

**DINAMICA DE LAS INUNDACIONES EN LAS CUENCAS
DEL DEPARTAMENTO MARACO (LA PAMPA)**

Lorena Verónica Carreño

*Trabajo de Tesis para ser presentado como requisito para optar por
el Título de*
***MAGISTER SCIENTIAE en Manejo y Conservación de Recursos
Naturales para la Agricultura***

Orientación: Agroecosistemas

Área Ciencias de las Plantas y Recursos Naturales

PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS AGRARIAS

**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
UNIVERSIDAD NACIONAL DE MAR DEL PLATA**

Balcarce, Argentina
Agosto 2020

**DINAMICA DE LAS INUNDACIONES EN LAS CUENCAS
DEL DEPARTAMENTO MARACO (LA PAMPA)**

Lorena Verónica Carreño

DIRECTORA DE TESIS: MSc. Zinda Edith Roberto (EEA INTA Anguil)

CO-DIRECTOR DE TESIS: MSc. Fabián Néstor Cabria (FCA, UNMdP)

DINAMICA DE LAS INUNDACIONES EN LAS CUENCAS DEL DEPARTAMENTO MARACO (LA PAMPA)

Lorena Verónica Carreño

Aprobada por:

Evaluador

MSc. Edgardo Osvaldo Adema

Evaluador

Dr. Daniel Emilio Martínez

Evaluador

Dr. Marino Marcelo Puricelli

DEDICATORIA

Esta tesis va dedicada enteramente a mis padres, Susana y José, que siempre me alentaron a estudiar una carrera profesional, aun cuando yo no lo tenía muy decidido. Sin ese primer empujón, no podría estar hoy presentando esta tesis de maestría. Eternamente agradecida, los amo.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecer a mi Directora y Co-Director de tesis, por haber aceptado formar parte de esto y acompañarme desinteresadamente en todo el proceso.

***Zinda**, ex compañera de trabajo y actual amiga, es la persona que junto a **Edgardo Adema** (director de la EEA INTA Anguil), me alentó a realizar el posgrado cuando no estaba pasando un muy buen momento anímico luego de reincorporarme de una prolongada licencia laboral por accidente de trabajo. Gracias a ambos por el aliento.*

***Fabián**, docente del posgrado, con quien a pesar de haber tomado su curso hace varios años, aceptó sin ningún problema, ser el co-director de la tesis. Gracias por tu trato cordial y tus interesantes aportes.*

*A la Secretaria de Ciencia y Técnica de la Facultad de Ciencias Agrarias, Mag. **Liliana Iriarte** por su insistencia en que no abandonara mis estudios de posgrado y facilitarme la gestión administrativa.*

*Al Director del Área de Ciencias de las Plantas y Recursos Naturales de la UI Balcarce, Dr. **Andrés Zambelli** por su apoyo en mi re-inscripción al posgrado.*

*A los evaluadores de la tesis: **Edgardo, Daniel y Marino** por sus constructivos aportes y sugerencias para mejorar la versión final de la tesis.*

*A mis compañeros y amigos del posgrado “la banda de Peluca”. A **Juancho, Fede, Cristian, Andrea, Anita, Antonela, Lucre y Vicky**, gracias por esta hermosa amistad que aún hoy, después de varios años de ya no convivir en Balcarce, hemos sabido mantener a través de la distancia.*

A mis compañeros y amigos de INTA, que hacen más llevaderas las horas laborales en la Institución, y han sabido entender cuando no dispuse de tiempo para aportar en otras actividades por estar abocada a finalizar la tesis.

Por último, a todas aquellas personas e Instituciones que facilitaron los datos y la información necesaria para llevar a cabo la presente tesis, y a cada uno de los

profesionales que han atendido alguna de mis consultas durante el proceso de análisis de datos o redacción de la tesis.

INDICE

DEDICATORIA.....	Pág. iv
AGRADECIMIENTOS.....	Pág. v
ÍNDICE.....	Pág. vii
ÍNDICE DE TABLAS.....	Pág. viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	Pág. ix
INDICE DEL APENDICE.....	Pág. xii
RESUMEN.....	Pág. xiii
ABSTRACT.....	Pág. xiv
INTRODUCCION.....	Pág. 1
HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.....	Pág. 3
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	Pág. 5
MATERIALES Y MÉTODOS.....	Pág. 17
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	Pág. 54
CONCLUSIONES.....	Pág. 93
BIBLIOGRAFÍA.....	Pág. 97
APÉNDICE A.....	Pág. 106
APENDICE B.....	Pág. 114
APENDICE C.....	Pág. 123

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Estadística descriptiva de registros de temperatura máxima y mínima en abrigo meteorológico para General Pico, período 1956-2018.....	Pág. 27
Tabla 2: Composiciones edáficas presentes en la cuenca mayor con sus unidades taxonómicas, texturas del horizonte A1 y B1, orden y profundidad.....	Pág. 30
Tabla 3: Fechas de las 38 imágenes satelitales utilizadas.....	Pág. 42
Tabla 4: Información de los pozos del área de estudio.....	Pág. 50
Tabla 5: Superficie de cada lote del departamento Maraco, que se inundó al menos una vez durante 1993-2017.....	Pág. 63
Tabla 6: Cantidad de otoños y primaveras neutras o normales, secas y húmedas para las localidades del área de estudio.....	Pág. 70
Tabla 7: Análisis de excesos hídricos, período 1990-2017, para Dorila, General Pico, Speluzzi y Ceballos.....	Pág. 72
Tabla 8: Excesos hídricos totales para cada mes y localidad (todo el período)...	Pág. 73
Tabla 9: Número de excesos diarios para cada categoría y localidad.....	Pág. 76
Tabla 10: Estadística descriptiva de excesos diarios de cada localidad (1990-2003 y 2004-2017).....	Pág. 76
Tabla 11: Promedio, desvío estándar, mínimo y máximo para los 4 pozos (1990-2017, 1990-2003 y 2004-2017).....	Pág. 81
Tabla 12: Estadística descriptiva de niveles freáticos de los pozos de Gral. Pico, para verano, otoño, invierno y primavera (período 1990-2017).....	Pág. 82
Tabla 13: Uso de la tierra (REPAGRO) para los ejidos municipales de la Cuenca “Oeste” y cuenca “Este” (1991-2002 y 2003-2014).....	Pág. 86

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Cuenca hidrográfica del NE de La Pampa.....	Pág. 19
Figura 2: Subcuencas Este y Oeste de la cuenca del NE de La Pampa.....	Pág. 20
Figura 3: Cuencas del departamento Maracó.....	Pág. 21
Figura 4: Localidades con registros pluviométricos históricos.....	Pág. 22
Figura 5: Promedio de precipitaciones anuales acumuladas de las distintas localidades (1993-2017).....	Pág. 23
Figura 6: Isohietas del departamento Maracó (1984-2014).....	Pág. 25
Figura 7: Altitudes (msnm) de la gran cuenca.....	Pág. 31
Figura 8: Curvas de nivel (m) del departamento Maracó.....	Pág. 31
Figura 9: Pendientes (%) del área de estudio.....	Pág. 32
Figura 10: Secuencia de pasos del modelo hidrológico (gvSIG) para construir la red de drenaje.....	Pág. 33
Figura 11: Red de drenaje del área de estudio.....	Pág. 34
Figura 12: Profundidades medias del nivel freático de La Pampa.....	Pág. 35
Figura 13: Escena del path-row 228-85 de la imagen Landsat de noviembre 2016, y localización de las subcuencas Este y Oeste.....	Pág. 41
Figura 14: Área utilizada como recorte de las imágenes satelitales.....	Pág. 43
Figura 15: Ejemplo de capa de superficie inundada (clasificación no supervisada).....	Pág. 45
Figura 16: Localización de los pozos con registros de niveles freáticos.....	Pág. 49
Figura 17: Superficie inundada (has.), período 1993-2017.....	Pág. 55
Figura 18: Superficie inundada (% de superf.), 1993-2017.....	Pág. 57
Figura 19: Máxima y mínima superficie inundada (1993-2017).....	Pág. 58

Figura 20: Diferencia de superficie inundada entre 24/04/2001 y 02/11/2001.....	Pág. 59
Figura 21: Máxima área inundada, 1993-2017.....	Pág. 61
Figura 22: Frecuencia de inundación del departamento Maracó, 1993-2017.....	Pág. 62
Figura 23: División catastral de Maracó, y superficie de cada lote que se inundó al menos una vez (1993-2017).....	Pág. 64
Figura 24: Títulos catastrales rurales de Maracó.....	Pág. 65
Figura 25: Títulos catastrales rurales de Maracó, según grado de afectación (%).....	Pág. 66
Figura 26: Precipitaciones anuales para localidades de cuencas “Oeste”, “Este”, y total (1993-2017).....	Pág. 68
Figura 27: Precipitaciones mensuales de General Pico (1990-2003).....	Pág. 69
Figura 28: Precipitaciones mensuales de General Pico (2004-2017).....	Pág. 69
Figura 29: Correlación entre lluvia acumulada 15, 30, 60 y 90 días antes de la fecha de la imagen satelital y, superficie inundada.....	Pág. 70
Figura 30: Precipitaciones y excesos hídricos diarios, para: a) Dorila, b) General Pico, c) Speluzzi y, d) Ceballos.....	Pág. 73
Figura 31: Profundidad media mensual de niveles freáticos de los pozos I-1, I-5, II-3 y I-11.....	Pág. 78
Figura 32: Variación de la profundidad media mensual del nivel freático, de los pozos: a) I-1, b) I-5, c) II-3 y, d) I-11 (1990-2017).....	Pág. 79
Figura 33: Precipitaciones medias y profundidad del nivel freático anual de los pozos analizados (1990-2017).....	Pág. 82
Figura 34: Precipitaciones medias y profundidad del nivel freático, de los pozos (verano, otoño, invierno y primavera), 1990-2003.....	Pág. 83
Figura 35: Precipitaciones medias y profundidad del nivel freático, de los pozos (verano, otoño, invierno y primavera), 2004-2017.....	Pág. 83
Figura 36: Superficie de cultivos y pasturas para ambas cuencas (1991-2014)..	Pág. 87

- Figura 37.** Superficie con cosecha fina y cosecha gruesa para ambas cuencas (1991-2014).....Pág. 87
- Figura 38:** Uso consuntivo de distintos patrones de uso de la tierra para ambas cuencas (1991-2002 y 2003-2014).....Pág. 89
- Figura 39:** Uso consuntivo promedio anual, para alfalfa, girasol, maíz, sorgo, soja y trigo.....Pág. 90
- Figura 40:** Esquema de cómo varían los flujos de agua según distintos patrones de uso del suelo.....Pág. 90
- Figura 41:** Uso consuntivo anual por hectárea para Maracó (1990-2015).....Pág. 91

INDICE DEL APENDICE

APENDICE A: Superficie inundada - periodo 1993-2017.....	Pág. 106
APENDICE B: Evolucion del area inundada - periodo 1993-2017	Pág. 114
APENDICE C: Isohietas quinquenales de Maraco – periodo 1993-2017.....	Pag. 121

RESUMEN

Las inundaciones constituyen procesos esenciales tal como lo son el flujo de energía y el ciclo de nutrientes, fundamentales en el mantenimiento de humedales y ecosistemas costeros. Sin embargo, cuando nos referimos a agroecosistemas, estas perturbaciones naturales causan efectos apreciables tanto sobre las comunidades vegetales y animales, como sobre los asentamientos urbano-rurales presentes en la región, afectando la economía, el transporte y la infraestructura local asociada a los mismos.

Particularmente en el caso del NE de La Pampa, durante los años 1999 y 2001, se registraron precipitaciones extraordinarias, que dieron lugar a situaciones de inundación y anegamiento severos afectando una importante superficie productiva. Otra situación similar ocurrió durante el otoño del año 2017. En este contexto de dinamismo constante del paisaje pampeano, las imágenes satelitales acopladas a un entorno SIG, proporcionan una herramienta adecuada para el estudio de la evolución de las áreas anegadas. Esta información sumada a otras capas permitiría desarrollar sistemas de prevención, seguimiento y evaluación a diferentes escalas espaciales y temporales.

En la presente tesis se evaluó a través del análisis de imágenes satelitales, la dinámica de las inundaciones en las cuencas del departamento Maracó durante un período de 25 años, comprendido entre 1993-2017. Para completar el estudio se evaluaron registros de precipitaciones, niveles freáticos, excesos hídricos y uso de la tierra (uso consuntivo).

Si bien la máxima superficie inundada ocurrió en la primavera del año 2001 para ambas cuencas, en la cuenca con tosca ("Oeste") la superficie inundada en términos relativos fue superior en casi todo el período, situación muy evidente en el período de inundación 1999-2002 (excepto en la inundación 2016-2017 donde la cuenca "Este" resulta ser más afectada). Al menos dos son los factores que pueden explicar la diferencia de permanencia del agua en la superficie del suelo, entre las cuencas "Este" y "Oeste": 1) la diferencia textural y, 2) la profundidad de la tosca. El análisis de correlación entre la lluvia caída 15, 30, 60 y 90 días antes de la fecha de la imagen satelital y la superficie inundada, presentó mejor ajuste con la lluvia acumulada de 60 días, explicando un poco más del 50% de la ocurrencia de las inundaciones. Los datos de uso de la tierra indicaron una clara tendencia de aumento de la superficie destinada a cultivos, acompañada de una disminución de la superficie destinada a pasturas para

ambas cuencas. Esto se ve reflejado en una disminución del uso consuntivo anual que realiza la vegetación. Es decir, el cambio en el uso de la tierra en los últimos años hacia especies que evapotranspiran menor cantidad de agua (dejando, por lo tanto, un volumen mayor disponible en el perfil del suelo), facilitan la posterior ocurrencia de inundaciones cuando se manifiestan las precipitaciones. Sin embargo, estos cambios fueron acompañados por una profundización de los niveles freáticos a través del tiempo, situación contraria a lo esperado.

Palabras clave: anegamiento, exceso hídrico, nivel freático, precipitación, riesgo

ABSTRACT

Floods are essential processes such as energy flow and nutrient cycle, fundamental in the maintenance of wetlands and coastal ecosystems. However, when we refer to agroecosystems, these natural disturbances cause appreciable effects both on plant and animal communities, and on urban-rural settlements in the region, affecting the economy, transport and local infrastructure associated with them.

Particularly in the case of the NE of La Pampa, during the years 1999 and 2001, extraordinary rainfalls were recorded, causing severe flooding and waterlogging situations, affecting an important productive area. Another similar situation occurred during the autumn of 2017. In this context of constant dynamism of the Pampean landscape, satellite images coupled with a GIS environment provide an adequate tool for studying the evolution of flooded areas. This information, added to other layers, would allow the development of prevention, monitoring and evaluation systems at different spatial and temporal scales.

In this thesis the dynamics of floods in the basins of Maracó political district during a 25-year period (1993-2017), were evaluated through the analysis of satellite images. To complete the study, rainfall records, groundwater levels, water excesses and land use (consumptive use) were evaluated.

Although the maximum flooded area occurred in the spring of 2001 for both basins, in the basin with rough ("West") the flooded area in relative terms was higher in almost the entire period, situation more evident in the 1999-2002 flood period (except in the 2016-2017 flood where the "East" basin was more affected). At least two are the factors that can explain the difference in the permanence of water on the soil surface,

between the “East” and “West” basins: 1) the textural difference and, 2) the depth of the rough. The correlation analysis between the fallen rain 15, 30, 60 and 90 days before the satellite image date and the flooded surface, presented a better adjustment with the accumulated rain of 60 days, explaining a little more than 50% of the occurrence of the floods. The land use data indicated a clear trend of increase in the area devoted to crops, accompanied by a decrease in the area devoted to pastures for both basins. This is reflected in a decrease in annual consumptive use by vegetation. That is, the change in land use in the recent years towards species that evapotranspire less amount of water (leaving a greater volume available in the soil profile), facilitate the subsequent occurrence of floods when excessive rainfall occurs. However, these changes were accompanied by a deepening of the water tables over time, a situation contrary to what was expected.

Key words: water-logging, water excess, groundwater level/water-table, precipitation, risk/vulnerability

INTRODUCCION

La palabra *dinámica* proviene del griego *dýnamis*, que significa fuerza, potencia. Por su parte, en el campo de la física, la dinámica analiza y describe cómo evoluciona un sistema en un cierto periodo temporal según aquellas causas que producen cambios en su estado. Teniendo en cuenta esto, se optó por incluir el término en el título de la presente tesis ya que incorpora la noción de **cambio** tanto a nivel espacial como temporal de la variable en estudio, en este caso, la *superficie inundada*.

Las inundaciones constituyen procesos esenciales tal como lo son el flujo de energía y el ciclo de nutrientes, fundamentales en el mantenimiento de humedales y ecosistemas costeros. Sin embargo, cuando nos referimos a agroecosistemas, estas perturbaciones naturales causan efectos apreciables tanto sobre las comunidades vegetales y animales, como sobre los asentamientos urbano-rurales presentes en la región, afectando la economía, el transporte y la infraestructura local asociada a los mismos (Aragón et al. 2010).

Moncaut (2001) realizó un interesante trabajo cualitativo al reconstruir y compilar los episodios de inundación y sequía ocurridos entre los años 1576-2001 en la región pampeana, dejando en claro que las inundaciones siempre se han repetido de forma cíclica en el tiempo. No obstante, a partir de la década del 70 se advierte, en gran parte del territorio argentino, el ingreso a un ciclo climático húmedo que se caracterizó por un marcado aumento de las precipitaciones, superando los registros históricos y concentrando en pocos días, grandes volúmenes de lluvia. Los recurrentes episodios de anegamiento que fueron sucediendo en consecuencia, han afectado una vasta extensión de tierras agropecuarias en la llanura pampeana. Aunque las causas y mecanismos no han sido estudiados en detalle, los anegamientos están explicados en parte por el relieve plano o deprimido de esas tierras, lo cual limita la evacuación rápida de volúmenes importantes de agua (Fuschini Mejía 1994). En gran parte de la región, también existen evidencias de un incremento tanto en la recarga subterránea como en la escorrentía superficial.

Particularmente en el caso del NE de La Pampa, durante los años 1999 y 2001, se registraron precipitaciones extraordinarias, que dieron lugar a situaciones de inundación y anegamiento severos afectando una importante superficie productiva. El incremento de las precipitaciones, agravado por la escasa pendiente del terreno, provocó la inundación y anegamiento de vastas extensiones, siendo los departamentos más afectados de la provincia de La Pampa: Capital, Catrillo,

Chapaleufú, Conhelo, Maracó, Quemú-Quemú, Realicó y Trenel ([Martinez Uncal 2015](#)). Otra situación de anegamiento de tierras ocurrió desde la primavera de 2016 hasta la primavera de 2017. Hacia octubre de 2016 se registraron en la provincia de La Pampa precipitaciones por encima de la media, debido al efecto “Niño” presente en la región desde el verano anterior. Posteriormente, entre el 26 de marzo y el 30 de abril de 2017 llovieron 650 mm en los departamentos del Noreste y Este provincial (esto siempre en términos generales). Las lluvias consideradas ocurrieron sobre un suelo ya seco, pero con un nivel freático muy elevado y entrando en el otoño, lo cual agravó la situación. Un informe técnico del 21/05/2017 de INTA Anguil, indicó una superficie inundada de alrededor de 600.000 has para el NE provincial y de 1.400.000 has anegadas. El mismo informe indicó que el 50% de la tierra apta para la agricultura se vio afectada directamente por el desastre natural, mientras que la restante superficie (principalmente lomas) era inaccesible por la falta de transitabilidad de caminos y potreros ([Vázquez 2017a](#)).

Según lo anterior, una de las zonas más recurrentemente afectadas por las inundaciones en la provincia, es la denominada *Región Fisiográfica Oriental con régimen hídrico subhúmedo – seco*, la cual se divide en dos subregiones: *Planicies Medanosas* y *Planicies con Tosca*, según el Inventario Integrado de los Recursos Naturales de la provincia de La Pampa ([INTA et al. 1980](#)). Esta será la zona geográfica de estudio comprendida en la presente tesis.

En este contexto de dinamismo constante del paisaje pampeano, las imágenes satelitales acopladas a un entorno SIG, proporcionan una herramienta adecuada para el estudio de la evolución de las áreas anegadas. Esta información sumada a otras capas permitiría desarrollar sistemas de prevención, seguimiento y evaluación a diferentes escalas espaciales y temporales.

HIPOTESIS

Durante el período de 25 años estudiado (1993-2017) en las cuencas del departamento Maracó, ocurrieron dos episodios importantes de inundación, pero con diferente permanencia y diferentes causales. Si bien durante la inundación 1999-2001, la cuenca más afectada fue la de la planicie con tosca, en la inundación posterior (2016-2017) también se inundó la cuenca de la planicie medanosa. Se asume que, en esta última, además del efecto de las variables hidrológicas (precipitaciones, niveles freáticos y excesos hídricos), existió una influencia antrópica provocada por el cambio en el uso de la tierra: reemplazo de pasturas perennes por cultivos anuales y veranización del sistema (abandono de cultivos de invierno por cultivos de verano). A diferencia de las pasturas perennes cuyo uso consuntivo es de alrededor de 1100 mm año⁻¹, los cultivos anuales poseen un uso consuntivo de alrededor de 550 mm año⁻¹, concentrándose en sólo unos pocos meses del año. Por lo tanto, el reemplazo de pasturas por cultivos conlleva a una menor cobertura vegetal anual y, por ende, a un ascenso del nivel freático. Las dos hipótesis de trabajo que se desprenden de este argumento son, que en el área de estudio:

****La inundación ocurrida entre los años 1999-2001 se asocia a precipitaciones extraordinarias en cortos períodos de tiempo, que afectaron un área mayor en la cuenca de la planicie con tosca que aquella que lo fue en la cuenca de la planicie medanosa.***

****La inundación de los años 2016-2017 afectó en mayor cuantía áreas que se ubican en la planicie medanosa, cambio que está asociado, entre otras variables, a la ocurrencia de precipitaciones extraordinarias, a la existencia de niveles freáticos de base más someros que en el caso anterior, y al vuelco en el uso de la tierra que determina un menor uso consuntivo.***

OBJETIVOS

Los puntos principales que se analizan en la presente tesis y que guardan relación con los aspectos mencionados más arriba son:

- a) monitorear la evolución de las áreas inundadas en dos cuencas del NE de la provincia de La Pampa durante un período de 25 años (1993-2017);
- b) analizar la relación existente entre área inundada, precipitaciones, niveles freáticos, excesos hídricos y uso de la tierra;
- c) determinar, a nivel de título catastral, el área máxima inundada del período y;
- d) elaborar un mapa de riesgo de inundación (probabilidad) a escala de lote catastral.

Este último punto es muy importante ya que en la zona de estudio muchos productores poseen explotaciones que se encuentran por debajo de la unidad económica lo que, sumado a la pérdida de área productiva por las inundaciones, agrava la problemática.

REVISION BIBLIOGRAFICA

Planteo del problema

Desde la década del '60 y hasta comienzos del siglo 21, se evidenció un significativo incremento de las precipitaciones en la franja central del país, disminuyendo, por el contrario, hacia la zona cordillerana del mismo (Rusticucci y Penalba 2000). Los mayores incrementos en el período 1960-2000 se registraron en el Noreste del país y en el Suroeste de la región pampeana, con aumentos de 7 y 5 mm año⁻¹, respectivamente (Camillone y Doyle 2004). En un trabajo de Forte Lay *et al.* (2008) para la región pampeana, se estudió la variabilidad de las precipitaciones en el período 1947-1976 y 1977-2006, encontrándose que en el último de ellos hubo un incremento de la precipitación anual que varió entre 50 y 200 mm según la zona, concentrándose en el semestre cálido (octubre-marzo). Si bien los procesos de inundaciones siempre fueron relativamente frecuentes en zonas de escasa pendiente, a partir de la década del '60 se presentó un escenario particular debido al inicio de un período húmedo, situación que tomó formas excepcionales a partir del año 1986 (Aiello y Mehl 1994).

Las inundaciones constituyen procesos esenciales al igual que el flujo de energía y el ciclo de nutrientes, y son fundamentales en el mantenimiento de humedales y ecosistemas costeros (Chaneton 2006, Aragon *et al.* 2010). Sin embargo, cuando nos referimos a agroecosistemas, estas perturbaciones naturales causan efectos apreciables tanto sobre las comunidades vegetales y animales, como sobre los asentamientos urbano-rurales presentes en la región, afectando la economía, el transporte y la infraestructura local asociada a los mismos (Chaneton 2006, Viglizzo y Frank 2006). El proceso de inundación puede definirse como *la presencia de agua sobre el terreno en lugares, formas y tiempos que resultan inadecuados para las actividades humanas y por lo tanto producen afectaciones económicas, sociales y ambientales* (Hirschboeck 1991). Constituye un fenómeno complejo donde interactúan tanto factores hidrológicos como climáticos. La magnitud de las precipitaciones constituye un factor necesario, pero no suficiente para que se produzcan procesos de inundación. Influyen además otras condiciones como la precipitación previa y las características del terreno y de la escorrentía superficial. Asimismo, las actividades humanas, en especial el uso de la tierra y las infraestructuras civiles e hidráulicas ejercen su influencia sobre el patrón de respuesta natural a los episodios de inundación (Llasat *et al.* 2005).

[Moncaut \(2001\)](#) realizó un interesante trabajo al reconstruir y compilar los episodios de inundación y sequía ocurridos entre los años 1576-2001 en la región pampeana. A pesar de que sin duda alguna constituye un completo trabajo que permite ampliar nuestro conocimiento sobre el comportamiento climático de la región, no es posible determinar relaciones causales ya que los datos utilizados son meramente cualitativos. Sin embargo, de este análisis queda claro que la alternancia de períodos de sequías e inundaciones ha sido una característica constante del régimen climático de la pradera pampeana en los últimos 500 años.

Los recurrentes episodios de anegamiento que se sucedieron desde mediados de la década de 1960, han afectado una vasta extensión de tierras agropecuarias -de alta importancia socio-económica- en la llanura pampeana. Aunque las causas y mecanismos no han sido estudiados en detalle, los anegamientos están explicados en parte por el relieve plano o deprimido de esas tierras, lo cual limita la evacuación rápida de volúmenes importantes de agua ([Fuschini Mejía 1994](#)). En gran parte de la región, también existen evidencias de un incremento tanto en la recarga subterránea como en la escorrentía superficial ([Viglizzo et al. 2009](#)). Una de esas evidencias corresponde al ascenso de más de 5 metros en los últimos 130 años del nivel de la Laguna Mar Chiquita (provincia de Córdoba), sin precedentes durante los últimos 2 siglos y medio ([Piovano et al. 2004](#)). Aunque hubo un aumento regional de las precipitaciones, los cambios también coinciden con el avance de la agricultura en la región ([Paruelo et al. 2005](#)).

A partir de la década de 1980, comenzaron a elevarse los niveles freáticos en el sector oriental y parte central de la provincia de La Pampa generando problemas, en general a partir de los años '90 ([Giai 2008](#)). En el año 1999 se registraron precipitaciones extraordinarias en el NE de La Pampa, dando lugar a la inundación de una importante superficie productiva. La topografía de la región, las modificaciones antrópicas sobre el ecosistema y el marcado incremento del régimen de precipitación produjeron nuevas y extensas áreas inundadas generando significativas alteraciones físicas, económicas, sociales, culturales y ambientales. Este fenómeno alcanzó características dramáticas en virtud del aumento del área afectada y también, por estar localizada en la mejor zona agrícola-ganadera de la provincia, comprometió los resultados de la cosecha fina y limitó la superficie a sembrar de cosecha gruesa ([Roberto y Casagrande 2002](#)).

Hacia octubre de 2016 se registraron en la provincia de La Pampa precipitaciones por encima de la media, debido al efecto "Niño" presente en la región desde el verano

anterior. Posteriormente, entre el 26 de marzo y el 30 de abril de 2017 llovieron 650 mm en los departamentos del Noreste y Este provincial (esto es en términos generales porque en algunas localidades llovió menos y en otras más). *Las lluvias consideradas* ocurrieron sobre un suelo ya seco, pero con un nivel freático muy elevado y entrando en el otoño, lo cual agravó la situación. Según un informe del INTA Anguil con fecha 22/08/2017, los escasos 15 mm registrados a principio de del mes se vieron reflejados en un incremento del 100% del área inundada (de 203.700 a 452.000 hectáreas), resultado del movimiento de napas a nivel regional. Las mismas, al buscar un estado de equilibrio y nivelarse con el terreno, comienzan a colmatar todos los sitios deprimidos del terreno. En contraparte, y no tan tangible como observar agua en superficie, se identificó una amplia región con problemas de napa cercana a superficie, fenómeno de mucha importancia en la región ([Vázquez 2017a](#), [2017b](#), [2017c](#), [2017d](#) y [2017e](#)). Las pérdidas económicas en el sector rural incluyeron muerte de animales, deterioro de alambrados, corrales, molinos, mangas y hasta pérdida de maquinarias, además de la degradación del recurso suelo. A esto se le suma la intransitabilidad de los caminos y el corte de rutas provinciales y nacionales, lo que provocó que muchas localidades quedaran totalmente aisladas. Por su parte en el sector urbano, hubo anegamiento de calles y casas, lo que provocó la evacuación de muchos vecinos.

El proceso de inundación que se manifiesta periódicamente en distintos sectores del país, se encuentra vinculado a la posterior salinización y/o sodificación de los suelos, condición que puede agravarse ante un manejo inadecuado, siendo la resultante final la pérdida de la capacidad productiva de la región con grandes consecuencias socioeconómicas por un lapso prolongado de tiempo. Esta problemática se encuentra asociada a la acumulación de sales y/o sodio en las partes más deprimidas del relieve. Éstas, reciben las aguas de escorrentía o el aporte de freáticas salinas que, al ascender en períodos de lluvias abundantes, favorecen la reubicación de sales en todo el perfil del suelo, variando su magnitud según la frecuencia y duración del fenómeno. Cuando se retiran las aguas y comienza el proceso de desecación de los horizontes superiores del suelo, se inicia el ascenso capilar del agua, que al evaporarse va enriqueciendo la superficie con sales que lleva en solución ([Casas y Pittaluga 1990](#)). El exceso de sales restringe la disponibilidad de agua para las plantas, y el sodio por su parte, queda retenido en el complejo de cambio de los suelos (arcillas y humus) siendo su acción persistente, afectando fuertemente la movilidad del agua a través del suelo ([Taboada et. al. 2009](#)). La acumulación del agua sobre el suelo durante períodos prolongados, produce

inconvenientes que se ven reflejados en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Su recuperación natural lenta se ve perjudicada por la presencia, a escasa profundidad, de horizontes densificados que dificultan la penetración del agua y la lixiviación de las sales.

El estudio de los procesos de inundación en áreas agrícolas a escala regional, aún plantea ciertos desafíos que es necesario resolver. Entre ellos podemos citar la necesidad de: i) esclarecer las estimaciones de la superficie agrícola afectada por agua durante los períodos de alta precipitación y recarga hídrica del paisaje, ii) investigar la existencia de mecanismos de no-linealidad en la dinámica hídrica regional y, iii) contar con modelos interpretativos que, aún en términos hipotéticos, ayuden a entender los procesos de expansión y retracción hídrica en las cuencas agropecuarias bajo estudio. [Viglizzo et al. \(2009\)](#) plantean la falta de estimaciones de la superficie agrícola afectadas por anegamiento que abarquen amplias escalas espaciotemporales. Debido a que la sucesión de eventos extremos podría hacerse aún más frecuente ([Barros et al. 2006](#), [Aragón et al. 2010](#)), la sociedad demandará con mayor frecuencia medidas de adaptación a estas perturbaciones.

Funcionamiento hidrológico en áreas de llanura

Un área de llanura se caracteriza por la existencia de un relieve plano de muy baja pendiente topográfica y donde la delimitación espacial de las cuencas hidrográficas resulta muy compleja ([Kruse y Zimmermann 2002](#)). Tal como sucede en otros paisajes, las actividades más productivas en áreas de llanura están íntimamente relacionadas con los recursos hídricos ([Usunoff 2002](#)). De aquí la necesidad de conocer el comportamiento hidrológico de un ambiente para la correcta planificación de prácticas de manejo. La hidrología de áreas de llanura se distingue por la baja energía morfológica del terreno, la cual en ambientes húmedos determina inundaciones temporarias del área, anegamiento del suelo y la acumulación de sales cerca de la superficie. En ambientes áridos en cambio, resulta en una hidrología superficial desordenada, que rara vez puede vincularse a la hidrología subterránea, y que condiciona el tipo y distribución de la vegetación en condiciones naturales. La principal consecuencia hidrológica relacionada con esta baja energía morfológica es que los términos verticales del balance de agua (precipitación, evapotranspiración, infiltración, intercambio de agua del suelo con la capa freática) prevalecen sobre sus equivalentes horizontales (escurrimiento superficial y subsuperficial) debido a un mayor tiempo de contacto del agua con la superficie del terreno ([Fuschini Mejía 1994](#),

Zimmermann 2017). Lo anterior facilita el almacenamiento natural del agua en depresiones locales, pero el agua que excede la capacidad de almacenamiento de estas depresiones se mueve como una lámina muy lentamente sobre la superficie. De aquí que en general, la infiltración es un término que resulta bastante elevado en estos ambientes. Todas estas características determinan que las actividades humanas puedan modificar el equilibrio de energía de áreas de llanuras (Vénere et al. 2004).

La República Argentina tiene un complejo y difícil escenario hídrico, el cual se manifiesta en zonas con grandes excesos de agua y, otras, por el contrario, con grandes déficits. Ya en el año 1880, Florentino Ameghino en su conocida publicación “Las Secas y las Inundaciones en la provincia de Buenos Aires”, decía: ...*“Aquí no hay sobrante. Si hoy nos ahogamos por excesiva abundancia de agua, mañana nos morimos de sed...”*. En su obra, expuso algunas observaciones sobre las causas de las inundaciones y los medios para evitarlas y encontró que las mismas, estaban íntimamente ligadas a los períodos secos que de tiempo en tiempo, hacían sentir sus efectos sobre distintas regiones de la provincia de Buenos Aires (Ameghino 1984).

La “Pradera Pampeana” o “Provincia Fitogeográfica Pampeana”, se encuentra ubicada en las llanuras orientales del país, cubriendo la mayor parte de la provincia de Buenos Aires, el Sur de las provincias de Entre Ríos, Santa Fé y Córdoba, el extremo Este de la provincia de La Pampa y una pequeña porción del Este de la provincia de San Luis. La región se caracteriza por la ausencia de ejemplares arbóreos y está constituida por fértiles suelos que dieron lugar a la actividad agrícola-ganadera. Así, se conforma un paisaje con llanuras horizontales o muy suavemente onduladas, con algunas serranías de poca altura y numerosas lagunas de agua dulce o salobre (Cabrera 1976). Representa una de las regiones sedimentarias de clima subhúmedo a semiárido más planas del planeta (Bilenca 2004), donde una gran fracción de su territorio posee pendientes menores al 0,1% (Tanco y Kruse 2001, Jobbágy et al. 2008).

La región del Noroeste de la provincia de Buenos Aires (“Pampa Arenosa”), se encuentra sujeta a variaciones climáticas con recurrencia de períodos húmedos y secos. Desde fines del año 1972 y con frecuencia sostenida, la región se vio afectada por un período de exceso de precipitaciones, que, acumuladas a través de los años, provoca periódicamente el anegamiento de extensas superficies por carecer de vías de drenaje natural. Esto determina que las partes planas o ligeramente deprimidas mantengan agua por mucho tiempo, comportándose como lagunas temporarias. Durante los años 1985 y 1986, la situación se agravó considerablemente,

incrementándose la superficie anegada, no solo por las abundantes precipitaciones registradas sino también por el ascenso del nivel freático. Esta realidad que involucra el NO de Buenos Aires, forma parte de un área más amplia de características ambientales similares, integrada por sectores de provincias vecinas, como los extremos del Suroeste de Santa Fe, Sudeste de Córdoba y Noreste de La Pampa (Casas y Pittaluga 1990).

En paisajes sedimentarios de llanura con redes de drenaje regional poco desarrolladas, los ciclos de inundación y sequía involucran cambios en la dinámica del nivel freático que ejercen una influencia significativa tanto en ecosistemas naturales como agrícolas (Nosetto *et al.* 2009, Aragon *et al.* 2010). En estos paisajes existe una estrecha relación entre el agua subterránea y la superficial, y la dinámica del nivel freático controla la formación y expansión de cuerpos de agua y, por ende, las inundaciones (Aragon *et al.* 2010). La presencia frecuente del nivel freático a escasa profundidad de la superficie (menos de 5 m), hace que tanto el agua superficial como la subterránea se hallen directamente relacionadas. Esta capa freática tiene la posibilidad de interactuar con la vegetación que se encuentra sobre la superficie: dependiendo de las profundidades prevalecientes, el agua subterránea puede ser una fuente importante de agua o, por el contrario, un agente de estrés por anegamiento y/o salinidad (Jobbágy y Jackson 2004, Nosetto *et al.* 2009, Aragon *et al.* 2010). Sin embargo, algunos autores han encontrado que, a pesar de la proximidad de los niveles freáticos a la superficie, la recarga o alimentación del acuífero en áreas de llanura sólo se manifiesta cuando los eventos de precipitaciones individuales son lo suficientemente prolongados en el tiempo (Usunoff 2002).

Hidrología y uso/cobertura de la tierra

Varios autores han atribuido una relación de causalidad entre la dinámica hidrológica de una cuenca y los cambios ocurridos en el uso y cobertura de la tierra. Trabajos de Douglas (1969), Reed (1971), Newson (1985), Bryan y Campbell (1986), Fiener y Auerswald (2006) demostraron que el escurrimiento del agua en las cuencas es afectado por el uso y manejo de la tierra, y por los cambios en la cobertura vegetal que los mismos generan. Existen numerosas evidencias en distintas partes del mundo que demuestran que la deforestación incrementa la frecuencia y severidad de las inundaciones (Oberlin 1993, Brown y Halweil 1998, Kundzewicz 1999, Bowling *et al.* 2000, Verburg 2001, Bradshaw *et al.* 2007). Los mecanismos que empíricamente parecen explicar mejor la ocurrencia de inundaciones como consecuencia del cambio

en la cobertura de la tierra son: a) la reducción de la capacidad de infiltración de los suelos, b) la pérdida de porosidad de los mismos, c) disminución de la evapotranspiración como consecuencia de la deforestación y eliminación de cobertura vegetal. Cuando se reduce la evapotranspiración en un ambiente anegado, se bloquea una vía importante de remoción de agua (Tollan 2002).

En cuanto a la deforestación, un trabajo de Bradshaw *et al.* (2007) analiza la situación de varios países en desarrollo. Los autores proporcionan la primera evidencia empírica a escala global de la correlación existente entre la deforestación y la frecuencia/severidad de las inundaciones. Mediante la combinación de varias herramientas (modelos lineales generalizados, modelos de efectos mixtos, medidas teóricas de parsimonia), se simuló una pérdida del 10% de la cobertura boscosa y predijeron aumentos en la frecuencia de las inundaciones que variaron entre 4-28%, dependiendo del país analizado. Cuando se utilizó ese mismo valor de pérdida de bosques para simular la severidad de las inundaciones (duración), los resultados variaron entre 4-8%. Por otro lado, diversos autores han argumentado que el persistente clima árido que experimenta el Sahel africano desde la década del '60 puede atribuirse en parte, a cambios en la cobertura vegetal del terreno (Charney 1975, Zeng *et al.* 1999, Wang y Eltahir 2000).

Pero no sólo la deforestación generada en una cuenca modifica su dinámica hidrológica. En Sudamérica amplias zonas de pastizal natural están siendo convertidas en bosques (forestación) (Nosetto *et al.* 2005). En nuestro país las tasas de forestación pasaron de 30.000 ha año⁻¹ en el año 1996 a 100.000 ha año⁻¹ en el año 2001 (SAGyP 2002). La resolución 220/07 (SAGyP) en el marco de la ley 25.080 de incentivos forestales promueve la plantación y actividades silvícolas de especies forestales en bosques cultivados y el enriquecimiento de bosque nativo para pequeños productores agrupados. Según un informe de SAGyP (2010), en el país este tipo de prácticas ya alcanza las 517.070 ha.

Estudios en la pampa húmeda muestran que la gran capacidad evaporativa de las especies forestales puede desencadenar, en algunos casos, un intenso consumo de agua freática (Jobbágy y Jackson 2004, Jobbágy *et al.* 2007). Debido a que los bosques utilizan mayor cantidad de agua que los pastizales tanto en épocas secas como húmedas, se sugiere un incremento de las pérdidas evaporativas de agua en áreas forestadas (Nosetto *et al.* 2005). En la provincia de San Luis, Jobbágy y Santoni (2006) hallaron un escaso drenaje profundo en bosques secos, aún en períodos climáticos húmedos. De aquí radican potenciales efectos negativos y positivos del

empleo masivo de esta práctica. Mientras la reducción de la escorrentía superficial beneficia el control de erosión e inundación en la cuenca ([Scott y Lesch 1997](#)), la disminución del rendimiento de agua y de la recarga subterránea constituyen aspectos negativos ([Bosch y Hewlett 1982](#), [Heuperman 1999](#)), principalmente en ambientes de climas áridos. Todo lo anterior refleja la complejidad existente en las respuestas hidrológicas al proceso de forestación/deforestación. Así lo sugiere [Andréassian](#) en su revisión del año [2004](#), donde argumenta que los efectos dependerán de las condiciones pedológicas (como la profundidad y tipo de suelo), climáticas (como la época del año en que ocurren las precipitaciones), y fisiológicas de las especies vegetales presentes en la cuenca (como el área foliar y la etapa sucesional).

El tipo de cobertura vegetal y su manejo determinan qué fracción de la precipitación regresa a la atmósfera mediante el proceso de evapotranspiración y por lo tanto, el remanente que drena o escurre superficialmente para infiltrarse y generar recarga freática ([Jobbágy y Jackson 2004](#), [Jobbágy et al. 2007](#), [Galván y Collado 2009](#)). Es decir, que las prácticas agropecuarias al modificar la cobertura vegetal del terreno, influirán en el comportamiento hidrológico de la cuenca, no sólo en lo que respecta al flujo superficial, sino también al subterráneo. El reemplazo de vegetación perenne por cultivos anuales tiene una influencia potencial sobre las inundaciones debido a las modificaciones generadas tanto en el escurrimiento superficial como en la evapotranspiración ([Mc Neill y Winiwarter 2004](#), [Withers et al. 2007](#)). Por ejemplo, [Zhang y Schilling \(2006\)](#) concluyeron que el reemplazo de vegetación perenne por cultivos estacionales (especialmente soja) en la cuenca del río Mississippi desde la década del 40', redujo la evapotranspiración y la escorrentía superficial y aumentó la recarga subterránea y el flujo de base (descarga de agua subterránea al río), lo que en conjunto condujo a un aumento del caudal del mismo. Los autores argumentan que las pérdidas anuales por evapotranspiración de los cultivos estacionales son generalmente menores que las de la vegetación perenne porque ésta última permanece activa durante un período del año mucho más prolongado que los cultivos. En estos últimos, los períodos de evapotranspiración coinciden con los de mayor crecimiento del cultivo. Por lo tanto, con menores tasas de evapotranspiración anual, el agua que infiltra queda disponible para la recarga subterránea. [Li et al. \(2007\)](#), realizaron un estudio en las cuencas del río Níger y el Lago Chad (África), en el cual simularon el impacto del sobrepastoreo sobre el flujo de agua. Para la simulación correspondiente al escenario con 100% de sobrepastoreo, hubo incrementos que variaron desde el 33% al 91%. Es más, los autores argumentan que la respuesta

hidrológica al cambio en la cobertura de la tierra es no-lineal con la existencia de umbrales críticos: existe un impacto muy leve en el flujo de agua simulado cuando la deforestación no supera el 50% y el sobrepastoreo es menor al 70% para sabanas y 80% para pastizal, respectivamente; sin embargo, el flujo de agua aumenta rápidamente cuando los valores se encuentran por encima de estos umbrales. En este contexto, la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias de Estados Unidos (Federal Emergency Management Agency: FEMA), mediante su Programa de Mapas de Riesgos de Inundación, identifica y evalúa los riesgos de inundación y trabaja en colaboración con las comunidades y estados para ofrecer al público la información necesaria para desarrollar e implementar medidas de mitigación. Dichos mapas son parte integral del Programa del Seguro Nacional de Inundación, FEMA utiliza los Mapas de Tasas de Seguros por Inundaciones (FIRMs, por sus siglas en inglés) y las evaluaciones de riesgo para mantener y actualizar datos. Los Mapas de Tasas de Seguros por Inundaciones incluyen información estadística como datos sobre los caudales de ríos, las mareas, análisis hidrológicos/hidráulicos, y estudios topográficos y de precipitaciones.

En nuestro país, un caso bien estudiado corresponde a la situación de la cuenca del arroyo Ludueña (provincia de Santa Fe). En la década del '70, se modificó el uso de la tierra pasando de un modelo ganadero a uno de agricultura extensiva (soja, maíz, forrajes). Esto implicó modificaciones sustanciales en la hidrología superficial de la cuenca. El excesivo laboreo del suelo y la erosión provocada por la nueva actividad se tradujo en una menor infiltración de la precipitación debido a la impermeabilización del terreno. El mayor escurrimiento superficial del agua generó mayores tasas de erosión y de lavado de nutrientes del suelo, situación que obligó a los productores de la zona a utilizar mayor cantidad de fertilizantes. Además de la posible contaminación de las aguas, todos estos factores contribuyen al consecuente anegamiento del terreno (Zimmermann 1995, 2017).

También en nuestro país, un trabajo de Santoni *et al.* (2010) explora cómo el reemplazo de bosques secos nativos por cultivos anuales en la provincia de San Luis afecta el drenaje profundo y el almacenamiento/transporte de sales. Los autores encontraron que seguidamente a la instalación de los cultivos, se incrementó el drenaje profundo y el lavado de sales. Tal situación es compartida con grandes superficies de Australia donde el reemplazo de bosques nativos por cultivos, aumentó la recarga permitiendo el ascenso del nivel freático y concentrando las sales en zonas de alta evaporación (Scanlon *et al.* 2005). Por su parte, Isla *et al.* (2003) afirman que

los cambios en el uso del suelo están induciendo alteraciones en los balances hidrológicos en la Pampa Occidental o Arenosa.

No obstante, en la actualidad existen prácticas más amigables que permiten atenuar las alteraciones del sistema hidrológico provocadas por el sector agropecuario en cuencas rurales. Entre ellas pueden citarse la rotación de cultivos, la labranza conservacionista y los cultivos de cobertura. El objetivo común en todas ellas es la conservación en la superficie del suelo de una cobertura vegetal suficientemente densa capaz de minimizar los efectos del escurrimiento superficial, la erosión del suelo y la pérdida de nutrientes (Bernard *et al.* 2000).

La teledetección como herramienta para la prevención, seguimiento y evaluación de inundaciones

Los desastres naturales son fenómenos ambientales extremos, de características excepcionales, como las inundaciones o los terremotos que, a partir de diversos grados de magnitud, ocasionan efectos en general catastróficos (Durán *et al.* 1998) para el medio ambiente. Estos desastres son inevitables ya que se originan por fenómenos de la naturaleza, sin embargo, es posible mitigar sus consecuencias a través de una planificación y un ordenamiento territorial adecuado y eficaz, acorde a cada situación. En el caso particular de las inundaciones, generalmente se asocian a eventos meteorológicos extremos, aunque muchas veces es la acción humana, con el mal manejo de las cuencas hídricas, lo que favorece la ocurrencia y aumenta la duración o intensidad de las mismas.

En las últimas décadas, en gran parte de la superficie del país, las lluvias extraordinarias originaron importantes problemas de inundación y anegamientos generalizados, por lo que, diferentes gobiernos, entidades e instituciones, comenzaron a llevar a cabo estudios para conocer, entender y tratar de buscar posibles soluciones a esta problemática. El conocimiento de la situación actual de las tierras, la cobertura vegetal y su dinámica temporal, es importante para poder alcanzar una correcta planificación y un ordenamiento del territorio acorde a cada área a estudiar y analizar. Disponer de herramientas que permitan el seguimiento y mapeo en tiempo real de las áreas afectadas es importante al momento de determinar los alcances de la situación de emergencia, contar con estimaciones del área afectada, disminuir las pérdidas de vidas humanas o brindar información a las autoridades competentes para ajustar su plan de acción. El análisis de eventos históricos de este fenómeno, por su parte, asegura la generación de cartografías de vulnerabilidad para la planificación del uso

del territorio. Algunos autores argumentan acerca de los beneficios de la integración de varias herramientas para el estudio de tales procesos a nivel regional. Por ejemplo, [Smith \(1997\)](#) plantea el desarrollo de correlaciones entre distintos indicadores a nivel de suelo y datos satelitales. Por su parte, [Aragón et al. \(2010\)](#), también plantean el uso integrado de técnicas de percepción remota junto a datos más puntuales como registros de precipitaciones y niveles freáticos.

Los avances tecnológicos existentes influyen de manera decisiva para evaluar distintos aspectos que hacen al uso de la tierra y son de gran utilidad en la toma de decisiones. Las imágenes satelitales, integradas a un Sistema de Información Geográfica (SIG) permiten calcular entre otras cosas y con bastante precisión, la superficie ocupada por agua a través del tiempo ([Casagrande y Roberto 2000](#)). La observación de la Tierra desde el espacio, ha experimentado en los últimos años un vertiginoso desarrollo, llegando a ser un aliado cada vez más imprescindible en el seguimiento de procesos ambientales de gran impacto para nuestro planeta ([Chuvienco 2002](#)), y a través de un uso adecuado y responsable de la teledetección y los SIG se puede obtener información relevante en el tiempo, de los cambios que se generan en el ambiente. Algunas de las razones que han favorecido la utilización de los sensores remotos para el seguimiento de los ecosistemas a distintas escalas espaciales y temporales son, su amplia versatilidad y precisión, y el bajo costo económico asociado. La selección de un determinado tipo de sensor dependerá de la resolución espacial requerida, de las características espectrales del fenómeno a estudiar y de su entorno, de la recurrencia con la que se decida estudiarlo o de la disponibilidad de medios económicos e informáticos para tratar la información obtenida, entre otros. A pesar de las limitaciones que puede presentar la teledetección para la localización, cuantificación y evaluación de los distintos fenómenos de inundación, no existe otra herramienta con estas capacidades. Capacidades que están asociadas a la disponibilidad global de información en tiempo real, a la objetividad en la toma de datos y a la existencia de información en series temporales de más de 20 años ([Di Bella et al. 2008](#)).

En lo que respecta al fenómeno de las inundaciones, la teledetección ha demostrado ser una herramienta poderosa para su estudio ([Jensen et al. 1986](#), [Lunetta y Balogh 1999](#)), debido al amplio contraste que existe entre el agua y el resto del paisaje en el espectro electromagnético. Esta herramienta permite detectar no solamente áreas anegadas sino también ubicar estructuras y geoformas que no son identificables si no se cuenta con cartas topográficas con un alto grado de detalle. La

elaboración de un diagnóstico actualizado a través de un estudio multitemporal con imágenes de satélite y con el apoyo de los SIG permitirá relevar la condición actual del área bajo estudio.

A partir de las características espectrales de las distintas coberturas de la superficie terrestre (firma espectral) se han desarrollado diversas aplicaciones asociadas a los eventos de inundación. En términos generales, dichas aplicaciones pueden agruparse en: 1) la detección y cuantificación de las áreas afectadas, 2) el seguimiento o evaluación en tiempo real, 3) el análisis post evento, o 4) la prevención y la caracterización de las condiciones predisponentes (Di Bella *et al.* 2008). Aunque la temática resulta de extrema complejidad por la multiplicidad de factores involucrados y relacionados entre sí, hoy en día disponemos de una ventaja tecnológica como lo es el uso masivo de las herramientas de teledetección libres y gratuitas que permiten estudiar su dinámica espacial y temporal.

MATERIALES Y METODOS

Si bien a priori se conocía el área de estudio aproximada afectada por inundaciones en la provincia, no se tenían los límites precisos de la misma. Por lo tanto, el primer paso metodológico desarrollado en la presente tesis fue la definición de la escala espacial y temporal abordada por la misma. Debido a que la metodología implica al menos en parte, un análisis de variables hidrológicas (precipitaciones, niveles freáticos, excesos hídricos, superficie inundada), la delimitación geográfica más adecuada corresponde a la definición de cuencas de estudio. La aplicación de un modelo hidrológico básico permitió definir la *escala espacial* y, el análisis de los datos de precipitaciones históricas se utilizó para definir la *escala temporal* de análisis.

1. ALCANCE ESPACIAL Y TEMPORAL

1.1. Definición del área de estudio

Para determinar el área de estudio se utilizó el Modelo Digital de Elevación (MDE) corregido de 30 m del Instituto Geográfico Nacional (IGN), descargándolo de manera libre y gratuita desde el sitio <http://www.ign.gob.ar/>. El MDE se genera para realizar la representación de la superficie topográfica de la Tierra. Se basa en dividir al territorio en celdas de un determinado tamaño que se agrupan en forma de una grilla ordenada. Cada celda tiene una ubicación georreferenciada, y a la misma se le asigna un valor de altura respecto del nivel medio del mar. De esta manera, el MDE permite obtener información sobre las alturas, pendientes y dimensiones del terreno, que se utilizan para la obtención de mapas y modelos tridimensionales de la superficie terrestre.

El IGN desarrolló una línea de producción para generar un MDE para la República Argentina, el cual se nutre principalmente de información proveniente de la misión SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). A través de dicha misión, la NASA logró generar un MDE de alta resolución que cubre casi la totalidad de la superficie terrestre (desde los 60 grados de latitud norte hasta los 60 grados de latitud sur). Para la determinación del área de estudio de la presente tesis se utilizaron 9 sectores del MDE SRTM 30m (formato *.img*) que se corresponden, con las hojas: 3563-19; 3563-20; 3563-21; 3563-25; 3563-26; 3563-27; 3563-31; 3563-32 y 3563-33 del mosaico que conforma al territorio de la República Argentina.

Al mosaico generado se le aplicó el módulo *SEXTANTE-Análisis Hidrológico Básico* del gvSIG (versión ejecutable 1.1.2) para crear las cuencas. Es un algoritmo que utilizando la red de drenaje (previamente calculada con el mismo módulo), elabora los límites geográficos de las diferentes cuencas presentes en el área de estudio. El módulo discrimina 3 tipos de unidades de drenaje: cuencas, intercuencas y cuencas internas. La *cuenca* es una unidad hidrográfica que no recibe drenaje de ninguna otra área, pero sí contribuye con flujo a otra unidad de drenaje. La *intercuenca* recibe el drenaje de otra unidad ubicada aguas arriba, mediante el curso del río principal (si lo hubiere), y permite el drenaje del flujo propio y del que ha ingresado a ésta hacia la unidad de drenaje que se ubica aguas abajo. Es decir, es una unidad de drenaje o de tránsito del río principal al cual también aporta sus propios caudales. Por último, la *cuenca interna* es un área de drenaje que no recibe flujo de agua de otra unidad ni contribuye con flujo de agua a otra unidad de drenaje o cuerpo de agua.

Para aplicar el modelo hidrológico siempre es necesario abarcar con el MDE un área mayor que la que efectivamente se desea estudiar, debido a las conexiones que hay entre cuencas, subcuencas, etc. La **Figura 1** muestra la gran cuenca del área de estudio y la **Figura 2** es la misma cuenca, pero subdividida en cuenca Este y cuenca Oeste. A su vez estas dos cuencas pueden ser subdivididas en otras cuencas menores.

Disponiendo de esta información se seleccionó un área para realizar la presente tesis, localizándose la misma en el NE de la provincia de La Pampa la cual comprende a dos cuencas: una ubicada en la Subregión de la planicie medanosa (412.232 has) y otra, en la Subregión planicie con tosca o costra calcárea (144.467 has). Estas subregiones son descritas más adelante en esta misma sección. Aquí es preciso aclarar que en el Inventario Integrado de los Recursos Naturales de la provincia de La Pampa (INTA *et al.* 1980), los límites de las subregiones planicie con tosca y planicie medanosa difieren de los que en este trabajo se han tenido en cuenta, por un efecto de escala (los mapas del Inventario son escala 1:500.000). El área total estudiada entonces, abarca una superficie de alrededor de 556.700 has ubicándose dentro de los límites del path/row 228/85 (órbita de Landsat). Por lo tanto, el único distrito político abarcado en su totalidad por ambas cuencas es el departamento Maracó, comprendiendo de forma parcial a los restantes (**Figura 3**). De aquí es que se llamó *cuencas del departamento Maracó* al área de estudio de la presente tesis. En esta decisión, también se tuvo en cuenta la disposición de información de las restantes

variables estudiadas en la presente tesis (precipitación, profundidad de los niveles freáticos, balance hídrico, uso de la tierra).

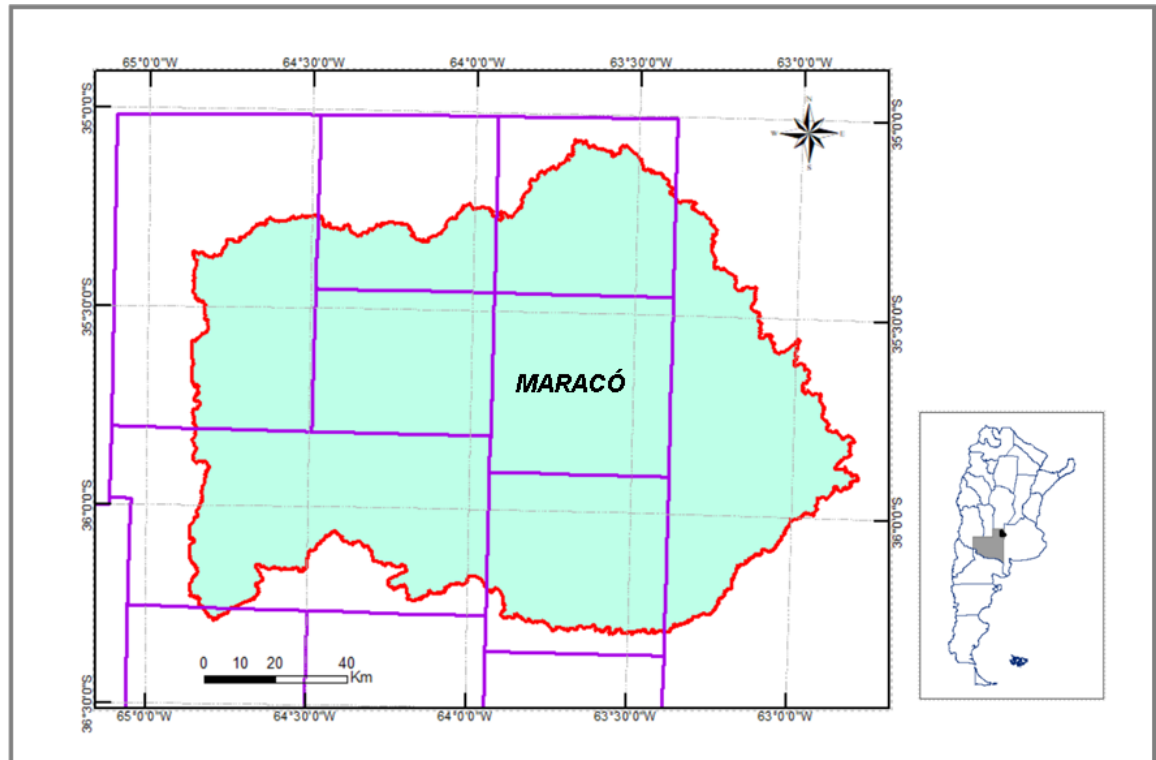


Figura 1. Cuenca hidrográfica del NE de la Provincia de la Pampa generada a partir del módulo SEXTANTE del gvSIG con la información altimétrica de teselas del MDE Shuttle Radar Topography Mission - NASA que suministra el IGN.

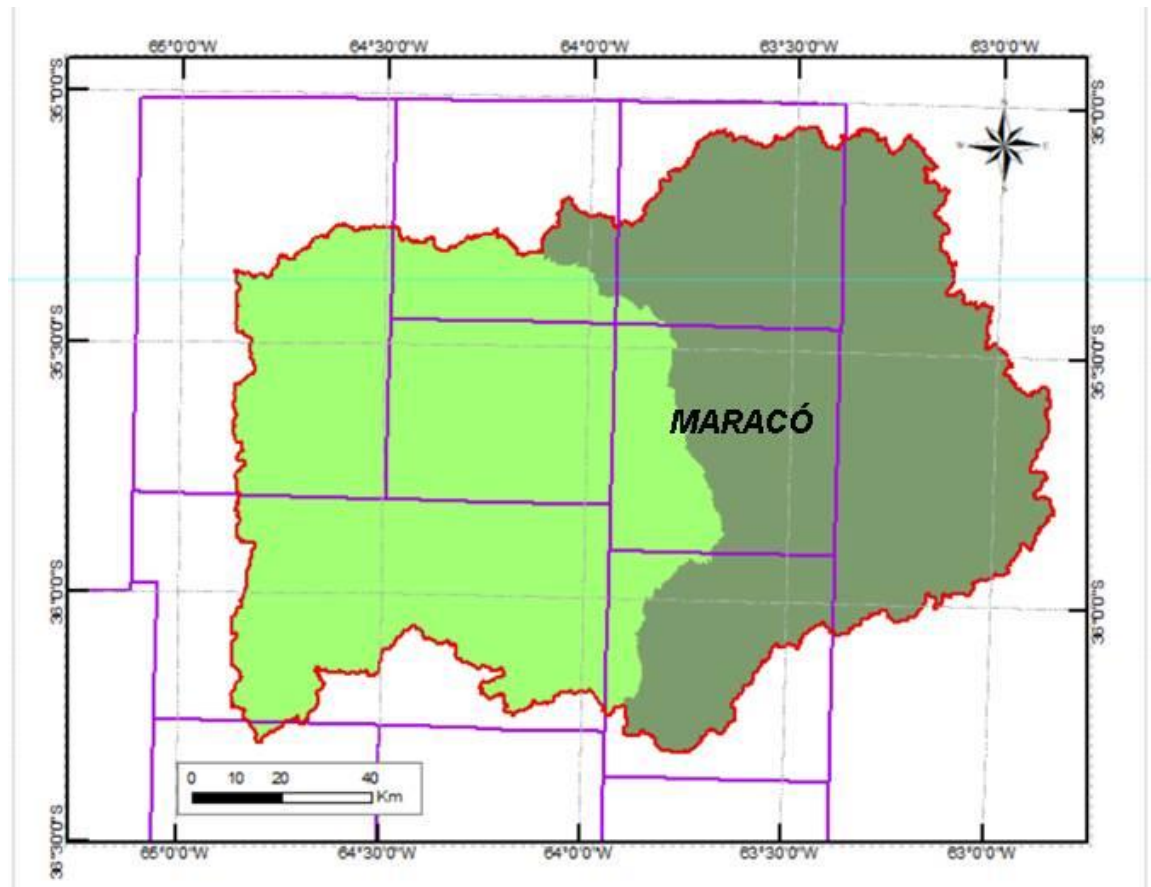


Figura 2. Subcuenca Este (verde oscuro) y subcuenca Oeste (verde claro) que componen la cuenca hidrológica NE de la Provincia de La Pampa (Figura 1).

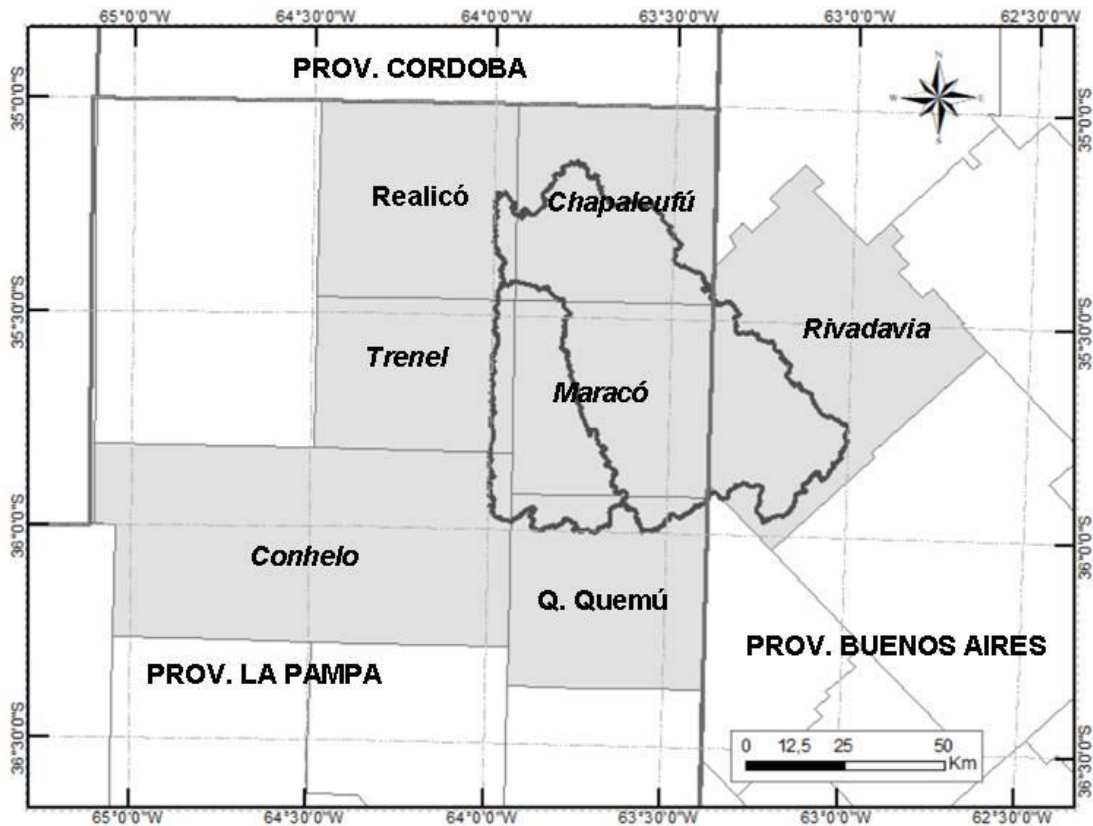


Figura 3. Área de estudio (cuencas departamento Maracó, delimitadas en color negro). En tono grisáceo se destacan los distritos políticos parcial o totalmente involucrados. La cuenca ubicada al NE se sitúa en la subregión planicie medanosa (412.232 has.), mientras que la ubicada al SO lo hace en la subregión planicie con tosca (144.467 has.).

1.2. Definición del periodo de estudio

Los registros de lluvia histórica sirvieron de base para determinar el período de estudio, buscando incluir en el mismo, eventos de inundación. Los datos se obtuvieron de la Administración Provincial del Agua (La Pampa). Los registros recientes se adquirieron del sitio web <http://www.apa.lapampa.gov.ar/>, mientras que los primarios, ausentes en la URL especificada, se solicitaron al personal de APA. Se analizaron aquellas localidades que contaban con registros pluviométricos históricos dentro del área de estudio y sus alrededores, a saber: Agustoni, Ceballos, Dorila, General Pico, Intendente Alvear, Metileo, Monte Nieves, Ojeda, Quemú Quemú, Speluzzi, Trebolares, Vertiz y Villa Mirasol. La **Figura 4** muestra la ubicación de dichas localidades dentro del área de estudio. Nótese que algunas no están ubicadas dentro de las cuencas definidas en el paso anterior pero igualmente fueron incluidas, debido a la cercanía con el área de estudio (menor a los 30 km).

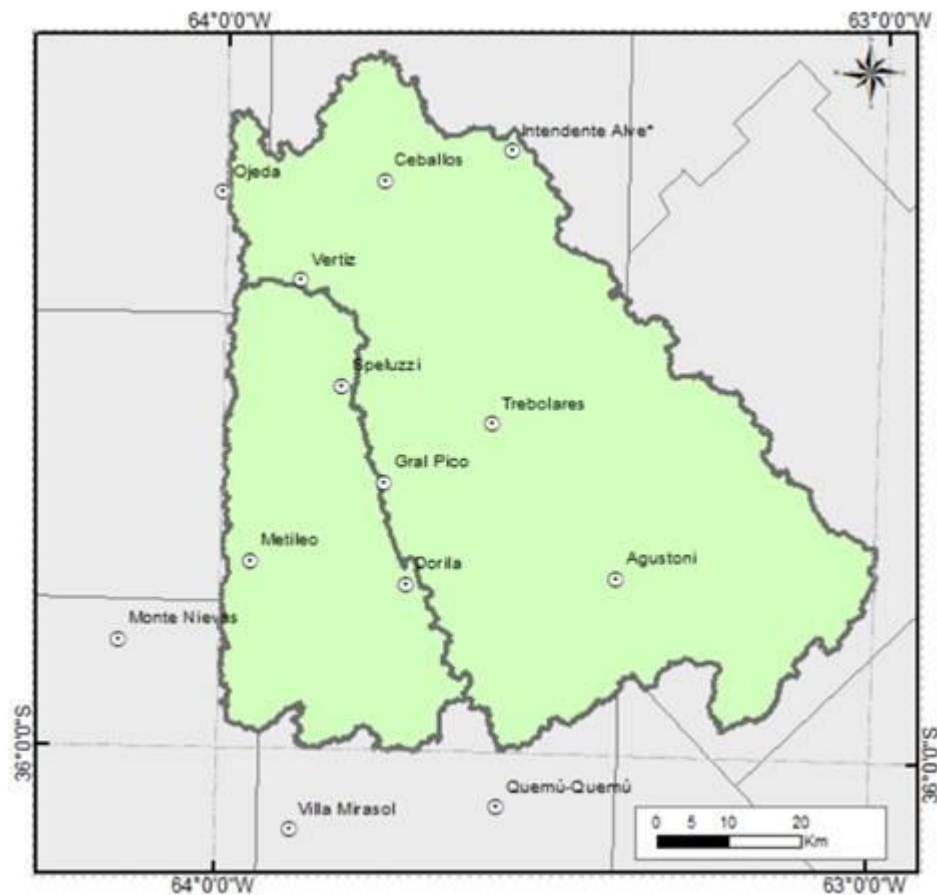


Figura 4. Localidades con registros pluviométricos históricos utilizadas para definir la escala temporal de análisis de la presente tesis.

Se evaluaron y analizaron las precipitaciones históricas de la zona para determinar la situación inicial y final del período a estudiar. De acuerdo a esto, queda definido un período de 25 años (1993-2017). Se consideró situación inicial el año 1993, ya que hasta ese momento las precipitaciones registradas se ajustaban al promedio zonal histórico (728 mm). Este promedio histórico de la región se calculó con datos de Roberto y Martínez Uncal (2012), donde recopilan las precipitaciones de las localidades de la provincia de La Pampa para el período 1921-2012. A partir del año 1996 las precipitaciones en la región comienzan a incrementarse paulatinamente, superando el valor promedio para la zona hasta el año 2002 inclusive, dando como resultado un período húmedo de aproximadamente 7 años de duración. Sin embargo, es a partir de marzo de 1999 que las precipitaciones resultan de carácter extraordinario, definiendo la situación de catástrofe para la zona. A partir del año 2003, las precipitaciones comienzan a disminuir nuevamente, con valores cercanos al promedio histórico zonal (exceptuando el año 2004 donde vuelven a ocurrir lluvias más

importantes). A partir de ahí, hubo un período de años bastante secos (2005-2011), y en el año 2012 vuelven a ocurrir precipitaciones importantes, para luego mantenerse en valores normales hasta el año 2015. Si bien las precipitaciones del año 2017 no fueron extraordinarias, hubo en la región ciertos episodios de inundación (otoño-invierno), razón por la cual el período finaliza en ese año. En la **Figura 5** se presentan las precipitaciones anuales de la región del periodo estudiado, donde se observa lo detallado al principio de este párrafo.

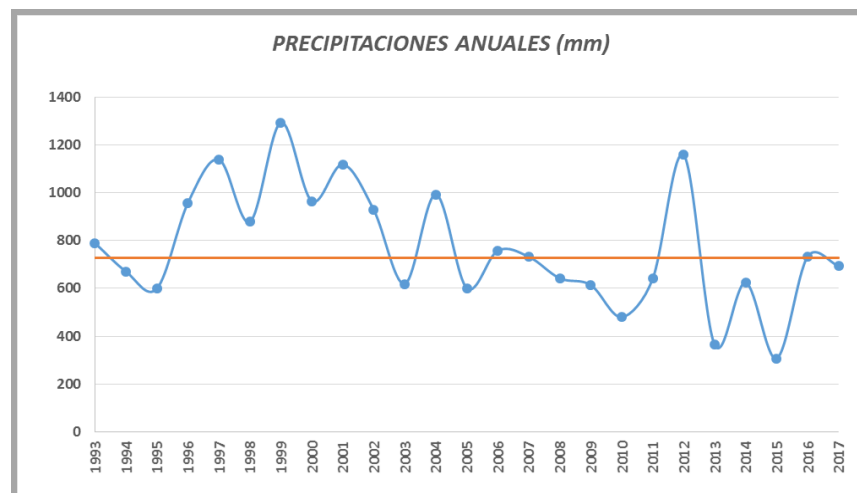


Figura 5. Promedio de las precipitaciones anuales acumuladas en milímetros de las 13 localidades con registros pluviométricos entre 1993 y 2017. La línea roja representa el promedio histórico zonal (728 mm, período 1921-2012).

2. DESCRIPCION DEL AREA DE ESTUDIO

Una vez definidas la escala espacial y temporal, es posible describir el área de estudio de la presente tesis.

2.1. Ubicación catastral

El área de estudio definida en la sección anterior se localiza en su mayor parte hacia el NE de la provincia de La Pampa, no obstante, una porción menor lo hace en el NO de la provincia de Buenos Aires. El extremo Norte se ubica alrededor de los 35° 8' lat. S, mientras que el extremo Sur se ubica en los -36° 0'. S. Por su parte los extremos Este y Oeste del área de estudio se ubican entre las longitudes W 62° 59' y 63° 59' respectivamente. En la provincia de La Pampa cubre la totalidad del departamento Maracó, y una porción muy pequeña de los departamentos Realicó, Chapaleufú, Trenel y Conhelo. En lo que respecta a la provincia de Buenos Aires

abarca de forma también parcial al partido Rivadavia. La superficie total de estudio abarca alrededor de 556.700 has (Ver **Figura 3**).

Las siguientes secciones que describen el área de estudio, contienen figuras de elaboración propia generadas en su mayoría a partir de distintas capas temáticas extraídas del trabajo de Roberto y Martínez Uncal (2012). Para algunas variables se tiene en cuenta las cuencas de estudio y para otras sólo al departamento Maracó, dependiendo de la disponibilidad de información.

2.2. Clima

El clima es uno de los factores más influyentes en el modelado del paisaje, en las características del suelo, la fisonomía de la vegetación y en el potencial productivo de una región. La Organización Meteorológica Mundial (OMM) lo define como “*el conjunto fluctuante de las condiciones atmosféricas caracterizado por los estados y las evoluciones del tiempo en una proporción determinada del espacio*”. Al efectuar la descripción del clima de una región o lugar, generalmente se tiene en cuenta las condiciones del tiempo atmosférico, consideradas en sus características medias a través de un período suficientemente largo de años (INTA *et al.* 1980). Entre los elementos y factores del clima más importantes para la provincia de La Pampa se encuentran la precipitación, la temperatura, el viento, la humedad atmosférica y la circulación general de la atmósfera (INTA *et al.* 1980).

La *precipitación* es un elemento del clima que condiciona en gran medida el rendimiento agrícola y la producción de forraje de una región. Sin embargo, también puede provocar acciones negativas entre las que se destacan la erosión hídrica y las inundaciones.

El régimen de la distribución de las lluvias a lo largo del año en La Pampa, muestra que las mayores precipitaciones medias mensuales ocurren en el semestre estival (octubre a marzo) con picos mayores en octubre y/o marzo, haciéndose ello notorio en el N de la provincia. El mes de menores lluvias en general es agosto, aunque en la parte meridional los son junio o julio. La distribución de las lluvias máximas y mínimas absolutas mensuales es aleatoria, si bien puede mencionarse que las máximas ocurren en los meses de verano y otoño, y las mínimas en los meses de invierno (Galmarini 1961). La variabilidad de las precipitaciones tanto en totales mensuales

como en los totales anuales es muy grande, siendo esto una característica de las regiones áridas y semiáridas.

A partir de los datos de las lluvias medias anuales es posible construir las isohietas. En la provincia las lluvias decrecen en sentido NE-SW, debido fundamentalmente a la circulación general de la atmósfera ya que existen diferencias en el contenido de humedad del aire, respondiendo esto último al aumento de la continentalidad hacia el W.

A partir de la información proveniente del trabajo de Roberto *et al.* (2016), en el cual se analizan registros pluviométricos para la provincia de La Pampa (período 1984-2014), se construyeron las isohietas del departamento Maracó (**Figura 6**). Las mismas se elaboraron con una equidistancia de 10 mm (desde los 800 a los 1000 mm). A modo complementario, en el **Apéndice C** se presentan las isohietas quinquenales del departamento Maracó (período 1993-2017).

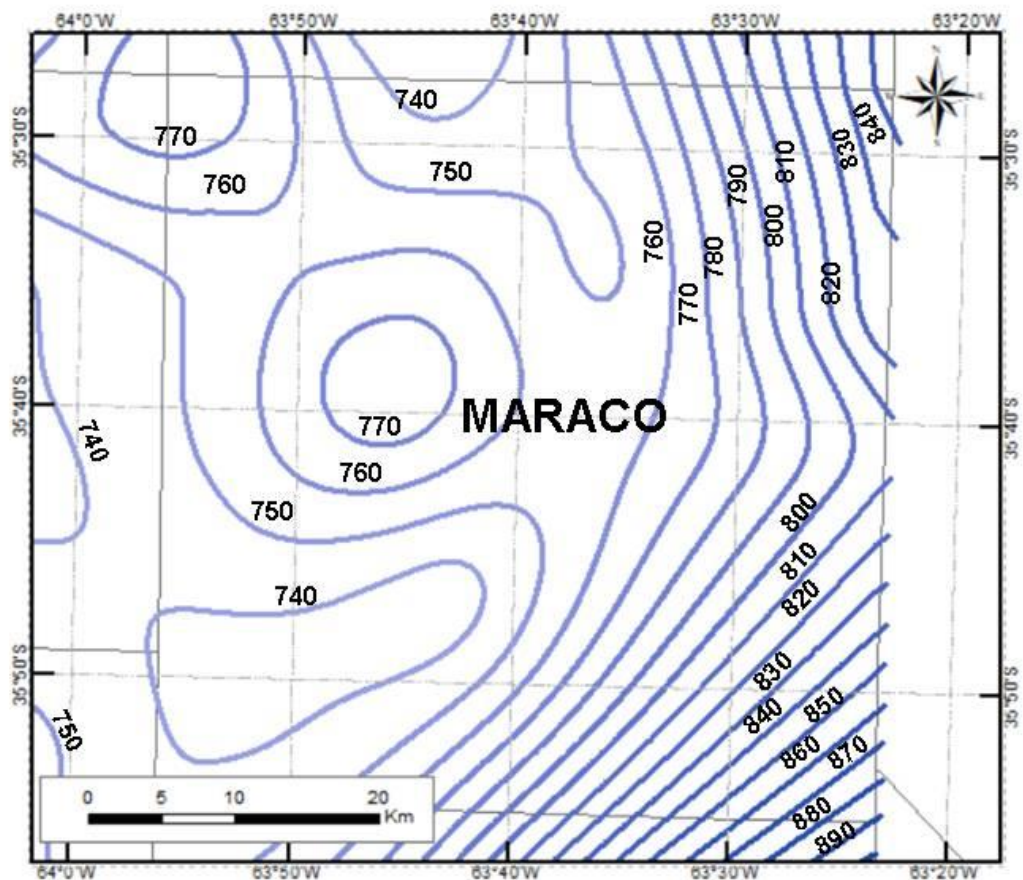


Figura 6. Isohietas del departamento Maracó. Las isohietas que cruzan el departamento oscilan entre los 800-1000 mm (equidistancia: 10 mm). Período: 1984-2014. Datos de lluvia de la policía de la provincia de La Pampa.

La *temperatura* es un factor ecológico muy importante, dado que en sus variaciones extremas (INTA *et al.* 1980) muy frecuentemente actúan como limitante para el crecimiento y la distribución de los seres vivos. Las variaciones de temperatura en la provincia son notorias en sentido N a S, aunque también adquieren valor las que ocurren en el extremo occidental, donde tiene marcada influencia la altitud.

La provincia de La Pampa se caracteriza por poseer un tipo de clima templado (temperatura media anual entre 14° y 16°C), con gran amplitud térmica (diferencia entre el mes más caliente y el mes más frío), que alcanza valores de 16°C. Esto denota el carácter continental que se incrementa hacia el W. La temperatura media del mes más caliente (enero), es de 24°C en el NNE y de 22°C en el W-SW. Existe una cuña de calor que penetra en la provincia por el N avanzando hacia el S y que responde al gran calentamiento estival, que abarca una gran área del centro del país. En el extremo suroriental las temperaturas decrecen algo por el flujo del aire del océano Atlántico (dirección SE) que es propio de la época. En la parte occidental el efecto de la altitud lleva a que los valores disminuyan en cortos trechos y que las isotermas se desplacen en el sentido N - S (Burgos 1974). Por su parte, la temperatura media del mes más frío (julio) sufre menos variaciones por el alcance que tienen las irrupciones de masas de aire polar que llegan a tener incidencia hasta el Brasil. La parte menos fría es el N de La Pampa, que posee una temperatura media del mes de julio de alrededor de 8°C, mientras que la más fría es la del W-SW con valores cercanos a los 6°C.

La temperatura máxima anual media es de unos 40°C, siendo la zona centro-norte la que posee los valores más altos y por lo tanto el clima más cálido de la provincia. La máxima absoluta oscila entre los 40° y 45°C. La mínima anual media va de —8°C en el NE a —12°C en el SW. Los valores extremos de la temperatura mínima anual absoluta, fluctúan entre —10°C en el NE y —17°C en el SW. Como se aprecia, existe una mayor heterogeneidad que en las máximas, lo cual se debe en parte a que es mayor el contenido de humedad del aire en el área nororiental (atemperando la acción negativa de la temperatura) y una mayor superficie del suelo cubierto por vegetación. Otra causa importante en esto es la circulación general de la atmósfera.

En la **Tabla 1** se presentan los datos del análisis efectuado de la serie histórica de registros de temperaturas máximas y mínimas en abrigo meteorológico para la localidad de General Pico (Maracó) - período 1956-2018. Los datos fueron provistos por el Instituto de Clima y Agua (INTA Castelar).

Tabla 1. Estadística descriptiva de registros de temperatura máxima y mínima en abrigo meteorológico para la localidad de General Pico, período 1956-2018. Datos de Instituto de Clima y Agua (INTA Castelar).

TEMPERATURA EN ABRIGO METEOROLÓGICO - GENERAL PICO		
	MÁXIMA	MINIMA
PROMEDIO	23.1	9.7
DESVIO ESTANDAR	7.1	6.4
MAXIMA ABSOLUTA	44.0	29.2
MINIMA ABSOLUTA	-9.6	-11.6

Relacionado a la temperatura, un factor muy importante para el sector agropecuario corresponde al *régimen de heladas*. Se considera helada a toda temperatura igual o inferior a 0°C ocurrida a nivel del abrigo meteorológico (1,50 m. de altura). Este fenómeno constituye junto con la sequía, uno de los de mayor importancia en su acción perjudicial sobre los vegetales.

Las heladas otoñales y primaverales tienen gran incidencia sobre la producción agrícola, ya que, por su época de ocurrencia, pueden llegar a producir hasta la pérdida total de las cosechas. En varios sistemas de clasificación climática de las zonas áridas se ha tenido en cuenta la temperatura para valorar sus condiciones térmicas (Burgos 1963a y 1963b), considerando como límite mínimo para llevar a cabo una agricultura de desarrollo, el valor de 150 días (5 meses) libres de heladas. Los valores más bajos del período libre de heladas en La Pampa (140 - 160 días) se registran al W -SW del río Salado. Además, allí adquiere fundamental incidencia la presencia de pastizales abiertos y arbustales ralos de bajo porte, que facilitan una mayor pérdida de calor por irradiación del suelo.

En la provincia existe una diferencia de fechas de primera y última helada hasta de 30 días en la ocurrencia de las mismas entre el sector nor-oriental y el sur-occidental. La variabilidad de ambas es elevada, siendo en general para toda La Pampa entre 15 y 20 días como mínimo. La frecuencia de masas frías provenientes del sector S-SW es una de las causas primordiales que provoca una gran dispersión en la fecha de ocurrencia de las primeras y últimas heladas. La región N-NE se encuentra menos afectada por ésta adversidad, aunque también en ésa zona las heladas adquieren un papel preponderante en la producción agropecuaria. Para la zona de estudio, la fecha media de la primera helada corresponde al 01/05, mientras que la de la última helada es el 21/09 (INTA *et al.* 1980).

En cuanto a los *vientos* predominantes para la provincia, existen datos de frecuencia de la dirección para los meses de enero y julio, porque constituyen dos condiciones extremas correlacionadas con la circulación de la atmósfera. En enero en la porción centro-oriental se observa la incidencia de la circulación del NNE y S-SW. La mayor actividad le corresponde al anticiclón del océano Atlántico, que penetra en la provincia por el N-NE complementada por la baja presión que se genera en el continente por el calentamiento del mismo. La acción del anticiclón del Pacífico genera los vientos del S-SW. Hacia el S de La Pampa se nota la influencia de los vientos semipermanentes del W (Río Colorado), aumentando la frecuencia de éstos. En el SE de la provincia se nota la influencia de la brisa del mar, propia de la estación, siendo mayor la frecuencia de los vientos del sector E. En julio se establece un centro de alta presión (anticiclónico) en el continente, por un enfrentamiento del mismo, aumentando el flujo de aire con dirección N y NW. Esto se hace más notable en las estaciones meteorológicas del centro (Victorica y Gral. Acha) y del W (Santa Isabel). En la zona S-SE (río Colorado) se hacen más frecuentes estas direcciones, disminuyendo la acción del mar (viento del este).

La velocidad promedio anual del viento oscila entre 10 y 15 km/h, siendo la primavera la estación en que sopla con mayor intensidad. Esto coincide con el final del período de menor precipitación, lo que contribuye a aumentar los riesgos de erosión eólica. Por su acción desecante, este elemento del clima adquiere, en determinados momentos, características adversas para la producción agropecuaria. Ejemplos de ello son la influencia del zonda de dirección N - NW que es caliente y seco y del pampero (de dirección S-SW) que es frío y seco, desplazándose en forma rápida hacia el NE. Los vientos de las direcciones E y NE son los más beneficiosos para La Pampa, pues aportan masas de aire húmedo precediendo generalmente a las precipitaciones ([INTA et al. 1980](#)).

Por último, la *circulación general de la atmósfera* es un factor importante ya que determina las características netas del clima regional. El río Colorado, que constituye un límite provincial y corre en dirección W-SE desembocando en el océano Atlántico, ha sido considerado como línea divisoria para separar los dos grandes sistemas de la circulación atmosférica que determinan los climas del territorio continental argentino ([Burgos 1974](#)). En el verano (enero), la faja continua de alta presión (anticiclón) semipermanente de los 30° de latitud, baja unos 5° hacia el S y se interrumpe por la presencia de un centro de baja presión (ciclónico) de origen térmico, que se genera en

el continente y que se intensifica periódicamente. El foco de dicho centro suele ubicarse en la región cuyana. Paralelamente, se establecen dos centros anticiclónicos, uno en el Atlántico y otro en el Pacífico. El primero, que se encuentra desplazado algo hacia el SE, a porta masas de aire que penetran en La Pampa con dirección N-NE y a veces del E, siendo calurosas y húmedas. En determinados momentos adquiere una mayor potencia el anticiclón del Pacífico (vientos del SW) y como consecuencia del choque frontal de ambas masas de aire, ocurren las precipitaciones propias de la época. En la estación invernal (julio), desaparece el centro de bajas presiones en el continente, restableciéndose la faja continua de altas presiones ubicada en los 30° de latitud. Por otro lado, la faja de las bajas presiones antárticas (60° de latitud) alcanza en su extremo norte hasta los 40° de latitud. Este frente polar en su accionar como formador de procesos frontales y aporte de precipitaciones (San Carlos de Bariloche), no tiene incidencia en La Pampa por la presencia de la barrera orográfica que constituye la cordillera de los Andes al N de los 40° de latitud S. Las masas de aire que penetran por el SW tienen la característica de ser frías y secas, pues han descargado su humedad en la zona cordillerana. Por ésta causa, en general, son escasas las precipitaciones en la época invernal (INTA *et al.* 1980).

2.3. Unidades edáficas, relieve y niveles freáticos

Los *suelos* de la provincia pertenecen a los tres siguientes órdenes taxonómicos: Molisoles, Entisoles y Aridisoles. Debido a que los Molisoles ocupan el sector oriental de la provincia presentando una distribución bastante uniforme y continua en la parte norte (sólo algunas inclusiones de Entisoles en médanos y Aridisoles en cuerpos de aguas temporarios, cubetas y lagunas de agua saladas), sólo se comentará brevemente acerca de este orden.

Exceptuando una pequeña porción del NE, que es la más húmeda y donde es údico el régimen de humedad de los suelos, la mayoría de los Molisoles en la provincia tienen regímenes ústicos, de lo cual se desprende que la distribución anual de la humedad en los suelos permite realizar cultivos de secano. Por su parte el régimen de temperatura de los suelos califica para térmico. Los suelos presentan cierta evolución pedogenética con escasa diferenciación de horizontes y leve estructuración. La clase textural varía entre franco y franco arenoso, el drenaje suele ser rápido, al igual que la permeabilidad, y su reacción oscila entre medianamente ácida y ligeramente alcalina

(pH 6-8). La característica más importante de estos suelos es la presencia de un horizonte superficial oscuro, bien provisto de materia orgánica y relativamente extenso en profundidad. También existen horizontes subyacentes muy difundidos como lo son las costras calcáreas (tosca o caliche) y el horizonte cámbico, particularmente localizados en los departamentos de Trenal y Realicó. Las limitaciones más destacables son las de naturaleza climática por estar situados en una región semiárida, debiendo ser tenida en cuenta particularmente la exposición a la erosión eólica. Otras limitaciones presentes, pero de naturaleza edáfica son la costra calcárea (tosca), el drenaje algo excesivo, la capacidad algo deficiente para la retención de humedad. La vegetación actual en la franja W del sector de los Molisoles corresponde al bosque de caldén dispuesto en bajos y pendientes. En las planicies se localizan pastizales. La parte oriental está bajo cultivos (INTA *et al.* 1980).

Las unidades edáficas presentes en la cuenca de mayor extensión se presentan en la **Tabla 2**.

Tabla 2. Composiciones edáficas presentes en la cuenca mayor con sus unidades taxonómicas, texturas del horizonte A1 y B1, orden y profundidad (cm).

<i>COD ATLAS</i>	<i>TAXON 1</i>	<i>TAXON 2</i>	<i>TEXT A1</i>	<i>TEXT B1</i>	<i>ORDEN</i>	<i>PROF (cm)</i>
E-Tus4	torripsamente tipico	-	arenosa	arenosa	ENTISOL	150
M-Jen1	hapludol entico	-	franca arenosa	franca arenosa	MOLISOL	150
M-Nen9	haplustol entico	haplustol entico	franca arenosa	franca arenosa	MOLISOL	100
M-Nen11	haplustol aridico	haplustol entico	franca arenosa	franca arenosa	MOLISOL	150
M-Nen18	haplustol entico	torripsamente ustico	arenosa	arenosa	MOLISOL	150
M-Nen37	haplustol entico	ustipsamente tipico	franca arenosa	franca arenosa	MOLISOL	150
M-Nen38	haplustol entico	haplustol entico	franca arenosa	franca arenosa	MOLISOL	150
M-Nen53	haplustol entico	ustipsamente tipico	franca arenosa	franca arenosa	MOLISOL	150
M-Nen55	haplustol entico	haplustol tipico	franca arenosa	franca arenosa	MOLISOL	150

En cuanto al relieve, el mosaico generado con los MDE utilizados para definir la escala espacial de la presente tesis, sirvió además para generar las siguientes figuras descriptivas de la zona de estudio: altitud (msnm) (**Figura 7**), curvas de nivel (m) (**Figura 8**), pendientes (**Figura 9**) y, drenaje (**Figura 11**).

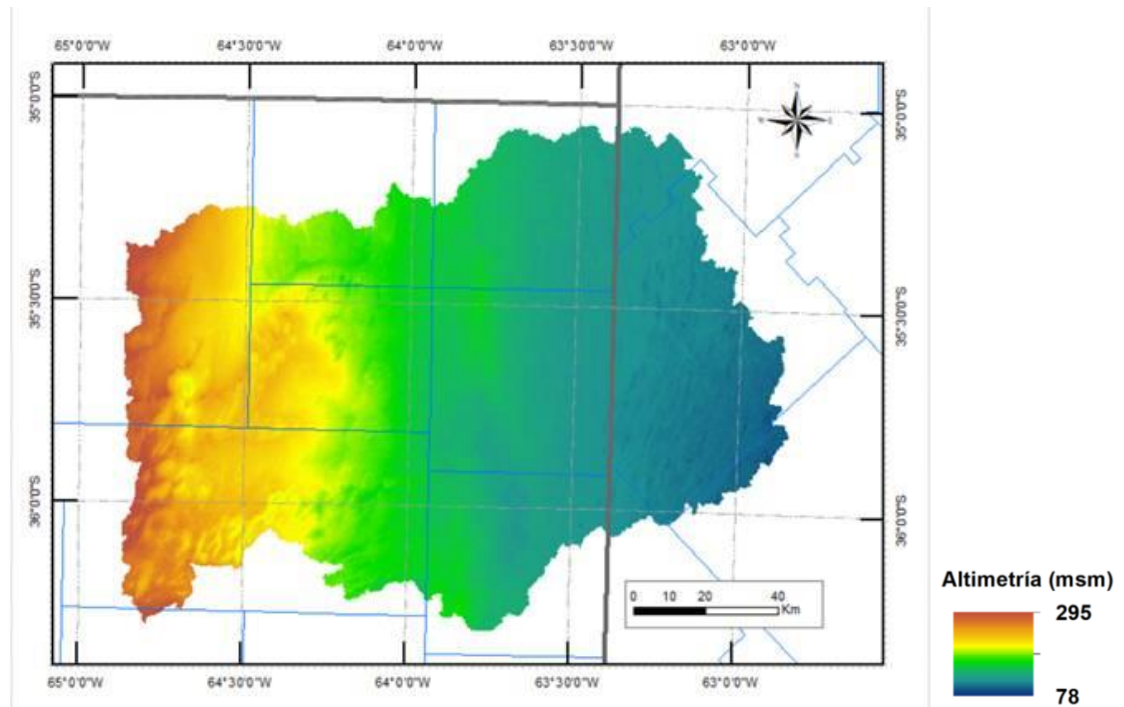


Figura 7. Altitudes (msnm) de la gran cuenca. Las alturas varían desde un valor mínimo de 78 m hasta un valor máximo de 295 m, creciendo en dirección Este a Oeste. Las menores alturas están representadas por tonos verdosos y azulados, mientras que las alturas mayores por tonos anaranjados y amarillos.

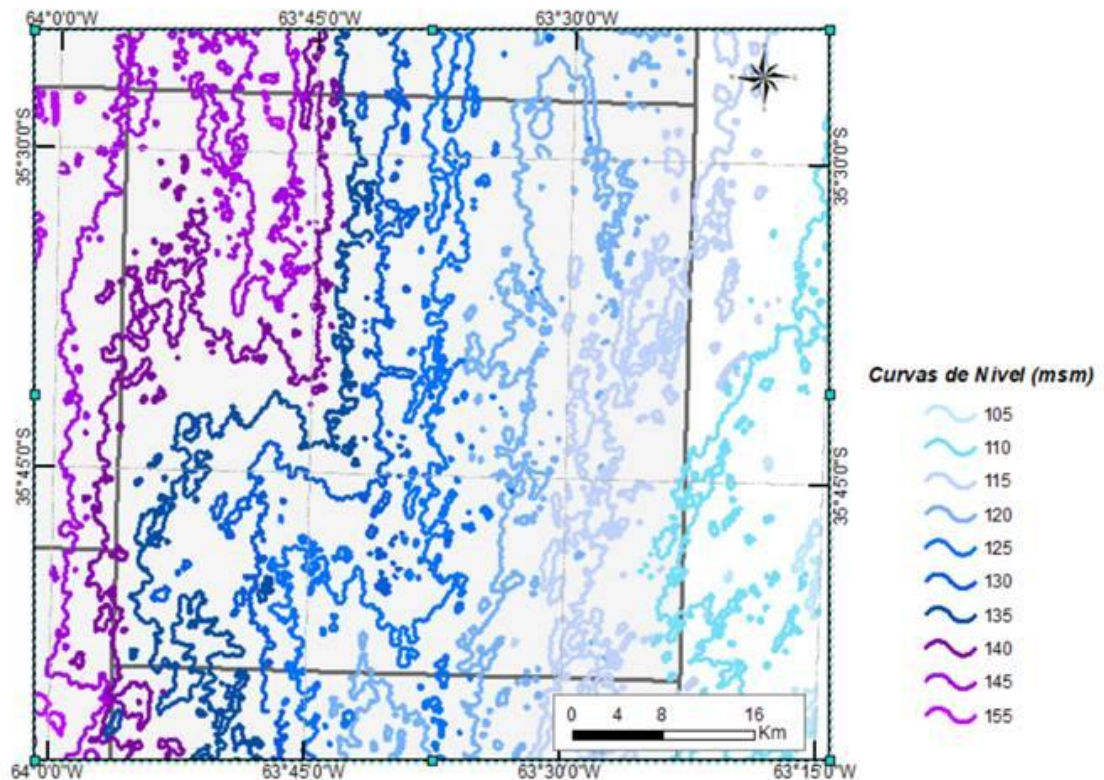


Figura 8. Curvas de nivel (m) del departamento Maracó (equidistancia: 5 m). El rango de las alturas tiene una amplitud de 50 m, aumentando en dirección Este a Oeste. Las curvas de menor altura corresponden a las tonalidades celestes y azuladas, mientras que las de mayor altura se representaron con tonalidades violáceas y rosas.

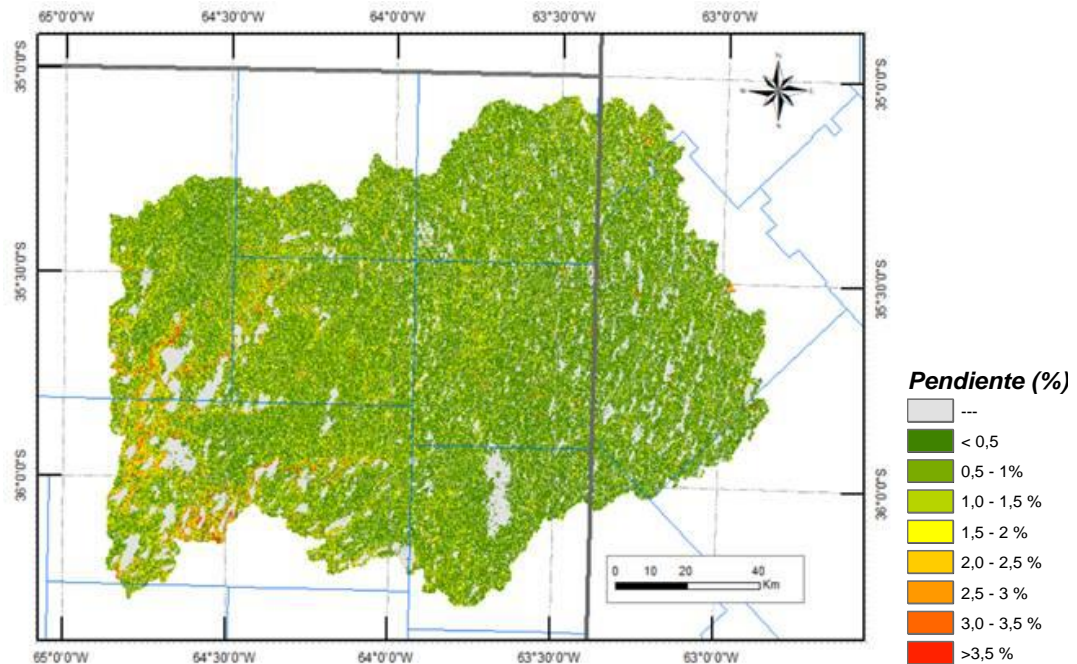


Figura 9. Pendientes (%) del área de estudio, elaborado con el Módulo geomorfometría. Las pendientes van aumentando a medida que se pasa de una tonalidad verde-amarilla (< 2 %) al naranja-rojo (> 2 %). Con tonalidad gris se representan las depresiones.

Para generar la red de drenaje se utilizó nuevamente el módulo *SEXTANTE-Análisis Hidrológico Básico* del gvSIG (utilizado previamente para definir la escala espacial de la presente tesis). Este módulo permite mapear las líneas de flujo del área de estudio y así determinar, una vez que existe agua en superficie, hacia donde podría dirigirse. El insumo básico para aplicar la metodología es nuevamente el MDE de la zona de estudio. Luego, se desarrolla la siguiente secuencia metodológica:

- 1) localización del área en cuestión y superposición al MDE (el presente trabajo se hizo a escala de cuenca, pero puede usarse para trabajar a nivel de departamento político o lote, por ejemplo);
- 2) recorte del MDE y eliminación de depresiones. Mediante este algoritmo se llenan pozos y sumideros, proceso que debe realizarse antes de ejecutar el análisis hidrológico propiamente dicho. De lo contrario, las direcciones de flujo no pueden calcularse en algunas celdas, dando como resultado cálculos incorrectos;
- 3) cálculo del mapa de orientación y flujo acumulado;

4) elaboración del mapa de drenaje para determinar aquellos sitios donde hay mayor acumulación de agua, y por ende mayor vulnerabilidad a que se manifiesten inundaciones.

Si bien el sistema permite hacer cada paso por separado, Roberto ([resultados no publicados](#)) creó un modelo para automatizar todos los pasos secuencialmente a través de la herramienta SEXTANTE - *Modelizador*. Creado el modelo, con solo ejecutarlo se realizan todos los pasos, uno detrás del otro en el orden previamente asignado (**Figura 10**).

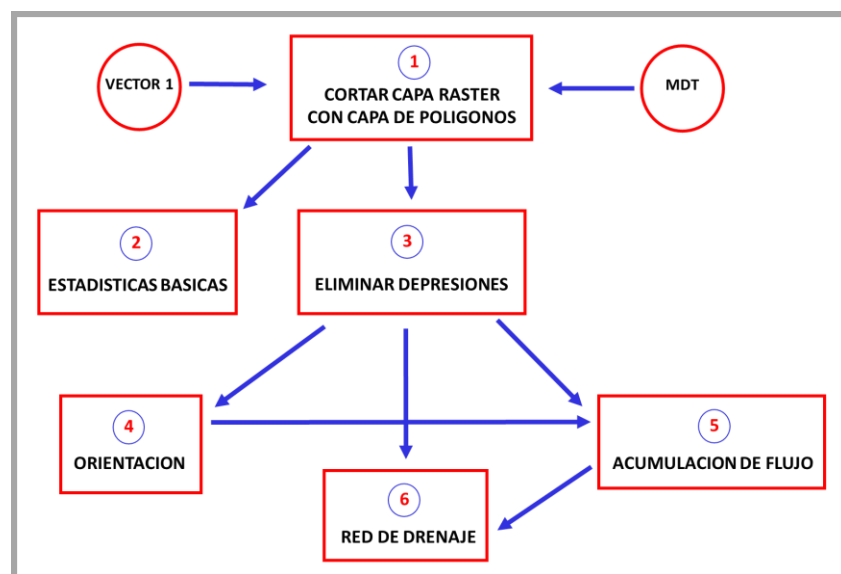


Figura 10. Secuencia de pasos seguidos por el modelo para construir el mapa de drenaje del área de estudio ([Roberto, resultados no publicados](#)).

Por último, es posible calcular la cuenca vertiente en un punto, algoritmo que permite extraer la cuenca hidrológica, y su división en sub-cuencas, asociada a una red de drenaje. Si a este resultado se lo transforma a formato vectorial, es posible determinar el área de captación de ese punto (**Figura 11**).

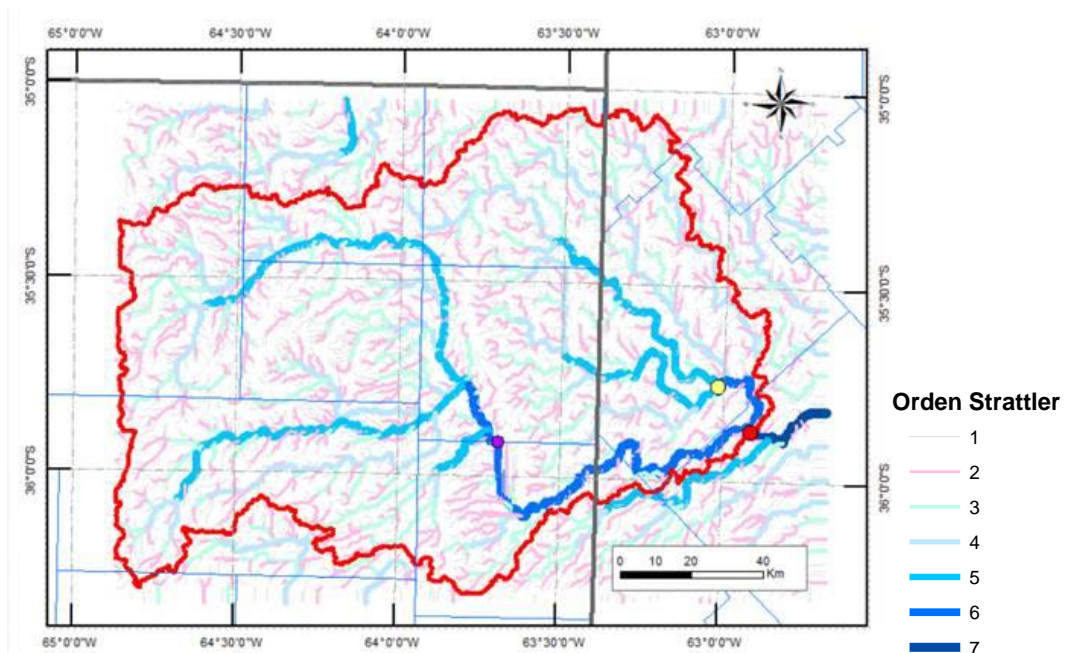


Figura 11. Red de drenaje del área de estudio. Nótese que a medida que se engrosa la línea mayor es el flujo de agua (mayor número de orden). El punto color amarillo corresponde a la desembocadura de la subcuenca Este y el punto color rosa representa la desembocadura de la subcuenca Oeste. Por último, el punto color rojo corresponde a la desembocadura de la cuenca mayor.

El “estudio de los daneses” (Jensen *et al.* 2000) encomendado por el Gobierno Provincial para evaluar alternativas de mitigación de las inundaciones ocurridas entre 1999-2001, se centró en un rectángulo que abarca un sector más reducido del NE del área de la **Figura 11** (departamentos Chapaleufú y Maracó, y parte de los departamentos de Realicó, Trenel, Conhelo y Quemú Quemú), y determinaron que un 48% de la superficie drena en dirección O-SO hacia la depresión topográfica natural, localizada al O de la localidad de Quemú Quemú. El 45% drena en dirección SE en forma generalizada, hacia la provincia de Buenos Aires, mientras que el porcentaje restante drena en dirección N a través del límite desde la provincia de La Pampa hacia la provincia de Córdoba.

Para completar la caracterización del área de estudio, en la **Figura 12** se presenta la profundidad del nivel freático para la provincia de La Pampa. Si bien en algunas regiones la profundidad de las mismas puede superar los 100 m, en el caso del departamento Maracó, son napas relativamente someras que no superan los 20 m (Roberto *et al.* 2008). En cuanto a su calidad para uso ganadero, un parámetro que puede brindarnos una idea general es el de RST (residuos sólidos totales). Un trabajo

de Roberto *et. al.* (2008) establece para el departamento Maracó los siguientes porcentajes de superficie según la cantidad de RST, a saber:

-18,9% con $< 2000 \text{ mg l}^{-1}$ (muy buena para cría / buena para invernada-tambo)

-10,1% con 2000 a 4000 mg l^{-1} (buena para cría / aceptable para invernada-tambo)

-5,8% con 4000 a 8000 mg l^{-1} (aceptable para cría / mala para invernada-tambo)

Hay que aclarar que el 65,2% restante de la superficie departamental, no cuenta con datos de calidad de agua. Estos datos pueden ser relevantes a la hora de entender, por ejemplo, los procesos de salinización y sodificación asociados a las inundaciones de estos suelos.

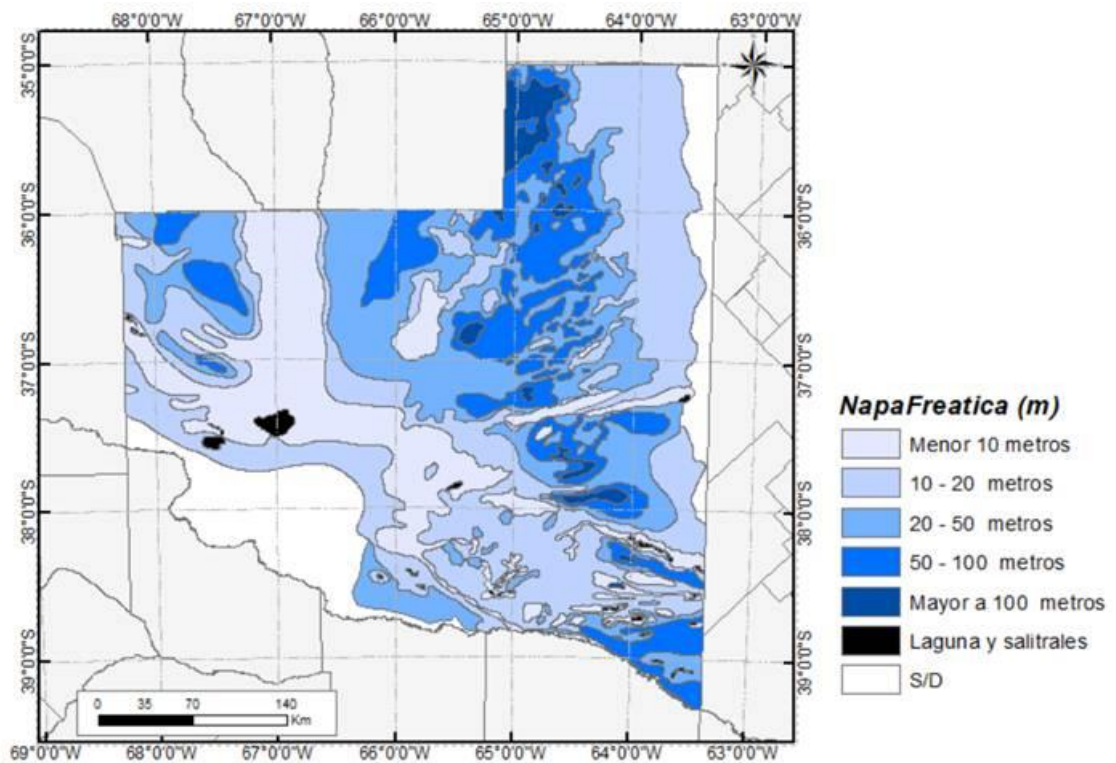


Figura 12. Profundidades medias del nivel freático de la provincia de La Pampa. Fuente: adaptado de Roberto *et al.* (2008).

2.4. Región fisiográfica

Según el Inventario Integrado de los Recursos Naturales de la provincia de La Pampa (INTA *et al.* 1980), la zona donde se lleva a cabo el presente estudio pertenece a la *Región Fisiográfica Oriental con régimen hídrico subhúmedo – seco*, la cual se divide en dos subregiones: *Planicies Medanosas* y *Planicies con Tosca*.

2.4.1. Subregión Planicies Medanosas

Esta subregión, ubicada en el extremo NE de la provincia de La Pampa, entre los meridianos 63° y 64° 15' O y los paralelos 35° y 37° 15' S, tiene una superficie de aproximadamente 9200 km², con una considerable extensión en sentido N-S, lo que pone de manifiesto claras diferencias climáticas. El régimen de temperatura varía bastante entre uno y otro extremo. El sector norte se caracteriza por poseer un invierno más benigno, aunque las marcas mínimas pueden llegar a valores muy bajos; la época estival es más cálida. La ocurrencia de las primeras y últimas heladas es variable según las zonas, por lo que en la zona sur los cultivos de cosecha son más riesgosos. Las precipitaciones medias anuales históricas eran de 600 mm - 650 mm, incrementándose en los últimos 30 años a valores de 700 mm - 800 mm aproximadamente. Los vientos presentan un comportamiento similar al de toda la provincia, siendo las direcciones dominantes N-NE y S-SO.

Los procesos morfogenéticos que actuaron en esta subregión fueron fundamentalmente hídricos y eólicos. Los primeros elaboraron una superficie calcárea con pendiente regional al E y sobre ella, el viento acumuló un manto arenoso de espesor variable. En el O este espesor alcanza el metro, mientras en el límite E de la unidad supera los 6 m. Dentro de este sedimento se encuentran acumulaciones de ceniza volcánica, suelos enterrados y paleohorizontes.

El relieve presenta diferencias que se pueden distinguir en tres sectores:

- *Sector norte*: se extiende desde el límite norte de la provincia hasta aproximadamente la línea General Pico-Trebolares, presentando un relieve plano a suavemente ondulado, con médanos bien definidos.
- *Sector central*: comprende desde General Pico hasta Anguil, con un relieve suavemente ondulado a ondulado, con lomas muy alargadas.
- *Sector sur*: el relieve es suavemente ondulado con características medanosas y presenta una apreciable cantidad de médanos vivos. Se observan numerosas micro depresiones dispuestas con sentido SO-NE.

Los suelos que se presenta en la subregión: "Planicies Medanosas", se pueden agrupar en tres unidades cartográficas:

- *Planicie medanosa con cubetas*: se encuentra ubicada en el extremo NE de la provincia. El suelo dominante es un Haplustol éntico, franca gruesa, mixta, térmica. Estos suelos tienen incipiente evolución genética con un sencillo perfil del tipo A-AC-C y la tosca se encuentra por debajo de los dos metros. Hay presencia de carbonato de

calcio por debajo de un metro de profundidad. El suelo superficial (horizonte A) es profundo, con buen contenido de materia orgánica y está bien estructurado. Estos suelos presentan drenaje algo excesivo, permeabilidad rápida, escurrimiento casi nulo y freática profunda. Tienen régimen de humedad údico, temperatura térmica, y su clase granulométrica es franca gruesa. Sus limitaciones son normales para suelos de áreas semiáridas, con regular capacidad de retención de humedad, erosión eólica ligera y sequías estacionales.

- *Planicie medanosa ondulada*: ésta unidad ocupa el E de la provincia, abarcando los departamentos Maracó, Chapaleufú, Quemú Quemú, Catrilo y una porción de Realicó y Atreucó. Los suelos de esta unidad integran una Asociación, compuesta por: Haplustol éntico, arenosa, mixta, térmica (80%) y Ustipsamente típico, arenosa, silíceo, térmico (20%). Estos suelos tienen poca evolución genética, presentando un sencillo perfil del tipo A-AC-C. Los carbonatos aumentan en profundidad y el suelo superficial tiene un buen espesor con contenido medio de materia orgánica. El suelo dominante tiene permeabilidad rápida, es excesivamente drenado y está asociado a médanos más o menos planos y estabilizados. Tienen regímenes de humedad ústico, de temperatura térmica y su clase, por tamaño de partícula, es arenosa. Las limitaciones de estos suelos están relacionadas con baja capacidad de retención de humedad, sequías estacionales y erosión eólica debida al laboreo y excesivo pastoreo.

- *Planicie medanosa con médanos vivos*: esta unidad abarca la mitad del departamento Atreucó, entre las localidades de Anchorena y Macachín y es una prolongación de la unidad anterior a la que se asemeja en los materiales y características morfológicas del perfil de sus suelos. Los suelos están poco estructurados y el horizonte superficial ha perdido parte de su espesor, lo que ha originado montículos y médanos en campos dedicados al cultivo. El mal manejo de los suelos, el sobrepastoreo, las sequías y los fuertes vientos han acelerado este proceso erosivo. Los suelos dominantes de esta unidad son: Haplustol éntico, arenosa, mixta, térmica, en fase severamente erosionada y Ustipsamente típico, silíceo, térmico, en fase severamente erosionada (INTA *et al.* 1980). En esta subregión se pueden diferenciar distintos tipos fisonómicos: cultivos, pastizal sammófilo y halófito. Esta zona presenta un sistema productivo ganadero-agrícola incrementándose en los últimos años la superficie agrícola en desmedro de la ganadera.

2.4.2. Subregión Planicie con Tosca

La denominada subregión Planicies con Tosca, situada en la parte NE de la provincia, entre los meridianos 63° 45´ y 64° 30´ O y los paralelos 35° y 36° 30´ S, tiene una superficie de aproximadamente de 8500 km², con una extensión en sentido N-S donde se aprecian ciertas diferencias climáticas. El régimen de temperatura varía bastante. La parte septentrional posee invierno más benigno, con una temperatura del mes más frío algo superior a los 8°C y un verano más caluroso, con una temperatura 25°C. Las fechas medias de las primeras y últimas heladas sufren un retraso y un adelanto respectivamente de alrededor de 15 días, teniendo influencia en las fechas de siembra y cosecha. La diferencia de las lluvias entre E y O se acentúa en la parte central donde llega a ser de unos 100 mm, lo que se manifiesta también en la deficiencia de agua anual que va de unos 160 mm en la parte oriental a casi 200 mm en la occidental. Los vientos, al igual que en la subregión “Planicies Medanosas”, tienen una predominancia en las direcciones de N-NE y S-SO (INTA *et al.* 1980).

Esta subregión se caracteriza por la presencia de una costra calcárea difundida y originada en épocas pasadas, donde posteriormente se depositó, por acción eólica, un delgado manto arenoso (INTA *et al.* 1980). Se observa una planicie uniforme muy suavemente ondulada con una pendiente regional SO-NE, donde no se visualizan vías de drenaje de importancia. El microrelieve está compuesto por pequeñas lomas y depresiones. Sobre la base de las características del relieve se pueden diferenciar dos sectores:

- *Sector norte*: se ubica desde el límite N de la provincia hasta las localidades de Winifreda y Colonia Barón. Se caracteriza por tener una delgada capa de ceniza y es común encontrar suelos sepultados. El relieve es particularmente plano.
- *Sector sur*: se encuentra ubicado al sur de las localidades anteriormente mencionadas. La capa de ceniza volcánica está prácticamente ausente y el relieve presenta lomas suaves.

El origen del nivel calcáreo o tosca aún no se ha determinado con exactitud ya que los investigadores tienen distintas opiniones. Unos sostienen que su origen se debe a la evaporación del agua que cubría la región y que al evaporarse precipitaron sus componentes minerales, ricos en carbonato de calcio dando origen al material calcáreo conocido como calcreta o tosca. Otros investigadores sostienen que el origen de la tosca es pedogenético producto de la lixiviación de compuestos carbonáticos del perfil del suelo hasta una profundidad en que dicho material precipita dando origen a

esas formaciones conocidas como tosca. Sea uno u otro origen de la tosca, su presencia a poca profundidad de la superficie es perjudicial para los suelos agrícolas (INTA *et al.* 1980).

En este ambiente se pueden distinguir dos unidades cartográficas muy similares:

- *Planicie de Realicó-Arata*: abarca una franja con dirección N-S, donde la presencia de la tosca es generalizada. Esta unidad cartográfica es un complejo de dos suelos que tienen cierta organización edafogenética, presentando un sencillo perfil del tipo A-AC-C-Tosca, o bien AB2-

C-tosca. El suelo superficial (horizonte A) está bien provisto de materia orgánica, rico en nutrientes y bien estructurado, con régimen de humedad ústico y temperatura térmica. Sus limitaciones están reflejadas en la escasa profundidad efectiva, drenaje natural excesivo, sequías estacionales y erosión eólica moderada. El suelo dominante es un Haplustol éntico, franco gruesa, mixta, térmica, distinguiéndose dos fases de acuerdo a la profundidad de la tosca: cuando la tosca se encuentra a menos de 50 cm, es fase somera del suelo dominante y cuando la tosca se encuentra a más de 150 cm., la fase es profunda. El otro suelo presente, en este complejo, es un Haplustol típico, franco fina, mixta, térmica. La tosca se encuentra alrededor de los 50 cm de profundidad. La característica fundamental que lo diferencia del anterior es la presencia de un horizonte diagnóstico cámbico (horizonte B). Estos suelos no tienen mucha difusión.

- *Planicie con tosca de Castex y Winifreda*: abarca una franja con dirección N-S a continuación de la unidad anterior. La tosca está presente en toda el área. Esta unidad cartográfica está constituida por un complejo integrado por un suelo dominante y sus fases. Son suelos como los de la unidad anterior, pero sin un horizonte B cámbico. El horizonte A presenta buen espesor, generalmente mayor a 20 cm, con buena provisión en materia orgánica y bien estructurado. Tienen régimen de humedad ústico y temperatura térmica. Estos suelos son de poca profundidad efectiva, drenaje natural excesivo, sequías estacionales, erosión eólica moderada y leve peligro a la erosión hídrica. El suelo dominante de esta unidad es un Haplustol éntico, franco gruesa, mixta, térmica (tosca a los 50-150 cm). Según la profundidad de la tosca se distinguen dos fases: si la tosca está a menos de 50 cm de profundidad el suelo se clasifica como Haplustol éntico, franco gruesa, mixta, térmica, petrocálcica, fase somera y si la tosca está por debajo de 1.5 m, el suelo se clasifica como Haplustol éntico, franco gruesa, mixta, térmica, con fase profunda.

En esta subregión, los cultivos cubren casi un 90% de la superficie, pudiendo encontrar cultivos estivales (sorgos graníferos y forrajeros, maíz y mijo) y cultivos invernales (centeno, avena, cebada, trigo), mientras que el 10% restante está representado por pastizales naturales, bosques de *Prosopis caldenia*, matorrales y arbustales halófilos (INTA *et al.* 1980).

3. DETERMINACION DE LAS VARIABLES INVOLUCRADAS

Si bien el área de estudio definida por la aplicación del módulo hidrológico del gvSIG, abarca dos cuencas con más de 500 mil hectáreas (**Figura 2**), una limitante en la presente tesis fueron los datos disponibles de las variables a analizar que fueron recopilados efectivamente. En lo que respecta a la determinación de la superficie inundada, mediante el análisis de imágenes satelitales, se cubrieron ambas cuencas en su totalidad. Por su parte, el análisis de las restantes variables, precipitaciones, niveles freáticos, excesos hídricos, uso de la tierra y uso consuntivo, se centró en el departamento Maracó (La Pampa). La elección del mismo tuvo que ver con dos razones a saber. Por un lado, para las localidades del departamento Maracó se cuenta con los registros históricos de niveles freáticos más completos y continuos, dato que es limitante para realizar estudios con series de tiempo amplias como la que en este trabajo se propone. Por el otro lado, el departamento Maracó es el único distrito político cuyo territorio está completamente situado dentro del área de la cuenca del NE de la provincia de La Pampa que comprende a las dos de las subcuencas que representan a la planicie medanosa y a la planicie con tosca.

3.1. Área inundada (1993-2017)

3.1.1. Obtención y procesamiento de imágenes satelitales

En esta etapa se procede a obtener las imágenes satelitales correspondientes al área de estudio para el periodo comprendido entre 1993-2017. Se analizaron imágenes del satélite Landsat 5 TM (1993-2011) y Landsat 8 OLI/TIRS (2013-2017), comprendiendo siempre que fuera posible, dos imágenes por año, una en primavera y otra en otoño. La de primavera, ya que se corresponde con la estación de mayores precipitaciones en la región, y la de otoño donde si bien las precipitaciones son más

escasas, las evapotranspiraciones son notoriamente menores y por lo tanto pequeñas variaciones en los registros de lluvia en esta época pueden generar notables efectos sobre el terreno. La imagen utilizada corresponde al path & row 228/85 porque involucra ambas cuencas de estudio (**Figura 13**).

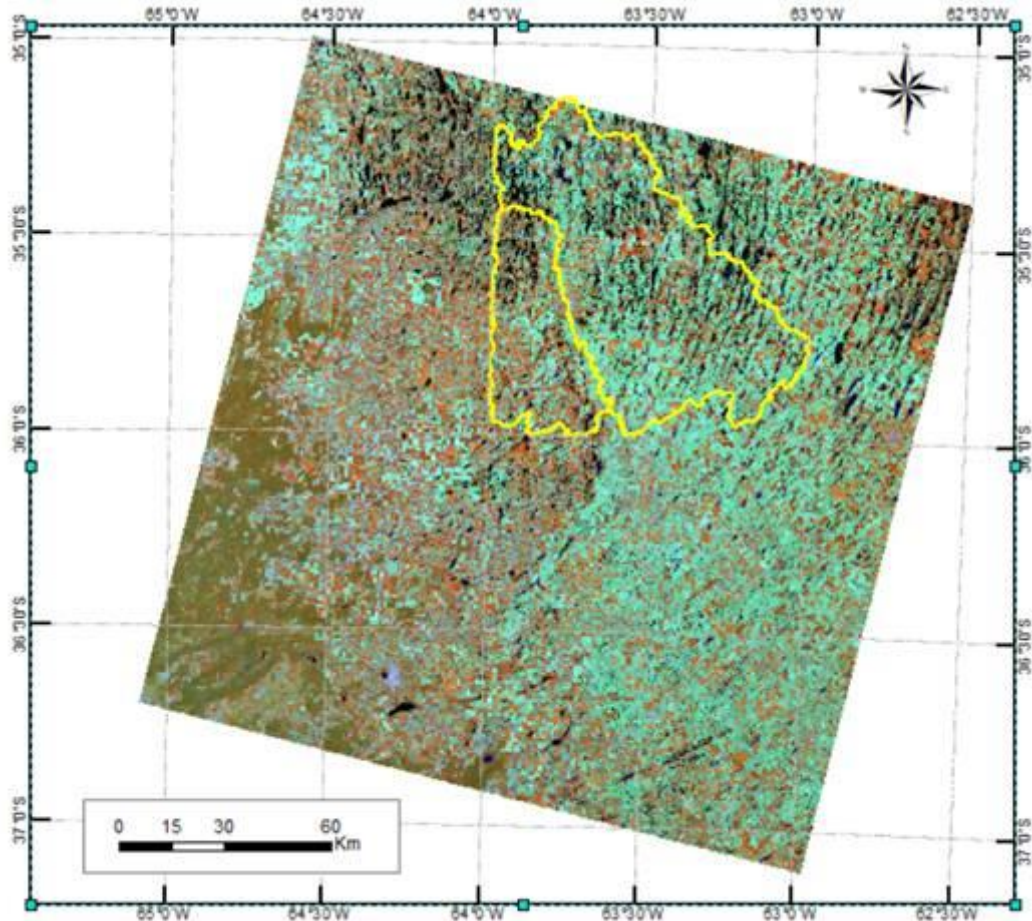


Figura 13. Escena del path-row 228-85 de la imagen satelital Landsat de noviembre de 2016, y localización de las subcuencas Este y Oeste que constituyen a la cuenca que se sitúa al NE de la provincia de La Pampa.

Los pasos seguidos para la obtención y procesamiento de las imágenes fueron los siguientes:

- *Selección de imágenes satelitales y descarga de las mismas:* luego de analizar las imágenes satelitales disponibles en el período de estudio, se seleccionaron aquellas que presentaban menor cantidad de nubes, mayor nitidez y que fueran aproximadamente de las mismas fechas para todos los años, con el fin de llevar adelante los objetivos presentados anteriormente. Una vez seleccionadas, se procedió a la descarga de las imágenes desde dos servidores gratuitos: a) del Instituto Nacional de Pesquisas Espaciales (INPE) de Brasil (<http://www.inpe.br/>), y b) del Servicio

Geológico de los Estados Unidos- USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). La **Tabla 3** presenta el detalle de las fechas de las imágenes satelitales utilizadas.

Tabla 3. Detalle de las fechas correspondientes a las 38 imágenes satelitales Landsat utilizadas.

AÑO	FECHA	MISION LANDSAT
1993	04 MAYO 30 DICIEMBRE	Landsat 5 TM+
1994	21 ABRIL 17 DICIEMBRE	
1995	10 MAYO 20 DICIEMBRE	
1996	26 ABRIL 20 NOVIEMBRE	
1997	02 JULIO	
1998	26 NOVIEMBRE	
1999	19 ABRIL 15 DICIEMBRE	
2000	21 ABRIL 15 NOVIEMBRE	
2001	24 ABRIL 02 NOVIEMBRE	
2002	27 ABRIL	
2003	23 OCTUBRE	
2004	16 ABRIL 12 DICIEMBRE	
2005	19 ABRIL	
2006	25 JUNIO 16 NOVIEMBRE	
2007	28 JUNIO	
2008	21 NOVIEMBRE	
2009	30 ABRIL 08 NOVIEMBRE	
2010	11 NOVIEMBRE	
2011	20 ABRIL	
2012	-	
2013	11 MAYO 05 DICIEMBRE	Landsat 8 OLI/TIRS
2014	12 ABRIL 22 NOVIEMBRE	
2015	18 JUNIO 11 DICIEMBRE	
2016	03 MAYO 11 NOVIEMBRE	
2017	30 NOVIEMBRE	

- *Reproyección*: las imágenes satelitales fueron reproyectadas al sistema de referencia de coordenadas planas Gauss Krüger, faja 3, utilizando el software libre y gratuito gvSIG (versión ejecutable 1.1.2). Esto responde a que la mayor parte de la información disponible de la provincia de La Pampa se encuentra en dicha faja. La reproyección se realizó mediante el comando *transformaciones geográficas/reproyectar capa*, donde se pasó de la proyección UTM zona 20 S (código: 32720) a Gauss Krüger faja 3 (código 22183). A continuación, cada imagen satelital fue ajustada con una imagen satelital ortorectificada del área en cuestión (path/row 228-85) obtenida previamente del servidor de la NASA.

-*Recorte del área de estudio*: seguidamente se procedió a utilizar el área de estudio (cuencas) definida en la sección 1.1 como área de recorte de cada imagen (**Figura 14**). El recorte del área de interés se hizo a través del *Módulo Sextante/herramientas básicas para capas raster: cortar capa raster con capa de polígonos*.

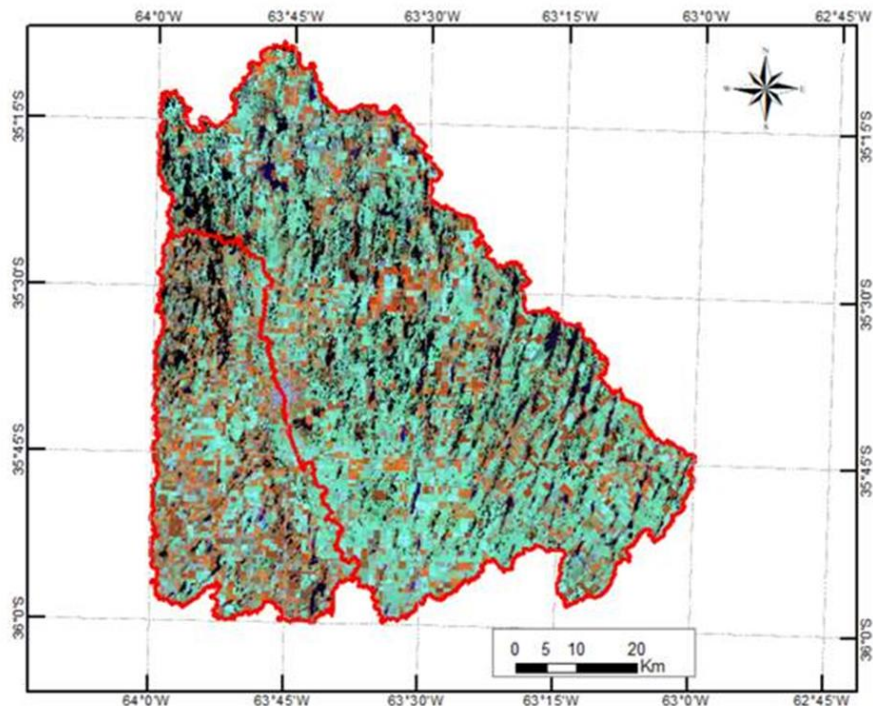


Figura 14. Área utilizada como recorte de las imágenes satelitales.

3.1.2. Cálculo y evolución del área inundada

Se realizó el procesamiento digital de las imágenes satelitales para la identificación de las áreas inundadas visibles en ellas. Este proceso requirió llevar a cabo previamente la clasificación de las imágenes con el *Módulo Sextante/algoritmos/herramientas de análisis para capas raster/clasificación no supervisada (clustering)*. En la clasificación se trabajó con la composición multi-banda en falso color compuesto de los canales RGB 453 del Landsat 5 TM y RGB 564 para Landsat 8 OLI/TIRS. Estas combinaciones de bandas permiten una visualización de los sectores ocupados por agua (zonas inundadas), en distintas tonalidades que van del azul al negro, lo que facilita distinguir claramente el agua del resto de las cubiertas naturales. Las superficies acuáticas absorben la mayor parte de la radiación óptica que reciben, siendo la absorptividad mayor, a mayor longitud de onda. La mayor reflectividad del agua clara se produce en el azul, reduciéndose paulatinamente hacia el infrarrojo cercano y medio, donde es prácticamente nula. Por esta razón, la frontera tierra-agua es muy nítida en esta banda (Chuvieco 2002).

En todas las clasificaciones generadas, la clase 1 representa área inundada. Los raster obtenidos en cada clasificación fueron convertidos al sistema vectorial a través del comando *Módulo Sextante/Algoritmos/vectorización/sectorizar capa raster (polígonos)*. En cada capa, resultado del proceso de clasificación, se seleccionó la clase 1, correspondiente a la clase agua y se procedió a guardarla como “capa agua”, mediante el comando *capa/exportar a.../SHP (Figura 15)*. Luego en cada tabla de atributos de cada capa, se calculó la superficie de cada polígono a través del comando *capa/agregar información geométrica/área*. De esta forma quedaron constituidos 38 shapefiles de superficie inundada del área de estudio (**Apéndice A**). Seguidamente, a través del comando de unión se calculó el área máxima inundada (*Gestor de geoprocetos: geoprocetos/análisis/solape/unión*). Sobre el shapefile resultante, se llevó a cabo el comando *disolver (Gestor de geoprocetos: geoprocetos/análisis/agregación/disolver)* para visualizar mejor el área máxima inundada.

Para calcular los cambios en el área inundada, se procedió a calcular la diferencia entre las coberturas de agua (shapefile) obtenidas en la etapa anterior, entre fecha y fecha. Para ello se utilizó el *Gestor de geoprocetos: geoprocetos/análisis/solape/unión*. Al shapefile resultante se lo reclasificó en tres categorías: a) 1-1 sin cambios (mantuvo el área); b) 1-0 decrecimiento del área; c) 0-1 incremento del área. Seguidamente se procedió a determinar las superficies de dichas categorías, en términos de porcentaje sobre la superficie total. Al finalizar el proceso se obtuvieron 37 capas temáticas, las que se pueden visualizar en el **Apéndice B**.

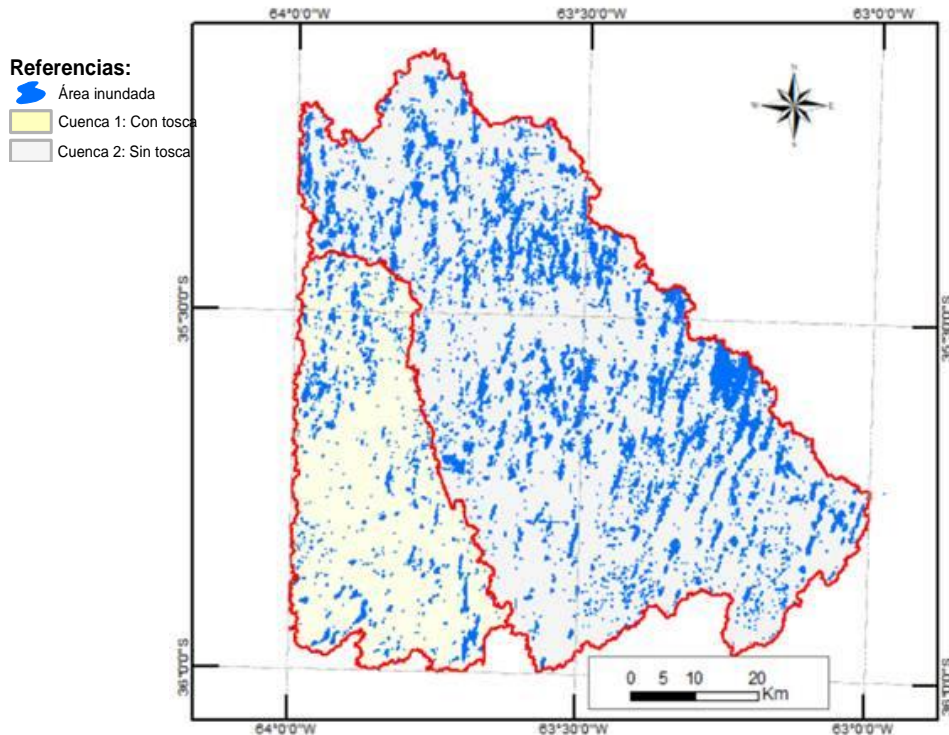


Figura 15. Ejemplo de capa de superficie inundada generada a partir de la clasificación no supervisada de las imágenes satelitales.

Como último paso, se elaboró una gráfica de vulnerabilidad o riesgo. Para esta etapa se utilizó una escala espacial de mayor detalle (departamento Maracó), ya que es el distrito político cuya superficie total está incluida en el área de estudio y, además, posee parte de su superficie en la cuenca ubicada en la planicie medanosa y parte localizada en la cuenca de la planicie con tosca, lo que permite el análisis y comparación de dos situaciones distintas. Para ello se utilizó el shapefile de máxima área inundada (sin disolver) y la división a nivel de lote catastral del departamento, estimándose así la probabilidad de cada lote de inundarse. De esta forma es posible identificar aquellos títulos que estuvieron en situación de emergencia agropecuaria (entre 50-79% de su superficie inundada) y, aquellos en situación de desastre agropecuario (> 80% de su superficie inundada). Ambos grupos acceden a los beneficios que establece la ley de emergencia provincial.

3.2. Precipitaciones (1993-2017)

En una primera instancia, se procede a elaborar el archivo de los datos diarios de lluvias del período analizado, 1993-2017 de las localidades existentes en el área de

estudio y su área de influencia (*ver sección 1.2*). La información fue proporcionada por la Administración Provincial del Agua de la provincia de La Pampa (APA). Para cada localidad se calcularon las precipitaciones acumuladas a 15, 30, 60 y 90 días antes de la fecha de cada imagen satelital, quedando constituidos 38 archivos, uno por cada imagen. Estos archivos fueron luego utilizados para correlacionarlos con el shapefile de las localidades, para llevar a cabo la interpolación del agua caída dentro del área de estudio (*Módulo Sextante/algoritmos/rasterización e interpolación/distancia inversa*). Independientemente del método de interpolación que se utilice, la bondad del método no va solo ligado al método en sí, sino también a la variable que se está interpolando y al uso que se va hacer de la misma. Chen et al. (2010), explican que tanto la frecuencia como la distribución, son determinantes y de gran influencia en la calidad de la interpolación de variables como la precipitación. Los autores concluyeron que el método determinístico *distancia inversa* mostró, en general, menores valores de error cuadrático medio. Otra cuestión por lo que el método es apropiado, es que, a medida que se aleja del punto de medición del dato (estación meteorológica) va perdiendo influencia.

La interpolación por distancia inversa es de tipo local y determinística, acotada por el radio de búsqueda. Se utiliza un radio mínimo que asegure que alrededor de todas las celdas se encuentra un número suficiente de puntos. Si ningún punto cae dentro del radio, la interpolación dará como resultado una celda sin dato. El parámetro exponente es el que se utiliza en el cálculo de los pesos de forma inversamente proporcional a la distancia. Este método tiene en cuenta para la ponderación, el alejamiento entre las celdas y no su posición. La tabla de validación se utiliza para verificar la calidad de dicha interpolación. El valor estimado es el valor que le corresponde a un punto si se interpolan todos los puntos menos el punto en cuestión. Esta tabla muestra la diferencia entre el valor real y el valor interpolado para todos los puntos utilizados para la interpolación.

Luego en esta etapa, se procede a determinar la cantidad de milímetros de agua caída 15, 30, 60 y 90 días antes de la fecha de cada imagen satelital, para cada polígono (área inundada), a través de un zonal (*Módulo Sextante/algoritmos/herramientas para capas polígonos/estadísticas de grid en polígonos*). A través de este zonal se pudo estimar la precipitación media, máxima, mínima y desvío estándar (STD), utilizando la capa vectorial de área inundada (para cada fecha) y la capa ráster desarrollada en la etapa anterior. La tabla, producto del zonal, se utilizó para calcular el coeficiente de determinación existente entre el área

inundada y las precipitaciones caídas 15, 30, 60 y 90 días anteriores a cada imagen satelital.

3.3. **Excesos hídricos** (1963-2017)

El régimen hídrico de una región no queda caracterizado sólo por los datos de precipitación. La misma actúa substancialmente disminuyendo o aumentando las posibilidades de crecimiento de los cultivos ante una demanda climática representada por la evapotranspiración. En la presente tesis se calculó el balance hídrico diario seriado mediante el software “AgroAgua” (Forte Lay *et al.* 1996). Es un software orientado a la agricultura que permite al usuario la aplicación de aspectos agrohidrológicos fundamentales para el ambiente rural. Permite grabar y actualizar las precipitaciones diarias, para luego poder realizar diferentes cálculos: estadística de precipitaciones para un período determinado, balance hidrológico diario para un seguimiento continuo de la humedad del suelo, estadísticas de humedad edáfica obtenidas a partir del balance, estudio de necesidades de aplicación de riego complementario, etc.

El software utiliza la metodología de Thornthwaite y Mather (1955) para el balance hídrico diario, mediante una técnica simplificada que reemplaza la Etp diaria por su valor climático o normal diario. Esto se hace por la difícil obtención de los datos diarios necesarios para su cálculo que permitan la grabación de archivos diarios ininterrumpidos como en el caso de la precipitación. Trabajos realizados en el CIBIOM (Centro de Investigaciones Biometeorológicas) demuestran que debido a la pequeña variabilidad que presenta este elemento del balance con relación a la enorme variabilidad de la precipitación, los resultados (ej.: almacenajes al final de cierto período) no difieren significativamente si se estiman mediante el uso de la Etp climática diaria o por medio de la Etp estimada para cada día con los valores reales.

La Etp climática diaria es estimada por el programa a partir de los 12 valores mensuales normales de cada localidad grabados en el archivo [etp], mediante un algoritmo de interpolación. Por lo tanto, los 365-366 valores obtenidos para un año se repiten para las mismas fechas de los distintos años. Por su parte, la Etp climática mensual puede ser calculada por cualquier método, pero por su mayor base física y por haber probado su idoneidad en diversos trabajos realizados en el CIBIOM (en que se compararon los almacenajes de agua en el suelo medidos en el campo con los estimados mediante balance), se recomienda el uso del método de Penman-FAO, y de

hecho es el usado para obtener los datos grabados en el archivo [etp] para las localidades de prueba entregadas. Los mismos han sido obtenidos a partir de valores calculados por Damario y Cattáneo (1982).

La Etp diaria es susceptible de ser modificada por la aplicación de coeficientes Kc a lo largo del año que modifican su valor respondiendo a la modalidad de uso de agua de distintos cultivos o manejos del suelo. El programa realiza por lo tanto el balance de agua en el suelo entre la oferta de agua (precipitación diaria medida) y la demanda (Etp diaria normal, modificada o no por los coeficientes Kc) para cualquier capacidad de almacenaje del suelo (capacidad de campo o CC) < 1000 mm., que determina distintas modalidades de retención. La salida es un gráfico con los almacenajes diarios del período pedido y los valores numéricos diarios de precipitación, evapotranspiración potencial, almacenaje, exceso de agua y exceso de agua acumulado en el período.

En la presente tesis, se ejecutó el programa para las 4 localidades del área de estudio que poseían series de datos de niveles freáticos históricos (General Pico, Ceballos, Speluzzi y Dorila), durante el período 1963-2017. Si bien el período de estudio es más acotado (1993-2017), el balance seriado debe correrse para un lapso de tiempo mayor (hacia atrás), ya que el software inicia con capacidad de campo para el 1° día de la serie y se estima que le demanda alrededor de 10 años para estabilizarse. Los parámetros utilizados para correr el programa fueron:

capacidad de campo = 150 mm

punto de marchitez permanente: 70 mm

precipitación: obtenida de APA y la Policía de la Provincia

Los datos de capacidad de campo y punto de marchitez permanente fueron consultados a profesionales del área de Suelos de INTA Anguil (Cristian Alvarez, com. pers.).

Aunque el software arroja además otros resultados, sólo se tuvo en cuenta el dato de *exceso* y *precipitaciones diarias* para relacionarlo luego con el dato de *profundidad del nivel freático*. Para cada localidad se calcularon los excesos acumulados 15, 30, 60 y 90 días antes de la fecha de cada imagen satelital, quedando 38 archivos, uno por cada imagen, con las localidades involucradas en el análisis. Los archivos obtenidos, fueron luego correlacionados con el shapefile de las localidades para llevar a cabo la interpolación de los excesos en el área de estudio (*Módulo Sextante/algoritmos/rasterización e interpolación/distancia inversa*).

3.4. Niveles freáticos (1990-2017)

La variable nivel freático casi siempre resulta una limitante en estudios a largo plazo, ya que en general no existen muchas localidades que cuenten con una base de datos de registros históricos continuos. Es por ello, que sólo fue posible recopilar datos de sólo 4 localidades de la zona de estudio, a saber: General Pico, Ceballos, Speluzzi y Dorila. Si bien algunas localidades presentaban información de años anteriores, la base de datos se armó para el período 1990-2017 para todas ellas. Hay que aclarar que en todos los pozos no existe ningún registro del año 2003. La **Figura 16** muestra la ubicación de los pozos en el área de estudio y la **Tabla 4** muestra el detalle de la información recopilada para cada uno de ellos.

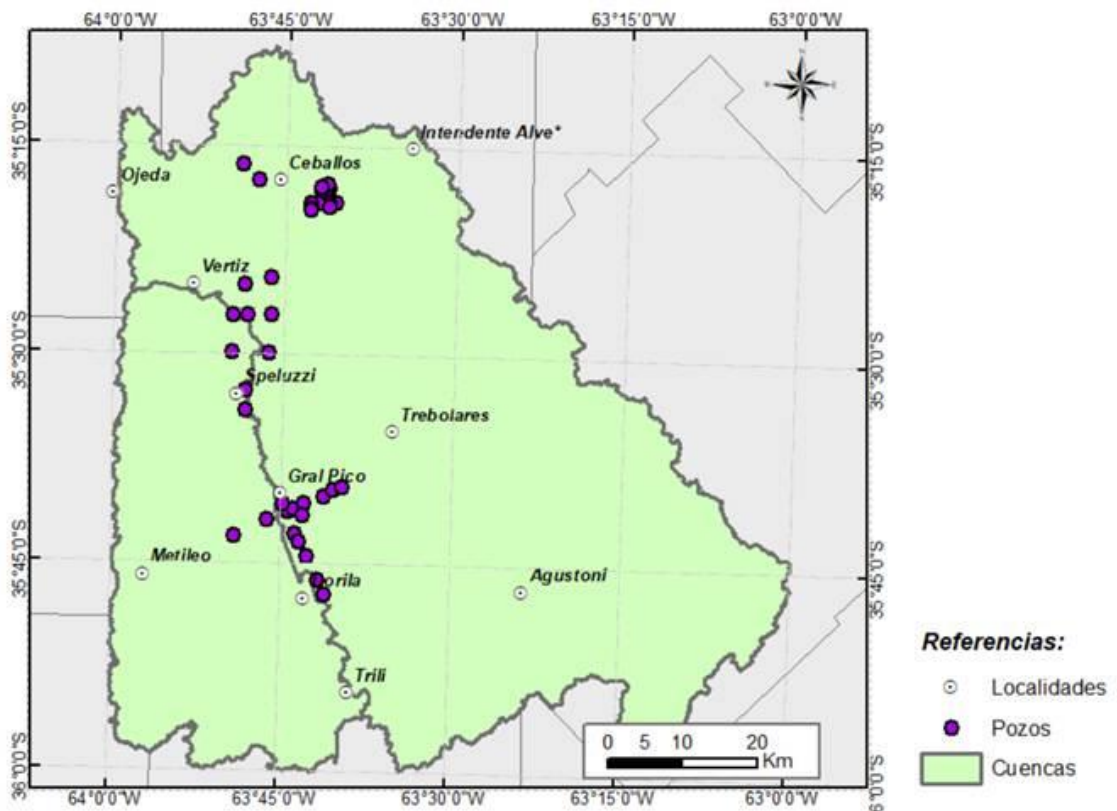


Figura 16. Localización de los pozos de los cuales se obtuvieron registros de niveles freáticos. En rojo se presentan algunas localidades que sirven de referencia. Nótese que la mayoría de los pozos se ubican en una línea sobre el límite que divide la cuenca Este y Oeste.

Tabla 4. Detalle de la información recopilada de los pozos ubicados en el área de estudio.

PERIODO	LOCALIDAD	POZO	
		NOMBRE	ALTURA (m)
1990-2017	CEBALLOS	81	137.5
	DORILA	II-5	133.7
		II-7	130.1
		II-8	129.1
		II-4	135.3
	GENERAL PICO	I-1	134.0
		I-3	136.2
		I-5	138.7
		I-6	137.6
		II-3	136.6
		I-10	128.6
		I-11	126.9
	SPELUZZI	I-7	137.0
		4	144.0
		6	151.0
		7	150.0
		8	148.0

Fuente: Adaptado de APA (Administración Provincial del Agua de la provincia de La Pampa).

Con esta información se generó una base de datos conteniendo el dato de precipitaciones, excesos hídricos y niveles freáticos, buscando posibles relaciones entre estas variables. Se representaron en un mismo gráfico las variables precipitación, exceso hídrico y nivel freático para evaluar su comportamiento.

3.5. Uso de la tierra (1990-2014)

Se utilizaron datos del Registro Provincial Agropecuario – REPAGRO (<https://produccion.lapampa.gob.ar>), para armar la base de datos sobre uso de la tierra de ambas cuencas. El período abarcado fue de 25 años (1990-2014), teniendo en cuenta que estos datos son al 30/06 de cada año. La información de la planilla que declaran los productores en el REPAGRO viene discriminada en dos ítems: *uso de la tierra* y *agricultura*.

En la sección *uso de la tierra* se tienen en cuenta los datos de superficie con agricultura para cosecha (trigo, avena, cebada, centeno y otros), verdeos de invierno (avena, cebada, centeno y otros), cultivos diferidos o verdeos de verano (maíz, sorgo y otros), rastrojos y barbechos, pasturas perennes (alfalfa, pasto llorón, etc.) y monte y campo natural. Esto permitió contrastar la superficie ocupada con pasturas con respecto a la superficie con cultivos de cosecha. Por su parte, en la sección *agricultura*, la información se divide en superficie sembrada con cultivos de cosecha fina (trigo, avena, cebada, centeno y otros) y cultivos de cosecha gruesa (girasol, maíz, sorgo granífero, soja, maní y otros). Esto permitió comparar la evolución de ambas superficies en cada cuenca.

3.6. Uso consuntivo (1990-2014)

Teniendo en cuenta el ciclo en días del desarrollo de cada cultivo, se calculó la evapotranspiración para los distintos cultivos de *cosecha fina*, *cosecha gruesa* y *pasturas*, mediante el método de Blanney y Criddle (1950), desarrollado en el Oeste de EEUU. Para el área de estudio, se utilizaron los siguientes ciclos de desarrollo: soja - noviembre a marzo; alfalfa - septiembre a mayo; girasol - noviembre a marzo; maíz - noviembre a abril; trigo - junio a diciembre y; sorgo - noviembre a abril.

En la fórmula interviene la temperatura media mensual y el porcentaje de horas luz por mes con respecto al total anual. Originalmente los autores diseñaron el método para estimar la evapotranspiración real total de los cultivos y su fórmula es:

$$ET = K * F$$

donde:

ET = evapotranspiración real total del cultivo expresada como lámina (cm)

K = coeficiente total de ajuste que depende del cultivo y de la ubicación de la zona de estudio

$F = \sum_{1}^n f$ es la suma de los valores "f" de todos los meses (desde el mes 1 hasta el mes n del ciclo vegetativo del cultivo en cuestión). Para calcular el valor de f se utiliza la siguiente ecuación:

$$f = \left(\frac{T + 17.8}{21.8} \right) * P * Duración_{mes}$$

donde:

T = temperatura promedio mensual (° C)

P = porcentaje de horas luz en el día en relación con el total anual (%)

Duracion_mes = división del número de días considerados en un mes para el ciclo vegetativo del cultivo, dividido entre el número total de días que tiene el mes (adim).

Por ejemplo, si se siembra el 15 noviembre, el mes de noviembre tendrá 16 días considerados dentro del ciclo vegetativo, y como noviembre tiene 30 días;

Duracion_mes = 16/30 = 0.53

Una modificación a la ecuación de Blanney-Criddle la realizó Phelan que introdujo al procedimiento el uso de un coeficiente por temperatura:

$$Kt = 0.031144 * T + 0.2396$$

donde:

T = temperatura media mensual en °C

Una vez determinado el valor de f y Kt se procede a calcular el valor de la evapotranspiración de referencia (ET_o), ya que, hasta este paso, únicamente se han considerado aspectos climáticos.

$$ET_o = f * Kt$$

Posteriormente se determinan los valores de los coeficientes de cultivo (K_c) para cada uno de los meses correspondientes al ciclo vegetativo y se calcula una primera estimación de la evapotranspiración potencial (ET_p')

$$ET_p' = ET_o * K_c$$

Para finalizar con el cálculo se determina un coeficiente de ajuste:

$$K' = \frac{ET_p'}{\sum_1^n f}$$

De la Tabla D se obtiene el valor de un coeficiente global de cultivo (K_G) y se calcula el valor final de la evapotranspiración, con la siguiente expresión:

$$ET_p = ET_p' * (K_G / K')$$

En resumen, para aplicar el método de Blanney – Criddle, se requiere de datos climáticos como temperatura media mensual y porcentajes de hora luz para cada mes

(estos se obtienen de una tabla y están en función de la latitud de la zona de estudio). Se requiere además de los coeficientes de cultivo (K_c se obtienen de tablas), conocer la curva de desarrollo del cultivo. Se requiere finalmente un coeficiente global de cultivo (K_G se obtiene de una tabla).

Los *consumos hídricos* de los cultivos anuales se calcularon a partir de los coeficientes de cultivo (K_c) provistos por la Oficina de Riesgo Agropecuario (ORA - www.ora.gob.ar) y la evapotranspiración de Penman-Monteith extraída del Programa AgroAgua (Forte Lay 1996). De la página de ORA se seleccionaron los K_c para los cultivos trigo, girasol, maíz y soja, de la zona llamada “Trenque Lauquen” que involucra el Este de la provincia de La Pampa y Oeste de la provincia de Buenos Aires. Posteriormente se calculó un uso consuntivo por hectárea (como porcentaje estimado según la participación de cada uso de la tierra). El paso siguiente fue la representación gráfica para detectar tendencias en el uso de la tierra.

RESULTADOS Y DISCUSION

A los fines prácticos y para facilitar la presentación de los resultados, se utilizará el término cuenca “Este” para referirnos a la situada en la Planicie Medanosa y cuenca “Oeste” para la ubicada en la Planicie con Tosca.

1. Evolución del área inundada

En esta sección se presenta la información obtenida mediante el procesamiento de las imágenes Landsat para el período 1993-2017. Es necesario aclarar que en la zona de estudio durante la primavera del año 2012 ocurrieron precipitaciones elevadas que provocaron inundaciones en algunas localidades. Sin embargo, y como ya fue explicado en la sección *Materiales y Métodos* esta inundación no fue analizada debido a que las imágenes Landsat 7 de ese año disponibles en los servidores gratuitos presentan un problema de bandeado, que genera gaps o líneas de ausencia de información. Es así que la imagen se muestra a través de un bandedo de franjas o líneas paralelas entre sí.

Existen varias herramientas para corregir este defecto en las imágenes, entre ellos algunos geotools basados en algoritmos (ejemplo, *Landsat Toolbox – Fix Landsat 7 Scanline Error; Remote pixel*, entre otros). Sin embargo, algunos autores, entre ellos Rodríguez Ramos *et al.* (2009), argumentan que los métodos utilizados para la corrección de esas imágenes resultan poco efectivos, e imponen la necesidad de desarrollar un software específico utilizando el proceso de macheo de histogramas. Con el fin de que todas las superficies de agua calculadas en esta sección sean comparables entre sí a lo largo del período de estudio, es que se optó por descartar del análisis las imágenes Landsat de ese año.

Durante el período de estudio, existió una alternancia de años secos, años normales y años donde las precipitaciones superaron la media anual histórica. En la **Figura 17** se puede observar como a lo largo de esos años la superficie inundada calculada mediante el análisis de imágenes satelitales, acompañó dicha variación.

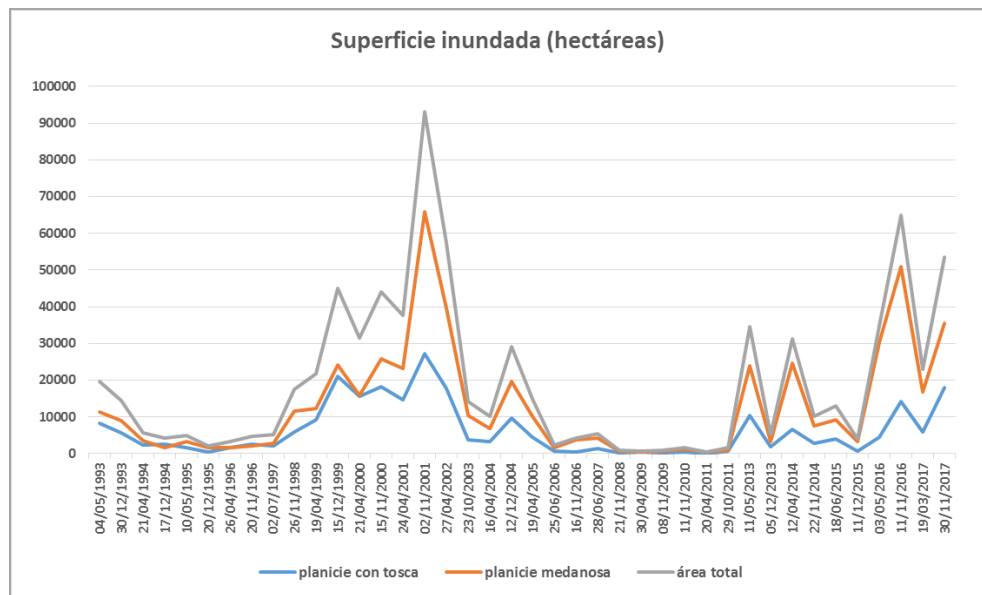


Figura 17. Superficie inundada (hectáreas) en el área de estudio. Se discrimina la superficie para la cuenca “Oeste” (color azul), para la cuenca “Este” (color naranja) y, la superficie inundada total (color gris).

La superficie inundada promedio para el área de estudio total (período 1993-2017), fue de 19.315 hectáreas (DE: ± 21.269 hectáreas), con un mínimo de 426 hectáreas (otoño del año 2011) y un máximo de 93.012 hectáreas (primavera del año 2001).

En el área de estudio total, entre mayo de 1993 y noviembre de 1998, la superficie inundada no superaba las 20.000 hectáreas, y a partir de abril de 1999 se incrementan notablemente las precipitaciones dando comienzo a los problemas en las zonas afectadas. Durante un lapso de 4 años (otoño del año 1999 hasta el otoño del año 2002), el área inundada presentó valores superiores a las 20.000 hectáreas con un pico de 93.012 hectáreas para la primavera del año 2001. Recién a partir de la primavera del año 2003 la superficie inundada comienza a disminuir presentando nuevamente valores menores a las 20.000 hectáreas para la región. Esta situación se mantiene hasta el otoño del año 2016 donde vuelve a superar los valores medios, escenario que se mantiene hasta finalizar el período de estudio en la primavera del año 2017. Hay que aclarar que entre estos dos períodos de superficies inundadas elevadas (otoño 1999 a otoño 2002 – otoño 2016 a primavera 2017), hubo algunos años aislados donde la superficie inundada también superó las 20.000 hectáreas (primavera del año 2004, otoño del año 2013 y otoño del año 2014), que pueden haber respondido a lluvias intensas bien localizadas con suelos relativamente secos y no, a un fenómeno de inundación regional.

La cuenca “Oeste” tuvo un valor promedio de superficie inundada para todo el período de 6.278 hectáreas (DE: ± 6.885 hectáreas), la mínima superficie fue de 30

hectáreas (otoño del año 2011) y la máxima superficie inundada fue de 27.132 hectáreas (primavera del año 2001). Por su parte la cuenca “Este” presentó una superficie inundada promedio de 13.036 hectáreas (DE: ± 14.991 hectáreas), con un valor mínimo de 366 hectáreas (otoño del año 2009) y un valor máximo de 65.879 hectáreas (primavera del año 2001).

Discriminando la superficie inundada en ambas épocas del año, en la estación primaveral se inundó una superficie mayor (para ambas cuencas) que en la otoñal: para la cuenca “Oeste” fueron alrededor de 22.000 has más en primavera que en otoño, para la cuenca “Este” 37.000 has más y para el área total de estudio fueron aproximadamente 59.000 has más.

Sin embargo, el área inundada presentada en unidades de superficie (hectáreas) puede no estar evidenciando la problemática que la inundación tuvo en cada cuenca en particular. Es por ello, que en la **Figura 18** se presenta la misma información, pero expresada en porcentaje con respecto al área involucrada en cada caso (cuenca “Oeste”: 144.467 has. – cuenca “Este”: 412.232 has. – área de estudio total: 556.700 has.). Aquí se puede diferenciar algo que en la Figura anterior no era posible, la superficie inundada en la cuenca “Oeste” en casi todos los casos fue superior a la de las otras dos zonas de estudio. Esta situación es muy evidente en el período de inundación 1999-2002. Sin embargo, en la inundación 2016-2017 la cuenca “Este” resulta la más afectada, aunque los valores de superficie inundada son más similares entre cuencas que en el período de inundación anterior. Estos resultados estarían planteando un comportamiento distinto en ambos períodos y en ambas cuencas, situación que se buscará explicar más adelante.

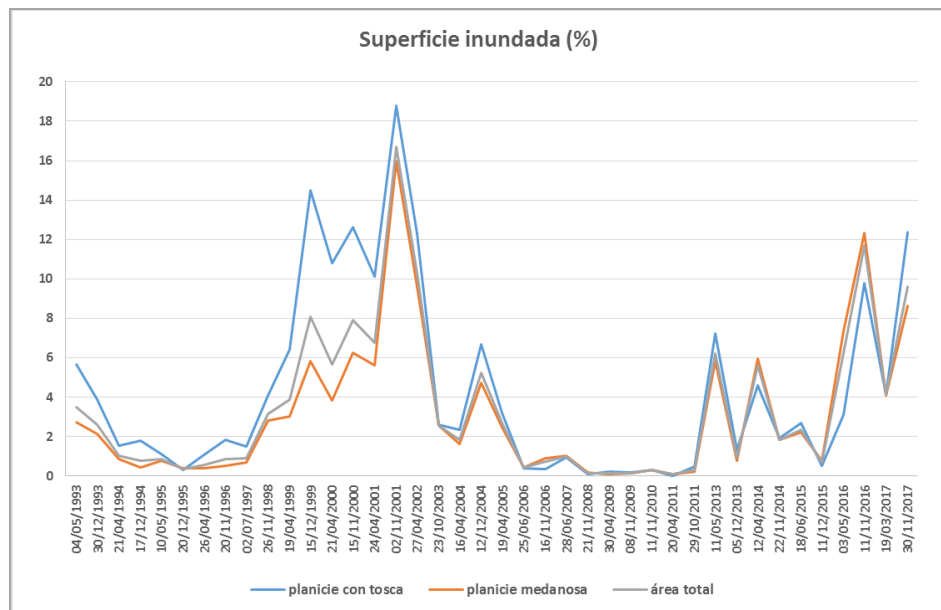


Figura 18. Superficie inundada (en % de la superficie total de cada cuenca), período 1993-2017. Se discrimina la superficie para la cuenca “Oeste” (color azul), la cuenca “Este” (color naranja), y la superficie para toda el área de estudio (color gris).

Para el área total estudiada, el promedio de superficie afectada para todo el período fue de 3,47% (DE: \pm 3,82%), con un mínimo de 0,08% (otoño del año 2011) y un máximo de 16,71% (primavera del año 2001). Para la cuenca “Oeste” el promedio de superficie afectada fue de 4,35% (DE: \pm 4,77%), con un mínimo de 0,02% (otoño del año 2011) y un máximo de 18,78% (primavera del año 2001). Por su parte la cuenca “Este” presentó una superficie afectada promedio de 3,16% (DE: \pm 3,64%), con un valor mínimo de 0,09% (otoño del año 2009) y un valor máximo de 15,98% (primavera del año 2001). Para el primer período de inundación (1999-2002), la cuenca “Oeste” tuvo una superficie inundada promedio de 12,22%, mientras que en la cuenca “Este” dicho valor fue de 7,17%, y en el área total alcanzó un valor de 10,30%. Para el segundo período de inundación (2016-2017), la cuenca “Oeste” tuvo una superficie inundada promedio de 7,35%, la cuenca “Este” de 8,11% y, el área total de 7,91%.

Casagrande y Roberto (2000), también analizaron mediante el procesamiento de imágenes satelitales, la superficie inundada del NE de la provincia de La Pampa (1999-2000). Concluyeron que la subregión “Planicie con Tosca” había sido la más afectada, tal como se observa en la Figura 19 del presente estudio. Resultados similares fueron hallados por Martínez Uncal (2015), para un área de estudio de mayor detalle en el NE de la provincia.

En la **Figura 19** se muestran las fechas con máxima y mínima superficie inundada para el área de estudio completa. La máxima superficie alcanzó las 93.012 has el 02/11/2001, mientras que la mínima superficie de 426 has ocurrió el 20/04/2011. En este último caso, si se considera la existencia de algunas lagunas permanentes en el área de estudio, se puede asumir que la superficie inundada fue cercana a cero. En el **Apéndice A** se presenta el detalle de las superficies inundadas para cada fecha de imagen satelital, expresadas en superficie (hectáreas) y en porcentaje de superficie (%).

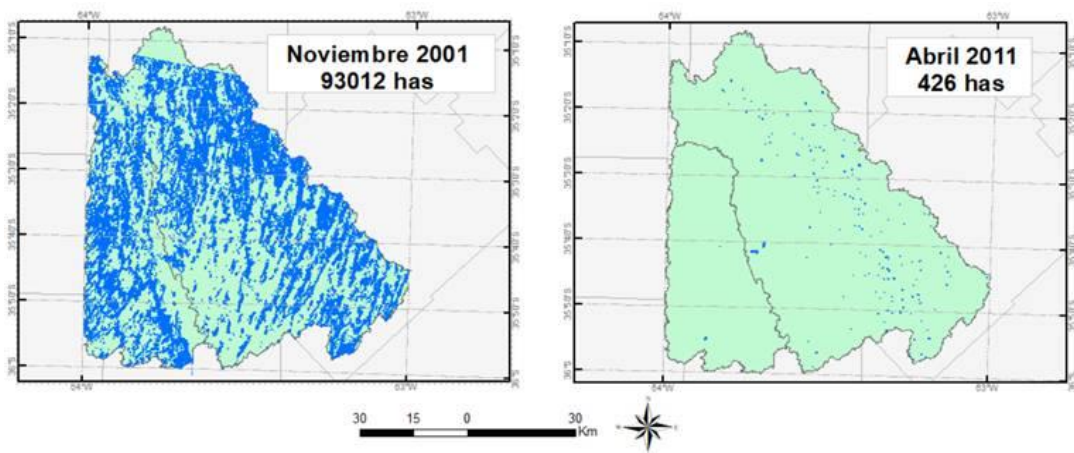


Figura 19. Izquierda: máxima superficie inundada para el área total de estudio (02/11/2001 - 93.012 has). Derecha: mínima superficie inundada (20/04/2011 - 426 has).

Teniendo los shapes o capas de superficie inundada para cada fecha de imagen satelital, fue posible calcular la diferencia entre fechas, es decir: (*fecha anterior* (-) *fecha posterior*). Un resultado positivo, indica que la superficie inundada disminuyó, mientras que si este resultado es negativo, la superficie inundada se incrementó. La mayor crecida para ambas cuencas se dio entre el 24/04/2001 y el 02/11/2001 (193 días). Para la cuenca “Oeste”: 12.540 has - 8,68 % y, para la cuenca “Este”: 42.710 has - 10,36 %. Por el contrario, la máxima recuperación (es decir, decrecimiento de la superficie inundada), se dio entre el 27/04/2002 y 23/10/2003 (545 días) para la cuenca “Oeste” (13.988 has - 9,68 %) y, entre el 11/11/2016 y 19/03/2017 (130 días) para la cuenca “Este” (33.961 has - 8,24 %). Para visualizar estos resultados, en la **Figura 20** se observa la diferencia de superficie inundada entre el 24/04/2001 y 02/11/2001. El color azul indica una disminución del área inundada, el rojo incremento y el blanco que se mantuvo constante entre ambas fechas. En el **Apéndice B** se presentan las capas de todas las diferencias de área inundada entre fechas.

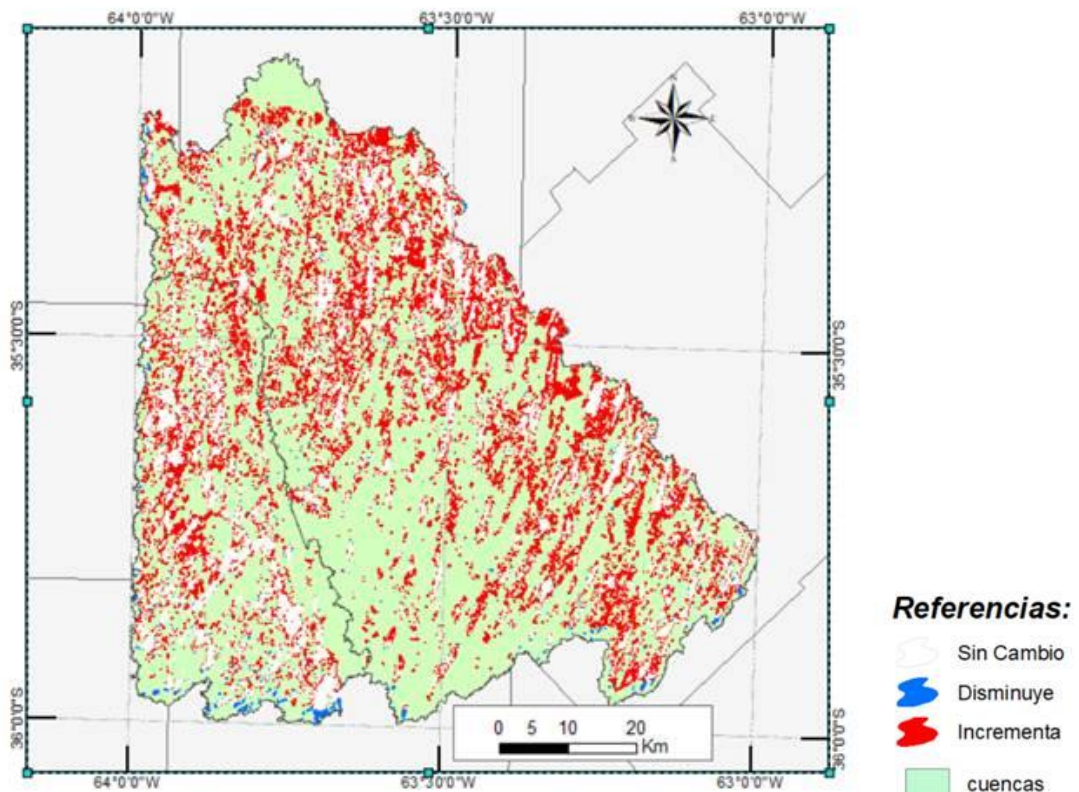


Figura 20. Diferencia de superficie inundada entre el día 24/04/2001 y el 02/11/2001 (193 días). El color azul indica disminución del área inundada, el rojo incremento y el blanco que se mantuvo constante entre ambas fechas.

Promediando los datos de crecidas y recuperaciones para todas las fechas analizadas, éstos fueron mayores para la cuenca “Este” (crecida: 9.798 has y recuperación: 10.084 has) que para la cuenca “Oeste” (crecida: 4.503 has y recuperación: 3.794 has). Si a estos datos los transformamos en tasas dividiendo por el total de días estudiados desde la primera a la última fecha (8.977 días), las tasas de crecida y recuperación resultan similares para cada cuenca. Sin embargo, las tasas de la cuenca “Este” (crecida diaria: $1,1 \text{ ha/día}$ y recuperación diaria: $1,1 \text{ ha/día}$), duplican a las de la cuenca “Oeste” (crecida diaria: $0,5 \text{ ha/día}$ y recuperación diaria: $0,4 \text{ ha/día}$). Es decir, si bien los suelos de la cuenca “Este” se inundan más rápido, el hecho de que no existan impedimentos físicos para el drenaje (tosca) y, en los casos que si existe, ésta se encuentra a profundidades que no impiden la circulación del agua, determina que la recuperación también sea más rápida. Es decir, al agua no se le presentan mayores inconvenientes tanto para ascender como para descender y drenar en el perfil, como para ascender por capilaridad y luego evaporarse. Al menos dos son los factores que pueden explicar la diferencia de permanencia del agua en la superficie

del suelo, entre las cuencas “Este” y “Oeste”: 1) la diferencia textural y, 2) la profundidad de la tosca (Porta *et al.* 1999).

En cuanto a la *textura*, el origen de estos suelos fue producto de la deposición de sedimentos eólicos provenientes de la zona cordillerana, que cubrió parte de la provincia de La Pampa y provincias limítrofes. Estos sedimentos compuestos fundamentalmente por loess y arenas finas, dieron la identidad a la textura de los suelos actuales (INTA *et al.* 1980). Si bien las texturas actuales de ambos ambientes son similares (franca arenosa fina), la Planicie Medanosa Ondulada cuenta con acumulaciones arenosas que, en muchos casos, forman verdaderos médanos en los cuales la infiltración es muy rápida. El uso intensivo de los suelos sin mayores precauciones para su cuidado, han determinado que se produjeran “voladuras” que, eliminando las partículas más finas han modificado la clase textural (por ejemplo, de franca arenosa a arenosa franca). Dicha textura no ofrece ningún impedimento para la infiltración del agua a través del perfil del suelo, excepto cuando existen duripanes u horizontes endurecidos, que determinan un retardo en la penetración del agua en el suelo.

En lo que respecta a la presencia de *tosca*, en la Planicie Medanosa Ondulada se encuentra a profundidades que oscilan entre 2/3 m hasta los 6 m de profundidad. A dichas profundidades, la presencia de tosca no afecta la infiltración, ya que el agua puede movilizarse sin ningún impedimento hasta dichos niveles. Por el contrario en la Planicie con Tosca, la existencia de un nivel calcáreo muy cercano a la superficie (en muchos casos, a menos de 50 cm), impide o restringe el movimiento del agua a través del perfil, formando una “falsa freática”. La capa de tosca es una seria limitante en la exploración radicular y la recarga de acuíferos. Aun cuando estos suelos sean fértiles y muy productivos, la presencia de tosca condiciona seriamente la productividad.

A una escala de más detalle, Roberto y Casagrande (2002), determinaron mediante el procesamiento de imágenes satelitales Landsat, que la superficie inundada del departamento Maracó aumentó un 22,43% entre noviembre de 1998 a noviembre de 2001 (de 5.598 a 61.265 has).

Ahora bien, otro dato interesante que podemos obtener, es la máxima superficie inundada del período, cálculo que se realiza mediante el comando *unión* del *gvSIG* (se unen los shapes de área inundada de todas las fechas). En la **Figura 21** se presenta el resultado. La máxima superficie inundada (por superposición) para el área total fue de 150.770 has (27,08%), para la cuenca “Este” fue de 110.576 has (26,82%) y, para

la cuenca "Oeste" fue de 40.194 has (27,82%). Es decir, en todos los casos la máxima superficie inundada presentó valores de alrededor del 27%, independientemente de la cuenca analizada.

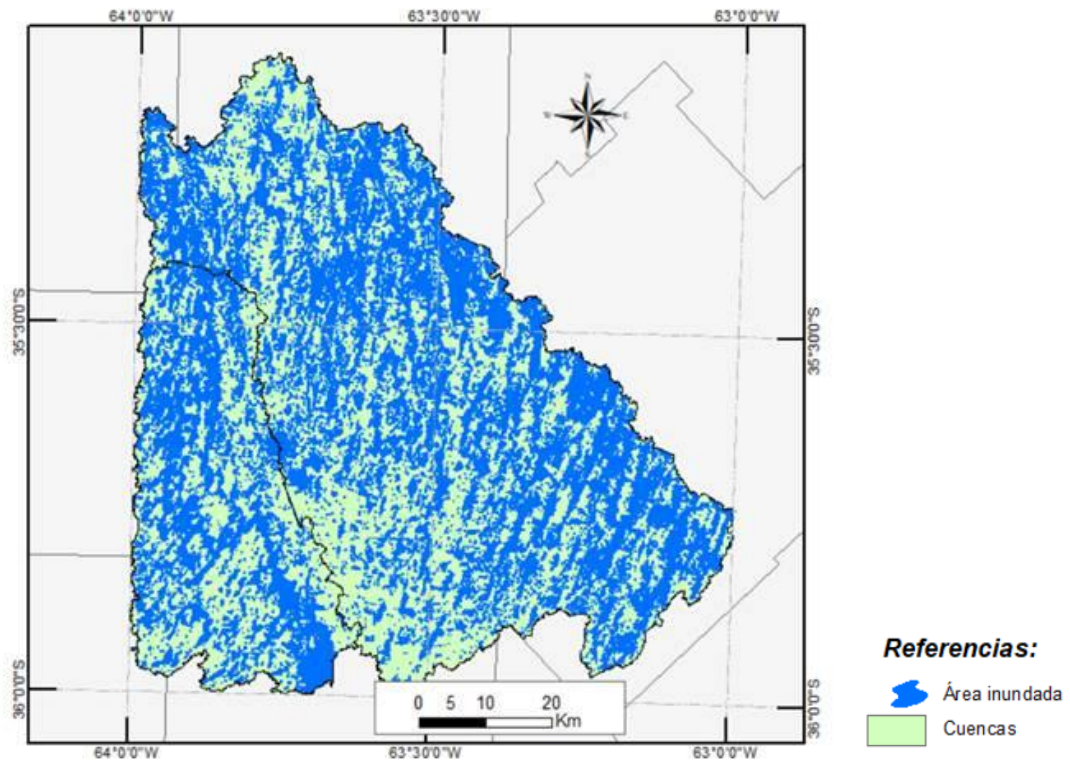


Figura 21. Máxima área inundada para todo el período de estudio (1993-2017).

Mapa de riesgo de inundación (frecuencia)

Con la información obtenida en el punto anterior, se procedió a elaborar un mapa de riesgo de inundación, para identificar la frecuencia a nivel de lote catastral. El departamento Maracó pertenece a la Sección I, Fracción C, y abarca 25 lotes de una superficie aproximada de 10.000 has cada uno. El máximo número de veces fue 38 porque esta es la cantidad de fechas de imágenes satelitales analizadas. En la **Figura 22** se muestra con una gama de tonos azules, el mapa resultante (a medida que el color es más intenso, mayor es la frecuencia de inundación).

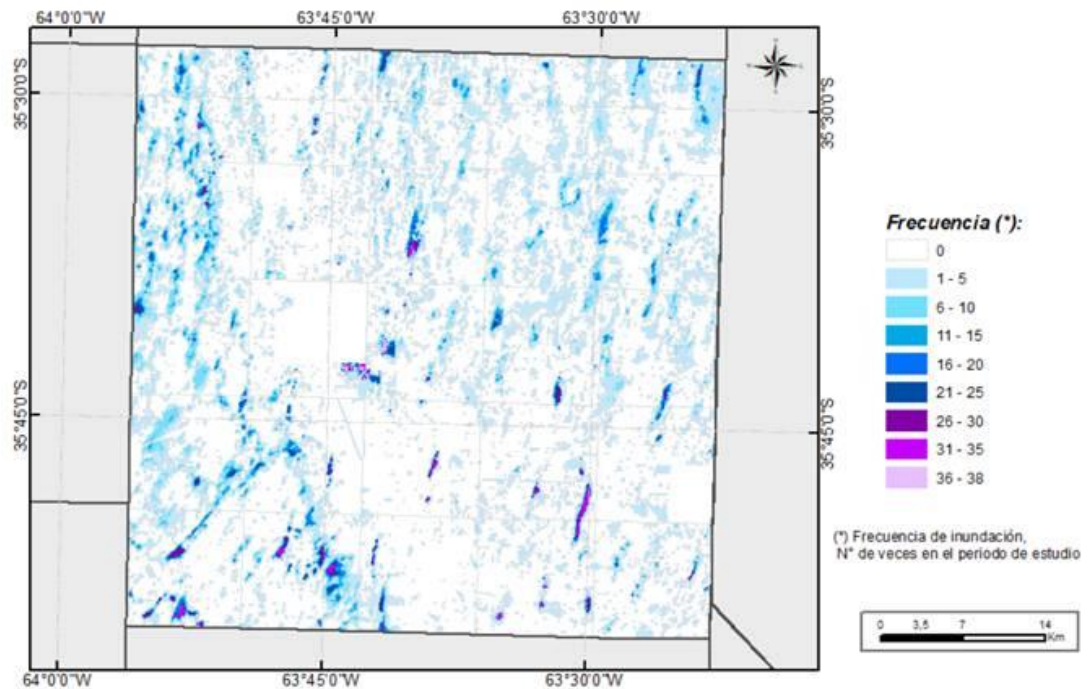


Figura 22. Frecuencia de inundación (n° de veces) del departamento Maracó, período 1993-2017. Nótese que se no se tuvieron en cuenta las superficies ocupadas por zona urbana.

Por su parte la **Tabla 5** muestra, la superficie de cada lote que se inundó al menos una vez durante el período de estudio (1993-2017). Nótese que el lote más afectado fue el 1.310 (3.618 has), mientras que el menos afectado fue el lote 1.318 (663 has). En general, los lotes más afectados correspondieron a la cuenca “Oeste”.

Tabla 5. Superficie de cada lote que se inundó al menos una vez durante el período de estudio (1993-2017).

LOTE	superficie inundada al menos una vez
1301	3392,34
1302	1499,69
1303	2927,00
1304	2490,42
1305	3549,79
1306	2462,52
1307	3110,90
1308	2282,13
1309	1126,43
1310	3617,60
1311	3206,54
1312	786,82
1313	2217,61
1314	2483,64
1315	2598,50
1316	1226,82
1317	1555,84
1318	622,86
1319	2092,72
1320	3294,71
1321	2229,05
1322	3044,03
1323	1146,58
1324	1393,97
1325	1630,40

En la **Figura 23** se presenta la superficie de cada lote que sufrió inundación al menos una vez durante todo el período de estudio. En el *eje x* se encuentra el código del lote (ordenados de menor a mayor superficie inundada), y en el *eje y* la superficie en hectáreas. De los 25 lotes que conforman el departamento Maracó, el 28% (7 lotes) presentó una superficie inundada inferior a las 1.500 has, al menos una vez en todo el período. El 44% (11 lotes) tuvo superficies inundadas entre 1500-3000 has y, el 28% restante (7 lotes), presentó superficies inundadas mayores a 3.000 has.

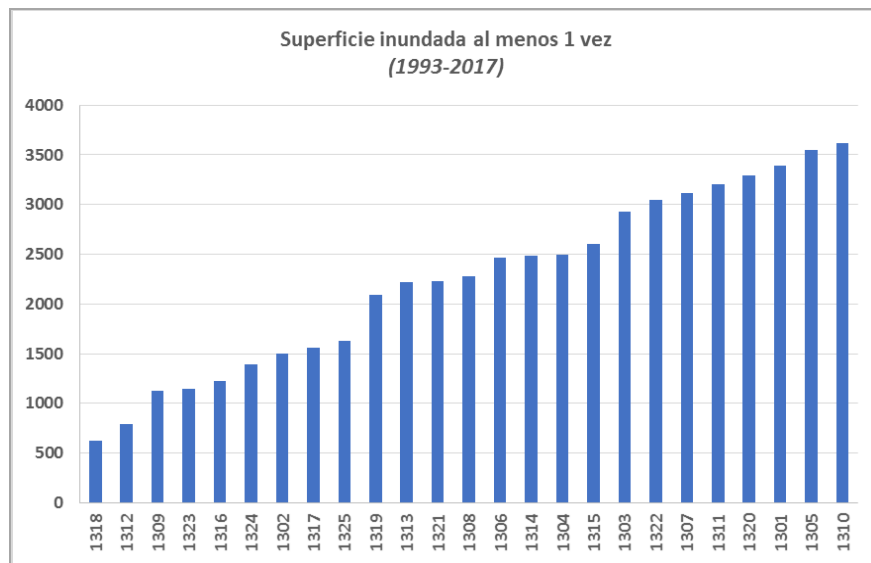


Figura 23. Superficie inundada al menos una vez durante el período 1993-2017 (en hectáreas), en orden creciente de afectación, por código de lote catastral.

En la provincia de La Pampa, el fraccionamiento de los predios catastrales rurales se rige por la ley N° 468 “*Fijando Normas para el Fraccionamiento de Predios Rurales*”, y sus decretos reglamentarios 2261/75, 2280/84 y 3317/84. Según la misma, el fraccionamiento deberá responder a las normas de la Unidad Económica Agraria, entendiéndose por tal: “*el predio que por su superficie, calidad de la tierra, ubicación, mejoras y demás condiciones de producción, racionalmente trabajado por una familia agraria tipo, que aporte la mayor parte del trabajo y desarrolle las actividades corrientes de la zona, le permita alcanzar un nivel de vida digno y evolucionar favorablemente*” (es necesario aclarar que un productor puede tener más de un título catastral o incluso, la mitad de uno). Posteriormente, mediante la ley N° 982 se revisaron dichas dimensiones. Es así que para el departamento Maracó se fijó una magnitud base superficial para la unidad económica agraria de 250 hectáreas sin desperdicios.

Teniendo en cuenta esto, el departamento Maracó está representado por 917 títulos catastrales rurales (TCR) (**Figura 24**), de los cuales el 31,3 % (287) se encuentra por encima de la unidad económica establecida por la ley, y el 68,7 % restante (630) por debajo. Esto implica que una reducción pequeña del área productiva, debido por ejemplo a una inundación, se traduzca en una situación económica desfavorable para el grupo familiar. Es por ello, que se consideró importante superponer los TCR a la máxima área inundada, para tener una noción de la máxima superficie afectada por título en todo el período.

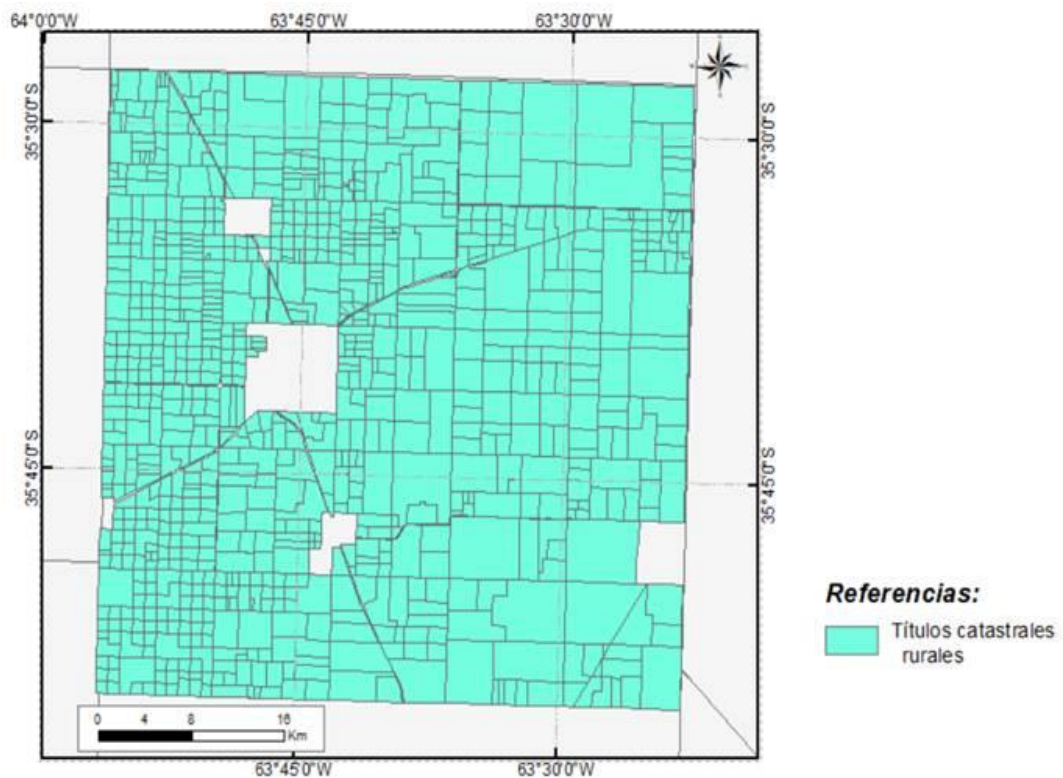


Figura 24. Títulos catastrales rurales (TCR) del departamento Maracó. Los sitios sin división (color blanco), corresponden a la zona de influencia del área urbana.

Aproximadamente el 2,73 % de los TCR (25) nunca presentó zona inundada alguna, mientras que el 97,27 % restante sí vio afectada su producción, en algún momento del período estudiado. Posteriormente, se clasificaron los TCR en 5 categorías, según el grado de afectación: a) < 20,0 %, b) 20,1 a 40,0 %, c) 40,1 a 60,0 %, d) 60,1 a 80,0 % y, e) > 80,0 %. Así fue posible analizar la magnitud del evento (**Figura 25**). La caracterización de los TCR según el área afectada, presentó los siguientes resultados:

- 1) 452 TCR (49,29 %), con un área afectada máxima < 20 %
- 2) 264 TCR (28,79 %), con un área afectada máxima entre 20,1 y 40,0 %
- 3) 113 TCR (12,32 %), con un área afectada máxima entre 40,1 y 60,0 %
- 4) 45 TCR (4,91 %), con un área afectada máxima entre 60,1 y 80,0 %
- 5) 18 TCR (1,96 %), con un área afectada máxima > 80 %

Más allá de la superficie afectada, una mirada a las distintas tonalidades de la Figura 27, nos indica que en general, la cuenca “Oeste” es la que más severamente afectados tuvo sus TCR (mayor cantidad de zonas con tonos naranja, rojo y violeta).

Sin embargo, hay que tener en cuenta que los TCR del sector “Oeste” del departamento son, en términos generales, de menor superficie que los de la zona “Este” del mismo.

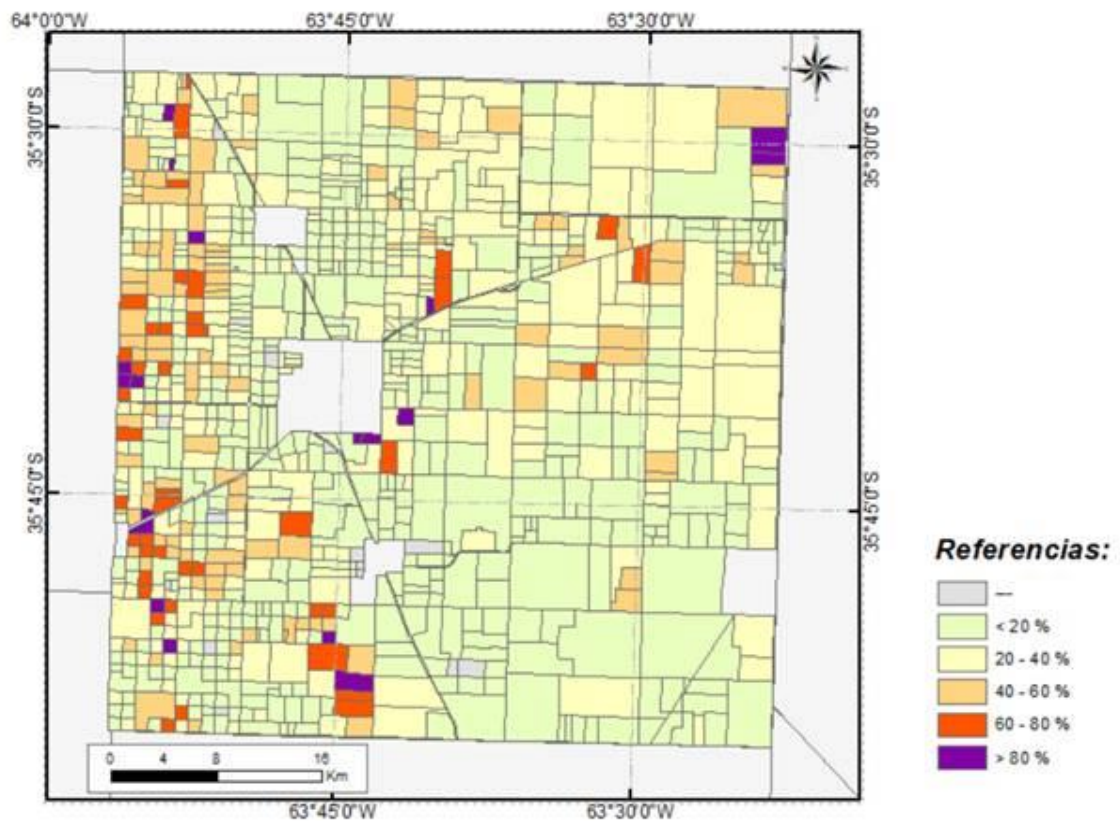


Figura 25. Títulos catastrales rurales (TCR) del departamento Maracó según el grado de afectación (%). El área en tonalidad blanca representa el área de influencia de la zona urbana.

En la provincia, la ley N° 1785 “Emergencia Agropecuaria” en su artículo 2 declara: *“El Poder Ejecutivo Provincial podrá declarar por un tiempo determinado en estado de Emergencia Agropecuaria a una región delimitada catastralmente, cuando por factores de origen climático, meteorológico, telúrico, físico o biológico no previsibles o inevitables e inimputables al productor, resulte afectada la producción o la capacidad productiva de las parcelas agropecuarias de dicha región, en por lo menos un cincuenta por ciento (50%).”* Mientras que el artículo 3 de dicha ley establece: *“Cuando la producción o la capacidad productiva afectada por las causales mencionadas en el artículo anterior superara el ochenta por ciento (80%), la autoridad de aplicación declarará a la región en Estado de Desastre Agropecuario por tiempo determinado”.* En el primer caso el beneficio al propietario (artículo 9) consiste en una prórroga de 150 días para el pago del impuesto inmobiliario rural, mientras que, en el segundo

caso, la prórroga se extiende a 240 días. Además, los propietarios afectados pueden acceder a créditos especiales y otro tipo de asistencia.

Teniendo en cuenta lo anterior, se realizó una caracterización con dichos límites porcentuales para determinar cuántos TCR presentaron alguna de esas dos situaciones, en el período estudiado. El 10,25% de los títulos (94), estuvieron alguna vez en situación de *emergencia agropecuaria*, mientras que 18 títulos (1,96%), se encontraron en situación de *desastre agropecuario*, alguna vez durante el período 1993-2017. Esto no es un dato menor si tenemos en cuenta que aproximadamente el 70% de los TCR del departamento se encuentran por debajo de la unidad económica.

2. Análisis de las precipitaciones

Para el análisis de las precipitaciones de la zona de estudio, se diferenciaron las localidades ubicadas dentro de la cuenca “Oeste” de aquellas presentes en la cuenca “Este”. Se creó un buffer de 30 km, y aquellas localidades que estaban por fuera de ese buffer, no se tuvieron en cuenta en el análisis. Esto tiene que ver con la distancia a partir de la cual la estación meteorológica ya no tiene influencia sobre el dato registrado. Por lo tanto las localidades de Dorila, General Pico, Metileo y Speluzzi, se agruparon como cuenca “Oeste” y, Agustoni, Ceballos, Intendente Alvear, Ojeda, Trebolares y Vertiz, por su parte, se agruparon como cuenca “Este”. La **Figura 26** presenta las precipitaciones anuales de las localidades de la cuenca “Oeste”, la cuenca “Este” y el área de estudio total (1993-2017). Una primera observación del gráfico diferencia dos situaciones: en el período de inundación 1999-2002 la cuenca “Este” es la que presentó los mayores valores de precipitación, mientras que en el período 2016-2017, las lluvias de la cuenca “Oeste” fueron mayores (situación contraria a la que siguió la superficie inundada, expresada en %). La cuenca “Este” presentó valores anuales de precipitación mayores que la cuenca “Oeste” hasta aproximadamente el año 2008, donde se invierte la situación.

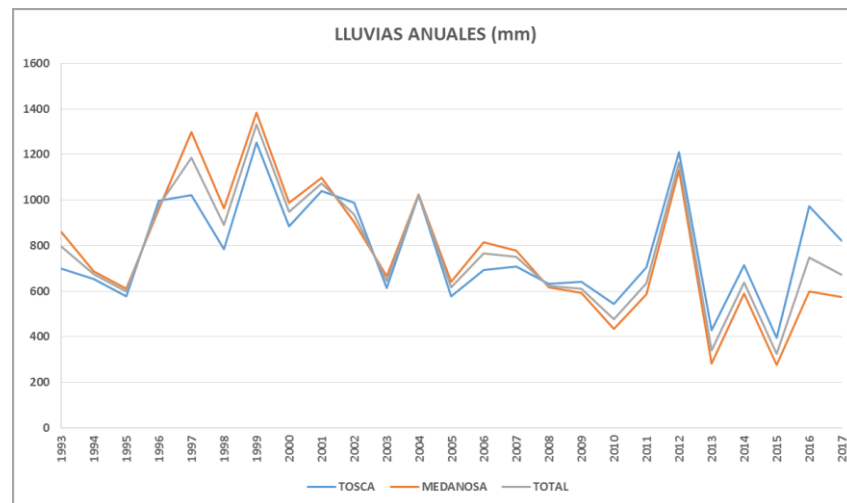


Figura 26. Precipitaciones anuales (mm) para las localidades de la cuenca “Oeste” (color azul), cuenca “Este” (color naranja) y la cuenca total (color gris). Período 1993-2017.

La cuenca total presentó un valor promedio de 778,1 mm (DE: $\pm 254,6$ mm), con un mínimo de 324,8 mm (año 2015) y un máximo de 1332,8 mm (año 1999). Para la cuenca “Oeste” el valor promedio anual fue de 783,3 mm (DE: $\pm 228,8$ mm), con un mínimo de 395,4 mm (año 2015) y un máximo de 1254,2 mm (año 1999). Por último, la cuenca “Este” presentó un valor promedio anual de 774,6 mm (DE: $\pm 285,1$ mm), con un mínimo de 277,7 mm (año 2015) y un máximo de 1385,2 mm (año 1999).

Para un estudio más detallado de las precipitaciones se seleccionó la localidad de General Pico. La **Figura 27** muestra las lluvias mensuales para el período 1990-2003, mientras que la **Figura 28** para el período 2004-2017. Para el primer período el promedio fue de 74,06 mm (DE: 69,38 mm), con un valor máximo de 382,5 mm (marzo del año 2001). Por su parte el promedio del segundo período fue de 71,06 mm (DE: 68,34 mm), con un valor máximo de 357,0 mm (enero del año 2011). Hubo 10 meses con valores mayores a 200 mm para el primer período: marzo 1990, diciembre 1991, marzo 1992, diciembre 1992, diciembre 1996, diciembre 1997, marzo 1999, enero 2000, marzo 2001 y marzo 2002. Mientras que para el segundo período fueron 8 los meses con lluvias superiores a los 200 mm: diciembre 2004, febrero 2008, enero 2011, febrero 2012, octubre 2012, abril 2014, octubre 2016 y abril 2017.

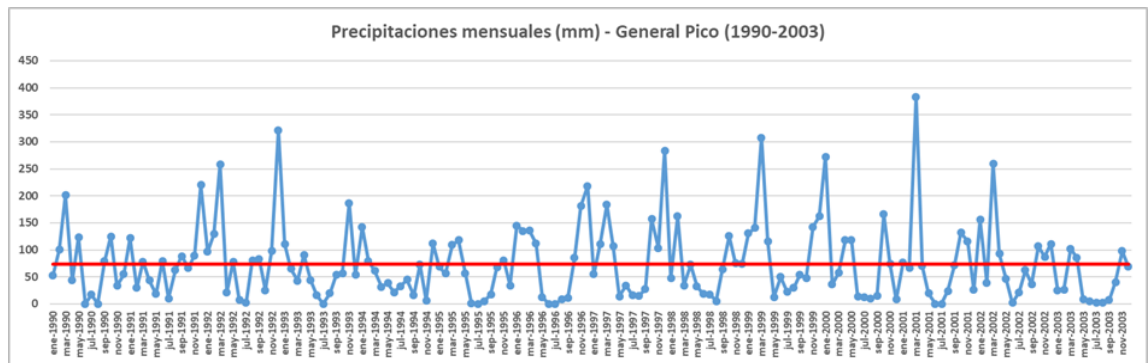


Figura 27. Precipitaciones mensuales (mm) para la localidad de General Pico, período 1990-2003. La línea roja indica la precipitación media histórica del período: 74,06 mm.

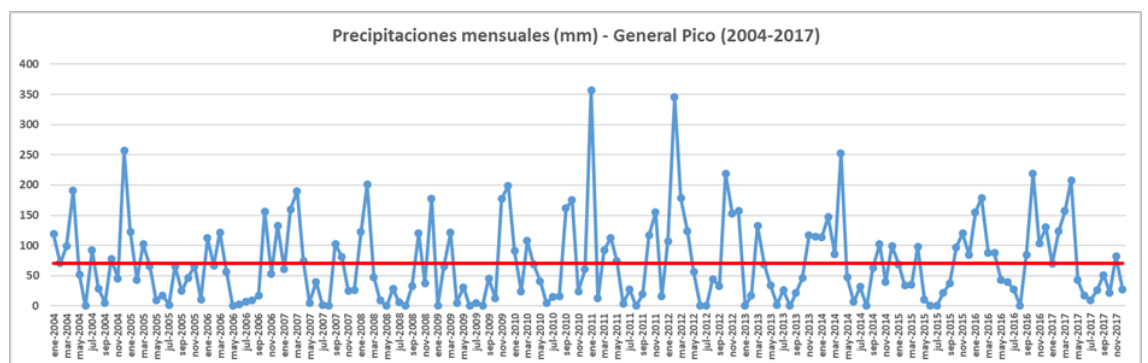


Figura 28. Precipitaciones mensuales (mm) para la localidad de General Pico, período 2004-2017. La línea roja indica la precipitación media histórica del período: 71,06 mm.

La **Figura 29** muestra la relación entre la lluvia caída 15, 30, 60 y 90 días antes de la fecha de la imagen satelital (*eje y*), y la superficie inundada (*eje x*). Los coeficientes de determinación fueron: 15 días ($r: 0,22$); 30 días ($r: 0,45$); 60 días ($r: 0,53$) y 90 días ($0,43$). Es decir, la línea de mejor ajuste corresponde a la lluvia acumulada de 60 días, explicando un poco más del 50% de la ocurrencia de inundaciones. Esto podría estar indicando que las precipitaciones presentan un retardo de alrededor de 2 meses para verse reflejadas en el terreno como área inundada, y así poder ser captadas por el sensor del satélite. Sin embargo, sería necesario profundizar el estudio para aseverar esta cuestión. En todos los casos las pendientes de las líneas de ajuste son positivas con valores menores a 0,003.

Martínez Uncal (2015) analizó un área del NE de La Pampa mucho más reducida que la de la presente tesis, y si bien encontró que la superficie inundada respondía a las lluvias acumuladas de 60 días antes de la fecha de la imagen satelital, también obtuvo el mismo ajuste para los 90 días.

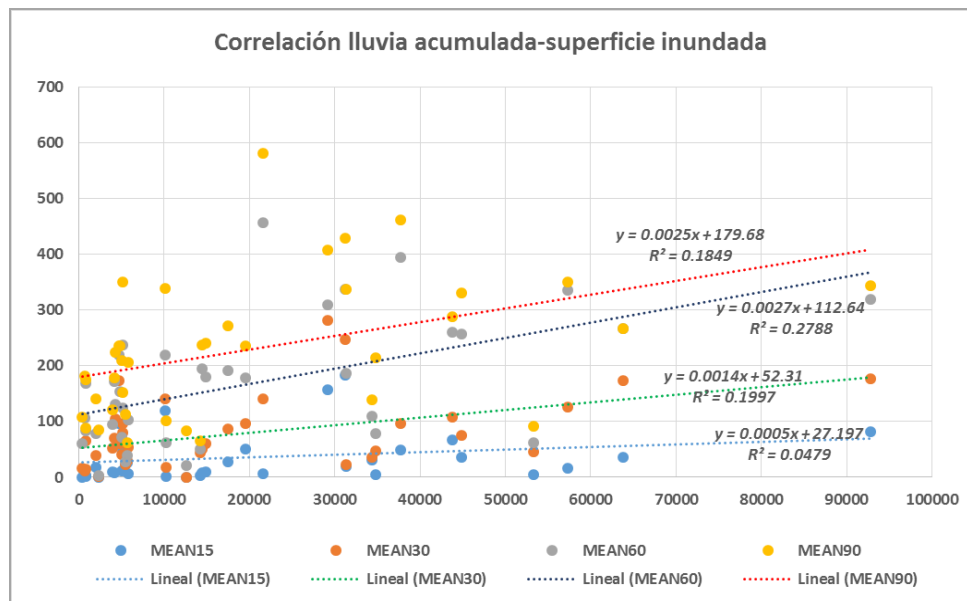


Figura 29. Correlación entre la lluvia acumulada 15, 30, 60 y 90 días antes de la fecha de la imagen satelital y, la superficie inundada de esa fecha. Se presentan las distintas regresiones lineales con su respectiva ecuación y valor de coeficiente de determinación R^2 .

El paso siguiente consistió en evaluar cuáles fueron estaciones normales, húmedas o secas para cada localidad. Al valor promedio anual histórico \pm un 20% se lo consideró *ciclo normal*, mayor al 20% fue considerado un *ciclo húmedo* y, un valor $<$ 20% se lo consideró *ciclo seco* (Vergara *et al.* 2005). En la **Tabla 6** vemos un resumen de esta información con la cantidad de estaciones normales, secas y húmedas para cada localidad para el total de los 25 años analizados.

Tabla 6. Detalle de la cantidad de otoños y primaveras neutras o normales, secas y húmedas para cada una de las localidades del área de estudio.

LOCALIDAD	OTOÑO			PRIMAVERA		
	Neutro	Seco	Húmedo	Neutro	Seco	Húmedo
Speluzzi	7	6	12	8	8	9
Dorila	9	6	10	6	7	12
Agustoni	4	10	11	4	8	13
Ceballos	5	7	13	7	9	9
Intendente Alvear	3	8	14	5	7	13
Vertiz	4	11	10	9	8	8
Ojeda	8	10	7	9	9	7
Metileo	8	8	9	10	9	6
Monte Nieves	5	18	2	8	9	8
Quemu Quemu	9	7	9	11	8	6
Villa Mirasol	3	13	9	2	11	12
Trebolares	5	9	11	5	8	12
General Pico	8	5	12	11	5	9

El análisis se enfoca en las estaciones húmedas debido a que lo que se intenta estudiar es el proceso de inundación. Para todas las localidades, la cantidad de otoños

húmedos varió entre 2 y 14 (8 y 56%). Para el caso de primaveras húmedas la cantidad oscila entre 6 y 13 (24 a 52%) dependiendo la localidad. Si promediamos todas las localidades, en los 25 años estudiados hubo un 40% de otoños húmedos y un 38% de primaveras húmedas. La localidad con mayor cantidad de otoños húmedos fue Intendente Alvear (14 = 56%), mientras que Agustoni e Intendente Alvear tuvieron la mayor cantidad de primaveras húmedas (13 = 52%). Por su parte Monte Nieves tuvo sólo 2 otoños húmedos en todo el período (8%), mientras que Metileo y Q.Quemú tuvieron ambas 6 primaveras húmedas (24%).

En esta sección es preciso aclarar que no sólo el dato de cantidad de milímetros precipitados es determinante para explicar el fenómeno de inundación, sino que también es importante involucrar la variable tiempo en el análisis (*intensidad de las lluvias*). Una seria limitante para la región es que no se cuentan con dichos datos, exceptuando algún dato puntual que pudiera aparecer en los diarios locales debido a la necesidad de evacuación de personas.

3. Cálculo de los excesos hídricos

Una de las formas de comprender el comportamiento climático de la zona de estudio es a través del denominado *balance hídrico seriado*. Para su elaboración, además de las precipitaciones diarias, se tiene en cuenta la *evapotranspiración potencial diaria* (ETP), que es el agua total que demanda la atmósfera. El volumen de agua está condicionado por la temperatura, el suelo y la vegetación, entre otras variables, por lo que los valores que finalmente “se entregan” a la atmósfera son en general menores o iguales a los requeridos (*evapotranspiración real diaria* - ETR). La diferencia entre ambos índices (ETP-ETR) determina un *déficit hídrico* (Forte Lay et al. 1996) que en el balance hidrológico climático de la zona de estudio se manifiesta en los meses estivales (diciembre, enero y febrero). En aquellos meses en que las precipitaciones superan los requerimientos atmosféricos se produce un efecto de *recarga hídrica* (primavera y otoño). Cuando las precipitaciones no alcanzan a cubrir la demanda de la ETP el sistema recurre al agua eventualmente almacenada, dando lugar al *consumo hídrico*.

Los suelos poseen una capacidad máxima de almacenar agua conocida como capacidad de campo, que varía según las características de los mismos. Superada esta capacidad se producen excesos, bien pueden perderse por infiltración profunda o

acumularse en superficie produciendo los efectos de anegamientos conocidos. Para la región estudiada, se estableció una capacidad de campo de 150 mm (Cristian Alvarez, comunicación personal).

En la presente tesis se calculó el balance hídrico diario seriado mediante el software "AgroAgua" (Forte Lay et al. 1996), lo que dio como resultado el exceso hídrico diario. Se ejecutó el programa para las 4 localidades del área de estudio que poseían datos de niveles freáticos históricos continuos (General Pico, Ceballos, Speluzzi y Dorila), durante el período 1963-2018. Tal como se explicó en la sección *Materiales y Métodos*, se corrió el balance seriado para un lapso de tiempo mayor (hacia atrás), ya que el software arranca con capacidad de campo para el 1° día de la serie y se estima que le demanda alrededor de 10 años estabilizarse.

La **Tabla 7** muestra un resumen de esta información. Para el período completo de análisis (1990-2017), todas las localidades presentaron valores de exceso total entre los 3.413-3.853 mm, con valores promedios anuales entre 148-168 mm. Los excesos mínimos anuales fueron entre 1-18 mm, mientras que los máximos anuales entre 471-614 mm. Por su parte el exceso promedio diario estuvo entre los 19 y 22 mm, mientras que el exceso máximo diario entre 111 y 129 mm. El número de días con excesos fue de entre 155 y 200 días para las 4 localidades. Hay que aclarar que si bien el período estudiado corresponde a 1993-2017, la Tabla muestra un período un poco más amplio para los excesos (comienza un par de años antes), para evaluar que venía ocurriendo con la humedad del suelo. Igual situación sucede en el caso del análisis de los datos de niveles freáticos.

Tabla 7. Análisis de excesos hídricos, en mm, para el período 1990-2017 (Dorila, General Pico, Speluzzi y Ceballos). Para cada localidad se presenta la sumatoria de excesos para todo el período, el número de días con excesos distinto de cero, y los siguientes valores: promedio anual, mínimo y máximo anual (con su respectivo año de ocurrencia), promedio diario y máximo diario (con fecha de ocurrencia).

1990-2017	DORILA	GRAL.PICO	SPELUZZI	CEBALLOS
Exceso total	3412,5	3852,9	3360,6	3539,6
Promedio anual	148,37	167,52	160,03	153,9
Mínimo anual	12,3 (1994)	2,0 (2005)	17,9 (2008)	1,1 (2011)
Máximo anual	485,2 (1999)	470,5 (2012)	512,8 (1992)	613,6 (1997)
Promedio diario	22,0	19,3	20,1	20,5
Máximo diario	127,8 (12/03/2012)	122,2 (16/01/2011)	111,2 (09/03/1990)	129,2 (14/12/1997)
N° de días con excesos	155	200	167	173

La **Tabla 8** por su parte presenta los excesos hídricos para cada mes, para las 4 localidades anteriores (período 1990-2017, es decir acumulado de 28 años). Se puede ver que la estación del año con mayores excesos fue el otoño (marzo y abril, con

valores entre 866 y 1.098 mm), mientras que la de menores excesos fue el invierno (junio a agosto, con valores entre 0 y 17 mm).

Tabla 8. Excesos hídricos totales para cada mes (para todo el período), para las 4 localidades estudiadas. En negritas: valores máximos y mínimos.

MES	DORILA	GRAL.PICO	SPELUZZI	CEBALLOS
ENE	11.8	188.9	92.0	186.9
FEB	255.3	453.5	225.8	186.3
MAR	887.0	1097.6	865.5	570.6
ABR	713.3	695.2	587.2	819.0
MAY	132.2	216.5	206.5	327.2
JUN	2.5	0.0	20.9	43.0
JUL	36.7	41.7	55.3	10.8
AGO	12.3	0.0	16.8	56.4
SEP	93.4	138.9	211.5	236.6
OCT	366.4	296.0	343.8	424.1
NOV	287.0	199.2	194.5	104.4
DIC	499.8	510.9	438.9	523.7

En las siguientes Figuras se presentan las precipitaciones diarias y los excesos hídricos diarios para las localidades de Dorila (**Figura 30a**), General Pico (**Figura 30b**), Speluzzi (**Figura 30c**) y Ceballos (**Figura 30d**).

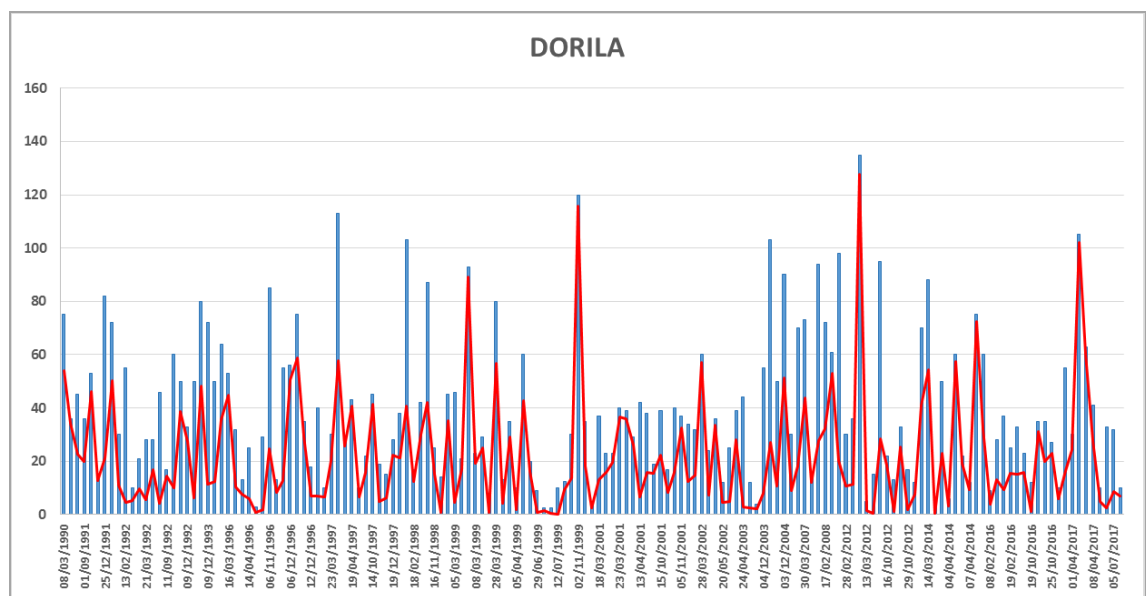


Figura 30a. Precipitaciones diarias (barra azul) y excesos hídricos diarios (línea roja), para la localidad de Dorila – período 1990-2017. Excesos mayores a 80 mm: 07/03/1999 (89.1 mm), 02/11/1999 (115.7 mm) 12/03/2012 (127.8 mm) y 02/04/2017 (102.2 mm).

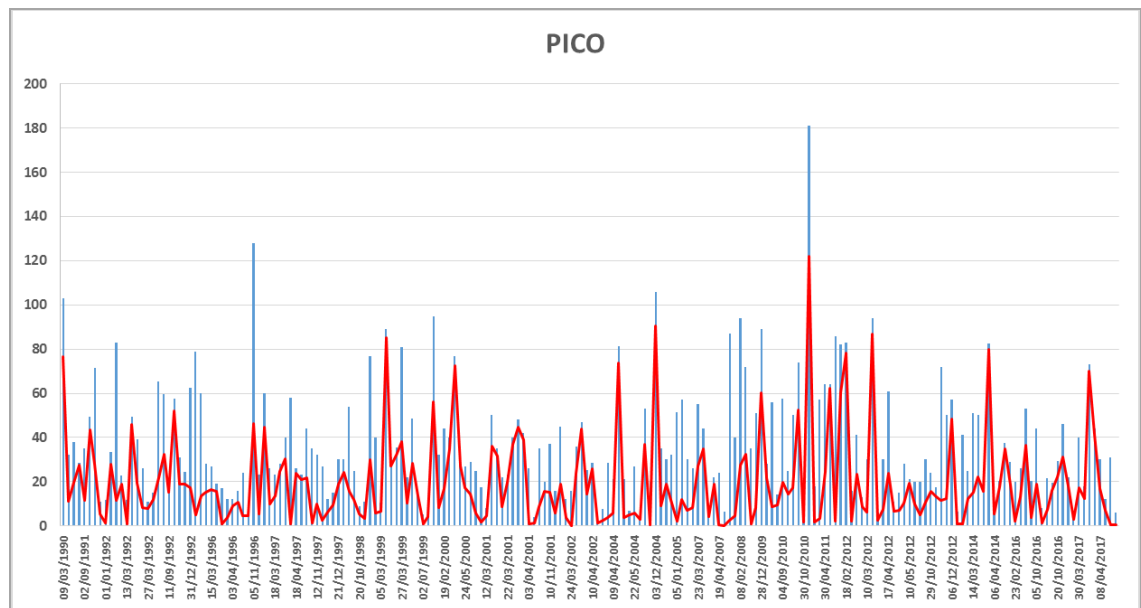


Figura 30b. Precipitaciones diarias (barra azul) y excesos hídricos diarios (línea roja), para la localidad de General Pico – período 1990-2017. Excesos mayores a 80 mm: 06/03/1999 (85.3 mm), 03/12/2004 (90.6 mm), 16/01/2011 (122.2 mm) y 12/03/2012 (86.8 mm).

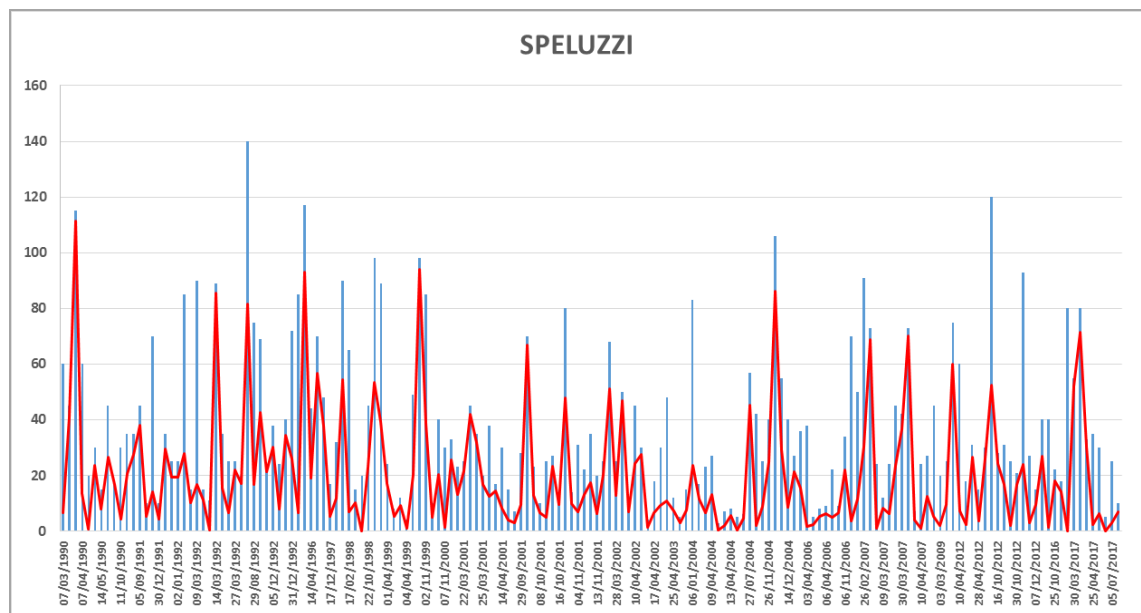


Figura 30c. Precipitaciones diarias (barra azul) y excesos hídricos diarios (línea roja), para la localidad de Speluzzi – período 1990-2017. Excesos mayores a 80 mm: 09/03/1990 (111.2 mm), 14/03/1992 (85.5 mm), 11/05/1992 (81.6 mm), 14/05/1995 (93.0 mm), 26/04/1999 (94.1 mm) y 03/12/2004 (86.1 mm).

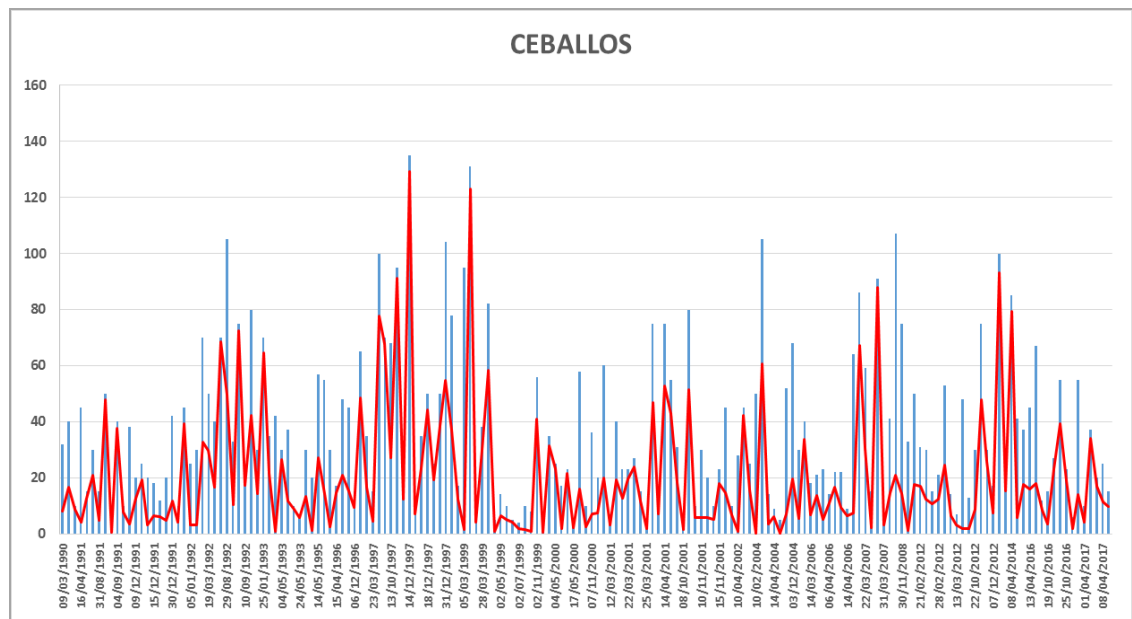


Figura 30d. Precipitaciones diarias (barra azul) y excesos hídricos diarios (línea roja), para la localidad de Ceballos – período 1990-2017. Excesos mayores a 80 mm: 14/10/1997 (91.3 mm), 14/12/1997 (129.2 mm), 07/03/1999 (122.9 mm), 30/03/2007 (87.9 mm) y 05/04/2014 (93.3 mm).

Para todo el período analizado (28 años) y cada una de las localidades, los excesos diarios fueron discriminados en las siguientes categorías:

- *entre 0-20 mm
- *entre 20-40 mm
- *entre 40-60 mm
- *entre 60-80 mm
- *entre 80-100 mm
- *mayor a 100 mm

Los resultados se presentan en la **Tabla 9**. La cantidad de días con excesos diarios distintos de cero para las cuatro localidades varió entre 155 y 200 días para todo el período. La categoría de excesos más representada fue de 0-20 mm (60,0-69,4%); luego la de 20-40 (19,0-23,4%); la de 40-60 (5,5-13,6%), la de 60-80 (1,3-4,6%), la de 80-100 (0,6-3,0%) y > 100 mm (0,5-1,9%).

Tabla 9. Número de excesos diarios para cada categoría y cada una de las 4 localidades analizadas.

EXCESOS	DORILA	G.PICO	SPELUZZI	CEBALLOS
0-20	93 (60,0%)	138 (69,0%)	105 (62,9%)	120 (69,4%)
20-40	35 (22,6%)	38 (19,0%)	39 (23,4%)	26 (15,0%)
40-60	21 (13,6%)	11 (5,5%)	13 (7,8%)	14 (8,1%)
60-80	2 (1,3%)	9 (4,5%)	4 (2,4%)	8 (4,6%)
80-100	1 (0,6%)	3 (1,5%)	5 (3,0%)	3 (1,7%)
> 100	3 (1,9%)	1 (0,5%)	1 (0,6%)	2 (1,2%)
TOTAL	155	200	167	173

La **Tabla 10** por su parte muestra los excesos diarios de las 4 localidades, pero donde al período total de 28 años se lo dividió en dos períodos iguales de 14 años cada uno. Nótese el distinto comportamiento de Dorila y General Pico (localidades más al Sur), comparado con las localidades del Norte (Speluzzi y Ceballos). En las localidades ubicadas hacia el norte de la cuenca, el segundo período (2004-2017) parece haber tenido valores más importantes de excesos diarios que el primero (1990-2003). Por el contrario, en las localidades ubicadas hacia el sur, la situación se invierte, y los excesos diarios del primer período parecen ser, en promedio más importantes.

Tabla 10. Estadística descriptiva de los excesos diarios de cada localidad para ambos períodos (1990-2003 y 2004-2017).

EXCESOS	1990-2003				2004-2017			
	Dorila	General Pico	Speluzzi	Ceballos	Dorila	General Pico	Speluzzi	Ceballos
<i>promedio</i>	21.0	18.7	22.2	21.5	24.2	19.9	17.1	18.4
<i>desvío estándar</i>	19.5	16.8	21.9	24.0	25.6	23.6	19.8	21.0
<i>mínimo</i>	0.3	0.1	0.2	0.4	0.5	0.2	0.1	0.3
<i>máximo</i>	115.7	85.3	111.2	129.2	127.8	122.2	86.1	93.3

4. Análisis de los niveles freáticos

En la provincia, la toma de datos de niveles freáticos es muy irregular y heterogénea, es decir hoy se registra un dato y el próximo puede registrarse al mes siguiente en algún año o, incluso varios meses después en el caso de otros años. Por ejemplo, el año 2003, carece de registros de profundidad de los niveles freáticos. Esto dificulta mucho el análisis del comportamiento de esta variable a través del tiempo, porque se desconoce qué sucedió entre la fecha de toma de un registro y el siguiente.

Es por ello, que en la presente tesis se realizaron muchas pruebas para evaluar cómo analizar estos datos: evaluar todos los registros de manera conjunta, separarlos por ubicación de los pozos, por altitud de boca de pozo, por estación del año, etc. A continuación, se presentan algunos ejemplos de los análisis realizados.

Si bien se cuenta con información histórica de profundidad del nivel freático (Subsecretaría de Recursos Hídricos-APA) para pozos de las localidades de General Pico, Ceballos, Speluzzi y Dorila, en el caso de la primera de ellas, ocurre una situación particular: existen pozos cuya ubicación sigue una orientación N-S (los pozos del N poseen una mayor altura que los ubicados al S), y pozos con una orientación E-O. Es por ello que se seleccionaron los 4 pozos de General Pico: uno ubicado al N (I-5: 138,7), otro al S (II-3: 136,6 m), uno al E (I-11: 126,9 m) y otro al O (I-1: 134,0 m).

La formación acuífera General Pico-Dorila, se encuentra en el Noreste de la provincia de La Pampa, formando cordones con orientación nor-noroeste al sur-suroeste de aproximadamente 10 km de ancho. Estos limitan al oeste con depresiones de carácter endorreico y al este se van insertando en el ambiente de llanura. El basamento no ha sido encontrado hasta el momento, solamente se atravesaron areniscas cuarzosas por debajo de arcilitas verdes y grises. Está delimitado por la Formación Laboulaye al Norte y la Formación Macachín al sur, por lo que se estima es un alto estructural entre ambas formaciones. Sobre estas formaciones se encuentran limos arenosos del pampeano, con una capa superficial de arenas eólicas suprayacente (Giai y Tulio 1998). Los cordones medanosos funcionan como área de recarga, en tanto que las depresiones cumplen la función de zonas de descarga pudiendo formar cuerpos de agua de carácter permanente o temporal. La zona de conducción se sitúa en medio de estas áreas y posee un relieve llano con pendiente suave hacia el este (Schulz y Castro 2005). El nivel freático en la gran mayoría de los casos se encuentra dentro de las arenas eólicas superiores (Giai y Tulio 1998). La variabilidad espacial de los niveles freáticos determina una dirección de escurrimiento hacia el sureste y el suroeste. Las actividades principales de la zona se relacionan al sector agrícola, por lo que el aprovechamiento y consumo de agua del suelo será característico y deberá ser tenido en cuenta al momento de planificar las actividades según se esté en situación de sequía o exceso.

En la **Figura 31** se presenta la profundidad media mensual de cada pozo para el período 1990-2017. La línea roja a 1,5 metros representa la zona de influencia de los niveles freáticos sobre las raíces de los cultivos. Una primera mirada revela que

aproximadamente en la primera mitad del período, las líneas están más juntas entre sí, pero a partir de cierto punto de quiebre estas parecieran separarse, indicando dos períodos distintos que podrían ser: 1990-2003 y 2004-2017. Tal situación es aún más evidente en los pozos I-5 y II-3 que son los ubicados a mayor altitud. A su vez estos pozos poseen niveles freáticos más profundos que los dos restantes localizados a menores altitudes del terreno.

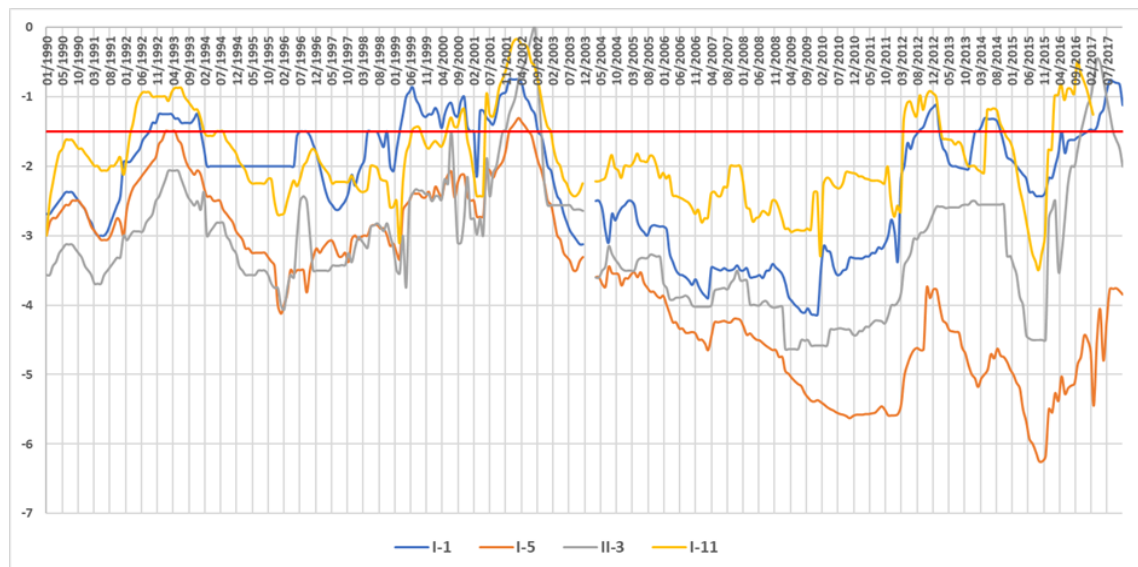


Figura 31. Profundidad media mensual de los niveles freáticos (m), donde la línea que marca el valor cero del eje y indica la superficie del terreno (período 1990-2017). La línea roja a 1,5 m indica la zona de influencia de las raíces.

Para el *pozo I-1* el valor promedio de todo el período fue de 2,23 m (DE: 0,88 m), con un mínimo de 0,75 m (ene-abr2002) y un máximo de 4,14 m (dic2009-ene2010). Para el período 1990-2003, el promedio fue de 1,83 m (DE: 0,60 m), con un mínimo de 0,75 m (ene-abr2002) y un máximo de 3,13 m (nov-dic2003). Para el período 2004-2017, el promedio fue de 2,63 m (DE: 0,93 m), con un mínimo de 0,76 m (ago2017) y un máximo de 4,14 m (dic2009-ene2010).

Por su parte el *pozo I-5* presentó un valor promedio para todo el período de 3,67 m (DE: 1,22 m), con un mínimo de 1,31 m (abr2002) y un máximo de 6,25 m (oct-nov2015). Para el período 1990-2003, el promedio fue de 2,65 m (DE: 0,61 m), con un mínimo de 1,31 m (abr2002) y un máximo de 4,13 m (feb1996). Para el período 2004-2017, el promedio fue de 4,71 m (DE: 0,69 m), con un mínimo de 3,45 m (ago2004) y un máximo de 6,25 m (oct-nov2015).

En el caso del *pozo II-3* el valor promedio de todo el período fue de 3,09 m (DE: 0,93 m), con un mínimo de 0,0 m (sep2002) y un máximo de 4,63 m (mar-jul2009).

Para el período 1990-2003, el promedio fue de 2,79 m (DE: 0,77 m), con un mínimo de 0,0 m (sep2002) y un máximo de 4,06 m (mar1996). Para el período 2004-2017, el promedio fue de 3,41 m (DE: 0,97 m), con un mínimo de 0,45 m (abr2017) y un máximo de 4,63 m (mar-jul2009).

Por último, para el pozo I-11 el valor promedio de todo el período fue de 1,89 m (DE: 0,64 m), con un mínimo de 0,18 m (mar-abr2002) y un máximo de 3,50 m (oct2015). Para el período 1990-2003, el promedio fue de 1,72 m (DE: 0,60 m), con un mínimo de 0,18 m (mar-abr2002) y un máximo de 3,11 m (mar1999). Para el período 2004-2017, el promedio fue de 2,07 m (DE: 0,64 m), con un mínimo de 0,50 m (oct2016) y un máximo de 3,50 m (oct2015).

En cuanto a la influencia del nivel freático sobre la zona radicular, la **Figura 32** muestra que dicha profundidad fue superada durante los siguientes años: 1992-1993 (I-1 e I-11), 1999-2002 (todos los pozos), 2012 y 2014 (I-1 e I-11), 2016-2017 (I-1, I-11 e II-3). Un dato llamativo es que en el primer período de inundación (1999-2002), todos los pozos superaron la profundidad de 1,5 m. Sin embargo, en la inundación de los años 2016-2017, el pozo I-5 (ubicado más al Norte), profundizó marcadamente su nivel.

Además de la profundidad del nivel freático, un dato que puede ser interesante es la variación del mismo (Δ profundidad). La **Figura 32** (a, b, c y d) muestra la variación de la profundidad del nivel freático para cada pozo, para el período 1990-2017. Como para realizar los cálculos los datos de profundidad se trabajaron en valores positivos, un Δ negativo indica una profundización del nivel freático, mientras que un Δ positivo implica, por el contrario, un ascenso del mismo.



Figura 32-a. Variación entre cada profundidad media mensual del nivel freático (Δ m) del pozo I-1. Período 1990-2017.



Figura 32-b. Variación entre cada profundidad media mensual del nivel freático (Δ m) del pozo I-5. Período 1990-2017.



Figura 32-c. Variación entre cada profundidad media mensual del nivel freático (Δ m) del pozo II-3. Período 1990-2017.



Figura 32-d. Variación entre cada profundidad media mensual del nivel freático (Δ m) del pozo I-11. Período 1990-2017.

Para el caso del *pozo I-1* (**Figura 32-a**), el mayor descenso (-0,65 m) se dio entre febrero y marzo del 2001, mientras que el mayor ascenso (1,19 m) fue entre febrero y marzo del 2012. Por su parte, el *pozo I-5* (**Figura 32-b**), tuvo su mayor descenso (-0,77 m) entre febrero y marzo del 2017, y su mayor ascenso (0,95 m) fue inmediatamente posterior (entre marzo y abril del mismo año). Para el caso del *pozo II-3* (**Figura 32-c**), el mayor descenso (-1,0 m) fue entre marzo y abril del 2016, y el mayor ascenso (1,75 m) entre diciembre del 2015 y enero del 2016. Por último, para el caso del *pozo I-11* (**Figura 32-d**), el mayor descenso (-0,92 m) fue entre enero y febrero del 2010, mientras que el mayor ascenso (1,45 m) fue entre mayo y junio del 2001.

La **Tabla 11** resume la información de *profundidades* y Δ *profundidades* de nivel freático para los cuatro pozos analizados. Se presentan los valores promedio, desvío estándar, valor mínimo y valor máximo, para el período completo (1990-2017), y para 1990-2003 y 2004-2017. Contrariamente a lo que se pensaba, en el segundo período los niveles freáticos, en promedio, se profundizaron en todos los pozos.

Tabla 11. Valores de promedio, desvío estándar, mínimo y máximo para los 4 pozos y los 3 períodos analizados (1990-2017, 1990-2003 y 2004-2017).

PERIODO	POZOS	<i>profundidad (m)</i>				<i>variación profundidad (m)</i>			
		I-1	I-5	II-3	I-11	I-1	I-5	II-3	I-11
1990-2017	<i>promedio</i>	2.23	3.67	3.09	1.89	0.00	0.00	0.00	0.01
	<i>desvío estándar</i>	0.88	1.22	0.93	0.64	0.17	0.17	0.25	0.22
	<i>mínimo</i>	0.75	1.31	0.00	0.18	-0.65	-0.77	-1.00	-0.92
	<i>máximo</i>	4.14	6.25	4.63	3.50	1.19	0.95	1.75	1.45
1990-2003	<i>promedio</i>	1.83	2.65	2.79	1.72	0.00	0.00	0.01	0.00
	<i>desvío estándar</i>	0.60	0.61	0.77	0.60	0.16	0.15	0.27	0.20
	<i>mínimo</i>	0.75	1.31	0.00	0.18	-0.65	-0.56	-0.85	-0.61
	<i>máximo</i>	3.13	4.13	4.06	3.11	0.95	0.70	1.24	1.45
2004-2017	<i>promedio</i>	2.63	4.71	3.41	2.07	0.01	0.00	0.00	0.01
	<i>desvío estándar</i>	0.93	0.69	0.97	0.64	0.17	0.19	0.23	0.25
	<i>mínimo</i>	0.76	3.45	0.45	0.50	-0.41	-0.77	-1.00	-0.92
	<i>máximo</i>	4.14	6.25	4.63	3.50	1.19	0.95	1.75	1.33

Lo que se puede observar comparando el primer período con el segundo, es que los niveles freáticos de todos los pozos en promedio, se profundizaron con el tiempo. Por ejemplo, el pozo I-1 se profundizó en promedio, unos 0,80 m en el segundo período, mientras que el I-11 se profundizó 0,35 m. Sin embargo, si tenemos en cuenta el cambio en el uso del suelo (menos pasturas y más cultivos anuales en el segundo período), se esperaría la situación contraria. Esto aportaría evidencias de que el comportamiento del nivel freático es muy complejo y responde más a una situación regional de cuenca. Es decir, las precipitaciones y el uso del suelo local, no alcanzan a explicar la respuesta en la variación del nivel freático.

Otro análisis que se realizó fue evaluar los niveles freáticos por estación del año. La **Tabla 12** muestra las profundidades del nivel freático mensual de cada pozo para verano (dic-ene-feb), otoño (mar-abr-may), invierno (jun-jul-ago) y primavera (sep-oct-nov), respectivamente. Vemos que los pozos mantienen similares valores de profundidad promedio, independientemente de la estación del año (la máxima variación de los 28 años es de 18 cm). El pozo I-5 (cota más alta) es el que presenta mayor variación en sus valores mínimos/profundos (0,67 m), mientras que el pozo I-11 (cota más baja) es el que tiene mayor variación en sus valores máximos/someros (1,00 m).

Tabla 12. Resumen de la estadística descriptiva de los niveles freáticos de los pozos de la localidad de General Pico, para verano, otoño, invierno y primavera (período 1990-2017).

MESES	VARIABLE	I-1	I-5	II-3	I-11
D-E-F	<i>prom</i>	-2,24	-3,69	-3,14	-1,91
	<i>DE</i>	0,86	1,24	0,85	0,62
	<i>mín</i>	-4,14	-6,18	-4,58	-3,30
	<i>máx</i>	-0,75	-1,43	-1,00	-0,25
M-A-M	<i>prom</i>	-2,22	-3,68	-3,19	-1,95
	<i>DE</i>	0,83	1,22	0,95	0,62
	<i>mín</i>	-3,94	-5,58	-4,63	-3,11
	<i>máx</i>	-0,75	-1,31	-0,45	-0,18
J-J-A	<i>prom</i>	-2,24	-3,65	-3,01	-1,84
	<i>DE</i>	0,92	1,24	0,99	0,66
	<i>mín</i>	-4,10	-6,00	-4,63	-3,25
	<i>máx</i>	-0,76	-1,43	-0,13	-0,25
S-O-N	<i>prom</i>	-2,21	-3,67	-3,04	-1,84
	<i>DE</i>	0,91	1,22	0,92	0,67
	<i>mín</i>	-4,13	-6,25	-4,58	-3,50
	<i>máx</i>	-0,78	-1,75	0,00	-0,50

Por otra parte, se representaron gráficamente y para cada año de estudio (1990-2017), los niveles freáticos y las precipitaciones (**Figura 33**) de los 4 pozos. Por su parte, para el período 1990-2003 (**Figura 34**) y 2004-2017 (**Figura 35**), se utilizaron las precipitaciones y niveles freáticos medios de cada estación del año.

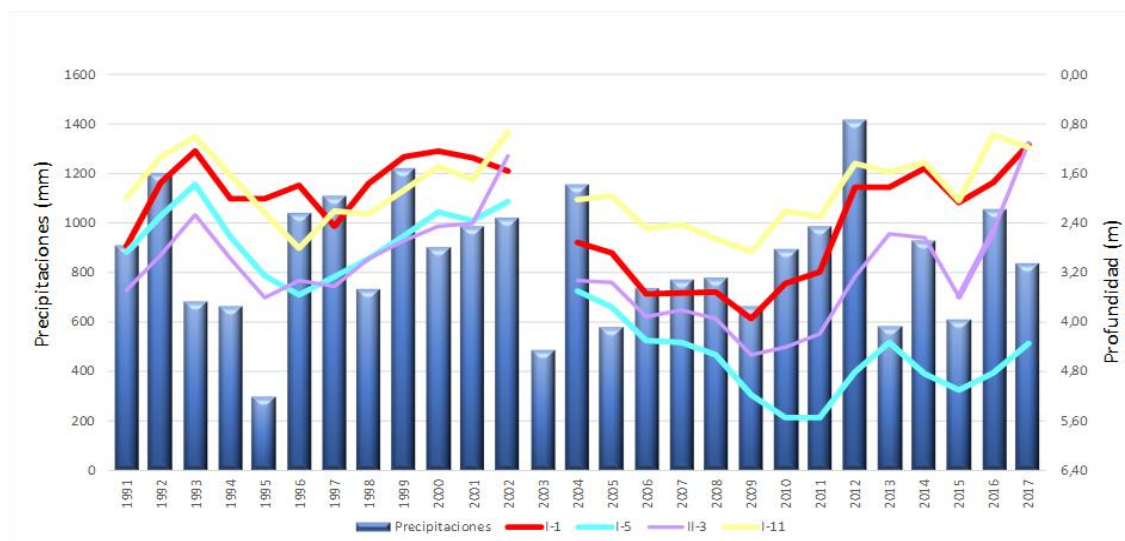


Figura 33. Precipitaciones medias anuales (barras) y profundidad del nivel freático anual (líneas) de los cuatro pozos analizados. Período 1990-2017.

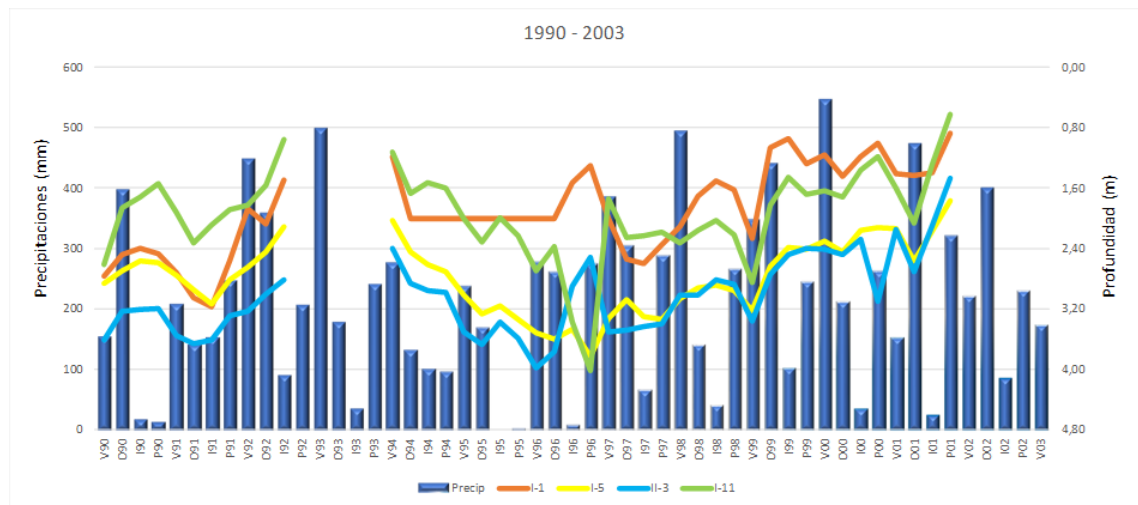


Figura 34. Precipitaciones medias (barras) y profundidad del nivel freático (líneas), de los cuatro pozos analizados, para las cuatro estaciones del año: verano, otoño, invierno y primavera. Período 1990-2003.

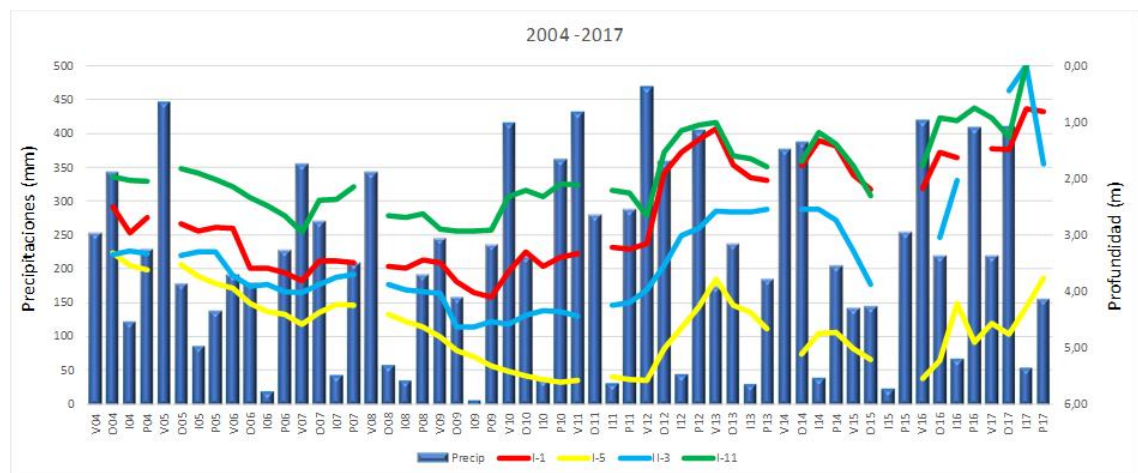


Figura 35. Precipitaciones medias (barras) y profundidad del nivel freático (líneas), de los cuatro pozos analizados, para las cuatro estaciones del año: verano, otoño, invierno y primavera. Período 2004-2017.

El análisis de las **Figura 33** indica que el nivel freático anual muestra cierta correspondencia con la magnitud de las precipitaciones. Similares resultados fueron hallados por Arroyo (2005), para la zona de Quemú Quemú, y por Jensen *et al.* (2000) para la zona inundable del NE de la provincia. Los promedios anuales fueron similares al comienzo y al final del período de estudio, excepto para el pozo I-5 que fue profundizando sus niveles marcadamente desde la finalización del período de inundación 1999-2002 hasta 2016-2017.

La **Figura 34** marca una tendencia general de ascenso del nivel freático en el período 1990-2003, con valores > 2 metros al comienzo, y valores < 2 metros hacia el

final del mismo. Igual tendencia se evidencia en la **Figura 35**, excepto para el pozo I-5 que profundiza sus niveles hacia el final del período 2004-2017.

Roberto y Casagrande (2002), estudiaron la evolución del área inundada para los departamentos del NE provincial, mediante el procesamiento de imágenes satelitales (noviembre 1998-noviembre 2001). Los autores argumentan que si bien el exceso de lluvia dio origen a las inundaciones, hay que tener en cuenta la influencia de la recarga subterránea provocada por las intensas lluvias en el S de Córdoba, agravado por la presencia de tosca en el perfil en la cuenca "Oeste". Jobbágy y Noretto (2009) establecen que la principal variable que define la influencia de las napas sobre los cultivos es su profundidad. Además enfatizan que comprender y cuantificar las relaciones profundidad-aporte/anegamiento en los sistemas pampeanos es la clave para incorporar el componente freático en la toma de decisiones. Jobbágy *et al.* (2007) argumentan que las napas pueden influir de dos maneras contrarias en la agricultura: la amortiguación de las sequías (oportunidad) por un lado, y la generación de episodios de inundación (riesgo), por el otro.

Giambelli (2008) estudió el comportamiento de 12 piezómetros del NE de La Pampa para el período 1993-2001 y concluyeron que éstos presentaban un comportamiento *regional* en sus oscilaciones. Para dicho estudio el autor asumió que en la provincia de La Pampa, el tipo climático subhúmedo seco determina una recarga de características episódicas, responsable de las fluctuaciones del nivel freático, las que deberían responder a una tendencia con validez regional modificada por las particularidades hidrogeológicas del entorno de cada sitio de medición.

5. Determinación del uso de la tierra

El *uso de la tierra* (que refleja el planteo predominante del sector rural), junto a la *adopción de tecnología* son los dos factores centrales que el productor controla para aumentar la productividad y mejorar su beneficio económico (Rabinovich y Torres 2004). La agricultura argentina en general, se ha expandido en los últimos años dentro de una matriz tecnológica enmarcada por cultivos transgénicos, siembra directa, mayor uso de fertilizantes y fitosanitarios y, en menor medida, agricultura de precisión (Viglizzo *et al.* 2002, Satorre 2005). Un cambio asociado de los planteos productivos de agricultura de cosecha es la *simplificación* de los mismos en unos pocos cultivos de

alta productividad y alta homogeneidad genética, lo que le confiere al sistema mayor riesgo climático, económico y biológico (plagas y enfermedades) (Carreño y Viglizzo 2007).

El clima también ejerce su efecto modelador sobre el uso de la tierra. El reemplazo de tierras naturales por tierras agrícolas en los períodos húmedos fue el cambio más notorio que experimentó la agricultura pampeana a lo largo del siglo XX (Timm 2004), demostrando el efecto modelador que las lluvias tienen sobre el uso de la tierra. Los registros estadísticos muestran un paralelismo entre las lluvias y el porcentaje de tierras cultivadas, exceptuando aquellos años de intensas sequías o inundaciones.

Mediante el análisis de los datos provenientes del REPAGRO (Registro Provincial Agropecuario) fue posible determinar en la presente tesis, la tendencia del uso de la tierra en la región. En la **Tabla 13** se puede ver el uso de la tierra para la cuenca "Oeste" y la cuenca "Este", discriminado en dos períodos: 1991-2002 y 2003-2014.

Para la cuenca "Oeste" la superficie de pasturas tuvo un valor promedio de 33,44% para el primer período, y de 21,18% para el segundo. La cosecha fina por su parte fue de 9,18% para el primer período y de 7,61% para el segundo. En tanto que la cosecha gruesa tuvo un valor promedio de 13,86% para el primer período y de 34,46% para el segundo período. En el caso de la cuenca "Este", la superficie promedio de pasturas fue de 34,90% para el primer período y de 19,82% para el segundo, la superficie con cosecha fina fue de 6,84% para el primer período y de 4,27% para el segundo y, la superficie promedio con cosecha gruesa fue de 24,52% para el primer período y de 46,71% para el segundo.

Resumiendo, en ambas cuencas, la superficie con pasturas y cosecha fina disminuyó, mientras que la superficie destinada a cosecha gruesa aumentó. La diferencia de tendencia de ambos períodos en ambas cuencas se presentó en el caso del girasol y sorgo (ambas superficies disminuyeron en la cuenca "Este" pero aumentaron en la cuenca "Oeste"). Los demás cultivos tuvieron iguales tendencias en ambas cuencas: la superficie de trigo disminuyó, mientras que la de maíz, soja y maní aumentaron.

Tabla 13. Resumen del uso de la tierra (REPAGRO) para los ejidos municipales pertenecientes a la cuenca “Oeste” y cuenca “Este”, para ambos períodos (1991-2002 y 2003-2014).

USO DE LA TIERRA		ESTE		OESTE	
		1991-2002	2003-2014	1991-2002	2003-2014
VERDEO DE INVIERNO	promedio	21.35	10.66	25.00	15.70
	desvío estandar	1.78	1.55	1.11	2.35
	mínimo	19.02	7.56	23.78	10.83
	máximo	23.22	12.99	26.46	18.67
RASTROJO/BARBECHO	promedio	18.10	41.29	15.50	30.79
	desvío estandar	3.46	14.04	3.34	7.45
	mínimo	14.84	7.75	10.14	13.31
	máximo	23.38	56.35	18.48	39.21
PASTURA	promedio	34.90	19.82	33.44	21.18
	desvío estandar	1.51	9.59	3.38	5.54
	mínimo	32.84	5.15	28.72	11.04
	máximo	37.03	34.38	37.11	28.19
CAMPO NATURAL	promedio	4.13	11.71	7.36	9.78
	desvío estandar	3.06	15.32	5.59	9.52
	mínimo	0.12	4.20	0.28	4.97
	máximo	8.75	55.07	15.74	36.72
COSECHA FINA	promedio	6.84	4.27	9.18	7.61
	desvío estandar	2.81	1.61	2.82	3.25
	mínimo	4.50	1.59	6.45	1.85
	máximo	10.95	7.37	12.34	11.43
TRIGO	promedio	4.59	2.39	5.71	4.07
	desvío estandar	1.52	1.47	1.78	2.26
	mínimo	3.19	0.63	3.50	0.75
	máximo	6.48	6.07	7.83	6.74
COSECHA GRUESA	promedio	24.52	46.71	13.86	34.46
	desvío estandar	6.02	5.98	2.80	3.69
	mínimo	19.20	38.71	10.76	30.28
	máximo	32.65	55.36	17.83	41.71
GIRASOL	promedio	14.99	10.75	9.17	11.87
	desvío estandar	5.07	2.64	3.65	4.51
	mínimo	10.55	7.49	5.81	4.73
	máximo	22.47	16.04	14.62	19.35
MAIZ	promedio	5.64	11.40	3.35	7.85
	desvío estandar	1.35	2.33	0.68	3.04
	mínimo	3.96	7.68	2.66	3.57
	máximo	7.34	14.12	4.44	11.76
SORGO	promedio	0.75	0.69	1.00	2.34
	desvío estandar	0.42	0.62	0.43	2.00
	mínimo	0.17	0.08	0.55	0.54
	máximo	1.26	2.03	1.63	5.48
SOJA	promedio	3.13	23.25	0.34	11.71
	desvío estandar	0.47	4.19	0.33	3.85
	mínimo	2.62	13.97	0.00	6.40
	máximo	3.59	27.12	0.82	19.08
MANI	promedio	0.00	0.68	0.00	0.37
	desvío estandar	0.00	0.79	0.00	0.46
	mínimo	0.00	0.00	0.00	0.00
	máximo	0.00	2.39	0.00	1.29

En los gráficos siguientes se compara la tendencia del uso de la tierra entre ambas cuencas. La **Figura 36** presenta el caso de las pasturas y los cultivos, donde la tendencia lineal resultó la de mejor ajuste en todos los casos (superior al 75%). Se evidencia una situación de aumento de la superficie sembrada con cultivos (r : 0,86 “Este” y r : 0,89 “Oeste”) y una disminución de la superficie sembrada con pasturas (r : 0,89 “Este” y r : 0,89 “Oeste”). Si bien la tendencia es parecida en ambas cuencas, en la cuenca “Este” la superficie de cultivos es mayor que en la “Oeste”. En el caso de las pasturas, las superficies son más similares en ambas cuencas, pero al inicio del período la cuenca “Este” presentaba mayor superficie hasta que aproximadamente a

mitad del período la situación se invierte. Nótese que la pendiente de las líneas de cultivos es superior a la de las pasturas.

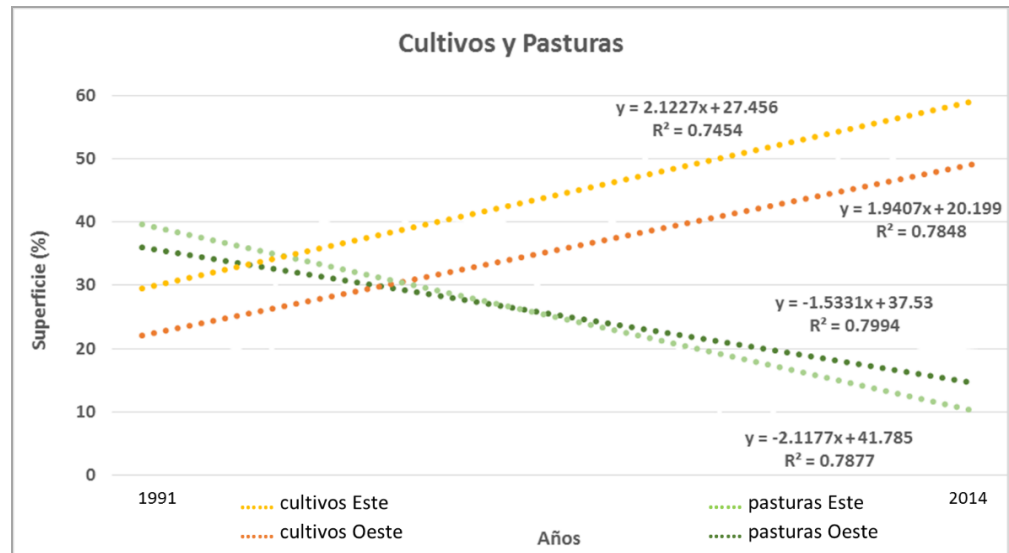


Figura 36. Tendencia de uso de la tierra para ambas cuencas (período 1991-2014). Se discrimina superficie de cultivos y pasturas para cuencas “Este” y “Oeste”, con sus respectivas ecuaciones de ajustes y valores de R^2 .

Por su parte en la **Figura 37** se presenta la tendencia para la superficie de cosecha fina y cosecha gruesa para ambas cuencas de estudio. Vemos que mientras la superficie con cosecha gruesa fue aumentando en ambas cuencas (r : 0,88 “Este” y r : 0,86 “Oeste”), la de cosecha fina se mantuvo o disminuyó levemente (r : 0,54 “Este” y r : 0,15 “Oeste”). Sin embargo, el ajuste lineal de la cosecha gruesa es muy bueno (mayor al 75%), mientras que para la cosecha fina resultó menor al 30%. Además, las pendientes de las rectas de cosecha gruesa son muy superiores a la de cosecha fina.

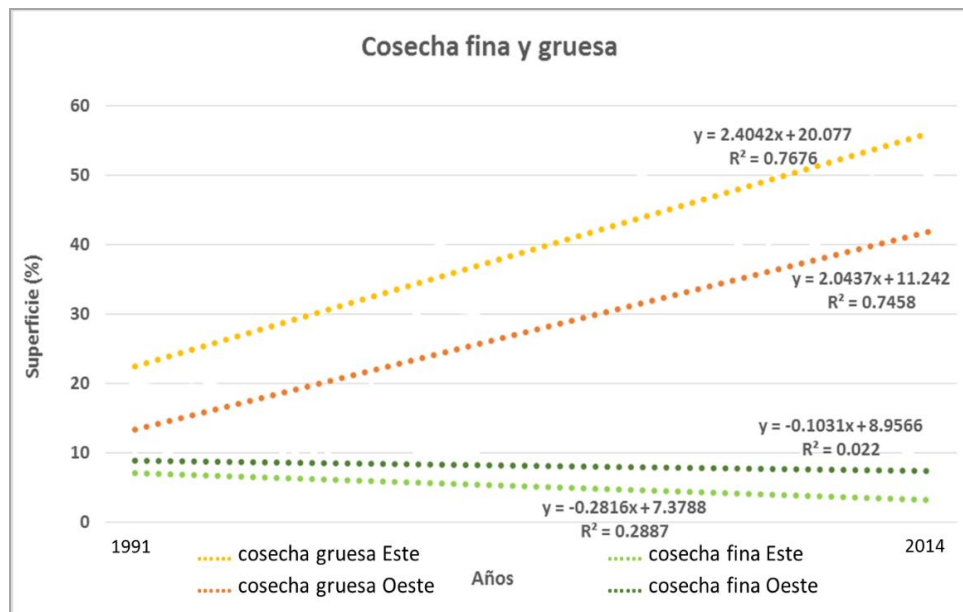


Figura 37. Tendencia de uso de la tierra para ambas cuencas (período 1991-2014), para la superficie con cosecha fina y cosecha gruesa.

Los resultados anteriores concuerdan con lo expresado por Carreño y Viglizzo (2007), quienes argumentan que existieron dos factores que han marcado la intensificación agrícola de los últimos años: a) la “*veranización*” de los planteos agrícolas, en el cual los cultivos de verano se expandieron a expensas de un estancamiento de los cultivos de invierno y, b) la “*sojización*” de la agricultura, en la cual la soja se expandió explosivamente sobre el resto de las especies.

6. Cálculo del uso consuntivo

El consumo de agua freática por las plantas tiene lugar cuando la zona de ascenso capilar ubicada por encima de la napa es alcanzada por las raíces de las plantas que experimentan déficit hídrico en estratos más superficiales del suelo. La potencialidad de este aporte depende de varios factores: 1) profundidad de napas y raíces (define la distancia fuente-destino), 2) textura del suelo (condiciona la capacidad de transporte capilar) y, 3) salinidad del agua (restringe la posible absorción). Es así que una gran parte de la región pampeana presenta condiciones óptimas para el consumo freático (napas superficiales, sedimentos limosos-arenosos finos, aguas freáticas de recarga de baja salinidad) (Jobbágy *et al.* 2007).

Al analizar el uso consuntivo anual que realiza la vegetación del agua del suelo para los distintos patrones de uso de la tierra para cada cuenca, se puede observar

que hubo una tendencia de disminución para ambas, al comparar dos períodos: 1991-2002 y 2003-2014 (**Figura 38**). A pesar de que ambos ajustes de la función polinómica son estadísticamente significativos (valor p ?), tuvieron un mejor valor de R^2 para el caso de la cuenca "Este" (r : 0,95 cuenca Este y r : 0,92 cuenca Oeste).

La **Figura 39** presenta el uso consuntivo promedio anual (mm año^{-1}) para la alfalfa, girasol, maíz, sorgo, soja y trigo. Mientras la pastura posee un uso consuntivo promedio anual de 1141 mm, este valor es mucho menor en el caso de los cultivos. Si ordenamos los cultivos en orden decreciente de uso consuntivo, quedarían de la siguiente manera: maíz (807 mm), sorgo (686 mm), trigo (665 mm), soja (634 mm) y girasol (470 mm). Estos datos aportarían evidencia de que el reemplazo de pasturas perennes (que evapotranspiran mayor cantidad de agua debido a sus raíces profundas y un ciclo vegetativo relativamente largo), por cultivos anuales (cuyas raíces están menos desarrolladas y con un ciclo vegetativo de unos pocos meses, que evapotranspiran menor cantidad de agua), llevan a una disminución del uso consuntivo (**Figura 40**). De aquí que es esperable que el reemplazo de plantas permanentes o perennes por cultivos anuales, reduzca las tasas de evapotranspiración y, eventualmente ascienda el nivel freático debido a un acortamiento del período de crecimiento ([Viglizzo et al. 2009](#)). Esta situación junto a intensas precipitaciones, suelos secos, niveles freáticos someros y la escasa pendiente del terreno, agrega un factor de riesgo más para un posible anegamiento del terreno.

En un trabajo reciente de García *et al.* (2018), se simularon los cambios en la profundidad del nivel freático en 3 escenarios de uso de la tierra, para la zona de las localidades Florentino Aneghino, General Villegas y General Pinto (NO de la provincia de Buenos Aires). El escenario A con 25% soja + 6% maíz + 6% trigo + 1% girasol + 62% pasturas o vegetación natural (datos del año 2004 con una precipitación normal); el escenario B con 100% soja y; el escenario C con 100% pastura. Los autores hallaron que la profundidad media del nivel freático fue de 4,6 m para el escenario A; 2,5 m para el escenario B y; 7,0 m para el escenario C.

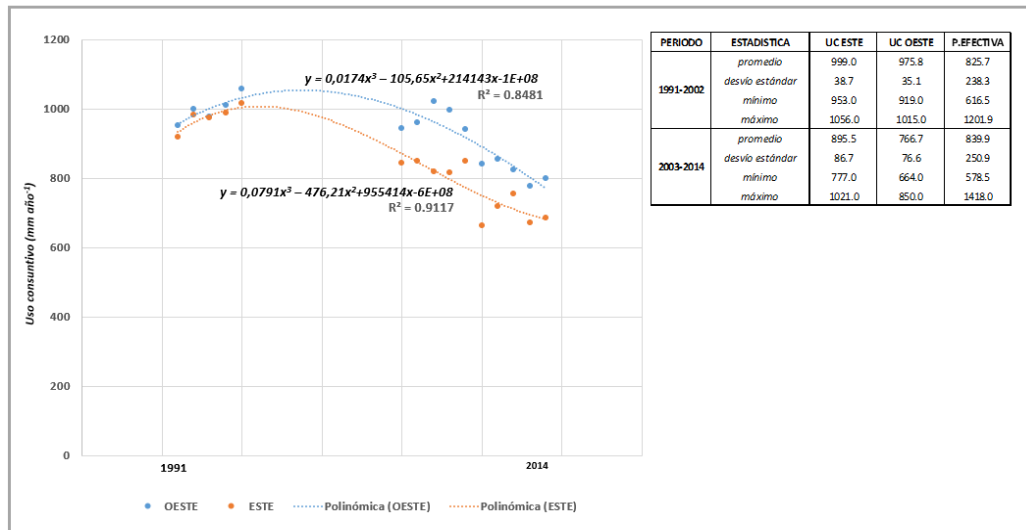


Figura 38. Uso consuntivo de los distintos patrones de uso de la tierra para las cuencas “Este” y “Oeste”, para ambos períodos (1991-2002 y 2003-2014). En la tabla se presenta un resumen de la precipitación efectiva de ambos períodos.

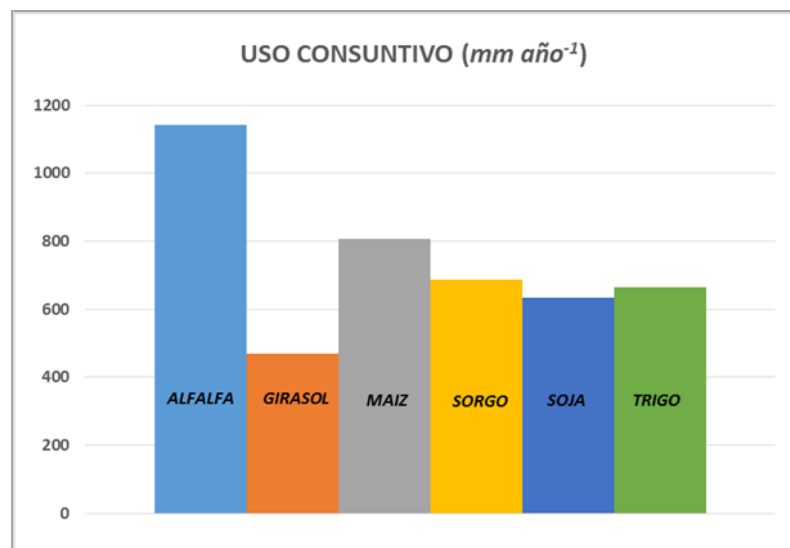


Figura 39. Uso consuntivo promedio anual para el período estudiado (mm año⁻¹), para alfalfa, girasol, maíz, sorgo, soja y trigo.

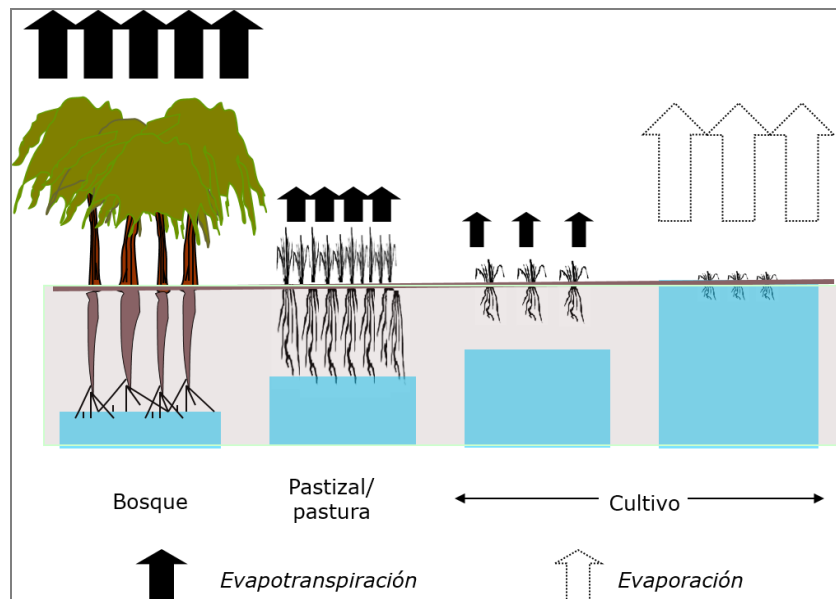


Figura 40. Esquema de cómo varían los flujos de agua (evaporación y evapotranspiración), en los distintos patrones de uso del suelo (bosque, pastura, cultivo anual y suelo inundado). En el caso de los bosques cuyas especies arbóreas perennes poseen raíces con una exploración del suelo profunda, la ETP es importante y más o menos constante durante todo el año, y el nivel freático se mantiene profundo. Un caso intermedio sería el de las pasturas con raíces menos desarrolladas que en el caso anterior, donde la ETP disminuye y el nivel freático comienza a ascender en el perfil del suelo. En el caso de los cultivos anuales, con raíces aún menos profundas y pulsos de ETP en algunos pocos meses del año, el nivel freático resulta mucho más somero que los casos anteriores. Un caso extremo sería el de un suelo totalmente inundado, donde no existe ETP de los cultivos pero la tasa de evaporación a través de la superficie libre del líquido resulta elevada.

Por último, se determinó el uso consuntivo anual por hectárea del departamento Maracó para el período 1990-2015 (**Figura 41**). Hubo una caída de alrededor de 136 mm / ha entre el inicio y final del período, lo que representan 1,36 cm más de agua en el perfil. Esto, junto con las tendencias halladas en la **Figura 36** y **Figura 37** podría ser un indicio de que el cambio en el uso de la tierra en los últimos años hacia especies que evapotranspiran menor cantidad de agua dejando, por lo tanto, un volumen mayor disponible en el perfil del suelo, facilitan la posterior ocurrencia de inundaciones cuando se manifiestan las precipitaciones.

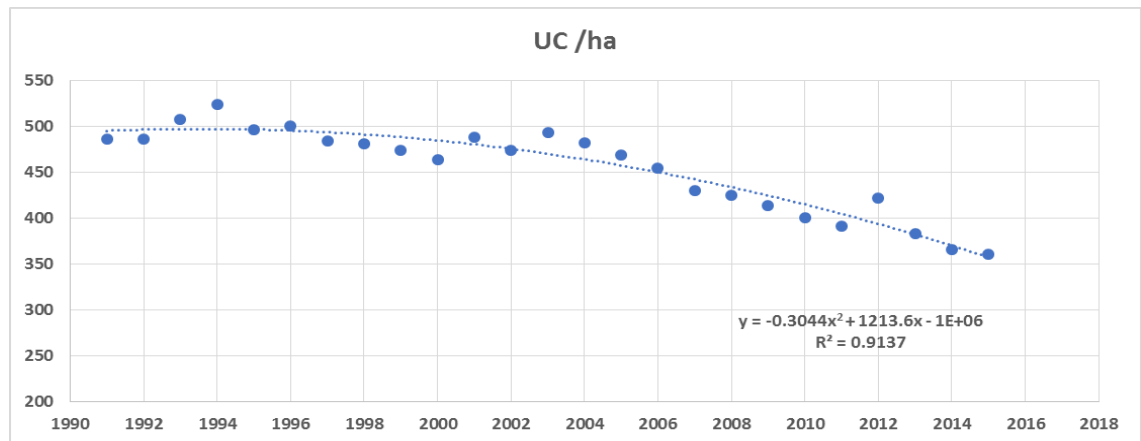


Figura 41. Uso consuntivo anual por hectárea para el departamento Maracó (período 1990-2015), $r = 0,96$.

A pesar de que los resultados que se han analizado dentro de esta sección, indicarían que en el período analizado existió un cambio en el uso de la tierra, que tuvo una clara repercusión en el uso consuntivo (y, por ende, en la cantidad de agua en el perfil del suelo), esto no se ve reflejado en el comportamiento del nivel freático. Evidentemente esta variable tiene un comportamiento regional a nivel de gran cuenca, situación que no fue alcanzada por los objetivos de la presente tesis.

CONCLUSIONES

Debido a la ocurrencia de precipitaciones extraordinarias que superaron el promedio zonal (730 mm), en reiteradas oportunidades ocurrieron inundaciones en gran parte de la superficie del NE de la provincia de La Pampa. La capacidad que presenta la Teledetección y los Sistemas de Información Geográfica, permitió evaluar la variación espacial y temporal de las zonas inundadas en el período comprendido entre 1993 y 2017. Algunas conclusiones a las que permitieron arribar los resultados encontrados en la presente tesis son:

- A pesar de que la máxima superficie inundada en ambas cuencas ocurrió en la primavera del año 2001, un dato que proporciona la presente tesis es que al relativizar el área inundada en función de la superficie de las cuencas, en el “Oeste” (cuenca con tosca) la proporción de tierras afectadas fue superior en casi todo el período 1999-2002, situación que se revierte en el período 2016-2017. Este resultado evidencia que en ambos períodos fue diferente el curso de las inundaciones.
- Las tasas de crecida y recuperación de la cuenca “Este” duplican a las de la cuenca “Oeste”, por lo tanto los suelos en el “Este” se inundan y recuperan más rápidamente que en el “Oeste”. Al menos dos variables edáficas permiten argumentar la diferente estancia del agua en la superficie de los suelos: textura/estructura del horizonte y profundidad de la tosca.
- En cuanto al análisis de regresión entre la lluvia caída 15, 30, 60 y 90 días antes de la fecha de la imagen satelital y la superficie inundada, la línea de mejor ajuste corresponde a la lluvia acumulada de 60 días, explicando un poco más del 50% de la ocurrencia de las inundaciones. Los factores que podrían estar influyendo serían entre otros, las características geomorfológicas del sitio, siendo la textura/estructura y la profundidad de la tosca, las variables que condicionan la infiltración del agua en superficie. La temperatura, la velocidad del viento, la evaporación, la evapotranspiración, la cobertura vegetal, el laboreo de las tierras, son variables que también hay que considerar a la hora de analizar la superficie inundada.

- Como en la provincia el registro de los datos de niveles freáticos es muy irregular, lo que dificulta el análisis del curso de la variable a través del tiempo. No obstante, si se considera que los datos de la localidad de General Pico evidencian en promedio una profundización de los niveles freáticos hacia el final del período de estudio, esto no concuerda con la hipótesis planteada. Este resultado no es suficiente para explicar las variaciones de nivel freático, cuestión que evidentemente resulta mucho más compleja.
- El análisis de los datos del REPAGRO (Registro Provincial Agropecuario) para el período 1991-2014, muestra una clara tendencia de aumento de la superficie destinada a cultivos, acompañada de una disminución de la superficie destinada a pasturas para ambas cuencas (Este y Oeste). Hay que destacar igualmente, que la superficie destinada a cultivos de la cuenca Este es superior a la de la cuenca Oeste, ya que, en esta última, la presencia de tosca en el perfil del suelo limita el desarrollo de los cultivos.
- Al analizar el uso consuntivo anual que realiza la vegetación a partir de los distintos patrones de uso de la tierra, en ambas cuencas se registró una tendencia decreciente en los consumos demandados. Esto, conjuntamente con la tendencia hallada en el punto anterior, es un indicio de que el cambio en el uso de la tierra hacia especies que evapotranspiran menos cantidad de agua estaría repercutiendo sobre la vulnerabilidad, provocando un mayor riesgo de anegamiento frente a la amenaza (precipitaciones extraordinarias).

Acerca de las hipótesis de trabajo

Durante el período de 25 años estudiado (1993-2017) en las cuencas del departamento Maracó, ocurrieron dos episodios importantes de inundación, pero con diferente permanencia y diferentes causales. Si bien durante la inundación 1999-2001, la cuenca más afectada fue la de la planicie con tosca, en la inundación posterior (2016-2017) también se inundó considerablemente la cuenca de la planicie medanosa. Se asume que, en esta última, además del efecto de las variables hidrológicas (precipitaciones, niveles freáticos y excesos hídricos), existió además una influencia

antrópica provocada por el cambio en el uso de la tierra: reemplazo de pasturas perennes por cultivos anuales y veranización del sistema (abandono de cultivos de invierno por cultivos de verano). A diferencia de las pasturas perennes cuyo uso consuntivo es de alrededor de 1100 mm año⁻¹, los cultivos anuales poseen un uso consuntivo de alrededor de 550 mm año⁻¹, concentrándose en sólo unos pocos meses del año. Por lo tanto, el reemplazo de pasturas por cultivos conlleva a una menor cobertura vegetal anual y, por ende, a un ascenso del nivel freático. Con este argumento, las dos hipótesis de trabajo que se propusieron en la presente tesis fueron:

**** La inundación ocurrida entre los años 1999-2001 se asocia a precipitaciones extraordinarias en cortos períodos de tiempo, que afectaron un área mayor en la cuenca de la planicie con tosca que aquella que lo fue en la cuenca de la planicie medanosa.***

Los resultados hallados en la presente tesis apoyan esta hipótesis, ya que en el año 1999 hubo precipitaciones anuales que superaron los 1200 mm, independientemente de la cuenca analizada. Si se considera que el promedio histórico para la región es de 730 mm, las lluvias del año 1999, representan 1,6 veces más que lo normal para la zona. Por otro lado, la cuenca más afectada, resultó la ubicada en la planicie con tosca, con un área máxima inundada cercana al 19% (primavera del 2001).

****La inundación de los años 2016-2017 afectó en mayor cuantía áreas que se ubican en la planicie medanosa, cambio que está asociado, entre otras variables, a la ocurrencia de precipitaciones extraordinarias, a la existencia de niveles freáticos de base más someros que en el caso anterior, y al vuelco en el uso de la tierra que determina un menor uso consuntivo.***

Los resultados del presente trabajo no permiten apoyar este aserto. A pesar de que en el período analizado existió un cambio en el uso de la tierra, que tuvo una clara repercusión en el uso consuntivo, esto no se vinculó con un nivel freático más somero. De hecho los niveles se profundizaron hacia el final del período estudiado, situación contraria a lo esperado. Evidentemente esta variable tiene un comportamiento regional a nivel de gran cuenca, y el análisis de las precipitaciones y el uso del suelo local no alcanzan para establecer el curso de la misma.

Algunas consideraciones finales

- Existen razones de índole climática, geomorfológica y edafológica que contribuyen a la ocurrencia de inundaciones. De acuerdo a los datos analizados, se evidencia la alternancia de excesos y déficit hídricos que demuestran la dinámica cambiante de los ecosistemas y el grado de incertidumbre que eso significa.
- Relacionado con lo anterior, sería de gran importancia e interés profundizar en la explicación física y la influencia (como y en qué proporción), de cada factor que pudiera estar incidiendo en la relación precipitación y superficie inundada, temática que excede los alcances de la presente tesis.
- Es necesario reconocer las oportunidades que brinda el agua subterránea a la producción de cultivos, así como las amenazas que puede presentar su elevación en el perfil del suelo y los posibles episodios de anegamiento y salinización que esto puede generar. Es por ello que se alienta a instituciones públicas y privadas para que incorporen y mantengan mediciones necesarias para estudiar la dinámica hidrológica de esta región.
- La interacción del clima con la cobertura del terreno y las decisiones de uso de la tierra resultan particularmente importantes en la hidrología de estos sistemas de llanura. Debe tenerse en cuenta que con una adecuada red freaticométrica, datos meteorológicos regionales, registros de niveles en cursos y lagunas, se podría analizar la evolución de las inundaciones e incluso efectuar pronósticos más seguros a fin de minimizar los impactos socio-económicos potencialmente adversos causados por las inundaciones.
- Si tenemos en cuenta que aproximadamente el 70% de los TCR del departamento Maraco (área central de estudio) se encuentran por debajo de la unidad económica, promover el tipo de estudio de la presente tesis, resulta prioritario para lograr interpretar el comportamiento de la zona frente a las inundaciones.

BIBLIOGRAFIA

- Administración Provincial del Agua (APA). (2020).** Estaciones meteorológicas online. Datos de lluvia. Ministerio de Obras y Servicios Públicos - Gobierno de La Pampa. Recuperado de: <https://apa.lapampa.gob.ar/metereologias/19-meteorologia/42-datos-historicos-de-lluvia.html>
- Aiello, J.L.; Mehl, H. (1994).** Aspectos hidrológicos del oeste de la provincia de Buenos Aires y este de la provincia de La Pampa. Proc. of the second Euro-Latin American space days. Buenos Aires, Argentina, 9-13 Mayo 1994.
- Ameghino, F. (1984).** "Las Secas y las Inundaciones en la provincia de Buenos Aires. Obras de retención y no de desagüe. 1884-1984". 5ª ed. Ministerio de Asuntos Agrarios: La Plata. 62p.
- Andréassian, V. (2004).** Waters and forests: from historical controversy to scientific debate. Journal of Hydrology 291: 1-27.
- Aragon, R.; Jobbágy, E.G.; Viglizzo, E. (2010).** Surface and groundwater dynamics in the sedimentary plains of the Western Pampas (Argentina). Ecohydrol. <https://doi.org/10.1002/eco.149>
- Argentina. Ministerio de Justicia y Derechos Humanos (1988, 16 de diciembre) Ley 25.080.** Ley de inversiones para bosques cultivados. <http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/55000-59999/55596/texact.htm>
- Asociación gvSIG. (2009)** gvSIG 2.5. [Software]. Recuperado de <http://www.gvsig.com/es/productos/gvsig-desktop/descargas>
- Arroyo, C. (2005).** Estimación de la recarga en el sector de explotación del acuífero que abastece a la localidad de Quemú-Quemú, provincia de La Pampa. Tesina de grado Carrera Licenciatura en Geología. Universidad Nacional de La Pampa. 51 p.
- Barros, V.; Menéndez, A.; Nagy, G. (2006).** El cambio climático en el Río de la Plata. Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA): Libros del Zorzal, Buenos Aires, Argentina; 174 p.
- Bernard, C.; Drury, C.F.; Fairchild, G.L.; Gregorich, L.J.; Goss, M.J.; Harker, D.B.; Lafrance, P.; McConkey, B.; MacLeod, J.A.; Tan, C.S.; VanderGulik, T.W.; van Vliet et, L.J.P.; Weersink, A. (2000).** Protecting Water Quality. In: D.R. Croote y L.J. Gregorich (eds.). The health of our water-Toward sustainable agriculture in Canada. AAFC: Ottawa, ON, pp. 91.104.
- Bilenca, D.; Miñarro, F. (2004).** Identificación de áreas valiosas de pastizal (AVPs) en las pampas y campos de Argentina, Uruguay y sur de Brasil. FVSA. Buenos Aires, Argentina. 325 p.
- Blaney, H.F.; Criddle, W.D. (1950).** Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data. USDA Servicio de Conservación de Suelos. SCS-TP96. 44 p.

- Bosch, J.M.; Hewlett, J.D. (1982).** A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology* 55: 3–23.
- Bowling, L.C.; Storck, P.; Lettenmaier, D.P. (2000).** Hydrologic effects of logging in western Washington, United States. *Water Resources Research* 36: 3223-3240.
- Bradshaw, C.J.A.; Sodhi, N.S.; Peh, K.S.H.; Brook, B.W. (2007).** Global evidence that deforestation amplifies flood risk and severity in the developing world. *Global Change Biology* 13: 1-17.
- Brown, L.R.; Halweil, B. (17 de Agosto de 1998).** A Human Hand in the Yangtze Flooding. *New York Times* Recuperado de: <https://www.nytimes.com/1998/08/17/opinion/IHT-a-human-hand-in-the-yangtze-flooding.html>
- Bryan, R.B.; Campbell, I.A. (1986).** Runoff and sediment discharge in a semi-arid drainage basin. *Z. Geomorphol.*, 58: 121-143.
- Burgos, J.J. (1963-a).** Las heladas en la Argentina. INTA. EEA Balcarce. Colección Científica; 3. 388p.
- Burgos, J.J. (1963-b).** El clima de las regiones áridas en la República Argentina. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*. XVII (4): 385-405.
- Burgos, J.J. (1974).** Mesoclimas del valle del río Colorado y su potencial agropecuario. *Ecosur I* (1/2): 1-172.
- Cabrera, A. (1976).** “Regiones Fitogeográficas Argentinas”. *Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería*. Tomo II, fascículo 1. Editorial ACME. Buenos Aires, pp. 42-43.
- Camillone, I.; Doyle, M. (2004).** Southern South America climate trends. Second AIACC Regional Workshop for the Latin America and Caribbean. Buenos Aires, 24-27 agosto, 2004.
- Carreño, L.; Viglizzo, E. (2007).** Provisión de servicios ecológicos y gestión de los ambientes rurales en Argentina., Ediciones INTA: Buenos Aires 65 p.
- Casagrande, G.; Roberto, Z. (2000).** Inundaciones en La Pampa 2000 - Las inundaciones en el Noreste de la Provincia. INTA. EEA Anguil, La Pampa. Proyecto AgroRADAR, 2 p.
- Casas, R.; Pittaluga, A. (1990).** “Anegamiento y salinización de los suelos en el noroeste de la provincia de Buenos Aires”. En: “Manejo de Tierras Anegadizas”: Prosa. FECIE: Buenos Aires, pp. 259-278.
- Chaneton, E.J. (2006).** Las inundaciones en pastizales pampeanos: impacto ecológico de las perturbaciones naturales. *Ciencia Hoy* 16 (92): 18-32.
- Charney, J.G. (1975).** Dynamics of deserts and drought in the Sahel. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 101, 193–202.

- Chen, D.; OU, T.; Gong, L.; Xu, C.; Li, W.; HO, C. (2010).** Spatial interpolation of daily precipitation in China: 1951-2005. *Advances In Atmospheric Sciences* 27(6), 1221-1232.
- Chuvienco, E. (2002).** "Teledetección Ambiental. La observación de la Tierra desde el espacio". Ariel Ciencia: España, pp. 13 y 62.
- Damarío, E.A.; Cattáneo, C.A. (1982).** Estimación climática de la evapotranspiración potencial en la Argentina según el método de Penman 1948. *Revista Facultad de Agronomía*, 3 (3): 271-292.
- Di Bella, C.M.; Posse, G.; Beget, M.E.; Fischer, M.A.; Mari, N.; Veron, S. (2008).** La teledetección como herramienta para la prevención, seguimiento y evaluación de incendios e inundaciones. *Ecosistemas* 17(3):39-52.
- Dirección General de Estadística y Censos (s.f.).** REPAGRO. Registro Provincial de producción Agropecuaria: manual de ayuda. Ministerio de Producción. Gobierno de la Pampa. Recuperado de:
https://repagro.lapampa.gob.ar/imagenes/Manual_de_REPAGRO.pdf
- Douglas, I. (1969).** Sediment yields from forested and agricultural lands. En: Proc. Sym. On The Role of Water in Agriculture, university of Wales, Aberystwyth, Memorandum N° 12, pp. E1-E22.
- Durán, D.; Buzai, G. (1998).** "El medio construido y las inundaciones en la aglomeración de Buenos Aires". En: Durán, D. (comp.) "La Argentina Ambiental. Naturaleza y Sociedad". 1998. Editorial Lugar: Buenos Aires, pp. 248.
- Fiener, P.; Auerswald, K. (2006).** Influence of scale and land use pattern on the efficacy of grassed waterways to control runoff. *Ecological Engineering*, 27: 208- 218.
- Forte Lay, J.; Aiello, J.; Kuba, J. (1996).** "Software Agroagua Versión 4.3". CONICET. Buenos Aires.
- Forte Lay, J.; Scarpati, O.; Capriolo, A. (2008).** Precipitation variability and soil water content in Pampean Flatlands (Argentina). *Geofísica Internacional* 47 (4), 341-354.
- Fuschini Mejía, M.C. (1994).** El Agua en las Llanuras. UNESCO, Oficina Regional de Ciencia y Tecnología para América Latina y el Caribe, Montevideo, 59p.
- Galmarini, A. (1961).** "Caracterización climática de la Provincia de La Pampa". CAFADE: Buenos Aires. Operación carnes : publicación técnica, 13. 59p.
- Galván, M.; Collado, A.D. (2009).** Escurrimientos hídricos superficiales en la cuenca hidrográfica de "El Morro", provincia de San Luis. 1° ed. INTA. EEA San Luis. Información Técnica N° 175, 62 p.
- García, P.E.; Badano, N.D.; Menéndez, A.N.; Bert, F.; García, G.; Podestá, G.; Rovere, S.; Verdín, A.; Rajagopalan, B.; Arora, P. (2018).** Influencia de los cambios en el uso del suelo y la precipitación sobre la dinámica hídrica de una cuenca de llanura extensa. Caso de estudio: Cuenca del Río Salado, Buenos Aires, Argentina. *Ribagua Revista Iberoamericana del Agua* 5(2)
<https://doi.org/10.1080/23863781.2018.1495990>

- Giai, S.B.; Tullio, J.O. (1998).** “Características de los principales acuíferos de la provincia de La Pampa”. Recuperado de: <https://apa.lapampa.gob.ar/images/Archivos/Agua/Acuiferos.pdf>
- Giambelli, G. (2008).** Dinámica espacial y temporal del nivel freático del Noreste de la provincia de La Pampa. Tesina de grado. Facultad de Cs. Exactas y Naturales. Universidad Nacional de La Pampa, Argentina. 44 p.
- Heuperman, A. (1999).** Hydraulic gradient reversal by trees in shallow water table areas and repercussions for the sustainability of tree-growing systems. *Agricultural Water Management* 39: 153–167.
- Hirschboeck, K.K. (1991).** Climate and floods. In: Paulson, R.W.; Chase, E.B.; Moody, D.W. (comp.). *National Water Summary 1988–89, Floods and Droughts*, US Geological Survey: Reston, VA. Water-Supply Paper; 2375:67-88.
- Instituto Geográfico Nacional (IGN). (s.f.)** Herramientas de búsqueda. Modelos digitales de elevación. Ministerio de Asuntos Agrarios. Argentina. Recuperado de <https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/Geodesia/ModeloDigitalElevaciones/Busqueda>
- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). (2017).** Catálogo de imagens Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. Brasil. Recuperado de: <http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA); Universidad Nacional de La Pampa Provincia de La Pampa (UNLPam). (1980).** “Inventario Integrado de los Recursos Naturales de la Provincia de La Pampa”: clima, geomorfología, suelo y vegetación. INTA: Buenos Aires. 493p.
- Isla, F.I.; Ruiz, E.; Márquez, J.; Urrutia, A. (2003).** Efectos ENSO en la transición entre el espinal y la pradera cultivada en la Diagonal Sudamericana, Argentina Central. *Revista C. & G.*, 17 (1-2), 63-74.
- Jensen, R.A.; Marazzi, M.L.; Savioli, J.C.; Brea, J.D.; Tavecchio, H. (2000).** Diagnóstico de inundación en la región Noreste de la provincia de La Pampa, Argentina. Informe Final. Recuperado de: <https://docplayer.es/23063844-Diagnostico-de-inundacion-en-la-region-noreste-de-la-provincia-de-la-pampa-argentina-informe-final-distribucion-gobierno-l-p.html>
- 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.
- Jóbbagy, E.G.; Noretto, M.D. (2009).** Napas freáticas: pautas para comprender y manejar su impacto en la producción. XVII Congreso AAPRESID, pp. 151-155.
- 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.

- Jobbágy, E.G.; Santoni, C.S. (2006).** La (nueva) agricultura y la hidrología en la llanura chaco-pampeana: Desafíos para las próximas décadas. Recuperado de: <https://docplayer.es/60266594-La-nueva-agricultura-y-la-hidrologia-en-la-llanura-chaco-pampeana-desafios-para-las-proximas-decadas.html>
- Jobbágy, E.G.; Sznaider, G.; Nosetto, M.; Aragón, R.; Mangas, G.; de Forteza, S. (2007).** Dinámica de napas y riesgo de inundación: Influencias y efectos en la variabilidad de los cultivos. *Mundo Agro*. Junio de 2007. Buenos Aires, Argentina. 8 p.
- Kruse, E.; Zimmermann, E. (2002).** Hidrogeología de grandes llanuras: particularidades en la llanura pampeana (Argentina). Workshop. Groundwater and Human Development. Mar del Plata, Argentina. Octubre 2002. Recuperado de: <https://www.fceia.unr.edu.ar/curiham/Publicaciones/WORKSH~1.pdf>
- Kundzewicz, Z.W. (1999).** Flood protection sustainability issues. *Hydrological Sciences Journal* 44: 559-571.
- Li, K.Y.; Coe, M.T.; Ramankutty, N.; De Jong, R. (2007).** Modeling the hydrological impact of land-use change in West Africa. *Journal of Hydrology* 337, 258– 268.
- Llasat, M.; Barriendos, M.; Barrera, A.; Rigo, T. (2005).** Floods in Catalonia (NE Spain) since the 14th century. Climatological and meteorological aspects from historical documentary sources and old instrumental records. *Journal of Hydrology* 313: 32–47.
- Lunetta, R.; Balogh, E. (1999).** "Application of Multi-Temporal Landsat 5 TM Imagery for Wetland Identification. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*". 65(11): 1303-1310.
- Martínez Uncal, C. (2015).** Monitoreo de tierras anegadas al Noreste de la provincia de La Pampa, Argentina. Tesis de Maestría en *Análisis y Procesamiento de Imágenes*. Universidad Nacional de Córdoba. 102 p.
- McNeill, J.R.; Winiwarter, V. (2004).** Breaking the Sod: Humankind, History, and Soil. *Science* 304 (5677), 1627-1629.
- Moncaut, C.A. (2001).** Inundaciones y Sequías en la Pampa Bonaerense 1576-2001. El Aljibe: City Bell, La Plata, Argentina. 102 p.
- Newson, M.D. (1985).** Forestry and water on the uplands of Britain- the background of hydrological research and options for harmonious land use. *J. For.*, 79: 113-120.
- Nosetto, 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.
- Nosetto, M.D.; Jobbágy, E.G.; Paruelo, J.M. (2005).** Land-use change and water losses: the case of grassland afforestation across a soil textural gradient in central Argentina. *Global Change Biology* 11: 1101–1117.
- Oficina de Riesgo Agropecuario (ORA). (s.f.).** Riesgo climático. Fenología de los cultivos monitoreados. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. Argentina. Recuperado de: http://www.ora.gob.ar/riesgo_fenologia.php

- Oberlin, G.; Gautier, J.N.; Chastan, B.; Farissier, P.; Givone, P. (1993).** Une méthode globale pour la gestion rationnelle des zones inondables: le programme "Inondabilité" du CEMAGREF, Science et changements planétaires / Secheresse 4 (3): 171-176.
- Paruelo, J.M.; Guerschman, J.P.; Verón, S.R. (2005).** Expansión agrícola y cambios en el uso del suelo. Ciencia Hoy 15: 14-23.
- Piovano, E.L.; Ariztegui, D.; Bernasconi, S.M.; McKenzie, J.A. (2004).** Stable isotopic records of hydrological changes in subtropical Laguna Mar Chiquita (Argentina) over the last 230 años. The Holocene 14: 525-535.
- Porta, J.; Lopez-Acevedo, M.; Roquero, C. (1999).** "Edafología. Para la Agricultura y el Medio Ambiente". 2ª. ed. Mundi-Prensa. España. 333p.
- Rabinovich, J.; Torres, F. (2004).** Caracterización de los síndromes de sostenibilidad del desarrollo. El caso de Argentina. Taller "Síndromes de sostenibilidad del desarrollo en América Latina", Santiago de Chile, 16 y 17 de septiembre de 2002.
- Reed, L.A. (1971).** Hydrological and sedimentation of Corey Creek and Elk Run Basins, North-Central Pennsylvania. US Geological Survey. Water Supply Paper 1532- E. 27p.
- Roberto, Z.E.; Belmonte, M.L.; Carreño, L.V. (2016).** Mapas digitales de precipitación de la provincia de La Pampa (período 1984-2014). INTA. EEA Anguil. Boletín de Divulgación Técnica N° 115.
- Roberto, Z.; Casagrande, G. (2002).** Las inundaciones en el Noreste de La Pampa. Red Agro-económica de Administración de Recursos. AgroRADAR. 2 p.
- Roberto, Z.E.; Martínez Uncal, M.C. (2012).** Bases para el ordenamiento territorial. INTA. EEA Anguil. Publicación Técnica N° 87, s.p.
- Roberto, Z.E.; Tulio, J.; Malán, J. (2008).** Cartografía de agua subterránea para uso ganadero en La Pampa. INTA. EEA Anguil. Publicación Técnica; N° 73. 25 p.
- Rodríguez Ramos, N.; Bell-Iloch García, I.; Galano Duverger, S.; Estrada Estrada, R.; Martín Morales, G. (2009).** Software para corregir los datos inválidos en las imágenes Landsat 7. Cub@: Medio ambiente y Desarrollo; Revista electrónica de la Agencia de Medio Ambiente 9(17).
- 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): 1-15.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca (SAGyP). (2002).** Primer inventario nacional de plantaciones forestales en macizo. SAGyP Forestal, 20, 2-9.
- 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, W10541, doi: 10.1029/2009WR008784, 2010.
- Satorre, E.H. (2005).** Cambios tecnológicos en la agricultura argentina actual. Ciencia Hoy. 15 (87), 24-31.

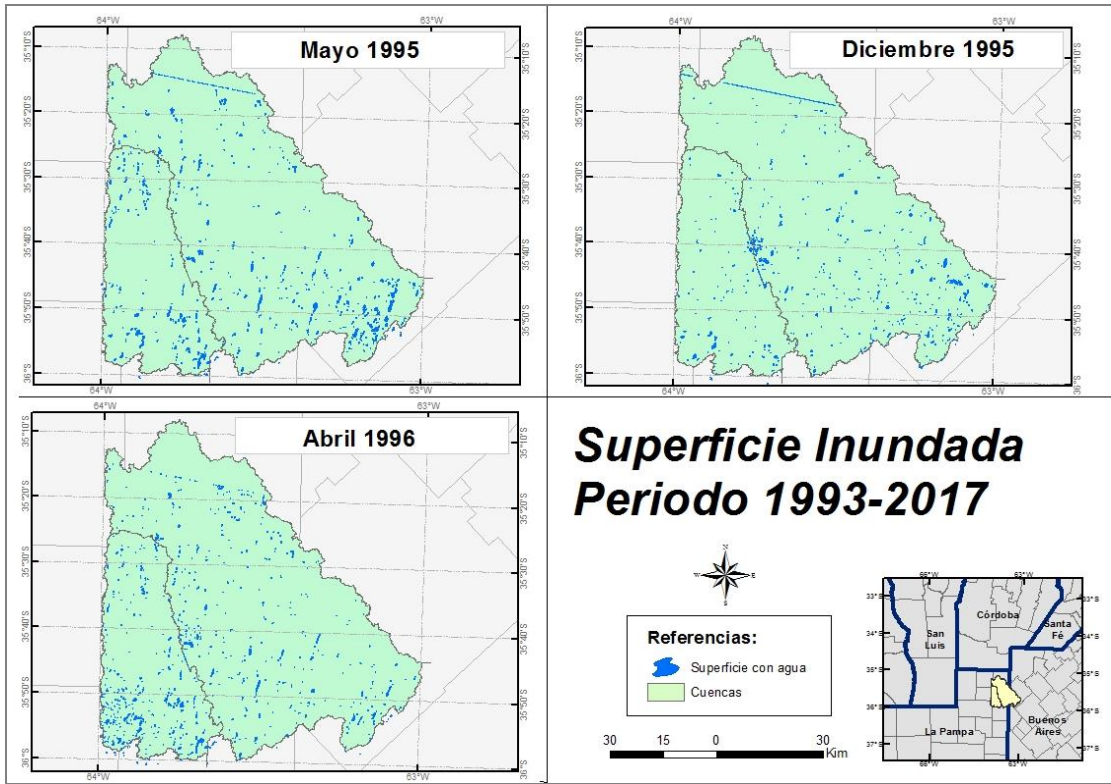
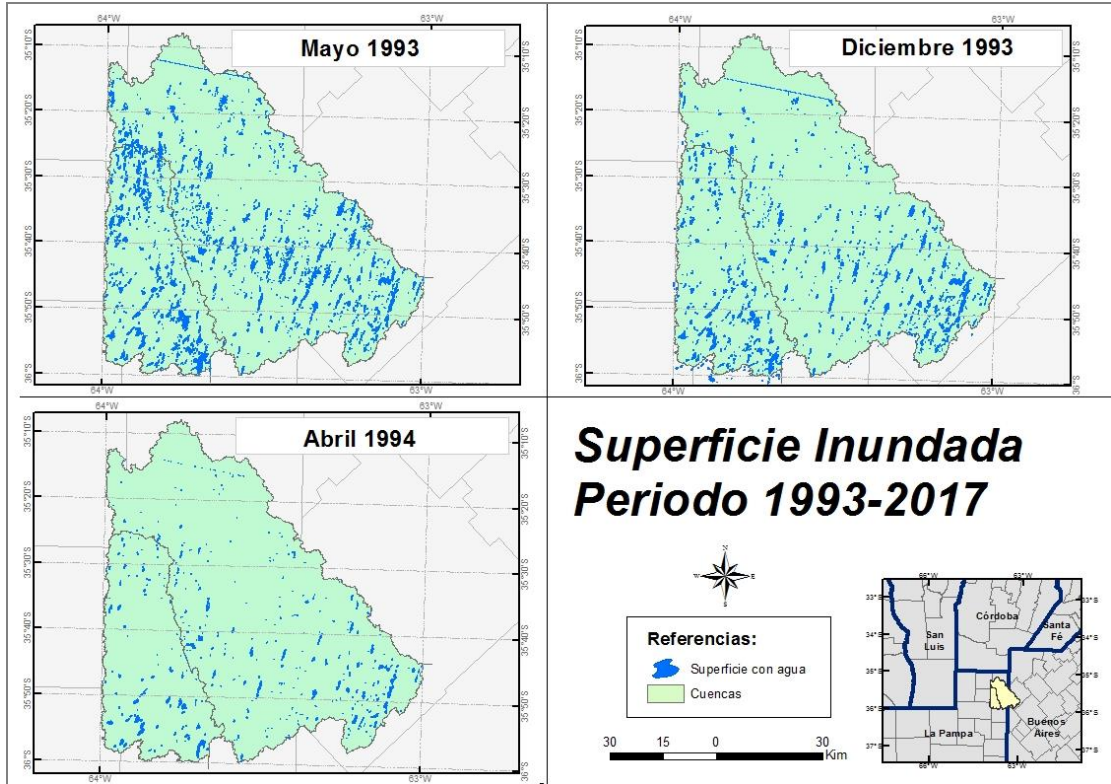
- Scanlon, B.R.; Reedy, R.C.; Stonestrom, D.A.; Prudic, D. E.; Dennehy, K.F. (2005).** Impact of land use and land cover change on groundwater recharge and quality in the southwestern US, *Global Change Biology* 11, 1577–1593.
- Schulz, C.J.; Castro, E. (2005).** “Estimación de la infiltración eficaz en el sector medanosos del noreste de La Pampa mediante distintos métodos”. IV Congreso Hidrogeológico Argentino, Río Cuarto. 25 al 28 de octubre, pp. 105-112.
- Scott, D.F.; Lesch, W. (1997).** Streamflow responses to afforestation with *Eucalyptus grandis* and *Pinus patula* and to felling in the Mokobulaan experimental catchments, South Africa. *Journal of Hydrology*, 199: 360–377.
- Smith, L.C. (1997).** Satellite remote sensing of river inundation area, stage, and discharge: a review, *Hydrological Processes*, 11, 1427–1439.
- Taboada, M.; Damiano, F.; Lavado, R. (2009).** “Inundaciones en la Región Pampeana. Consecuencias sobre los suelos”. En: “Alteraciones de la fertilidad de los suelos. El halomorfismo, la acidez, el hidromorfismo y las inundaciones”. FAUBA: Buenos Aires. 118p.
- Tanco, R.; Kruse, E. (2001).** Prediction of seasonal water-Table fluctuations in La Pampa and Buenos Aires, Argentina, *Hydrogeology Journal*, 9 (4), 339–347.
- Thorntwaite, C.W.; Mather, J.R. (1955).** The water balance. v.8 t.1 Drexel Institute of Technology, Laboratory of Climatology, Centerton, NJ. 104p.
- Timm, J. (2004).** Variabilidad Climática y Cambios en el Uso de la Tierra en la Región Pampeana Argentina. Tesis de Graduación, Universidad Nacional de La Pampa, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Santa Rosa, La Pampa. 42 p.
- Tollan, A. (2002).** Land-use change and floods: what do we need most, research or management? *Water Science and Technology* 45: 183-190.
- U.S. Geological Survey (USGS). (s.f.).** Earth explorer. Recuperado el (18 de julio de 2020) de <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- Usunoff, E.J. (2002).** Framework for assessing hydrogeology of large plains. Proceedings of the Workshop publication on Groundwater and Human development. Mar del Plata, Argentina, pp. 2039-2042.
- Vázquez, P. (2017a).** Emergencia agropecuaria en la provincia de La Pampa. Inundaciones periodo 19 de abril-21 de mayo 2017. Informe Técnico. Recuperado de: https://inta.gob.ar/sites/default/files/informe_inundaciones_20170521.pdf
- Vázquez, P. (2017b).** Emergencia agropecuaria en la provincia de La Pampa. Inundaciones periodo 19 de abril-3 de junio 2017. Informe Técnico Complementario. Esgurrimiento del agua.. INTA. EEA Anguil. Recuperado de: https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_informe_inundaciones_20170603_extendido_movimiento_de_aguas.pdf

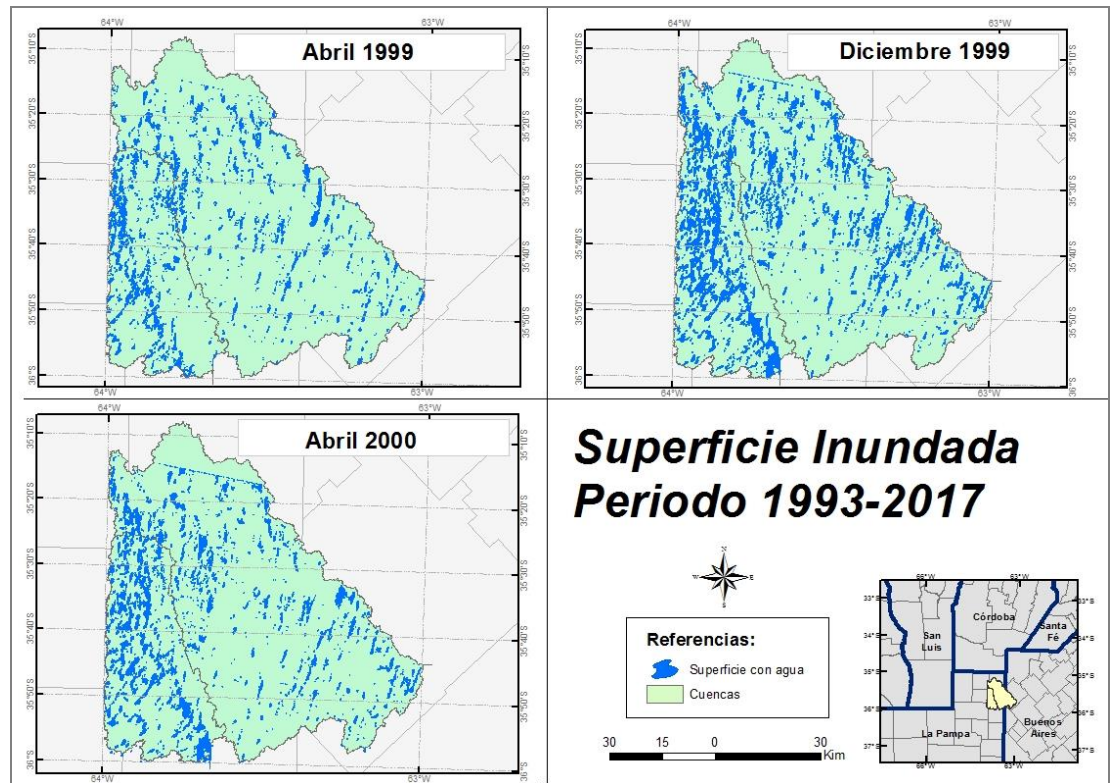
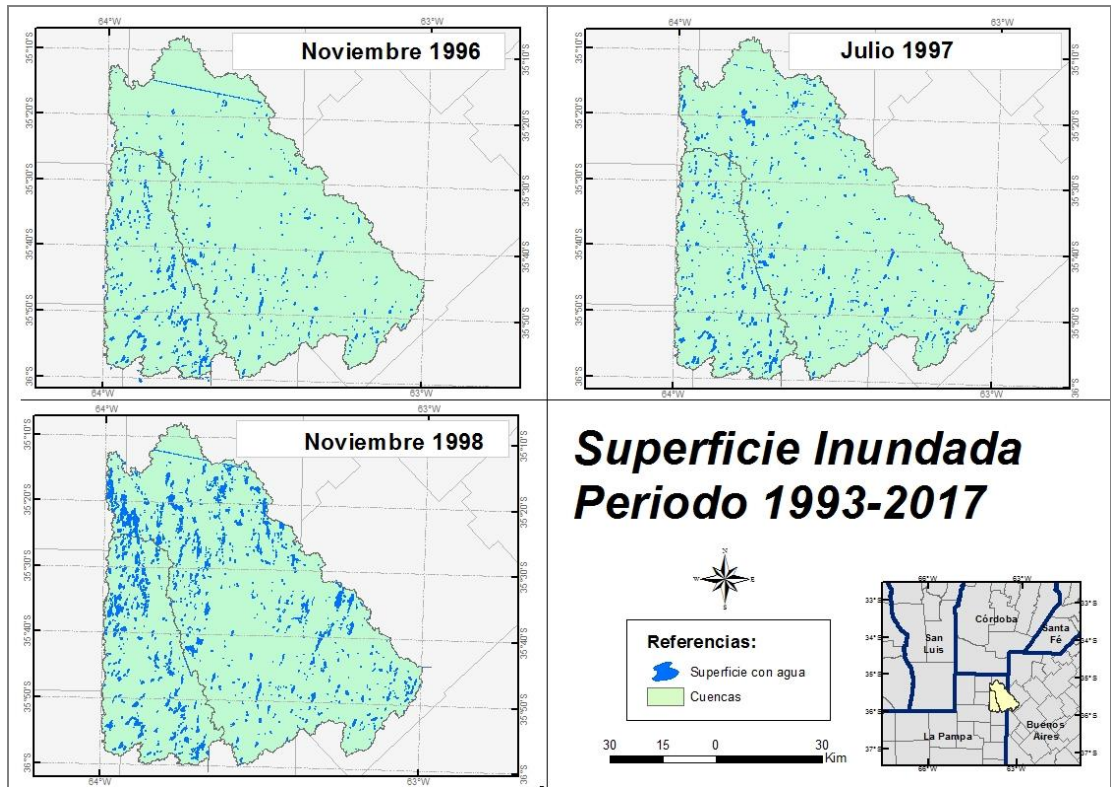
- Vázquez, P. (2017c).** Emergencia agropecuaria en la provincia de La Pampa. Inundaciones periodo 19 de abril-29 de junio de 2017. Informe Técnico INTA. EEA Anguil. Recuperado de: https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_informe_inundaciones_la_pampa_20170628.pdf
- Vázquez, P. (2017d).** Emergencia agropecuaria en la provincia de La Pampa. Inundaciones periodo 19 de abril-17 de julio de 2017. Informe Técnico. INTA. EEA Anguil. Recuperado de: https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_informe_inundaciones_20170717.pdf
- Vázquez, P. (2017e).** Emergencia agropecuaria en la provincia de La Pampa. Inundaciones periodo 19 de abril-22 de agosto de 2017. Informe Técnico. INTA. EEA Anguil. Recuperado de: https://inta.gob.ar/sites/default/files/informe_inundaciones_20170822.pdf
- Vázquez, P. (2019).** Emergencia agropecuaria en la provincia de La Pampa. Seguía octubre 2019. Informe Técnico. INTA. EEA Anguil. Recuperado de: https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_informe_tecnico_sequia_20191003.pdf
- Vénere, M.; Clause, A.; Dalponte, D.; Rinaldi, P.; Cazenave, G.; Varni, M.; Vives, L.; Usunoff, E. (2004).** Simulación de inundaciones en llanuras: Aplicación a la Cuenca del Arroyo Santa Catalina, Azul. *Mecánica Computacional* 23: 1135-1149.
- Verburg, P.H.; Veldkamp, A. (2001).** The role of spatially explicit models in land use change research sequences – a case study for cropping patterns in China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 85, 177-190.
- Vergara, G.; Casagrande, G.; Sierra, E.; Pérez, S.; Brevedan, E. (2005).** Comportamiento de las precipitaciones (1921-2000) en el este de la provincia de La Pampa (Argentina). *Revista de la Facultad de Agronomía (UNLPam)*, 16(1/2). Recuperado de: <https://core.ac.uk/download/pdf/322503982.pdf>
- Viglizzo, E.F.; Frank, F.C. (2006).** Ecological interactions, feedbacks, thresholds and collapses in the Argentine Pampas in response to climate and farming during the last century. *Quaternary International* 158: 122-126.
- Viglizzo, E.F.; Pordomingo, A.J.; Castro, M.G.; Lértora, F.A. (2002).** La sustentabilidad ambiental de la agricultura pampeana ¿oportunidad o pesadilla? *Ciencia Hoy* 12: 38-51.
- Viglizzo, E.; Jobbágy, E.; Carreño, L.; Frank, F.; 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: 1-12.
- Wang, G.; Eltahir, E.A.B. (2000).** Ecosystem dynamics and the Sahel drought. *Geophysical Research Letters*. 27(6): 795–798.
- Withers, P.J.A.; Hodgkinson, R.A.; Bates, A.; Withers, C.L. (2007).** Soil cultivation effects on sediment and phosphorus mobilization in surface runoff from three contrasting soil types in England. *Soil Tillage Research*. 93: 438–451.

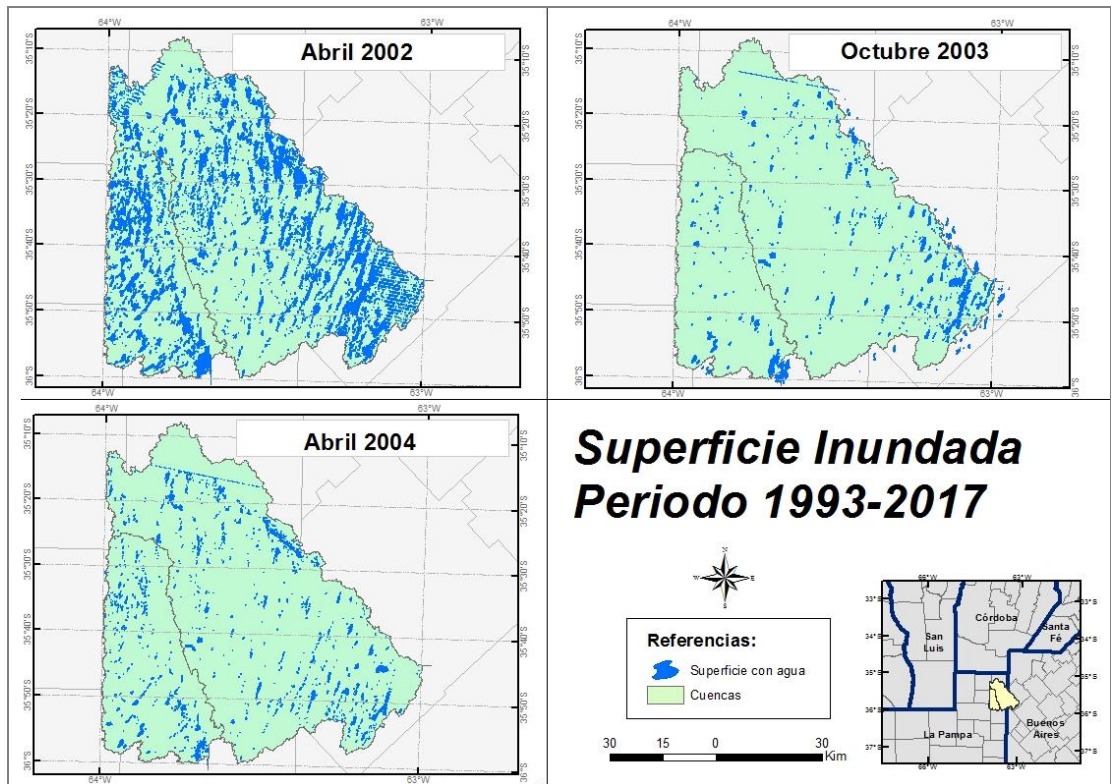
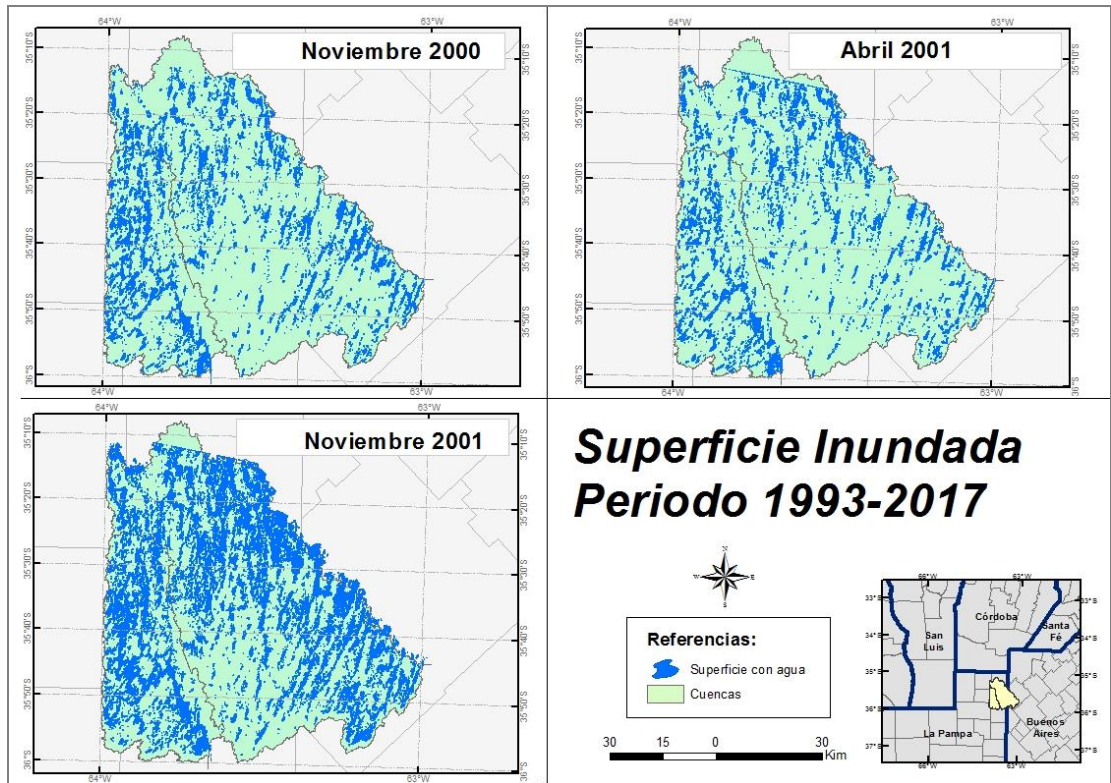
- Zeng, N.; Neelin, J.D.; Lau, K.M.; Tucker, C.J. (1999).** Enhancement of interdecadal climate variability in the Sahel by vegetation interaction. *Science*. 286: 1537–1540.
- Zhang, Y.K.; Schilling, K.E. (2006).** Increasing streamflow and baseflow in Mississippi River since the 1940s: Effect of land use change. *Journal of Hydrology* 324: 412–422.
- Zimmermann, E.D. (1995).** Implicancias antrópicas en los procesos de inundaciones de áreas llanas. *Jornadas Regionales Interdisciplinarias sobre Ambiente*. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas. Santa Fe, Argentina. 11 p.
- Zimmermann, E.D. (2017).** Ciclo hidrológico en la naturaleza. Balance hidrológico. En: Orsolini, H.E., Zimmermann, E.D., Basile, P.A. (eds.). *Hidrología: Procesos y Métodos*. Universidad Nacional de Rosario, Argentina, pp. 1-18.

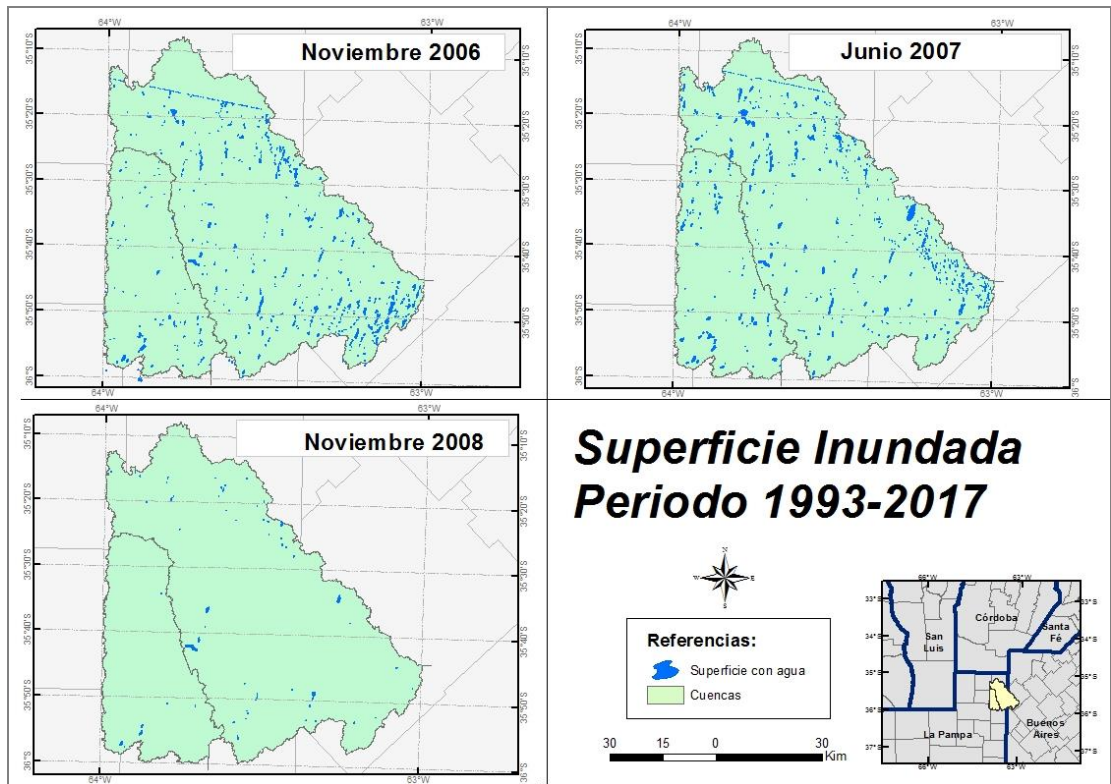
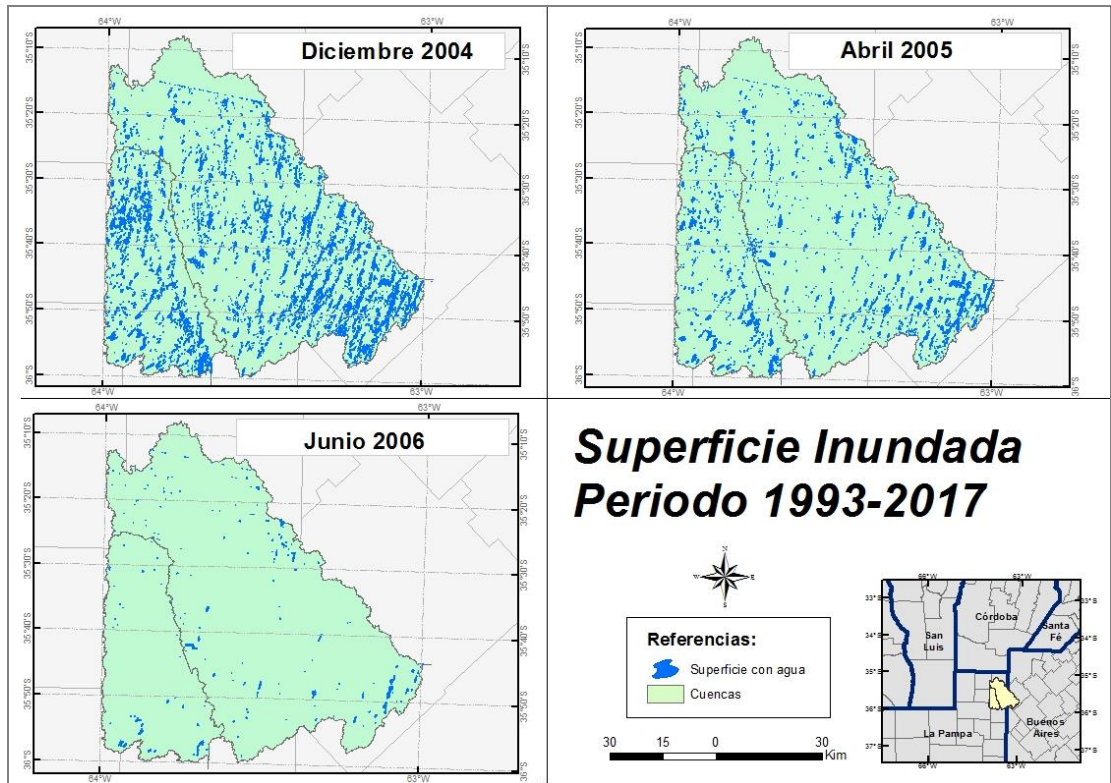
APENDICE A

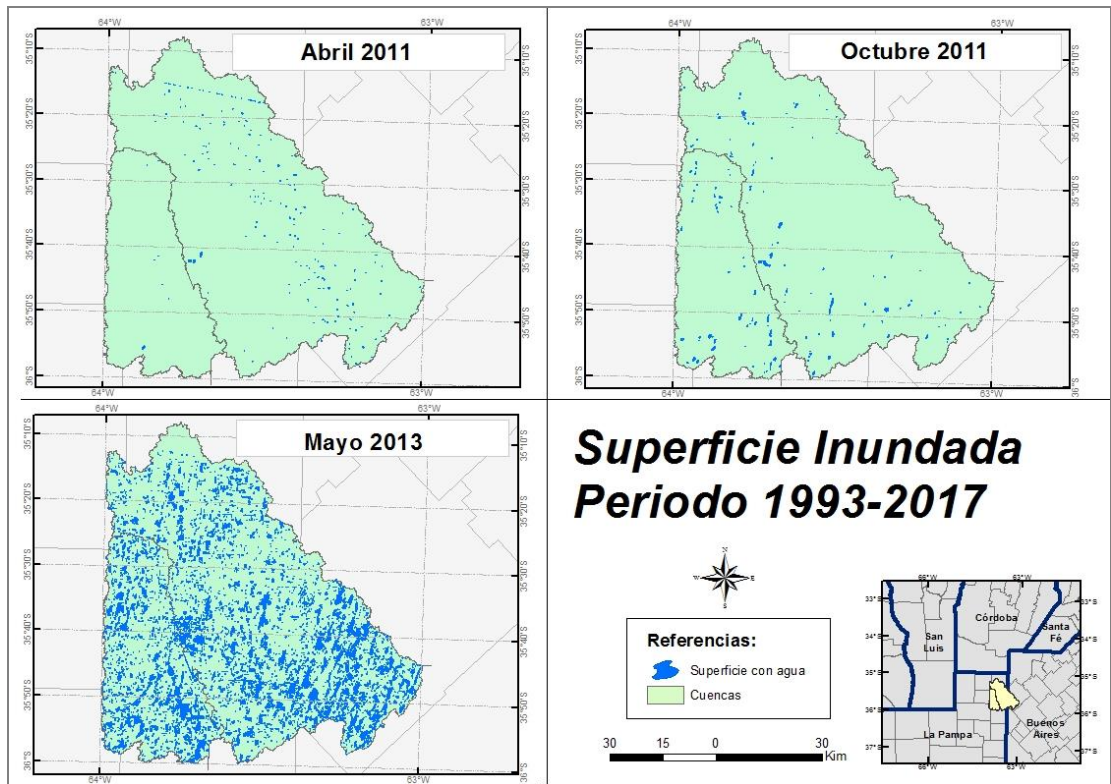
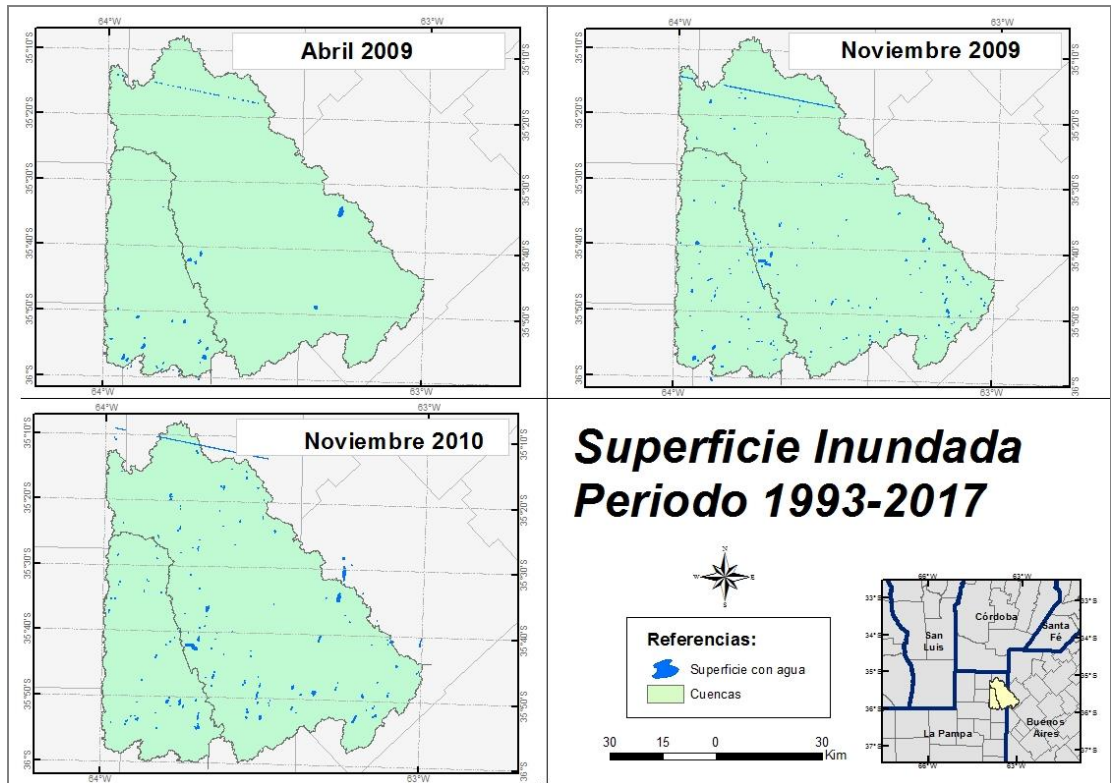
Superficie inundada Periodo 1993-2017

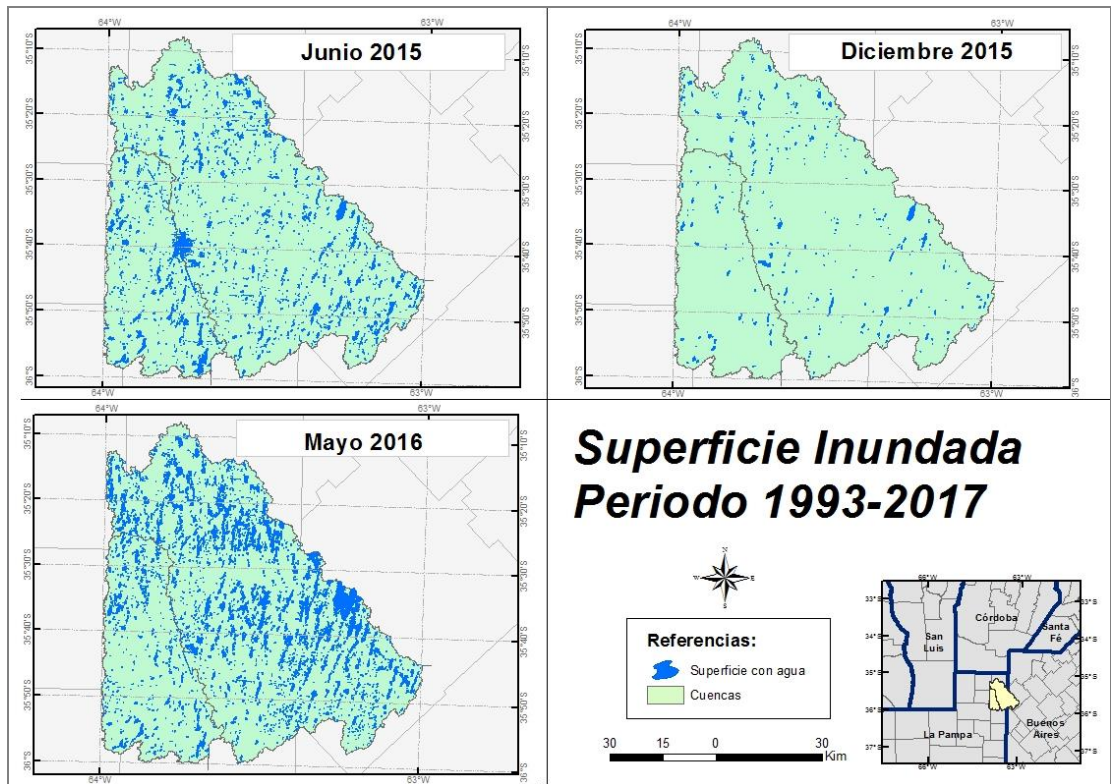
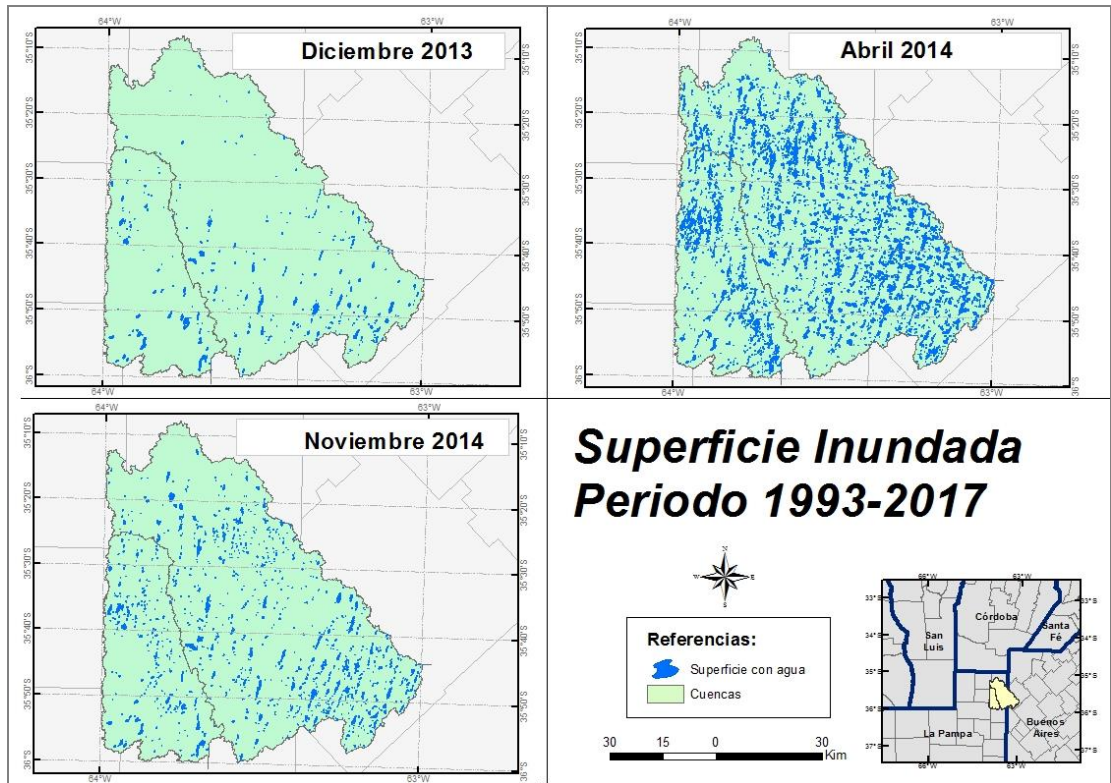


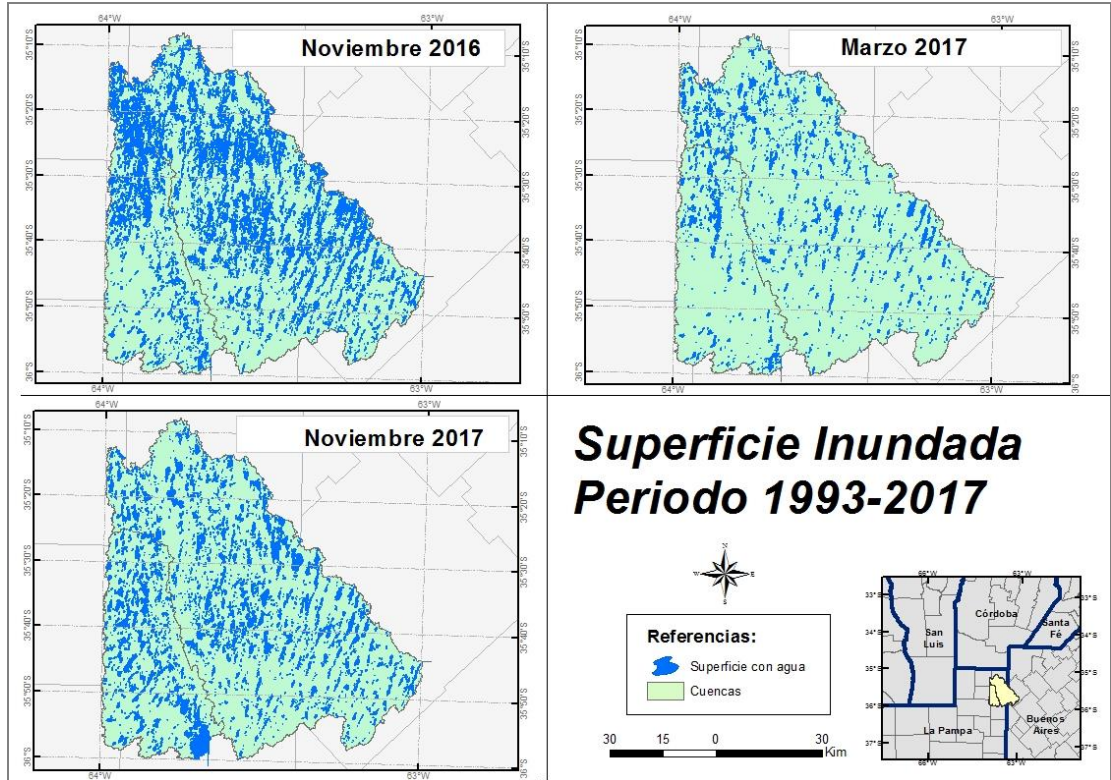






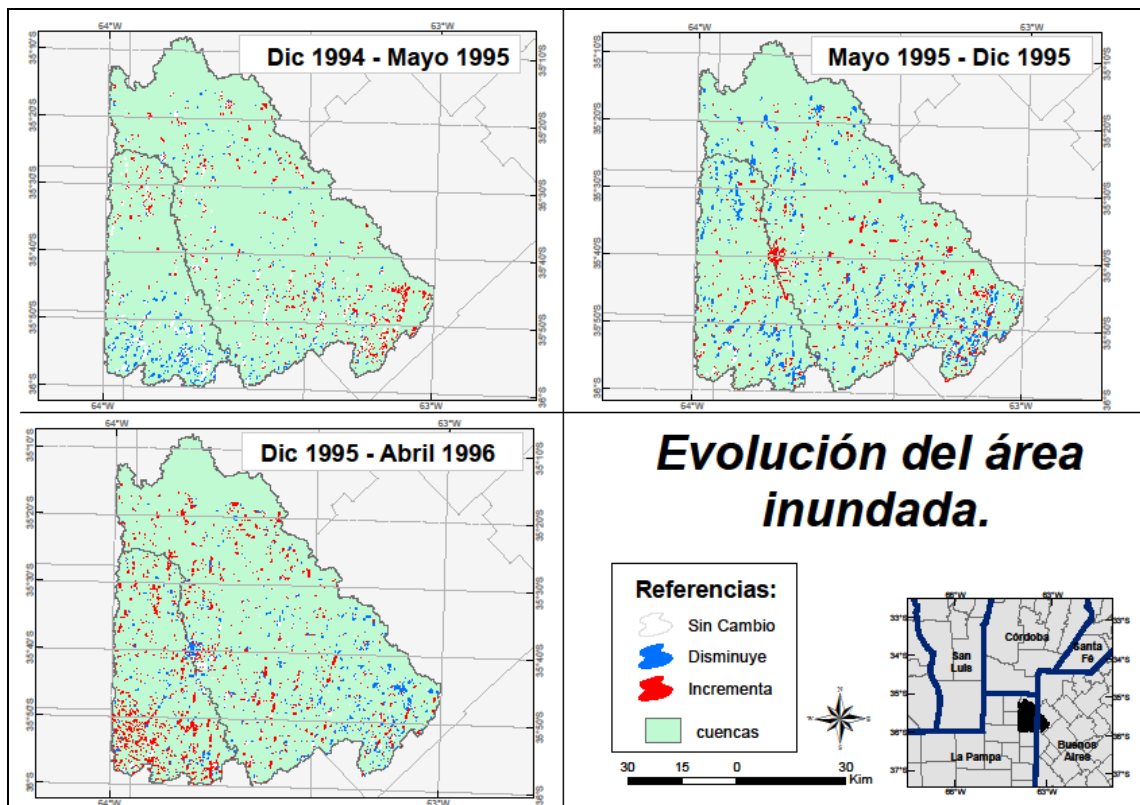
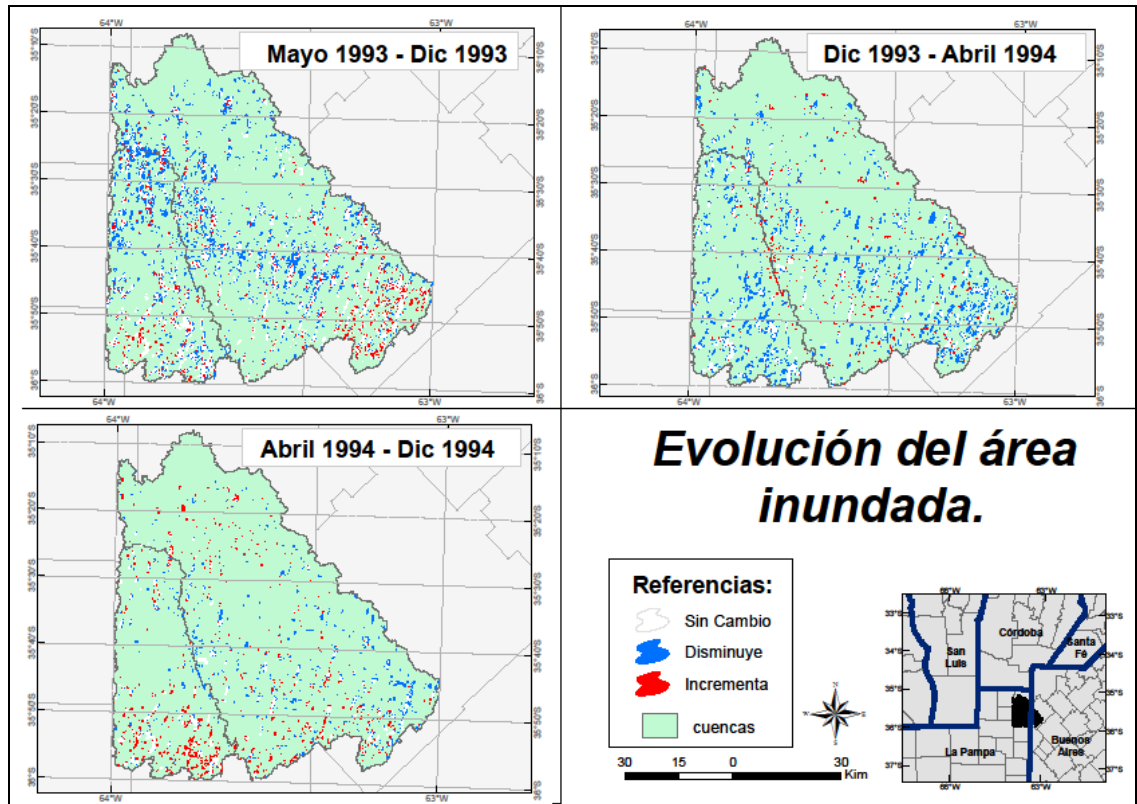


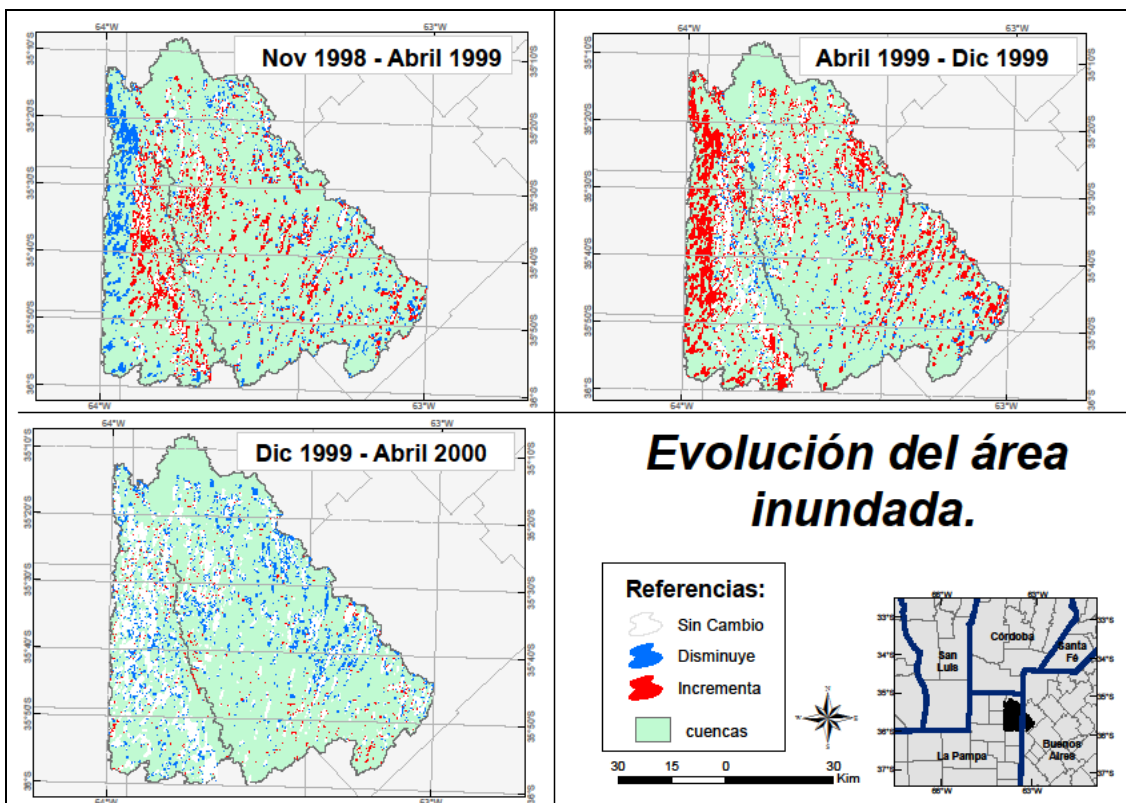
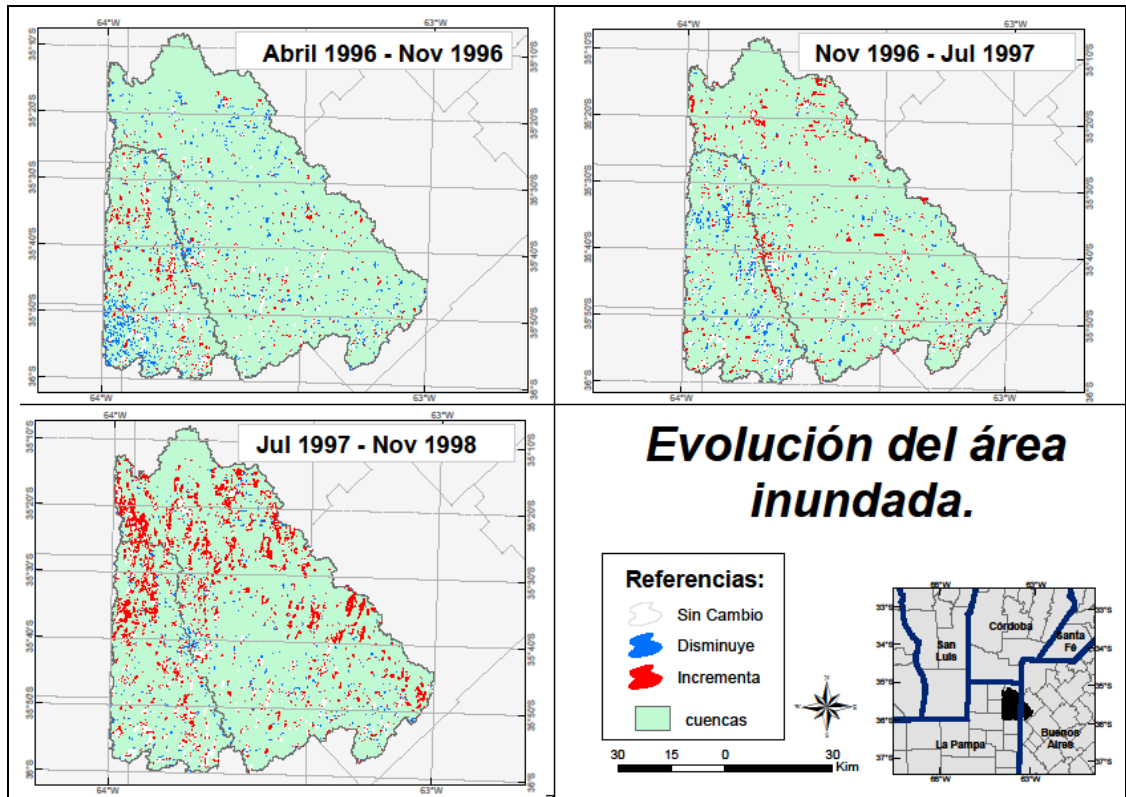


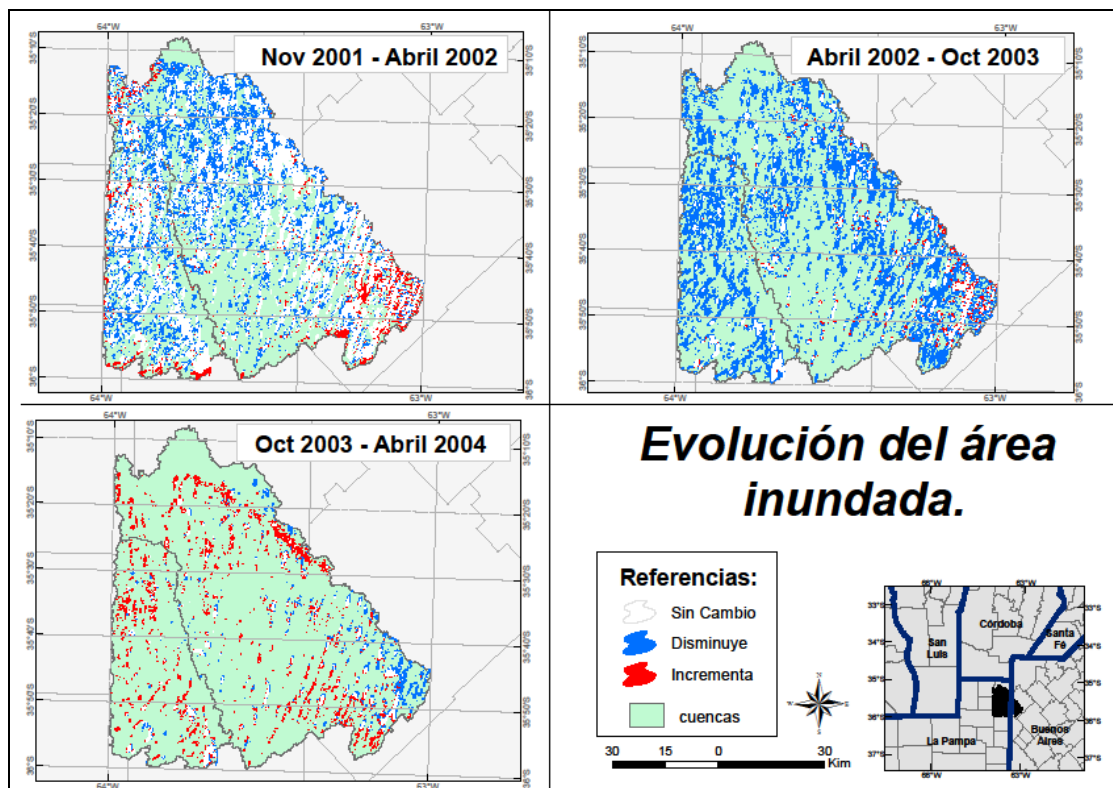
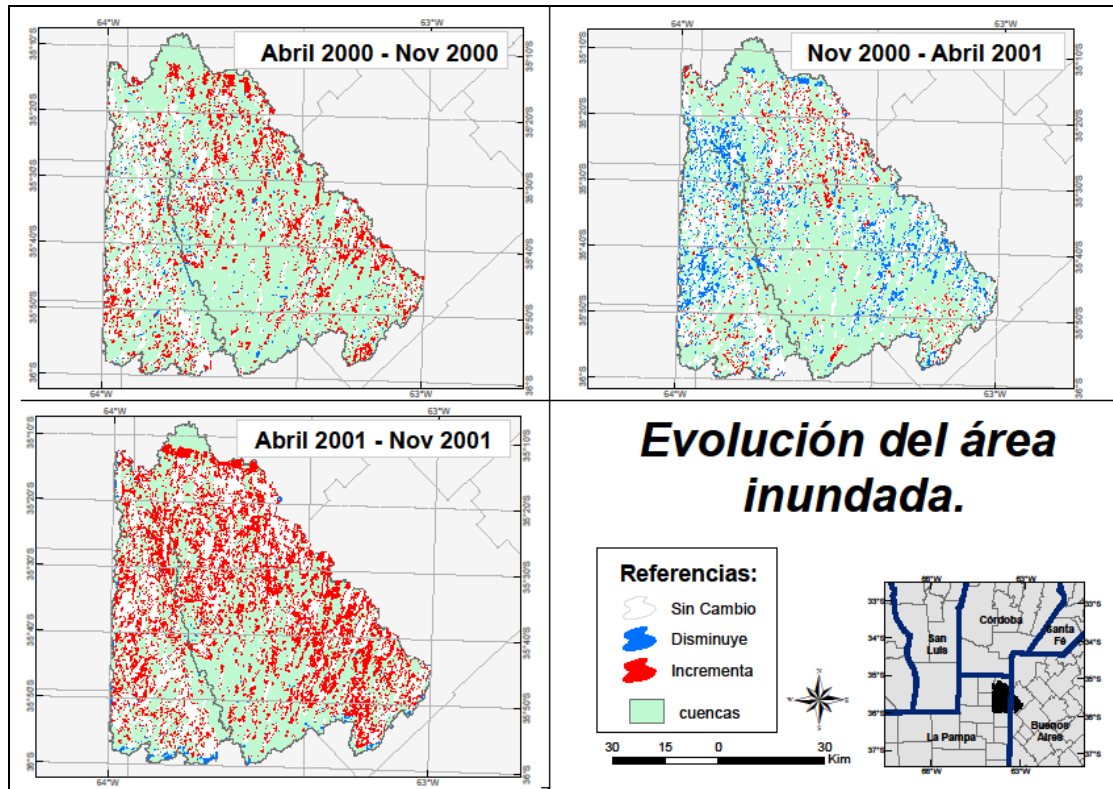


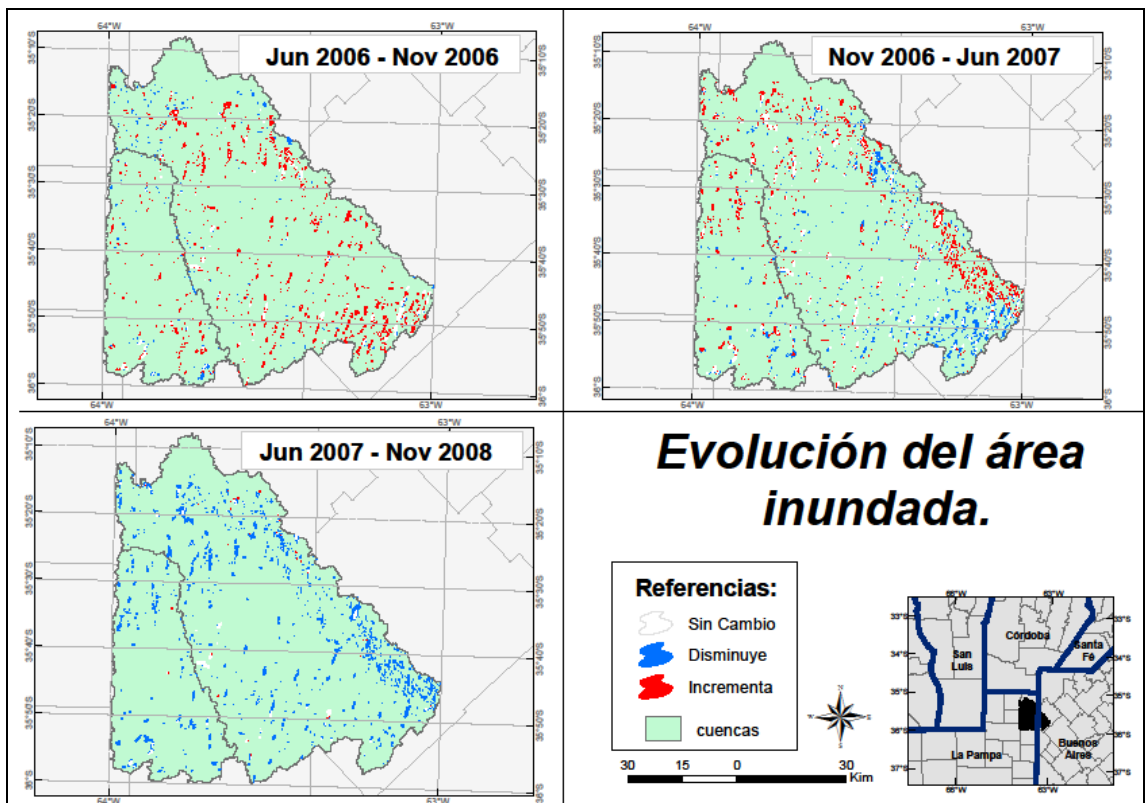
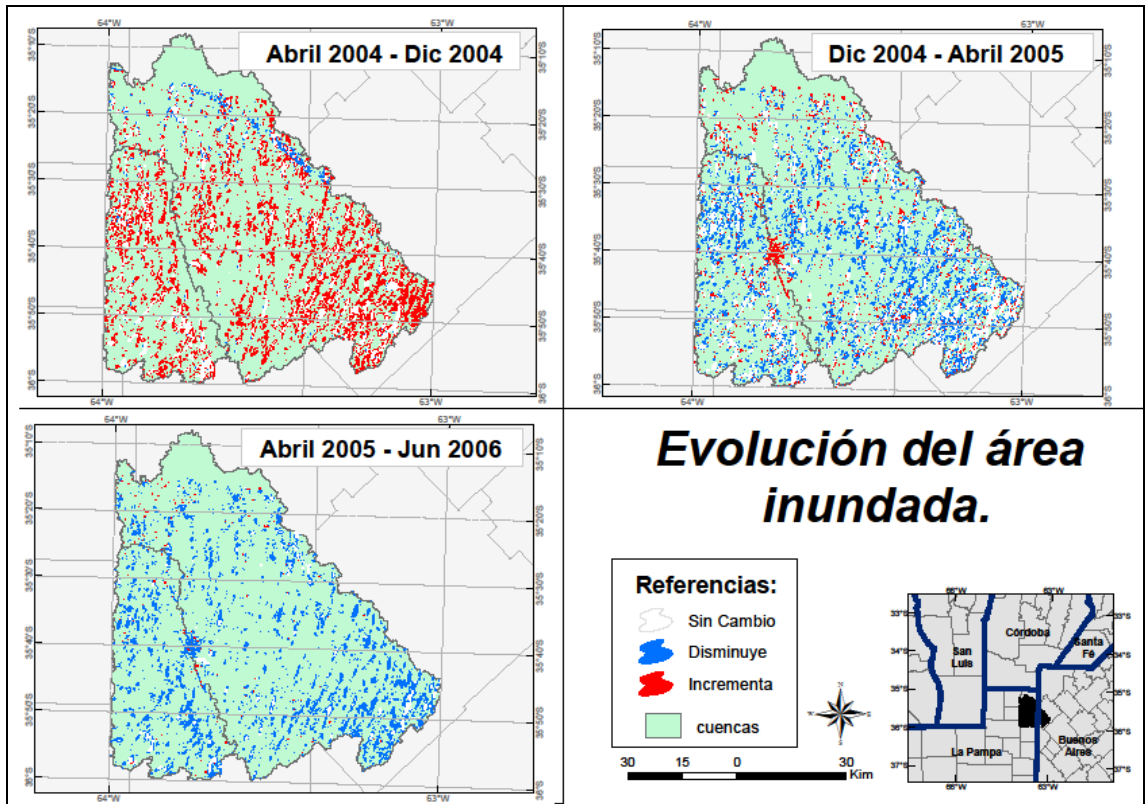
APENDICE B

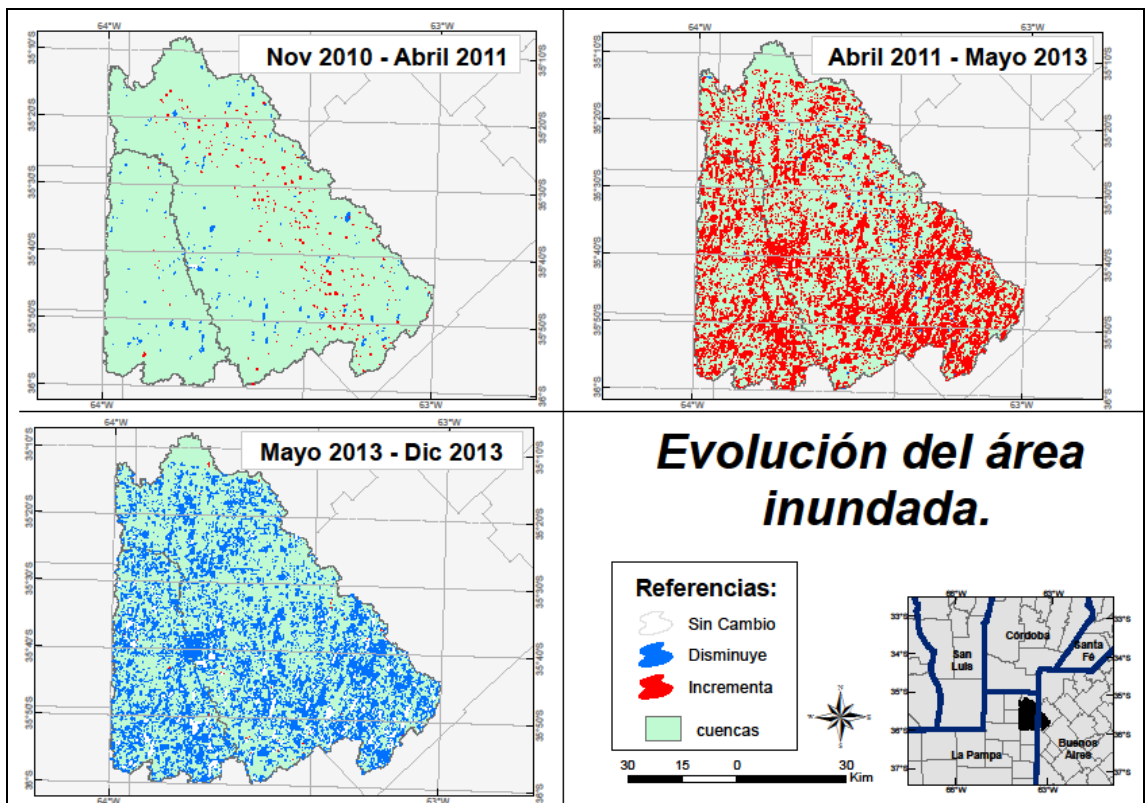
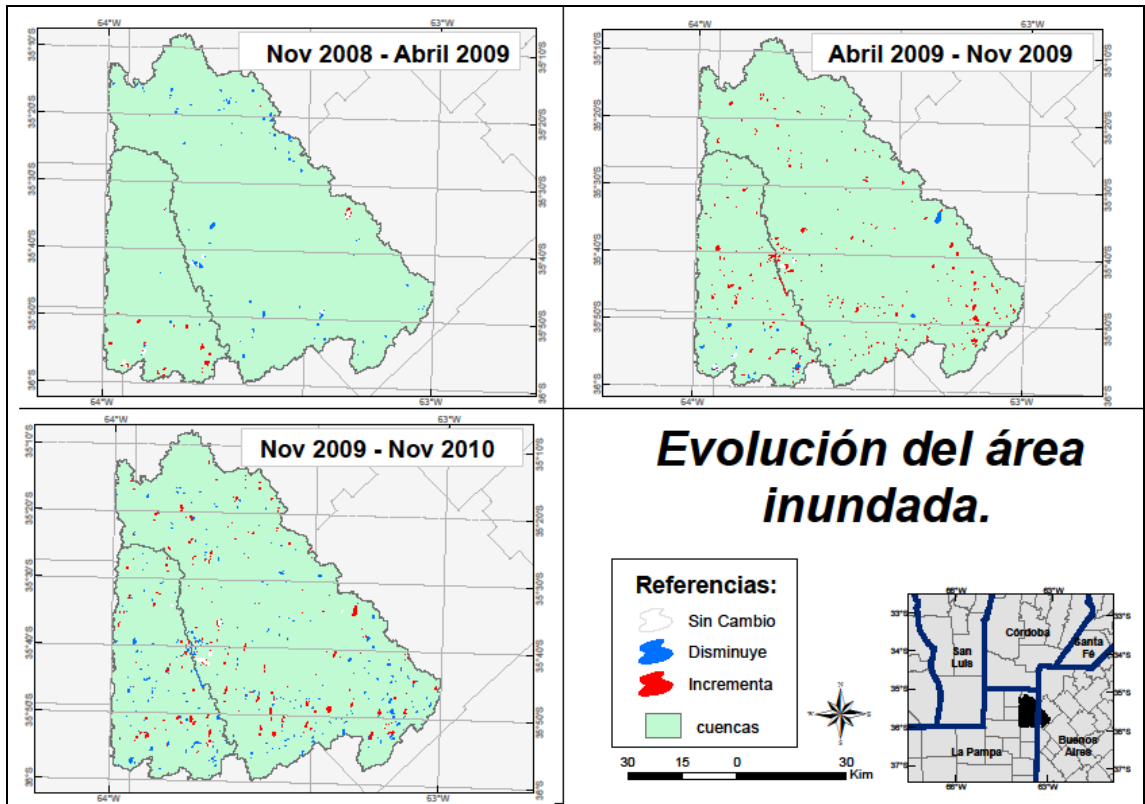
Evolución del área inundada Periodo 1993-2017

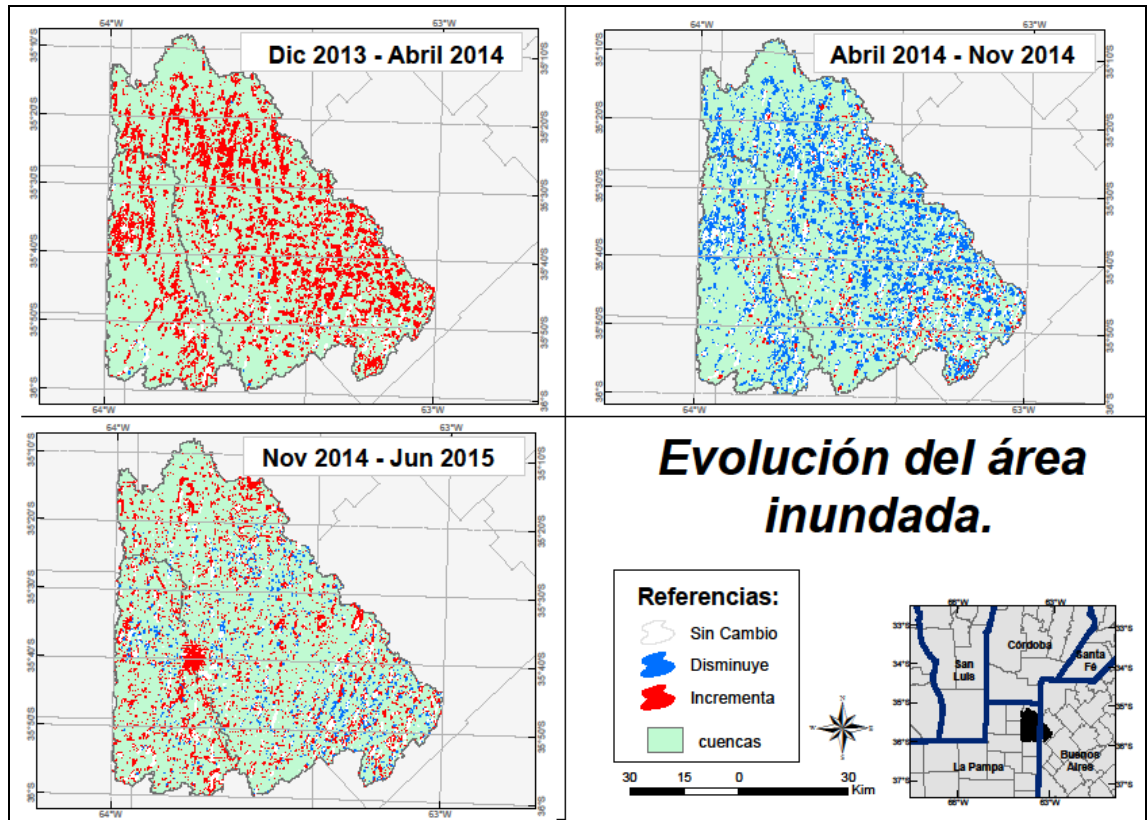


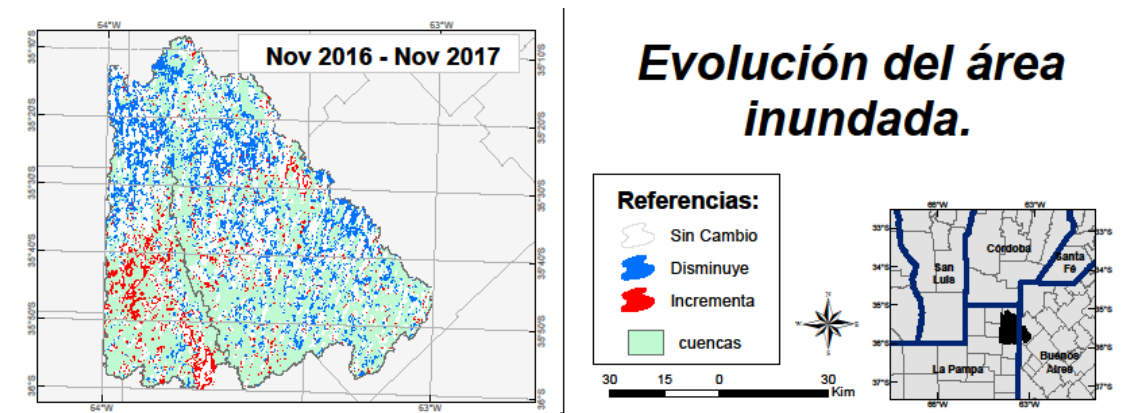
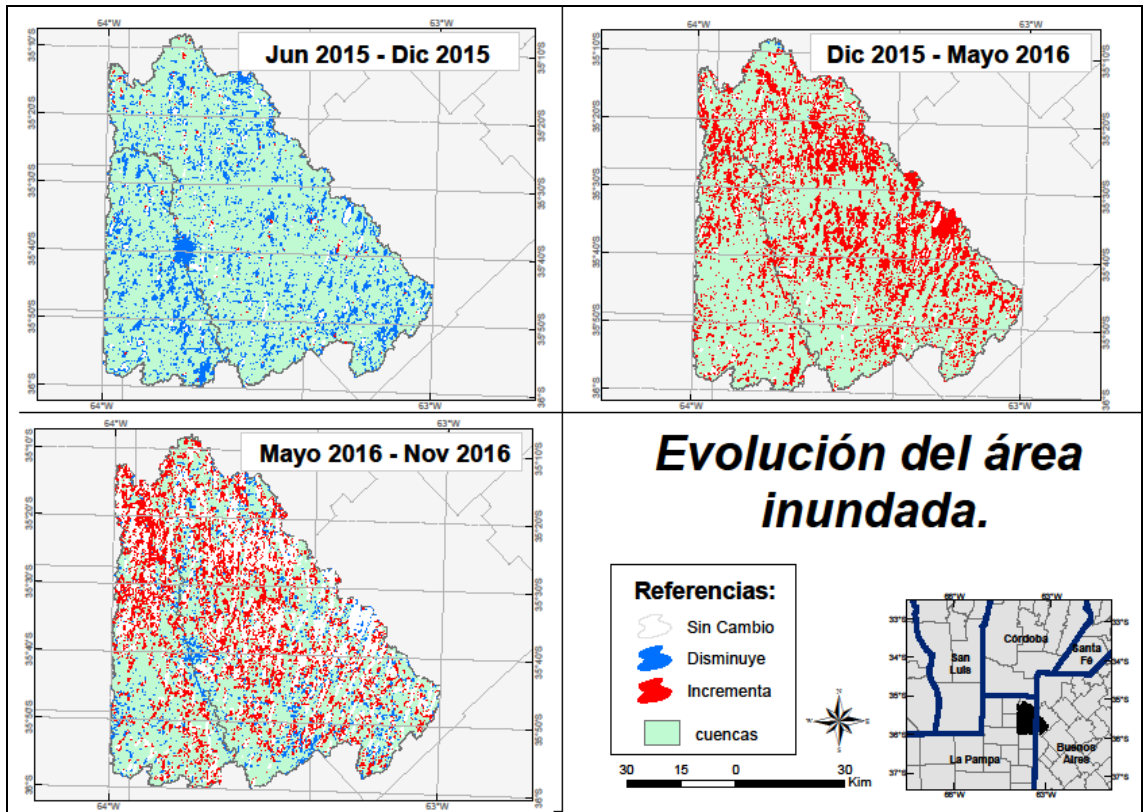












APENDICE C

Isohietas quinquenales Periodo 1993-2017

