esencialmente vertical. A su vez, los bajos gradientes del flujo subterráneo hacen que el aporte al caudal de base de los cursos de la región sea poco significativo.

La interacción de la mayoría de los procesos mencionados hasta ahora (evapotranspiración, infiltración, escorrentía) depende de las características (espesor, tipos de suelo) de la zona no saturada, que incluye el suelo y los horizontes subyacentes hasta el nivel del agua subterránea. Las propiedades del suelo no saturado definen la capacidad de infiltración del terreno, como así también la rapidez con la que el agua succionada desde la napa freática repone el agua que es evapotranspirada desde los estratos superiores del suelo (Usunoff, 2002). Al reducirse por evapotranspiración la humedad en las capas superiores del suelo los meniscos se retraen, disminuyendo la presión del agua presente en la matriz de suelo, lo que genera un gradiente de energía que produce un flujo de agua ascendente. En zonas de llanura, este efecto es el principal responsable del descenso freático, dada la mencionada lentitud del flujo horizontal en la zona saturada (en Badano, 2010).

Los tipos de suelo que componen la zona no saturada son importantes porque su tamaño de grano y su grado de compacidad (textura y estructura, en términos agronómicos) definen la capacidad de infiltración. Los materiales finos y estructurados generalmente tendrán una capacidad de infiltración baja. Eso significa que, aunque la zona no saturada no está completamente llena, se producirán escurrimientos o almacenamientos de agua en la superficie. En materiales más gruesos y menos estructurados, la infiltración es mayor, y los poros son los que se llenan primero (Usunoff, 2002).

El balance netamente vertical que caracteriza la llanura pampeana hace que la misma sea fuertemente sensibles a las fluctuaciones climáticas (excesos y déficit de agua) así como a las actividades antrópicas (Kruse and Ainchil, 2017).

Una consecuencia de la preponderancia del balance vertical es el rol fundamental que juega la evapotranspiración en la evolución del nivel freático. Por esto último, la cobertura vegetal es un factor clave, permitiendo que la evapotranspiración sea capaz de producirse a tasa cercana a la potencial, aún en condiciones en que no existe humedad suficiente en la capa superior del suelo; la vegetación puede extraer agua del suelo mediante sus raíces desde profundidades mayores que las que se alcanzan por evapotranspiración directa (Nosetto et al., 2009; Badano, 2010). En la cuenca del río Salado, por tanto, la producción agrícola ganadera puede influir significativamente en la dinámica de los niveles freáticos (García et al., 2018).

Las grandes llanuras suelen presentar napas freáticas cercanas a la superficie y una estrecha relación entre el agua superficial y subterránea (Kruse and Zimmermann, 2002).

La escorrentía en cuencas de llanura es muy pequeña respecto de la evaporación y la infiltración (Iriondo, 1986; Durán, 2002). Las geoformas locales suelen condicionar el escurrimiento más que las pendientes regionales. Esto último hace que, desde el punto de vista hidrológico, sean más importantes las características topográficas locales que las pendientes regionales. Badano (2010) resalta la necesidad de contemplar las alteraciones que estas geoformas locales producen sobre

el balance hídrico, independientemente de la escala de resolución a la que se pretenda encarar el análisis hidrológico.

En la medida en que las pendientes topográficas son escasas, no hay suficiente energía morfológica que conduzca a la formación de una red de drenaje lineal organizada y jerarquizada (Usunoff, 2002). Parte de esa red, presenta direcciones de drenaje variable dependiendo del régimen de lluvia a corto plazo y de la humedad antecedente de la zona no saturada. Parte de un evento de lluvia dado se disipa en forma de flujos superficiales, parte se acumula en las depresiones, y la mayor parte repone el almacenamiento de humedad del suelo. Si el evento de lluvia es lo suficientemente largo y/o de alta intensidad, el suelo se llena, aumenta la escorrentía superficial y las depresiones mencionadas anteriormente crecen hasta el punto de conectarse entre sí y encontrar la manera de descargar agua en los principales cursos de agua (Usunoff, 2002).

3.3 Conclusiones del capítulo

Es posible describir a la llanura pampeana como un “Sistema hidrológico no típico”, cuyas características predominantes son: Predominancia de los movimientos verticales del agua debido a las escasas pendientes regionales, importantes retenciones superficiales en bajos, esteros y lagunas, red de drenaje mal definida, arroyos interrumpidos por lagunas, divisorias de agua mal definidas y escasa erosión hídrica.

El balance netamente vertical que caracteriza la llanura pampeana, hacen de la evapotranspiración y las precipitaciones mecanismos fundamentales en la evolución del nivel freático. En estas condiciones, los cambios de uso del suelo, las características de la cobertura vegetal y la variabilidad climática observada en la cuenca del río Salado, suponen importantes impactos en la dinámica freática de la zona, que si bien son conocidos y registrados por diversos autores, no suelen estar cuantificados. Los próximos capítulos buscan entender la evolución hídrica de la cuenca A1 del río Salado, cuantificando los impactos producto de los cambios en el uso del suelo y las precipitaciones y ensayar distintas estrategias de manejo agronómico para comprender si es posible mitigar los efectos regionales de los excesos y déficits de agua a través de cambios en el uso del suelo.

Capítulo 4

Modelo Hidrológico¹

– Esa es otra cosa que hemos aprendido de vuestra Nación, dijo Mein Herr, el arte de hacer mapas. Pero lo hemos desarrollado mucho más que vosotros. ¿Cuál es para ti el mapa más grande que sería de verdad útil?

– Sobre seis pulgadas por milla.

– ¡Solo seis pulgadas! exclamó Mein Herr. Nosotros muy pronto superamos las seis yardas por milla. Entonces probamos con cien yardas por milla. ¡Y finalmente llegamos a la idea más fabulosa de todas! ¡Realizamos un mapa del país, con la escala de una milla por milla!

– ¿Lo habéis utilizado mucho? pregunté.

– Nunca ha sido desplegado todavía, dijo Mein Herr, los granjeros se opusieron. Ellos dijeron que cubriría completamente el país, ¡y no dejaría pasar la luz del Sol! Así que ahora utilizamos el propio país, como su propio mapa, y te aseguro que funciona casi tan bien.

“Silvia y Bruno”
Lewis Carroll

¹ Los principales resultados de este capítulo están incluidos en García, P.E., Menéndez, Á.N., Podestá, G.P., Bert, F., Arora, P., Jobbágy, E.G., 2017. Land-Use as possible strategy for managing water table depth in flat basins with shallow groundwater. *The International Journal of River Basin Management*, Vol. 16, Issue 1. DOI:10.1080/15715124.2017.1378223 y en Badano, N., 2010. Modelación integrada de grandes cuencas de llanura con énfasis en la evaluación de inundaciones, Tesis de grado, Facultad de Ingeniería. Universidad de Buenos Aires: Buenos Aires, Argentina (https://www.ina.gob.ar/pdf/phc_tesis_%20badano_mar10.pdf), p. 158.

Para cumplir los objetivos propuestos en esta Tesis, es decir analizar la dinámica hídrica observada en esta región de la llanura pampeana, entender y cuantificar la influencia de los forzantes climáticos y el uso del suelo en la hidrología de zona de estudio y estudiar la viabilidad del manejo de la profundidad freática mediante diversas estrategias de cultivos, se procedió a implementar un modelo hidrológico de la subcuenca A1 (SA1), cuya primer versión fue desarrollada por Badano (2010).

4.1 Software MIKE SHE

Para el desarrollo del modelo hidrológico de la SA1 se utilizó el código de simulación *MIKE-SHE* (Refsgaard and Storm, 1995; Refsgaard et al., 2010), derivado del modelo '*Système Hydrologique Européen*' o SHE (Abbott et al., 1986a, b), desarrollado colaborativamente por varios laboratorios europeos. *MIKE SHE* es un modelo hidrológico determinístico, distribuido y de base física, es decir que los procesos de movimiento del agua se modelan mayormente mediante la resolución numérica de las ecuaciones diferenciales de conservación. *MIKE-SHE* ha sido aplicado en una variedad de cuencas con áreas que varían desde 500 a 350.000 km² (Refsgaard et al., 1992; Vázquez et al., 2002; Henriksen et al., 2003; Liu et al., 2008; Stisen et al., 2008; Janža, 2013; Wijesekara et al., 2014; Farjad et al., 2017; García et al., 2017; Loliyana and Patel, 2018; He et al., 2019). También ha sido utilizado para actualizar el Plan Maestro para control de inundaciones en la cuenca del Salado, en el contexto del '*Plan de Desarrollo Integral del Río Salado: Estudio de Impacto Ambiental, Social y Territorial*' o PDIRS (UTN-FRA, 2007; INA, 2012). Con este plan se buscó implementar un sistema documental, actualizado y homogéneo, para la totalidad de las regiones y subregiones de la cuenca, que cubriera los aspectos técnicos, económicos, sociales y ambientales, a efectos de lograr: (i) la continuidad de proyectos, obras e intervenciones estructurales que permitieran el desarrollo armónico y sustentable de la cuenca; (ii) la sistematización regular de la información técnica que permitiera el control de los efectos de las intervenciones antrópicas, el monitoreo de la vulnerabilidad territorial, el control de la evolución de los eventos climáticos generadores de riesgos, el cuidado del medio ambiente; y (iii) el diseño y aplicación de medidas no estructurales.

MIKE-SHE simula la mayoría de los procesos presentes en el ciclo hidrológico, incluyendo la evapotranspiración (ET), el flujo superficial en lámina y encauzado, el flujo en la zona no saturada y el flujo subterráneo (Graham and Butts, 2005; Sahoo et al., 2006; UTN-FRA, 2007; Refsgaard et al., 2010; DHI, 2012b), tal como se muestra en la Figura 4.1. Para cada uno de estos procesos, *MIKE-SHE* ofrece múltiples opciones de modelación.

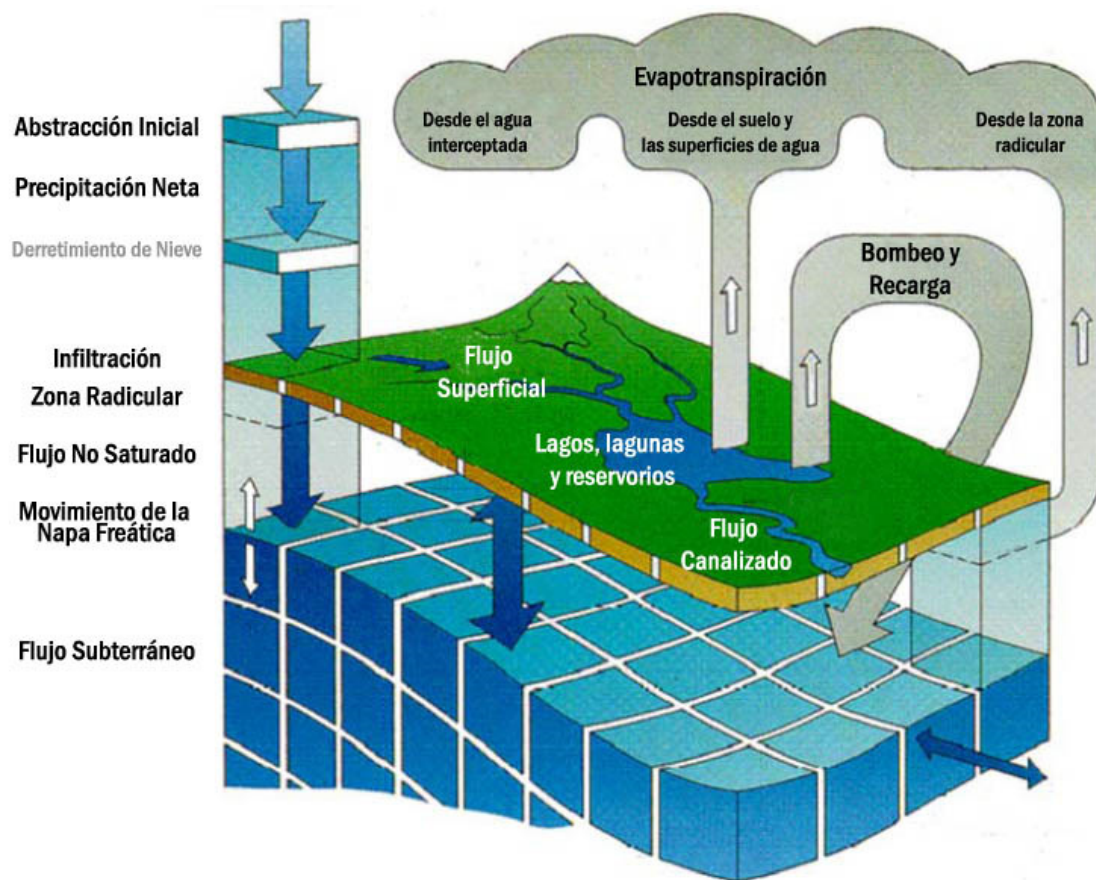


Figura 4.1. Vista esquemática de los procesos hidrológicos incluidos en el software MIKE SHE (Badano, 2010).

La evaporación directa de agua desde el suelo y desde la interceptación en el follaje, y la transpiración vegetal se modelan por el método propuesto por Kristensen and Jensen (1975). Este método utiliza como forzante la ET potencial, la cual modula con parámetros asociados al uso del suelo (Índice de área foliar y profundidad de raíces) y otros empíricos (Janža, 2013); además, tiene en cuenta el límite impuesto por la humedad disponible. El flujo superficial en lámina (escorrentía) se calcula mediante la resolución de las ecuaciones bidimensionales de onda difusiva (Wijesekara et al., 2014), que se acoplan a un modelo dinámico unidimensional para el flujo concentrado en cauces (código *MIKE 11*, subsumido dentro del *MIKE-SHE*) basado en las ecuaciones de Saint Venant (Havno et al., 1996; DHI, 2012a). El flujo en la zona no saturada se considera exclusivamente vertical (Abbott et al., 1986b), y se resuelve mediante la ecuación de Richards (Richards, 1931; DHI, 2012b). El flujo en la zona saturada se representa mediante la ecuación tridimensional de Boussinesq (Liu et al., 2008).

La cuenca a modelar se discretiza en celdas cuadradas de suelo, las cuales a su vez se subdividen en capas, generándose así una discretización tridimensional. El intercambio de agua entre dos celdas contiguas se considera horizontal, ya sea de tipo superficial o de tipo subterráneo en la zona saturada.

Las características de la formulación utilizada en *MIKE SHE* se adaptan muy bien a las particularidades de las cuencas de llanura. En especial, la resolución del escurrimiento vertical bidireccional en la zona no saturada es clave para representar la dinámica de estas cuencas. La ecuación de Richards (Richards, 1931) requiere la utilización de submodelos de curvas de retención y de conductividad hidráulica no saturada, con los cuales se estiman la altura de succión en el agua intersticial y la conductividad hidráulica, respectivamente, en función del contenido de humedad en el suelo.

4.2 Modelo hidrológico de SA1

La SA1 se discretizó en celdas cuadradas de 1 km de lado (es decir, cada celda tiene un área de 100 hectáreas). Con este paso espacial se generaron alrededor de 14.000 celdas, lo que constituye una discretización espacial suficiente para resolver el flujo superficial, pero manteniendo las depresiones como escalas no resueltas. El tiempo de procesamiento computacional fue de aproximadamente 1 hora de cálculo por cada año simulado. Adicionalmente, un área de 100 hectáreas es consistente con el tamaño tipo de lotes agrícolas (es decir, áreas donde el productor agrícola decide implementar un uso del suelo homogéneo) en la región de estudio.

Se construyó un Modelo Digital del Terreno (MDT) de 90 m de paso sobre el dominio de modelación, basado en los datos de la *Shuttle Radar Topographic Mission* o SRTM (Farr et al., 2007). Estos datos fueron filtrados y sus tendencias regionales corregidas utilizando las curvas de nivel topográfico provistas por el *Instituto Geográfico Nacional (IGN)* de Argentina (Badano, 2010; INA, 2012). A cada celda se le asignó como cota topográfica (techo de la celda) el promedio de valores del MDT que caen dentro de su área, las cuales se representan en la Figura 4.2. Estas cotas por celda son las que condicionan la dirección del escurrimiento superficial en lámina. Adicionalmente, del MDT surge para cada celda un valor de volumen de almacenamiento disponible en depresiones, que constituye la ‘abstracción inicial’ en el balance hidrológico vertical. La resistencia hidráulica de la superficie del terreno al flujo de lámina se caracterizó con un coeficiente de rugosidad de Manning de $0,2 \text{ s/m}^{1/3}$ (Donigian and Davis, 1978).

Los terraplenes de las rutas y ferrocarriles principales actúan, en algunas zonas, como obstrucciones al flujo superficial en lámina. Para tener en cuenta su efecto, estas obstrucciones se representaron como barreras impermeables, y sus alcantarillas como conexiones atravesadas a la barrera, simuladas como cursos de agua cortos conteniendo esa estructura hidráulica mediante *MIKE 11* (Badano, 2010).

El principal forzante del modelo son las precipitaciones. Actualmente, un modelo hidrológico distribuido, como el presente, puede forzarse con datos distribuidos e instantáneos de precipitación obtenidos mediante satélite o radar (Maggioni and Massari, 2018; Ren et al., 2018; Mazzoleni et al., 2019). Dado que no se cuenta con este tipo de datos para el período histórico considerado en el presente trabajo, se empleó la metodología clásica de asignar arealmente registros pluviométricos de distintas estaciones terrestres mediante polígonos de Thiessen (Thompson et al., 2004). Se dispuso de series en 12 pluviómetros ubicados en las inmediaciones del área de estudio (ver Figura 4.2). Las series tomadas en estas estaciones estaban disponibles

simultáneamente solo desde 1911 hasta 2004, ya que luego gran parte de ellas fueron dadas de baja (las ventanas de tiempo con datos faltantes encontradas en varias estaciones fueron completadas mediante correlaciones con las estaciones vecinas) (UTN-FRA, 2007; Badano, 2010).

Se representaron explícitamente los cauces principales identificados en la subcuenca modelada, así como las lagunas de mayor importancia que estos atraviesan. Estos cauces concentran los excedentes hídricos de las zonas linderas, y los conducen eficientemente cuenca abajo. Su introducción en el modelo como cursos unidimensionales es necesaria dado que las secciones de los mismos son de escala demasiado pequeña para ser representadas explícitamente en la grilla del modelo hidrológico.

Dada su importancia, las conducciones representadas en el modelo fueron:

- Río Salado, desde la Laguna de Gómez hasta la Laguna del Carpincho (inmediatamente fuera del dominio de modelación hidrológica).
- Canal de vinculación entre Laguna de Mar Chiquita y Laguna de Gómez
- Cañada de las Horquetas, en dos tramos: desde Mar Chiquita a Laguna La Salada y aguas arriba de la misma hasta la laguna La Salada de Santa Eleodora
- Arroyo Salado, entre Mar Chiquita y la Laguna del Chañar
- Canal Pergaminera, que desemboca en la Laguna de Gómez
- Canal Piñeyro, que desemboca en el Arroyo Salado
- Tres cursos de agua en la provincia de Santa Fe, aguas arriba del Chañar, sin nombre conocido

También se modelaron explícitamente, mediante la especificación de una serie de secciones transversales, las lagunas La Salada, Mar Chiquita y de Gómez, cuyas áreas en condiciones medias son, respectivamente 15 km², 55 km² y 40 km². Además se modelaron implícitamente algunas otras lagunas de menor envergadura, cuyos volúmenes de almacenamiento están incorporados dentro de las secciones transversales relevadas de los cursos, por hallarse las mismas a lo largo de las trazas de estos. En la Figura 4.2 se presentan las trazas de los cursos y lagunas modelados.

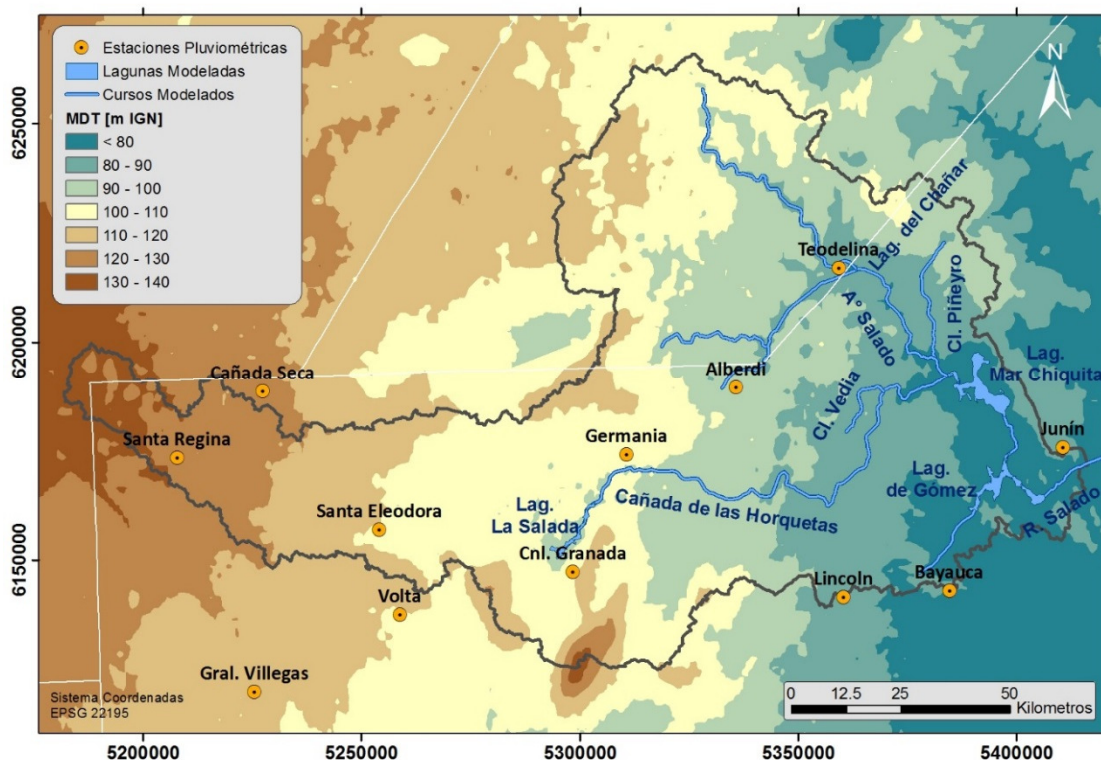


Figura 4.2. Modelo Digital del Terreno (MDT), estaciones pluviométricas utilizadas (círculos naranjas), cursos y lagunas modeladas, límite de la SA1 (línea gris oscura) y límites provinciales (líneas blancas).

Los parámetros característicos de la vegetación utilizados por el modelo para calcular la evapotranspiración real, - el índice de área foliar (LAI) y la profundidad máxima de las raíces (RD) - dependen del tipo de cultivo y de su etapa fenológica. Se obtuvieron trayectorias diarias compuestas de LAI y RD para los principales cultivos (maíz, soja, trigo y girasol), pasturas y pastizales a través de los siguientes pasos. En primer lugar, se simuló series anuales de paso diario de LAI y RD para cada cultivo utilizando el código *DSSAT*, que es un modelo agronómico que simula el crecimiento y desarrollo de cultivos y que, entre otros, genera como salidas la biomasa, el rendimiento, y los índices de área foliar y profundidad y densidad de raíces (Jones et al., 2003). El modelo *DSSAT* requiere los siguientes datos: i) características de la planta (como ser el tiempo que transcurre entre plantación y floración, salida de la primera flor o vaina, tiempo transcurrido para lograr su maduración, máxima tasa de fotosíntesis en la hoja, máxima longitud y área específica de la hoja), ii) datos del ecosistema de la planta, en particular datos del suelo y clima (los datos del suelo que se requieren son los parámetros físicos, químicos y estructurales de éste a diferentes profundidades; el clima requiere datos diarios de temperatura máxima, mínima, radiación solar y precipitación) y iii) manejo del ensayo (fecha de siembra, cantidad y tipo de fertilizante, sistemas de siembra, etc.). En estas simulaciones se consideró un único suelo representativo de la región, y se utilizaron 40 años de datos climáticos observados. Las múltiples series anuales generadas por cultivo fueron promediadas para obtener una única serie representativa de ese cultivo para cada uno de los dos parámetros. Como las series de LAI y RD para pasturas y pastizales son relativamente similares, se utilizaron las mismas series para ambos

usos del suelo (García et al., 2017). Las series de LAI y RD para cada cultivo se presentan en la Figura 4.3. Por otro lado, del Ministerio de Agroindustria de la República Argentina se obtuvieron las áreas destinadas cada año a los distintos tipos de cultivo. Estas se informan por Partido, que es una jurisdicción administrativa de segundo nivel, de modo que se determinaron los porcentajes de cultivo por unidad de área de cada Partido, asignándose este valor a las celdas incluidas dentro de él. El área con pasturas/pastizales en cada Partido se estimó como la diferencia entre el área total del Partido y el área total cultivada, lo cual es una aproximación aceptable dado el relativamente bajo grado de urbanización de la región. Las series de LAI y RD asignadas a cada celda surgieron entonces como el promedio de las correspondientes a cultivos y pasturas/pastizales, ponderado por el área ocupada por cada uno de ellos.

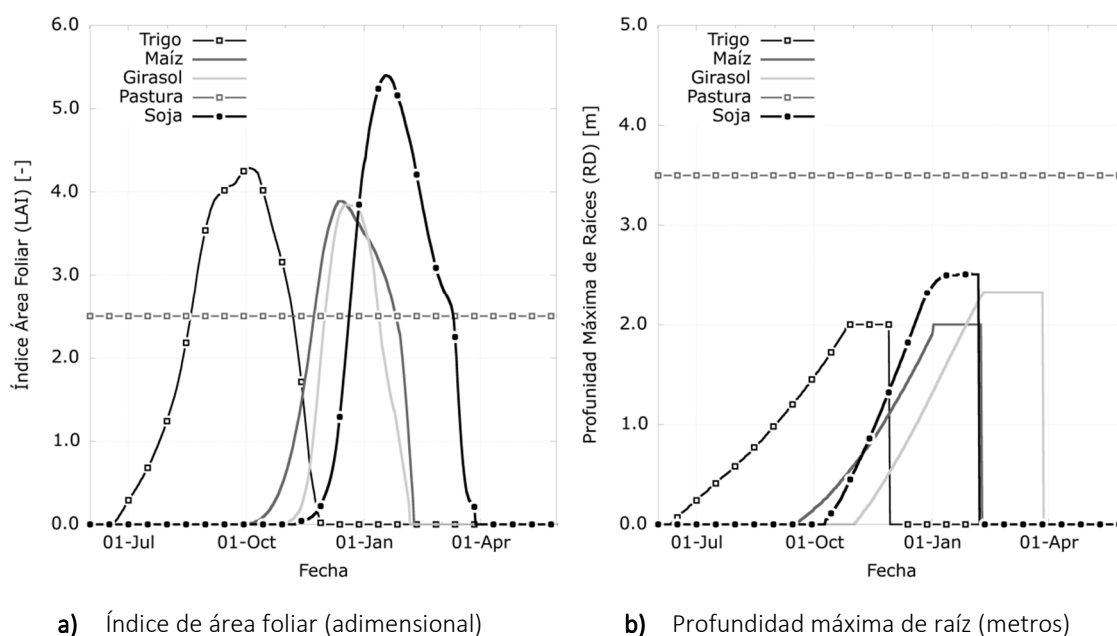


Figura 4.3. Series anuales de LAI y RD para cada tipo de cultivo.

Para resolver el flujo en la zona no saturada se discretizó verticalmente el terreno en capas de 5 cm para los primeros 40 centímetros del suelo, y luego capas de 20 cm y 1 m hasta llegar a la profundidad de 20 metros, que corresponde a niveles siempre superados por el nivel freático durante la simulación. Se consideraron dos tipos de suelo, de acuerdo a las dos formaciones geológicas superficiales predominantes: la Formación Junín en el oeste, constituida por arenas finas y limos arenosos, y la Formación Pampeana en el este, compuesta de loess. Más específicamente, la formación Junín se discontinúa a alrededor de 40 km al oeste de la ciudad homónima, a lo largo de una línea divisoria que corre en el sentido NO–SE, dejando el sedimento Pampeano al descubierto hacia el este (Halcrow and Partners, 1999; Badano, 2010). Las propiedades hidráulicas de estos suelos quedan representadas por curvas paramétricas de retención y conductividad. Entre todos los parámetros del modelo, los que caracterizan estas curvas presentan la mayor incertidumbre, además de mostrar una sensibilidad apreciable en los resultados.

La zona de flujo subterráneo saturado se representó en capas correspondientes a cada una de las principales formaciones que muestran un comportamiento activo (UTN-FRA, 2007; INA, 2012). La formación Paraná se consideró como la base impermeable. Por sobre ella se identificaron las formaciones sincrónicas Araucana y Puelche, las que luego están cubiertas totalmente por la formación Pampeana. Se entiende por formaciones geológicas sincrónicas a aquellas que se desarrollan simultáneamente (ISSC, 1976). Sobre la zona oeste de SA1 aparece por encima la formación Junín. El Modelo Digital de Elevación de los techos de cada una de estas formaciones se construyó en base a datos antecedentes; también se usaron determinaciones históricas para asignar valores a los parámetros hidráulicos característicos de cada formación (UTN-FRA, 2007; Badano, 2010).

Como condiciones de borde hidrogeológicas se impusieron valores de gradiente hidráulico estimados a partir de curvas isofreáticas, los cuales se mantuvieron constantes en el tiempo. De todos modos, los resultados fueron poco sensibles a estas condiciones de borde, dada la gran extensión del dominio y los bajos gradientes del agua subterránea (Badano, 2010).

Las simulaciones realizadas abarcaron el período 1960-2004, para el cual se contaban con todos los datos de forzantes del modelo hidrológico. A su vez, en esa ventana temporal se observó una marcada tendencia de aumento en los niveles freáticos, de los caudales y de las áreas inundadas en la llanura pampeana debido a mayores precipitaciones registradas y a los cambios en el uso del suelo.

Las condiciones iniciales del agua subterránea constituyen un condicionante significativo de la evolución temporal del sistema. A fin de generar condiciones iniciales apropiadas para el período estudiado, 1960-2004, se realizó una simulación simplificada de los 20 años previos a 1960 utilizando como forzantes los datos de precipitación y evapotranspiración potencial disponibles en algunas de las estaciones, de modo de garantizar la entrada en régimen del sistema.

4.3 Calibración y verificación del modelo

La calibración del modelo se llevó a cabo ajustando las series temporales de niveles freáticos calculados a los registros históricos disponibles para diversas estaciones, minimizando el error medio cuadrático (RMSE) como indicador global de ajuste. Como parámetros de calibración se utilizaron los correspondientes a las curvas de retención y de conductividad hidráulica de la zona no saturada (Badano, 2010). Las series temporales de aforos de caudales disponibles en los cursos superficiales fueron empleadas para realizar una verificación del modelo.

Los datos de profundidades freáticas y caudales utilizados para el proceso de calibración y verificación corresponden a los registros recopilados para la zona de estudio en el Plan Maestro Integral de la Cuenca de Río Salado (PMI) (Halcrow and Partners, 1999) y en el PDIRS (UTN-FRA, 2007; INA, 2012). Se contó con 9 estaciones con registros de profundidad freática y 8 estaciones de aforo de caudal (ver Figura 4.4). De estas últimas, sólo la correspondiente al río Salado posee muestreos relativamente sistemáticos.

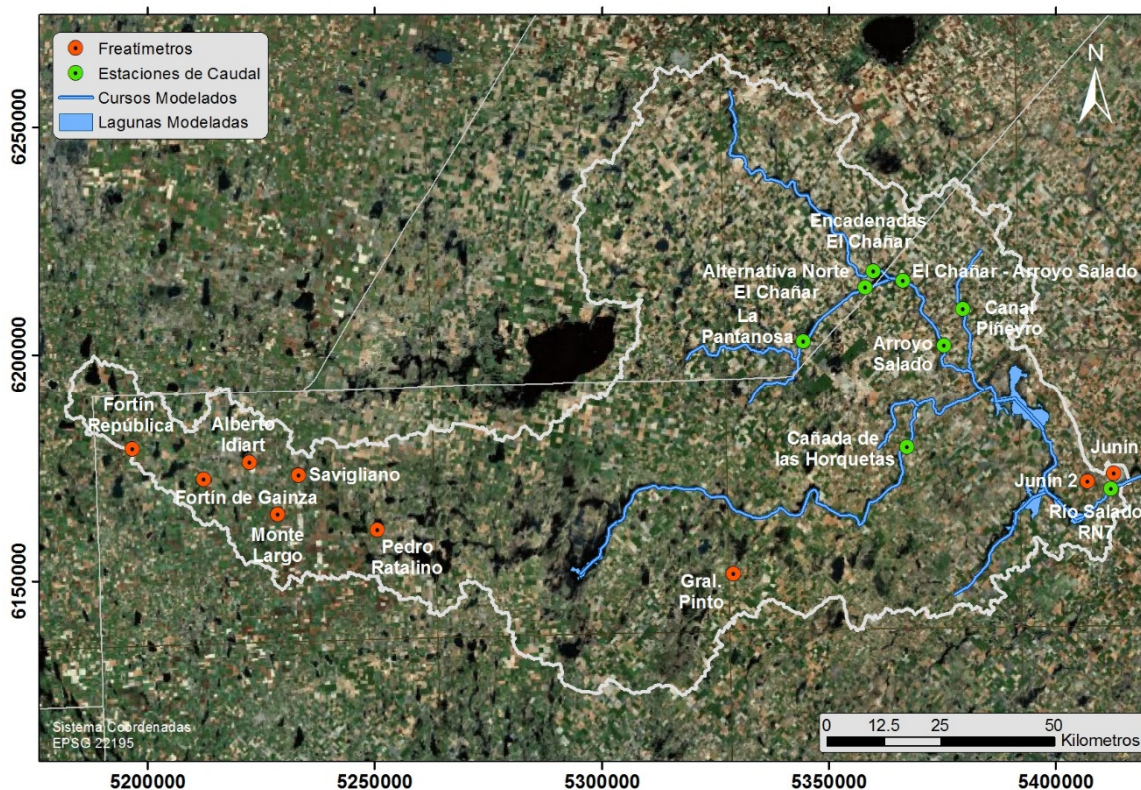


Figura 4.4. Freaímetros y estaciones de registro de caudal utilizadas respectivamente para la calibración y verificación del modelo hidrológico de la SA1.

Las curvas de retención y de conductividad hidráulica no saturada ajustadas por calibración se encuentran dentro del intervalo de un desvío estándar respecto de valores medios informados para los tipos de suelo correspondientes por Schaap and Leij (2000). Los parámetros de ambas curvas para los dos tipos de suelo considerados determinados por calibración se muestran en la

Tabla 4.1. Detalles al respecto pueden encontrarse en Badano (2010). En la Tabla 4.2 se presentan los valores obtenidos del RMSE (para cuantificar el orden de magnitud de los errores medios del modelo), del coeficiente de Nash-Sutcliffe (con el objetivo de evaluar la habilidad predictiva del modelo) (Nash and Sutcliffe, 1970) y del coeficiente de correlación de Pearson (para verificar si el modelo representa correctamente la variabilidad temporal de las series de profundidad freáticas) (Moriassi et al., 2007); también se incluyen la cantidad de registros recopilados para cada uno de los freaímetros utilizados en la calibración. Los valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe son positivos en todas las estaciones de análisis (en el rango de 0,20-0,90), indicando la relevancia de utilizar un modelo de este tipo. Los coeficientes de correlación de Pearson en su mayoría son mayores a 0,70, lo que muestra la buena representación por parte del modelo de la variabilidad temporal de los niveles freáticos. Los valores mínimos del RMSE varían para los diferentes freaímetros entre 0,20 m y 0,42 m. El valor mínimo del RMSE global obtenido fue de 0,29 m. El ajuste se consideró muy bueno dada la escala de modelación.

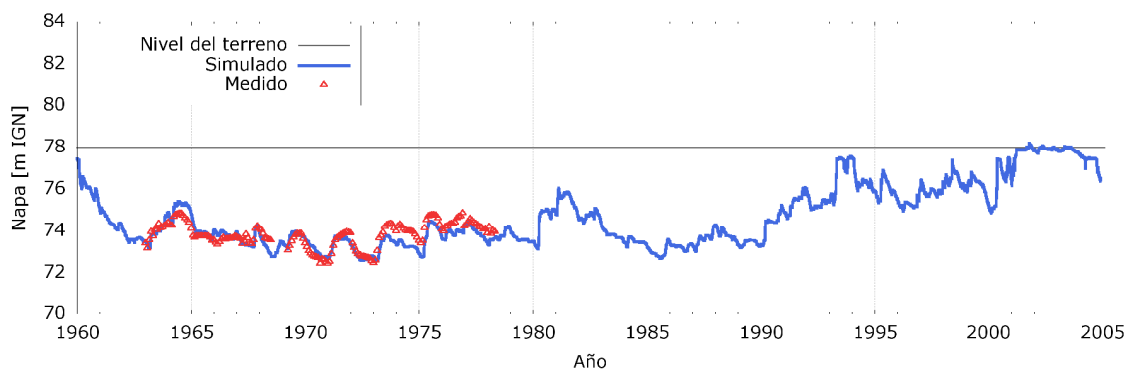
Tabla 4.1. Parámetros de las curvas de retención y de conductividad hidráulica no saturada determinados por calibración.

Suelo	Parámetro	Valor
Formación Pampeana (limo)	Humedad de saturación θ_s [-]	0,438
	Parámetro de la curva de retención α [-]	0,027
	Parámetro de la curva de retención n [-]	1,377
	Conductividad saturada K_s [cm/día]	200
Formación Junín (arenas finas y limos arenosos)	Humedad de saturación θ_s [-]	0,396
	Parámetro de la curva de retención α [-]	0,0499
	Parámetro de la curva de retención n [-]	1,754
	Conductividad saturada K_s [cm/día]	168

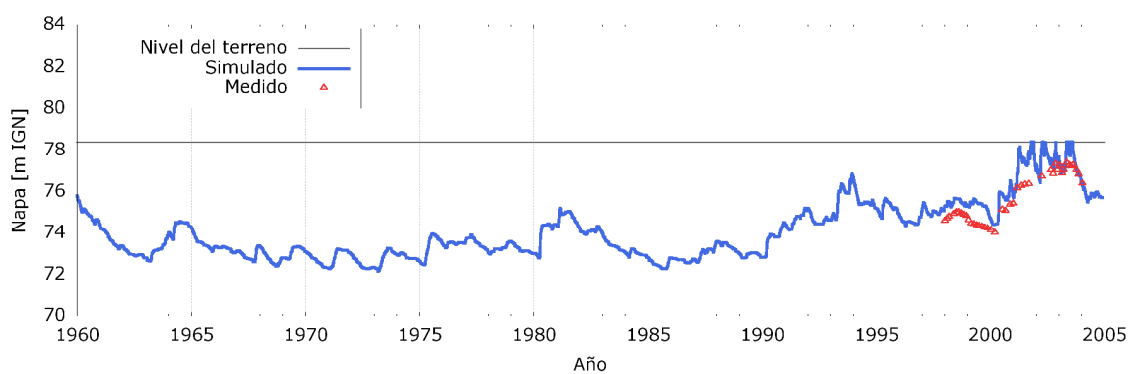
Tabla 4.2. Error cuadrático medio obtenido en cada uno de los freatómetros utilizados en la calibración del modelo hidrológico.

Freatómetro	Cantidad de Registros	RMSE	Coficiente Pearson	Coficiente Nash-Sutcliffe
Alberto Idiart	35	0,36	0,55	0,30
Savigliano	48	0,27	0,79	0,60
Monte Largo	50	0,27	0,79	0,60
Pedro Ratallino	41	0,36	0,60	0,20
Fortín de Gainza	23	0,21	0,70	0,40
Fortín República	24	0,18	0,76	0,60
Gral. Pinto	43	0,24	0,81	0,80
Junín 1	177	0,34	0,85	0,70
Junín 2	42	0,42	0,94	0,90
GLOBAL	483	0,29		

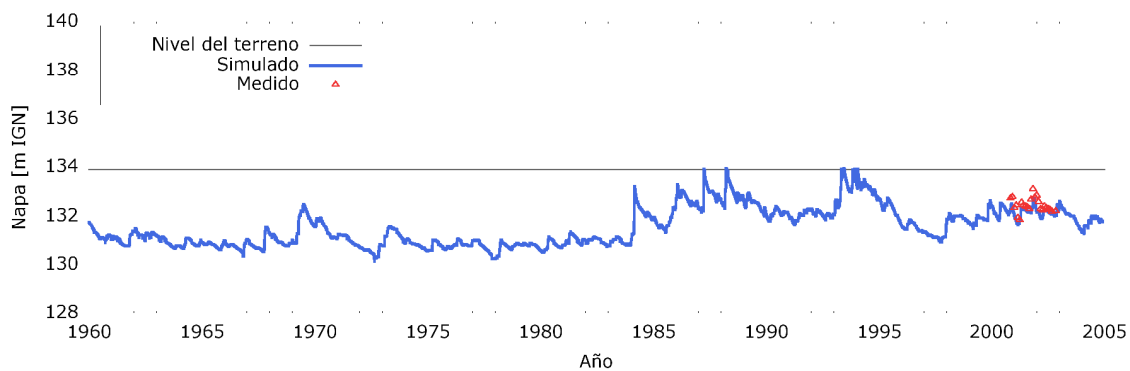
En la Figura 4.5 se presenta la serie de niveles freáticos comparados con los registros disponibles en los distintos freatómetros utilizados para calibrar. Se observa un acuerdo general satisfactorio. En particular, el modelo reproduce con relativa precisión la modulación temporal de los registros.



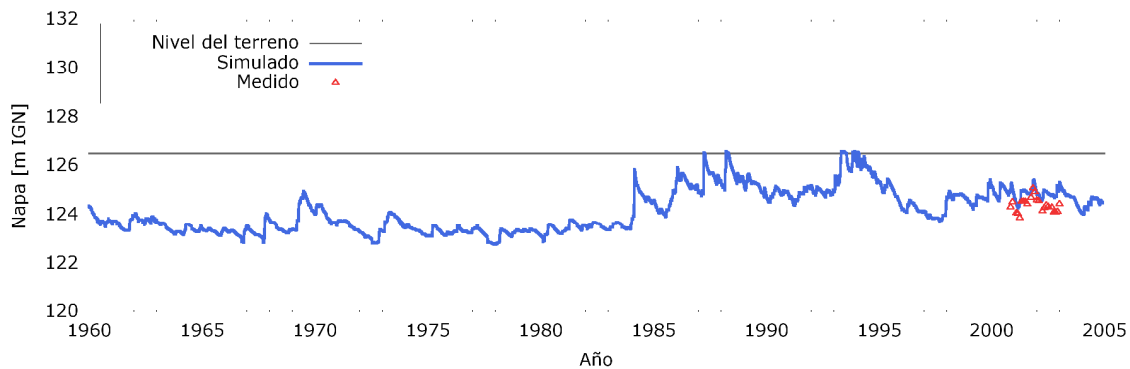
a) Junín



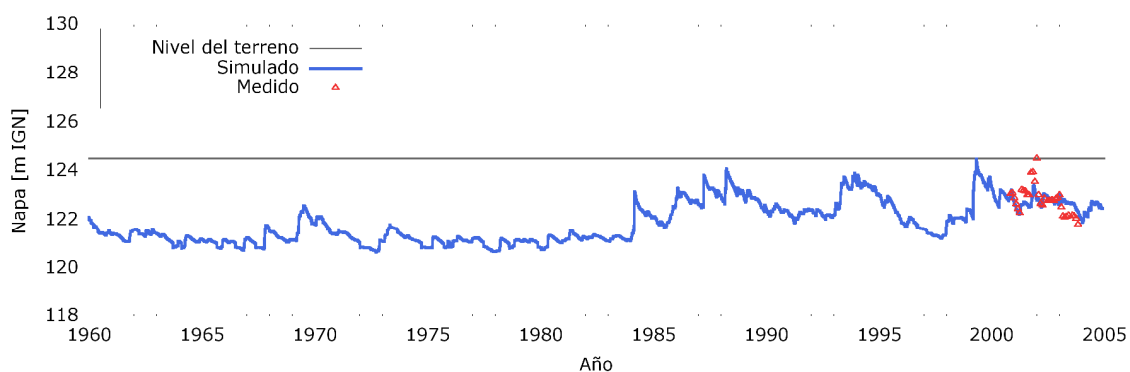
b) Junín 2



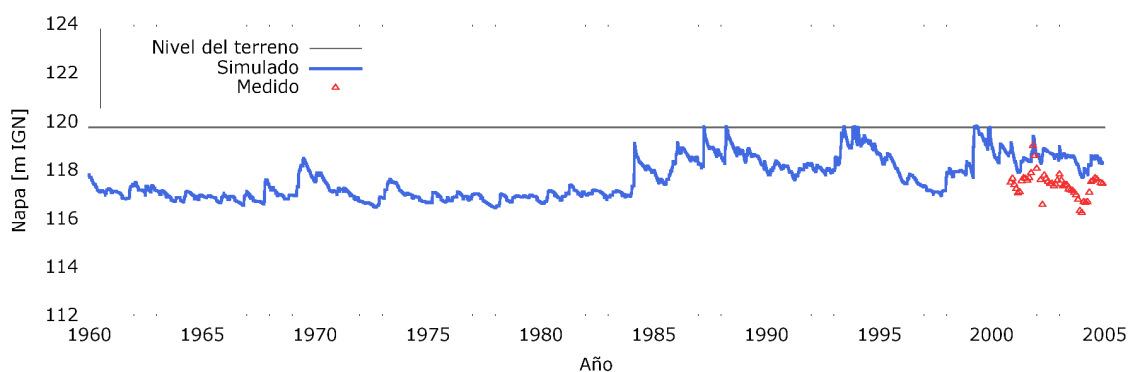
c) Fortín República



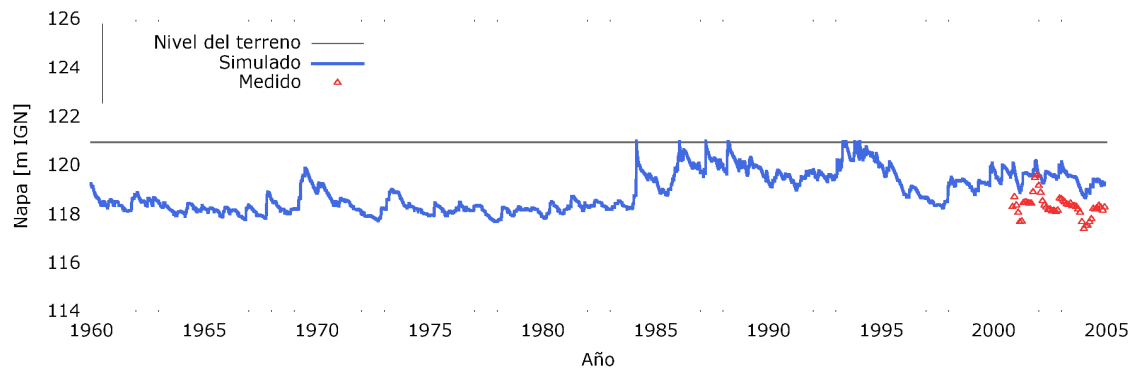
d) Fortín Gainza



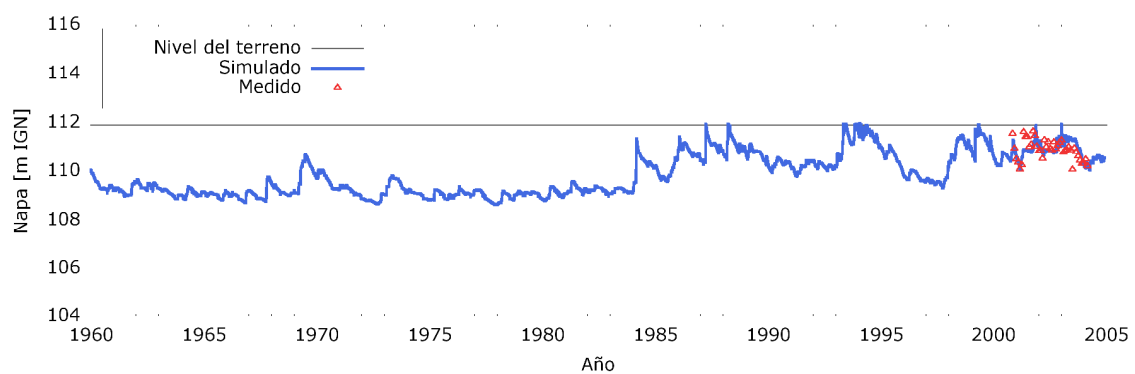
e) Alberto Idiart



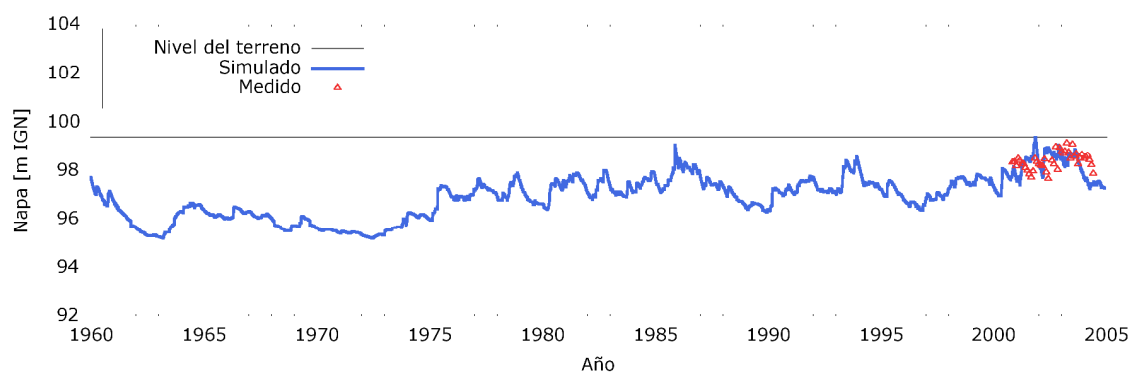
f) Savigliano



g) Monte Largo



h) Pedro Ratallino

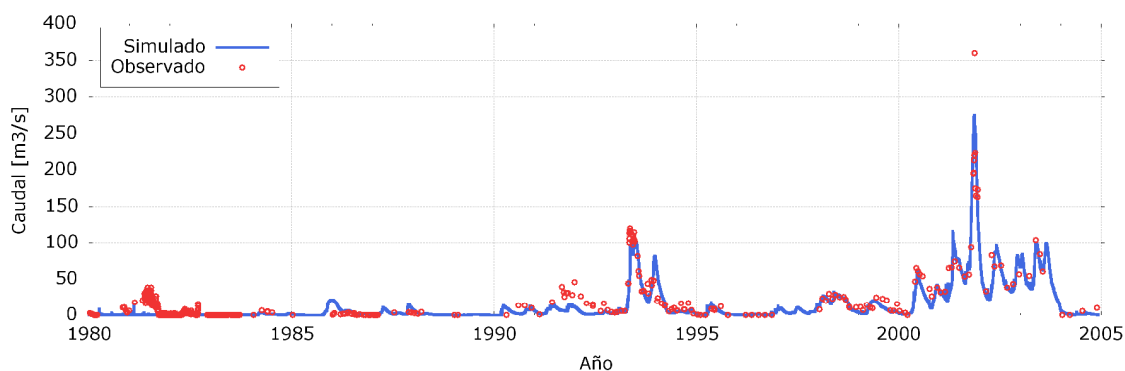


i) General Pinto

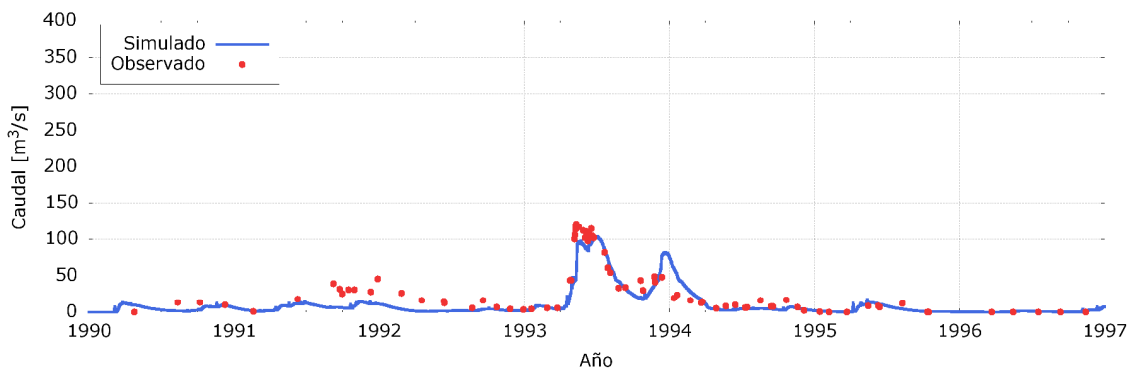
Figura 4.5. Comparación de niveles freáticos simulados (líneas azules) y registrados (triángulos rojos).

Como se mencionó anteriormente, la verificación del modelo se realizó principalmente a través de la comparación de los caudales simulados con aforos esporádicos realizados en distintas

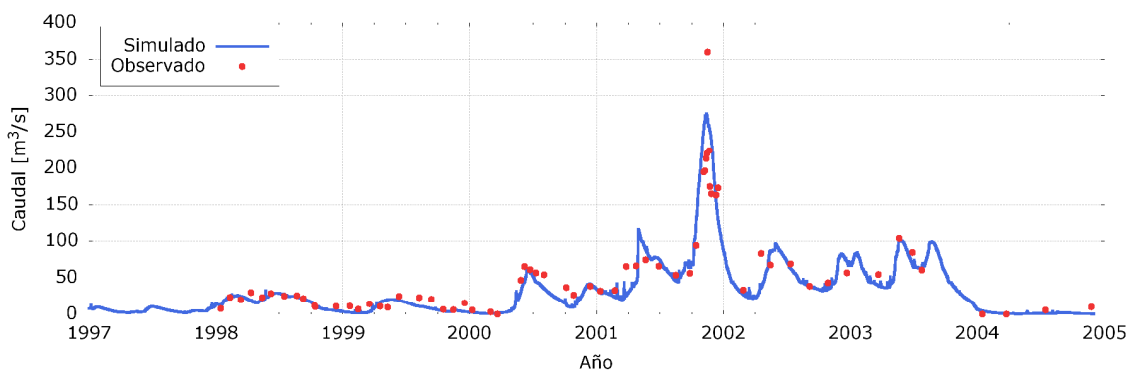
estaciones de la cuenca. La única estación que cuenta con registros relativamente numerosos es la ubicada en el río Salado en el puente de la Ruta Nacional N° 7 (que se encuentra aproximadamente a la salida de la SA1). Estos fueron la principal fuente para la verificación. En la Figura 4.6 se presentan los caudales simulados para las distintas estaciones en que se cuenta con aforos. Puede observarse un buen acuerdo para la mayor parte de los aforos. En particular es de destacarse el muy buen acuerdo en las tendencias para la estación del río Salado.



a) Río Salado y Ruta Nacional N° 7



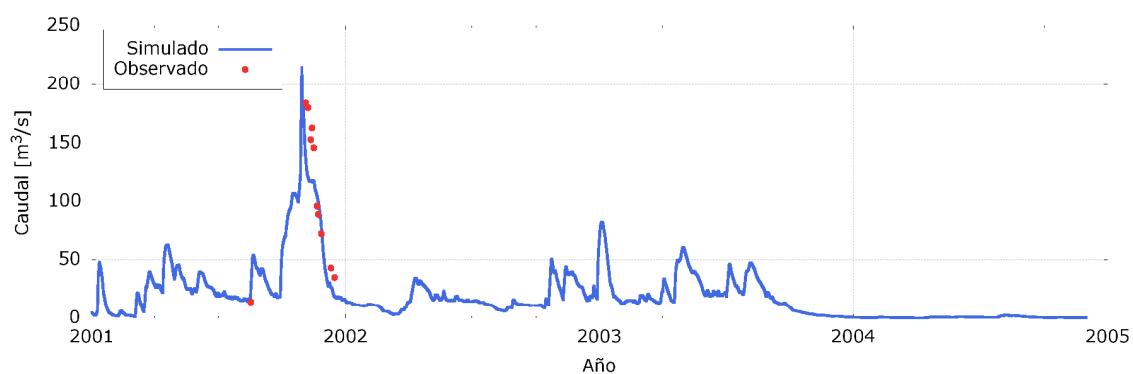
b) Río Salado y Ruta Nacional N° 7. Detalle 1990 - 1997



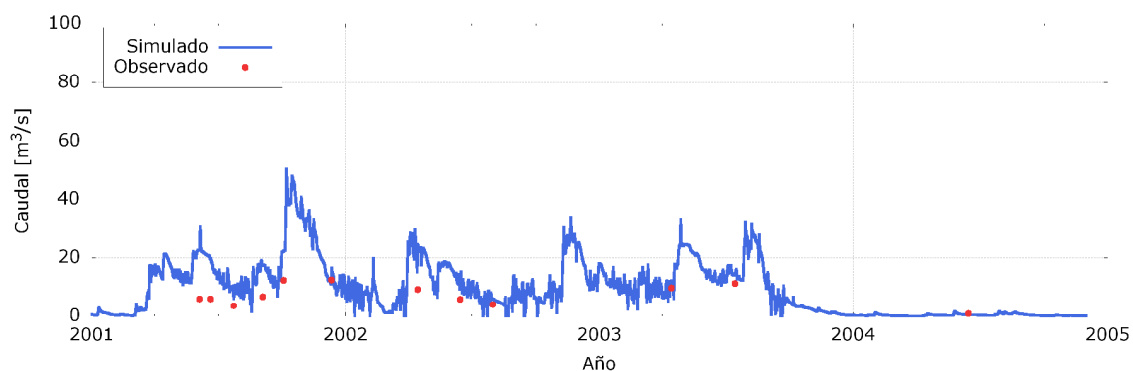
c) Río Salado y Ruta Nacional N° 7. Detalle 1997 - 2004



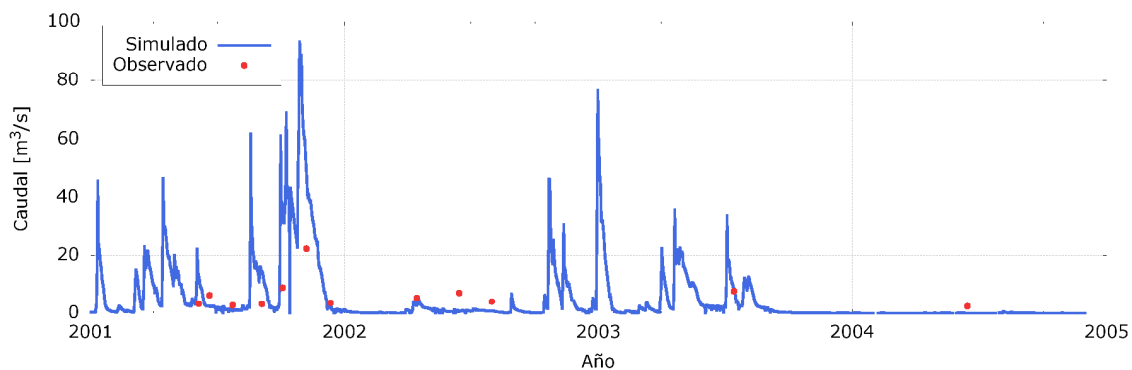
d) Cañada de las Horquetas



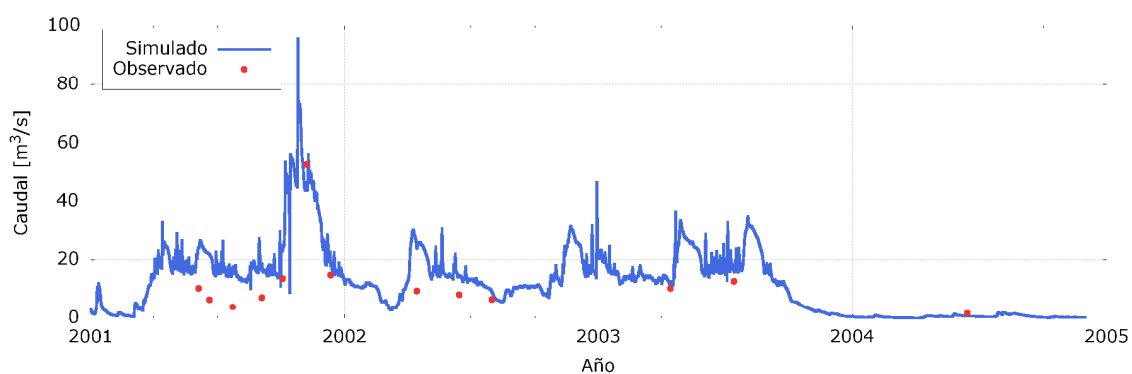
e) Arroyo Salado



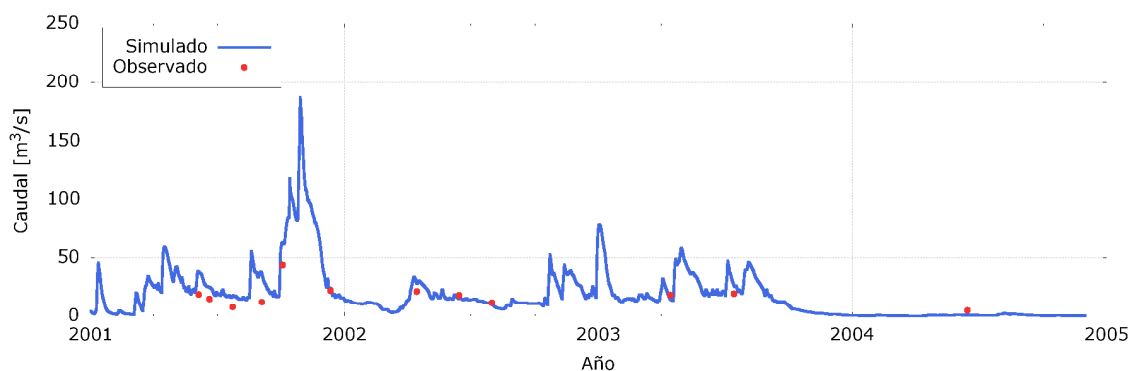
f) Laguna La Pantanosa



g) Ingreso de Lagunas Encadenadas a El Chañar



h) Ingreso de Alternativa Norte a El Chañar



i) Salida de El Chañar a Arroyo Salado

Figura 4.6. Comparación de caudales simulados (líneas azules) y registrados (círculos rojos).

4.4 Conclusiones del capítulo

Los resultados obtenidos de la modelación hidrológica superficial-subterránea integrada desarrollada en este capítulo, muestran que esta metodología resulta adecuada para abordar el estudio de grandes cuencas de llanura, donde el intercambio vertical es muy significativo en el balance de agua.

Se pudieron representar con adecuada precisión la evolución de las principales variables hidrológicas de la región de estudio, en particular la profundidad de la napa freática en 9 estaciones distribuidas en toda la región A1 y los caudales en otras 9 estaciones de aforo, ubicadas principalmente en la zona Este de la SA1.

Por último, cabe resaltar la importancia de contar con una herramienta como la modelación numérica para poder alcanzar los objetivos planteados en esta Tesis. Aplicando esta herramienta se realizará un diagnóstico y un análisis retrospectivo del comportamiento hídrico de una cuenca bajo diferentes forzantes y usos de suelo (Capítulo 5), se analizarán las implicancias espaciales y temporales en el agua subterránea de diferentes estrategias de uso de suelo (Capítulo 6), y servirá para el desarrollo de un modelo de gestión agronómica integrado, donde se acoplarán al modelo hidrológico una serie de modelos de toma de decisión que servirán para evaluar el impacto hidrológico, económico y productivo de diferentes manejos agrícolas (Capítulo 7).

Capítulo 5

Análisis de la evolución hídrica histórica.

Influencia de los cambios en el uso del suelo y las precipitaciones²

Hacía una semana que estaban allí, refugiados de la inundación, que había cubierto casi completamente el pueblo. El agua formaba una inmensa laguna y no se veían pájaros, ni siquiera cerca de la iglesia. Tras una sequía de tres meses, que obligó a llevar los ganados muy lejos, desbordó el río Largo como desde cincuenta años no se tenía noticia. A los tres días de lluvia diluviana salió del cauce y se volcó en la hondonada, donde alzábase la población. A la distancia se veían los techos y los molinos, las copas de los árboles y maderas y enseres boyantes.

“La Inundación”

Ezequiel Martínez Estrada

² Los principales resultados de este capítulo están incluidos en García, P.E., Badano, N., Menéndez, Á.N., Bert, F., García, G.A., Podesta, G., Verdin, A., Rajagopalan, B., Arora, P., 2018. Influencia de los cambios en el uso de suelo y las precipitaciones sobre la dinámica hídrica de una cuenca de llanura extensa. Caso de estudio: Cuenca del Río Salado, Buenos Aires, Argentina. Revista Iberoamericana del Agua 5(2) 15. <https://doi.org/10.1080/23863781.2018.1495990>

Una vez implementado el modelo hidrológico de la SA1, y antes de analizar la viabilidad y efectividad del manejo de la napa freática mediante diferentes estrategias de uso del suelo y las implicancias que traen consigo las mismas, es importante entender la dinámica hídrica observada y cuantificar el impacto diferencial del uso del suelo y de las precipitaciones en el comportamiento hidrológico de la zona de estudio.

Como se indicó en el primer capítulo, en la región pampeana de la República Argentina se produjeron, en la última mitad del siglo XX, dos procesos que impactaron fuertemente en el nivel de los niveles freáticos y, como consecuencia, en la frecuencia de inundaciones. El primer proceso, de origen climatológico, está relacionado con la variabilidad y los cambios climáticos registrados en esta región, que se ha caracterizado por una tendencia de aumento de las precipitaciones anuales (Castañeda and Barros, 1994; Berbery et al., 2006; Seager et al., 2010; Barros et al., 2014). El segundo proceso, de origen directamente antrópico, está asociado a una fuerte tendencia hacia la agriculturización en desmedro de la superficie destinada a la actividad ganadera, que se ha traducido en un cambio de uso del suelo, incrementándose áreas con cultivos anuales y disminuyendo las zonas con pasturas y pastizales naturales (Viglizzo et al., 2009).

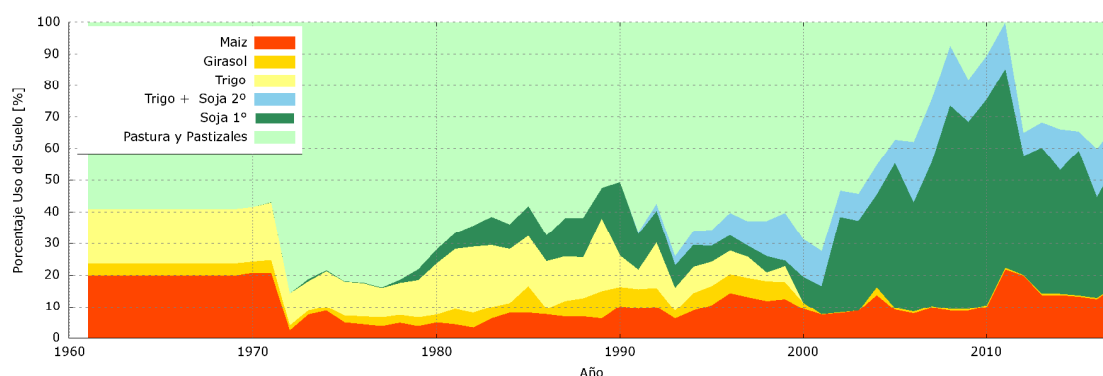
Existen trabajos precedentes que, a partir del análisis de observaciones históricas y modelación hidrológica, establecieron que la combinación de los aumentos de precipitación y los cambios en el uso de la tierra desde la década de 1970 han inducido un aumento progresivo en el nivel de napa, incrementando en consecuencia los riesgos de inundación. Estos estudios antecedentes, de gran relevancia para la comprensión de esta problemática en la llanura pampeana, fueron realizados mediante el análisis de sensores remotos (Contreras et al., 2011), utilizando modelos semidistribuidos como el *SWAT* (Feler et al., 2014; Havrylenko et al., 2016; Guevara Ochoa et al., 2019) o un modelo unidimensional como el *DRAINMOD* (Vazquez Amabile et al., 2017). Las novedades que presenta esta tesis, respecto a los trabajos recién mencionados, son: (i) analizar los efectos diferenciales del aumento de precipitación y del cambio en el uso del suelo, (ii) utilizar un modelo hidrológico totalmente distribuido y (iii) tomar como zona de estudio una región significativamente mayor.

En el presente capítulo se busca cuantificar las influencias del cambio del uso del suelo y de las tendencias de cambio de las precipitaciones sobre la dinámica hídrica (evolución de los niveles freáticos, caudales y áreas inundadas) para la SA1 durante las últimas décadas del siglo XX, delimitándose así esos efectos. En particular, el período de estudio es el comprendido entre 1960 y 2004, el cual se considera suficiente para entender los procesos observados y cuantificar el impacto de las distintas variables intervinientes, puesto que en el mismo se observa una tendencia de crecimiento significativa y consistente del nivel de napa y de los caudales en los

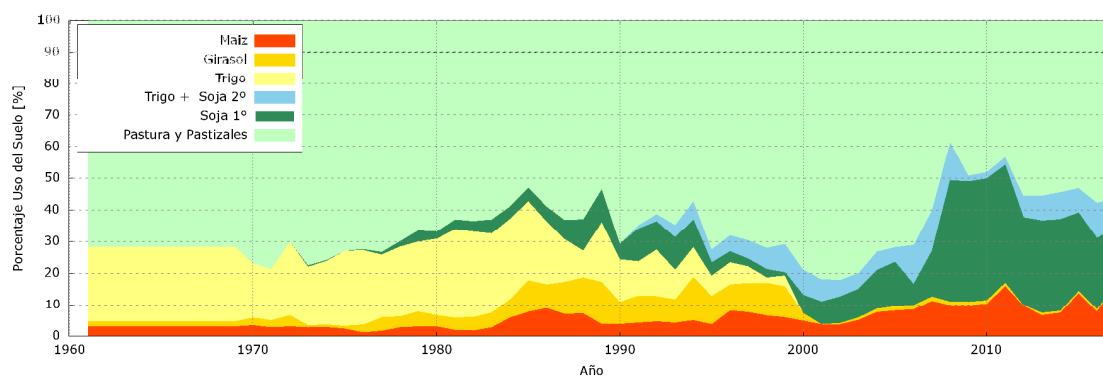
diferentes cursos de agua de la SA1, como así también importantes variaciones en el uso del suelo y las precipitaciones anuales.

5.1 Evolución del uso del suelo

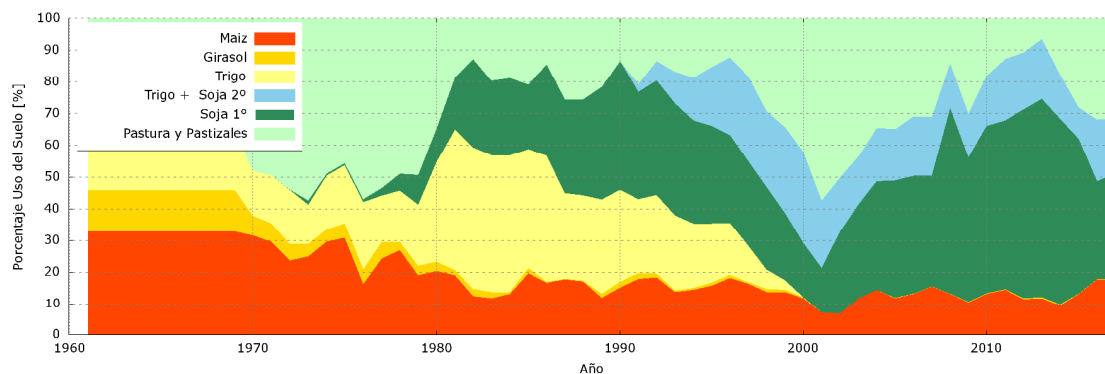
La llanura pampeana registró un fuerte aumento del área destinada a cultivos agrícolas anuales en detrimento de áreas destinadas a ganadería (Manuel-Navarrete et al., 2009; Viglizzo et al., 2011). En la Figura 5.1 se puede ver la evolución de los porcentajes de los cultivos más importantes (maíz, trigo, girasol y soja) para el período 1960-2017 para cada uno de los partidos que pertenecen a la SA1. El porcentaje del área con cultivos anuales en toda la SA1 se incrementó desde 28% en 1960 a 40% en la campaña 2004, alcanzando en la actualidad aproximadamente el 60% (Figura 2.10) (Agroindustria, 2018). Los partidos que mayor crecimiento de superficie agrícola presentaron en el período 1960-2017 son: General Villegas (incremento del 36% de la superficie cultivada), Presidente Roque Sáenz Peña (aumento del 33%), Leandro N. Alem (27%) y Lincoln y General Viamonte (con el 26%). En términos absolutos, el departamento de General López (con 900 km²) y el partido de General Villegas (con 840 km²) son los que mayor área agrícola incorporaron a la SA1.



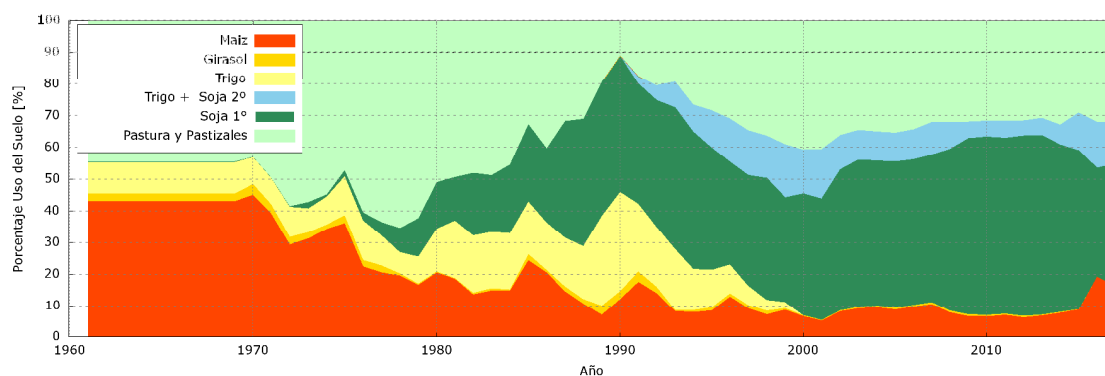
a) Partido de Leandro N. Alem (Provincia Buenos Aires).



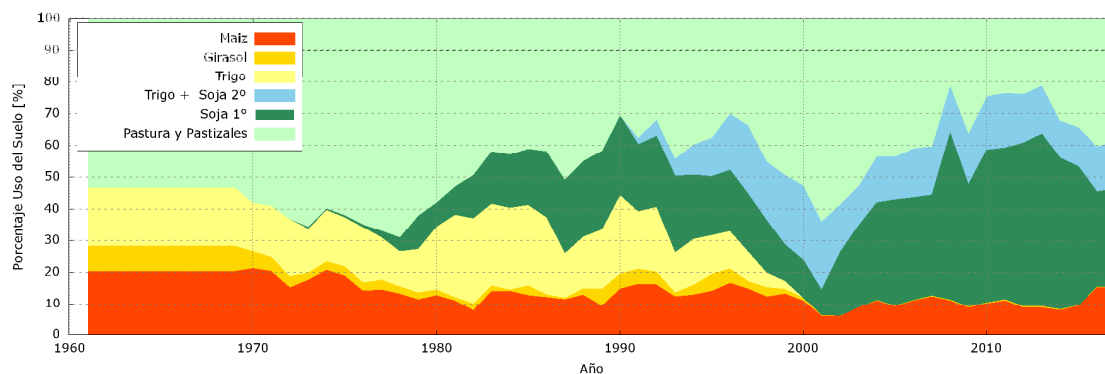
b) Partido de Florencio Ameghino (Provincia Buenos Aires).



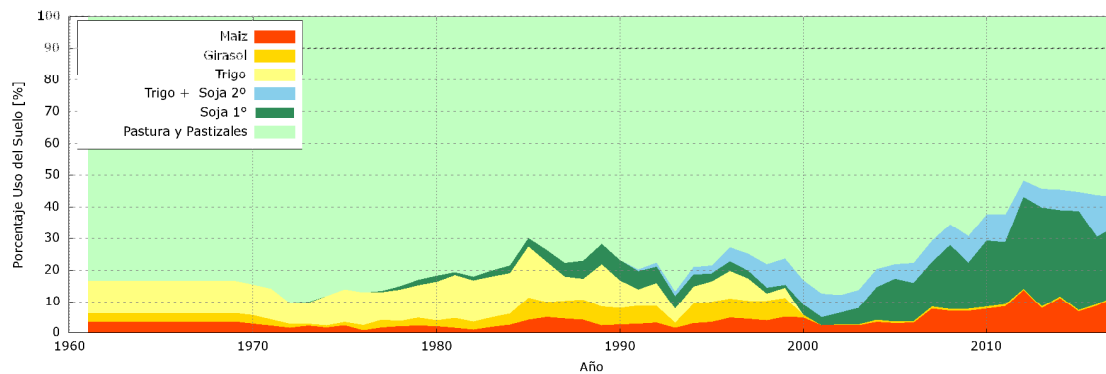
c) Partido de General Arenales (Provincia Buenos Aires).



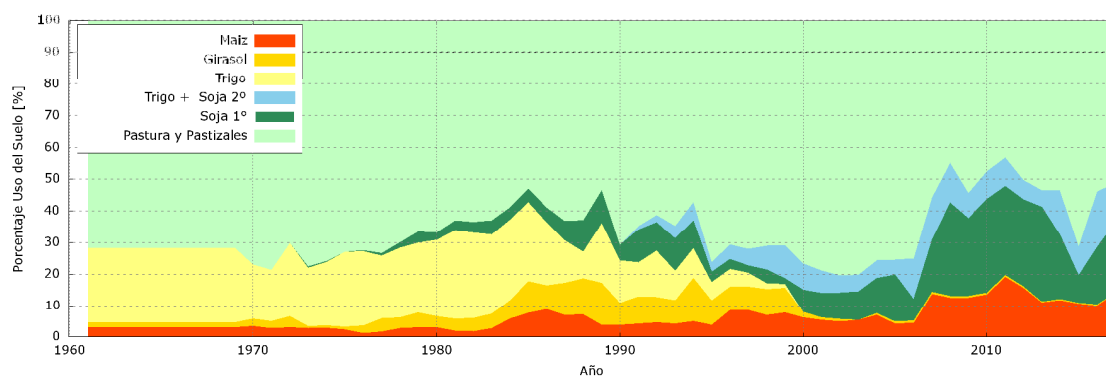
d) Partido de Colón (Provincia Buenos Aires).



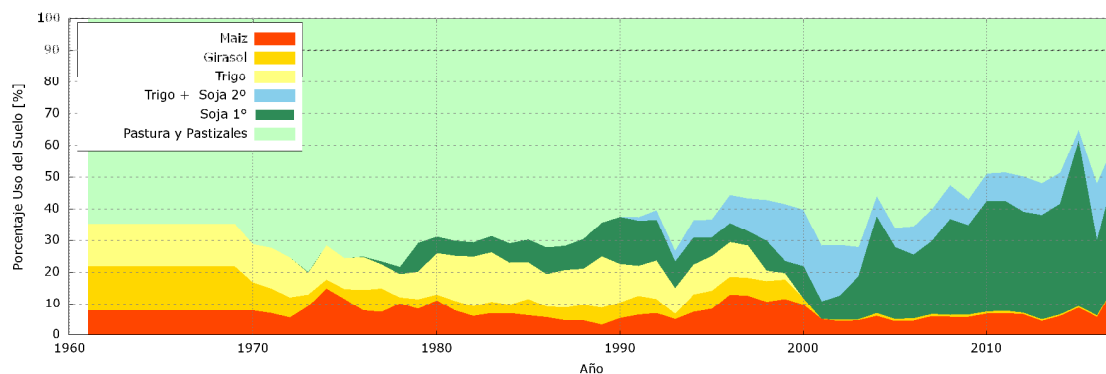
e) Partido de Junín (Provincia Buenos Aires).



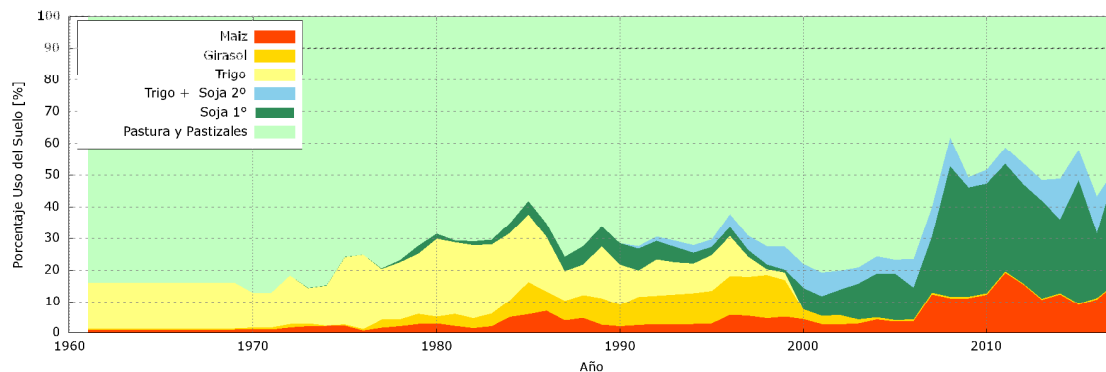
f) Partido de Lincoln (Provincia Buenos Aires).



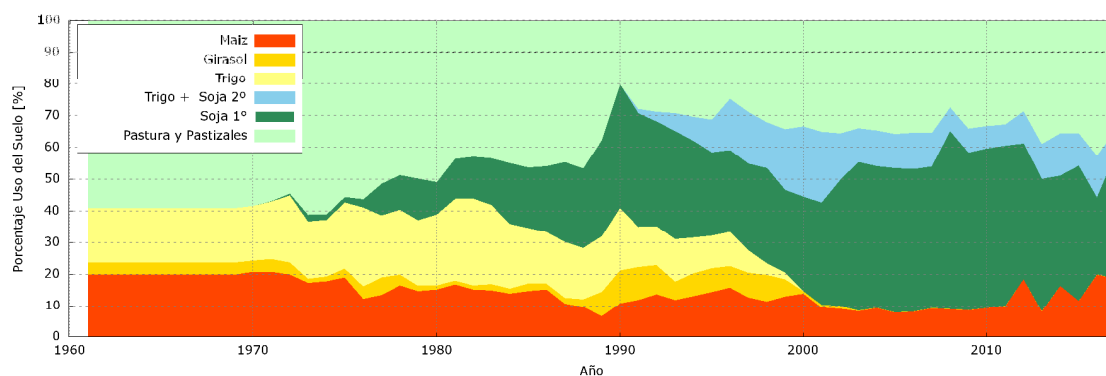
g) Partido de General Pinto (Provincia Buenos Aires).



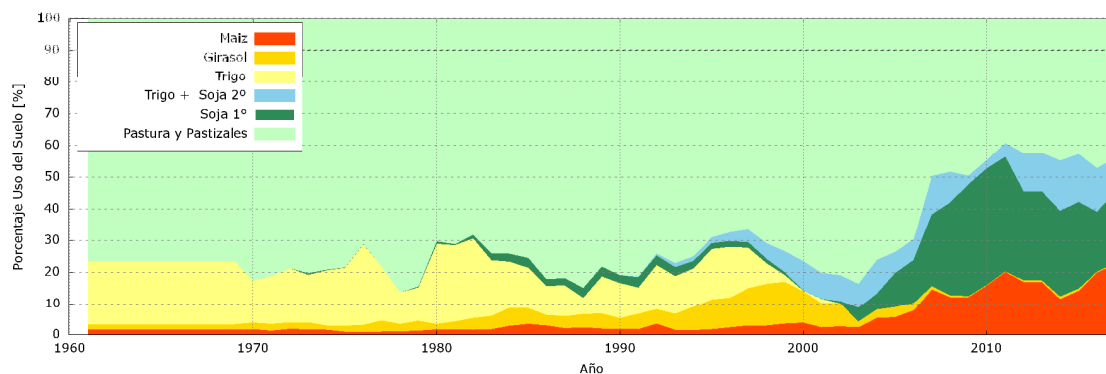
h) Partido de General Viamonte (Provincia Buenos Aires).



i) Partido de General Villegas (Provincia Buenos Aires).



j) Departamento de General López (Provincia Santa Fe).



k) Departamento Presidente Roque Sáenz Peña (Provincia Córdoba).

Figura 5.1. Evolución histórica del uso del suelo para toda la SA1 y para los diferentes partidos y departamentos de la SA1.

5.2 Análisis de las precipitaciones

Tal como se indicó en el capítulo anterior, se dispuso de series de precipitaciones diarias en 12 pluviómetros ubicados en las inmediaciones del área de estudio (Figura 2.12), las que fueron recopiladas en estudios previos (Halcrow and Partners, 1999; UTN-FRA, 2007; García et al., 2017). Las series de estas estaciones están disponibles simultáneamente desde 1911 hasta 2004, ya que luego gran parte de ellas fueron dadas de baja (actualmente solo se encuentran operativas las estaciones Junín, Lincoln y General Villegas).

Las tendencias positivas en las precipitaciones para el período 1960-2004 se observa en los registros de todos los pluviómetros, variando las mismas de +3,7 mm/año (Estación General Villegas) a 11,5 mm/año (Estación Alberdi), tal como se muestra en la Figura 5.2.

La Figura 5.3 muestra, para las 12 estaciones, las anomalías respecto de la respectiva precipitación media anual histórica (período 1911-2004) para distintos períodos (1960-1969, 1970-1979, 1980-1989, 1990-1999, 2000-2004). Se observa que, si se toma como referencia la precipitación media anual histórica (período 1911-2004): i) la década de 1960 fue un período muy seco, con déficits de entre 50 y 200 mm; ii) la década de 1970 también fue seca, presentando déficits en 9 de las 12 estaciones analizadas; y iii) las décadas de 1980 y 1990, junto con el período 2000-2004, fueron húmedas para casi la totalidad de las estaciones.

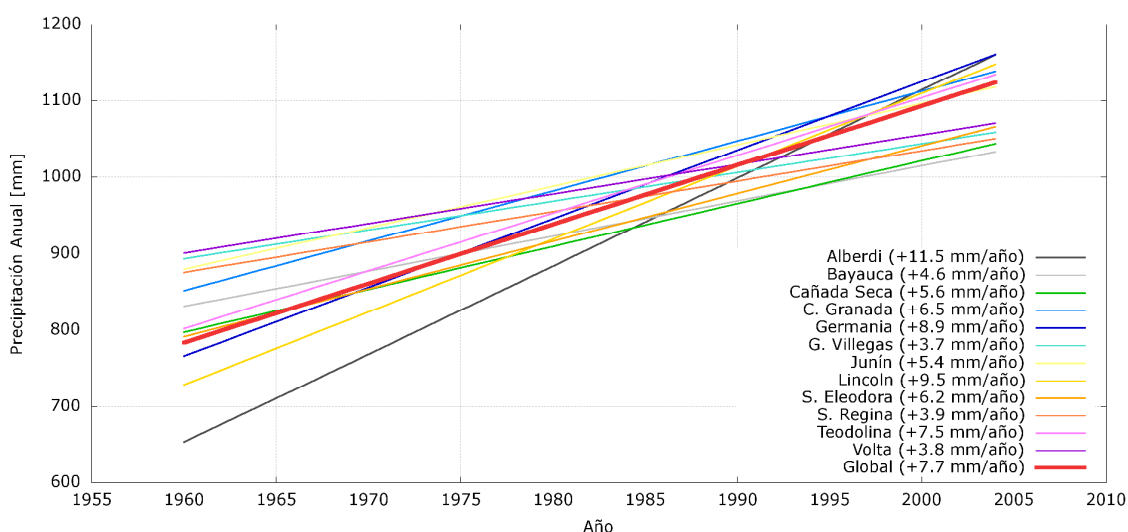


Figura 5.2. Tendencias de las precipitaciones observadas en las distintas estaciones pluviométricas en el período 1960-2004.

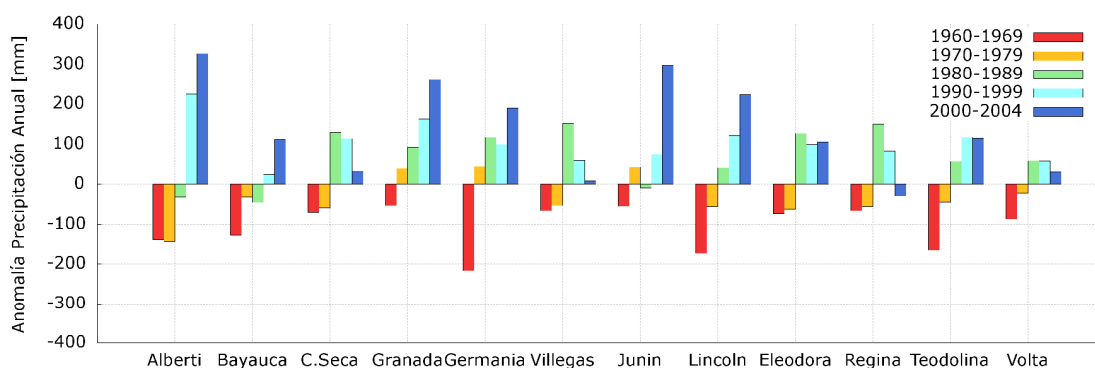


Figura 5.3. Anomalías de las precipitaciones para las distintas estaciones pluviométricas utilizadas.

5.3 Ensayos

Se realizaron diversos ensayos numéricos con el modelo presentado en el Capítulo 4 para simular la respuesta de los niveles freáticos, caudales y áreas inundadas a diversos usos de la tierra y escenarios climáticos. El conjunto de ensayos realizados tuvo como objetivos: (a) comprender la influencia diferenciada del uso del suelo y el clima en la dinámica de las napas observada en la última mitad del Siglo XX (período 1960-2004) y (b) encontrar relaciones entre los niveles de napa, los caudales y las áreas inundadas..

Para analizar el efecto del uso del suelo y del clima se definieron tres escenarios: i) Escenario A: uso del suelo histórico (es decir el registrado en el período 1960-2004) + clima histórico (clima observado en el período 1960 – 2004); ii) Escenario B: El uso del suelo es constante en toda la simulación y se corresponde al registrado en el año 1960 + clima histórico; y iii) Escenario C: uso del suelo histórico + clima histórico, pero con las precipitaciones sin la tendencia positiva registrada en el período 1960-2004 (ver sección 5.2). El escenario B apunta a identificar los efectos producidos sólo por la tendencia en las precipitaciones, mientras que el escenario C tiene como objetivo analizar el efecto del cambio del uso del suelo.

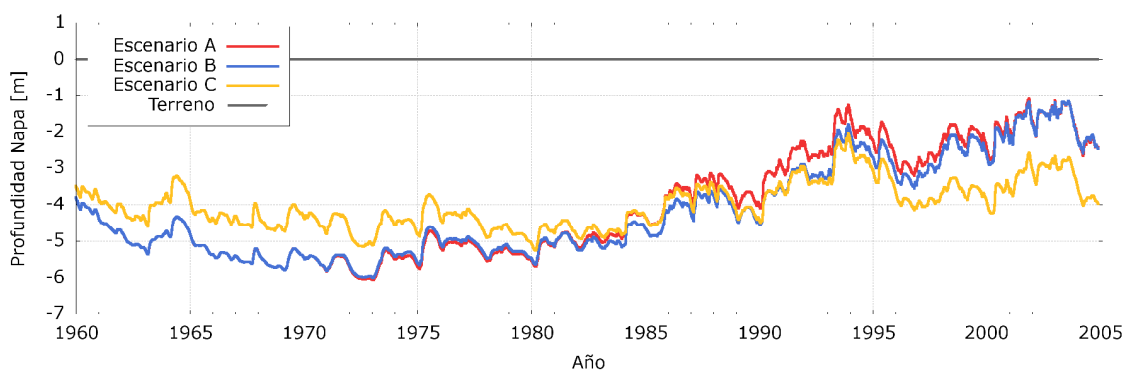
Para el escenario C, a las series históricas de cada estación pluviométrica se les sustrajo su componente de tendencia (presentadas en la Figura 5.2), convirtiéndolas en estacionarias en torno al valor medio histórico del período 1950-1960. Por consiguiente, resultan mayores precipitaciones a las registradas durante el periodo 1960-1980 y menores en el período 1980-2004.

5.4 Dinámica de niveles freáticos y caudales

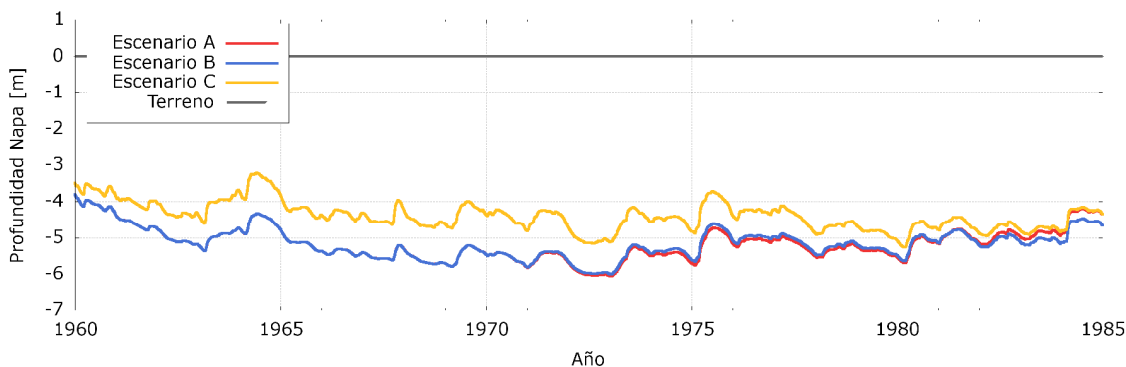
La Figura 5.4 muestra la evolución temporal del nivel promedio sobre todo SA1 de la napa freática en el período 1960-2004 para los tres escenarios planteados. En los resultados del escenario A (escenario base) se distinguen claramente dos tendencias en el período considerado: entre 1960-1980 hay una profundización del nivel freático del orden de los 2 metros, mientras que en el período 1980-2004 se produce una fuerte tendencia de aumento del nivel de napa, elevándose alrededor de 4 metros.

El escenario B muestra un comportamiento similar al escenario A hasta aproximadamente 1980. Esto se explica porque, si bien en ese período hubo un aumento en el área con cultivos anuales de la SA1 para el escenario A, la napa estaba tan baja que el efecto de los cultivos sobre el balance vertical de agua no fue significativo. A partir de 1980 el escenario B muestra una disminución del nivel de la napa respecto al escenario A, llegando a 1990 con una diferencia promedio de 1 metro. Esta diferencia es el efecto de la agriculturización. Desde 1990 hasta el final del período simulado esas diferencias van disminuyendo, hasta casi desaparecer en los últimos años. Este nuevo cambio en la dinámica de las napas obedece a dos razones: i) la introducción del doble cultivo, tal como se explicó en la sección 5.1, que ha generado un aumento de la evapotranspiración total anual y ii) que la presencia de napas freáticas tan cerca de la superficie hace que se minimicen las diferencias de evapotranspiración total anual entre los cultivos y las pasturas (García et al., 2017).

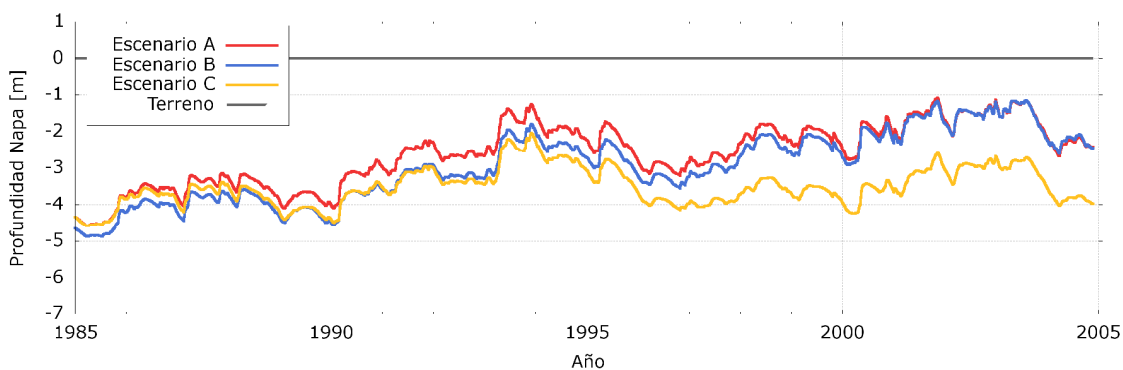
Para el escenario C se observa que los niveles de napa son menos profundos respecto a los escenarios A y B hasta el final de la década de 1980, debido a que las precipitaciones son mayores que las históricas. Por el contrario, desde el final de la década de 1980 hasta el 2004 el escenario C muestra niveles freáticos marcadamente menores al de los escenarios A y B, con profundidades hasta 3 metros mayores, como efecto de precipitaciones menos intensas que las históricas. En términos generales, para el escenario C se observa una mayor estabilidad del nivel de napa, poniendo en evidencia, por contraste con los otros dos escenarios, el efecto de la tendencia positiva de la precipitación.



a) Profundidad media espacial de la napa freática para todo el período simulado (1960 - 2004)



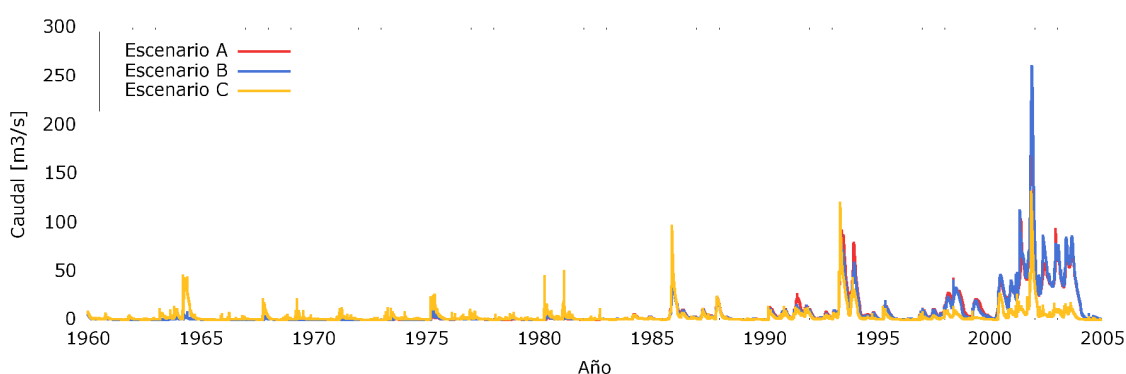
b) Profundidad media espacial de la napa freática – Detalle 1960 - 1985



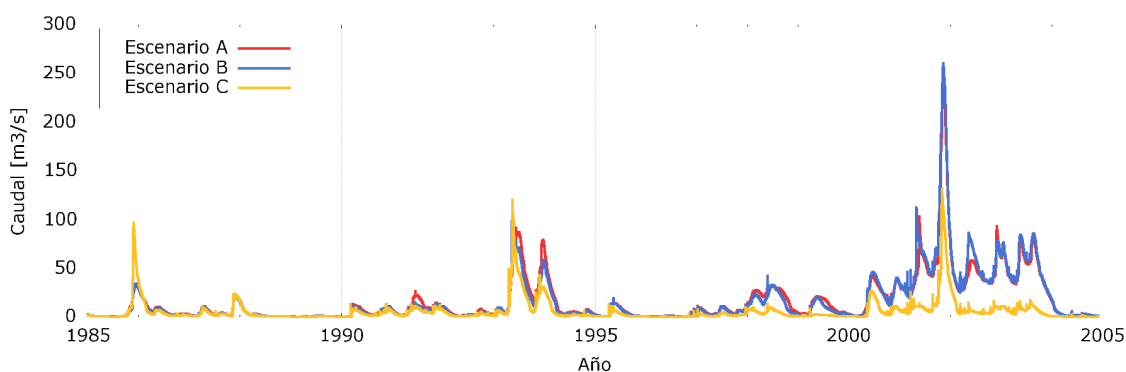
c) Profundidad media espacial de la napa freática – Detalle 1985 - 2004

Figura 5.4. Profundidad media espacial de la napa freática para los escenarios de ensayo: Escenario A (línea roja), Escenario B (línea azul) y Escenario C (línea amarilla).

En la Figura 5.5 se presentan las series de caudales diarios a la salida de SA1 para los tres escenarios planteados. Se observa que hasta 1990 los escenarios A y B muestran caudales similares, mientras que el escenario C genera caudales mayores por el efecto de las mayores precipitaciones. Desde 1990 la tendencia se revierte, siendo menores los caudales para el escenario C debido a las menores precipitaciones. Los caudales para los escenarios A y B permanecen relativamente similares entre sí, excepto durante la década de 1990, en que el escenario B muestra valores algo menores a los del escenario A por efecto de la agriculturización. Los resultados indican que la sensibilidad del caudal a la tendencia de precipitación es mucho mayor que a la de cambio de uso del suelo.



a) Caudales en el río Salado (Ruta Nacional N° 7) para todo el período simulado (1960 – 2004).



b) Caudales en el río Salado - Ruta Nacional N° 7. Detalle 1985 – 2004.

Figura 5.5. Evolución del caudal para los escenarios de ensayo: Escenario A (línea roja), Escenario B (línea azul) y Escenario C (línea amarilla).

5.5 Evolución de áreas inundadas

El impacto de cambios en el uso del suelo y en las tendencias de precipitaciones también se puede evaluar con la estimación de las áreas inundadas. Este resultado es de suma utilidad para poder cuantificar las consecuencias productivas y sociales que traen aparejados estos dos fenómenos observados en la zona pampeana.

Los mapas de inundación instantáneos se construyeron utilizando la técnica conocida como llenado/derrame (Teng et al., 2017) utilizando el volumen de agua que sale de las celdas del modelo (de 1 km de lado) y derramándolo en el MDT (con celdas de 90 m de lado) . Dado que este procedimiento requiere un tiempo de procesamiento relativamente alto, se desarrolló una aplicación que calcula, para cada celda del modelo, la superficie inundada y su disposición para distintos niveles de agua, generándose así una tabla que luego es consultada en función del nivel instantáneo calculado con el modelo (Badano, 2010). Los detalles del algoritmo y las hipótesis asumidas se detallan en Badano (2010).

A fin de validar esta metodología, se confeccionaron mapas de inundación correspondientes a algunos instantes históricos para los que se cuenta con imágenes satelitales que permiten visualizar el estado de inundación en la SA1. Las zonas inundadas pueden ser determinadas con relativa sencillez a partir de imágenes satelitales gracias al relativamente fuerte contraste existente entre el agua y el resto del paisaje en el espectro electromagnético (Jensen et al., 1986). Se seleccionó una serie de imágenes LANDSAT³ correspondientes al período analizado que muestran diferentes condiciones hídricas de la zona de estudio. A título ilustrativo, en la Figura 5.6 se presenta, para la fecha del 24/05/2003, el mapa de inundación provisto por el modelo, y se lo compara con la imagen satelital correspondiente. El acuerdo cualitativo se considera satisfactorio, teniendo en cuenta la complejidad del problema abordado.

También se llevó a cabo una comparación cuantitativa entre las superficies de las áreas inundadas provenientes del cálculo con el modelo y de las estimadas a partir de imágenes satelitales (para esto último se procesaron las bandas 3,4 y 5 del Thematic Mapper (TM) del satélite Landsat 5). Dado que las imágenes satelitales no cubren la totalidad del dominio, la comparación se realizó en cada caso sobre el área de la respectiva imagen, excepto para las fechas 20/03/1988 y 24/4/2001, en las cuales se pudo armar un mosaico con las imágenes disponibles que cubre toda la SA1. Los resultados obtenidos para las diferentes imágenes y para el mosaico se muestran en la Figura 5.7. Las máximas diferencias entre las áreas inundadas modeladas y las obtenidas a partir de imágenes están en el orden del 4%, por lo que el acuerdo cuantitativo se considera satisfactorio.

³ <http://landsatlook.usgs.gov/viewer.html>

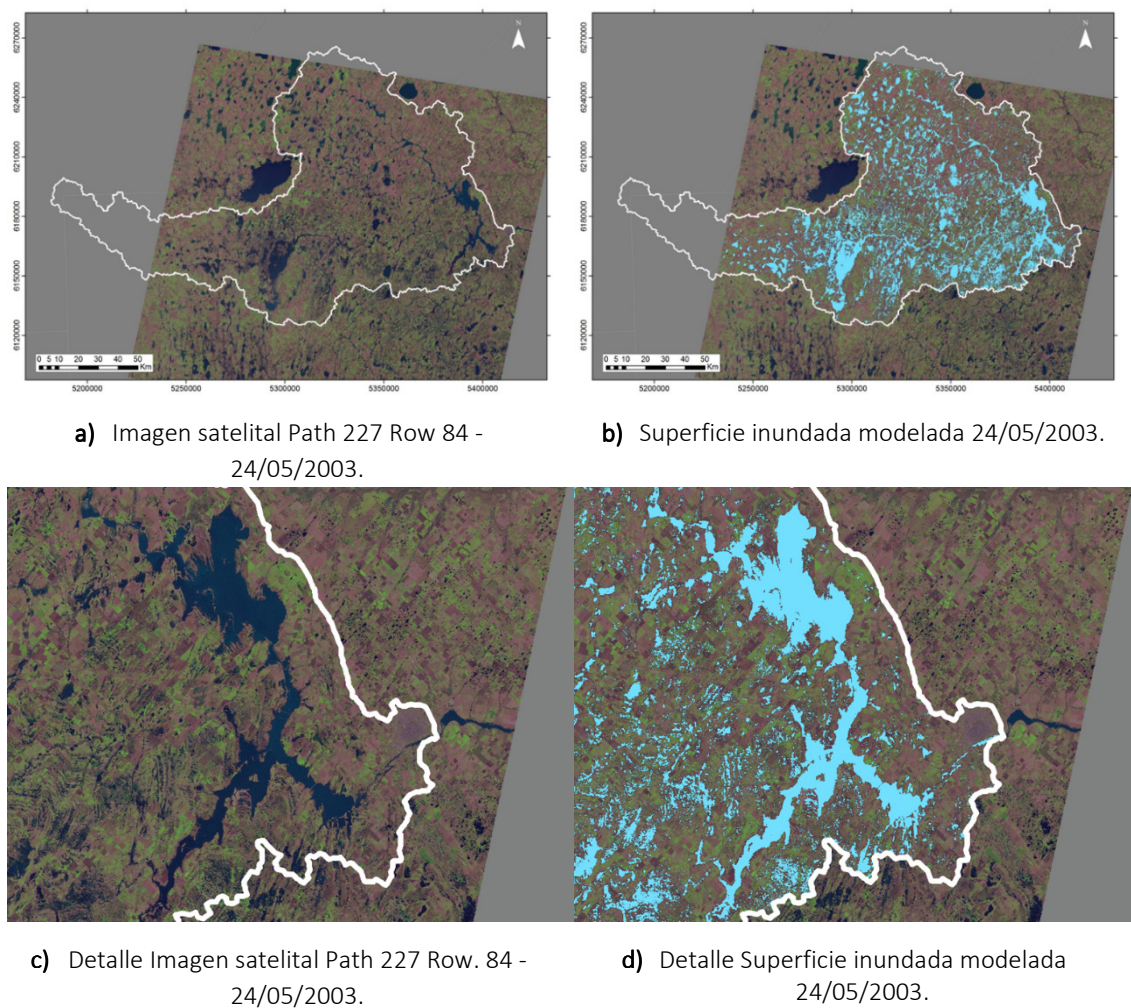


Figura 5.6. Validación cualitativa de la metodología del cálculo de área inundada.

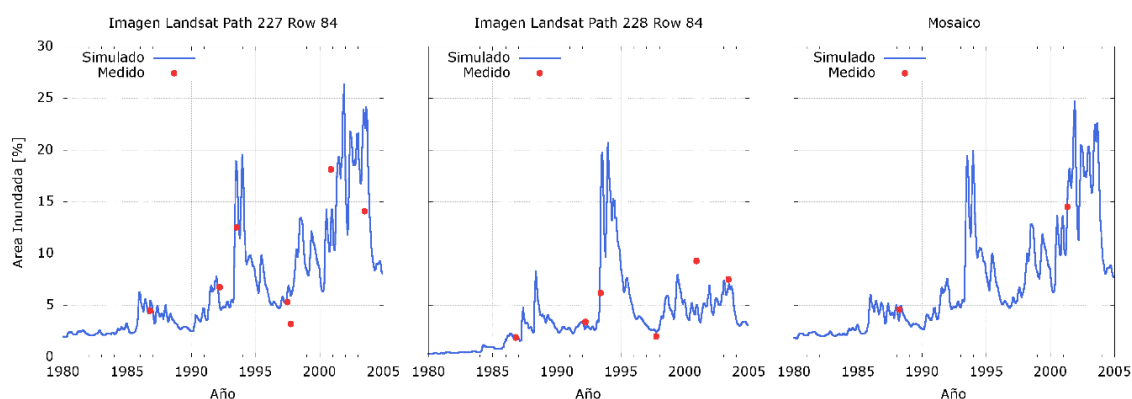
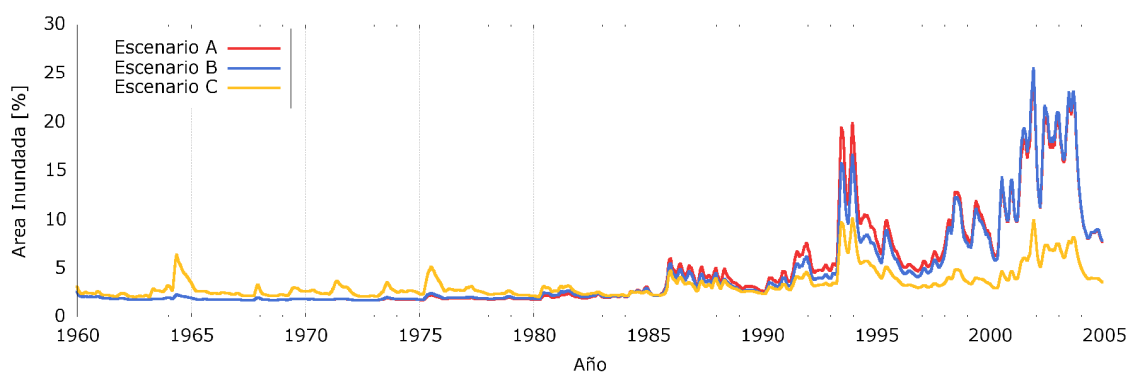
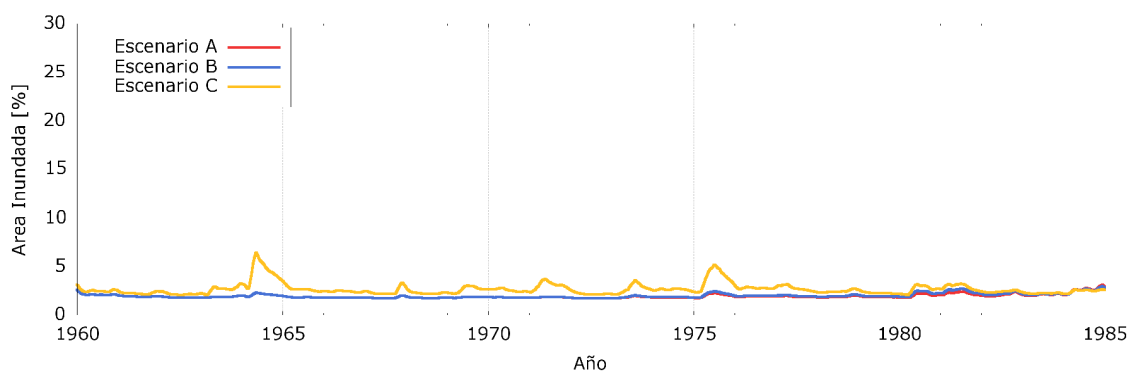


Figura 5.7. Validación cuantitativa de la metodología del cálculo de área inundada. Áreas inundadas simuladas (línea azul) vs áreas inundadas de imágenes satelitales (puntos rojos).

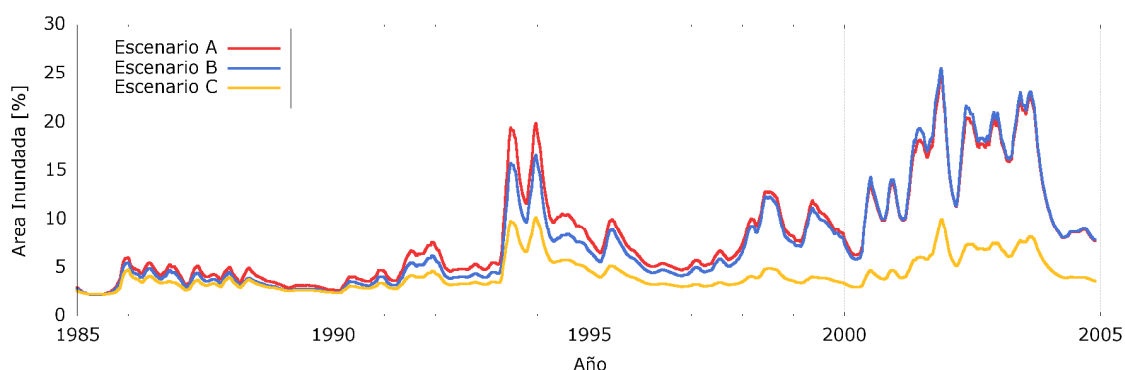
Con la metodología descripta se calculó la proporción de áreas inundadas en la SA1 para los tres escenarios de ensayo (Figura 5.8). Se observa que las áreas correspondientes al escenario A son levemente mayores a las del escenario B hasta finales de la década de 1990, pero luego son muy similares entre sí. El escenario C muestra áreas inundadas mayores a las de los escenarios A y B para el período 1960-1980, resultando en adelante sensiblemente menores. Para las inundaciones del año 1993 se puede ver que el total del área inundada de la SA1 es aproximadamente de 20%, 16% y 10% para los escenarios A, B y C respectivamente. En el año 2001, el total del área inundada de la SA1 es aproximadamente de 25% para los escenarios A, y B mientras que el escenario C muestra un porcentaje de área inundada del 10%. Estos comportamientos son compatibles con los observados para los niveles de napa y los caudales, obedeciendo a las mismas causas.



a) Evolución del área inundada en la SA1 para todo el período simulado (1960 – 2004).



b) Evolución del área inundada en la SA1 – Detalle 1960 - 1985



c) Evolución del área inundada en la SA1 – Detalle 1985 - 2004

Figura 5.8. Evolución del área inundada en la SA1 para los escenarios de ensayo: Escenario A (línea roja), Escenario B (línea azul) y Escenario C (línea amarilla).

En la Figura 5.9 se analiza la frecuencia absoluta de las áreas inundadas simuladas presentadas en la Figura 5.8. Puede observarse que la SA1 tuvo casi el 7% del tiempo del período 1960 – 2004 (es decir, alrededor de 3 años) más del 15% de su área bajo agua (Escenario A). En el caso del Escenario B los resultados son similares. Es importante destacar que en el Escenario C no se presentan en todo el período simulado áreas inundadas mayores al 10% de la SA1.

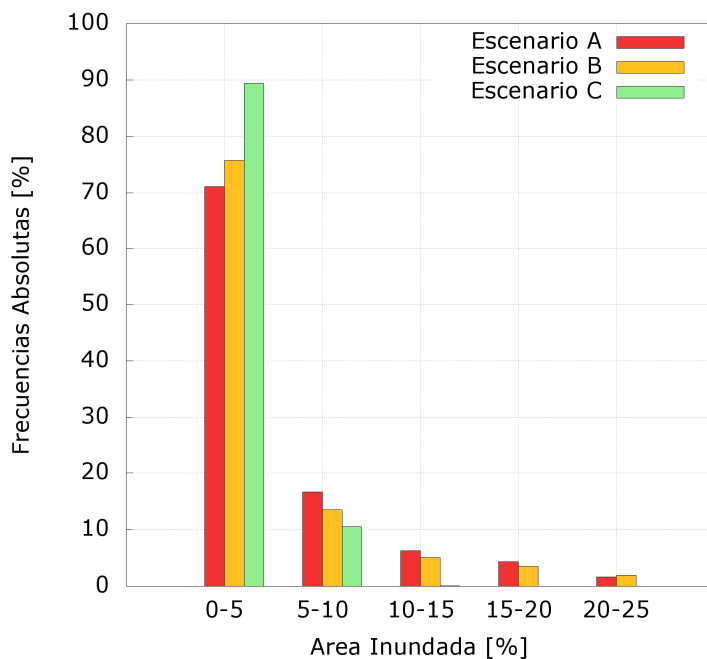


Figura 5.9. Frecuencia absoluta de inundaciones.

En varias zonas de la región pampeana, la dinámica de las napas freáticas ejerce control sobre la formación y expansión de cuerpos de agua libre (Aragón et al., 2010; Kuppel et al., 2015). Para evaluar este aspecto, se analizó la relación entre la profundidad freática media (Figura 5.4) y el área inundada (Figura 5.8). Esto se efectuó para el escenario A. La correlación de estos datos (Figura 5.10.a) muestra una tendencia de tipo exponencial. Mientras la profundidad de la napa freática media se encuentra entre los 3 y los 6 metros, el área inundada de la SA1 no supera el 5%. Cuando la profundidad freática varía entre 2 y 3 metros el área inundada de la SA1 va del 5 al 10%. Finalmente, cuando la profundidad de napa es menor a 2 metros crecen fuertemente las áreas inundadas, variando estas del 10 al 25% de la superficie de la SA1. La relación entre la profundidad freática y el área inundada es causal, ya que al aproximarse el nivel freático al terreno, la capacidad de infiltración tiende a colapsar, incrementándose significativamente la generación de excedentes en superficie, los cuales tienden a acumularse en las depresiones del terreno. Del mismo modo se analizó la relación entre la profundidad freática y los caudales a la salida de la SA1. La misma también es de tipo exponencial y se presenta en la Figura 5.10.b. Si bien pueden observarse caudales de entre 30 y 40 m³/s con profundidades freáticas mayores a 3,5 m (valores asociados a fuertes eventos de precipitación) es importante destacar que los mayores caudales (superiores a 50 m³/s) aparecen solamente cuando la profundidad media freática de la SA1 es menor a 1,5 m

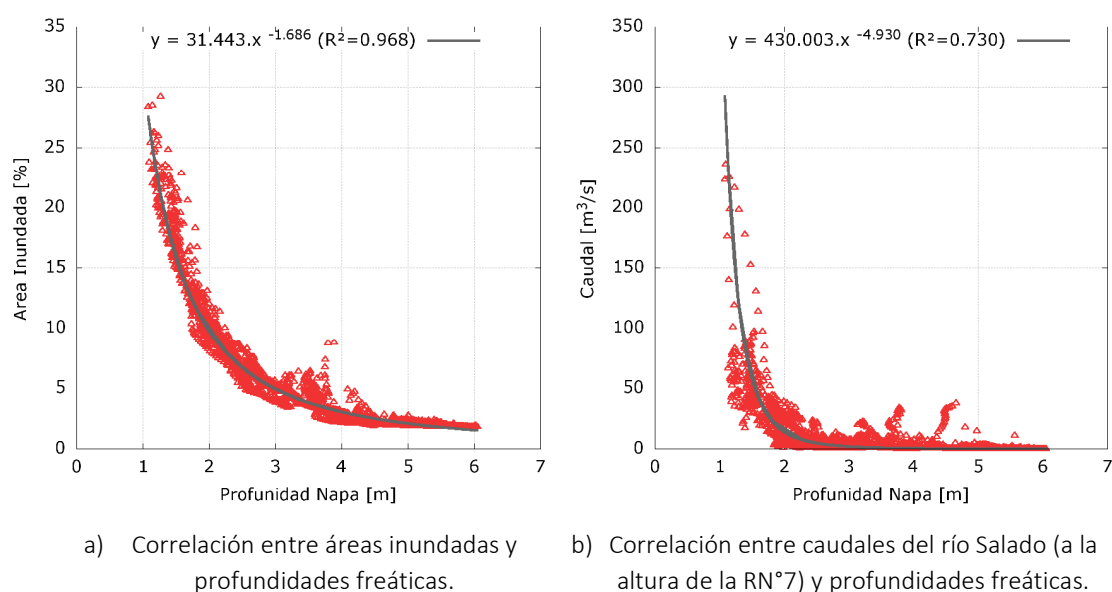


Figura 5.10. Análisis de áreas inundadas y su vinculación con la profundidad de las napas freáticas.

5.6 Análisis de efectos

Se efectuó un análisis de los resultados obtenidos con el modelo para tratar de discriminar los efectos cuantitativos de las precipitaciones y del cambio de uso del suelo. Para ello se identificó, dentro de la ventana de tiempo de modelación, un período durante el cual se observa una tendencia de crecimiento significativa y consistente del nivel de napa y el caudal para todos los

escenarios, como así también se observan variaciones en el uso del suelo y las precipitaciones anuales. Este se extiende desde el 12/12/1973 al 12/12/1993, es decir, es de exactamente 20 años.

En la Tabla 5.1 se indican las variaciones del nivel de napa y del caudal en el período de análisis, las tasas de variación anual, y la relación entre estas tasas y la correspondiente al escenario de base (A). Analizando las variaciones del nivel de napa se observa que, si el uso del suelo hubiera permanecido como en 1960 (escenario B), la variación debida exclusivamente a la precipitación hubiera sido el 86% de la variación total efectivamente ocurrida (escenario A). En cambio, si no hubiera existido una tendencia positiva en la precipitación anual (escenario C), la variación debida exclusivamente al cambio de uso de suelo hubiera sido el 58% de la variación total efectivamente ocurrida (escenario A). Esto indica que ambos efectos han sido significativos, aunque ha resultado cuantitativamente mayor el de las precipitaciones. Nótese además la alta no linealidad del sistema hidrológico, ya que la combinación de ambos efectos produce un resultado bastante inferior a la suma de cada uno de los efectos por separado.

Tabla 5.1. Variaciones del nivel de napa y del caudal en todo el período de análisis y las tasas de variación anual de dichas variables.

Napas				Caudales			
Escenario	A	B	C	Escenario	A	B	C
Variación (m)	4,40	3,55	2,42	Variación (m ³ /s)	61,9	43,9	29,5
Tasa (m/año)	0,21	0,18	0,12	Tasa (m ³ /s /año)	3,1	2,2	1,5
Tasa relativa		86%	58%	Tasa relativa		71%	48%

Si se analizan las variaciones de caudal en el período de análisis se observa que la respuesta es similar, sólo que la variación relativa de la tasa para uso del suelo constante (escenario B) fue del 71% de la variación total efectivamente ocurrida (escenario A), mientras que la variación sin tendencia positiva de precipitación alcanzó el 48% de la variación total efectivamente ocurrida (escenario A). Es decir, cada efecto por separado explica algo menos la variación total, mostrando un menor efecto de no linealidad.

Se considera que la relativa consistencia entre las tasas relativas de cambio obtenidas para el nivel de napa y el caudal otorga robustez a estos indicadores simples de cambio.

La construcción de estos indicadores presenta ciertas limitaciones. Por un lado, al restringirse el análisis a un período menor a la ventana de tiempo de modelación, la precipitación para el escenario C no quedó estrictamente libre de tendencia de precipitación. Por el otro lado, la condición inicial de nivel de napa del escenario C es diferente a la de los otros dos escenarios, lo cual influencia la respuesta del sistema hidrológico (esta es más sensible al cambio de uso de suelo para el escenario C). Por estas imprecisiones, los indicadores sólo deberían considerarse representativos del orden de magnitud de las influencias relativas. Téngase en cuenta, de todos modos, que cualquier indicador de este tipo tendría limitaciones para caracterizar la respuesta de un sistema complejo y no lineal como el presente.

5.7 Conclusiones del capítulo

En la región pampeana se produjo un fuerte desarrollo de las actividades agrícolas, disminuyendo las aéreas con pasturas y pastizales. En particular, en la SA1 de la cuenca del río Salado el porcentaje del área cultivada se duplicó en los últimos 50 años. Paralelamente con este desarrollo agrícola, la región registró un aumento en las precipitaciones, mostrado por todas las estaciones pluviométricas de la zona de estudio.

Como consecuencia de estos cambios, la zona presentó un significativo aumento del nivel de napas freáticas, que ha generado un incremento consecuente en la intensidad y frecuencia de las inundaciones. Cuando las profundidades freáticas son menores a los 2 metros, eventos de precipitaciones de gran magnitud pueden producir anegamientos significativos, de entre el 10 y el 30% del área de la SA1.

Si bien en zonas de llanuras el papel de la vegetación es clave en el balance hídrico vertical, el cambio del uso del suelo en la SA1 no puede explicar totalmente la disminución de las profundidades freáticas.

El aumento en las precipitaciones, que en la zona estudiada presenta una tendencia positiva de 7,7 mm/año, explica, aproximadamente, el 85% del aumento en el nivel de las napas y el 70% del aumento en los caudales en el río Salado, mientras que el incremento de la superficie cultivada explica, respectivamente, el 60% y el 50%, es decir, su efecto es menor. Estos resultados ponen de manifiesto la alta no linealidad del sistema hidrológico, ya que la combinación de ambos efectos produce un resultado bastante inferior a la suma de cada uno de los efectos por separado.

Se estableció una correlación de tipo exponencial entre la profundidad de napa freática y el porcentaje del área inundada de la SA1, siendo las profundidades freáticas de 2 metros un valor umbral a partir de la cual las áreas inundadas crecen significativamente. Similar correlación se encontró entre la profundidad de napa freática y los caudales a la salida de la cuenca, siendo en este caso la profundidad freática de 1,5 metros el umbral al partir del cual puede esperarse un aumento abrupto en los caudales. Se considera que estos resultados son indicativos del tipo de respuesta a esperar en zonas de llanura similares.

Dado que las napas juegan un rol fundamental en los eventos de inundaciones y que el uso del suelo influye en la dinámica freática, es importante analizar la validez de estrategias que busquen reducir el riesgo de inundaciones a partir de un manejo inteligente del uso del suelo. La profundización de estos análisis, como así también el concepto de interdependencia espacial de las aguas subterráneas, se presenta en el Capítulo siguiente.

Capítulo 6

Implicancias espaciales y temporales de diferentes estrategias de uso de suelo en el agua subterránea⁴

*¡Amalaya! La siembra se echó a perder
Y el agua del arroyo se echó a correr!
Al lucero le gusta la claridad
Y al agua del arroyo la libertad*

“El surco”
Chabuca Granda

⁴ Los principales resultados de este capítulo están incluidos en García, P.E., Menéndez, Á.N., Podestá, G.P., Bert, F., Arora, P., Jobbágy, E.G., 2017. Land-Use as possible strategy for managing water table depth in flat basins with shallow groundwater. *The International Journal of River Basin Management*, Vol. 16, Issue 1. DOI:10.1080/15715124.2017.1378223.

Como se vio en el capítulo anterior, el uso de la tierra puede tener importantes efectos en la dinámica del agua subterránea. La vegetación ejerce un fuerte control sobre el balance hídrico, lo que influye tanto en la recarga como en la descarga de agua subterránea (Seyfried et al., 2005; Santoni et al., 2010; Feler et al., 2014; Noretto et al., 2015; Vazquez Amabile et al., 2017; Guevara Ochoa et al., 2019). En las últimas décadas, los cultivos anuales se han expandido por toda la región pampeana, desplazando pastizales y pasturas (Manuel-Navarrete et al., 2009; Viglizzo et al., 2011). Como los cultivos ocupan la tierra solo durante unos pocos meses y tienen raíces menos profundas, anualmente consumen menos agua que las pasturas y/o los pastizales (Noretto et al., 2012; Noretto et al., 2015). Además, la siembra directa, una práctica muy común en las Pampas (Trigo et al., 2009), deja el suelo sin alterar y cubierto con rastrojo, lo que reduce la evaporación del suelo (Sinclair et al., 2007). En consecuencia, la recarga de agua subterránea aumenta y consecuentemente, disminuye la profundidad freática (Viglizzo et al., 2009; Contreras et al., 2011). Tal como se concluyó en la sección anterior, los cambios recientes en el uso de la tierra en región pampeana pueden tener fuertes implicaciones para la recarga de agua subterránea, el aumento del nivel freático y la frecuencia y los impactos de las inundaciones y sequías (García et al., 2018).

A su vez, los niveles de agua subterránea poco profundos (generalmente de menos de 3 a 5 m de profundidad) pueden afectar y, recíprocamente, verse afectados por los cultivos anuales y las pasturas y/o pastizales que dominan el uso de la tierra en esta región. Los niveles freáticos pueden tener impactos nulos, positivos o negativos en los cultivos según su profundidad (Noretto et al., 2009; Zipper et al., 2015). Si el nivel freático es profundo, el agua subterránea no es accesible a las raíces y, por lo tanto, no influye en el crecimiento o rendimiento del cultivo. Si el nivel freático está más cerca de la superficie (1,5-2,5 m), el agua subterránea puede alcanzar la zona de la raíz a través del ascenso capilar y, por lo tanto, proporcionar hasta el 50% de las necesidades de agua de un cultivo (Ayars et al., 2009). Este “subsidio al agua subterránea” (Mejia et al., 2000; Lowry and Loheide, 2010) ayuda a estabilizar los rendimientos de los cultivos de secano cuando la precipitación es escasa (Jobbágy and Jackson, 2004; Florio et al., 2014; Rizzo et al., 2018). Si el nivel freático está muy cerca de la superficie, el efecto positivo de las aguas subterráneas en los rendimientos se reemplaza por una “penalización de las aguas subterráneas”: los impactos negativos de la saturación de agua que limita la actividad de las raíces, la disponibilidad de nutrientes y el establecimiento de la planta (Kahlow and Azam, 2002; Zipper et al., 2015). Napas cercanas a la superficie también impiden el acceso de la maquinaria agrícola y reducen la tierra disponible para el cultivo (Viglizzo and Frank, 2006). Finalmente, cuando las napas llegan a la superficie, pueden desencadenar inundaciones rápidas y masivas con impactos sociales y económicos considerables (García et al., 2018). Este tema se desarrollará con mayor profundidad en el Capítulo 7.

La mitigación de los riesgos de inundaciones y sequías a menudo implica el desarrollo de infraestructura costosa (por ejemplo, canales, embalses, etc.). Sin embargo, el potencial para el manejo basado en el uso del suelo de tales riesgos es cada vez más evidente. Idealmente, los agricultores deberían tratar de mantener la napa freática a una profundidad que permita el acceso de los cultivos al agua subterránea, brindando protección contra la escasez de lluvias, pero no tan superficial que los riesgos de inundaciones puedan aumentar significativamente. Desafortunadamente, la gestión del riesgo adaptativo a menudo está limitada por la incertidumbre en la dinámica de la profundidad freática dentro de un ciclo de cultivo, ya que la precipitación y la evapotranspiración son altamente variables (García et al., 2017). Este tipo de gestión implica además una complejidad adicional que es la interdependencia física y socioeconómica entre los productores que comparten aguas subterráneas, la cual se explica a continuación.

Los flujos horizontales de agua subterránea entre áreas con diferentes profundidades freáticas inducen vínculos entre campos espacialmente adyacentes. Cuando los cultivos absorben el agua subterránea, disminuyen el nivel de la napa freática, provocando flujos laterales del entorno circundante. De manera similar, napas freáticas poco profundas (por ejemplo, resultantes de un largo período de barbecho) pueden generar flujos de agua subterránea hacia las áreas adyacentes. Debido a estos flujos laterales, el uso de la tierra dentro de un lote puede influir en la napa freática de las áreas circundantes; de manera similar, la profundidad de napa freática en un lote o en un campo también puede depender del uso del suelo en áreas cercanas. En consecuencia, los riesgos de inundación o sequía que enfrenta un productor están influenciados no solo por sus propias decisiones sobre el uso de la tierra, sino también por las de otras personas cercanas que comparten la napa freática (García et al., 2017).

Las implicancias de las aguas subterráneas compartidas van más allá de las interdependencias espaciales: cuando las estrategias de uso del suelo de un campo afectan la disponibilidad de agua subterránea en los campos adyacentes, los resultados económicos de los distintos campos se vuelven interdependientes. Esta situación, en la que las decisiones de una persona influyen en los riesgos físicos y financieros que enfrentan los demás y viceversa, puede considerarse como un problema de *"dilema de bienes comunes"* (o *"commons dilemma"*) (Hardin, 1968; Ostrom, 2000), caracterizado por el hecho de que un productor individual puede hacer una elección cooperativa (por ejemplo seleccionando un uso de suelo determinado) y reduzca la probabilidad de escenarios negativos (p. ej., inundaciones) para todos o, en su lugar, elija enfocarse solo en el beneficio individual (García et al., 2017). La interdependencia en los problemas ambientales puede requerir la cooperación entre los individuos y, finalmente, la coordinación entre las acciones de todos (cuando hay más de una opción disponible) antes de que los beneficios colectivos puedan realizarse plenamente. Típicamente, el dilema de los bienes comunes se debe al uso excesivo del agua subterránea para obtener ganancias individuales al costo de crear una escasez para el colectivo. Sin embargo, en el caso de la pampa argentina, es la subutilización de las aguas subterráneas lo que resulta en un dilema (García et al., 2017). La evidencia obtenida en el capítulo anterior y en trabajos antecedentes indica que los cambios en el uso del suelo en la región pampeana generaron un aumento en el nivel promedio de las aguas subterráneas en casi 2 m (Nosetto et al., 2012; García et al., 2018), lo que potencialmente aumenta el riesgo de inundación. El cambio en el uso del suelo fue motivado principalmente por la ganancia económica

para el individuo, mientras que las consecuencias ambientales y la pérdida económica potencial son asumidas por todos los productores de la cuenca, lo que genera un dilema de bienes comunes tradicionales.

Desafortunadamente, el concepto de agua subterránea como un recurso común ha recibido una limitada atención, posiblemente porque se necesitan antecedentes básicos de las ciencias físicas. Es también objetivo de este trabajo producir resultados que puedan utilizarse como sustentos para profundizar este tipo de estudios de bienes comunes.

En particular, en este capítulo se cuantifican las vinculaciones entre el clima, la hidrología y las decisiones sobre el uso del suelo con el fin de proporcionar antecedentes físicos necesarios para comprender los efectos de interdependencia espacial, temporal y socioeconómica entre productores que comparten aguas subterráneas. A su vez, se estudian las implicancias de diferentes estrategias simples de manejo del suelo, y se analiza bajo qué condiciones las mismas podrían ser válidas para realizar una gestión de las napas freáticas a escala cuenca.

6.1 Ensayos numéricos: resultados y discusión

Se realizaron diferentes ensayos numéricos para simular la respuesta del nivel freático a diversos patrones de uso del suelo y diferentes escenarios climáticos. Se definieron tres conjuntos de ensayos para abordar diferentes objetivos: (a) evaluar el impacto de diferentes usos de suelo en la dinámica de las napas (para estudiar la viabilidad de gestionar la dinámica de los niveles freáticos con diferentes usos de la tierra); (b) estimar la extensión espacial de las variaciones de niveles freáticos entre campos adyacentes con diferentes usos de la tierra (para poner en evidencia los efectos de interdependencia y empezar a cuantificar su impacto); y (c) evaluar preliminarmente los cambios de los niveles freáticos en respuesta a la variabilidad climática.

Todas las simulaciones realizadas en la SA1 abarcaron un período de 20 años, tiempo suficientemente largo para que el sistema alcance condiciones de régimen (es decir, estables); Las condiciones de régimen se alcanzaron después de 8-15 años, dependiendo del escenario simulado. Para todas las simulaciones, se construyó una serie sintética del forzante climático repitiendo 20 veces los registros meteorológicos diarios para un año específico ("año base"); se utilizaron varios años base dependiendo de los objetivos del ensayo a realizar. Para cada ensayo, el uso del suelo de entrada se mantuvo sin cambios a lo largo de la simulación. Los detalles de cada conjunto de ensayos numéricos y sus resultados se presentan en las siguientes secciones.

6.2 Impacto del uso del suelo en la dinámica de los niveles freáticos

El aumento de los niveles freáticos en la región de estudio, tal como se vio en el capítulo anterior, se relaciona en parte con un cambio del uso del suelo, dado que hubo un aumento de las áreas con cultivos anuales en detrimento de zonas con pasturas y pastizales (Viglizzo et al., 2011; García et al., 2018). Por esta razón, el primer conjunto de ensayos buscó cuantificar las variaciones en la profundidad de la napa freática resultantes de considerar diferentes usos de la tierra. Se simularon tres escenarios contrastantes: (A) un patrón de uso de la tierra realista, basado en

datos de 2004: 25% de soja, 6% de maíz, 6% de trigo, 1% de girasol y 62% de pasturas o pastizales naturales (las áreas urbanas se consideran despreciables) distribuidos espacialmente de manera uniforme; (B) toda la cuenca sembrada con soja; y (C) toda la cuenca cubierta con pasturas. Los escenarios B y C no son realistas, pero pretenden abarcar el posible rango de variaciones de profundidades freáticas. El año base del clima fue 2004, ya que tuvo una precipitación anual promediada espacialmente (920 mm) muy similar a la precipitación media anual para el período 1911-2004 (930 mm).

El uso del suelo tuvo fuertes efectos en las profundidades de las napas simuladas en toda la cuenca. La Figura 6.1 muestra, para los escenarios A, B y C, series temporales de la profundidad de napa freática promedio en toda la cuenca. Una vez que se alcanzaron las condiciones de régimen, se obtuvieron los niveles de napa promedio más profundos (≈ 7 m) para el escenario C (todo pastura) y los niveles más altos ($\approx 2,5$ m) para el escenario B (todo soja). Como era de esperar, el nivel de la napa promedio para el Escenario A (uso mixto del suelo) se encuentra entre los obtenidos para los escenarios B y C ($\approx 4,6$ m). Este comportamiento está asociado con el mayor consumo anual de agua de las pasturas, derivado de la combinación de su sistema radicular más profundo y la evapotranspiración durante todo el año. En contraste, los cultivos anuales consumen agua del suelo solo durante el tiempo limitado en que ocupan la tierra (Nosetto et al., 2015). El escenario C muestra una menor variabilidad interanual de niveles freáticos debido a la presencia de pasturas durante todo el año. Por el contrario, la mayor variabilidad en los niveles freáticos se observa en el escenario B, donde los mismos son más altos durante los meses de barbecho (de mayo a octubre, cuando también la evapotranspiración potencial es baja) y más profundos durante los meses de máximo desarrollo de la soja (de noviembre a mayo).

La diferencia de alrededor de 4.5 m en los niveles freáticos promedio entre los escenarios de uso de suelo más contrastantes (escenarios B y C) implica diferencias significativas en los riesgos de inundaciones o sequías: para los suelos típicos en la cuenca SA1, una variación de 4,5 m en los niveles freáticos es equivalente a 800-900 mm de agua, aproximadamente lo mismo que la precipitación media anual (García et al., 2017). Estos resultados confirman las conclusiones obtenidas en el capítulo anterior, afirmando que la reciente expansión de los cultivos anuales y el desplazamiento correspondiente de pasturas y pastizales naturales es una de las causas que ha generado un aumento generalizado en los niveles de agua y por consiguiente de los riesgos de inundación.

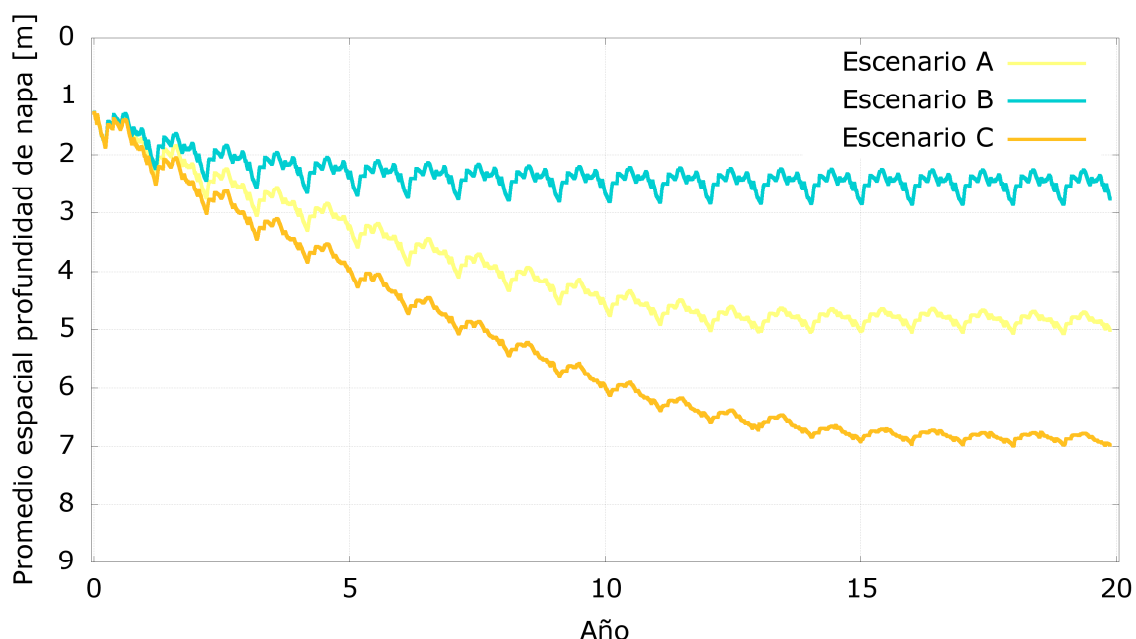


Figura 6.1. Promedio espacial de la profundidad de napa freática en función del tiempo para los escenarios con diferentes usos del suelo: escenario A (patrón de uso de la tierra realista), escenario B (todo soja) y escenario C (todo pasturas).

Para los tres escenarios anteriores, hubo importantes diferencias espaciales en la profundidad de napas simuladas en toda la SA1. La Figura 6.2 muestra el promedio anual de profundidad de napa para el escenario B una vez que se alcanzan las condiciones de régimen. El nivel freático es menos profundo (<1 m) en la parte sudoeste de la cuenca, mientras que alcanza valores profundos (≈6 m) en el lado noreste; en las otras partes de la cuenca, la profundidad de la napa se encuentra dentro del rango de 2-3 m. El patrón espacial de la profundidad de napa freática está estrechamente vinculado a las variaciones tanto en la precipitación como en las propiedades del suelo en toda la cuenca. Los impactos de tales heterogeneidades se magnifican porque las simulaciones se basan en una serie sintética que repite las mismas condiciones climáticas (el año base) 20 veces. Las líneas blancas en la Figura 6.2 indican los bordes de los polígonos de Thiessen correspondientes a las estaciones meteorológicas disponibles (Ver Figura 2.12 en el capítulo 2); una línea blanca discontinua con dirección NO-SE separa aproximadamente los dos tipos de suelo utilizado en el modelo (García et al., 2017). En base a esta información, se identificaron tres regiones diferentes (Figura 6.2): (i) una región oriental, donde tanto la precipitación anual como la permeabilidad del suelo son relativamente bajas; (ii) una región occidental, donde la precipitación anual y la permeabilidad del suelo son altas; y (iii) una región central, donde la precipitación anual es intermedia y la permeabilidad del suelo es alta.

El nivel freático tiende a ser menos profundo cuando la precipitación y la conductividad hidráulica del suelo son altas (por ejemplo, la región occidental), ya que esta combinación de factores mejora la recarga de agua subterránea; a la inversa, el nivel de la napa es generalmente más profundo donde la precipitación y la conductividad son bajas (es decir, la región este). Sin embargo, hay que tener en cuenta que este patrón inusual de lluvias más altas en los extremos oeste y más bajas en el extremo este de la cuenca fue particular al año base (2004) seleccionado:

el patrón normal en la región pampeana es el opuesto, es decir, una disminución en precipitación de este a oeste. Sin embargo, la discusión previa sobre la lluvia y las propiedades del suelo es válida. Estos resultados confirman que, debido a la escasa pendiente de la cuenca, el balance hídrico está dominado por flujos verticales. Las profundidades de napas intermedias en la región central sugieren que las mismas son más sensibles a la precipitación que a la permeabilidad del suelo. Esta hipótesis se confirmó mediante un experimento numérico en el que se impuso la misma cantidad de precipitación a toda la cuenca (García et al., 2017).

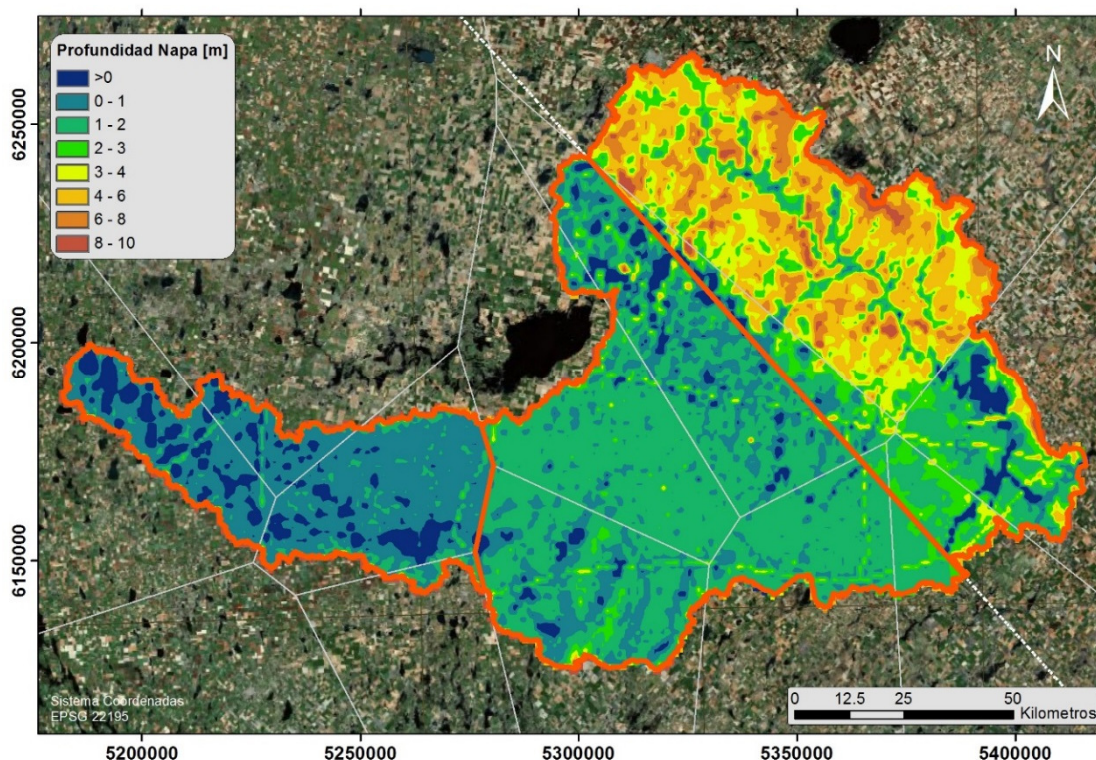


Figura 6.2. Promedio anual de la profundidad de la napa freática para el escenario B. Las líneas blancas marcan los límites de los polígonos de Thiessen según las estaciones meteorológicas disponibles. La línea discontinua blanca marca la separación entre las zonas de tipo de suelo. Las líneas gruesas marcan la zonificación de la cuenca en función de la precipitación anual total y la permeabilidad: (i) Región este, donde la precipitación anual total y la permeabilidad del suelo son (relativamente) bajas; (ii) región oeste, donde la precipitación anual total y la permeabilidad del suelo son altas; y (iii) región central, donde la precipitación total anual es intermedia y la permeabilidad del suelo es alta.

6.3 Impacto espacial del uso del suelo en la profundidad de napa

Las simulaciones anteriores mostraron que el uso del suelo claramente puede modificar los niveles freáticos. Si una zona incluye un mosaico de diferentes usos del suelo, cada uno con diferentes impactos, los niveles de napa pueden variar entre áreas adyacentes con diferentes usos. Sin embargo, es necesario cuantificar la extensión espacial de los impactos en los niveles freáticos de un uso de suelo dado en áreas adyacentes, ya que este efecto ha recibido poca atención en la literatura. La cuantificación de este impacto es fundamental para evaluar la

importancia de estas situaciones de interdependencia en la que las decisiones de un individuo (el propietario de un campo) pueden influir en los resultados de otros.

La cobertura de soja en el escenario B se intervino con 10 “islas” cuadradas cubiertas de pasturas; las islas se distribuyen irregularmente en toda la cuenca (Figura 6.3). Se probaron tres tamaños diferentes de islas: 3x3 km (900 hectáreas, escenario D), 5x5 km (2.500 hectáreas, escenario E) y 9x9 km (8.100 hectáreas, escenario F). También se probó la situación opuesta: toda la cuenca cubierta con pasturas, excepto por 10 islas de soja de tamaño 3x3 km (escenario G), 5x5 km (escenario H) y 9x9 km (escenario I). Finalmente, para representar un patrón de uso de la tierra más realista, también se consideró una variante del escenario F: cada una de las islas de pasturas de 9x9 km se reemplazó por un patrón de damero o tablero de ajedrez (81 casillas de 1 km², alternando soja y pastura, escenario J. Ver Figura 6.4). El perímetro de cada damero o tablero de ajedrez es el mismo que las islas en el Escenario F, pero el área de soja es aproximadamente la mitad.

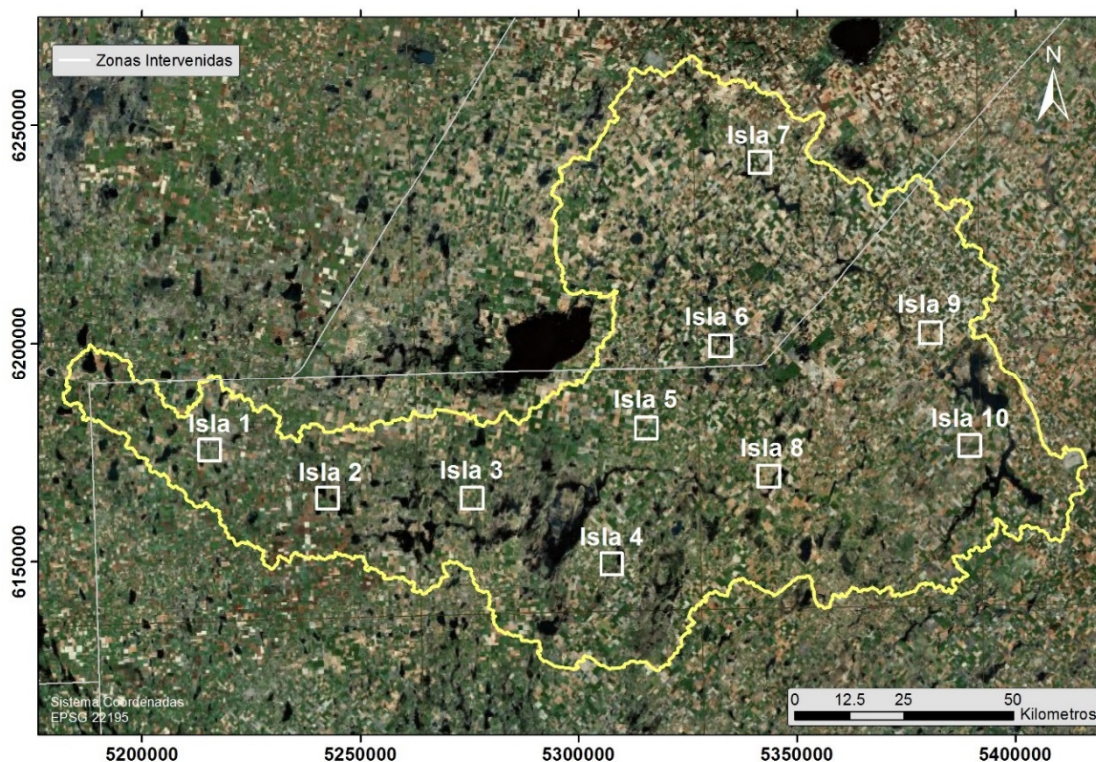


Figura 6.3. Ubicación de las áreas intervenidas o “islas”.

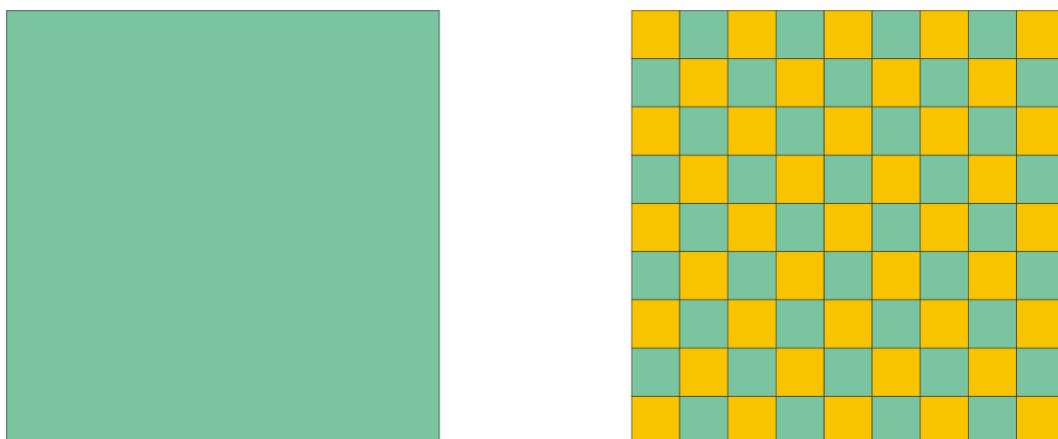


Figura 6.4. Patrón de uso de suelo del tipo damero o “tablero de ajedrez”.

El uso heterogéneo de la tierra dentro de una zona genera diferencias en las profundidades freáticas entre áreas adyacentes. La magnitud absoluta de los cambios en la profundidad de napas disminuye con la distancia desde el centro del área intervenida (o “isla”) que tiene asociada un diferente uso del suelo. Por ejemplo, la Figura 6.5 muestra las diferencias de profundidades en la napa (una vez que se alcanzan las condiciones del régimen) entre los escenarios F (islas de pasturas) e I (islas de soja), y sus respectivos escenarios de referencia (B y C) para la isla 9 (ver Figura 6.3). Las diferencias en las profundidades de napas se trazan en función de la distancia desde el centro de la isla. El límite de una isla de 9x9 km se encuentra entre 4.5 y 6.4 km desde el centro (debido a la forma cuadrada de la isla); este rango se indica mediante dos líneas verticales discontinuas en la Figura 6.5.

Para el escenario F, el consumo de agua de las pasturas durante todo el año induce una profundización de las napas (es decir, una diferencia positiva con respecto al escenario de referencia) alrededor del centro de la isla. Para el escenario I, ocurre lo contrario: la isla de soja tiene una napa menos profunda que las pasturas circundantes, por lo que la diferencia con el escenario de referencia correspondiente es negativa. Para ambos escenarios, las diferencias absolutas de profundidad de napa disminuyen rápidamente con la distancia desde el centro de la isla. La rápida disminución de la influencia espacial del uso del suelo en la profundidad freática parece confirmar el papel limitado del transporte lateral en el balance hídrico de cuencas muy planas. Las variaciones máximas de profundidad de napas (en el centro de la isla) fueron (i) una profundización de 5 m cuando se implementaron islas de pasturas en una cuenca cubierta de soja (escenario F), y (ii) un aumento del nivel de napas de aproximadamente 4,3 m para islas de soja en una cuenca cubierta de pasturas (escenario I). En el borde de la isla, las diferencias absolutas de profundidad de napas están en el rango de 0,5 a 4,0 m para el Escenario F; el rango correspondiente para el escenario I fue de 1,0 a 3,0 m. Para ambos escenarios, la variación en la profundidad de napa disminuyó por debajo de 0,1 m (es decir, prácticamente indetectable) a unos 13 km del centro de la isla. Se observa una mayor dispersión de las diferencias de profundidades de napas dentro de las líneas discontinuas: esto se debe a que este rango incluye celdas dentro y fuera de la isla. En general, las variaciones absolutas de la profundidad de napa son ligeramente mayores para el escenario F que para el escenario I, lo que sugiere un mayor impacto de las intervenciones con pasturas en un paisaje de soja que en el caso opuesto.

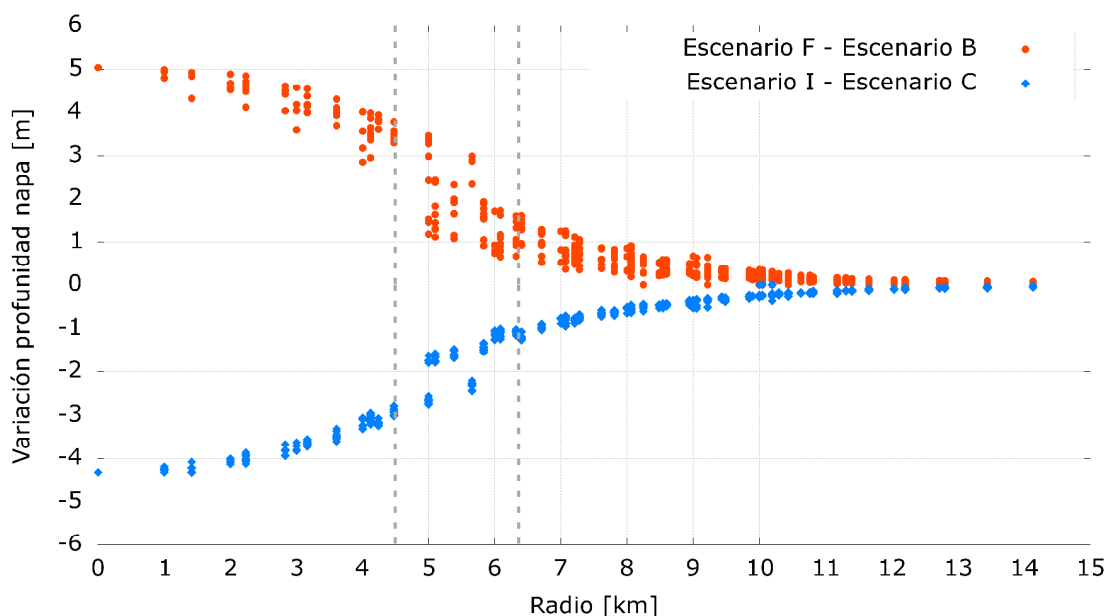
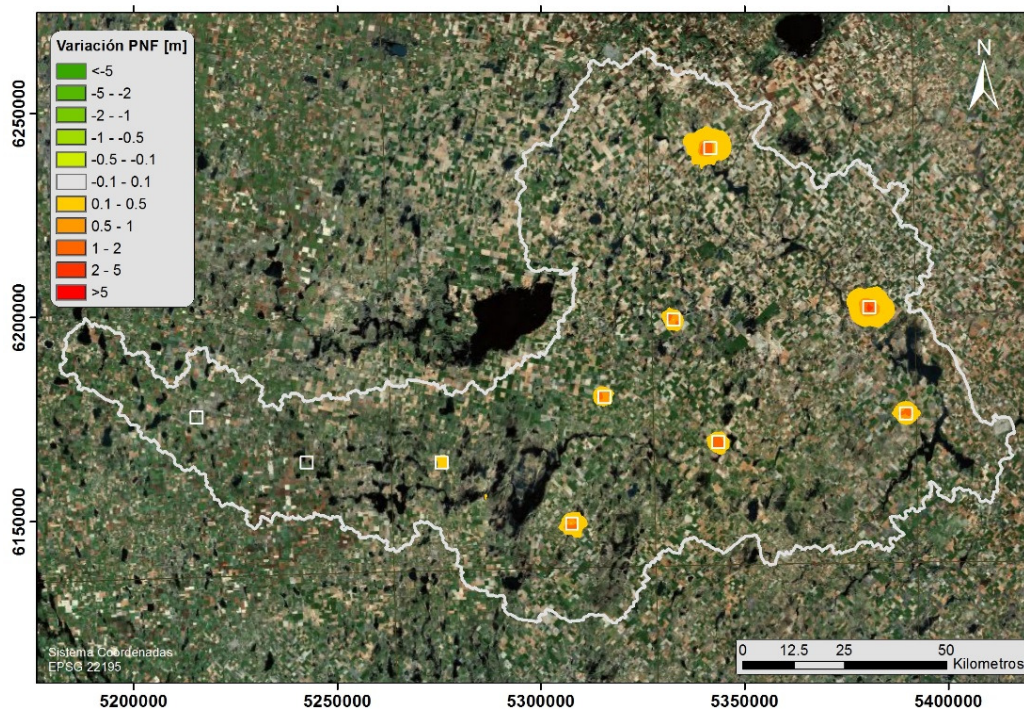
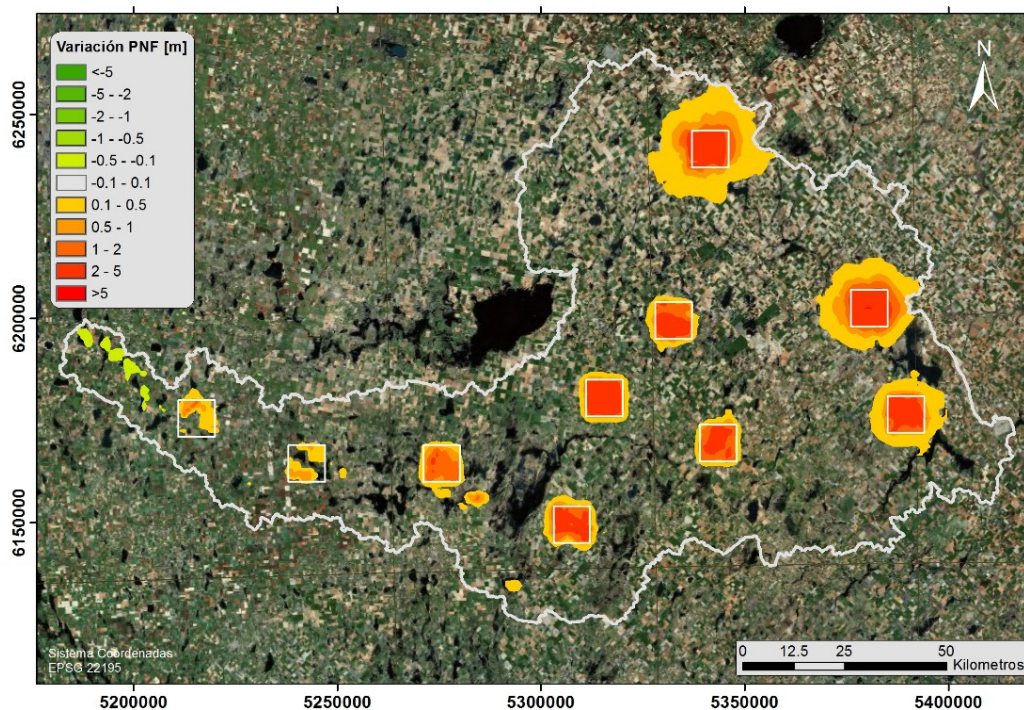


Figura 6.5. Distribución radial de la variación promedio anual de la profundidad de napa para la Isla 9 con un tamaño de 9 km entre los escenarios F (islas de pasturas) e I (islas de soja) y sus respectivos escenarios de referencia (B y C). El borde de la isla se encuentra dentro de la zona de transición delimitada por líneas verticales discontinuas. Son dos aristas porque la isla es cuadrada.

La Figura 6.6 muestra las diferencias medias anuales de la profundidad de napa (una vez alcanzadas las condiciones de régimen) entre los escenarios D (intervenciones con celdas cuadradas de pasturas de 3 km de lado) y F (intervenciones con celdas cuadradas de pasturas de 9 km de lado) y el escenario de referencia con toda la cuenca cultivada con soja (escenario B). En ambos casos, se observa una profundización de los niveles freáticos en las áreas de soja alrededor de las áreas intervenidas con pasturas (por eso ver las variaciones positivas en la profundidad de napa). Sin embargo, la extensión espacial de los efectos de las intervenciones en la profundidad de napa parece variar a lo largo de la cuenca. En la zona occidental (islas 1 y 2) solo se observaron pequeñas diferencias de profundidad de napa tanto dentro como fuera de las islas. Por el contrario, las diferencias significativas en la profundidad de napa aparecieron en la zona oriental (islas 7, 9, 10). En la zona central, las diferencias en las profundidades freáticas son intermedias.



a) Escenario D (todo soja con intervenciones de pasturas de 3 km de lado) - Escenario B (todo soja).



b) Escenario F (todo soja con intervenciones de pasturas de 9 km de lado) - Escenario B (todo soja).

Figura 6.6. Variación promedio anual de la profundidad de napa una vez alcanzadas condiciones de régimen.

La extensión espacial de las diferencias en las profundidades de la napa parecería depender del tamaño de las islas: el tamaño total de las áreas influenciadas por el uso del suelo fuera de la islas parece mayor en la Figura 6.6b (islas más grandes, de 81 km²) que en la Figura 6.6a (islas de 9 km²). Para investigar el efecto del tamaño de la isla, se calcularon las diferencias de profundidad de napa entre los escenarios D, E y F (islas de pasturas con tamaños de 9, 25 y 81 km² respectivamente) y el escenario B de referencia (todo soja). De manera similar, se calcularon las diferencias de profundidad de napa entre los escenarios G, H e I (islas de soja con tamaños de 9, 25 y 81 km² respectivamente) y el escenario C de referencia (todo pastura). La Figura 6.7 muestra, para la isla 9, las diferencias en las profundidades de napa para todos los escenarios enumerados anteriormente como una función de la distancia desde el centro de la isla. Esta figura es similar a la Figura 6.5, pero ambos ejes fueron reescalados. La distancia desde el centro de una isla (el eje "x") se volvió a escalar dividiéndola por la longitud del lado de una isla (3, 5 o 9 km, según el escenario). El eje "y" también fue reescalado: las diferencias en la profundidad de napa se expresaron como un porcentaje de la diferencia máxima de profundidad de napa para cada escenario (generalmente observada en el centro de la isla, o distancia 0). Se observa que las curvas de diferencia de profundidad de napa para las diferentes intervenciones con islas de pastura o de soja resultaron muy similares. Otro resultado interesante es que las variaciones relativas de la profundidad de napa fuera de la isla (distancias relativas > 0,50 – 0,71) siempre estuvieron por debajo del 50%.

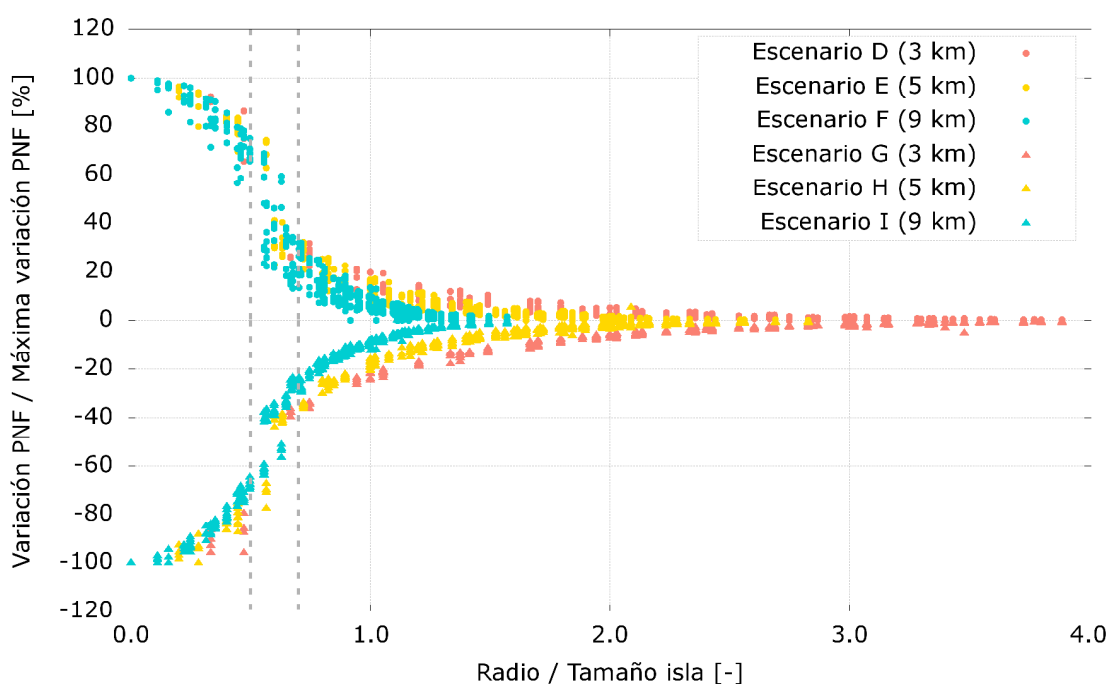


Figura 6.7. Distribución radial de la variación relativa del promedio anual de la profundidad de napa para la isla 9 para diferentes intervenciones con pasturas (escenarios D, E y F) y soja (escenarios G, H e I), y sus respectivos escenarios de referencia (B y C).

Como se mostró anteriormente, la elección del uso del suelo por parte de un productor puede afectar los niveles freáticos en campos y lotes adyacentes, pero dicho impacto se hace cada vez

menor a medida que se aumenta la distancia desde el campo de dicho productor. A continuación se estima el área influenciada por una opción específica de uso del suelo teniendo en cuenta diferentes umbrales de variación absoluta de la profundidad de napa (los umbrales considerados varían de 0,25 m a 2,00 m, con un paso de 0,25 m). La Figura 6.8a muestra el área influenciada para dos islas ubicadas en diferentes extremos de la cuenca (isla 1 e isla 9); Como resultado de su ubicación, las islas difieren en su profundidad de napa inicial. Obviamente, el área influenciada disminuye si se consideran umbrales más altos. Para la isla 9, el área influenciada fue más grande que el área de la isla (es decir, el uso del suelo de un productor afecta las napas en un área más grande que su propio campo) cuando el umbral es $\leq 0,5$ m para el escenario D, $\leq 1,25$ m para el Escenario E, y ≤ 2 m para el escenario F; el área influenciada alcanzó valores entre 3,5 y 4 veces el área intervenida si el umbral es de 0,25 m. En el caso de la isla 1, el área influenciada siempre fue más baja que el área intervenida; para un valor umbral de 0,25 m, alcanzó un máximo del 45% del área intervenida para el escenario F.

El patrón del tablero de ajedrez redujo el área efectiva sujeta a la intervención. La Figura 6.8b es similar a la Figura 6.8a, pero compara el tamaño del área influenciada para los escenarios F y J (áreas intervenidas de 81 km², con uso homogéneo y otro con un patrón tipo damero, respectivamente). Es de notar que los efectos espaciales en las profundidades de napa no fueron necesariamente proporcionales a la reducción del área intervenida: en términos relativos, el patrón del tablero de ajedrez mostró mayor impacto espacial que el patrón regular. Este resultado sugiere que una estrategia del tipo damero debería ser más eficiente desde el punto de vista práctico. Por ejemplo, si se implantaran pasturas con el objetivo de aumentar la profundidad de la napa y, por lo tanto, reducir los riesgos de inundación, la misma área de pastura influiría en mayor medida si se dispusiera como un damero, en lugar de como un bloque completo.

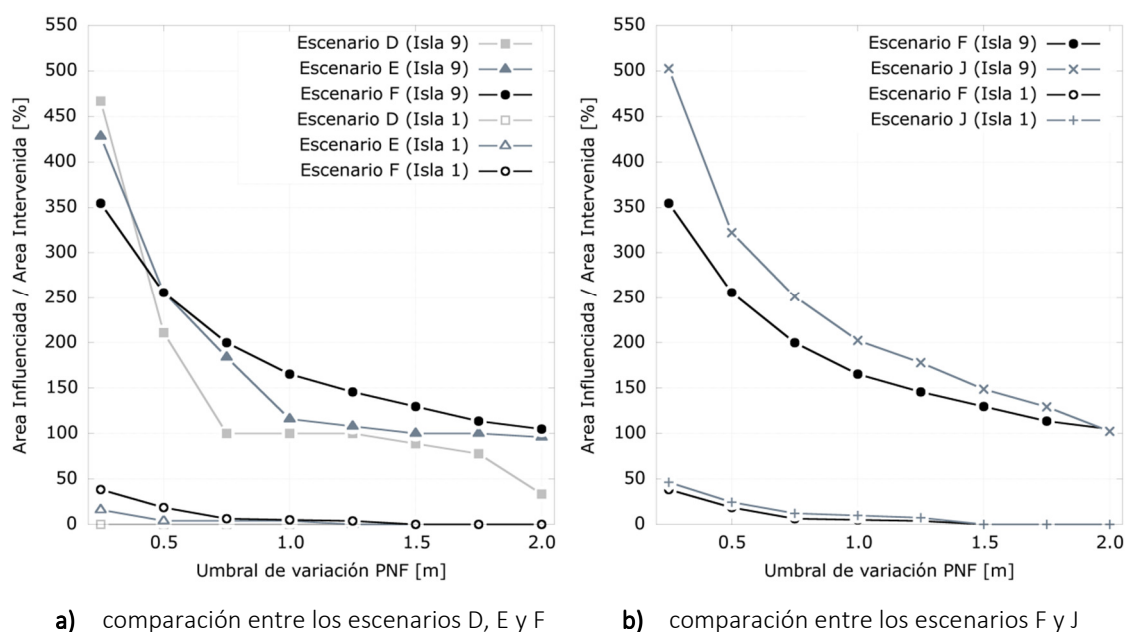


Figura 6.8. Área influenciada en función del umbral de variación de la profundidad de napa para diferentes islas (1 y 9).

6.4 Impacto de la variabilidad climática en la dinámica del nivel freático

Como se mencionó anteriormente, en zonas tan planas, como la SA1, la profundidad de napa está controlada principalmente por dos procesos opuestos: evapotranspiración y precipitación. La primera es principalmente una función del uso del suelo y la época del año; por esa razón, en la Sección 6.2 se analizaron los efectos del uso del suelo en la dinámica de los niveles freáticos. Sin embargo, al mismo tiempo, la cuenca SA1 ha mostrado una considerable variabilidad en las precipitaciones tanto en escalas interanuales como decenales (Berbery and Barros, 2002; García et al., 2018). Debido a que las variaciones de las precipitaciones pueden jugar un papel importante en la dinámica de los niveles freáticos, esta sección explora preliminarmente las respuestas de la profundidad de napa a la variabilidad en la precipitación.

Se consideraron dos variantes del escenario F en estas simulaciones. Estas dos variantes implicaron cambiar el año base para imponer condiciones climáticas más secas (escenario K) y más húmedas (escenario L). Los respectivos años bases alternativos elegidos tuvieron una precipitación anual cercana al percentil 20 (860 mm, año 1994) y al percentil 80 (1.280 mm, año 2002) de la precipitación anual histórica promediada espacialmente (García et al., 2017). Los escenarios alternativos K y L tuvieron, respectivamente, precipitaciones totales un 15% más bajas y un 30% más altas que el Escenario F.

La Figura 6.9a muestra las series de tiempo de la profundidad de napa promediada espacialmente para los escenarios F, K y L. Como se esperaba, la profundidad de la napa (en condiciones de régimen) fue mayor para el escenario seco (K) y menor para el escenario húmedo (L). Las variaciones en la profundidad de napa en relación con el escenario F fueron de aproximadamente +0,5 m y -1,5 m, respectivamente. Estos resultados sugieren un impacto no lineal de las precipitaciones en la dinámica freática: aunque el aumento de la precipitación en el escenario húmedo (30%) fue el doble de la disminución correspondiente (15%) para el escenario seco, el aumento del nivel de napa fue 3 veces mayor que la caída del nivel freático en el escenario más seco.

La Figura 6.9b compara el área impactada, en relación con el área intervenida, en función del umbral de variación de la profundidad freática para los tres escenarios (F, K y L). La extensión espacial de los efectos del uso del suelo tierra disminuyó a medida que aumentaba la precipitación. Por el contrario, el área impactada aumentó en un escenario con baja precipitación. En resumen, la misma área intervenida puede tener efectos totalmente diferentes en las napas adyacentes, dependiendo de las condiciones climáticas.

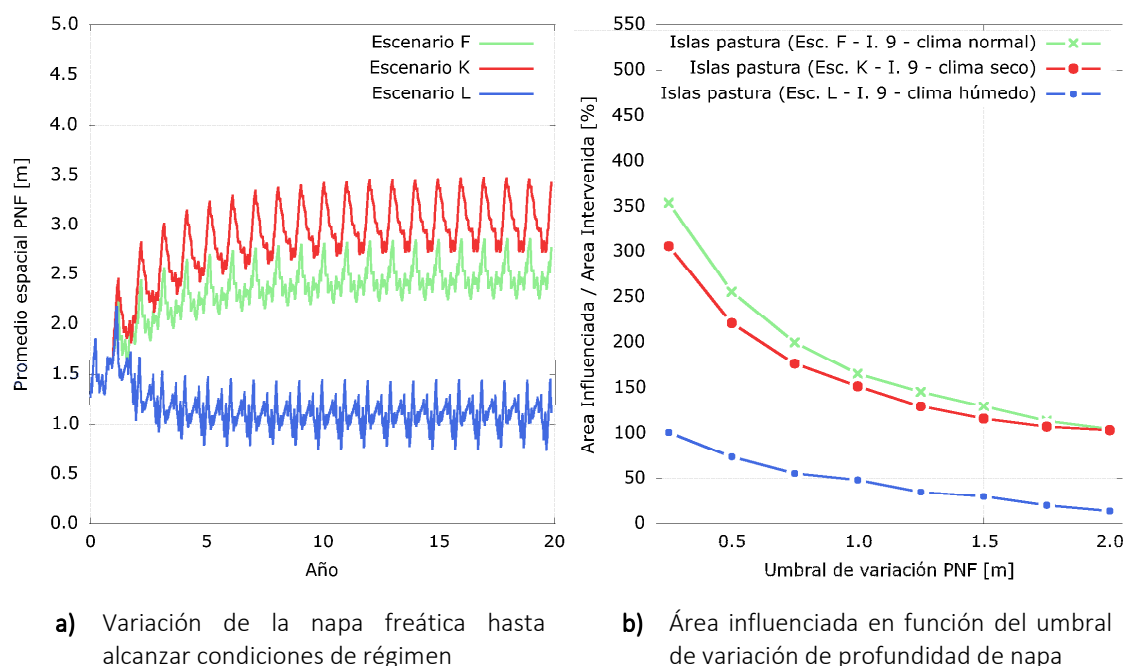


Figura 6.9. Impactos de la variabilidad climática en condiciones de precipitaciones medias (Escenario F), secas (Escenario K) y húmedas (Escenario L).

6.5 Conclusiones del capítulo

En este capítulo se evaluaron las dinámicas temporales y espaciales de las profundidades freáticas en la SA1. Un aspecto novedoso de los resultados que se presentaron es la escala espacial (relativamente grande) de la zona de estudio. Si bien existen trabajos anteriores que han examinado los vínculos entre el uso del suelo y la napa freática en zonas planas, estos estudios a menudo se han basado en mediciones puntuales realizadas a nivel de campo o parcela (Nosetto et al., 2013; Mercau et al., 2015; Zipper et al., 2015). En contraposición, los análisis aquí presentados se basan en simulaciones para evaluar los efectos del uso del suelo y la variabilidad climática en una cuenca muy amplia (14.500 km²).

Los resultados de este capítulo muestran, como era de esperarse, que los usos del suelo que consumen más agua (pasturas y pastizales) conducen a una disminución en los niveles de la napa freática. Por el contrario, los cultivos anuales generalmente aumentan los niveles de la napa. Estos resultados respaldan la conclusión del capítulo anterior de que la expansión de los cultivos anuales y el desplazamiento de pasturas y pastizales ha llevado a un aumento de la recarga de agua subterránea y a menores profundidades de la napa freática en algunas partes de la llanura pampeana (Viglizzo et al., 2011; Nosetto et al., 2012).

Los análisis presentados son relevantes para explorar el alcance de la gestión activa de la napa freática a través de decisiones sobre el uso del suelo con el doble objetivo de: i) evitar los efectos negativos del agua subterránea en la producción agrícola e ii) intentar maximizar los impactos positivos (por ejemplo, "subsídios" del agua subterránea a los cultivos en períodos secos). Una contribución clave de este capítulo es la evaluación de las interdependencias entre los tomadores de decisión (productores) que comparten la napa freática. Estas interdependencias no solo tienen

implicancias físicas en los sistemas agrícolas/ganaderos de llanuras, sino también sociales. Por ejemplo, las interdependencias entre el agua subterránea y el uso del suelo pueden definir las relaciones sociales de los productores: las decisiones sobre el uso del suelo de un agricultor pueden influir positiva o negativamente en los rendimientos y los riesgos de inundación de los productores vecinos. Como se muestra en este capítulo, la intensidad de esta influencia depende de los niveles freáticos y de los volúmenes precipitados durante el ciclo de cultivo.

Los resultados también proporcionan evidencia preliminar sobre las limitaciones para el manejo de la profundidad de la napa freática través de decisiones sobre el uso del suelo. El primer problema es la propagación de los efectos del uso del suelo en la profundidad freática desde el lote (representado por las “islas” que se simularon) hasta el nivel de la subcuenca. A esta última escala se observa una influencia poco significativa si el uso del suelo se cambia solo en unas pocas áreas pequeñas. Este resultado indica que para modificar efectivamente la frecuencia de inundaciones y sequías a nivel de cuenca, los cambios en el uso del suelo serían necesarios realizarlos en todo el paisaje. Un segundo problema son los efectos acumulativos del uso del suelo: bajo forzantes climáticos constantes, las condiciones de régimen en la profundidad de napa se alcanzan después de 10-15 años, dependiendo del tipo de cultivo. Esto sugiere que el cambio en el uso del suelo, dirigido a gestionar las aguas subterráneas a nivel de cuenca, no solo debe ser en todo el paisaje sino también persistente en el tiempo.

En resumen, en este capítulo se evaluaron las interacciones no lineales entre el uso del suelo, el clima y las aguas subterráneas en zonas de llanuras. Los resultados sugieren que, aunque los productores podrían tratar de controlar los niveles de agua subterránea a través de diferentes estrategias del uso del suelo, la efectividad estaría sujeta a las incertidumbres asociadas al clima. Además de la complejidad del sistema físico, la gestión de la napa freática requeriría la disposición de los productores para adaptar sus decisiones sobre el uso del suelo y hacerlo en forma coordinada. Si bien las simulaciones presentadas en este capítulo muestran claramente las interdependencias entre productores aledaños y los efectos del uso del suelo en la napa freática, entrevistas a diferentes productores de la zona pampeana sugieren que, en la actualidad, los mismos no están completamente conscientes de los impactos que tienen las decisiones que toman respecto al uso del suelo en las napas, y menos aún sobre las interdependencias entre ellos (Arora et al., 2016).

Los resultados presentados en este capítulo tienen ciertas limitaciones, relacionadas con la modelación de la toma de decisiones de los productores y los forzantes climáticos. Para poder profundizar los resultados y el entendimiento de la interacción entre la hidrología, los usos del suelo y la toma de decisiones de los productores se presenta en el capítulo siguiente el desarrollo de un modelo integrado que acopla al modelo hidrológico un modelo de agentes que simula la toma de decisiones de los productores, un modelo generador de climas sintéticos y un modelo de cultivos para empezar a abordar los impactos productivos y económicos.

Capítulo 7

Sistema de Modelación Integrada (SMI) para evaluar el impacto hidrológico, económico y productivo de diferentes manejos agrícolas⁵.

*Érase una vez una coincidencia que había salido de paseo en compañía
de un pequeño accidente; mientras paseaban, encontraron una explicación,
tan vieja, que estaba toda encorvada y arrugada y parecía más bien una adivinanza*

“Silvia y Bruno”
Lewis Carroll

⁵ Los principales resultados de este capítulo están incluidos en García, G.A., García, P.E., Rovere, S.L., Bert, F.E., Schmidt, F., Menéndez, A.N., Nosetto, M.D., Verdin, A., Rajagopalan, B., Arora, P., Podesta, G.P. (2019). “A linked modelling framework to explore interactions among climate, soil water and land use decisions in the Argentine Pampas”. *Environmental Modelling & Software*. DOI: 10.1016/j.envsoft.2018.10.013.

Para seguir profundizando el análisis de las interacciones y las retroalimentaciones recíprocas entre las decisiones individuales del uso del suelo, la dinámica de las napas freáticas, los escenarios climáticos y los impactos emergentes de estas interacciones en el uso regional del suelo, la producción agrícola y los riesgos de inundaciones y sequías, se procedió a implementar un modelo integrado que dé cuenta de la complejidad del sistema y ofrezca respuestas cuantitativas de los impactos previamente mencionados. Este modelo integrado se desarrolló en el marco del proyecto *“From Farm Management to Governance of Landscapes: Climate, Water, and Land-Use Decisions in the Argentine Pampas”* financiado por la National Science Foundation (NSF) y participaron en el proceso, además del autor de esta Tesis, ingenieros informáticos (Ing. Santiago Rovere e Ing. Federico Schmidt, ambos consultores independientes), agrónomos (el Dr. Guillermo García, del CONICET y AACREA, y el Dr. Federico Bert, de AACREA y la FAUBA), especialistas en modelos de agentes (Dr. Guillermo Podestá, de la University Miami, y la Dra. Poonam Arora, del Manhattan College) y especialistas en modelos estocásticos (Dr. Andrew Verdin y Dr. Balaji Rajagopalan, ambos de la University of Colorado Boulder).

7.1 Zona de estudio (o subcuenca A de la cuenca del río Salado)

La aplicación del modelo integrado se realizó en la subcuenca A (de ahora en adelante SA) de la cuenca del río Salado, que incluye a la SA1 presentada en el Capítulo 2. Esta ampliación en la zona de estudio se basa en la necesidad de simular con el modelo integrado el accionar de una mayor cantidad de productores de manera de darles mayor sustento a los patrones regionales emergentes relacionados con el uso del suelo, la dinámica freática y los riesgos asociados a inundaciones y sequías.

La SA ocupa aproximadamente 6,9 millones de hectáreas (69.000 km²), extendiéndose unos 330 km de este a oeste y 360 km de norte a sur (Figura 7.1). Los partidos que componen la SA son: Adolfo Alsina, Bragado, Carlos Casares, Carlos Tejedor, Colón, Daireaux, Florentino Ameghino, General Arenales, General Pinto, General Viamonte, General Villegas, Guaminí, Hipólito Yrigoyen, Junín, Leandro N. Alem, Lincoln, Nueve de Julio, Pehuajó, Pellegrini, Rivadavia, Salliquelo, Trenque Lauquen y Tres Lomas (todos estos pertenecientes a la Provincia de Buenos Aires); General Roca, Chapaleufú, Maraco, Quemú Quemú y Catriló (todos estos pertenecientes a la Provincia de La Pampa); General López (perteneciente a la Provincia de Santa Fe) y Presidente Roque Sáenz Peña (perteneciente a la Provincia de Córdoba), tal como se muestra en la Figura 7.1.



Ing. Pablo E. García

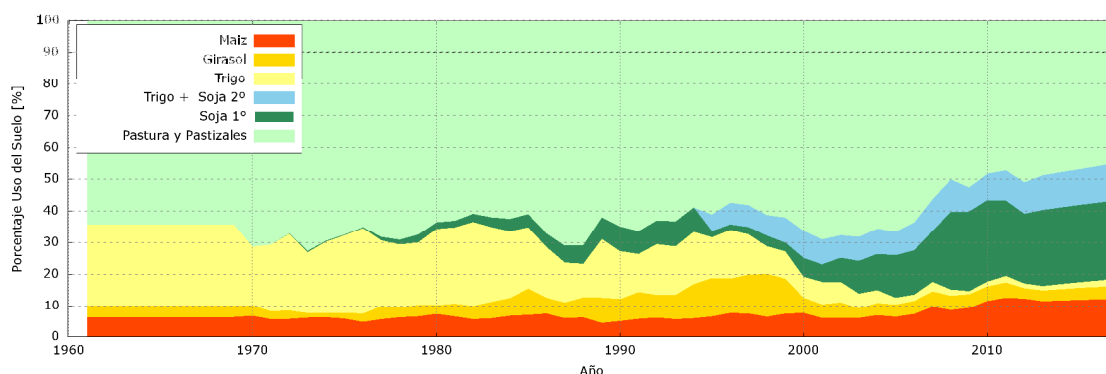


Figura 7.2. Evolución histórica del uso del suelo para la SA.

Como se mencionó en el Capítulo 2, la cuenca del Salado ha mostrado, desde la época colonial, ciclos de inundaciones y sequías alternadamente desplazando poblaciones e interrumpiendo las actividades productivas durante prolongados períodos. Las inundaciones fueron frecuentes a finales del siglo XIX y principios del XX, una época relativamente húmeda. En contraste, las sequías extensas fueron más frecuentes durante las décadas más secas de 1930 a 1950 (Herzer, 2003; Seager et al., 2010). Las inundaciones en la mitad occidental de la Pampa (principalmente en la SA) entre 1997 y 2003 dejaron más de una cuarta parte del área bajo el agua, reduciendo a la mitad la producción de granos, dañando numerosa infraestructura y afectando la calidad del suelo (Viglizzo et al., 2009). Las inundaciones que perduran varios meses (e incluso algunos años), son características de esta región: ocurren cuando la napa freática alcanza la superficie luego de excesos de precipitaciones sostenidos (Kuppel et al., 2015; García et al., 2018).

7.2 Sistema de modelación integrada

7.2.1 Descripción general

Se desarrolló un Sistema de Modelación Integrada (SMI) para describir las interacciones y retroalimentaciones recíprocas entre escenarios climáticos plausibles, decisiones individuales de uso del suelo, la dinámica de las napas freáticas y los impactos emergentes de estas interacciones en el uso regional de la tierra, la producción agrícola y los riesgos de inundaciones y sequías. Los diversos componentes del SMI y el flujo de datos y resultados entre ellos se ilustran en la Figura 7.3. Los detalles sobre los diferentes componentes se presentan en las secciones siguientes.

Un componente fundamental del SMI es el modelo hidrológico, utilizado para capturar los vínculos físicos y biológicos entre los cultivos y las aguas superficiales y subterráneas. Sin embargo, la producción de información relevante para el diálogo ciencia-política también requiere una comprensión profunda de las decisiones humanas y de los contextos económicos y sociales en los que se integran las decisiones de producción. Debido a que los humanos y sus elecciones influyen y están influenciados por el clima, las napas y los cultivos, se acopló a los modelos biofísicos un modelo basado en agentes de decisiones de uso del suelo y producción

agrícola, siendo otro componente importante del sistema integrado, que incluye descripciones realistas del comportamiento humano, toma de decisiones e interacciones sociales. Otros componentes del sistema integrado generan los forzantes necesarios (por ejemplo, múltiples realizaciones climáticas sintéticas de paso diario), permiten el post procesamiento y la visualización de los resultados del sistema, y proporcionan un entorno computacional para ejecutar gran cantidad de simulaciones con relativa facilidad.

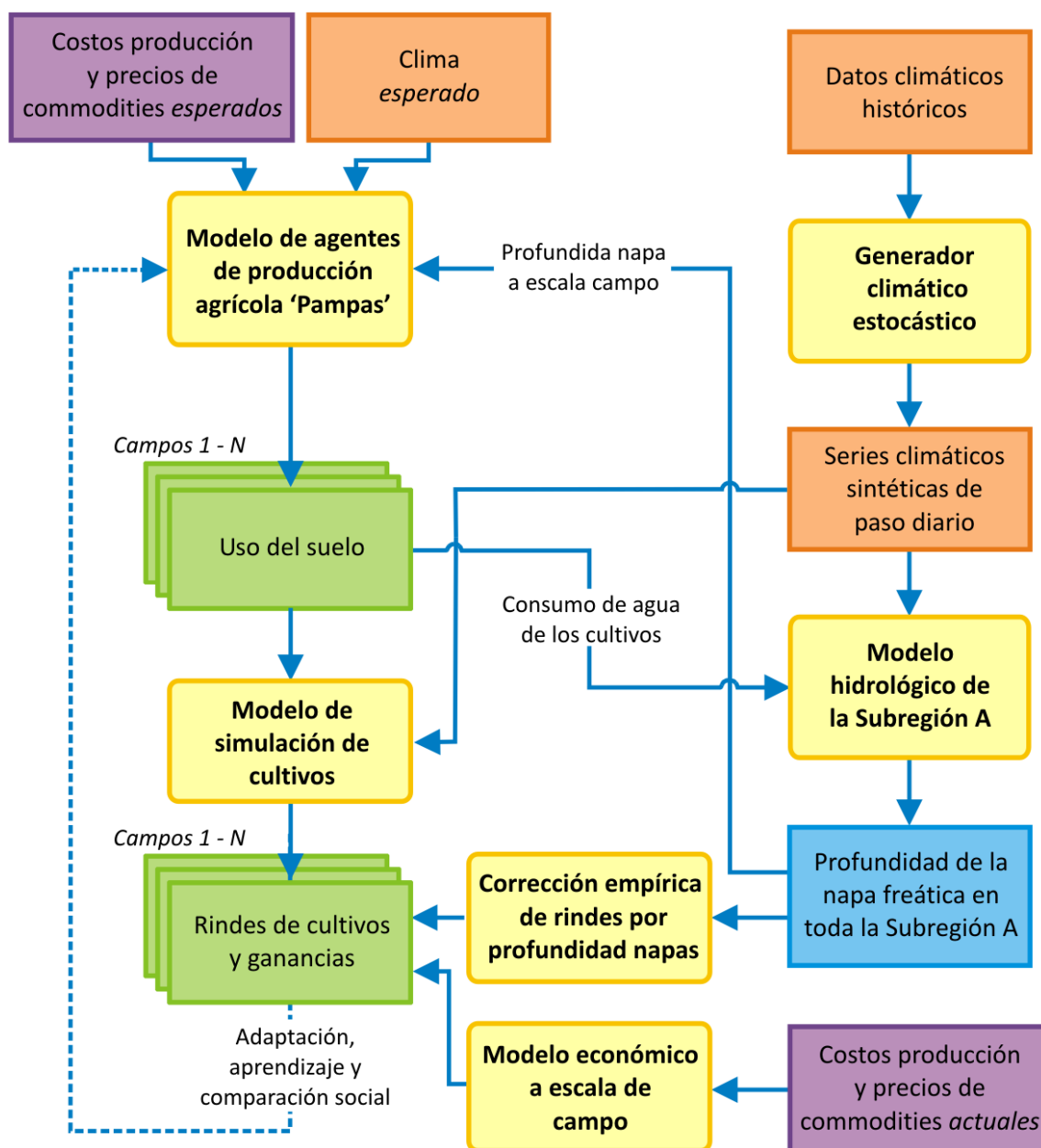


Figura 7.3. Sistema de Modelación Integrada (SMI). Los cuadros amarillos indican los componentes principales del SMI, los cuadros naranjas indican las entradas climáticas, los cuadros púrpuras indican las entradas económicas, los cuadros verdes indican los resultados del modelo Pampas a nivel de campo y el cuadro azul indica los resultados hidrológicos del MIKE SHE. Los textos a lo largo de las líneas indican intercambios de información y resultados entre los componentes (Adaptado de García et al, 2019).

7.2.2 Componentes del Sistema de Modelación Integrada

7.2.2.1 *Modelo hidrológico de la subcuenca A*

A partir del modelo hidrológico de la SA1, se desarrolló un modelo hidrológico de la SA, extendiendo el anterior, y tomando como referencia los modelos desarrollados en el 'Plan de Desarrollo Integral del Río Salado: Estudio de Impacto Ambiental, Social y Territorial' o PDIRS (UTN-FRA, 2007; INA, 2012).

La SA se discretizó en celdas cuadradas de 5 km de lado (es decir, cada celda tiene un área de 2.500 hectáreas), obteniéndose con este paso espacial alrededor de 2.800 celdas. La discretización adoptada surge como un compromiso entre una resolución espacial suficiente para describir los procesos de interés y los recursos informáticos disponibles para que los tiempos de cálculos no sean excesivos. El Modelo Digital del Terreno (MDT) de la cuenca se basó en los datos de la *Shuttle Radar Topographic Mission* o SRTM (Farr et al., 2007). Estos datos fueron filtrados y sus tendencias regionales corregidas utilizando las curvas de nivel topográfico provistas por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) de Argentina (Badano, 2010; INA, 2012). La elevación de la SA disminuye de 140 m.s.n.m. en el extremo occidental a unos 60 m.s.n.m. en el este, con una pendiente regional de aproximadamente 0,03%. La SA está ampliamente cubierta por depresiones generadas por el viento, donde el agua se almacena temporalmente después de los eventos de lluvia. Sin embargo, el área típica de estas depresiones es mucho más pequeña que el tamaño de celda del modelo. Por lo tanto, las depresiones se consideraron como abstracciones iniciales de agua de la celda correspondiente.

Se incluyeron dos tipos principales de suelo con propiedades bastante diferentes (conductividad horizontal y vertical, humedad saturada y residual del suelo), definidos como perfiles verticales desde la superficie del suelo hasta 40 m debajo de la superficie. Cada suelo se asoció con una formación geológica diferente. Se representaron tres capas hidrogeológicas (Post-Pampeana, Pampeana y Puelche) apoyadas sobre una capa prácticamente impermeable (Halcrow and Partners, 1999). Los detalles sobre los tipos de suelo y las capas hidrogeológicas se pueden ver en INA (2012) y García et al. (2018). La condición inicial de la zona no saturada se establece mediante un perfil de presión de equilibrio (DHI, 2012b).

7.2.2.1.1 *Calibración del modelo hidrológico*

Al igual que en modelo hidrológico de la SA1, la calibración se llevó a cabo ajustando las series temporales de niveles freáticos calculados a los registros históricos disponibles para diversas estaciones, minimizando el error medio cuadrático (RMSE) como indicador global de ajuste. Como parámetros de calibración se utilizaron los correspondientes a las curvas de retención y de conductividad hidráulica de la zona no saturada (García et al., 2019). Para la verificación del modelo se utilizó la serie de área inundada generada por el *Servicio de Información y Alerta Hidrológico (SlyAH)* del *Instituto Nacional del Agua (INA)* a partir del procesamiento de imágenes MODIS.

Los datos de profundidades freáticas utilizados para el proceso de calibración fueron obtenidas de Instituciones públicas (como el *Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria*) y de productores particulares. Estas observaciones se encuentran compiladas en la *red MATE* y se

encuentran disponibles on line en forma libre y gratuita (<http://red-mate.agro.uba.ar/>). En el área comprendida por la SA se dispusieron de 124 freáticos, aunque la gran mayoría solo contaba con algunos pocos datos, por lo que se descartaron para utilizar en la calibración del modelo. Los freáticos seleccionados tienen varios años de datos, registran diferentes ventanas temporales y se encuentran distribuidos espacialmente en toda la SA (Ver Figura 7.4).

Para las simulaciones de calibración se utilizaron como forzantes del modelo series climáticas sintéticas de paso diario, producidas por el generador climático estocástico descrito en la Sección 7.2.2.3. Se produjeron diez realizaciones climáticas con características estadísticas similares a las de los datos observados en el período 1961-2015 (Verdin et al., 2018; Garcia et al., 2019).

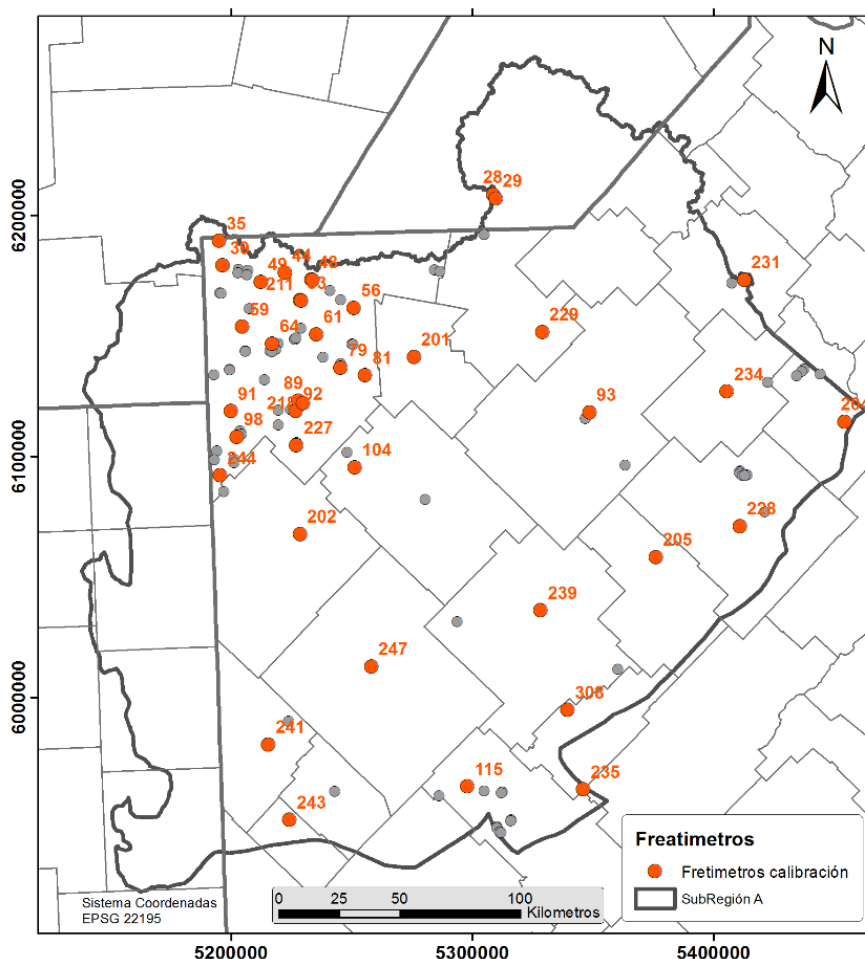
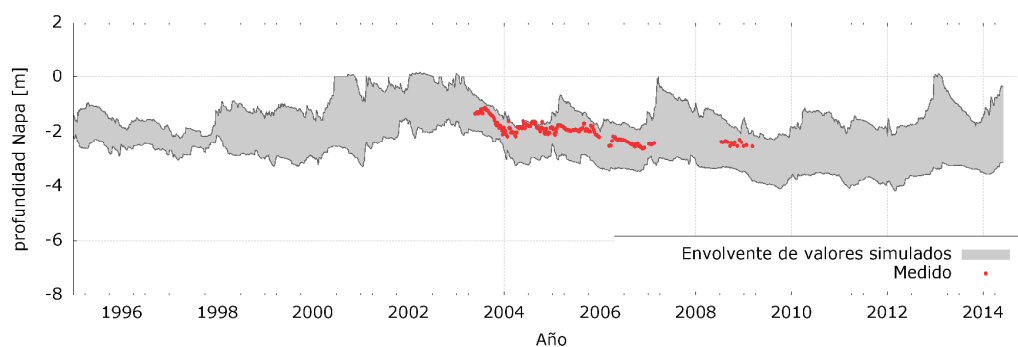


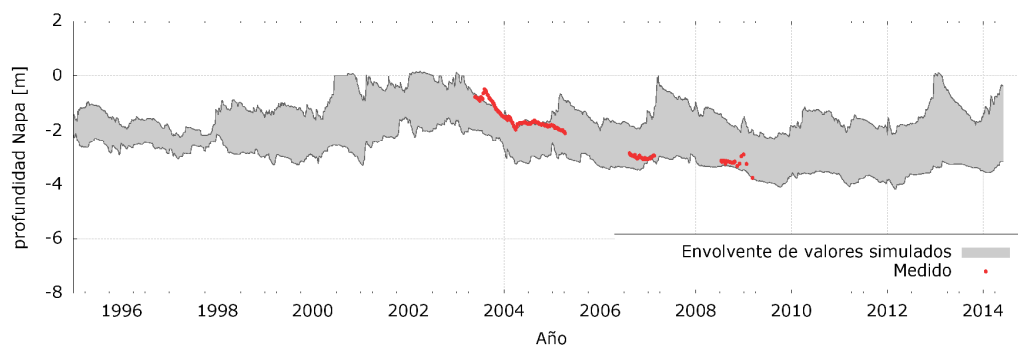
Figura 7.4. Freáticos utilizados en la calibración del modelo hidrológico (círculos naranjas) y freáticos descartados por tener pocos datos observados (círculos grises).

En la Figura 7.5 se presentan las series de niveles freáticos comparados con los datos observados para los distintos freáticos disponibles. Se puede ver un acuerdo general muy razonable, destacando que el modelo reproduce satisfactoriamente la dinámica del agua subterránea observada, capturando la modulación temporal de los registros (con sus respectivas subidas y

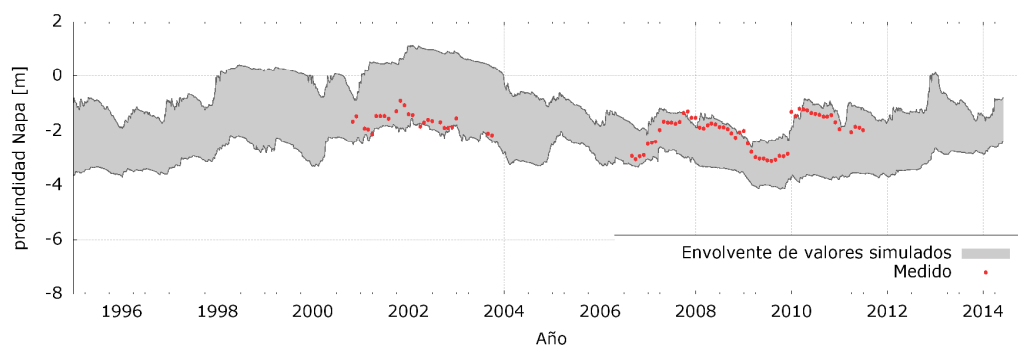
bajadas de los niveles freáticos). La banda gris de cada uno de los gráficos de la Figura 7.5 representa el rango de variación del nivel freático para las 10 realizaciones climatológicas sintéticas utilizadas como forzante del modelo (recordamos que cada una de esas realizaciones presentan estadísticos similares a los datos observados en el período 1961-2015 y cada una de ellas es igualmente probable). Analizando las comparaciones entre los datos observados y modelados, se observa que los niveles freáticos se encuentran principalmente dentro de las envolventes de los valores simulados con el modelo, lo que sugiere que los niveles simulados utilizando el clima sintético son consistentes con los niveles freáticos observados.



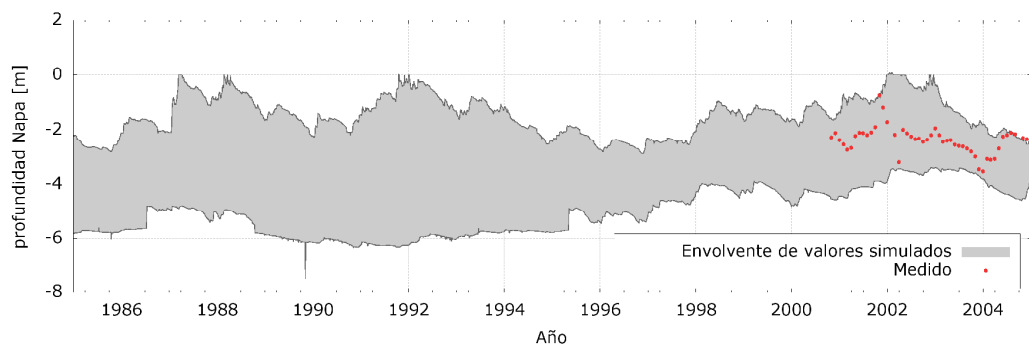
a) Freatímetro #28



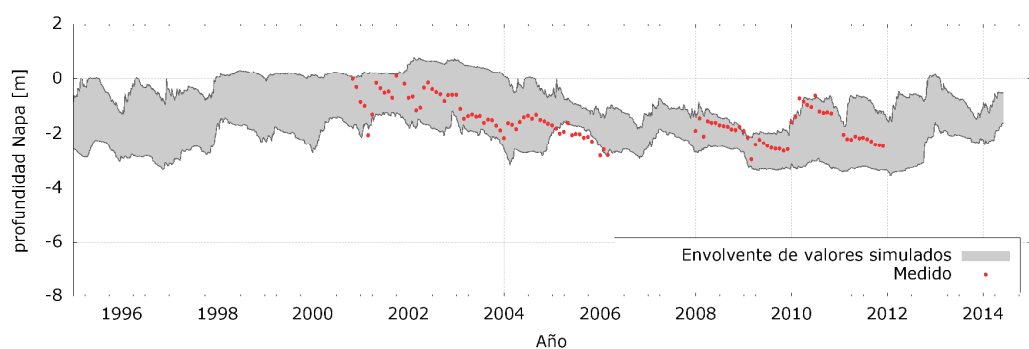
b) Freatímetro #29



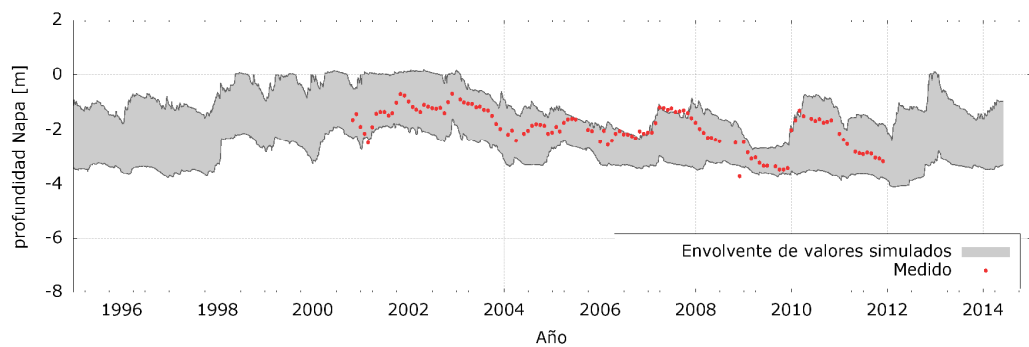
c) Freatímetro #35



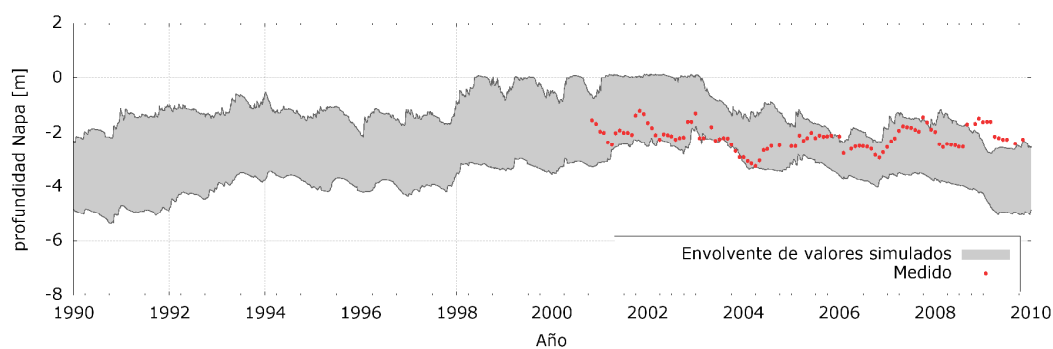
d) Freatímetro #39



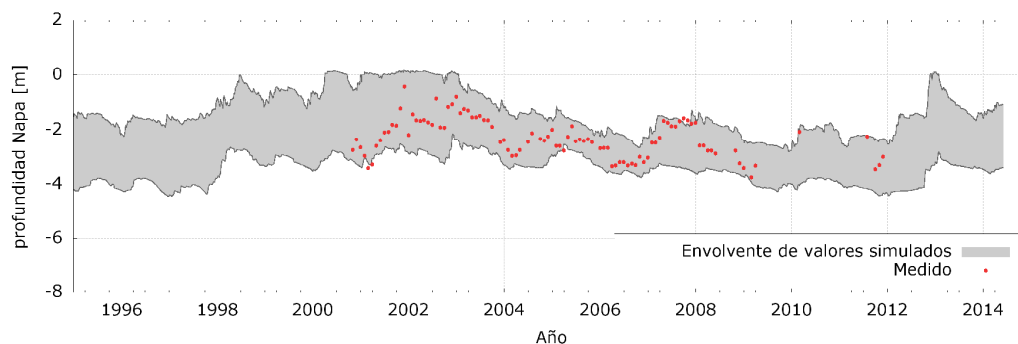
e) Freatímetro #44



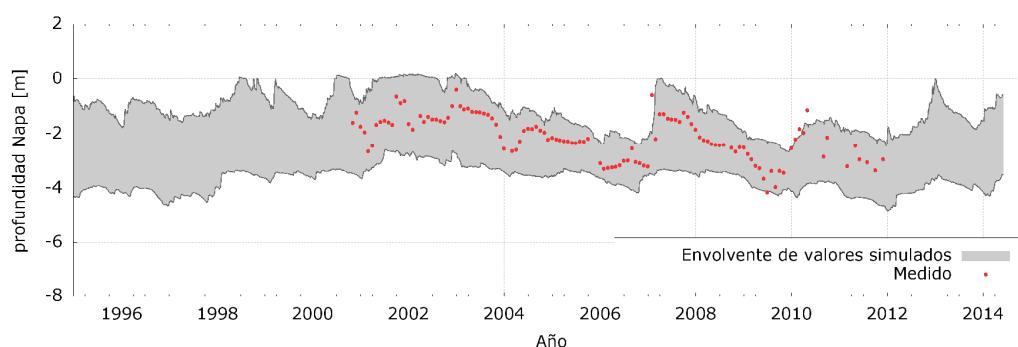
f) Freatímetro #48



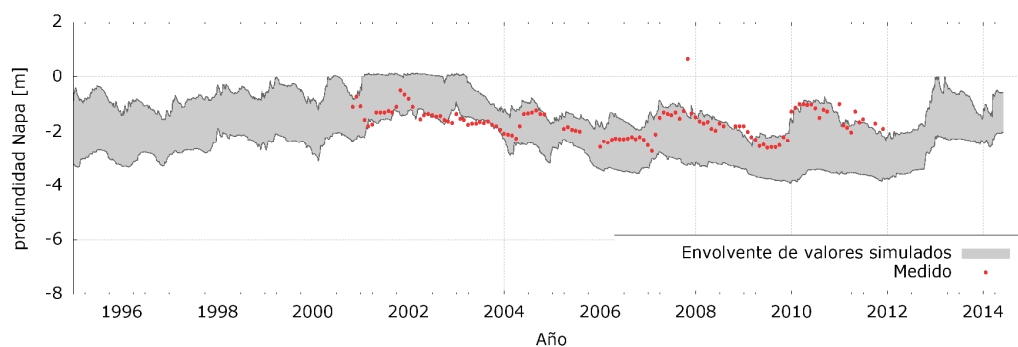
g) Freatímetro #49



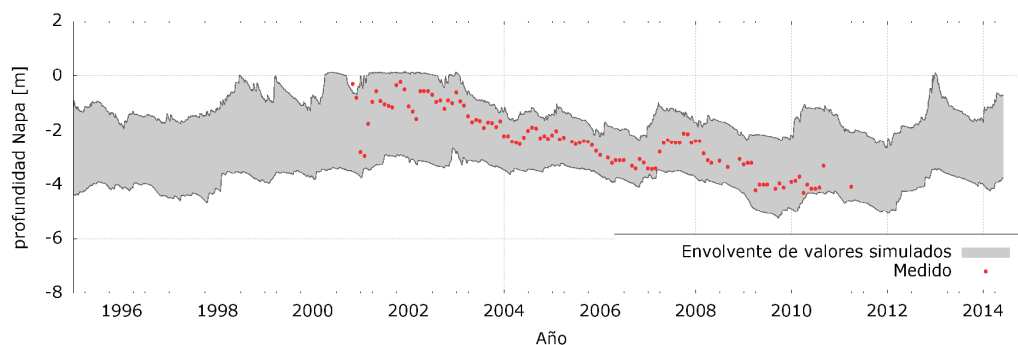
h) Freatímetro #53



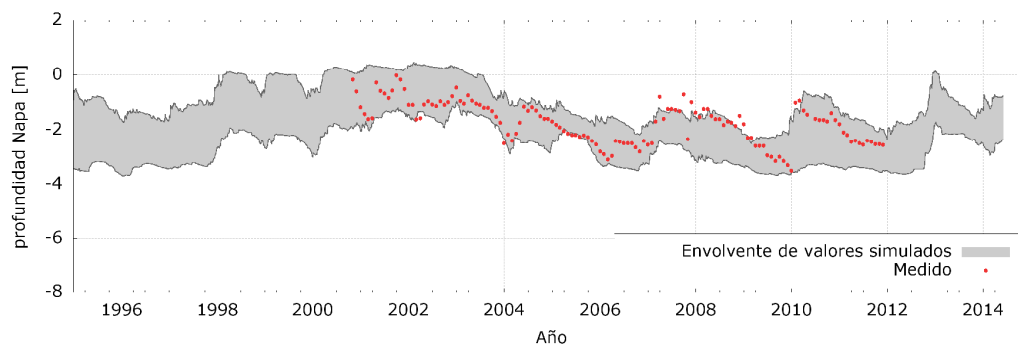
i) Freatímetro #56



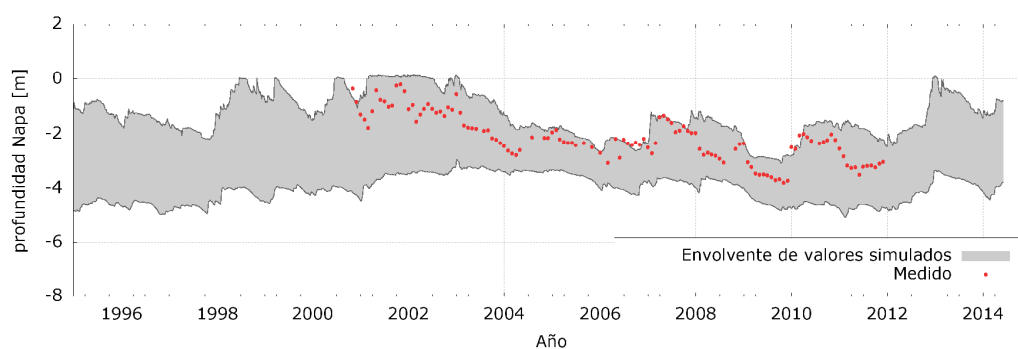
j) Freatímetro #59



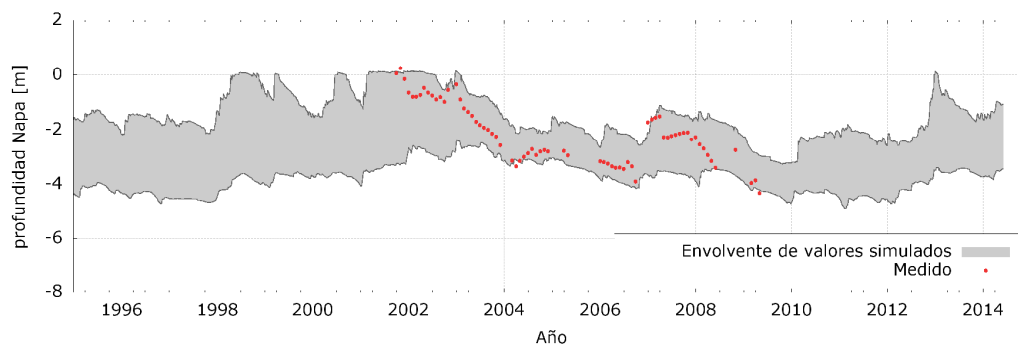
k) Freatímetro #61



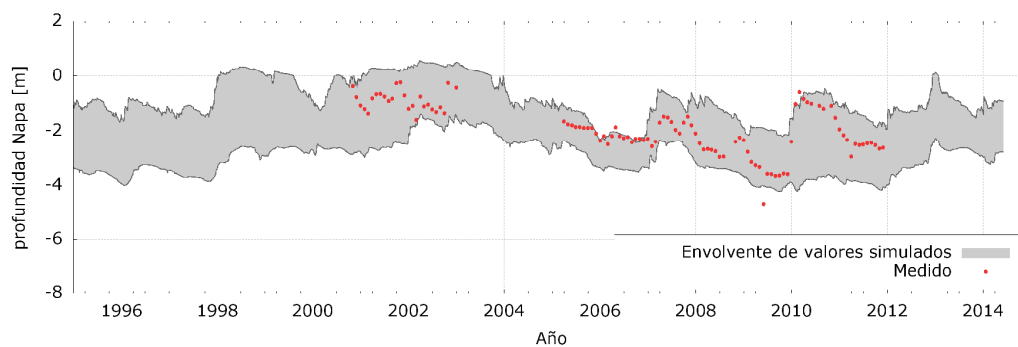
l) Freatímetro #64



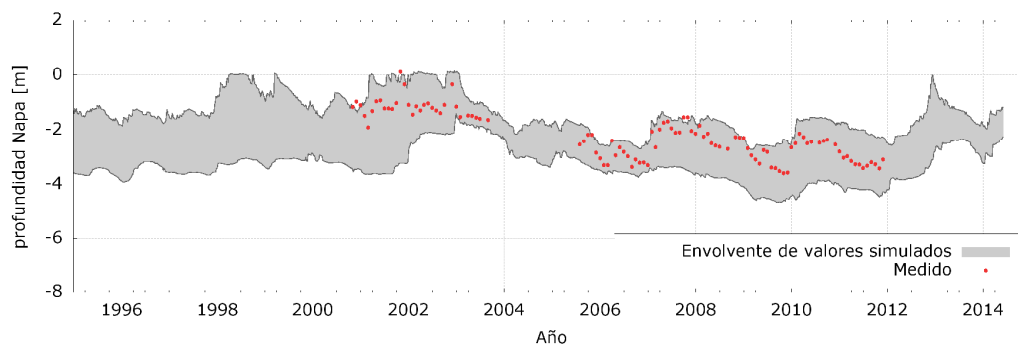
m) Freatímetro #79



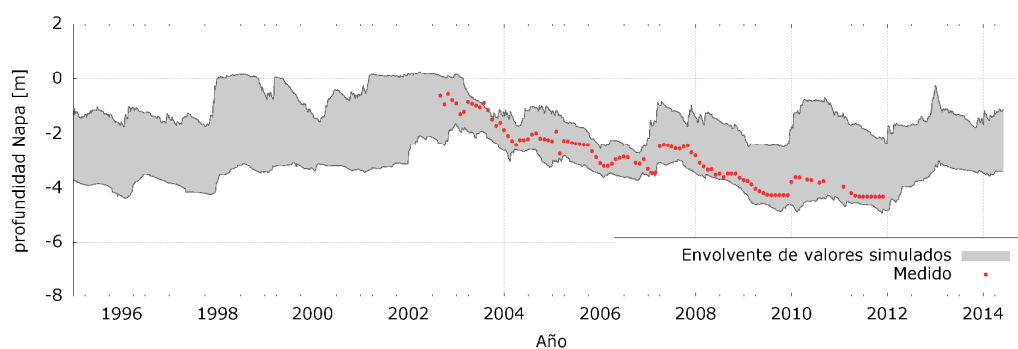
n) Freatímetro #81



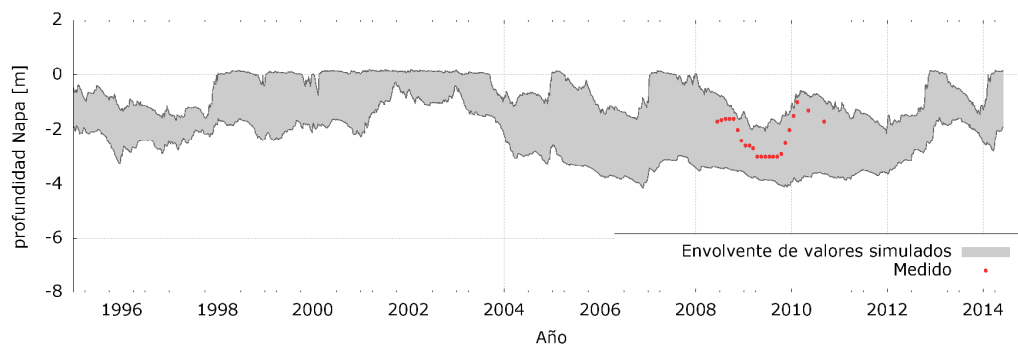
o) Freatímetro #89



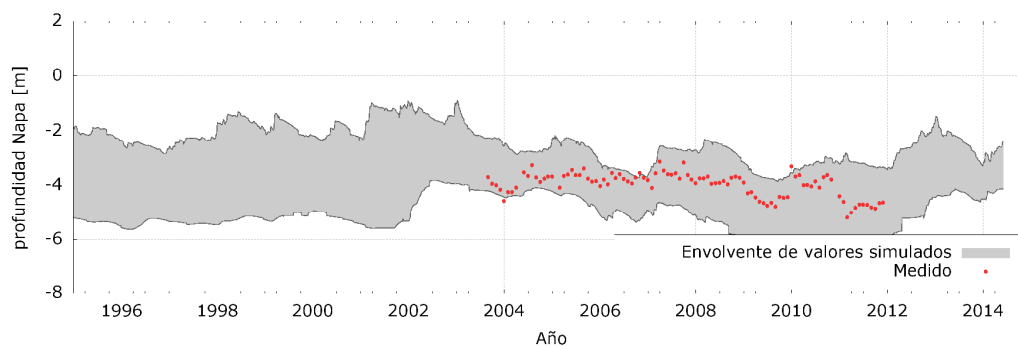
p) Freatímetro #91



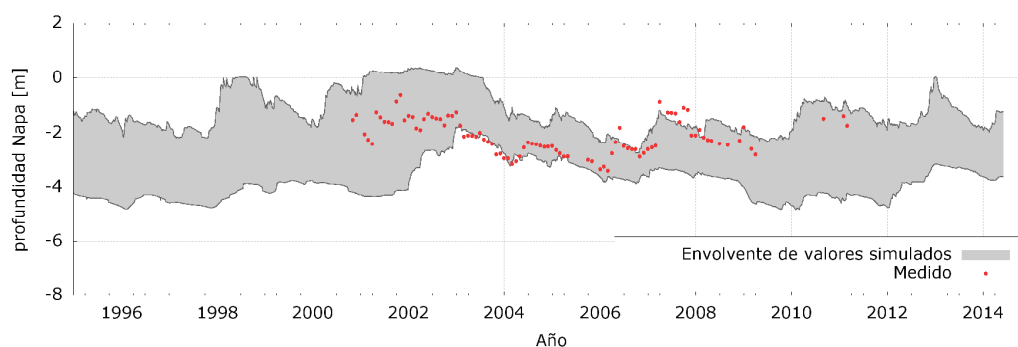
q) Freatímetro #92



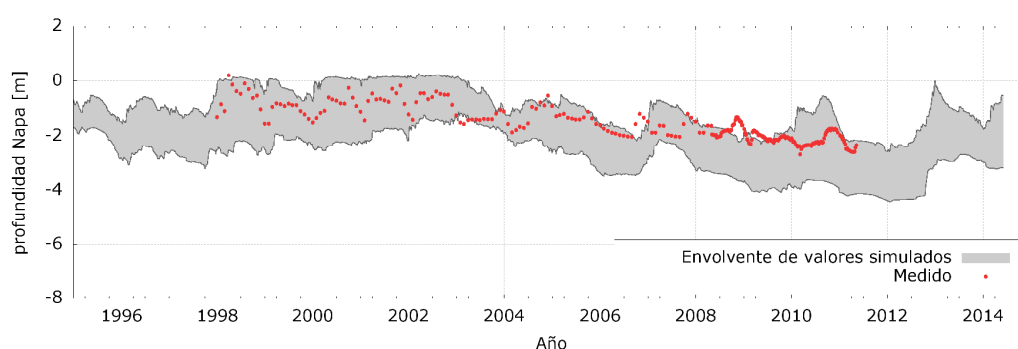
r) Freatímetro #93



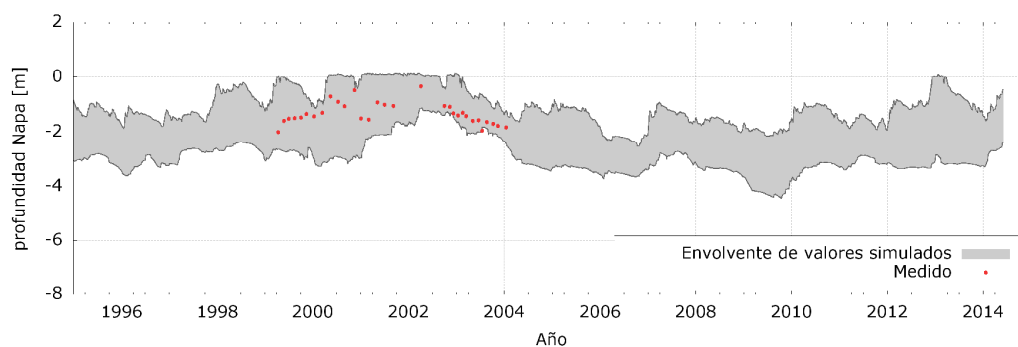
s) Freatímetro #98



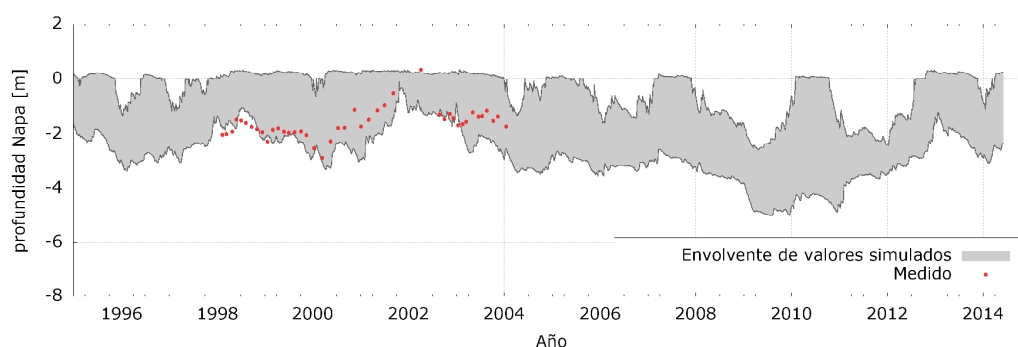
t) Freatímetro #104



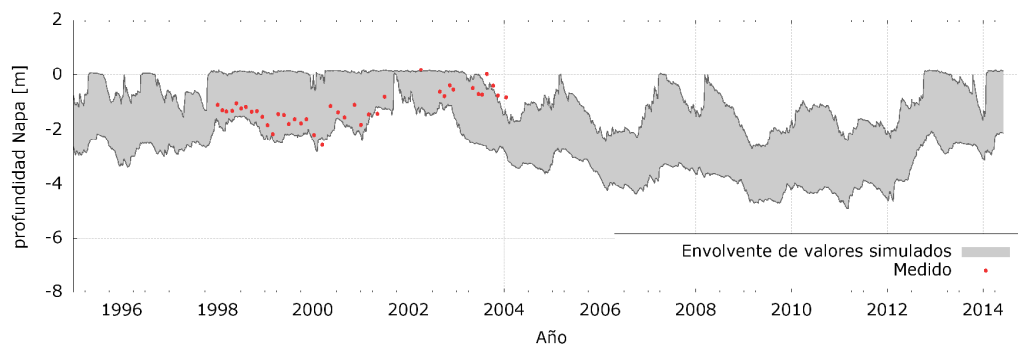
u) Freatímetro #115



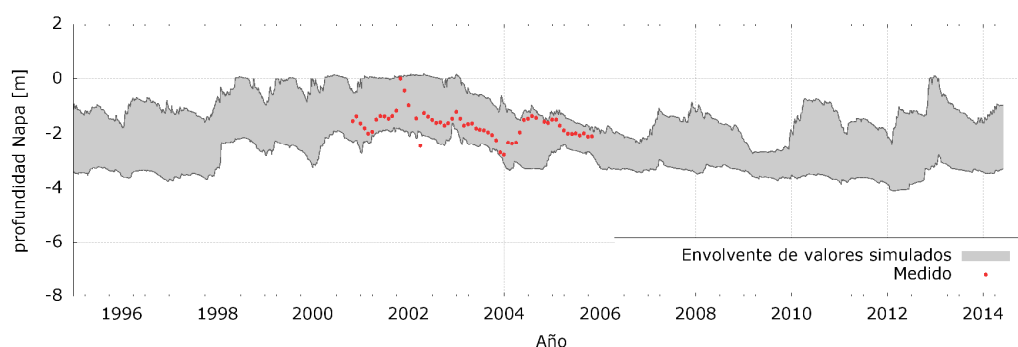
v) Freatímetro #202



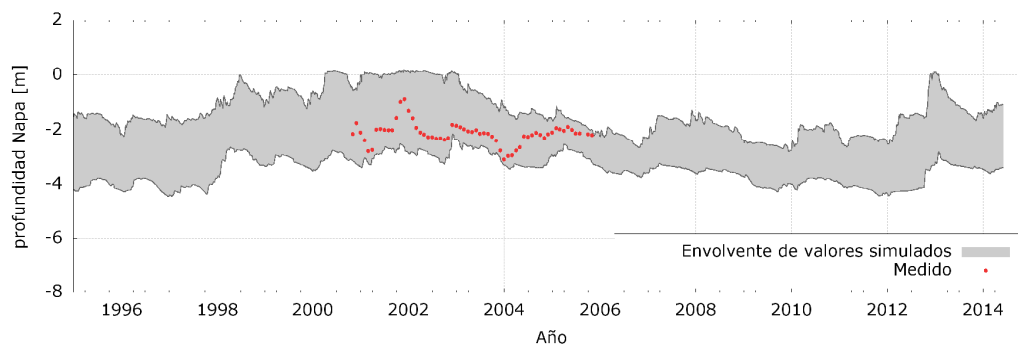
w) Freatímetro #204



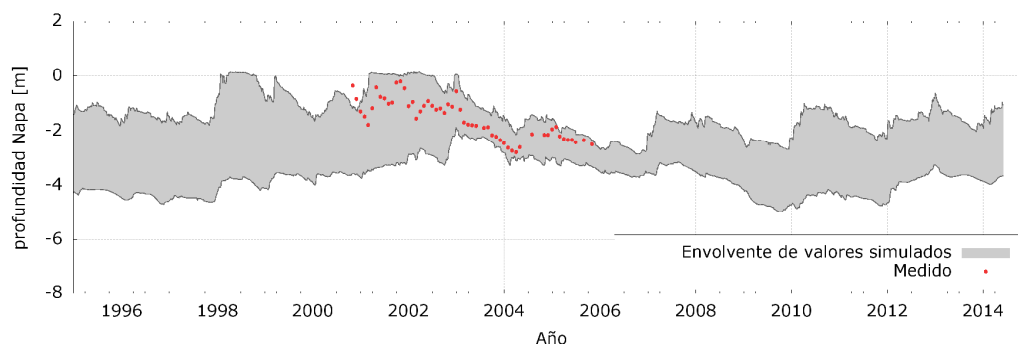
x) Freatímetro #205



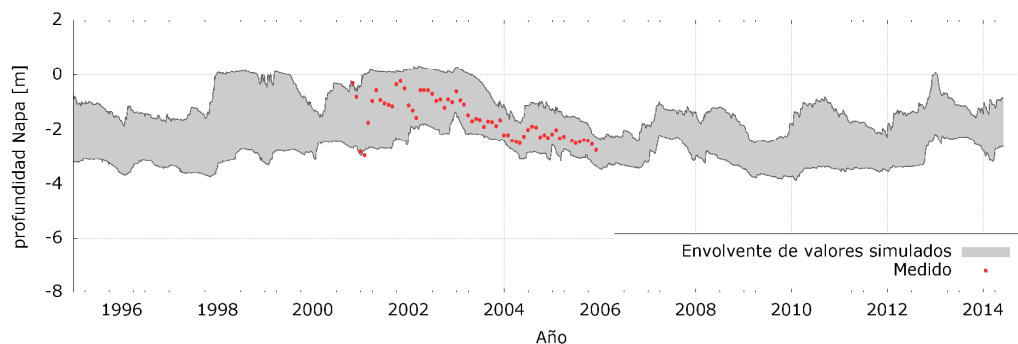
y) Freatímetro #209



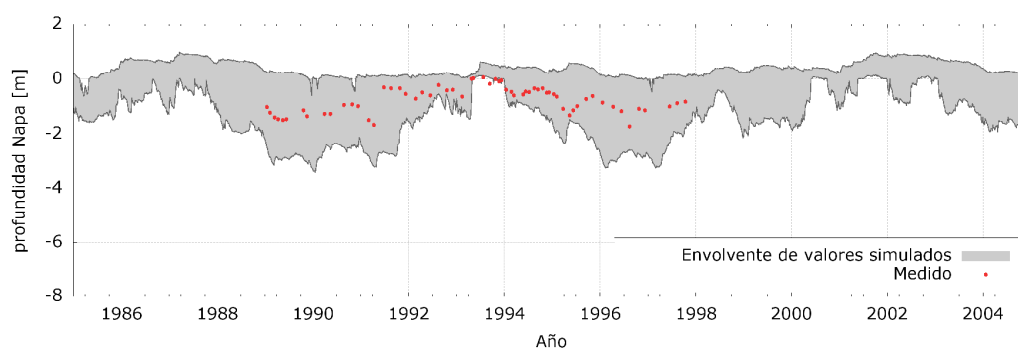
z) Freatímetro #211



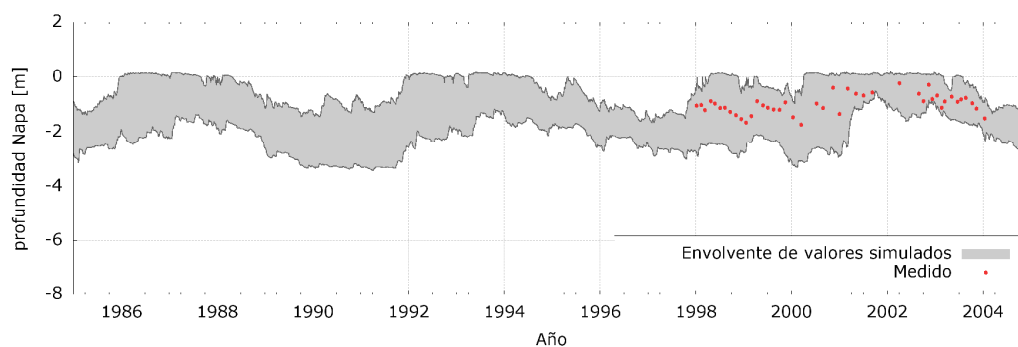
aa) Freatímetro #218



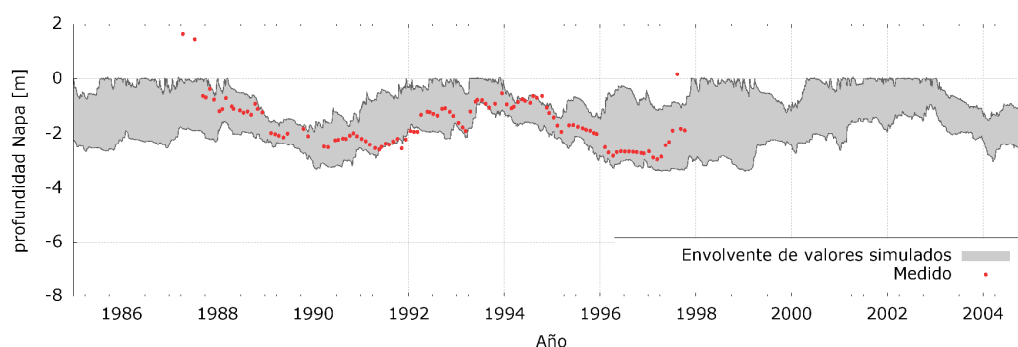
bb) Freatímetro #227



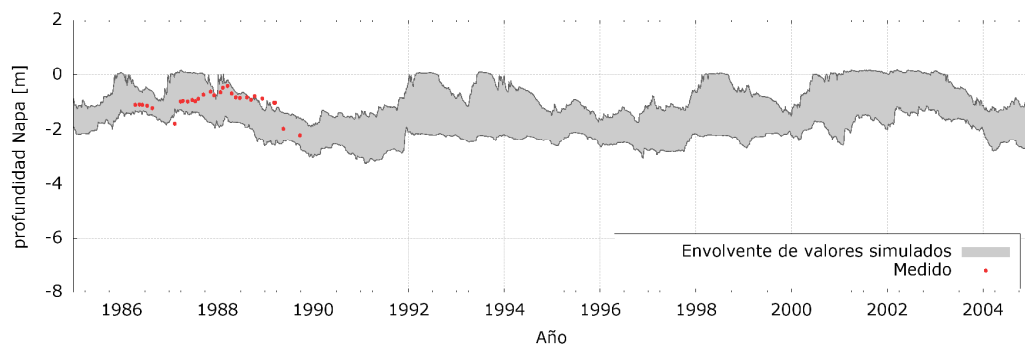
cc) Freatímetro #228



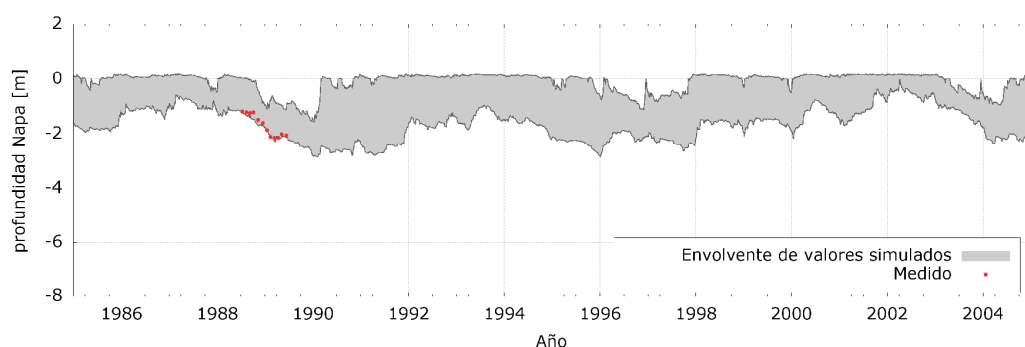
dd) Freatímetro #229



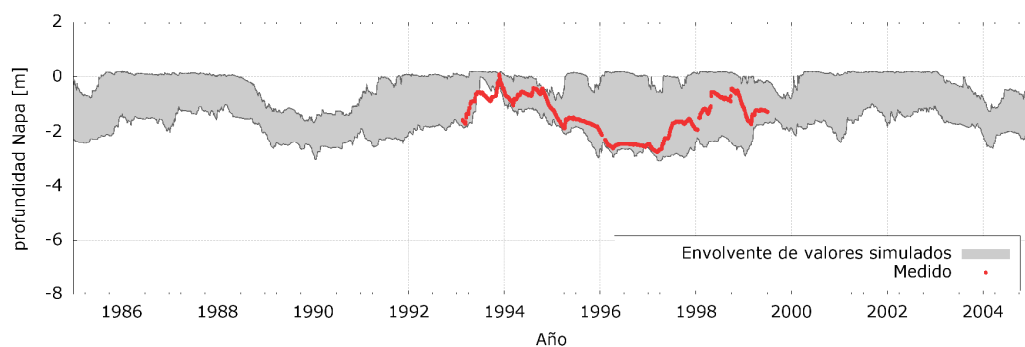
ee) Freatímetro #235



ff) Freatímetro #243



gg) Freatímetro #247



hh) Freatímetro #308

Figura 7.5. Calibración del modelo hidrológico de la SA. Valores medidos (puntos rojos) y simulados de profundidad de la napa freática (la banda gris incluye las 10 realizaciones climáticas sintéticas utilizadas) para diferentes freáticos distribuidos espacialmente en la cuenca y cada uno de ellos con registros de ventanas de tiempo diferentes.

Para verificar el modelo se realizó una comparación entre las áreas inundadas registradas mediante imágenes satelitales y las áreas inundadas obtenidas del modelo utilizando la metodología descrita en la Sección 5.5. La misma se presenta en la Figura 7.6 y en ella se pueden ver una banda gris que representa el rango de variación de las áreas inundadas para las 10 realizaciones climáticas sintéticas utilizadas como forzante del modelo, la media de esas áreas inundadas (línea azul) y los datos registrados provistos por el SlyAH del INA (círculos rojos). Se puede ver un acuerdo general satisfactorio, con el modelo capturando las inundaciones

registradas en la cuenca en los años 2001-2002, 2007 y 2013 (en general se observa una sobreestimación de las áreas inundadas, esto posiblemente atado a la resolución espacial del modelo).

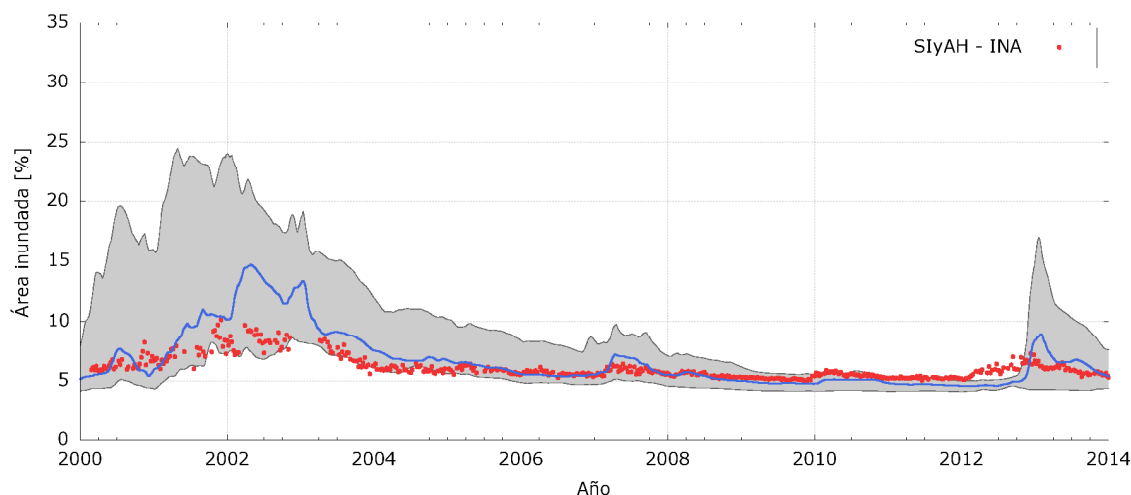


Figura 7.6. Verificación del modelo hidrológico de la SA. Valores observados (puntos rojos) y simulados de áreas inundadas en la SA (la banda gris incluye las 10 realizaciones climáticas sintéticas utilizadas y la línea azul representa la mediana de los resultados obtenidos con esas 10 realizaciones).

7.2.2.2 Modelo Pampas: modelo basado en agentes de decisiones del uso del suelo y producción agrícola

Los patrones o tendencias a gran escala (por ejemplo del uso del suelo o de los niveles freáticos para la SA) no se pueden predecir a partir de la suma de comportamientos individuales, ya que esto descartaría procesos como las interacciones sociales, el aprendizaje y la adaptación (Schreinemachers and Berger, 2006; Matthews et al., 2007). Para abordar estos procesos, frecuentemente dejados de lado, se decidió utilizar un modelo basado en agentes (Grimm and Railsback, 2005; Gilbert, 2008) para "transformar" las decisiones y resultados a nivel de lote en resultados a escala de cuenca (Verburg and Overmars, 2009).

El Modelo Pampas (MP), un modelo basado en agentes de decisiones del uso del suelo, diseñado para comprender los cambios estructurales en los sistemas agrícolas de la llanura Pampeana, fue incorporado al Sistema de Modelación Integrado (SMI) (Bert et al., 2010; Bert et al., 2011a; Rovere et al., 2016). El MP considera decisiones individuales (por ejemplo, asignación de usos del suelo, manejo agronómico, expansión o contracción del área cultivada por un productor) influenciadas por objetivos personales (por ejemplo, maximización de la utilidad económica) y características (por ejemplo, tolerancia al riesgo). Las decisiones se toman en el contexto de los condicionantes físicos (clima), económicos (precios de granos, costos) y sociales (vecinos, redes de pares).

Para ilustrar el papel del MP dentro del SMI, se describe a continuación brevemente la dinámica del modelo. Un ciclo de cultivo simulado representa el período comprendido entre el 1 de mayo de un año y el 30 de abril del siguiente año calendario.

- 1) Al comienzo de un ciclo de cultivo, los productores ajustan sus aspiraciones económicas en función del estado esperado de diversos factores (clima, precios de producción, costos de insumos). Luego, los productores deciden si pueden: (i) cultivar suelos adicionales (la única forma de expandir el área cultivada es alquilando campos/lotés adicionales), (ii) mantener el área cultivada en el ciclo anterior o, en cambio, (iii) liberar algo o toda el área previamente cultivada.
- 2) Posteriormente, los productores asignan en sus lotes un conjunto plausible y realista de actividades agrícolas (que se describen posteriormente en la Sección 7.2.2.4.2). Los agentes pueden tener diferentes estrategias de asignación de cultivos, como la imitación o la maximización de una función objetivo (Gotts et al., 2003; Gotts and Polhill, 2009).
- 3) Después de que se asignen los cultivos de cada productor, se obtiene el rendimiento de cada actividad seleccionada, que fue calculado previamente utilizando modelos de cultivos (ver Sección 7.2.2.4.2) y series climáticas observadas. Una nueva característica introducida en la versión actual del MP considera una corrección empírica de los rendimientos del cultivo basada en la profundidad promedio de la napa durante el ciclo (ver Sección 7.2.2.5). Los resultados económicos se calculan a partir de los rendimientos corregidos por el nivel freático y los precios y costos de granos especificados como insumos del modelo. El resultado final de los cálculos económicos es un valor actualizado para el capital de trabajo del productor al final del ciclo de producción.
- 4) Con base en los resultados económicos logrados, los productores actualizan su nivel de aspiración para el siguiente ciclo (Cyert and March, 1963; March, 1988; Lant, 1992). El nivel de aspiración es un valor especial que separa los resultados percibidos como éxitos o fracasos (Diecidue and Van De Ven, 2008), que se utiliza como entrada para las decisiones en el siguiente ciclo de cultivo. Los productores comparan su desempeño económico con el de sus pares, y usan esa información para actualizar su nivel de aspiración posterior (Herriott et al., 1985) e imitar a sus pares exitosos (Bala and Goyal, 1998).

El MP se validó en forma integral durante su desarrollo (Bert et al., 2014). Se pudo observar que El MP reprodujo correctamente la distribución y evolución del número y tamaño de lotes agrícolas, la tenencia de los campos y los cultivos observados en la llanura Pampeana (Bert et al., 2010; Bert et al., 2011b), así como los precios de alquiler de la tierra generados endógenamente (Bert et al., 2015).

7.2.2.2.1 *El entorno espacial del Modelo Pampas: definición de campos sintéticos*

El MP representa explícitamente múltiples campos operados por agentes propietarios o inquilinos. La distribución general de número y tamaño de campos simulados en la SA es consistente con los valores reportados en el Censo Agrícola Argentino 2002, que es la información más reciente y confiable sobre los tamaños de campos en Argentina. Debido a que el MP actualmente incluye reglas de decisión y cálculos económicos solo para usos agrícolas, los campos sintéticos incluyen solo áreas sembradas con cultivos anuales.

Desafortunadamente no se tienen accesos a los mapas catastrales que puedan mostrar los límites reales de cada campo. Por eso se crearon una cantidad de campos que cumplen con la cantidad y tamaño de los informados por el Censo Agrícola. Debido a que el MP solo incluye decisiones agrícolas, los campos simulados se colocaron solo en áreas aptas para la producción de cultivos, es decir, que tienen suelos con un índice de productividad (PI; Riquier et al., 1970) mayor a 32. El IP es un atributo asociado con cada unidad de suelo descrito en el atlas digital del suelo 1: 500.000 producido por INTA (INTA, 1990). Los suelos con $PI < 32$ se consideraron apropiados solo para la producción de ganado; por lo tanto se asumió que los mismos están cubiertos por pasturas o pastizales en todas las simulaciones. La Figura 7.7 muestra el índice de productividad de los suelos de la SA. En la Sección 7.2.2.2 se presenta una breve discusión de los suelos utilizados en las modelaciones.

Se simularon un total de 15.832 campos que abarcaban 3.792.720 ha sembradas con cultivos anuales (aproximadamente el 55% de la SA). Los mismos pueden verse en la Figura 7.8. El tamaño de los campos varió entre 20 y 5.040 ha. Se supuso que el resto de la cuenca (3.091.181 ha, o aproximadamente el 45% del área de la SA) estaba cubierto permanentemente por pasturas implantadas o naturales. Los agentes no toman decisiones de producción en estos suelos ni obtienen ganancias de ellos, sin embargo, estos suelos influyen en la dinámica hidrológica. Debe tenerse en cuenta el hecho de que aproximadamente el 45% de la SA siempre está cubierto por pasturas o pastizales al interpretar los resultados de las simulaciones. Las áreas urbanas y las rutas representan una proporción muy pequeña de la SA y, por lo tanto, no se las incluye.

7.2.2.2.2 *Implementación del Modelo Pampas en la subcuenca A: suelos representativos*

La información del suelo es un input de entrada de los modelos de simulación de cultivos. Los suelos representativos en la SA se definieron a partir de diversas fuentes de información. Primero, a partir del atlas de suelo del INTA (INTA, 1990) (con una escala 1: 500.000) se identificaron 36 unidades de suelo (cada una con 1 a 3 tipos de suelo) dentro de la SA. De estos, 19 tipos de suelo clasificados a nivel de subgrupo se consideraron aptos para la producción de cultivos (es decir, $PI \geq 32$). Sin embargo, el atlas no incluía la información del suelo necesaria para las simulaciones de cultivos (por ejemplo, características de textura, profundidades del horizonte). Para incluir las características detalladas del suelo, se utilizaron las cartas de suelo del INTA (escala 1: 50.000) que habían sido procesadas previamente para ser incluidas en el software de simulación de trigo *Triguero*[®] (Satorre et al., 2005). De estas cartas, se eligieron 60 series de suelo. Algunos tipos de suelo se asociaron con solo una serie dentro de la SA, mientras que los suelos más comunes (por ejemplo, Hapludolls típicos) incluyeron hasta ocho series diferentes. Cuando

un tipo de suelo involucra múltiples series, los rendimientos de los cultivos se simulan para cada serie y luego se promedian.

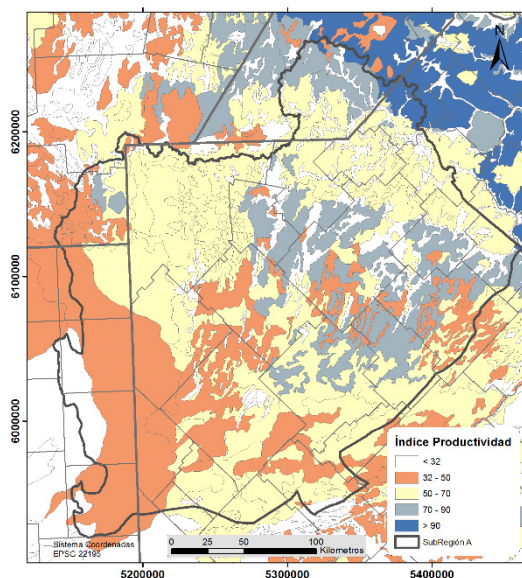


Figura 7.7. Índice de productividad de suelos de la SA.

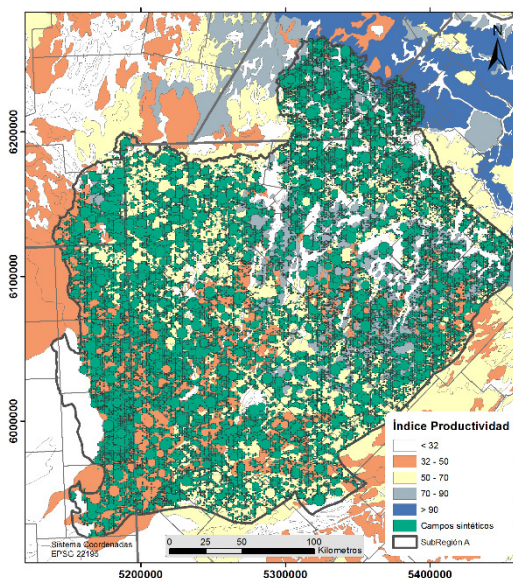


Figura 7.8. Campos sintéticos utilizados para el modelo de agentes 'Pampa'.

7.2.2.3 Generador climático espacial estocástico

Los modelos hidrológicos y de cultivos incluidos en el SMI requieren como forzantes diferentes variables climáticas a paso diario en una grilla espacial. Debido a la escasa distribución espacial de las estaciones meteorológicas en la SA, un enfoque alternativo para la interpolación de datos observados es realizar simulaciones con series meteorológicas sintéticas que tengan características estadísticas similares a las de los datos históricos. Para esto se utilizó el generador climático espacio-temporal desarrollado por Verdin et al. (2018) para producir series climáticas sintéticas en una cuadrícula de 25 x 25 km que abarca la SA, es decir, cada celda del modelo climático abarca 25 celdas del modelo hidrológico (que tienen 5 x 5 km de resolución). Esta herramienta permitió producir series sintéticas en 210 puntos, preservando la dependencia espacial en el clima diario. Como se pueden generar fácilmente múltiples secuencias climáticas igualmente probables, este enfoque permite una evaluación de impacto más exhaustiva que el uso del registro histórico, que representa una sola realización del proceso meteorológico (Richardson, 1981). Otra característica importante del generador climatológico es que puede aceptar covariables que pueden usarse para imitar las fluctuaciones observadas o para explorar escenarios climáticos futuros plausibles (por ejemplo, proyecciones con aumentos o disminuciones de la precipitación, etc.).

El generador climático fue 'alimentado' con datos diarios observados en 21 estaciones meteorológicas dentro o cerca de la SA (pertenecientes al SMN y al INTA) para el período 1961-2015. Luego se produjeron 10 realizaciones climáticas sintéticas de paso diario (precipitación y temperaturas máximas y mínimas), cada una de 55 años, coincidente con la duración del registro

climático histórico. Otras variables necesarias para el modelo hidrológico y el modelo de cultivos se estimaron a partir de las variables simuladas; por ejemplo, la radiación solar se calculó utilizando el método de Bristow and Campbell (1984) y la evapotranspiración potencial se estimó mediante el método propuesto por Droogers and Allen (2002). Estas 10 series generadas se denominaron "pseudohistóricas".

7.2.2.4 Modelos de simulación de cultivos

Los cultivos cumplen dos roles claves en nuestro Sistema de Modelación Integrado. Primero, los rendimientos de los cultivos influyen directamente en los resultados económicos logrados por los productores (otros factores como los precios de los productos básicos y los costos de los insumos se mantienen constantes) y, por lo tanto, tienen un fuerte impacto en las decisiones de uso del suelo. En segundo lugar, los cultivos influyen en el sistema hidrológico a través del consumo de agua subterránea.

Para simular el crecimiento, desarrollo y rendimiento de los principales cultivos en la SA - trigo (utilizado como cultivo anual y cultivo de cobertura), maíz, soja y girasol - se utilizaron los modelos incluidos en el paquete *DSSAT* (Jones et al., 2003). Los modelos incluidos en el *DSSAT* han sido previamente calibrados y validados para la región por diversos autores (Bert et al., 2007; Mercau et al., 2007; Monzon et al., 2007; Grassini et al., 2009; Aramburu Merlos et al., 2015). La información requerida para ejecutar los modelos *DSSAT* incluye series meteorológicas diarias, parámetros del suelo (consistentes con los utilizados en el modelo hidrológico), coeficientes genéticos del cultivo y una descripción del manejo del cultivo seleccionado.

7.2.2.4.1 Simulaciones de cultivos para generación de inputs del MIKE SHE

El índice de área foliar (LAI) y la profundidad de raíz de los cultivos (RD) son datos importantes utilizados por el *MIKE-SHE* para calcular la evapotranspiración real mediante el método de Kristensen and Jensen (1975). Para estimar los valores de LAI y RD en cada celda del modelo hidrológico se siguieron los siguientes pasos:

- 1) Primero, los valores diarios de LAI y RD para la soja, el maíz, el trigo y el girasol se simulaban utilizando el modelo *DSSAT*. Para cada cultivo, se simulaban 40 años utilizando el clima observado para Junín, una estación meteorológica ubicada dentro de la SA y un suelo representativo de dicha región (Hapludoll típico). Las 40 trayectorias simuladas de LAI y RD se promediaron en una sola serie para cada variable y cultivo. En contraste, las series LAI y RD para pasturas / pastizales se definieron utilizando datos de campo (García et al., 2017).
- 2) Luego, como dato de entrada para las simulaciones hidrológicas, se calcularon valores de LAI y RD "ponderados" para cada celda del *MIKE SHE* y para cada ciclo de cultivo. Estos valores resultaron de ponderar los valores promedio de LAI y RD para cada actividad (es decir, cada cultivo o pasture/pastizales) por la proporción del área de la celda ocupada por esa actividad en un ciclo de simulación dado. El uso del suelo para cada celda y ciclo había sido previamente seleccionado por los agentes durante las simulaciones del

Modelo Pampas o, como alternativa, se impuso como parte de alguna simulación particular (por ejemplo, si se suponía que toda la cuenca estaba cubierta por pasturas).

7.2.2.4.2 Simulaciones de cultivos para el Modelo Pampas

El MP incluye múltiples mecanismos a través de los cuales los agentes (productores) pueden seleccionar el uso del suelo para su campo. En cada ciclo, un productor selecciona el uso del suelo entre seis posibles manejos agrícolas (i) un cultivo de cobertura de larga duración no destinado a la cosecha seguido de soja de ciclo completo (*CCL-Sj*), (ii) un cultivo de cobertura de corta duración no destinado a la cosecha seguido de soja de ciclo completo (*CCC-Sj*) (Pinto et al., 2017), (iii) trigo seguido de soja de ciclo corto (*Tr-Sj*), (iv) soja de ciclo completo sin cultivo de cobertura (*Sj*), (v) maíz de siembra temprana (*MzTe*) y (vi) maíz de siembra tardía (*MzTa*). Es decir, el girasol no figura entre los usos del suelo que los agentes pueden seleccionar en el MP⁶. Se asume que el trigo para cosecha siempre fue seguido por un cultivo de soja de ciclo corto sembrada inmediatamente después de la cosecha del trigo; esta es una suposición muy realista para la SA (García et al., 2017). El manejo agronómico representativo para cada una de estas actividades (Tabla 7.1) se definió en colaboración con expertos técnicos de la *Asociación Argentina de Consorcios Regionales de Experimentación Agrícola (AACREA)*. La Tabla 7.1 también describe las condiciones iniciales del suelo y las variables más relevantes en el manejo de cultivos utilizados en las simulaciones *DSSAT*.

Para explorar todas las combinaciones posibles de series climáticas sintéticas, suelos y manejos agronómicos fue necesaria una gran cantidad de simulaciones de cultivos (aproximadamente 150.000 para toda la cuenca). Ejecutar estas simulaciones de forma manual habría sido una tarea extremadamente lenta y propensa a errores. Es por eso que se utilizó el sistema “*System for integrating Impact Models and Sectors*” (pSIMS) desarrollado por Elliott et al. (2014). El sistema pSIMS permitió utilizar infraestructura informática de alto rendimiento (cluster) para ejecutar todas las simulaciones preestablecidas.

⁶ Esto se debe a que el modelo de girasol en DSSAT – OILCROP-SUN 3.5 (98.0) – no está disponible en la última versión del DSSAT (v4.6) que es compatible con el pSIMS. Para la calibración del modelo hidrológico se usó una versión anterior del DSSAT, a fin de incluir el cultivo de girasol.

Tabla 7.1. Descripción de los distintos manejos agrícolas disponibles para los agentes (productores) de la SA en el Modelo Pampas. Se indican las condiciones iniciales del suelo y los datos más relevantes del manejo del cultivo utilizado en las simulaciones con el paquete DSSAT. Se utilizaron genotipos adaptados para la región. Tomado de García et al., 2019.

Uso del suelo	Cultivo	Condiciones iniciales del suelo			Manejo del Cultivo			
		Fecha (dda)	Agua (%ASD)	N (kg ha ⁻¹)	Fecha siembra (dda)	Tasa siembra (semillas m ⁻²)	Tasa fertilización N (kg N ha ⁻¹)	Aplicación herbicida (dda)
CCL - Sj	Trigo (cobertura)	121	100	50	121	330	60	295
	Soja	304	40	40	305	28	-	-
CCC - Sj	Trigo (cobertura)	121	100	50	121	330	50	253
	Soja	304	75	40	305	28	-	-
Tr -Sj	Trigo (cultivo)	121	100	50	166	330	80	-
	Soja	343	54	40	344	32	-	-
MzTe	Maíz	121	100	60	263	7	90	-
MzTa	Maíz	121	100	80	335	6	60	-
Sj	Soja	121	100	60	305	28	-	-

dda: día del año; ASD: agua suelo disponible; N: Nitrógeno; CCL: Cultivo cobertura largo; CCC: Cultivo cobertura corto; Sj: Soja; Tr: Trigo; MzTe: Maíz temprano; MzTa: Maíz tardío

7.2.2.5 Ajuste de los rindes y beneficios de los cultivos por efecto de la profundidad freática

El impacto de las napas en los rendimientos de los cultivos no son bien capturados por los modelos de cultivos *DSSAT*, a pesar de intentos existentes anteriores de acoplar los modelos *DSSAT* con modelos hidrológicos (Ma et al., 2006). Para dar cuenta de este efecto en el SMI fue necesario, por lo tanto, implementar una relación empírica para "corregir" los rendimientos simulados de los cultivos debido a la profundidad de la napa freática. Como se mencionó anteriormente, las napas pueden tener impactos en nulos, positivos o negativos en los cultivos, dependiendo de su profundidad (Nosetto et al., 2009; Zipper et al., 2015). Para parametrizar los impactos de la profundidad freática en el crecimiento y la producción de los cultivos durante un ciclo productivo se utilizaron datos de campo presentados en Nosetto et al. (2009). Estos impactos se ilustran en la Figura 7.9. Para cada uso del suelo simulado (por ejemplo, soja de ciclo completo) se realizaron dos simulaciones independientes con el modelo *DSSAT*. La primera simulación representó un "rendimiento limitado por agua" que dependía del agua almacenada en el suelo no saturado y de las precipitaciones durante el ciclo del cultivo. La segunda simulación, en cambio, excluyó las limitaciones de agua (es decir, el cultivo fue "regado" cuando el agua del suelo era insuficiente) y el resultado fue un "rendimiento potencial" (Fischer et al., 2014).

Los productores a menudo buscan una situación de compromiso entre maximizar las ganancias y minimizar el riesgo a escala de campo, en lugar de maximizar el rendimiento de cada cultivo implantado en sus lotes. Este comportamiento se traduce en manejos agrícolas que son económicamente apropiados pero insuficientes para maximizar los rendimientos. Para dar cuenta de esta situación se multiplicaron por 0,8, tanto los rendimientos potenciales como los limitados por agua, obteniendo así rendimientos "alcanzables" (Aramburu Merlos et al., 2015; Sadras et al., 2015). La Figura 7.9 muestra la relación entre los rendimientos alcanzables y la profundidad de napa promediada durante el ciclo productivo completo. La relación de estas cantidades fue el factor utilizado para producir los rendimientos corregidos por la profundidad de napa.

Se identificaron cuatro bandas distintas de profundidades freáticas (las profundidades varían para cada cultivo) con diferentes impactos en el rendimiento del cultivo (Figura 7.9).

- En la parte inferior (Banda 4), con napas freáticas profundas, el agua subterránea no es accesible para las raíces de las plantas y, por lo tanto, no influye en el crecimiento o rendimiento de los cultivos. Los rindes se mantienen constantes independientemente de la profundidad de la napa, pero pueden mostrar un rango de valores (banda roja más clara) dependiendo de la precipitación estacional (si las precipitaciones son altas, los rendimientos se aproximan a los valores potenciales alcanzables).
- Si la napa freática es menos profunda (Banda 3), el agua subterránea puede alcanzar las raíces a través del ascenso capilar (puntos azules en el perfil del medio) (Ayars et al., 2009). Este "subsidio" que dan las aguas subterráneas (Mejia et al., 2000; Lowry and Loheide, 2010; Zipper et al., 2017) ayuda a estabilizar los rendimientos de los cultivos de secano (acercándolos al rendimiento potencial alcanzable) si la precipitación es insuficiente

- Si la napa freática está en la profundidad óptima (Banda 2), el agua subterránea compensa cualquier déficit de lluvia y el cultivo no está limitado por el agua, por lo que se puede lograr un rendimiento potencial alcanzable. Las profundidades freáticas óptimas para el trigo, maíz y soja son, respectivamente, 0.7-1.4 m, 1.4-2.4 m y 1.2-2.2 m
- Si el nivel freático es muy poco profundo (Banda 1), los efectos positivos del agua subterránea desaparecen. Los anegamientos producen impactos negativos como ser la limitación de la actividad radicular, menor disponibilidad de nutrientes y dificultades para el desarrollo de los cultivos (Kahlow and Azam, 2002; Zipper et al., 2015). Los rendimientos, por lo tanto, disminuyen rápidamente con napas cercanas a la superficie. Finalmente, se produce un punto de inflexión cuando el nivel freático llega a la superficie: el agua libre fluye mucho más rápido, aumentando abruptamente la conectividad espacial y temporal de zonas bajas, lo que posiblemente desencadena grandes inundaciones.

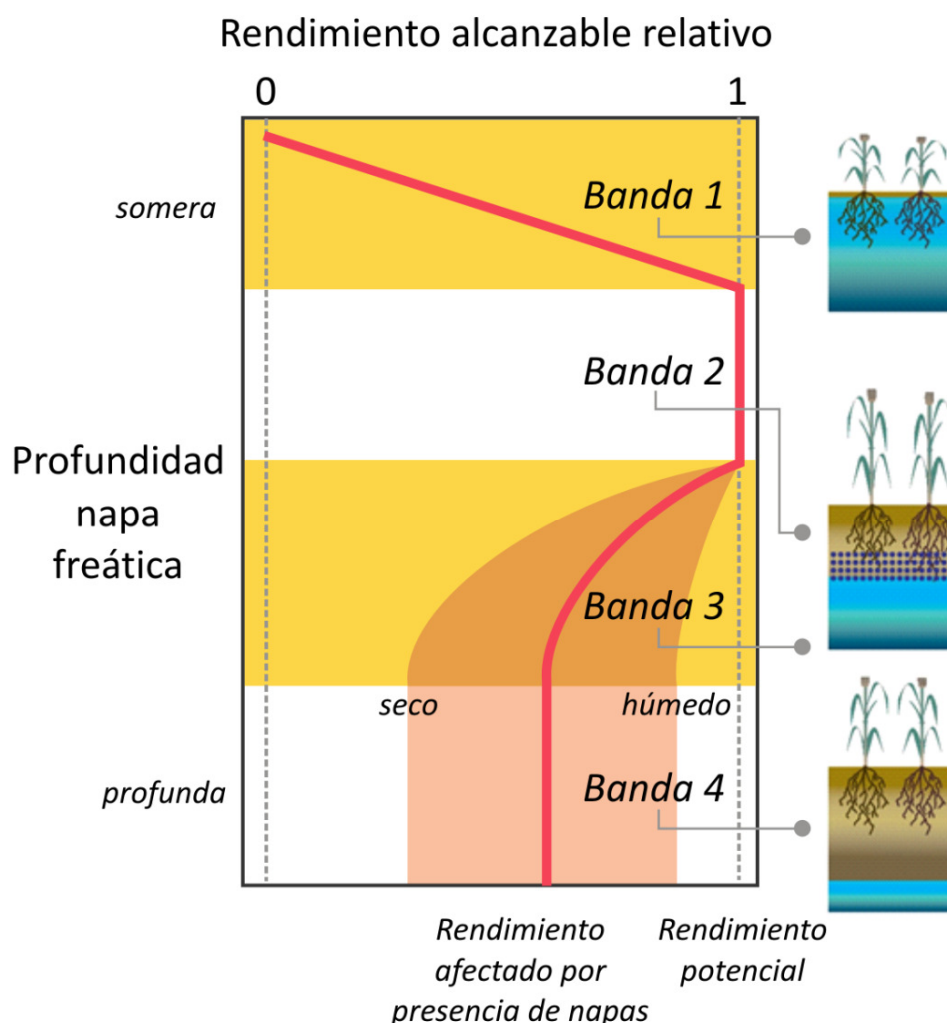


Figura 7.9. Afectación de los rendimientos de cultivos debido a la profundidad de la napa freática. Figura tomada de García et al., 2019.

7.2.2.6 Cálculos económicos

Los rendimientos corregidos por la profundidad de la napa se utilizan para calcular los beneficios económicos que influyen en las decisiones de los productores durante el siguiente ciclo de cultivo (Figura 7.3). Los detalles de los cálculos de ganancias se pueden ver en Bert et al. (2015). Los costos directos variables, es decir, los costos de cosecha, comercialización y transporte, están en función de los rendimientos de los cultivos. Los costos de transporte varían con la distancia desde el campo sintético hasta las instalaciones de exportación o procesamiento. Este último ítem representa un gran porcentaje de los costos totales de producción en la SA: alrededor del 15-20% del valor bruto de los granos cosechados. La distancia del centroide de cada campo sintético (Sección 7.2.2.2.1) al puerto de Rosario (donde se encuentran la mayoría de las instalaciones de procesamiento y exportación de granos) se calcula mediante la determinación de la ruta más corta, para lo cual se utilizaron diversas herramientas de *Google Maps* (developers.google.com/maps/documentation/directions/intro).

7.2.2.6.1 Costos de entrada y precios de commodities

Los costos de entrada y los precios de los commodities se mantuvieron constantes para todas las simulaciones, a menos que se indique lo contrario. Los costos de los insumos (por ejemplo, semillas, fertilizantes, agroquímicos y mano de obra) se extrajeron de la base de datos "Agroseries" (<http://www.aacrea.org.ar/>) mantenida por AACREA. Los precios de producción (granos) se obtuvieron de las estadísticas de la Junta de Comercio de Granos de Rosario (<http://www.cac.bcr.com.ar>), y correspondieron a los períodos en que la mayor parte de la producción se comercializa para cada cultivo: enero-marzo, abril-agosto y mayo-junio para trigo, maíz y soja, respectivamente. Todos los valores se expresaron en dólares estadounidenses (USD) de junio de 2015 utilizando la serie "All Commodities" de la Oficina de Estadísticas Laborales de EE. UU. (<https://download.bls.gov/pub/time.series/wp/wp.data.1.AllCommodities>). Los tipos de cambio de pesos argentinos (ARS) a USD se obtuvieron de las estadísticas del Banco Central de Argentina (<http://www.bcra.gov.ar/>).

7.2.3 Flujo de información entre componentes del Sistema de Modelación Integral

Los diversos componentes del SMI (Figura 7.3) deben poder intercambiar información y resultados a lo largo de las simulaciones. Algunos inputs se definen durante las etapas de configuración e inicialización del sistema: por ejemplo, el clima sintético y los rendimientos de los cultivos (limitados por el agua o no) se simulan previamente al comienzo de una corrida del SMI y se accede a los resultados cuando es necesario. A medida que las corridas del SMI avanzan en el número de ciclos de cultivo que se desea simular, los datos se van intercambiando entre los componentes del sistema: los resultados de un componente se convierten en entradas para otro componente. Por brevedad, nos centramos en los flujos de información que se establecen entre los dos componentes principales del SMI: el MP de agentes y el modelo hidrológico. El resto de los detalles pueden encontrarse en García et al. (2019).

Al comienzo de un ciclo de cultivo, los agentes (productores) del MP seleccionan el uso del suelo dentro de sus lotes. Luego, esta información se procesa y se convierte en los inputs que necesita

el *MIKE SHE* (modelo hidrológico): series temporales de LAI y RD ponderados para cada celda del modelo (ver Sección 7.2.2.4.1). Se debe tener en cuenta que estas series temporales de LAI y RD incluyen el área de pastura dentro de la celda del *MIKE SHE* no incluida en las decisiones de los productores. Una vez que se pasa esta información, el MP queda en pausa mientras el *MIKE SHE* simula los diferentes procesos hidrológicos. El clima sintético (ver Sección 7.2.2.3) para el ciclo que se simula se recupera de una base de archivos tipo *netCDF* y se convierte al formato de entrada *DFS2* compatible con *MIKE SHE*. El modelo hidrológico produce una serie temporal diaria de profundidad freática para cada celda del modelo y para el ciclo de cultivo que se simula. Estas series se almacenan en un archivo con formato *netCDF* y se devuelven al MP, donde se calcula una profundidad de napa promedio para el ciclo de cultivo para cada campo sintético con el fin de calcular los rendimientos corregidos y los resultados económicos. El MP luego actualiza el capital de trabajo para cada productor simulado y comienza el siguiente ciclo de simulación.

Existen interfaces estándar que permiten el intercambio de información entre dos o más componentes de un modelo y la intercomunicación de procesos que se ejecutan en diferentes plataformas: un ejemplo es la interfaz *OpenMI* (<http://www.openmi.org/>). Sin embargo, para usar esta interfaz, cada componente involucrado debe ser compatible con *OpenMI*. La versión de *MIKE SHE* (versión 2012 para *Windows*) no era compatible con *OpenMI*. Al no poder utilizar el protocolo *OpenMI*, se implementó un protocolo ad-hoc para intercambiar información entre los componentes del SMI basado en archivos intermedios en los formatos necesarios para el componente/modelo que recibe cada input (García et al., 2019). Esta fue una alternativa aceptable en el contexto del SMI actual pues los intercambios de información son bastante limitados: el flujo de datos entre el MP y el *MIKE SHE* ocurre solo una vez y en una sola dirección durante un ciclo de cultivo simulado.

7.3 Validación del Sistema de Modelación Integral

El SMI incluye componentes que ya habían sido calibrados y validados por separado, mostrando su capacidad para reproducir patrones importantes de los sistemas que representa cada modelo. El modelo hidrológico *MIKE SHE* había sido validado anteriormente para toda la cuenca del Salado (Badano, 2010; Menéndez et al., 2012), y recalibrado / validado para la subcuenca A1 (García et al., 2018) y la SA (ver Sección 7.2.2.1.1). De manera similar, el modelo de agentes MP también había sido sometido previamente a una exhaustiva validación que combinaba enfoques conceptuales y empíricos (Bert et al., 2014).

En contraste, la validación del SMI descripta aquí, es decir, el proceso de evaluar el nivel de confianza que se pueden tener los resultados generales del sistema, es más difícil. El SMI involucra múltiples modelos que describen la dinámica de sistemas naturales y humanos acoplados. Sistemas como el SMI involucran casi invariablemente no linealidades, dinámicas estocásticas y circuitos de retroalimentación de diferentes escalas (Fagiolo et al., 2007). La capacidad de replicar evidencia empírica se ve a menudo como el único criterio verdaderamente decisivo para la calidad de un modelo científico. Sin embargo, la mayoría de los sistemas integrados se utilizan para explorar escenarios interesantes para los que no hay datos disponibles en el mundo real.

Por las razones discutidas anteriormente, se adoptó un enfoque de validación conceptual para el SMI. Primero, se buscó garantizar que todos los componentes y modelos del SMI involucraran mecanismos y propiedades de base física, o en su defecto, que sean razonables y observados en el mundo real: este proceso se denomina *“Micro-face validation”* (Rand and Rust, 2011). En segundo lugar, se adoptó el enfoque *“Take A Previous Model and Add Something (TAPAS)”* (Frenken, 2006; Polhill et al., 2010). Este enfoque incremental mejora la validez conceptual de sistemas integrados de modelación basándose en modelos, componentes y supuestos subyacentes previamente utilizados y aceptados. Finalmente, la validez general del SMI se verificó a través del enfoque *“Pattern-Oriented Modeling (POM)”* o *“Modelación Orientada a Patrones”* propuesto por Grimm et al. (2005). La idea central detrás de POM es usar patrones observados en sistemas reales, como el reciente aumento en los niveles freáticos, para guiar el diseño de la estructura del sistema de modelación y verificar si se producen las tendencias esperadas.

Se realizaron dos grupos de simulaciones para realizar la validación del SMI siguiendo el enfoque POM, es decir, tratando de reproducir patrones y/o tendencias observadas. El primer grupo de simulaciones presenta un grupo de ensayos donde se combinan diferentes usos del suelo y escenarios climáticos y se analizan las tendencias de las profundidades freáticas obtenidas en toda la SA. En el segundo grupo de simulaciones se introduce una variación en el precio de un commodity (trigo) observando las implicancias que tiene esto en las áreas cultivadas con ese grano.

7.3.1 Ensayos combinando diferentes usos del suelo y escenarios climáticos

Como se mencionó anteriormente, este primer grupo de simulaciones tuvo como objetivo proporcionar una validación del SMI al explorar escenarios con diferentes usos del suelo uniformes en toda la SA y climas contrastantes, analizando si los mismos generaban tendencias regionales en las profundidades freáticas previstas previamente por expertos. En ambientes planos como la SA, la recarga de agua subterránea depende principalmente de la lluvia, mientras que la descarga está modulada principalmente por la vegetación (Jobbágy and Jackson, 2004; Jobbágy et al., 2008; Viglizzo et al., 2009). Para simular las interacciones entre estos dos forzantes, se asignaron sucesivamente siete usos del suelo (los seis usos agrícolas considerados en el MP más pasturas) al área agrícola en la SA (es decir, aproximadamente el 55% de la cuenca). La porción restante de la SA (es decir, el 45%) siempre se consideró cubierta con pasturas. Cada uno de estos siete usos del suelo se simuló con tres escenarios climáticos diferentes: clima con una tendencia negativa en el aumento de las precipitaciones (clima seco), clima con una tendencia neutra en el aumento de las precipitaciones (clima normal), y finalmente un clima con una tendencia positiva en el aumento de las precipitaciones (clima húmedo).

La construcción de las series climáticas sintéticas se llevó a cabo mediante el Generador Climático Espacial (ver Sección 7.2.2.3). Esta herramienta permite, entre otras funcionalidades presentadas anteriormente, la creación de series meteorológicas utilizando una tendencia lineal definida para cada variable (precipitación, temperatura mínima y máxima). En particular nos centraremos en escenarios con 3 tendencias de lluvia: negativa (clima seco), neutral (clima normal) y positiva (clima húmedo).

Para definir las tendencias en las precipitaciones, se utilizó el enfoque descrito en Podestá et al. (2009). La suposición central de esta metodología es que las tendencias climáticas que ocurrieron en el pasado podrían ocurrir nuevamente o de manera muy similar en el futuro cercano. Por esta razón, se tomaron las series de precipitación anual a largo plazo (1961-2016) para las estaciones meteorológicas ubicadas dentro de la SA y en sus adyacencias (Figura 7.10), se definió una ventana móvil de 25 años y se calculó, para cada una de estas ventanas, la pendiente de la regresión lineal. El conjunto resultante de valores de pendiente constituye una muestra de una función de distribución, que varía de pendientes extremadamente negativas a extremadamente positivas.

A partir de esta distribución de tendencias, se definieron las tendencias negativas, neutras y positivas de precipitación como los valores asociados a los percentiles 10, 50 y 90, respectivamente. Utilizando estas tendencias, se ejecutó el Generador Climático Espacial para producir las series climáticas sintéticas requeridas. La Figura 7.11 muestra las series sintéticas de precipitaciones anuales obtenidas para las tres tendencias correspondientes a las diferentes celdas del modelo. Los totales anuales de lluvia (promediados sobre la SA y durante toda la serie sintética) fueron aproximadamente 700, 950 y 1.200 mm, para las series con tendencia negativa, neutra y positiva, respectivamente.

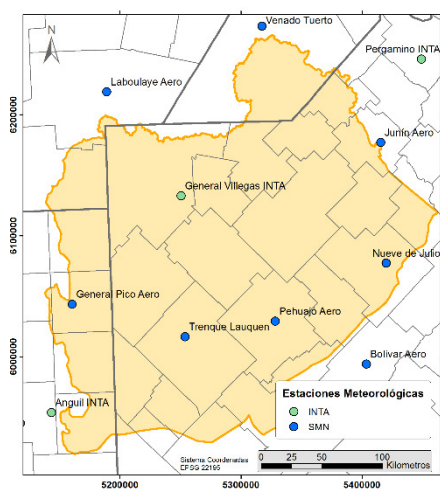


Figura 7.10. Estaciones meteorológicas utilizadas para el armado de las series climáticas sintéticas.

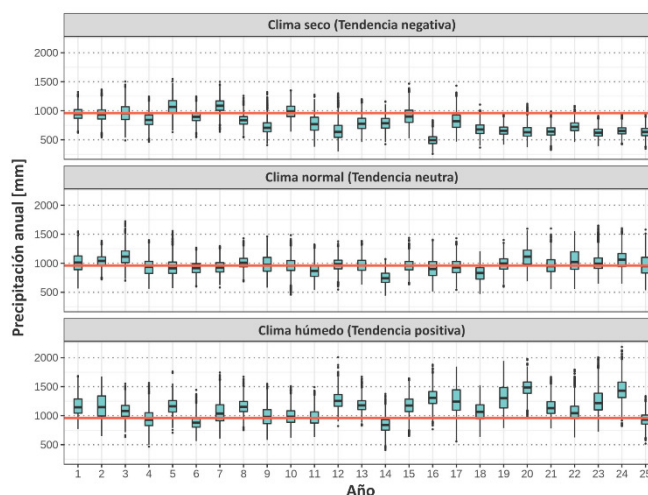


Figura 7.11. Series sintéticas de precipitación anual con diferentes tendencias (negativa, neutra y positiva). La línea roja muestra la precipitación anual promedio para el período 1961-2016 (960 mm).

Las 21 combinaciones de clima y uso del suelo (producto de los tres escenarios climáticos y los 7 usos del suelo definidos) se simularon a través del SMI. En este caso, se deshabilitó en el modelo de agentes la posibilidad de que los productores seleccionen el uso del suelo. En todos los escenarios, la profundidad freática inicial en toda la cuenca se estableció en 1 m como un compromiso entre la representación adecuada del sistema y la practicidad. Este valor fue establecido por un perfil de presión de equilibrio, proceso incluido en el *MIKE SHE*. La profundidad freática de 1 m es una situación observada frecuentemente en la zona de estudio durante las

últimas dos décadas (García et al., 2018; Garcia et al., 2019). El uso de una profundidad freática inicial específica en cada celda del modelo habría requerido modificaciones del código del SMI y será una de las modificaciones a incluir en desarrollos y estudios posteriores.

Los efectos combinados entre los diferentes climas y usos del suelo simulados, se vieron reflejados en los patrones temporales de profundidad freática media que se presentan en la Figura 7.12. Como era esperable, la napa freática es más profunda cuando la cuenca se encuentra cubierta totalmente de pastura, ya que este uso consume agua durante todo el ciclo de cultivo y tiene raíces más profundas que los cultivos de granos (Nosetto et al., 2015). En el escenario húmedo, cuando la SA estuvo completamente cubierta de pasturas, el nivel freático era al menos 1 m más profundo que para el resto de los usos agrícolas simulados. Las diferencias de profundidades freáticas entre cultivos y pasturas fueron mayores para los climas secos y normales, como era de esperar. Entre los usos agrícolas, los cultivos dobles indujeron napas más profundas que los cultivos individuales. Sin embargo, estas diferencias solo fueron apreciables en los escenarios seco y normal, y casi insignificantes en el escenario húmedo. Si ordenamos los usos del suelo por la napa freática obtenida de menor a mayor profundidad, el listado es el siguiente: maíz de siembra tardía, maíz de siembra temprana, soja de ciclo completo, cultivo de cobertura corta + soja, trigo + soja y cultivo de cobertura larga + soja. Las series más cortas de profundidades freáticas presentadas en la Figura 7.12 para algunos usos del suelo, observadas en climas extremos (por ejemplo, trigo + soja en clima el clima seco), son consecuencia de que todos los productores de la cuenca abandonan la actividad debido a resultados económicos negativos.

Un mayor consumo de agua del suelo disponible durante todo el ciclo de cultivo explica las napas freáticas más profundas en cultivos de cobertura larga + soja en comparación con trigo + soja. El rendimiento de la soja y, a su vez, el uso del agua, es menor cuando el cultivo es doble, en lugar de único, debido a su fecha de siembra retrasada y al agotamiento de los recursos causado por el cultivo precedente de trigo (Andrade et al., 2015). El doble cultivo de trigo + soja también tiene un consumo limitado de agua durante la transición entre cultivos a principios del verano, donde se produce una alta demanda de evaporación atmosférica (Mercau et al., 2016). Por el contrario, cuando el trigo se usa como cultivo de cobertura corta, la tierra se libera antes, lo que permite una siembra y establecimiento más temprano del siguiente cultivo de soja (aproximadamente un mes, ver Tabla 7.1). En este caso, las diferencias en el rendimiento potencial y el uso del agua entre los cultivos de soja únicos o los cultivos de soja precedidos por cultivos de cobertura corta, son menores (Caviglia and Andrade, 2010; Rimski-Korsakov et al., 2015).

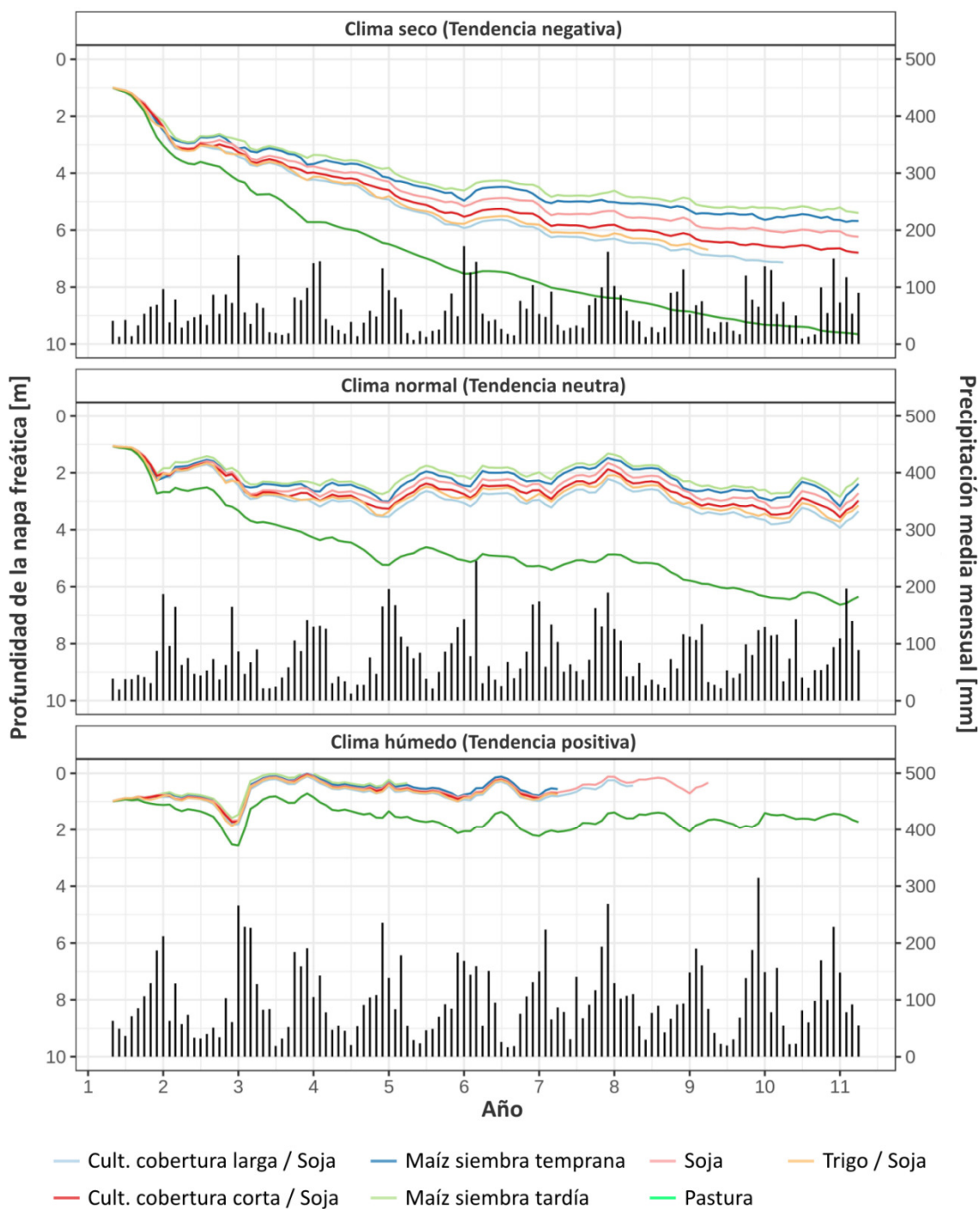


Figura 7.12. Variación temporal de la profundidad freática promedio en toda la SA. Los productores asignaron el mismo uso del suelo a toda el área agrícola (aproximadamente el 55% de la cuenca, el área con aptitud no agrícola siempre está cubierta por pasturas o pastizales naturales) bajo tres series climáticas sintéticas. Las barras negras indican la precipitación mensual promedio. Las series de profundidad freática más cortas (por ejemplo, trigo + soja en clima seco) son consecuencia de que todos los agentes de la cuenca abandonan la producción debido a los malos resultados económicos.

La variabilidad dentro de la cuenca (debido, entre otras variables, a la topografía y las características de los suelos) es capturada por el SMI, lo que refleja la variabilidad espacial de la profundidad freática debido a la influencia del uso del suelo (producto de la decisión de los productores) y del clima. Como ejemplo, la Figura 7.13 muestra la profundidad freática al final del 4to ciclo de cultivo simulado para nueve combinaciones de escenarios de uso del suelo y clima. Los impactos del uso del suelo en las napas se pueden explorar observando cada columna de la Figura 7.13. La profundidad freática promedio en toda la cuenca aumenta a medida que el uso del suelo pasa del maíz de siembra tardía, a un cultivo de cobertura largo + soja, a pasturas. Para cada uso del suelo, los escenarios climáticos que van desde seco (fila superior) hasta húmedo (fila inferior) están vinculados a napas freáticas cada vez menos profundas. Además, el área inundada o con agua en superficie pasa de ser casi inexistente para la cobertura de pasturas y el clima seco (Figura 7.13, arriba a la derecha) a ocupar una gran proporción de la SA cuando se simula un escenario con siembra de maíz tardío y clima húmedo (Figura 7.13, abajo a la izquierda).

Los resultados obtenidos con este primer grupo de simulaciones fueron en la dirección esperada. Las tendencias obtenidas en las profundidades freáticas medias fueron consistentes con los resultados de trabajos previos (Nosetto et al., 2009; Caviglia and Andrade, 2010; Andrade et al., 2015; Nosetto et al., 2015; Rimski-Korsakov et al., 2015; Mercáu et al., 2016) por lo que se puede considerar exitosa esta primera validación siguiendo el enfoque POM, detallado previamente.

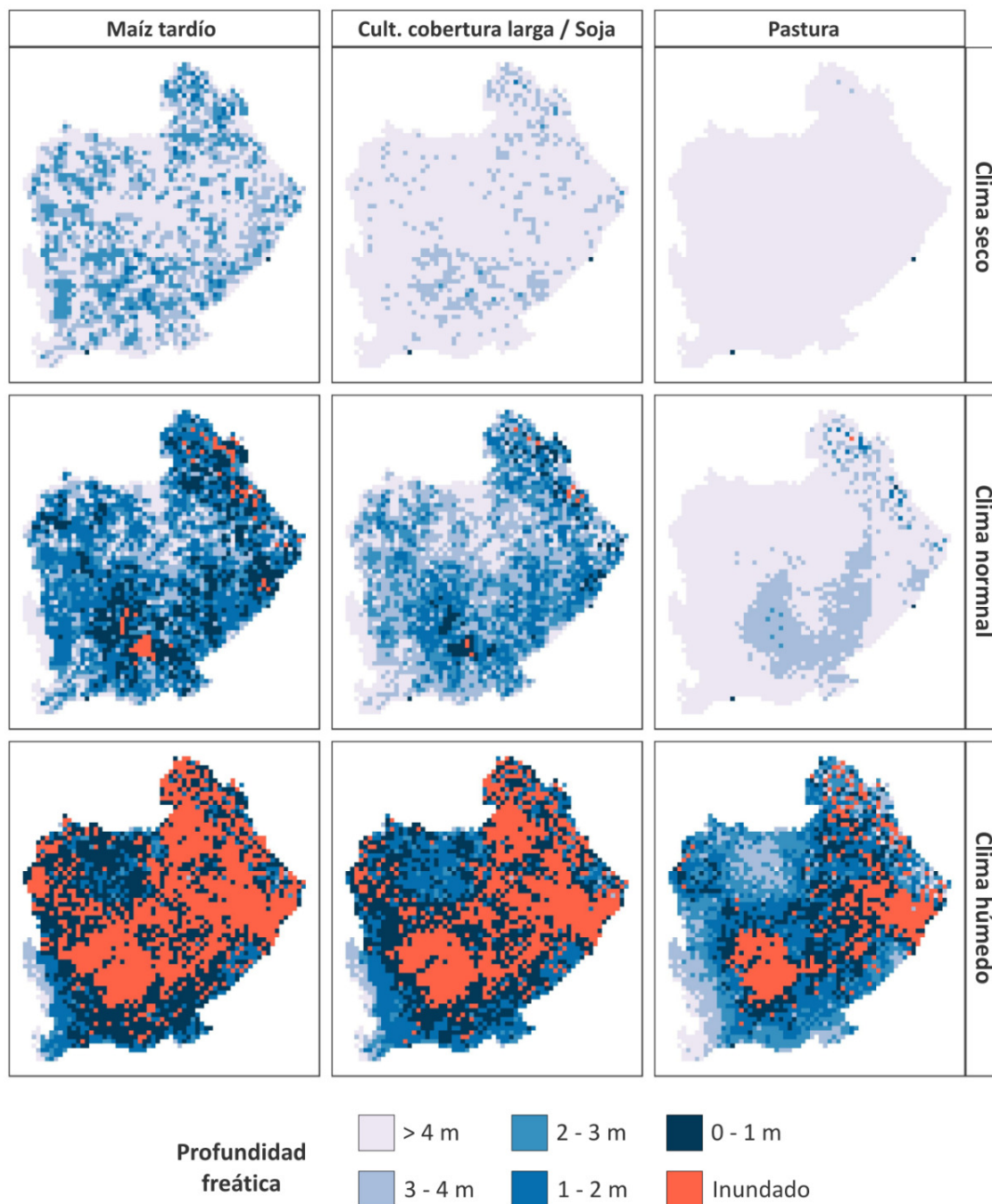


Figura 7.13. Variación temporal de la profundidad freática promedio en toda la SA. Los productores asignaron el mismo uso del suelo a toda el área agrícola (aproximadamente el 55% de la cuenca, el área con aptitud no agrícola siempre está cubierta por pasturas o pastizales naturales) bajo tres series climáticas sintéticas. Los datos corresponden al final del cuarto ciclo de cultivo simulado.

7.3.2 Ensayos con el precio de los granos

La asignación del uso del suelo está influenciada por factores internos y externos; los precios de los granos son un importante impulsor de las decisiones por parte de los productores de la llanura pampeana (Calviño and Monzon, 2009; Satorre, 2011). Las políticas nacionales aplicadas a fines

de la década de 2000 (impuestos a las exportaciones de ciertos granos) desalentaron la siembra de trigo en Argentina, aumentando el área asignada a los cultivos individuales de soja. La caída más notable del área de siembra de trigo ocurrió durante el período 2007-2013, desde 6 a 3.2 millones de ha (Agroindustria, 2018). Como el trigo es seguido principalmente por una soja de ciclo corto, este condujo a una asignación menor de doble cultivo en la SA, que se ha demostrado que tiene una mayor influencia en la profundización de la napa que los cultivos individuales (Figura 7.12).

Para tratar de reproducir las tendencias observadas en el porcentaje de áreas sembradas con trigo, se realizaron con el SMI diferentes simulaciones variando el precio del grano de trigo. A su vez, se utilizaron estos escenarios para explorar las implicancias que tienen los cambios de precios de commodities en: i) las decisiones que toman los productores para definir el uso del suelo (influenciadas por la rentabilidad relativa de cultivos alternativos) y ii) en la dinámica del nivel freático

Se utilizó como referencia el precio del trigo del ciclo 2015-16 (140 USD la tonelada). A este mismo se lo redujo un 23% (para imitar la tasa de impuestos a la exportación vigente a fines de la década del 2000) y, recíprocamente, se lo aumentó un 23%. Estas dos variaciones resultaron en relaciones de precios de trigo/soja de 0,37 (una relación baja) y 0,59 (un valor cercano a la relación histórica), respectivamente. Estos precios del trigo como los otros cultivos de granos (151 y 293 USD por tonelada para el maíz y la soja, respectivamente) y los precios de los insumos se mantuvieron constantes durante el período simulado. La asignación inicial de cultivos en los campos sintéticos simulados se fijó en 1/3 de trigo + soja, 1/3 de soja de ciclo completo, 1/6 de maíz de siembra temprana y 1/6 de maíz de siembra tardía. Para estas simulaciones, se utilizó una de las series pseudohistóricas utilizadas en la calibración del modelo hidrológico (ver Sección 7.2.2.3).

El mayor precio del trigo produjo un sensible aumento del área sembrada con trigo + soja: después de 25 ciclos de cultivo, este uso del suelo se expandió de 33,3% a 82% en el área agrícola de la SA (Figura 7.14). El menor precio del trigo, en contraste, causó que el área de trigo + soja cayera del 33,3% a menos del 6% después de 25 ciclos de cultivo. En consecuencia, el área ocupada por soja de ciclo completo aumentó de 33,3% a aproximadamente 78%. Estas tendencias obtenidas fueron totalmente consistentes con la evolución de cultivos observada en la llanura pampeana en el período 2007-2015 (Agroindustria, 2018). Para ambos escenarios de precios del trigo, la adopción de cultivos de cobertura por parte de los productores fue prácticamente insignificante. Es cierto que los servicios ecológicos proporcionados por los cultivos de cobertura, incluido el control de inundaciones, no se cuantificaron explícitamente dentro del modelo de agentes, por lo que para el modelo solo se asocia a un incremento en los costos.

Como se esperaba, en virtud de los resultados del grupo anterior de simulaciones (Figura 7.12), la mayor proporción del doble cultivo trigo + soja produjo niveles freáticos más profundos en la SA (Figura 7.15). Después de 25 ciclos de cultivo, las profundidades freáticas más frecuentes fueron 3,5 m en el escenario de alto precio del trigo (en respuesta a un aumento en el área de trigo + soja) versus 1,3 m en el precio bajo (área reducida de trigo + soja). Las diferencias en las profundidades freáticas medias entre los escenarios con distintos precios de trigo comenzaron a notarse después de 8-9 ciclos de cultivos.

Las tendencias obtenidas con este segundo grupo de simulaciones se condicen con los cambios observados en las áreas sembradas de trigo en la llanura pampeana. Esto puede considerarse, siguiendo el enfoque POM adoptado, como una nueva validación del SMI. En resumen, los ensayos realizados en las secciones 7.3.1 y 7.3.2, muestran que el SMI reproduce correctamente diferentes patrones observados en la SA con lo cual se lo puede considerar correctamente validado.

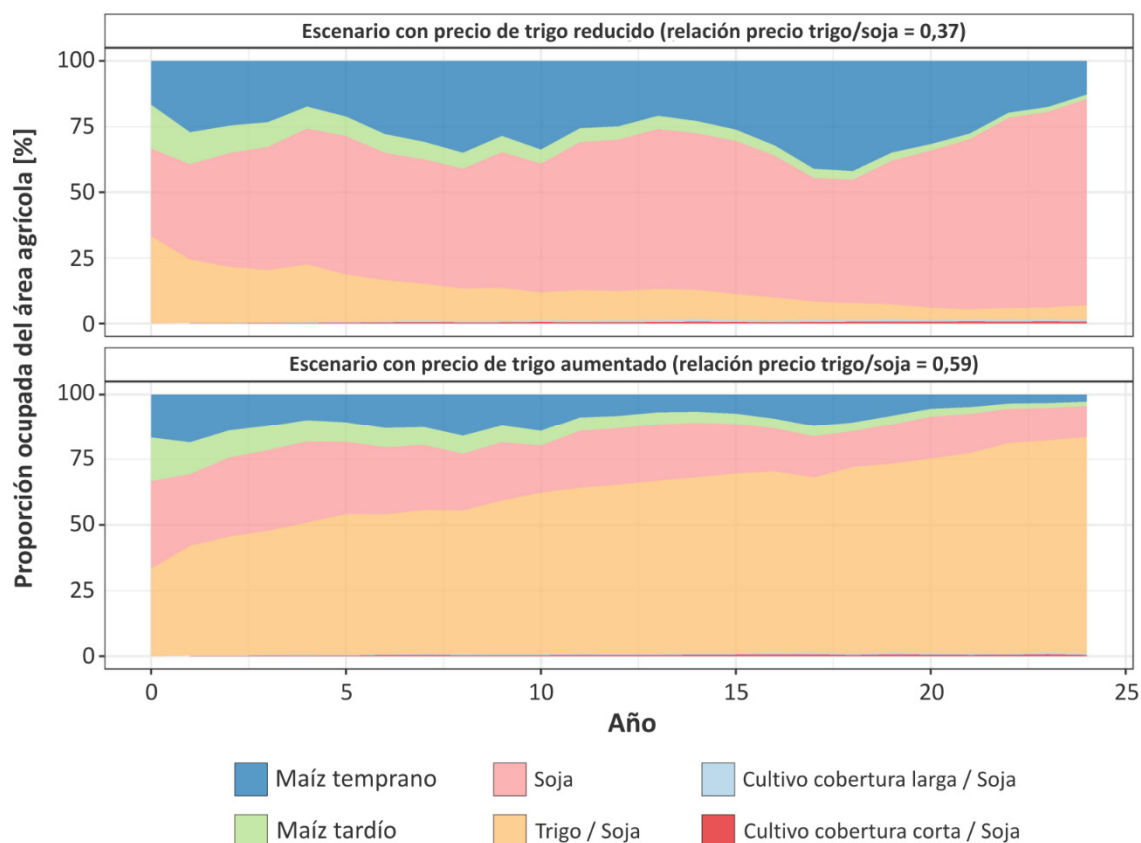


Figura 7.14. Evolución temporal de los diferentes usos del suelo en la SA (proporción del área agrícola) bajo diferentes precios de granos de trigo: precio bajo (relación de precios trigo/soja de 0,37; gráfico superior) y precio alto (relación de precios trigo/soja de 0,59; gráfico inferior). . Figura tomada de García et. al, 2019.

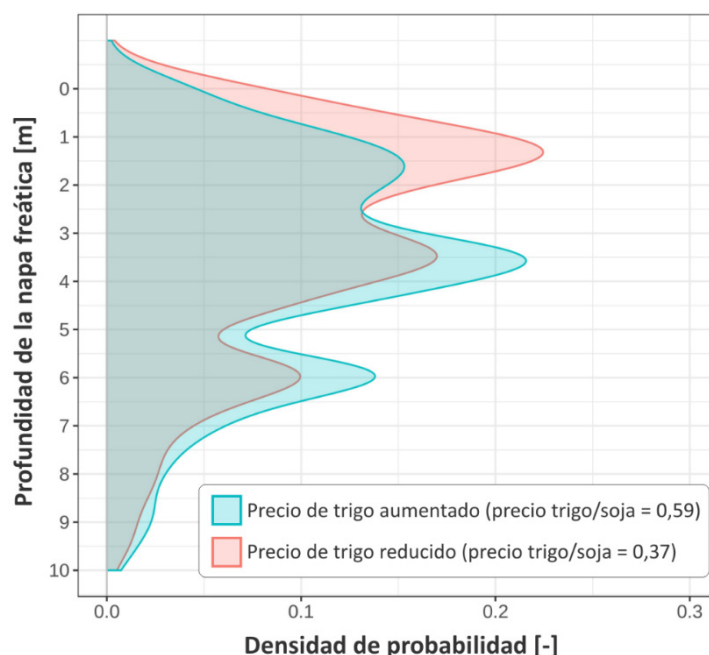


Figura 7.15. Curvas de densidad de probabilidad de profundidad freática después de 25 ciclos de cultivo con precios bajos de trigo (relación precio trigo/soja de 0,37, línea rosa) y precios altos (relación precio trigo/soja de 0,59; línea turquesa). Figura tomada de García et. al, 2019.

7.4 Explotación del SMI

A pesar del impacto de las napas en el crecimiento y rendimiento de los cultivos, es inusual que los productores de la llanura pampeana incluyan esta variable en el proceso de toma de decisiones sobre el uso del suelo para el próximo ciclo productivo. En entrevistas con estos productores, informadas en trabajos anteriores (García et al., 2017), se encontró una fuerte creencia de que el agua subterránea tiende a manejarse por sí sola para alcanzar niveles similares al comienzo de cada ciclo de cultivo, independientemente de las precipitaciones ocurridas durante el ciclo anterior. En consecuencia, los productores tienden también a ignorar el aumento/caída en la profundidad del nivel freático asociado con sus propias opciones de cultivo (García et al., 2017). Dado que en las cuencas de llanura el balance hídrico es esencialmente vertical, y la profundidad de la napa freática está fuertemente conectada con el equilibrio entre las precipitaciones y el consumo de agua por cultivos y/o pasturas, incluir el análisis de la profundidad freática en la selección de la elección del uso del suelo parece ser adecuado, para perseguir los siguientes objetivos: i) consumir más agua subterránea cuando su nivel está muy cerca de la superficie, tratando de reducir el riesgo de anegamiento y posibles inundaciones en años húmedos; y ii) disminuir el consumo de agua subterránea cuando el nivel de la misma es muy profundo, dejándola disponible para "subsidiar" las necesidades de consumo de agua de los cultivos durante años secos. Es interesante destacar que este criterio de gestión agrícola se basa en una variable fácilmente medible como es la profundidad de napa, quedando solo las incertidumbres asociadas a los posibles escenarios climáticos que se desarrollarán en el próximo ciclo productivo.

En esta sección se pretende mostrar el potencial del SMI, para estudiar los efectos de un manejo agrícola que incorpore el análisis de la profundidad freática en la elección de los cultivos, bajo diferentes escenarios climáticos, para comprender si es posible mitigar los efectos regionales de los excesos y déficits de agua a través de cambios en el uso del suelo. Es sumamente interesante analizar las posibilidades y alcances de esta medida no estructural para incorporar en la gestión y mitigación de inundaciones y sequías, complementando el accionar de obras de infraestructura (canales, reservorios) cuyo impacto suele ser bastante localizado debido a la topografía plana de la zona (LHA-INA, 2012).

En particular se van a intentar contestar dos preguntas con el SMI: (i) ¿cómo serán los riesgos asociados a inundaciones y sequías en el clima futuro con el manejo agrícola actual?; y (ii) ¿se puede reducir el riesgo de inundaciones y sequías en el futuro mediante un manejo agronómico que incluya entre sus variables de decisión a la profundidad freática? La primera pregunta plantea un escenario en el que los productores no consideran a la napa como una variable de decisión para seleccionar los cultivos del año siguiente. Por el contrario, la segunda pregunta explora escenarios en los que el manejo agronómico tiene en cuenta la profundidad freática, por lo que el problema es determinar su impacto en el rendimiento del cultivo (con su correspondiente resultado económico) y el área inundada.

Se utilizaron diferentes indicadores para caracterizar el riesgo hídrico: (a) balance hídrico en toda la cuenca; (b) la variación temporal de la napa freática promedio de toda la cuenca; (c) variación temporal del área inundada. El impacto en el rendimiento de los cultivos se mide a través de las diferencias entre los rendimientos y entre los márgenes globales brutos (MGB) asociados al manejo agrícola actual y al manejo agronómico basado en la profundidad freática.

Como clima futuro se adoptaron las tres series climáticas presentadas en la Sección 7.3.1, cada una de ellas asociada a un clima seco, un clima normal y un clima húmedo. La profundidad freática inicial se estableció en 1 m, por los motivos mencionados en la Sección 7.3.1.

7.4.1 ¿Cómo cambiará el riesgo de inundación y sequía bajo diferentes climas futuros si se continúa con el manejo agrícola actual?

Como se mencionó anteriormente, este primer grupo de ensayos tiene como objetivo estudiar los riesgos hídricos asociados a tres climas futuros (bien contrastantes entre ellos) si se utiliza el manejo agronómico actual observado en la SA (como dijimos, bajo el esquema actual de manejo agrícola, el productor no suele incluir el análisis de la profundidad freática para definir los cultivos del ciclo siguiente). Los resultados que se presentan y analizan en esta sección, están integrados a escala de cuenca.

Un balance hídrico simplificado en una cuenca de llanura puede determinarse como la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración real integrada en toda la cuenca. Cuando el volumen de precipitaciones no es suficiente para satisfacer las necesidades de los cultivos, el agua subterránea puede actuar como subsidiaria de las plantas, permitiendo que los cultivos se desarrollen con relativa normalidad y con rendimientos razonables. Es por eso que la dinámica de la napas está directamente asociada con este balance hídrico, cuestión que es más evidente en las cuencas de llanura (Badano, 2010; García et al., 2017; Garcia et al., 2019).

En la Figura 7.16 se muestran las series temporales anuales del balance hídrico acumulado a lo largo de los 25 años simulados para los tres escenarios climáticos. Se observa que para clima con tendencia negativa de precipitaciones (clima seco) el balance hídrico es negativo (es decir, la precipitación no fue suficiente para abastecer los requerimientos de agua de los cultivos) durante el 80% del tiempo (20 años), dando lugar a un déficit acumulado de 1.900 mm. En el caso de la tendencia neutral, la mitad de los años tienen un saldo negativo, pero aún existe un déficit acumulado que alcanza los 500 mm. En el caso del escenario con tendencia positiva (clima húmedo) la simulación se detiene después de 16 años; esto se debe a que se alcanza el criterio de corte de producción en todos los agentes/productores del modelo MP debido a una sucesión de rendimientos muy bajos (con los consecuentes resultados económicos) producidos por napas muy cercanas a la superficie e inundaciones continuas (ver más abajo).

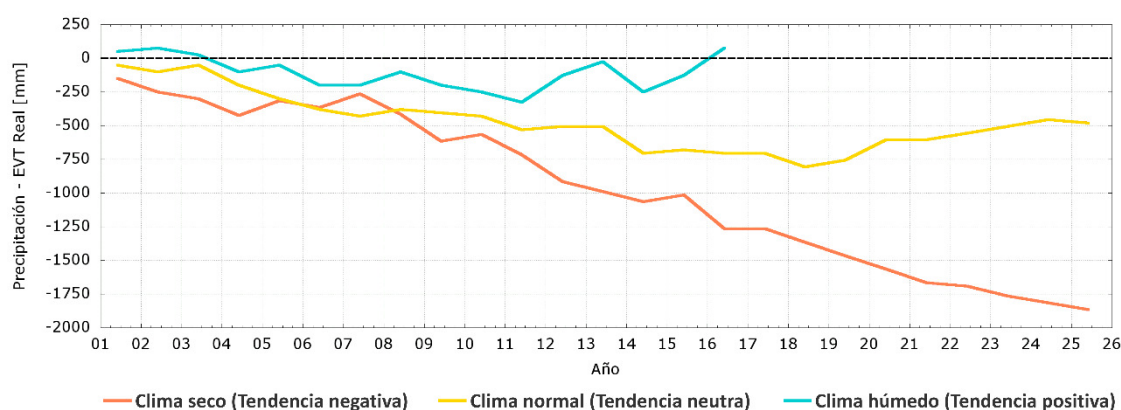


Figura 7.16. Series temporales de balance hídrico anual acumulado (diferencia entre precipitación y evapotranspiración real) para tres escenarios climáticos.

La Figura 7.17 muestra la evolución temporal de la profundidad freática media en toda la SA y el área inundada en dicha región. Se observa que las series temporales de profundidad freática son muy similares a las del balance hídrico acumulativo (Figura 7.16), lo que indica que el balance hídrico en esta cuenca de llanura es predominantemente vertical, tal como se esperaba (García et al., 2017; García et al., 2018; García et al., 2019). Para la tendencia negativa, la napa se profundiza aproximadamente 6 metros al final de la simulación (la profundidad freática aumenta durante toda la simulación, excepto del año 5 al año 8, donde se tienen balances hídricos positivos). En el caso de la tendencia neutral, también hay una profundización de las napas, aunque de menor magnitud, llegando al final de la simulación a establecerse en 2 metros de profundidad (del año 5 al año 17, se puede ver una tendencia al aumento de la profundidad freática, consistente con lo observado en la Figura 7.16 donde se ve que en esos años el balance hídrico tiende a ser negativo; del año 17 en adelante se observa una disminución en las profundidades freáticas debido al balance positivo). La profundidad freática permanece prácticamente por debajo de 2 m para la trayectoria de tendencia positiva, y cae por debajo de 1 m antes de llegar a la finalización de la simulación.

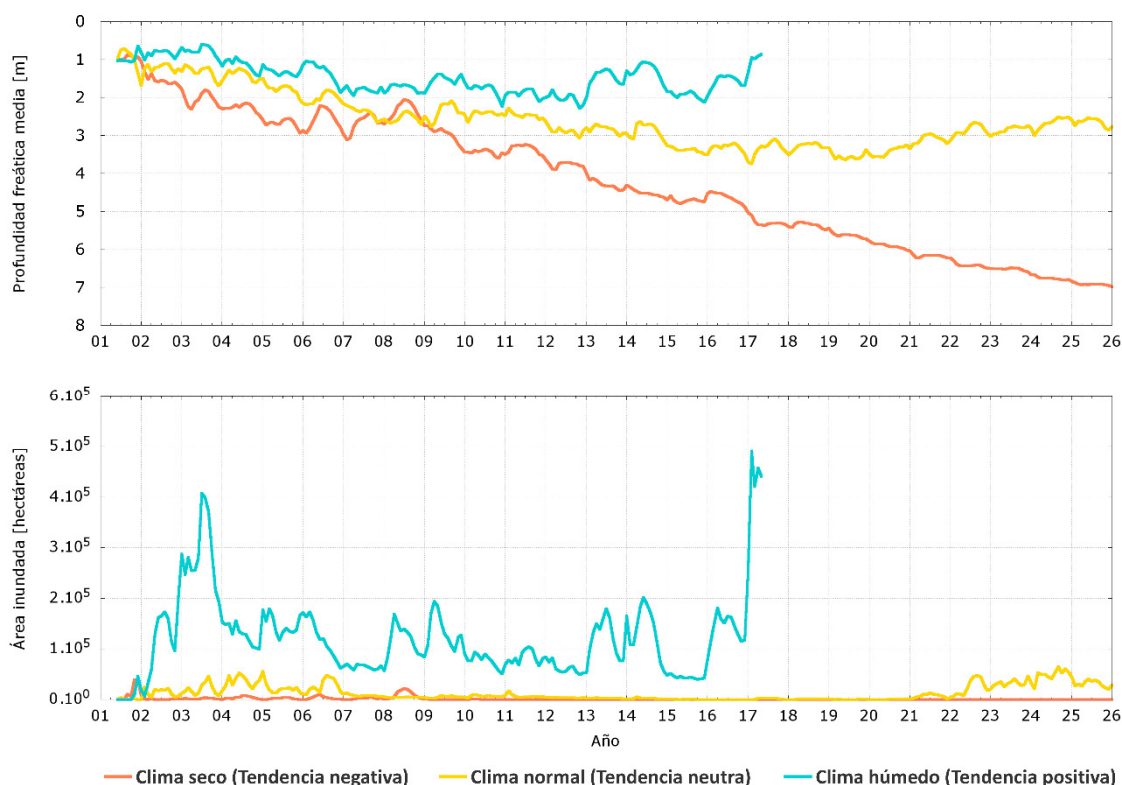


Figura 7.17. Profundidad de la napa freática promediada en toda la cuenca (gráfico superior) y área inundada en toda la cuenca (gráfico inferior) para las tres trayectorias de precipitación (negativa, neutral y positiva).

El área inundada está fuertemente relacionada con napa, ya que a medida que el nivel freático se acerca al suelo, la capacidad de infiltración tiende a colapsar, aumentando significativamente la generación de exceso de agua superficial, que se acumula en las depresiones del terreno antes de generar escorrentía (García et al., 2018). En la Figura 7.17 se observa que profundidades de napas por debajo de 2 m tiende a generar importantes inundaciones, siendo esto consistente con los resultados presentados en la Sección 5.5. Como se mencionó anteriormente, en el escenario con el clima húmedo, se presentan continuamente inundaciones, generando resultados económicos negativos en los productores que conducen al colapso económico de los mismos y la consiguiente detención de la producción. En este escenario, las áreas inundadas están en el orden de las 180.000 hectáreas con picos de hasta 450.000 hectáreas. Para el escenario neutral, se observa que al final de la simulación, aparecen áreas inundadas (del orden de 50.000 hectáreas con picos de hasta 100.000) debido al aumento de las precipitaciones. Para la trayectoria de tendencia negativa no hay áreas inundadas, excepto en los primeros años, estando las mismas asociadas a la profundidad freática inicial.

La Figura 7.18 muestra la distribución de la napa freática para los tres escenarios. La profundidad freática se clasificó en tres zonas: i) zona de napa superficial, donde los rendimientos de los cultivos caen abruptamente (napa freática menor a 1,4 m), ii) zona óptima de profundidad freática, donde los rendimientos de los cultivos están cerca de los potenciales (napa freática de 1,4 a 2,5 m) y iii) zona de napa profunda, donde la napa freática no tiene influencia en los rendimientos de cultivo obtenidos (profundidades de napa mayores a 2,5 m). La determinación

de los límites de estas diferentes zonas se explica con mayor detalle en la sección siguiente (Sección 7.4.2).

Se puede ver claramente que el escenario neutral es el que tiene el mayor porcentaje de área con la napa freática en la zona óptima (banda verde), mientras que en los escenarios climáticos con tendencias positiva y negativa, este porcentaje disminuye hasta casi desaparecer al final de la simulación. Estos resultados se correlacionan con la evolución de rendimientos obtenida como veremos a continuación.

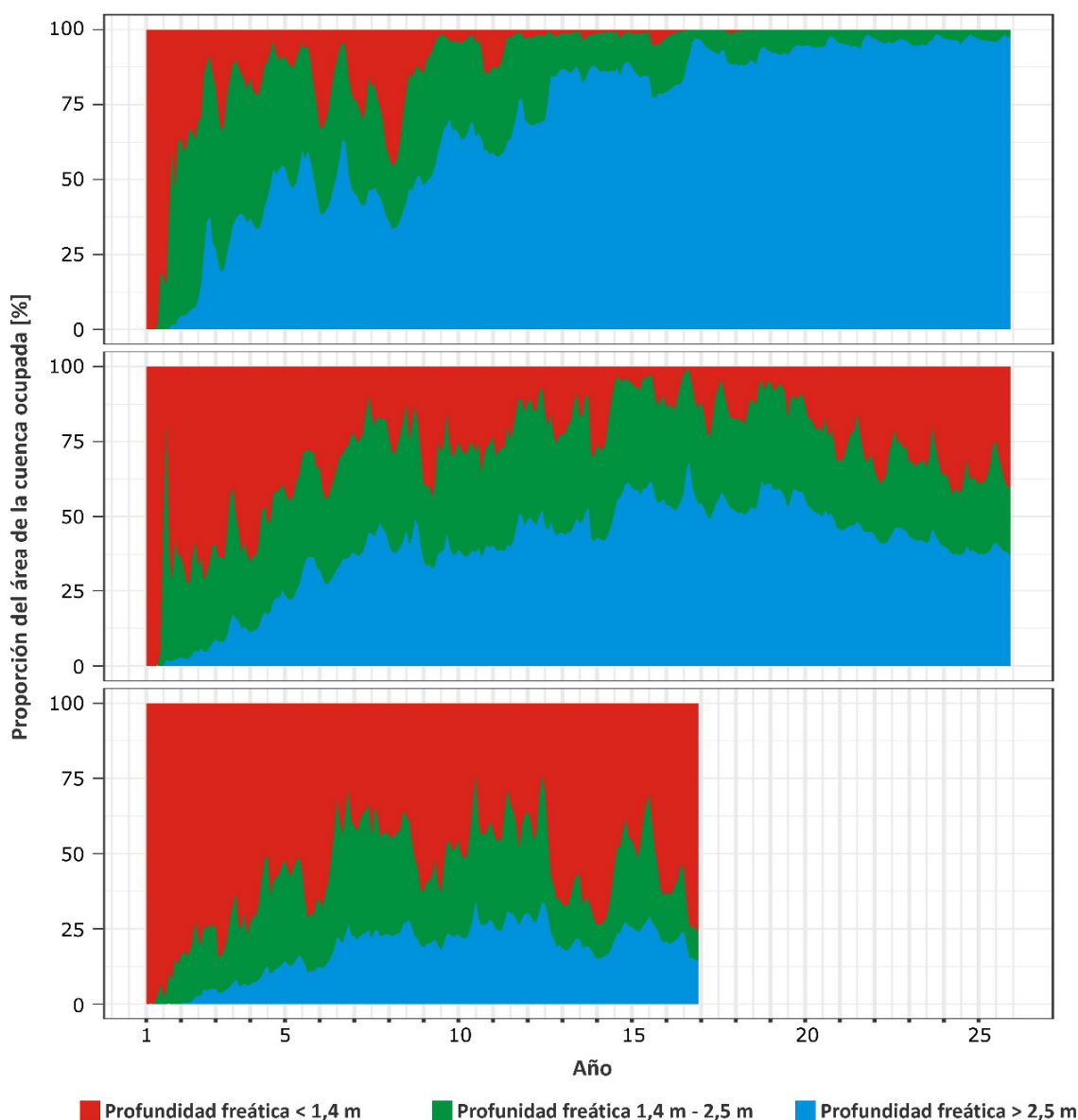


Figura 7.18. Distribución de las napas freáticas para los tres escenarios climáticos.

Para analizar el impacto de las napas en los rendimientos de los cultivos, se utilizaron dos indicadores: el rendimiento alcanzable limitado por agua y el rendimiento alcanzable limitado por

agua ajustado por efecto de la profundidad freática (ver Sección 7.2.2.5 y Figura 7.9). Estos indicadores se normalizaron con el rendimiento alcanzable limitado por agua obtenido en el primer año de simulación. La Figura 7.19 muestra los rendimientos promedio de cada cultivo en todas las campos que implantaron ese cultivo; cada fila representa un cultivo (de arriba a abajo: maíz temprano, maíz tardío, soja y trigo); cada columna corresponde a una trayectoria de precipitación (de izquierda a derecha: tendencia negativa, neutral y positiva). Para el escenario climático con tendencia negativa (clima seco) se observa que los rendimientos ajustados por el efecto de la profundidad freática son claramente más altos que los rendimientos limitados por agua durante los primeros 15 años simulados, lo que pone en evidencia el suministro de agua a los cultivos proveniente del agua subterránea (aprovechando haber comenzado la simulación con una napa freática poco profunda); a partir del año 15 el aporte de agua a los cultivos por parte del agua subterránea se vuelve insignificante, y los rendimientos ajustados por presencia de las napas son muy similares a los rendimientos limitados por agua (esto se correlaciona con los resultados presentados en la Figura 7.18, donde para esta tendencia se muestra el fuerte aumento de las zonas con napas profundas, disminuyendo el porcentaje de áreas con napas en la zona óptima y con napas poco profundas); en este escenario puede verse el efecto positivo que pueden llegar a tener las napas cuando las precipitaciones no alcanzan a cubrir las necesidades de los cultivos. Para el escenario climático con tendencia neutral, la napa freática se encuentra en un gran porcentaje dentro de la zona óptima (Figura 7.18), por lo que los rendimientos ajustados por presencia de napas siempre son más altos que los rendimientos limitados por agua. Para el escenario climático con tendencia positiva (clima húmedo), se observan muchos años con rendimientos ajustados por presencia de napas menores que los rendimientos limitados por agua. Esto se debe a las afectaciones que trae una napa freática poco profunda (impacto negativo de las napas). Para el maíz tardío y la soja, el aumento del rendimiento debido al aporte de agua subterránea es excepcional. Para el maíz temprano y el trigo, los efectos negativos de las napas poco profundas son más débiles o insignificantes, debido a que su ciclo de crecimiento tiene lugar durante la estación menos lluviosa; además de que el trigo tiene raíces más cortas.

Estos resultados muestran que el manejo agrícola tiene potencial como para profundizar su estudio y tratar de que sea una herramienta útil en el manejo de los niveles freáticos, aumentando el consumo de agua cuando la napa es poco profunda y disminuyéndolo cuando la napa está muy profunda, ayudando de esta manera a gestionar y minimizar los riesgos asociados a inundaciones y sequías. En la siguiente sección se propondrá un manejo agronómico que incorpore como variable de análisis a la napa freática buscando el doble objetivo mencionado previamente.

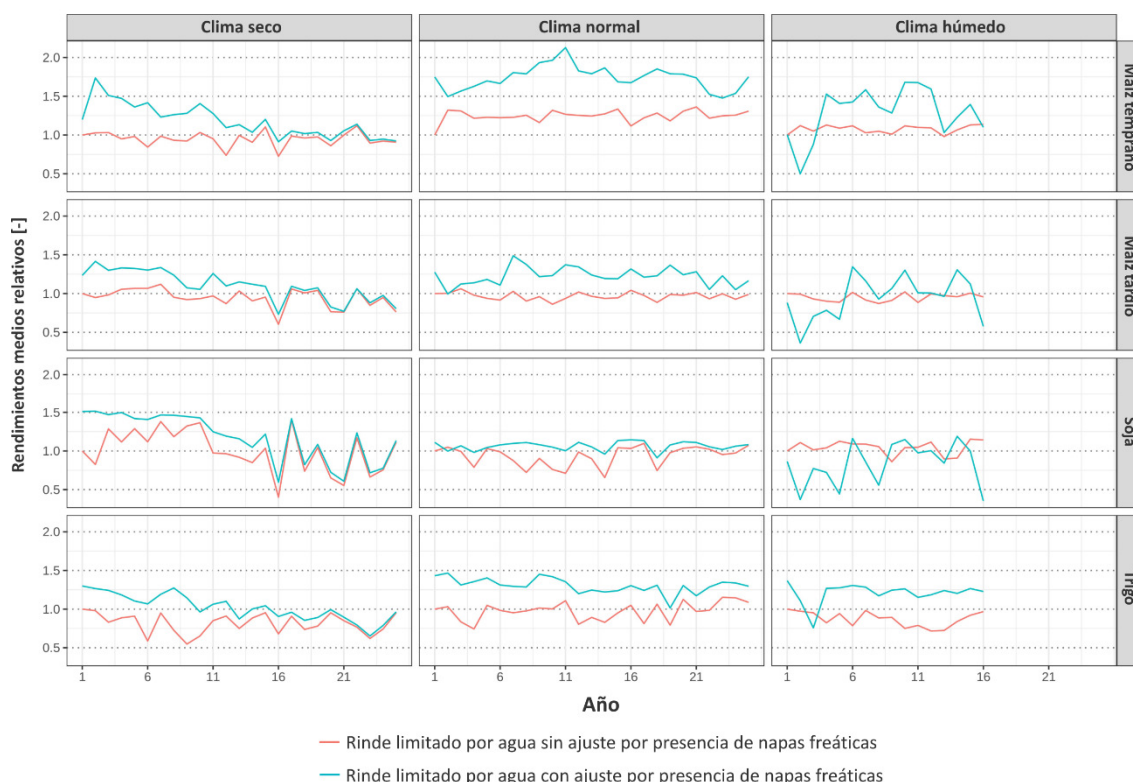


Figura 7.19. Diferencias entre los rendimientos limitados por agua y los rendimientos ajustados por la profundidad freática para los tres escenarios climáticos y los diferentes cultivos utilizados.

7.4.2 ¿Se puede reducir el riesgo de inundaciones y sequías en el futuro mediante el manejo del uso del suelo?

En esta sección se propondrá un manejo agrícola, que incluye a la profundidad freática como una variable de decisión para definir los cultivos del próximo ciclo. Al ser el nivel de la napa una variable de fácil mensura, las incertidumbres físicas de este manejo están relacionadas con el escenario climático que se desarrollará durante el próximo ciclo productivo. Cualitativamente, las decisiones para definir el uso del suelo teniendo en cuenta la napa freática buscan: i) un aumento en el consumo de agua si la napa freática es poco profunda, tratando de evitar una posible reducción de los rendimientos o incluso disminuir el riesgo de inundaciones); ii) una disminución en el consumo de agua si la napa freática es profunda, tratando de cambiar su posición hacia un nivel lo suficientemente alto como para subsidiar la falta de agua de lluvia, o incluso alcanzar la zona óptima para obtener el máximo rendimiento.

Cuantitativamente, se proponen los siguientes criterios en el manejo agrícola: i) si la profundidad de la napa freática es menor a 1,4 m: todos los agricultores deben realizar un doble cultivo, que consiste en trigo seguido de soja (en la Sección 7.3.1 se demostró que esta es la combinación de cultivos que consume la máxima cantidad de agua subterránea); ii) si la profundidad de la napa freática es mayor a 2,5 m: todos los agricultores deben realizar cultivos simples (maíz temprano, maíz tardío, soja), es decir, no se permite el doble cultivo y iii) si la profundidad de napa está entre 1,4 m y 2,5 m, el productor no tiene ninguna limitación para escoger el uso del suelo del próximo ciclo productivo. El rango de profundidades freáticas que va entre 1,4 m y 2,5 m incluye las

profundidades de rendimiento óptimo para la mayoría de los cultivos. Estos límites adoptados (1,4 y 2,5 m, respectivamente) surgieron como valores recomendados luego de varios experimentos numéricos. La adopción de prácticas adicionales, como el uso de cultivos de cobertura cuando la napa freática está muy cerca de la superficie, no demostró mejorar significativamente los resultados.

Para evaluar el impacto del manejo agrícola propuesto, se realizaron diversos ensayos con el SMI, analizando una cantidad de indicadores diferenciales entre las situaciones de manejo incluyendo o no la variable napa. Los indicadores utilizados fueron: áreas con profundidades de napa menores a 0,7 m (donde los rendimientos caen abruptamente), áreas con profundidades de napa mayores a 2,5 m (donde la napa freática ya no aporta agua a los cultivos), área inundada y margen global bruto (MGB). Los primeros tres indicadores se utilizan para analizar el impacto hidrológico del manejo agronómico propuesto, mientras que el último indicador está directamente relacionado con los resultados económicos producto de los cambios en los rendimientos de los cultivos obtenidos. La Figura 7.20 y la Figura 7.21 muestran las diferencias entre los resultados hidrológicos obtenidos para el manejo sin considerar a la napa freática y considerándola para los tres climas ensayados. En particular la Figura 7.20 presenta la variación del área con profundidades de napa menores a 0,7 m y la Figura 7.21 muestra los cambios en las áreas inundadas.

Para la tendencia negativa, se observa una disminución de las áreas con profundidades freáticas menores a 0,7 metros durante los primeros 10 años simulados (con picos de 450.000 y 350.000 hectáreas). En el escenario con tendencia neutral, se observa que las áreas con napas con profundidades menores a 0,7 metros disminuyen en gran parte del período simulado, destacándose las disminuciones en los primeros 10 años (con picos de hasta 600.000 hectáreas) y en los últimos 5 años (con picos de 300.000 hectáreas). Para la tendencia positiva, se destaca que durante toda la simulación se ve una disminución en las áreas con profundidades freáticas menores a 0,7 metros (esa disminución es en promedio de 300.000 hectáreas, con picos de 1.000.000 de hectáreas). Las áreas inundadas también muestran una disminución para los tres escenarios climáticos, presentando tendencias similares a las áreas con la napa muy cerca de la superficie comentadas anteriormente. Para la tendencia negativa, el manejo agronómico propuesto disminuye las áreas inundadas durante los primeros 7 años (con un máximo de 15.000 hectáreas). En el escenario con tendencia neutral, se logran reducir las áreas inundadas en los primeros y últimos 5 años del período simulado, con un máximo del orden de 20.000 hectáreas. Para la tendencia positiva, el nuevo manejo propuesto logra disminuir las áreas inundadas durante todo el período simulado (la reducción media en todo el período es del orden de 30.000 hectáreas, alcanzando en los últimos años picos de 100.000 hectáreas).

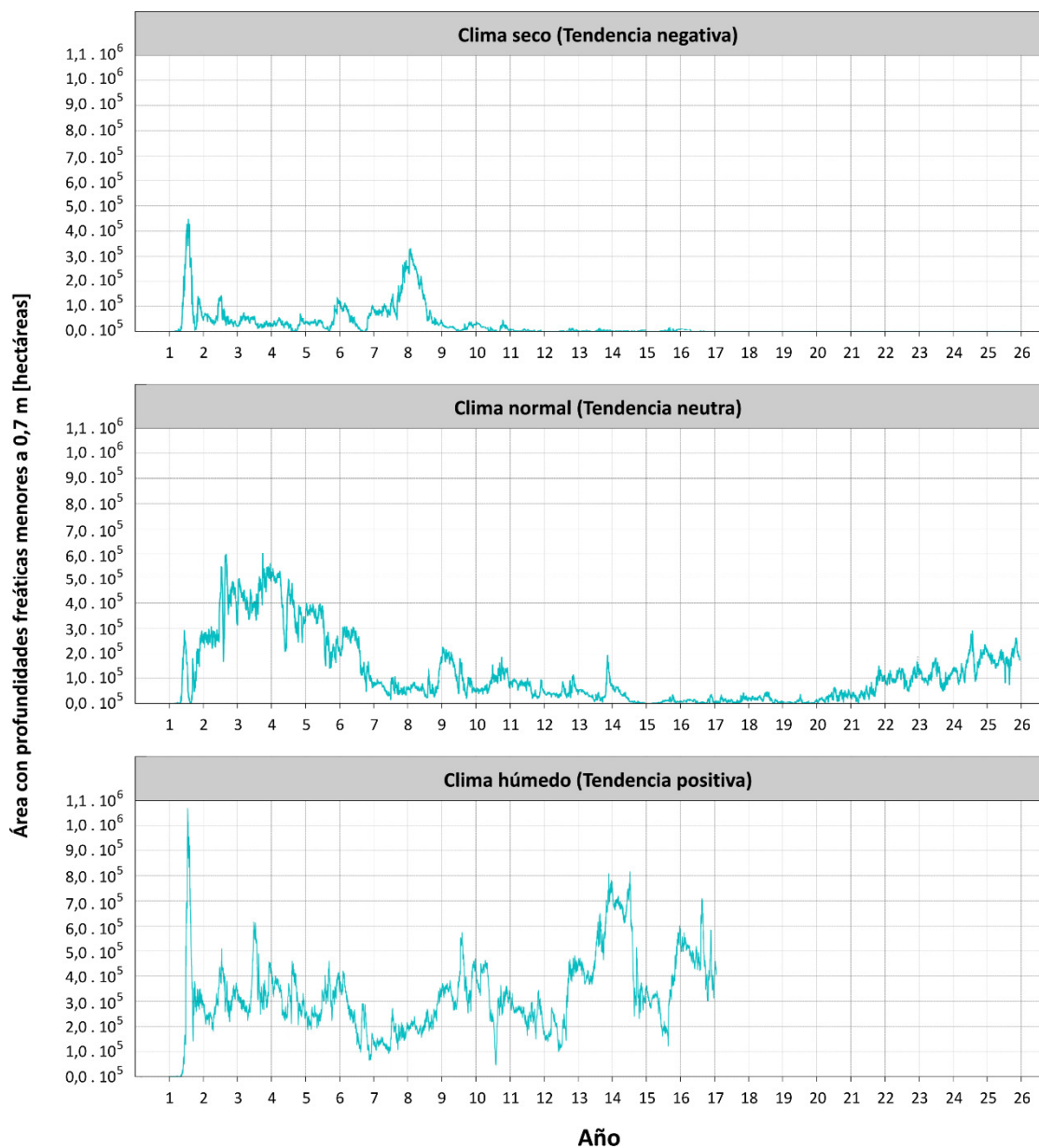


Figura 7.20. Diferencias en los resultados hidrológicos entre el manejo agrícola sin y con napa freática como variable de decisión. Diferencias de áreas con profundidades freáticas menores a 0,7 m.

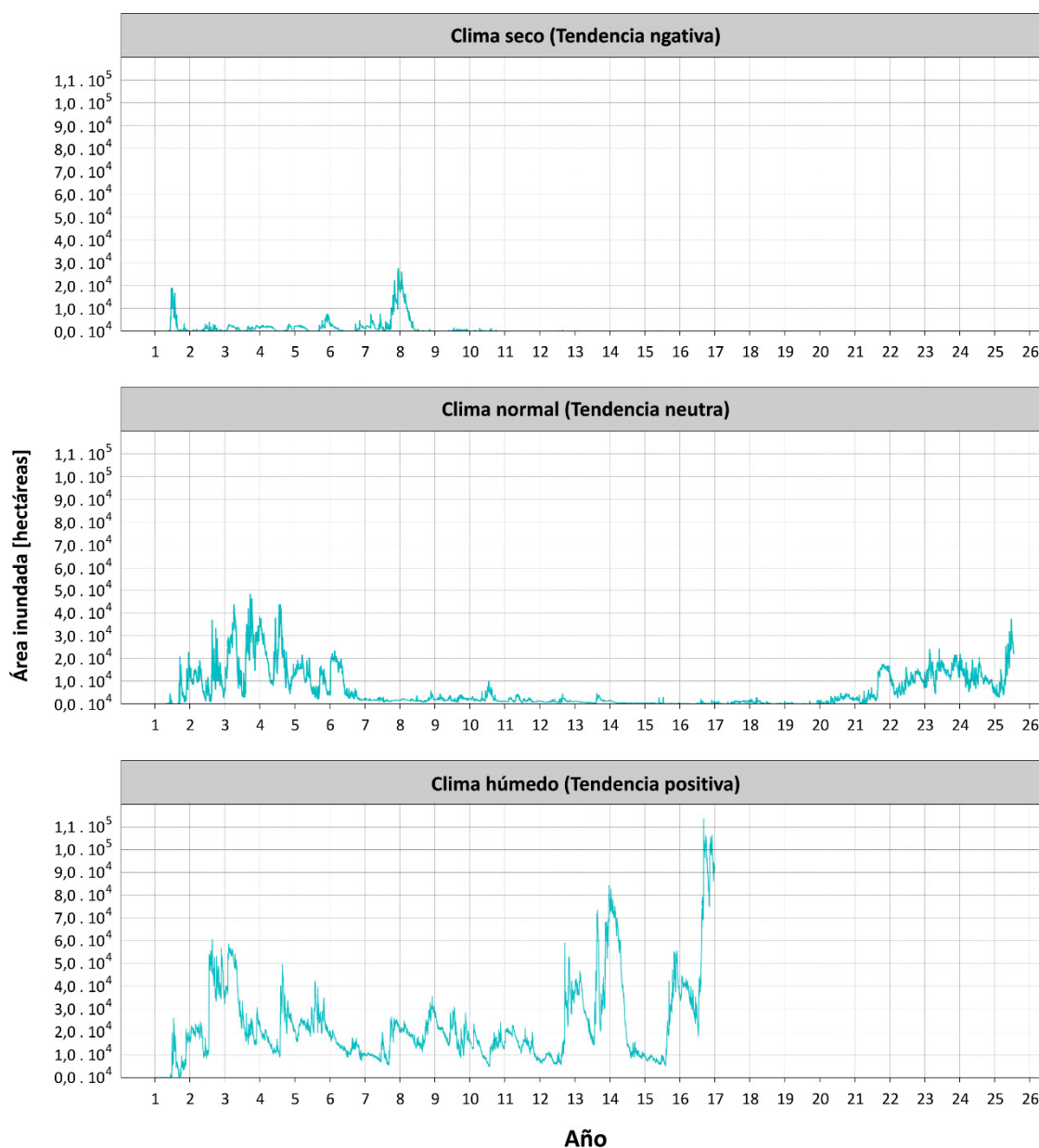


Figura 7.21. Diferencias en los resultados hidrológicos entre el manejo agrícola sin y con napa freática como variable de decisión. Diferencias de áreas inundadas.

La Figura 7.22 muestra el impacto económico del manejo agronómico propuesto. Se observa que la diferencia entre los márgenes globales brutos (MGB) es positiva para los tres escenarios climáticos prácticamente en todos los años simulados, lo que indica los posibles beneficios económicos de este nuevo paradigma de manejo. A lo largo de las simulaciones, se obtienen aumentos acumulados de 1.250, 2.300 y 3.800 millones de US\$ para las tendencias negativa, neutral y positiva, respectivamente (estos valores deben tomarse solamente como indicadores de los resultados económicos asociados a este nuevo manejo agronómico). Los mayores aumentos en el margen global bruto están dados por la disminución del área con napas cercanas a la superficie, ya que, como se explicó anteriormente, con esos niveles freáticos los rendimientos de los cultivos caen abruptamente. En la tendencia negativa, es interesante notar que hay

diferencias positivas en el MGB en los últimos años de la simulación, pero no por disminución de las áreas con profundidades de napa menores de 0,7 metros, sino porque el manejo agrícola propuesto ayuda a mantener la napa freática en la zona óptima de algunos cultivos al disminuir el consumo de agua, evitando una mayor profundización del nivel freático. La tendencia positiva presenta el mayor aumento en el MBG, esto se debe al hecho de que en este escenario, con el manejo agrícola propuesto, se obtienen las mayores disminuciones en áreas con napas poco profundas.

El uso de la profundidad freática como variable de decisión trae efectos positivos, tanto productivos/económicos (aumento de MBG) e hidrológicos (disminución de áreas potencialmente inundadas). Este manejo no solo es útil en casos de climas extremos (exceso o déficit de agua) sino que en situaciones climáticas normales también genera beneficios.

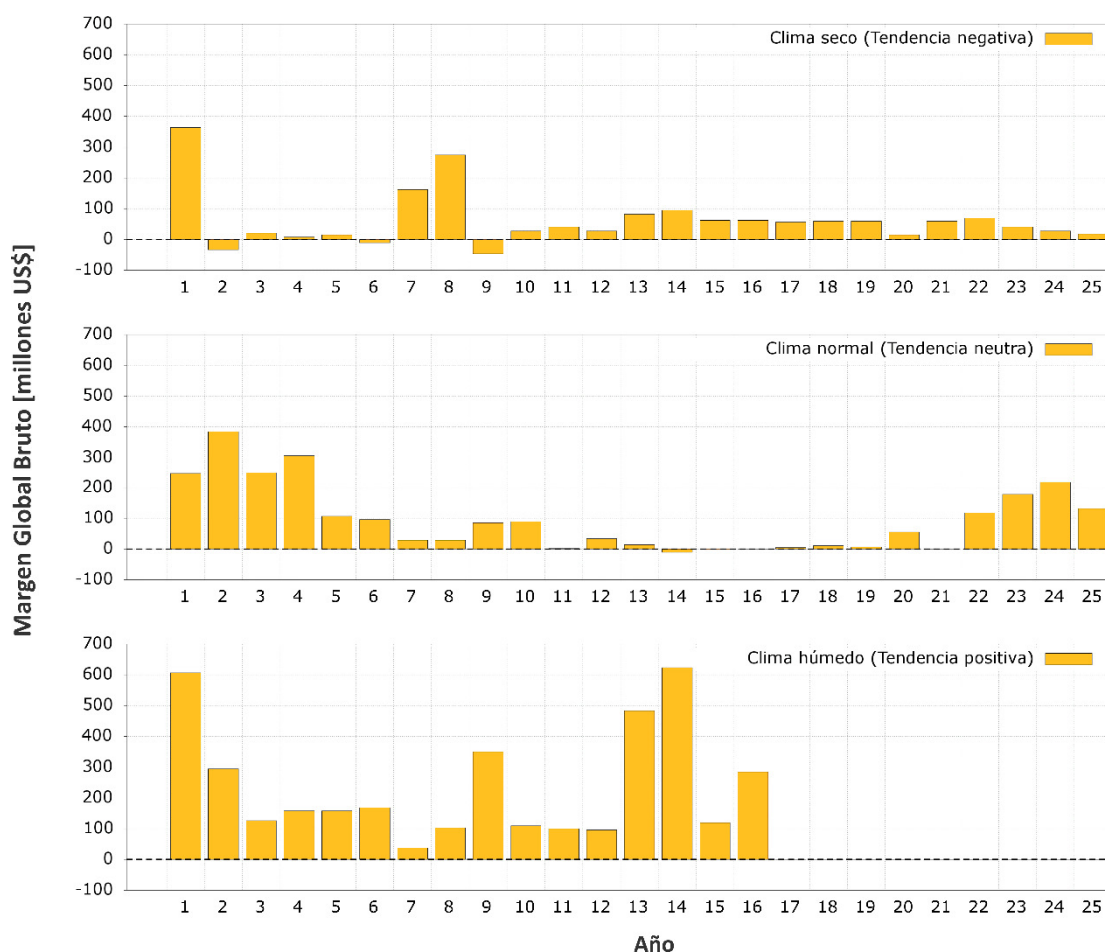


Figura 7.22. Diferencias en el Margen Global Bruto para los escenarios con tendencia positiva (gráfico superior), con tendencia neutra (gráfico medio) y con tendencia negativa (gráfico inferior).

7.5 Conclusiones del capítulo

La comprensión y modelación de sistemas ambientales complejos, como la llanura pampeana que contempla múltiples escalas de análisis (clima / agua / cultivo), requieren modelos

interconectados que puedan representar los principales procesos involucrados y las vinculaciones entre los mismos. El Sistema de Modelación Integrado (SMI), desarrollado previamente por un grupo de trabajo del cual fue parte este tesista (García et al., 2019) demostró ser fundamental para representar las interacciones y retroalimentaciones recíprocas entre escenarios climáticos plausibles, decisiones individuales de uso del suelo, dinámica de las napas freáticas poco profundas e impactos emergentes de estas interacciones sobre el uso regional del suelo, la producción agrícola y los riesgos de inundaciones y sequías. La performance del SMI resultó óptima para el tipo de análisis requerido. Se realizaron varias simulaciones con el SMI para validar el sistema completo (los componentes individuales habían sido validados previamente) y para demostrar la utilidad del SMI para abordar problemas complejos que involucran dimensiones tanto naturales como humanas.

La napa freática puede tener impactos nulos, positivos o negativos en los cultivos, dependiendo de su profundidad. A pesar del impacto de la napa freática en el crecimiento y los rendimientos de los cultivos, es inusual que los productores agrícolas de la llanura pampeana consideren esta variable en el proceso de toma de decisiones del uso del suelo para el próximo ciclo productivo.

En este capítulo se analizaron los efectos de un manejo agrícola que incorpore la consideración de la napa, bajo diferentes escenarios climáticos, para comprender si es posible mitigar los efectos de los excesos y déficits de agua a través de cambios en el uso del suelo; y verificar qué impacto tiene este nuevo paradigma productivo en los rendimientos de los cultivos y en los resultados económicos.

La gestión agrícola propuesta tiene los siguientes criterios: i) consumir más agua subterránea cuando su nivel está cercano a la superficie, tratando de reducir el riesgo de anegamiento y posibles inundaciones en condiciones climáticas húmedas; y ii) disminuir el consumo del agua subterránea cuando la misma se encuentra a niveles profundos, dejándola lista para "subsidiar" las necesidades de agua del cultivo durante los años secos. Es importante destacar que estos criterios en los que se basa la nueva gestión agronómica están asociados a una variable muy simple de medir y cuantificar (la napa freática), quedando solo las incertidumbres asociadas a los posibles escenarios climáticos que se desarrollarán en el próximo ciclo productivo.

Los usos del suelo que se plantean en la estrategia explorada, son solo una combinación de varias posibles. No es un objetivo de esta investigación determinar ni recomendar un uso del suelo en particular en detrimento de otro. Lo que se busca demostrar es la utilidad del SMI para explorar problemas complejos como este.

Se puede ver que el manejo agrícola propuesto, que incluye una variable perfectamente medible como la profundidad de napa en la toma de decisiones (dada su importancia en el ajuste de los rendimientos que se pueden obtener para los diferentes cultivos analizados), presenta mejoras desde el punto de vista hidrológico (al reducir áreas inundadas) y desde el punto de vista productivo al aumentar la MGB. Estas mejoras se observan en todos los escenarios climáticos analizados, lo que indica la conveniencia de utilizar este tipo de manejo, independientemente del clima futuro esperado. En definitiva, este manejo, tomado como una medida no estructural, y complementado con obras de infraestructura, podría ayudar a mitigar los impactos de los déficits y excesos hídricos en esta zona de llanura.

Capítulo 8

Conclusiones generales

¡Adiós, pampa mía!... Me voy... Me voy a tierras extrañas.

Adiós, caminos que he recorrido, ríos, montes y cañadas, tapera donde he nacido.

Si no volvemos a vernos, tierra querida, quiero que sepas que al irme dejo la vida. ¡Adiós!...

*¡Adiós, pampa mía!... Me voy camino de la esperanza. Adiós, llanuras que he galopado, sendas,
lomas y quebradas, lugares donde he soñado.*

¡Adiós!... ¡Me voy, pampa mía!... ¡Adiós!...

“Adiós pampa mía”

Ivo Pelay – Francisco Canaro – Mariano Mores

Esta tesis tuvo como objetivo avanzar en la caracterización de los vínculos entre la hidrología, el clima, el uso del suelo y la toma de decisiones agronómicas en la llanura pampeana, una de las principales regiones productoras de cereales y semillas oleaginosas del mundo, utilizando como principal herramienta de análisis la modelación numérica.

La cuenca del río Salado resultó una zona ideal para poder estudiar las relaciones y retroalimentaciones entre los procesos hidrológicos y ambientales. Se pusieron de manifiesto y cuantificaron los significativos cambios observados en las precipitaciones y en la cobertura vegetal de esta zona. Esto permitió entender el rol individual que juegan el clima y el uso del suelo en los sistemas hidrológicos de llanura, como así también ponderar el impacto de dichos factores en la dinámica del agua subterránea y de las inundaciones. La subcuenca A del río Salado mostró también ser un área propicia para ensayar diferentes estrategias de manejo agronómico y analizar el impacto hidrológico y económico de las mismas.

Todos estos análisis se hicieron mediante la implementación de una serie de modelos, entre los que se destacan: i) un modelo hidrológico distribuido y de fuerte base física que simula la mayoría de los procesos presentes en el ciclo hidrológico, ii) un modelo de toma de decisiones basado en agentes que incluye descripciones realistas del comportamiento humano, toma de decisiones e interacciones sociales, iii) un modelo de simulación de crecimiento, desarrollo y rendimiento de los principales cultivos, iv) un generador climático para producir series climáticas sintéticas diarias y v) un modelo empírico de corrección de los rendimientos de cultivos por la presencia de napas.

En la región pampeana se produjo un fuerte desarrollo de las actividades agrícolas, disminuyendo las aéreas con pasturas y pastizales. En nuestras zonas de estudio, el área cultivada prácticamente se duplicó en los últimos 50 años. Paralelamente con este avance de la frontera agrícola, la región registró un aumento sostenido en las precipitaciones, especialmente en primavera y verano, mostrado por todas las estaciones pluviométricas de la zona de estudio. Estos cambios, de origen natural y antrópico respectivamente, produjeron un aumento general del nivel de napas freáticas en nuestra zona de estudio, generando consecuentemente un incremento en la intensidad y frecuencia de las inundaciones. Estos análisis se presentaron en el Capítulo 4, donde se pudo establecer una correlación de tipo exponencial entre la profundidad de napa freática y el porcentaje del área inundada en las subcuencas estudiadas, siendo las profundidades freáticas de 2 metros un valor umbral a partir de la cual las áreas inundadas crecen significativamente, registrándose anegamientos de entre el 10 y el 30% del área analizada.

El análisis del comportamiento hidrológico de cuencas de llanuras realizado en el Capítulo 3, permite afirmar que el balance hídrico netamente vertical que caracteriza la llanura pampeana hace que la misma sea fuertemente sensible a las fluctuaciones climáticas (excesos y déficit de agua) así como a las actividades antrópicas. Ambos factores son indispensables para poder

explicar la marcada disminución de las profundidades freáticas registradas en la zona de estudio. El aumento en las precipitaciones explica, aproximadamente, el 85% del aumento en el nivel de las napas mientras que el incremento de la superficie cultivada explica el 60%. Estos resultados ponen de manifiesto la alta no linealidad y complejidad del sistema natural estudiado, ya que la combinación de ambos efectos produce un resultado bastante inferior a la suma de cada uno de los efectos por separado.

Históricamente el control de los excesos y déficits de agua se hizo mediante obras de infraestructura (canalizaciones, reservorios, compuertas, etc.); y si bien son muy importantes en la gestión de inundaciones y sequías, su impacto suele ser espacialmente acotado y su implementación muy costosa. Dado que las napas juegan un rol fundamental en los eventos de inundaciones y que el uso del suelo influye en la dinámica freática, es importante analizar la validez de estrategias que busquen reducir el riesgo y mitigar el impacto de inundaciones y sequías a partir de un manejo inteligente del uso del suelo.

Si bien existen antecedentes científicos donde se estudiaron las relaciones entre el uso del suelo y la napa freática en zonas planas, estos a menudo se han basado en mediciones puntuales realizadas a nivel de campo o parcela. En contraposición, los resultados presentados en esta Tesis se basan en simulaciones numéricas para evaluar los efectos del uso del suelo; incluyendo además en el análisis el factor climático para ver la performance de los diferentes manejos productivos propuestos en función del clima futuro esperado.

Los primeros ensayos con manejos productivos muy simples se presentaron en el Capítulo 6. Se pudo corroborar que usos del suelo como las pasturas y los pastizales consumen mucho más agua que cultivos anuales, esto debido a que están presentes todo el año y que su desarrollo radicular es mayor, pudiendo sus raíces acceder al agua subterránea más profunda. Estos resultados respaldan la conclusión de que la expansión de los cultivos anuales y el desplazamiento de pasturas y pastizales ha llevado a un aumento de la recarga de agua subterránea y a menores profundidades de la napa freática en algunas partes de la llanura pampeana. Estos ensayos también aportan evidencia preliminar sobre las limitaciones que puede tener el manejo de la napa freática través de decisiones sobre el uso del suelo. El primer limitante es la propagación de los efectos del uso del suelo en la profundidad freática desde el lote hasta el nivel de la subcuenca. A esta última escala se observa una influencia poco significativa si el uso del suelo se cambia solo en unas pocas áreas pequeñas. Este resultado indica que para modificar efectivamente la frecuencia de inundaciones y sequías a nivel de cuenca, los cambios en el uso del suelo serían necesarios realizarlos en gran parte de la cuenca. Un segundo problema son los efectos acumulativos del uso del suelo: bajo forzantes climáticos constantes, las condiciones de régimen en la profundidad de napa se alcanzan después de 10-15 años, dependiendo del tipo de cultivo. Esto sugiere que el cambio en el uso del suelo, dirigido a gestionar las aguas subterráneas a nivel de cuenca, no solo debe ser en toda la cuenca sino también persistente en el tiempo.

Una importante contribución de esta Tesis fue poner de manifiesto, y cuantificar, las interdependencias existentes entre los tomadores de decisión (productores) que comparten la napa freática. Estas interdependencias no solo tienen implicancias físicas en los sistemas agrícolas/ganaderos de llanuras, sino también sociales: las decisiones sobre el uso del suelo de un productor pueden influir positiva o negativamente en los rendimientos y los riesgos de

inundación de los productores vecinos. Si bien las simulaciones presentadas muestran claramente las interdependencias entre productores aledaños y los efectos del uso del suelo en la napa freática, entrevistas a diferentes productores de la zona pampeana sugieren que, en la actualidad, gran parte de los mismos no están completamente conscientes de los impactos que tienen las decisiones que toman respecto al uso del suelo en las napas, y menos aún sobre las interdependencias entre ellos.

Los resultados presentados en el Capítulo 6 presentan ciertas limitaciones, relacionadas con la modelación de la toma de decisiones de los productores y los forzantes climáticos. Para seguir profundizando el análisis de las interacciones y las retroalimentaciones recíprocas entre las decisiones individuales del uso del suelo, la dinámica de las napas freáticas, los escenarios climáticos y los impactos emergentes de estas interacciones en el uso regional del suelo, la producción agrícola y los riesgos de inundaciones y sequías, se desarrolló, junto con profesionales de varias instituciones, un modelo integrado que dé cuenta de la complejidad del sistema y ofrezca respuestas cuantitativas de los impactos previamente mencionados.

El Sistema de Modelación Integrado (SMI) que se desarrolló fue validado en forma completa, mientras que sus componentes individuales habían sido validados previamente (en esta Tesis y en los trabajos de referencia oportunamente citados). Para la validación del SMI, presentada en el Capítulo 7, se simuló en primer lugar los efectos combinados de diferentes cultivos bajo escenarios climáticos contrastantes (húmedo, normal y seco). Como se esperaba, las combinaciones de diversos usos del suelo y climas dieron como resultado patrones temporales y espaciales bastante diferentes de profundidades freáticas en toda la zona de estudio. El SMI pudo reproducir también el impacto de las variaciones en los precios relativos de los granos en el uso seleccionado del suelo y, a su vez, en la dinámica de la napa freática.

Con el SMI se analizaron los efectos de un manejo agrícola que incorpore la consideración de la napa, bajo diferentes escenarios climáticos, para comprender si es posible mitigar los efectos de los excesos y déficits de agua a través de cambios en el uso del suelo; y verificar qué impacto tiene este nuevo paradigma productivo en los rendimientos de los cultivos y en los resultados económicos. La gestión agrícola propuesta tiene los siguientes criterios: i) consumir más agua subterránea cuando su nivel está cercano a la superficie, tratando de reducir el riesgo de anegamiento y posibles inundaciones en condiciones climáticas húmedas; y ii) disminuir el consumo del agua subterránea cuando la misma se encuentra a niveles profundos, dejándola lista para "subsidiar" las necesidades de agua del cultivo durante los años secos. Es importante destacar que estos criterios en los que se basa la nueva gestión agronómica están asociados a una variable muy simple de medir y cuantificar (la napa freática), quedando solo las incertidumbres asociadas a los posibles escenarios climáticos que se desarrollarán en el próximo ciclo productivo. Los ensayos realizados mostraron una performance óptima del SMI para los análisis requeridos y la utilidad del mismo para profundizar el conocimiento de problemas complejos como este.

El manejo agrícola propuesto, que incluye una variable perfectamente medible como la profundidad de napa en la toma de decisiones (dada su importancia en el ajuste de los rendimientos que se pueden obtener para los diferentes cultivos analizados), presentó mejoras desde el punto de vista hidrológico (al reducir áreas inundadas y con la napa muy cerca de la

superficie) y desde el punto de vista productivo al aumentar los márgenes brutos de ganancia (fundamentalmente por mejorar los rindes de los cultivos implantados). Estas mejoras se observan en todos los escenarios climáticos analizados, lo que indica la conveniencia de utilizar este tipo de manejo, independientemente del clima futuro esperado. En definitiva, este manejo, tomado como una medida no estructural, y complementado con obras de infraestructura, podría ayudar a mitigar los impactos de los déficits y excesos hídricos en esta zona de llanura.

Respecto a la herramienta utilizada, podemos afirmar que la modelación numérica es un instrumento cada vez más potente y confiable para caracterizar fenómenos naturales y para apoyar la toma de decisiones en la gestión agronómica, dado que permite analizar escenarios de variadas escalas temporales y espaciales y poner a prueba hipótesis sin tener que materializar físicamente aquello que se desea estudiar. Por último, cabe resaltar la importancia que tuvo contar con un modelo hidrológico debidamente calibrado y validado para poder realizar un diagnóstico y un análisis retrospectivo del comportamiento hídrico de una cuenca bajo diferentes forzantes y usos de suelo. Se considera que este tipo de herramienta es fundamental para el desarrollo y posterior gestión de proyectos hidráulicos y agronómicos a escala de cuenca.

Referencias

- Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E., Rasmussen, J., 1986a. An introduction to the European Hydrological System — Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology* 87(1–2) 45–59.
- Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E., Rasmussen, J., 1986b. An introduction to the European Hydrological System — Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 2: Structure of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology* 87(1–2) 61–77.
- Agroindustria, 2018. Datos Abiertos Agroindustria (public data). Production/Estimates <https://datos.magyp.gob.ar/reportes.php?reporte=Estimaciones>, 2016 ed. Ministerio de Agroindustria, Presidencia de la Nación: Buenos Aires, Argentina.
- Andrade, J.F., Poggio, S.L., Ermácora, M., Satorre, E.H., 2015. Productivity and resource use in intensified cropping systems in the Rolling Pampa, Argentina. *European Journal of Agronomy* 67(0) 37–51.
- Aragón, R., Jobbágy, E.G., Viglizzo, E.F., 2010. Surface and groundwater dynamics in the sedimentary plains of the Western Pampas (Argentina). *Ecohydrology* 4(3) 433–447.
- Aramburu Merlos, F., Monzon, J.P., Mercau, J.L., Taboada, M., Andrade, F.H., Hall, A.J., Jobbagy, E., Cassman, K.G., Grassini, P., 2015. Potential for crop production increase in Argentina through closure of existing yield gaps. *Field Crops Research* 184 145–154.
- Arora, P., Bert, F., Podesta, G., Krantz, D., 2015. Ownership effect in the wild: Influence of land ownership on agribusiness goals and decisions in the Argentine Pampas. *Journal of Behavioral and Experimental Economics* 58 162–170.
- Arora, P., Peterson, N., Bert, F., Podesta, G., 2016. Managing the triple bottom line for sustainability: a case study of Argentine agribusinesses. *Sustainability: Science, Practice and Policy* 12(1) 16.
- AYARS, J.E., SHOUSE, P., LESCH, S.M., 2009. In situ use of groundwater by alfalfa. *Agricultural Water Management* 96(11) 1579–1586.
- Badano, N., 2010. Modelación integrada de grandes cuencas de llanura con énfasis en la evaluación de inundaciones, Facultad de Ingeniería. Universidad de Buenos Aires: Buenos Aires, Argentina (https://www.ina.gob.ar/pdf/phc_tesis_%20badano_mar10.pdf), p. 158.
- Bala, V., Goyal, S., 1998. Learning from neighbours. *Review of Economic Studies* 65 595–621.
- Barros, V., Boninsegna, J., Camilloni, I., Chidiak, M., Magrín, G., Rusticucci, M., 2014. Climate change in Argentina: trends, projections, impacts and adaptation. *WIREs Climatic Change* 19.
- Barsky, O., Gelman, J., 2009. Historia del agro argentino: desde la conquista hasta fines del siglo XX, Third ed. Sudamericana, Buenos Aires.
- Berbery, E.H., Barros, V.R., 2002. The Hydrologic Cycle of the La Plata Basin in South America. *Journal of Hydrometeorology* 3(6) 630–645.

- Berberly, E.H., Doyle, M.E., Barros, V., 2006. Tendencias regionales en la precipitación, In: Barros, V., Clarke, R., Silva Días, P. (Eds.), El cambio climático en la Cuenca del Plata. CONICET: Buenos Aires, pp. 67-92.
- Bert, F., North, M., Rovere, S., Tatara, E., Macal, C., Podestá, G., 2015. Simulating agricultural land rental markets by combining agent-based models with traditional economics concepts: The case of the Argentine Pampas. *Environmental Modelling & Software* 71 97-110.
- Bert, F.E., Laciana, C.E., Podesta, G.P., Satorre, E.H., Menéndez, A.N., 2007. Sensitivity of CERES-Maize simulated yields to uncertainty in soil properties and daily solar radiation. *Agricultural Systems* 94 141-150.
- Bert, F.E., Podestá, G.P., Rovere, S., González, X., Menéndez, A., Ruiz Toranzo, F., Torrent, M., North, M., Macal, C., Sydelko, P., Weber, E.U., Letson, D., 2010. Agent based simulation of recent changes in agricultural systems of the Argentine Pampas. *Advances and Applications in Statistical Sciences* 2(2) 213-231.
- Bert, F.E., Podestá, G.P., Rovere, S., Menéndez, A.N., North, M., Tatara, E., Laciana, C.E., Weber, E.U., Ruiz Toranzo, F., 2011a. An agent based model to simulate structural and land use changes in agricultural systems of the argentine pampas. *Ecological Modeling* 222 3486– 3499.
- Bert, F.E., Podestá, G.P., Rovere, S.L., Menéndez, Á.N., North, M., Tatara, E., Laciana, C.E., Weber, E., Toranzo, F.R., 2011b. An agent based model to simulate structural and land use changes in agricultural systems of the argentine pampas. *Ecological Modelling* 222(19) 3486-3499.
- Bert, F.E., Rovere, S.L., Macal, C.M., North, M.J., Podestá, G.P., 2014. Lessons from a comprehensive validation of an agent based-model: The experience of the Pampas Model of Argentinean agricultural systems. *Ecological Modelling* 273(0) 284-298.
- Bertoni, J.C., Ganancias, F., 2010. Comportamiento hidrológico y criterios del diseño de obras hídricas en sistemas climáticos cambiantes: reflexiones y análisis de casos., In: Paoli, C., Malinow, G. (Eds.), Publicación del Seminario-Taller Criterios para la determinación de crecidas de diseño en sistemas climáticos cambiantes. Universidad Nacional del Litoral: Santa Fe, Argentina, p. 174.
- Boelee, E., 2011. Ecosystems for water and food security. United Nations Environment Programme and International Water Management Institute: Nairobi and Colombo, p. 179.
- Bristow, K.L., Campbell, G.S., 1984. On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. *Agricultural and Forest Meteorology* 31(2) 159-166.
- Caamaño Nelli, G., Fertonani, M., Prendes, H., Quinodoz, H., 1979. Análisis de sistemas hidrológicos no típicos. Bases teóricas y criterios metodológicos, IX Congreso Nacional del Agua: San Luis, Argentina, p. 7.
- Calviño, P., Monzon, J., 2009. Farming systems of Argentina: yield constraints and risk management, In: Sadras, V., Calderini, D. (Eds.), Crop Physiology. Academic Press: San Diego, pp. 55-70.
- Calviño, P.A., Monzón, J.P., 2009. Farming systems of Argentina: Yield constraints and risk management, In: Calderini, D. (Ed.), Crop physiology: Applications for genetic improvement and agronomy. Elsevier Academic Press: San Diego, California.
- Castañeda, M.E., Barros, V., 1994. Las tendencias de la precipitación en el Cono Sur de América al este de los Andes. *Meteorológica* 19(1-2) 23-32.

- Caviglia, O.P., Andrade, F.H., 2010. Sustainable intensification of agriculture in the Argentine Pampas: capture and use efficiency of environmental resources. *The Americas Journal of Plant Science and Biotechnology* 3((Special issue 1)) 1-8.
- Contreras, S., Jobbágy, E.G., Villagra, P.E., Nosetto, M.D., Puigdefábregas, J., 2011. Remote sensing estimates of supplementary water consumption by arid ecosystems of central Argentina. *Journal of Hydrology* 397(1-2) 10-22.
- Cyert, R.M., March, J.G., 1963. *A behavioral theory of the firm*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- de Fraiture, C., Wichelns, D., 2010. Satisfying future water demands for agriculture. *Agricultural Water Management* 97(4) 502-511.
- Delvenne, P., Vasen, F., Vara, A.M., 2013. The “soy-ization” of Argentina: The dynamics of the “globalized” privatization regime in a peripheral context. *Technology in Society* 35(2) 153-162.
- DHI, 2012a. MIKE 11—a modelling system for rivers and channels, In: Environment, D.W. (Ed.), *Reference Manual*: Horsholm, Denmark.
- DHI, 2012b. Volume 2, In: Environment, D.W. (Ed.), *MIKE SHE User Manual*: Horsholm, Denmark.
- Diecidue, E., Van De Ven, J., 2008. Aspiration level, probability of success and failure, and expected utility. *International Economic Review* 49(2) 683-700.
- Donigian, A.S., Davis, H.H., 1978. *User's Manual for Agricultural Runoff Management (ARM) Mode*. U.S. Environmental Protection Agency: U.S. Environmental Protection Agency.
- Droogers, P., Allen, R.G., 2002. Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. *Irrigation and Drainage Systems* 16(1) 33-45.
- Eakin, H., Wehbe, M., 2009. Linking local vulnerability to system sustainability in a resilience framework: two cases from Latin America. *Climatic Change* 93(3) 355-377.
- Elliott, J., Kelly, D., Chrysanthacopoulos, J., Glotter, M., Jhunjhnuwala, K., Best, N., Wilde, M., Foster, I., 2014. The parallel system for integrating impact models and sectors (pSIMS). *Environmental Modelling & Software* 62 509-516.
- Fagiolo, G., Moneta, A., Windrum, P., 2007. A critical guide to empirical validation of agent-based models in economics: methodologies, procedures, and open problems. *Computational Economics* 30(3) 195-226.
- Farjad, B., Pooyandeh, M., Gupta, A., Motamendi, M., Marceau, D.J., 2017. Modelling Interactions between Land Use, Climate, and Hydrology along with Stakeholders' Negotiation for Water Resources Management. *Sustainability* 9(11) 19.
- Farr, T.G., Rosen, P.A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D., Alsdorf, D., 2007. The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of geophysics* 45(2).
- Feler, M.V., Vázquez Amabile, G., van Meer, H., Gaspari, F.J., Mercuri, P.A., Prieto, D., Flamenco, E., 2014. Validación del modelo SWAT en la Cuenca del Río Quequén Grande y evaluación de cambios potenciales en el clima y uso de tierras, *Memorias del II Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras*: Santa Fe, Argentina., p. 10.

- Ferreiro, V., 1983. El mapa hidrogeomorfológico. Su utilización en el estudio de los recursos hídricos superficiales en regiones con insuficiente información de base. La cuenca hídrica superficial del río Bermejo, Actas del Coloquio de Olavarría de Hidrología de las grandes llanuras: Olavarría, Argentina., p. 39.
- Fertonani, M., Prendes, H., 1983. Hidrología en áreas de llanura. Aspectos conceptuales teóricos y metodológicos, Actas del Coloquio de Olavarría de Hidrología de las grandes llanuras: Olavarría, Argentina., p. 39.
- Fidalgo, F., 1983. Algunas características de los sedimentos superficiales en la cuenca del Río Salado y en La pampa Ondulada, Coloquio Internacional Sobre Hidrología de Grandes Llanuras: Olavarría, Buenos Aires, Argentina, pp. 1045-1067.
- Fischer, R.A., Byerlee, D., Edmeades, G.O., 2014. Crop Yields and Global Food Security: Will Yield Increase Continue to Feed the World? ACIAR Monograph No. 158. Australian Centre for International Agricultural Research: Canberra, Australia, p. 634.
- Florio, E.L., Mercau, J.L., Jobbágy, E.G., Noretto, M.D., 2014. Interactive effects of water-table depth, rainfall variation, and sowing date on maize production in the Western Pampas. Agricultural Water Management 146 9.
- Frenken, K., 2006. Technological innovation and complexity theory. Economics of Innovation and New Technology 15(2) 137-155.
- Fuschini Mejía, M.C., 1994. El agua en las llanuras, In: UNESCO/ORCYT (Ed.): Montevideo, Uruguay, p. 54.
- García, G.A., García, P.E., Rovere, S.L., Bert, F.E., Schmidt, F., Menéndez, A.N., Noretto, M.D., Verdin, A., Rajagopalan, B., Arora, P., Podesta, G.P., 2019. A linked modelling framework to explore interactions among climate, soil water and land use decisions in the Argentine Pampas. Environmental Modelling & Software 111 13.
- García, P.E., Badano, N., Menéndez, Á.N., Bert, F., García, G.A., Podesta, G., Verdin, A., Rajagopalan, B., Arora, P., 2018. Influencia de los cambios en el uso de suelo y las precipitaciones sobre la dinámica hídrica de una cuenca de llanura extensa. Caso de estudio: Cuenca del Río Salado, Buenos Aires, Argentina. Revista Iberoamericana del Agua 5(2) 15.
- García, P.E., Menéndez, Á.N., Podestá, G.P., Bert, F., Arora, P., Jobbágy, E.G., 2017. Land-Use as possible strategy for managing water table depth in flat basins with shallow groundwater. The International Journal of River Basin Management 16(1).
- Gilbert, N., 2008. Agent-based models. SAGE, Los Angeles, CA.
- Giorgi, F., 2002. Variability and trends of sub-continental scale surface climate in the twentieth century. Part I: Observations. Climate Dynamics 18 675-691.
- Gotts, N.M., Polhill, J.G., 2009. When and How to Imitate Your Neighbours: Lessons from and for FEARLUS. Journal of Artificial Societies and Social Simulation 12(3) 2.
- Gotts, N.M., Polhill, J.G., Law, A.N.R., Izquierdo, L.R., 2003. Dynamics of imitation in a land use simulation, Second International Symposium on Imitation in Animals and Artefacts: University of Wales, Aberystwyth, UK, pp. 39-46.
- Graham, D.N., Butts, M.B., 2005. Flexible, integrated watershed modelling with MIKE SHE. , In: Singh, V.P., Frevert, D.K. (Eds.), Watershed Models. CRC Press: London, pp. 245-272.

- Grassini, P., Hall, A.J., Mercau, J.L., 2009. Benchmarking sunflower water productivity in semiarid environments. *Field Crops Research* 110(3) 251-262.
- Grimm, A.M., Barros, V.R., Doyle, M.E., 2000. Climate variability in southern South America associated with El Niño and La Niña events. *Journal of Climate* 13 35-58.
- Grimm, V., Railsback, S.F., 2005. Individual-based modeling and ecology. Princeton University Press, Princeton.
- Grimm, V., Revilla, E., Berger, U., Jeltsch, F., Mooij, W.M., Railsback, S.F., Thulke, H.-H., Weiner, J., Wiegand, T., DeAngelis, D.L., 2005. Pattern-oriented modeling of agent-based complex systems: lessons from ecology. *Science* 310(987-991).
- Guevara Ochoa, C., Cazenave, G., Masson, I., Vives, L., Vazquez Amabile, G., 2019. A Novel Approach for the Integral Management of Water Extremes in Plain Area. *Hydrology* 6(3) 28.
- Halcrow, Partners, 1999. Plan Maestro Integral de la Cuenca de Río Salado. Ministerio de Obras y Servicios Públicos de la Provincia de Buenos Aires: La Plata, Argentina.
- Hall, A.J., Rebella, C.M., Ghersa, C.M., Culot, J.P., 1992. Field-crop systems of the Pampas, In: Pearson, C.J. (Ed.), *Field Crop Ecosystems: Ecosystems of the World*. Elsevier: Amsterdam, Holland, pp. 413-450.
- Hardin, G., 1968. The Tragedy of the Commons. *Science* 162(3859) 1243-1248.
- Havno, K., Madsen, M., Dorge, J., 1996. MIKE 11 - A generalised river modelling package, In: Singh, V.P. (Ed.), *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications: Colorado, USA.
- Havrylenko, S.B., Bodoque, J.M., Srinivasan, R., Zucarelli, G.V., Mercuri, P., 2016. Assessment of the soil water content in the Pampas region using SWAT. *CATENA* 137 298-309.
- Haylock, M.R., Peterson, M.C., Alves, L.M., Ambrizzi, T., Anunciação, Y.M.T., Baez, J., Barros, V.R., Berlato, M.A., Bidegain, M., Coronel, G., Corradi, V., Garcia, V.J., Grimm, A.M., Karoly, D., Marengo, J.A., Marino, M.B., Moncunill, D.F., Nechet, D., Quintana, J., Rebello, E., Rusticucci, M., Santos, J.L., Trebejo, I., Vincent, L.A., 2006. Trends in total and extreme South American rainfall in 1960–2000 and links with Sea Surface Temperature. *Journal of Climate* 19 1490-1512.
- He, X., Lucatero, D., Ridler, M., Madsen, H., Kidmose, J., Hole, Ø., Petersen, C., Zheng, C., Refsgaard, J.C., 2019. Real-time simulation of surface water and groundwater with data assimilation. *Advances in Water Resources* 127 13.
- Henriksen, H.J., Trolborg, L., Nyegaard, P., Sonnenborg, T.O., Refsgaard, J.C., Madsen, B., 2003. Methodology for construction, calibration and validation of a national hydrological model for Denmark. *Journal of Hydrology* 280(1–4) 52-71.
- Herriott, S.R., Levinthal, D., March, J.G., 1985. Learning from experience in organizations. *The American Economic Review* 75(2) 298-302.
- Herzer, H., 2003. Flooding in the Pampean Region of Argentina: The Salado Basin, In: Kreimer, A., Arnold, M., Carlin, A. (Eds.), *Building Safer Cities: The Future of Disaster Risk*. The World Bank, Disaster Management Facility: Washington, D.C., pp. 137-147.
- Heuvelmans, G., 2010. Development and credibility assessment of a metamodel relating water table depth to agricultural production. *Agricultural Water Management* 97(11) 1731-1741.

- Iglesias, A., Quiroga, S., Diz, A., 2011. Looking into the future of agriculture in a changing climate. *European Review of Agricultural Economics* 38(3) 21.
- INA, 2012. Evaluación de las Inundaciones y las Obras de Drenaje en la Cuenca del Salado (Prov. Buenos Aires) mediante Modelación Numérica, García, Pablo E. ed. Laboratorio de Hidráulica - Instituto Nacional del Agua, p. 323.
- INTA, 1990. Atlas de Suelos de la República Argentina. Escala 1:500.000 y 1:1.000.000. CIRN. Instituto de Evaluación de Tierras, Buenos Aires, Argentina.
- IPCC, 2007. Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change In: Core Writing Team, P., R.K and Reisinger, A. (Ed.), p. 104.
- Iriondo, M., 1986. Modelos sedimentarios de cuencas continentales: las llanuras de agradación, Congreso Latinoamericano de hidrocarburos: Buenos Aires, pp. 81-98.
- ISSC, 1976. International Stratigraphic Guide -A guide to stratigraphic classification, terminology, and procedure John Wiley and Sons ed. International Subcommission on Stratigraphic Classification.
- Janža, M., 2013. Impact assessment of projected climate change on the hydrological regime in the SE Alps, Upper Soča River basin, Slovenia. *Natural Hazards* 67(3) 1025-1043.
- Jensen, W., Hodgson, E., Christiansen, H., Mackey, J., Tinney, L., Sharitz, R., 1986. Remote Sensing Inland Wetlands: a Multispectral Approach. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 52(1) 87-100.
- Jobbágy, E.G., Jackson, R.B., 2004. Groundwater use and salinization with grassland afforestation. *Global Change Biology* 10 1299-1312.
- Jobbágy, E.G., Noretto, M.D., Santoni, C.S., Baldi, G., 2008. El desafío ecohidrológico de las transiciones entre sistemas leñosos y herbáceos en la llanura Chaco-Pampeana. *Ecología Austral* 18 305-322.
- Jones, J.W., Hoogenboom, G., Porter, C.H., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L.A., Wilkens, P.W., Singh, U., Gijsman, A.J., Ritchie, J.T., 2003. The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy* 18 235-265.
- Kahlown, M.A., Azam, M., 2002. Individual and combined effect of waterlogging and salinity on crop yields in the Indus basin. *Irrigation Drainage* 51 329-338.
- Khan, S., Yufeng, L., Ahmad, A., 2009. Analysing complex behaviour of hydrological systems through a system dynamics approach. *Environmental Modelling & Software* 24(12) 10.
- Kristensen, K.J., Jensen, S.E., 1975. A model for estimating actual evapotranspiration from potential evapotranspiration. *Nordic Hydrology* 6 (3) 170-188.
- Kruse, E., 2001. Hydrological processes on large flatlands: Case study in the northwest region of Buenos Aires Province (Argentina). *IAHS-AISH Publication*(267) 531-535.
- Kruse, E., Ainchil, J., 2011. El agua en la llanura bonaerense, *Revista de la Universidad. Universidad Nacional de La Plata (UNLP): La Plata, Argentina.*, p. 11.
- Kruse, E., Ainchil, J., 2017. Comportamiento hidrológico en grandes llanuras: caso de estudio Noroeste de la Provincia de Buenos Aires, Argentina. *Universidad de La Plata: Argentina*, p. 11.

- Kruse, E., Lay, J.A.F., Aiello, J.L., 2006. Water table fluctuations: An indicator of hydrological behaviour in the northwest region of Buenos Aires Province (Argentina), Sustainability of Groundwater Resources and its Indicators, 302 ed. IAHS Press, pp. 91-97.
- Kruse, E., Zimmermann, E., 2002. Hidrogeología de Grandes Llanuras. Particularidades en la Llanura Pampeana (Argentina), Workshop Groundwater and Human Development - XXXII IAH Congress: Mar del Plata (Argentina). pp. 2025-2038.
- Kuppel, S., Houspanossian, J., Nosetto, M.D., Jobbágy, E.G., 2015. What does it take to flood the Pampas?: Lessons from a decade of strong hydrological fluctuations. Water Resources Research 51(4) 2937-2950.
- Laio, F., Tamea, S., Ridolfi, L., D'Odorico, P., Rodriguez-Iturbe, I., 2009. Ecohydrology of groundwater-dependent ecosystems: 1. Stochastic water table dynamics. Water Resources Research 45(5).
- Lamers, P., McCormick, K., Hilbert, J.A., 2008. The emerging liquid biofuel market in Argentina: Implications for domestic demand and international trade. Energy Policy 36(4) 1479-1490.
- Lant, T.K., 1992. Aspiration level adaptation: an empirical exploration. Management Science 38(5) 623-643.
- LHA-INA, 2012. Evaluación de las Inundaciones y las Obras de Drenaje en la Cuenca del Salado (Prov. Buenos Aires) mediante Modelación Numérica, Project LHA 331, Report LHA 01-331-12. Instituto Nacional del Agua, Argentina: Ezeiza.
- Li, F., Liu, Y., Zhao, Y., Deng, X., Jiang, R., 2019. Regulation of shallow groundwater based on MODFLOW. Applied Geography 110.
- Liebmann, B., Vera, C.S., Carvalho, L.M.V., Hoerling, M.P., Barros, V., Báez, J., Bidegain, M., 2004. An observed trend in central South American precipitation. Journal of Climate 17 4357-4367.
- Liu, Y., Gupta, H., Springer, E., Wagener, T., 2008. Linking science with environmental decision making: Experiences from an integrated modeling approach to supporting sustainable water resources management. Environmental Modelling & Software 23(7) 846-858.
- Loliyana, V., Patel, P., 2018. Performance evaluation and parameters sensitivity of a distributed hydrological model for a semi-arid catchment in India. Journal of Earth System Science 127 26.
- Lovino, M., Müller, O., Müller, G., Sgroi, L., Baethgen, W.E., 2018. Interannual-to-multidecadal hydroclimate variability and its sectoral impacts in northeastern Argentina. Hydrology and Earth System Sciences, 22(6) 22.
- Lowry, C.S., Loheide, S.P., 2010. Groundwater-dependent vegetation: Quantifying the groundwater subsidy. Water Resources Research 46(6) n/a-n/a.
- Ma, L., Hoogenboom, G., Ahuja, L.R., Ascough li, J.C., Saseendran, S.A., 2006. Evaluation of the RZWQM-CERES-Maize hybrid model for maize production. Agricultural Systems 87(3) 274-295.
- Maggioni, V., Massari, C., 2018. On the performance of satellite precipitation products in riverine flood modeling: A review. Journal of Hydrology 558 11.
- Manuel-Navarrete, D., Gallopín, G.C., Blanco, M., Díaz-Zorita, M., Ferraro, D.O., Herzer, H., Lateralra, P., Murmis, M.R., Podestá, G.P., Rabinovich, J., Satorre, E.H., Torres, F., Viglizzo, E.F., 2009. Multi-causal and integrated assessment of sustainability: the case of agriculturization in the Argentine Pampas. Environment, Development and Sustainability 11(3) 621-638.

- March, J.G., 1988. Variable risk preferences and adaptive aspirations. *Journal of Economic Behavior and Organization* 9(1) 5-24.
- Matthews, R., Gilbert, N., Roach, A., Polhill, J., Gotts, N., 2007. Agent-based land-use models: a review of applications. *Landscape Ecology* 22(10) 1447-1459.
- Maydana, G., Romagnoli, M., Cunha, M., Portapila, M., 2020. Integrated valuation of alternative land use scenarios in the agricultural ecosystem of a watershed with limited available data, in the Pampas region of Argentina. *Science of The Total Environment* 714.
- Mazzoleni, M., Brandimartec, L., Amarantod, A., 2019. Evaluating precipitation datasets for large-scale distributed hydrological modelling. *Journal of Hydrology* 578 16.
- Mejia, M.N., Madramootoo, C.A., Broughton, R.S., 2000. Influence of water table management on corn and soybean yields. *Agricultural Water Management* 46(1) 73-89.
- Menéndez, Á.N., Badano, N., Lecertua, E., Re, F., Re, M., 2012. Evaluación de las inundaciones y las obras de drenaje de la Cuenca del Saldo (prov. Buenos Aires) mediante modelación numérica. Instituto Nacional del Agua: Ezeiza, Argentina, p. 323.
- Mercau, J.L., Dardanelli, J.L., Collino, D.J., Andriani, J.M., Irigoyen, A., Satorre, E.H., 2007. Predicting on-farm soybean yields in the pampas using CROPGRO-soybean. *Field Crops Research* 100(2-3) 200-209.
- Mercau, J.L., Nosoetto, M.D., Bert, F., Giménez, R., Jobbágy, E.G., 2015. Shallow groundwater dynamics in the Pampas: Climate, landscape and crop choice effects. *Agricultural Water Management* 163 159-168.
- Mercau, J.L., Nosoetto, M.D., Bert, F., Giménez, R., Jobbágy, E.G., 2016. Shallow groundwater dynamics in the Pampas: Climate, landscape and crop choice effects. *Agricultural Water Management* 163 159-168.
- Monzon, J.P., Sadras, V.O., Abbate, P.A., Caviglia, O.P., 2007. Modelling management strategies for wheat-soybean double crops in the south-eastern Pampas. *Field Crops Research* 101(1) 44-52.
- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., Veith, T.L., 2007. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE* 50(3) 885-900.
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10(3) 282-290.
- Nosoetto, M.D., Acosta, A.M., Jayawickreme, D.H., Ballesteros, S.I., Jackson, R.B., Jobbágy, E.G., 2013. Land-use and topography shape soil and groundwater salinity in central Argentina. *Agricultural Water Management* 129 120-129.
- Nosoetto, M.D., Jobbágy, E.G., Brizuela, A.B., Jackson, R.B., 2012. The hydrologic consequences of land cover change in central Argentina. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 154(0) 2-11.
- Nosoetto, M.D., Jobbágy, E.G., Jackson, R.B., Sznaider, G.A., 2009. Reciprocal influence of crops and shallow ground water in sandy landscapes of the Inland Pampas. *Field Crops Research* 113 138-148.
- Nosoetto, M.D., Paez, R.A., Ballesteros, S.I., Jobbágy, E.G., 2015. Higher water-table levels and flooding risk under grain vs. livestock production systems in the subhumid plains of the Pampas. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 206 60-70.

- Ostrom, E., 2000. Collective Action and the Evolution of Social Norms. *Journal of Economic Perspectives* 14(3) 137-158.
- Pinto, P., Fernández Long, M.E., Piñeiro, G., 2017. Including cover crops during fallow periods for increasing ecosystem services: Is it possible in croplands of Southern South America? *Agriculture, Ecosystems & Environment* 248 48-57.
- Polhill, J.G., Sutherland, L.-A., Gotts, N.M., 2010. Using Qualitative Evidence to Enhance an Agent-Based Modelling System for Studying Land Use Change. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 13(2) 10.
- Portela, S.I., Andriulo, A.E., Jobbágy, E.G., Sasal, M.C., 2009. Water and nitrate exchange between cultivated ecosystems and groundwater in the Rolling Pampas. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 134 277-286.
- Rand, W., Rust, R.T., 2011. Agent-based modeling in marketing: guidelines for rigor. *International Journal of Research in Marketing* 28(3) 181-193.
- Reboratti, C.E., 2010. Un mar de soja: la nueva agricultura en Argentina y sus consecuencias. *Revista de Geografía, Norte Grande* 45 63-76.
- Refsgaard, J.C., Seth, S.M., Bathurst, J.C., Erlich, M., Storm, B., Jørgensen, G.H., Chandra, S., 1992. Application of the SHE to catchments in India Part 1. General results. *Journal of Hydrology* 140(1-4) 1-23.
- Refsgaard, J.C., Storm, B., 1995. MIKE SHE, In: Singh, V.P. (Ed.), *Computer models of watershed hydrology*. Water Resources Publications, pp. 809-846.
- Refsgaard, J.C., Storm, B., Clausen, T., 2010. Système Hydrologique Européen (SHE): Review and perspectives after 30 years development in distributed physically-based hydrological modelling. *Hydrology Research* 41(5) 355-377.
- Ren, P., Li, J., Feng, P., Guo, Y., Ma, Q., 2018. Evaluation of Multiple Satellite Precipitation Products and Their Use in Hydrological Modelling over the Luanhe River Basin, China. *Water* 10(6) 23.
- Richards, L.A., 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Journal of Applied Physics* 1(5) 318-333.
- Richardson, C.W., 1981. Stochastic simulation of daily precipitation, temperature, and solar radiation. *Water Resources Research* 17(1) 182-190.
- Rimski-Korsakov, H., Alvarez, C.R., Lavado, R.S., 2015. Cover crops in the agricultural systems of the Argentine Pampas. *Journal of Soil and Water Conservation* 70(6) 134A-140A.
- Riquier, J., Bramao, D.L., Corne, J.P., 1970. A new system of soil appraisal in terms of actual and potential productivity: Rome, Italy, p. 38.
- Rizzo, G., Rattalino Edreira, J.I., Archontoulis, S., Yang, H., 2018. Do shallow water tables contribute to high and stable maize yields in the US Corn Belt? *Global Food Security* 18 8.
- Ropelewski, C.F., Halpert, S., 1987. Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño-Southern Oscillation. *Monthly Weather Review* 115 1606-1626.
- Rovere, S.L., North, M.J., Podestá, G.P., Bert, F.E., 2016. Practical Points for the Software Development of an Agent-Based Model of a Coupled Human-Natural System. *IEEE Access* 4 4282-4298.

- Rusticucci, M., Penalba, O., 2000. Interdecadal changes in the precipitation seasonal cycle over Southern South America and their relationship with surface temperature. *Climate Research* 16 1-15.
- Sadras, V.O., Cassman, K.G.G., Grassini, P., Hall, A.J., Bastiaanssen, W.G.M., Laborte, A.G., Milne, A.E., Sileshi, G., Steduto, P., 2015. Yield gap analysis of field crops – Methods and case studies, FAO Water Reports No. 41. FAO: Rome, Italy.
- Sahoo, G.B., Ray, C., De Carlo, E.H., 2006. Calibration and validation of a physically distributed hydrological model, MIKE SHE, to predict streamflow at high frequency in a flashy mountainous Hawaii stream. *Journal of Hydrology* 327(1–2) 94-109.
- Sallies, A.R., 1999. Clima e Inundaciones en la Pampa Deprimida, Floodplain Management Association – 17th Semiannual Conference.
- Santoni, C.S., Jobbágy, E.G., Contreras, S., 2010. Vadose zone transport in dry forests of central Argentina: Role of land use. *Water Resources Research* 46(10) W10541.
- Satorre, E.H., 2011. Recent changes in pampean agriculture: possible new avenues in coping with global change challenges, In: Araus, J.L., Slafer, G.A. (Eds.), *Crop Stress Management and Global Climate Change*. CABI: Wallingford, UK, pp. 47-57.
- Satorre, E.H., Menéndez, F., Tinghitella, G.A., Cavasassi, J.L., 2005. TRIGUERO: un sistema de apoyo a la fertilización nitrogenada de trigo. Convenio AACREA y Profertil S. A., software de aplicación agronómica: Buenos Aires, Argentina.
- Scarpati, O.E., Spescha, L., Capriolo, A., 2002. Occurrence of severe floods in the Salado River Basin, Buenos Aires province, Argentina. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 7(3) 285-301.
- Schaap, M.G., Leij, F.J., 2000. improved Prediction of Unsaturated Hydraulic Conductivity with the Mualem-van Genuchten Model. *Soil Science Society of America Journal of Applied Physics* 64 843-851.
- Schnepf, R.D., Dohleman, E., Bolling, C., 2001. Agriculture in Brazil and Argentina: Developments and prospects for major field crops, Economic Research Service Agriculture and Trade Report. U.S. Department of Agriculture: Washington, D.C., p. 85.
- Schreinemachers, P., Berger, T., 2006. Land use decisions in developing countries and their representation in multi-agent systems. *Journal of Land Use Science* 1(1) 29 - 44.
- Seager, R., Naik, N., Baethgen, W.E., Robertson, A.W., Kushnir, Y., Nakamura, J., 2010. Tropical oceanic causes of interannual to multidecadal precipitation variability in southeast South America over the past century. *Journal of Climate* 23 5517-5539.
- Seyfried, M.S., Schwinning, S., Walvoord, M.A., Pockman, W.T., Newman, B.D., Jackson, R.B., Phillips, F.M., 2005. Ecohydrological control of deep drainage in arid and semiarid regions. *Ecology* 86 277-287.
- Sinclair, T.R., Salado-Navarro, L.R., Salas, G., Purcell, L.C., 2007. Soybean yields and soil water status in Argentina: Simulation analysis. *Agricultural Systems* 94(2) 471-477.
- SMN, 2017. Servicios Climáticos. Atlas Climático. Servicio Meteorológico Nacional: Buenos Aires, Argentina.
- Stisen, S., Jensen, K.H., Sandholt, I., Grimes, D.I.F., 2008. A remote sensing driven distributed hydrological model of the Senegal River basin. *Journal of Hydrology* 354(1–4) 131-148.

- Teng, J., Jakeman, A.J., Vaze, J., Croke, B.F.W., Dutta, D., Kim, S., 2017. Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. *Environmental Modelling & Software* 90 201-216.
- Thompson, J.R., Sørensen, H.R., Gavin, H., Refsgaard, A., 2004. Application of the coupled MIKE SHE/MIKE 11 modelling system to a lowland wet grassland in southeast England. *Journal of Hydrology* 293 151–179.
- Trigo, E.J., Cap, E., Malach, V., Villarreal, F., 2009. The case of zero-tillage technology in Argentina, Discussion Paper. International Food Policy Research Institute.
- Usunoff, E., 2002. Framework for assessing hydrogeology of large plains, In: Bocanegra, E.-M., D - Massone, H (Ed.), *Groundwater and human development: Mar del Plata, Argentina.*, pp. 2039-2042.
- UTN-FRA, 2007. Plan de Desarrollo Integral del Río Salado: Estudio de Impacto Ambiental, Social y Territorial. DiPSOH: Buenos Aires, Argentina (<https://www.ina.gov.ar/pdf/LH-PHC-InformeSalado-23-07-12.pdf>).
- Vargas, W.M., Minetti, J.L., Poblete, A.G., 2002. Low-frequency oscillations in climatic and hydrological variables in southern South America's tropical-subtropical regions. *Theoretical and Applied Climatology* 72(1-2) 29-40.
- Vazquez Amabile, G., Bosch, N., Ricca, A.P., Ortiz de Zarate, M.L., Rojas, D., Lascombes, J., Feiguin, F., 2017. Napa Freática: dinámica, variables de control y contenido de nitratos en suelos de Pampa arenosa. *Revista Ciencia del Suelo* 35(1) 18.
- Vázquez, R.F., Feyen, L., Feyen, J., Refsgaard, J.C., 2002. Effect of grid size on effective parameters and model performance of the MIKE-SHE code. *Hydrological Processes* 16(2) 355-372.
- Verburg, P.H., Overmars, K.P., 2009. Combining top-down and bottom-up dynamics in land use modeling: exploring the future of abandoned farmlands in Europe with the Dyna-CLUE model. *Landscape Ecology* 24(9) 1167.
- Vercelli, N., Varni, M., Lara, B., Entraigas, I., Ares, M., 2019. Linking soil water balance with flood spatial arrangement in an extremely flat landscape. *Hydrological Processes* 34(1) 12.
- Verdin, A., Rajagopalan, B., Kleiber, W., Podestá, G., Bert, F., 2018. A conditional stochastic weather generator for seasonal to multi-decadal simulations. *Journal of Hydrology* 556 12.
- Viglizzo, E.F., Frank, F.C., 2006. Land-use options for Del Plata Basin in South America: Tradeoffs analysis based on ecosystem service provision. *Ecological Economics* 57(1) 140-151.
- Viglizzo, E.F., Frank, F.C., Carreño, L.V., Jobbágy, E.G., Pereyra, H., Clatt, J., Pincén, D., Ricard, M.F., 2011. Ecological and environmental footprint of 50 years of agricultural expansion in Argentina. *Global Change Biology* 17(2) 959-973.
- Viglizzo, E.F., Jobbágy, E.G., Frank, F.C., Aragón, R., De Oro, L., Salvador, V., 2009. The dynamics of cultivation and floods in arable lands of Central Argentina. *Hydrology and Earth System Sciences* 13 491-502.
- Viglizzo, E.F., Roberto, Z.E., Lertora, F., Gay, E.L., Bernardos, J., 1997. Climate and land-use change in field-crop ecosystems of Argentina. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 66(1) 61-70.
- Wijesekara, G.N., Farjad, B., Gupta, A., Qiao, Y., Delaney, P., 2014. A comprehensive land-use/hydrological modeling system for scenario simulations in the Elbow River watershed, Alberta, Canada. *Environmental Management* 53(2) 357-381.

Zhao, H., Wei, Y., Ding, M., Zhao, Y., Zhang, Z., 2019. Farmers' perceptions of water use for social equality, economic development and environmental protection in a water-stressed region. *International Journal of River Basin Management* 8 8.

Zimmermann, E., 1999. Adaptación de Tecnologías Existentes a los Sistemas Hidrológicos de Llanura: Modificación y Aplicación del Modelo de Onda Cinemática. *Cuadernos del CURIHAM. PHI-UNESCO* 5(2) 21.

Zipper, S.C., Motew, M., Booth, E., Chen, X., Qiu, J., Kucharik, C., Carpenter, S., Loheide II, S.P., 2018. Continuous separation of land use and climate effects on the past and future water balance. *Journal of Hydrology* 565 15.

Zipper, S.C., Soylu, M.E., Booth, E.G., Loheide, S.P., 2015. Untangling the effects of shallow groundwater and soil texture as drivers of subfield-scale yield variability. *Water Resources Research* 51(8) 6338-6358.

Zipper, S.C., Soylu, M.E., Kucharik, C.J., Loheide II, S.P., 2017. Quantifying indirect groundwater-mediated effects of urbanization on agroecosystem productivity using MODFLOW-AgroIBIS (MAGI), a complete critical zone model. *Ecological Modelling* 359 201-219.