

Inundaciones y su relación con el clima y la hidrología subterránea en el Noroeste de Buenos Aires (1980-2010): Aplicación de percepción remota.

Trabajo final presentado para la Especialización en Teledetección y Sistemas de Información Geográfica Aplicados al Estudio de los Recursos Naturales y la Producción Agropecuaria

Silvina Inés Ballesteros

Ingeniera Agrónoma - Universidad Nacional de Entre Ríos - 2005

Grupo de Estudios Ambientales. Instituto de Matemática Aplicada San Luis (CONICET
- Universidad Nacional de San Luis)



Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano
Facultad de Agronomía – Universidad de Buenos Aires

COMITÉ CONSEJERO

Director de tesis

Esteban G. Jobbágy

Ingeniero Agrónomo (Universidad de Buenos Aires)

PhD. Biología (Duke University-EE.UU.)

JURADO DE TESIS

Director de tesis

Esteban Gabriel Jobbágy

Ingeniero Agrónomo (Universidad de Buenos Aires)

PhD. Biología (Duke University-EE.UU.)

JURADO

Carlos Marcelo Di Bella

Ingeniero Agrónomo (Universidad de Buenos Aires)

Doctor del Institut National Agronomique Paris-Grignon (Paris-Francia)

JURADO

Mariano Oyarzabal

Ingeniero Agrónomo (Universidad de Buenos Aires)

Doctor en Ciencias agropecuarias (Universidad de Buenos Aires)

Fecha de defensa de la tesis: 25 de Junio de 2014

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a mi director de tesis, Esteban J, quien me incentivó para realizar la Especialización, por su orientación y aportes durante el proceso de elaboración de la tesis.

También quiero agradecer a los integrantes del Tribunal de Evaluación, a quienes corresponde el mérito de juzgar el trabajo y contribuir con sus apreciaciones a una potencial mejora de la tesis.

A Roxana Aragón por los datos aportados a esta investigación, sus comentarios y sugerencias.

A mis compañeros del GEA (Germán, Javier, Celina, Carla, Jorge, Raúl, Marisa, Ricardo, Eva, Flavia, Pato, Sylvain, Sofía). Un agradecimiento especial a Germán que me ayudó a mejorar distintas secciones de la tesis

El presente trabajo no hubiera sido posible de desarrollar sin la ayuda del GEA, por haber solventado los gastos derivados de la Especialización y brindarme las condiciones laborales adecuadas para concluirla.

Finalmente quiero agradecer a mi familia de Paraná, a Marcelo por su apoyo incondicional y afecto, y a mis dos seres especiales, Lucía y Nicolás.

"Declaro que el material incluido en esta tesis es, a mi mejor saber y entender, original, producto de mi propio trabajo (salvo en la medida en que se identifique explícitamente las contribuciones de otros), y que este material no ha sido presentado, en forma parcial o total, como una tesis en ésta u otra institución."

INDICE GENERAL

Agradecimientos.....	iii
Declaración.....	iv
Índice General.....	v
Índice de Tablas.....	vii
Índice de Figuras	viii
Lista de Abreviaturas.....	ix
Resumen.....	x
Abstract.....	xi
1. Introducción.....	1
2. Materiales y método.....	3
2.1. Descripción del área de estudio.....	3
2.2. Estimación con imágenes Landsat del área inundada	4
2.3. Estimación con imágenes MODIS del área inundada.....	6
2.4. Relación entre inundación, clima, hidrología y uso de la tierra.....	8
2.5. Caracterización de las superficies sembrada y cosechada.....	9
3. Resultados.....	11
3.1. Estimación con imágenes Landsat del área inundada.....	11
3.2. Estimación con imágenes MODIS del área inundada	12
3.3. Relación entre inundación, clima, hidrología y uso de la tierra.....	13
3.3.1. Caracterización climática del período de estudio.....	13
3.3.2. Análisis de la variabilidad freática.....	14
3.3.3. Caracterización de las superficies sembrada y cosechada.....	15
3.3.4. Relación entre precipitación, área inundada, variación del nivel freático y uso de la tierra sobre el área inundada (%)......	16

4. Discusión.....	20
5. Conclusiones.....	23
6. Bibliografía.....	24

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Características de los sensores montados en las plataformas de los satélites Landsat.....	Pág.4
Tabla 2: Lista de las imágenes satelitales utilizadas para estimar el área inundada.....	Pág.5
Tabla 3: Descripción de las bandas del producto MOD13Q1.....	Pág.7
Tabla 4: Análisis de correlación entre el % inundado y el nivel freático, Δ nivel freático, PPT, ETP y balance de agua para distintos meses de acumulación. Números en negrita significa valores de $p < 0,05$	Pág.16
Tabla 5: Análisis de correlación entre la fracción del área inundada y la fracción del área sembrada o cosechada y su diferencia.....	Pág.19

INDICE DE FIGURAS

- Figura 1: Ubicación de la zona de estudio en el NO de Buenos Aires (escena Landsat 227/85) con detalle de los distritos de los Pastizales del Río de La Plata en el área de estudio (Soriano et al. 1991).....Pág.1
- Figura 2: Escena Landsat (227-85) del año 2001. Se indica el polígono en la zona superior derecha donde se efectuó una caracterización del área inundada con mayor resolución temporal (cada ~30 días) y el polígono en la zona inferior derecha donde se describió la relación entre un freatómetro (punto rojo) y el área inundada..... Pág.6
- Figura 3: Relación entre el área inundada (%) estimado con la clasificación con umbral y el área inundada (%) estimado a partir del algoritmo de Aragón et al (2010) para un período de 10 años (1996-2005)..... Pág.11
- Figura 4: (a) Porcentaje de área inundada de la zona de estudio para el período 1980-2010 en una superficie de 24000 km². (b) Dinámica de inundación del período 1985 – 1989 (primera inundación) y 2000 – 2003 (segunda inundación) para un área de 540 km² analizada con mayor detalle (ver Figura 2). Las líneas azules punteadas indican el lapso del estudio con mayor resolución temporal que corresponde a las dos grandes inundaciones que alcanzaron sus respectivos máximos en los años 1987 y 2001... Pág.12
- Figura 5: Relación entre el área inundada (%) estimado con Landsat y el porcentaje estimado con MODIS por el método (a) Lineal, (b) Probabilístico y (c) Exhaustivo..Pág.13
- Figura 6: (a) Valores anuales de precipitación y ETP para período Enero-Diciembre. (b) Nivel freático mensual y media móvil de 12 meses. (c) Porcentaje de la superficie sembrada y cosechada de la zona de estudio para el período 1980-2010.....Pág.15
- Figura 7: (a) Relación entre el área inundada y PPT para un período de 24 meses acumulados; (b) Relación entre el área inundada y balance para un período de 36 meses acumulados.....Pág.17
- Figura 8: Nivel de asociación (coeficiente de correlación de Pearson) entre porcentaje de área inundada y (i) balance hídrico, (ii) PPT y (iii) nivel freático absoluto, en relación a los diferentes meses acumulados.....Pág.17
- Figura 9: a) Relación entre el nivel freático y el área inundada (%) de toda la zona de estudio para los períodos de 1980-1995 ($r=0,87$; $P<0,05$) y 1996-2010 ($r=0,85$; $P<0,05$); b) Relación entre el nivel freático y el área inundada (%) para la zona de estudio seleccionada en los alrededores del freatómetro ubicado en el departamento Daireaux. Se indica con flechas rojas la trayectoria.....Pág.19

Lista de abreviaturas

Δ nivel freático	Delta nivel freático
NO	Noroeste
ETP	Evapotranspiración potencial
EVI	del inglés Enhanced Vegetation Index
MIR	del inglés Mid Infrared
MODIS	del inglés Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
NDVI	del inglés Normalized Differences Vegetation Index
NIR	del inglés Near Infrared
PPT	Precipitación
SMA- ALME	Análisis Lineal de Mezcla Espectral
UTM	del inglés Universal Transversal Mercator

Título: Inundaciones y su relación con el clima y la hidrología subterránea en el Noroeste de Buenos Aires (1980-2010): Aplicación de percepción remota.

Resumen

Gran parte de la llanura pampeana Argentina presenta una escasa red de drenaje superficial y niveles freáticos cercanos a la superficie que, junto a los excesos hídricos, producen a menudo inundaciones provocando un fuerte impacto sobre los ecosistemas naturales y modificados. En esta tesis, mediante la utilización de sensores remotos, caractericé el área inundada y su relación con condicionantes climáticos, hidrológicos y de uso de la tierra para el período 1980-2010 en una superficie de ~24.000 km² en el noroeste de la provincia de Buenos Aires. La estimación de la fracción del área inundada mediante una clasificación con umbral en la banda 5 de imágenes Landsat presentó alta confiabilidad cuando se la comparó con un método más complejo de clasificación preexistente ($r^2=0,99$, EEest = 1%, n = 10). Se observaron fuertes oscilaciones de la superficie inundada lo largo del período de estudio con valores extremos de 0,96 y 27,7%. Se identificaron claramente dos grandes ciclos completos de inundación en 1987 y 2001, los que llegaron a cubrir el 22,5 y 27,7% del territorio respectivamente y retrayéndose a niveles < 5% en los siguientes dos años en ambos episodios. La utilización del producto MOD13Q1 del sensor MODIS para estimar el área inundada empleando la técnica de Análisis Lineal de Mezclas Espectrales presentó altos niveles de error cuando se lo comparó con las estimaciones realizadas con Landsat. El análisis que vinculó al área inundada con la precipitación (PPT), el nivel freático absoluto y sus variaciones, la evapotranspiración potencial (ETP) y el balance hídrico, mostró que la precipitación fue el factor que más estuvo asociado a los eventos de inundación aun con períodos largos de integración de 24 y 36 meses. La inclusión de la evapotranspiración en el análisis, tanto en forma directa como a través del balance PPT-ETP, no mejoró en forma apreciable la explicación de las inundaciones. El nivel freático absoluto mostró una asociación alta con el área inundada (mayor inundación con niveles más superficiales) a la escala de 3 meses, perdiendo peso como variable explicativa en períodos más extensos. Ante la posibilidad de que se desarrollen nuevos eventos de inundación masiva en la llanura pampeana es trascendental avanzar en el conocimiento de las interacciones entre la hidrología, el clima y el uso del suelo a fin de compatibilizar estrategias agrícolas con estrategias de ordenamiento hidrológico del territorio para reducir el impacto de dichos eventos.

Palabras claves: Landsat, inundación, precipitación, nivel freático, llanura pampeana, uso de la tierra.

Title: Flooding and its relation with climate and groundwater hydrology in Northwestern Buenos Aires (1980-2010): Application of remote sensing.

Abstract

Most of the Pampas plain has a poor surface drainage with shallow water-table levels which, together with water excesses, leads to frequent flooding events that strongly impact on natural and modified ecosystems. In this thesis, I characterized the flooded area and its relation to climate, hydrology and land use for the period 1980-2010 in an area of ~24.000 km² in the northwest of Buenos Aires province through the use of remote sensing and climate and land use statistics. The estimation of the flooded area by image classification based on a threshold in the band 5 of Landsat images showed high accuracy when compared to a more complex classification method ($r^2 = 0.99$, EEest = 1%, n=10). A strong variability of the flooded area was observed along the study period, with extreme values of 0.96 and 27.7%. Two complete flooding cycles were clearly identified in 1987 and 2001, which covered 22.5 and 27.7% of the landscape, respectively, and retracted to levels <5% in the next two years of both episodes. The estimation of the flooded area through Linear Mixing Spectral Analysis of MOD13Q1 product from MODIS showed high error levels when it was compared with Landsat estimations. The analysis of the relationships between the flooded area and precipitation (PPT), absolute water-table levels, water-table level variations, potential evapotranspiration (ETP), and water balance, showed that precipitation was the most important factor explaining flooding events, even when long integration periods of 24 and 36 months were considered. The inclusion of evapotranspiration in the analysis, directly and through the PPT-ETP balance, did not improve noticeably the explanation of flooding. The absolute water-table level showed high association with the flooded area (higher flooding with shallower WT levels) at a 3-month scale, but the explanatory power decreased with longer integration periods. Given the possibility of new massive flooding events in the Pampas, it is important to gain knowledge about the interactions between hydrology, climate and land use in order to reconcile agricultural strategies with the hydrological management of the territory to reduce the impact of such events.

Keywords: Landsat, flooding, precipitation, groundwater, pampas plain, land use.

1. Introducción

En la llanura Pampeana con frecuencia se producen inundaciones que afectan el normal desarrollo y actividad de los asentamientos urbanos, las vías de comunicación y la producción agropecuaria en general (Viglizzo y Frank 2006). La llanura Pampeana es una planicie sedimentaria que abarca más de 600,000 km², con una escasa red de drenaje superficial hacia el océano y una napa freática cercana a la superficie que, junto a los excesos hídricos, produce a menudo inundaciones. Los ciclos de sequía-inundación provocan cambios en la profundidad del nivel freático que ejercen una importante influencia sobre los ecosistemas naturales y modificados (Aragón et al. 2010, Nosetto et al. 2009). Por otro lado, los cambios en el uso de la tierra de esta región, involucran cambios en la cobertura vegetal capaces de afectar el balance hídrico (Paruelo et al. 2006, Jobbágy et al. 2008, Nosetto et al. 2009), y se ha especulado que estos cambios podrían favorecer o contrarrestar el desarrollo de inundaciones y los procesos de salinización (Viglizzo et al. 2011). A las tendencias de largo plazo en el uso de la tierra de la región deben sumarse los aumentos de las precipitaciones anuales y de la contribución del período estival a las mismas en las últimas décadas, en especial la Pampa Interior (Taboada et al. 2009). En general, las relaciones entre el uso de la tierra y su hidrología han sido poco estudiadas en la pradera pampeana (Paruelo y Sala 1990, Basualdo y Forte Lay 2004, Jobbágy et al. 2008, Nosetto et al. 2009, Viglizzo et al. 2009).

La región, históricamente dominado por pastizales nativos, se transformó poco a poco a una matriz mixta de pastizales nativos, cultivos anuales y pasturas a partir de finales del siglo XIX (Hall et al. 1992). Sin embargo, desde la década de 1980, y especialmente en la última década, el remanente de pastizales y de praderas fue casi completamente convertido a la agricultura anual, siendo la soja el cultivo dominante en la actualidad. Debido a la baja evapotranspiración y los sistemas de raíces menos profundas de los cultivos anuales en comparación con pasturas (Nosetto et al. 2012), este cambio de uso del suelo generalizado se ha relacionado con un aumento de los niveles freáticos, de los eventos de inundación y de la aparición de problemas de salinización, según lo sugerido por registros históricos, los patrones de uso del suelo y la modelización hidrológica (Contreras et al. 2008, Viglizzo et al. 2009). Los cambios en el uso del suelo podrían tener efectos importantes sobre hidrología en general y en particular sobre las inundaciones.

Los eventos de inundaciones tienen un fuerte impacto en las economías rurales ya que pueden deteriorar la infraestructura rural, disminuir el área cultivable, y pueden desencadenar procesos de salinización de difícil remediación (Taboada et al. 2009). Un trabajo realizado por Aragón et al (2010) en el Oeste de las Pampas encuentra que las inundaciones afectaron hasta un 28% del paisaje en el último ciclo que tuvo lugar entre 1997 y 2002, y que esto estuvo asociado a un ascenso de los niveles freáticos de aproximadamente 2,5 m y una acumulación subterránea y superficial de excesos hídricos durante este período que alcanzó una media regional de 800 mm de lámina de agua.

El agua subterránea está relacionada con el agua en superficie, y en la llanura la dinámica de la napa freática controla la formación y expansión de los cuerpos de agua, determinando la magnitud de los eventos de inundaciones (Brunke y Gonser 1997, Ferone y Devito 2004). A pesar de este contexto, el papel de las aguas subterráneas ha sido tradicionalmente subestimado (Pringle 2001). En este trabajo, se explorará la relación entre precipitaciones, área inundada y variación del nivel freático y el papel que

tiene sobre ella el uso de la tierra para explicar la dinámica de las inundaciones en zonas agrícolas con muy poca pendiente y escasa red de drenaje. Se aplican para ello diversas fuentes de información satelital, complementada con datos de campo.

Las inundaciones son uno de los fenómenos más dramáticos que afectan tanto a la población humana y a los sistemas naturales. Disponer de herramientas que permitan el análisis de eventos históricos de este fenómeno y el seguimiento de las áreas afectadas es importante para la generación de cartografías de vulnerabilidad, para la planificación del uso del territorio, para determinar los alcances de la situación de emergencia, y para desarrollar el conocimiento de su dinámica y sus causas.

La información satelital se ha utilizado para estudiar cuestiones hidrológicas con diferentes objetivos, tales como la modelización de flujos en ríos y arroyos (Overton 2005, Weisling et al. 2007); análisis de riesgos de inundación (Kuligowski 2006), cartografía y monitoreo de inundaciones (Bonn y Dixon 2005, Bach et al. 2005, Sandoz y Thauvin 2006), evaluación de daños post-inundación (Jun et al. 2004, Gianetto et al. 2006), estudios de vegetación afectada por inundaciones (Herrera et al. 2005) y monitoreo de la humedad del suelo (Lacava et al 2005), entre otros. También, la información satelital se ha utilizado para describir la evolución temporal de distintas variables relacionadas a los procesos de inundación como son la *precipitación*, estimada mediante el GPI (GOES Precipitation Index) para latitudes de entre 40°N y 40°S, las imágenes TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) que monitorean y estudian las precipitaciones tropicales y subtropicales entre 35°N y 35°S (Campos 2013, Kummerow et al. 1998); la *evapotranspiración* a partir de aproximaciones empíricas (Contreras et al 2011, Dibella et al. 2000, Della Chiesa 2011) y biofísicas (Nosetto et al. 2005, Mu et al. 2011); *los cambios en el almacenamiento* terrestre de agua a partir de GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) (Aragón et al. 2010, Tapley et al. 2010, Swenson et al. 2003) y *los cambios en la profundidad* de los cuerpos de agua mediante ENVISAT (Environmental Satellite) (Frapart et al. 2006). Este proyecto caracterizará la frecuencia y duración de los ciclos de inundación mediante el empleo de una herramienta clave como lo es la teledetección, aplicando un método sencillo de clasificación.

El objetivo general de este estudio es caracterizar el área inundada en una región principalmente de la Pampa Interior y vincularla, aplicando sensores remotos, a condicionantes climáticos, hidrológicos y de uso de la tierra para el período 1980-2010. Los objetivos específicos de esta tesis son: A) Cuantificar y mapear el área inundada para una región de la Pampa Interior para el período (1980-2010) a partir de un protocolo sencillo aplicado a imágenes Landsat y analizar su eficacia comparando con un protocolo más complejo (Aragón et al. 2010); B) Evaluar el uso de información del sensor MODIS para generar estimaciones de área inundada aplicando técnicas “subpixel” (Collado et al. 2002) y C) Analizar la relación entre precipitaciones, área inundada y variación del nivel freático y el posible papel que tiene sobre ella el uso de la tierra.

2. Materiales y Métodos

2.1. Descripción del área de estudio

El área de estudio está localizada mayoritariamente en la porción occidental de la Pampa Argentina, que se conoce como Pampa Interior, la cual incluye a la Pampa Interior Plana e Interior Oeste (Soriano et al. 1991) (Figura 1). La zona es una amplia llanura desarrollada a partir de sedimentos eólicos loésicos, depositados durante el Pleistoceno (Iriando 1999). La región históricamente fue ocupada por pastizales naturales desprovistos de árboles. Desde finales del siglo XIX y comienzos del siglo XX, el uso y la cobertura del suelo en la región pasó por una serie de etapas de cambios progresivos de pastizales naturales a pasturas cultivadas, pasturas en rotación con cultivos y finalmente rotaciones puramente agrícolas (Viglizzo et al. 2001). La Pampa Interior ha sido la porción de la región pampeana que experimentó el avance de cultivos más veloz en las últimas tres décadas (Baldi et al. 2008).

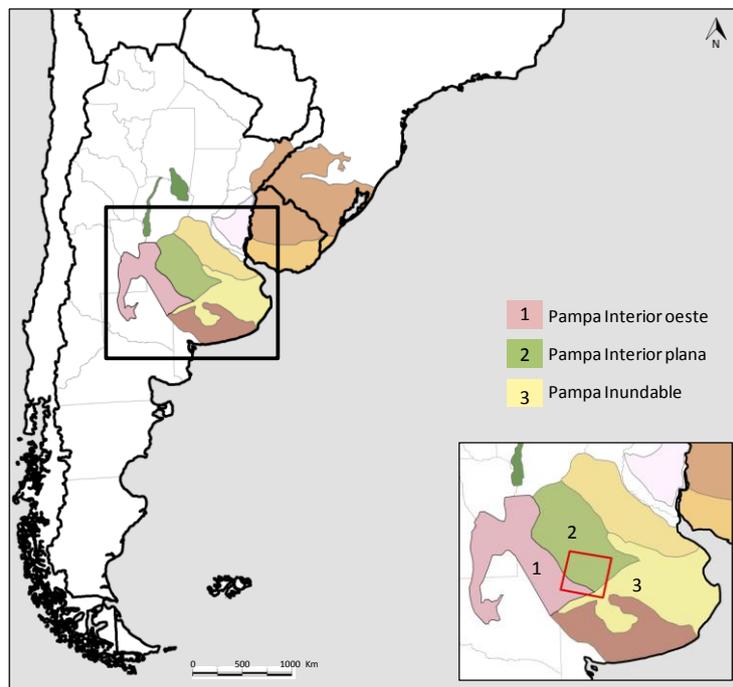


Figura 1: Ubicación de la zona de estudio en el NO de Buenos Aires (escena Landsat 227/85) con detalle de los distritos de los Pastizales del Río de La Plata en el área de estudio (Soriano et al. 1991).

El clima es templado con una temperatura media anual de 16 °C. La precipitación media anual es de 980 mm, siendo el 70 % de las precipitaciones primavero-estival (Diaz Zorita et al. 1998). El paisaje se caracteriza por bajas pendientes topográficas con un pobre desarrollo regional de escurrimiento y la presencia de materiales relativamente permeables en la superficie del terreno (Sala et al. 1983). Estos factores favorecen la existencia de una capa freática muy cercana a la superficie, que en las últimas décadas se ha ubicado a menos a 5 metros de profundidad en la mayor parte del paisaje (Forte Lay et al. 2007, Kruse et al. 2005). La suma de factores geomorfológicos (baja pendiente, relieve modelado por el viento) y climático (clima húmedo a subhúmedo) hacen a esta región propensa a la inundación por períodos prolongados alternados por períodos libres de ellas (Aragón et al. 2010, Viglizzo et al. 1997, Salvador 2010).

2.2. Estimación con imágenes Landsat del área inundada

Para estimar el área inundada se trabajó con imágenes obtenidas de los sensores Thematic Mapper (TM), Multispectral Scanner (MSS) y Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) a bordo de los distintos satélites de la generación Landsat (Tabla 1).

Tabla 1: Características de los sensores montados en las plataformas de los satélites Landsat.

Satélite	Sensor	Rango espectral (μm)	N° de banda	Tamaño de la escena (km)	Resolución del pixel (m)
L 1-3	MSS multi-spectral	0,5 – 1,1	4-5-6-7	185 x 185	60
L 4-5	MSS multi-spectral	0,5 – 1,1	1-2-3-4	185 x 185	60
L 4-5	TM multi-spectral	0,45 – 2,35	1-2-3-4-5-7	185 x 185	30
L 4-5	TM termal	10,40 – 12,50	6	185 x 185	120
L 7	ETM+ multi-spectral	0,45 – 2,35	1-2-3-4-5-7	185 x 185	30
L 7	ETM termal	10,40 – 12,50	6,1- 6.2	185 x 185	60
L 7	Panchromatic	0,52 – 0,90	8	185 x 185	15

Se recopilaron 31 imágenes libres de nubes de los distintos sensores Landsat (escena 227/85) provistas por la CONAE, INPE y NASA. La mayoría de las escenas adquiridas corresponden a la estación de primavera de cada año desde 1980 hasta 2010 (Tabla 2). La selección de este período del año para realizar la clasificación se debió a que se pretendía comparar la eficacia del algoritmo sencillo utilizado en esta tesis con un protocolo más complejo utilizado por Aragón et al. (2010), en el cuál se utilizaron imágenes pertenecientes exclusivamente a dicho período, que suele coincidir con el de máxima inundación en décadas recientes. En los años 1980, 1981 y 1982 las escenas adquiridas están espacialmente desplazadas respecto a los años posteriores y por lo tanto se realizaron mosaicos con varias escenas para poder abarcar la zona de estudio. Previamente a la clasificación de las imágenes, se las corrigió geométricamente (corregistración) utilizando el método de selección de puntos de control terrestre, utilizando > 30 puntos y aceptando errores menores al tamaño de un pixel. Las imágenes se proyectaron según la UTM zona 20 Sur Datum WGS84. Como el objetivo era realizar una clasificación con un algoritmo sencillo y expeditivo y compararlo con el algoritmo realizado por Aragón et al. (2010) se decidió no realizar correcciones radiométricas a las imágenes.

Tabla 2: Lista de las imágenes satelitales utilizadas para estimar el área inundada.

Satélite y sensor	Escena	Banda	Rango espectral (µm)	Fecha
5 TM	227-85	5	1,55 – 1,75	03/10/2010
5 TM	227-85	5	1,55 – 1,75	30/09/2009
5 TM	227-85	5	1,55 – 1,75	29/10/2008
5 TM	227-85	5	1,55 – 1,75	20/05/2007
5 TM	227-85	5	1,55 – 1,75	21/08/2006
5 TM	227-85	5	1,55 – 1,75	05/10/2005
5 TM	227-85	5	1,55 – 1,75	03/11/2004
5 TM	227-85	5	1,55 – 1,75	01/11/2003
7 ETM	227-85	5	1,55 – 1,75	06/11/2002
5 TM	227-85	5	1,55 – 1,75	27/11/2001
5 TM	227-85	5	1,55 – 1,75	24/11/2000
5 TM	227-85	5	1,55 – 1,75	22/11/1999
5 TM	227-85	5	1,55 – 1,75	19/11/1998
5 TM	227-85	5	1,55 – 1,75	29/09/1997
5 TM	227-85	5	1,55 – 1,75	28/10/1996
5 TM	227-85	5	1,55 – 1,75	01/12/1995
5 TM	227-85	5	1,55 – 1,75	01/08/1994
5 TM	227-85	5	1,55 – 1,75	01/08/1993
5 TM	227-85	5	1,55 – 1,75	27/06/1992
5 TM	227-85	5	1,55 – 1,75	29/09/1991
4 TM	227-85	5	1,55 – 1,75	20/10/1990
5 TM	227-85	5	1,55 – 1,75	07/09/1989
4 TM	227-85	5	1,55 – 1,75	28/09/1988
4 TM	227-85	5	1,55 – 1,75	28/10/1987
5 TM	227-85	5	1,55 – 1,75	17/10/1986
5 MSS	227-85	4	0,8 – 1,1	28/09/1985
5 MSS	227-85	4	0,8 – 1,1	11/10/1984
4 MSS	227-85	4	0,8 – 1,1	01/10/1983
3 MSS	244-84	7	0,8 – 1,1	15/08/1982
	244-85	7		15/08/1982
2 MSS	244-84	7	0,8 – 1,1	09/11/1981
	244-85	7		09/11/1981
	243-85	7		08/11/1981
3 MSS	244-85	7	0,8 – 1,1	12/09/1980
	243-85	7		11/09/1980

Debido a que los satélites Landsat no captan escenas exactamente superpuestas en cada fecha, se creó un polígono de superposición completa para poder estimar el área inundada en todos los años. La superficie aproximada del polígono fue de 24000 km².

Las imágenes que estos sensores proveen están conformadas por cuatro (MSS), siete (TM) y ocho bandas (ETM+); cada una de ellas capta la intensidad de la energía reflejada o emitida por la superficie en diferentes porciones del espectro electromagnético. Para estimar el área inundada se aplicó una clasificación mediante evaluación visual de las imágenes Landsat. Se utilizaron las bandas que corresponden al infrarrojo medio con el sensor TM (Banda 5) e infrarrojo cercano con MSS (Banda 4 y 7) del espectro electromagnético ya que son las que mostraron una mejor discriminación

de cuerpos de agua de otras coberturas presentes en el terreno (Frazier y Page, 2000) y las mismas se detallan en la Tabla 2. Con el software ENVI 4.2 se efectuó la evaluación visual de las imágenes definiendo un valor umbral en el número digital para cada año, que por debajo del cual todo es clasificado como agua. Además, se comparó visualmente empleando 3 bandas del sensor (Red: 3, Green: 5, Blue: 4) de la misma fecha, observando las áreas urbanas y suelos expuestos en tonos de azul claro, mientras que las áreas inundadas y el agua aparecen en tonos azul oscuro. Posteriormente, se realizó una reclasificación a partir del umbral definido con el software Idrisi Andes. Finalmente, en la imagen clasificada se calculó la superficie de agua. Los resultados se compararon con los obtenidos en un estudio previo (Aragón et al. 2010), en el cual la clasificación de imágenes fue más compleja y realizada a partir de un árbol de decisión.

Para describir con mayor resolución temporal la dinámica de las dos grandes inundaciones ocurridas en los años 1987 y 2001, se seleccionaron imágenes Landsat con mayor frecuencia. Para ello, se definió una superficie más pequeña de estudio (1770 km²) en una zona de superposición entre dos escenas Landsat adyacentes (226/85 y 227/85) lográndose una frecuencia de aproximadamente 30 días para ambas inundaciones y analizándose un total de 51 imágenes para la primera inundación (1985-1989) y 50 imágenes para la segunda (2000-2003) (Figura 2).

Por otro lado, para una mejor descripción de la relación entre el nivel freático y el área inundada se analizaron los datos de un freatómetro que contiene la serie más larga y completa (1987-2010) encontrada hasta el momento, sin interrupciones de medición. El mismo, está ubicado en el departamento Daireaux, al sureste de la zona de estudio. Se delimitó entonces un polígono de 30 km x 30 km aproximadamente conteniendo al freatómetro en cuestión en el cual se cuantificó el área inundada utilizando las mismas imágenes clasificadas para toda la zona de estudio (Fig. 2).

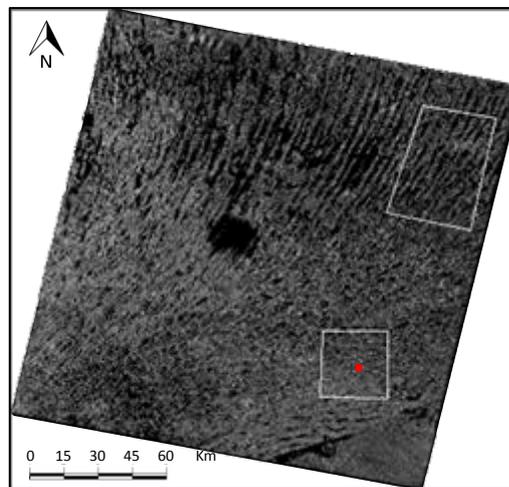


Figura 2: Escena Landsat (227-85) del año 2001. Se indica el polígono en la zona superior derecha donde se efectuó una caracterización del área inundada con mayor resolución temporal (cada ~30 días) y el polígono en la zona inferior derecha donde se describió la relación entre un freatómetro (punto rojo) y el área inundada.

2.3. Estimación con imágenes MODIS del área inundada

A través de un Análisis Lineal de Mezclas Espectrales (ALME) (Collado et al. 2002) se calcularon los porcentajes de suelo desnudo, vegetación y agua para estimar el porcentaje de área inundada en la zona de estudio (24000 km²). Tradicionalmente los análisis de teledetección consideran que un píxel está uniformemente cubierto, por lo tanto, las diferentes técnicas de clasificación asignan a cada píxel sólo una categoría

(Chuvieco 2002). Por el contrario, ALME asume que la señal emitida por un determinado píxel es el resultado de las reflectividades de varias cubiertas en función a la proporción que ocupan (Horwitz et al. 1971, Marsh et al. 1980, Adams et al. 1986). A partir de esta técnica se estiman las diferentes proporciones ocupadas por las cubiertas que componen un píxel asumiendo que la respuesta recibida por el sensor es una combinación lineal de las firmas espectrales puras (Chuvieco 2002).

El ALME asume que (1) la radiación recibida por el sensor se restringe al ámbito del área ocupada por cada píxel (Settle y Drake, 1993), (2) la radiancia global es proporcional a la superficie ocupada por cada cubierta, y (3) existen firmas espectrales puras válidas para toda la zona analizada (Quarmby et al. 1992). A partir de estas tres suposiciones podemos asumir la reflectividad de un píxel como la combinación lineal de las reflectividades de sus componentes puros (Shimabukuro y Smith, 1991).

Se generaron estimaciones de áreas inundadas basadas en el sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) a bordo del satélite Terra aplicando ALME para un período de superposición de la serie Landsat y MODIS (2000-2010), el cual brinda una resolución temporal de 16 días. Las imágenes utilizadas provenientes del sensor MODIS coincidieron (± 8 días) con las de las imágenes Landsat disponibles. Se utilizó las bandas RED, NIR, NDVI y EVI del producto MOD13Q1 adquirido del servidor de descarga de imágenes del sitio web de la NASA porque son la que tienen menor resolución espacial (Tabla 3).

Tabla 3: Descripción de las bandas del producto MOD13Q1.

Banda	Resolución (m)	Rango espectral (μm)	Sigla
Reflectancia BLUE	500	0,459 – 0,479	BLUE
Reflectancia RED	250	0,620 – 0,670	RED
Reflectancia NIR	250	0,841 – 0,876	NIR
Reflectancia MIR	500	1,628 – 1,652	MIR
Índice de Vegetación	250		NDVI
Índice de Vegetación	250		EVI

Donde la reflectancia BLUE (azul) y RED (rojo) corresponden a la porción visible del espectro electromagnético, la reflectancia NIR (Near-Infrared) es el infrarrojo cercano y MIR es el infrarrojo medio. El producto NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) es el Índice de Vegetación Normalizado y combina datos del espectro electromagnético en el Rojo (RED) y en el infrarrojo cercano (NIR), quedando definido por:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

El producto EVI (Enhanced Vegetation Index) es el Índice de Vegetación Mejorado (IVM), es similar al NDVI pero incorpora otras bandas espectrales para optimizar las señales de la vegetación, particularmente en niveles altos de biomasa. Se expresa como:

$$EVI = G \cdot \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + C1 * \rho_{RED} - C2 * \rho_{BLUE} + L}$$

Donde ρ es la reflectividad en superficie de las bandas del infrarrojo cercano (NIR), roja (RED) y azul (BLUE), L el coeficiente de ajuste de entorno (suelo), $C1$ y $C2$ los coeficientes de corrección atmosférica para las bandas BLUE y RED respectivamente y G el factor de ganancia (Chuvienco 2002).

Se descargaron las escenas MODIS que se superponen con la escena Landsat analizadas, seleccionando una fecha por año entre 2000 y 2010. Como la escena Landsat está incluida dentro del área correspondiente a dos escenas MODIS, se generó un mosaico de las escenas MODIS (h12v12 y h13v12) para poder luego obtener un "subset" o recorte apropiado. Se utilizó el ALME aplicando las metodologías "lineal", "exhaustiva" y "probabilística" con el software Idrisi Andes. El primer método supone que cualquier píxel puede ser una combinación de todos los componentes representados en el archivo de grupo firma. El número de firmas debe ser menor o igual que el número de bandas de imágenes. La metodología exhaustiva es útil cuando el número de firmas representadas en el archivo de grupo de firmas es mayor que el número de bandas de imágenes. El número de componentes a considerar para cada píxel en este caso fue dos. Cada combinación posible de clases (hasta el número definido por el usuario) es evaluado y es la mezcla final asignada con el menor valor residual. Por ejemplo, si tres firmas (a, b, c) están presentes en el archivo de grupo de la firma y el usuario ha indicado considerar dos componentes, combinaciones de 3 (ab, ac, bc) calculados y que con el menor residual se elija. Al igual que el método exhaustivo, en el probabilístico se puede utilizar cuando el número de firmas representadas en el archivo de grupo de firmas es mayor que el número de bandas de imágenes. El número de componentes a considerar para cada píxel fue de 2. Sin embargo, el proceso de probabilidad guiada primero evalúa la probabilidad bayesiana para cada componente.

Primero se definieron los componentes puros que representan las cubiertas existentes. Para esto, se realizó una selección de polígonos en las imágenes Landsat en de áreas con cuerpos de agua, suelos descubiertos de vegetación y vegetación con la combinación de bandas (Red: banda 4, Blue: banda 5 y Green: banda 3) para cada año. Luego se superpusieron a las imágenes MODIS para definir así los pixeles puros cada año y por último se ratificó con Landsat que los polígonos formados en MODIS representen correctamente las áreas de interés. A partir de estos pixeles puros se obtuvieron valores medios de NDVI, EVI, RED y NIR para las coberturas que se utilizaron en el modelo de ALME. Se evaluaron los resultados mediante el análisis de regresión lineal simple para comparar con lo estimado por Landsat, coeficiente de determinación R^2 y del error estándar de la estimación (EE est.) de cada método. Se consideró significativo el modelo de regresión cuando el valor p fue menor a 0,05 (nivel de significancia del 95%).

2.4. Relación entre inundación, clima, hidrología y uso de la tierra

Con el objetivo de estudiar la relación entre precipitaciones, área inundada y variación del nivel freático y el papel que tiene sobre el área inundada el uso de la tierra, se utilizaron distintas fuentes de información. Por un lado, se construyó una base de datos de niveles freáticos basándose en el trabajo realizado por Aragón et al (2010) en el cual se abarca un período de 10 años (1996 – 2005). La información utilizada en esta tesis se amplió respecto al trabajo de Aragón et al. (2010), extendiendo el período de tiempo (1980 – 2010 vs. 1996-2003) y abarcando así dos ciclos de inundación más, y ampliando también la cantidad de freatómetros utilizados (67 sitios en total). Además se recopiló información de datos freáticos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN),

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Instituto Nacional del Agua (INA), Cámara de Cereales, Innovación y Desarrollo para el Agro (IyDA) y de productores. Los datos de profundidad del nivel freático (distancia a la que se encuentra el agua desde la superficie del terreno) obtenidos para la zona de estudio fueron heterogéneos tanto en el período total cubierto y la frecuencia. Los datos de precipitación fueron provistos por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y de 3 establecimientos agropecuarios, realizándose un promedio anual para la zona de estudio. La evapotranspiración potencial (ETP) fue calculada usando el método Penman-Monteith (Allen et al. 1998) con información meteorológica disponibles para la estación Pehuajó del SMN. Luego se calculó el balance de agua climático como la diferencia entre PPT y ETP.

La variabilidad freática fue estudiada a través del nivel freático reconstruido a escala mensual y el uso de un nivel medio mensual móvil que integró todas las mediciones disponibles. Para cada freatómetro disponible se seleccionaron todas las mediciones realizadas en un intervalo de tiempo menor a dos meses. Con cada par de mediciones subsecuentes se calculó el cambio de nivel (Δ nivel, variación en profundidad del nivel en una fecha respecto a la anterior, expresada metros), y el tiempo transcurrido (Δ fecha, días transcurridos entre mediciones). El cociente entre Δ nivel y Δ fecha, definido como la tasa de variación de nivel freático, expresado en metros/día se convirtió a metros/mes aplicando un multiplicador de 30,5. Esta operación permitió obtener tasas mensuales integrando períodos de medición variables. Si una serie de datos incluyó varios períodos de medición durante un mes (e.g. mediciones mensuales), se integraron todas las tasas medidas durante el período en el cálculo final de la tasa. Si por el contrario, el intervalo entre mediciones superó el mes (e.g. mediciones cada 45 días), las tasas calculadas se aplicaron a dos meses contiguos. En el análisis se descartaron los períodos entre mediciones de más de dos meses. Para cada mes calendario se calculó el promedio de todas las tasas de variación de nivel, obteniéndose un valor único para toda la región independiente de las profundidades absolutas de cada freatómetro y de los sesgos que en el tiempo pudo haber introducido la localización de freatómetros en distintas posiciones del paisaje.

Se generó una serie de nivel freático absoluto reconstruido a partir de propagar las variaciones medias de nivel freático desde la fecha 15/06/2011 hacia el pasado, tomando el nivel absoluto de esta fecha como referencia. Esta aproximación se consideró ideal por tomar como “anclaje” absoluto una fecha en la que había disponibles una alta cantidad de freatómetros (22 pozos de medición) con una distribución representativa de la región (13 departamentos fueron incluidos). Con respecto al nivel medio mensual móvil, se calculó haciendo un promedio de 12 meses centrado (6 meses anteriores y posteriores) del valor del nivel freático absoluto reconstruido. Para el análisis de la relación entre nivel freático y área inundada se realizó una partición en dos períodos de tiempo (1980-1995 y 1996-2010) a fin de analizar si dicha relación cambia entre períodos, los cuales se caracterizaron por presentar diferencias en el uso del suelo.

2.5. Caracterización de las superficies sembrada y cosechada

Se recopiló información de las superficies sembrada y cosechada para cada departamento según cultivo. Estos datos fueron adquiridos del sitio web del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación (<http://www.minagri.gob.ar>). Se calculó el porcentaje de superficie sembrada y cosechada total de los cultivos en los

departamentos que estuvieron incluidos dentro de la zona de estudio (11 departamentos) con un porcentaje mayor al 10% de superficie. Para no cuantificar de manera duplicada la superficie con el doble cultivo trigo/soja, se asumió que la mitad del trigo sembrado se efectuó en sistema doble cultivo trigo/soja y por lo tanto dicha superficie fue restada de la superficie total de soja.

Para estudiar las relaciones funcionales entre variables se realizaron análisis de regresión lineal simple. Una medida de la capacidad predictiva del modelo es el coeficiente de determinación R^2 que relaciona la variación explicada por el modelo respecto a la variación total. Además se utilizó el coeficiente de correlación r que mide la fuerza de la relación entre las variables. Se consideró significativo el modelo de regresión y correlación cuando el valor p fue menor a 0,05 (nivel de significancia del 95%).

3. Resultados

3.1. Estimación con imágenes Landsat del área inundada

Los resultados de la estimación del área inundada (%) a partir de la clasificación con umbral en la banda 5 de imágenes Landsat y el estimado a partir del algoritmo de Aragón tuvieron una alta correlación ($r = 0,99$) y un bajo error estándar de la estimación (EE est = 1,03 %). De acuerdo a esto se puede decir que el protocolo de clasificación simplificado y más expeditivo empleado en esta tesis presentó una capacidad similar de identificar áreas inundadas en comparación al protocolo más complejo de Aragón et al. (2010), indicando además que las estimaciones realizadas presentan alta confiabilidad (Figura 1).

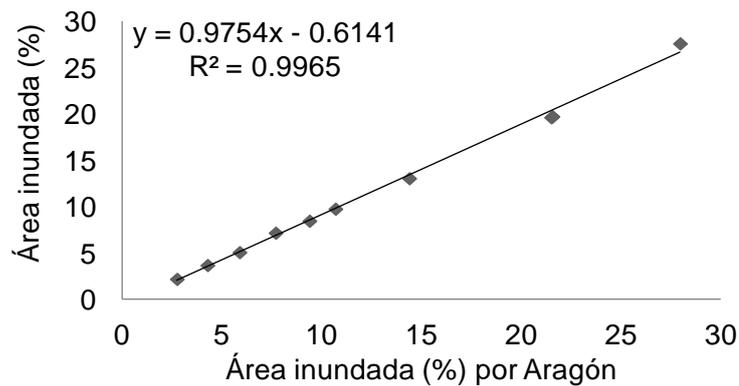


Figura 3: Relación entre el área inundada (%) estimado con la clasificación con umbral y el área inundada (%) estimado a partir del algoritmo de Aragón et al (2010) para un período de 10 años (1996-2005).

El área de estudio mostró fuertes oscilaciones de la superficie cubierta por agua a lo largo del período de 30 años de estudio con valores extremos de 0,96 y 27,73%. En este período, se lograron apreciar claramente dos grandes ciclos completos de inundación (figura 4a). Los mismos tuvieron sus máximos durante los años 1987 y 2001 llegando el área inundada a cubrir el 22,5 y 27,7% del paisaje respectivamente y retrayéndose a niveles $< 5\%$ en los siguientes 3 años en ambos episodios. La tasa de expansión del área inundada fue mayor en la primera que en la segunda inundación (193 vs. 179 km^2 / mes). Esto equivale a la inundación de un área equivalente a la ciudad de Buenos Aires ($\sim 200 \text{ km}^2$) por mes por un período de 25 meses para la primera inundación y de 24 meses para la segunda inundación. Por otro lado, la tasa de retracción de las áreas inundadas fue más lenta en la primera inundación que en la segunda (168 vs. 200 km^2 /mes).

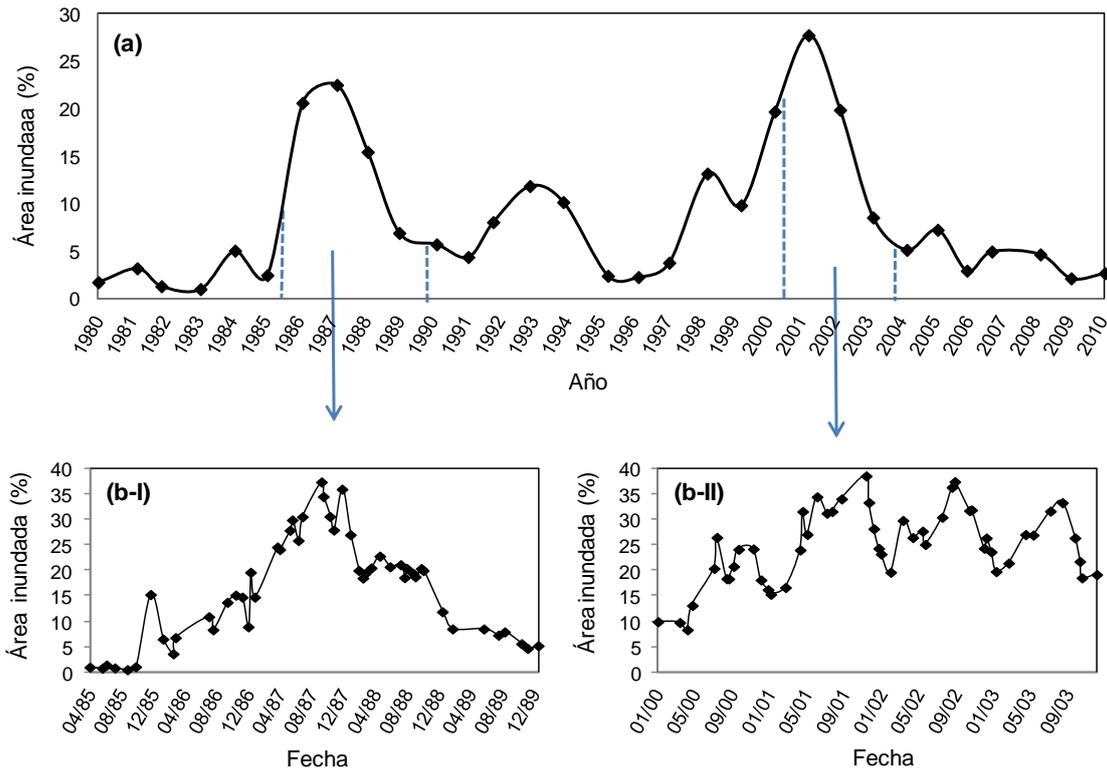


Figura 4: (a) Porcentaje de área inundada de la zona de estudio para el período 1980-2010 en una superficie de 24000 km². (b) Dinámica de inundación del período 1985 – 1989 (primera inundación) y 2000 – 2003 (segunda inundación) para un área de 540 km² analizada con mayor detalle (ver Figura 2). Las líneas azules punteadas indican el lapso del estudio con mayor resolución temporal que corresponde a las dos grandes inundaciones que alcanzaron sus respectivos máximos en los años 1987 y 2001.

En el estudio de mayor detalle temporal de la dinámica de inundación se pudo observar que la inundación de 1987 se inició con valores de área inundada de ~ 1 % en el otoño de 1985, mientras que en la inundación de 2001 se inició en el verano de 2000 con valores de ~10%. Además, en la inundación de 1987 se observa un ascenso del área inundada más constante, mientras que inundación del 2001 tiene más oscilaciones estacionales hasta llegar al máximo de inundación (Fig. 4a 4b). Ocurre algo similar cuando se va retrayendo el área inundada.

3.2. Estimación con imágenes MODIS del área inundada

El uso de información del sensor MODIS aplicando el análisis lineal de mezclas espectrales (ALME) a través de los tres métodos no logró estimar de manera satisfactoria el área inundada (figura 5) cuando se comparó con las clasificaciones realizadas con el satélite Landsat. El método con el que se obtuvo el menor error de estimación fue el lineal con el 9,6% y un r² de 0,43.

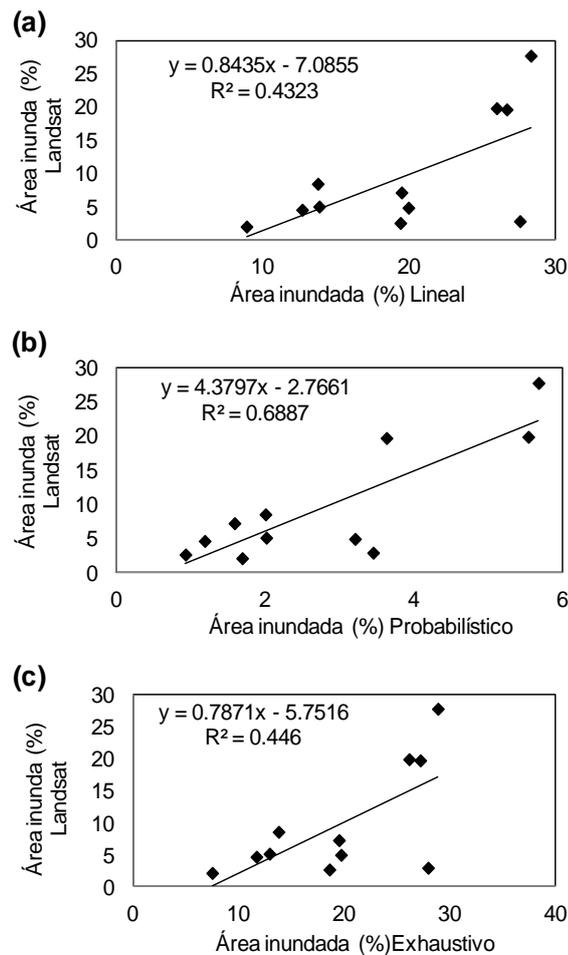


Figura 5: Relación entre el área inundada (%) estimado con Landsat y el porcentaje estimado con MODIS por el método (a) Lineal, (b) Probabilístico y (c) Exhaustivo.

3.3. Relación entre inundación, clima, hidrología y uso de la tierra

3.3.1. Caracterización climática del período de estudio

Para el período 1980-2010 se estimó una precipitación media de 943 mm/año con un desvío estándar de 156,8 mm/año. Se registraron precipitaciones mínimas en la zona cercanas a los 681 mm/año (año 2010) y precipitaciones máximas que llegaron a 1226 mm/año (año 2001). Después del periodo de exceso de precipitaciones comenzó la sequía hasta 1990, registrándose en 1989 212 mm/año menos que el promedio. La evapotranspiración potencial promedio fue de 1129 mm/año con un desvío estándar mucho menor al de la precipitación (96,2 mm/año) y los valores mínimos y máximos registrados variaron entre 918 y 1388 mm/año (Figura 6a). Al estudiar el comportamiento de la ETP a través de los años se observó una tendencia positiva durante el período de estudio ($r = 0,68$; $p < 0,05$), llegando a un pico de 1388 mm en el año 2009.

En promedio para todo el período de estudio, el cociente entre precipitación y evapotranspiración fue de 0,85, lo que correspondió a un déficit climático medio de 186,1 mm/año, cuyo desvío estándar fue 225,8 mm/año. Además, se observó que la precipitación superó a la evapotranspiración solamente en el 30% de los años, los cuales coincidieron con los momentos de mayor inundación. El análisis de correlación mostró

una relación inversa ($r = - 0,56$; $p < 0,05$) entre la PPT y ETP, lo que sugiere que la situación de excesos hídricos de años lluviosos es exacerbada por la menor demanda atmosférica de vapor.

3.3.2. Análisis de la variabilidad freática

La profundidad freática media estimada para el período de análisis fue de 2,70 m, Los valores mínimos y máximos medios de la región de estudio fueron 1,37 (en octubre de 2000) y 3,56 m (en marzo de 1997), respectivamente, lo que indica un rango de variación máximo de 2,19 m. En los picos de las inundaciones de 1987 y 2001, el nivel freático medio fue de 1,84 m y 1,69 m, respectivamente. Las máximas tasas de ascenso de nivel ocurrieron en abril 1987, diciembre 1991, noviembre 1997 y mayo 2000 con valores entre 8,1 a 13,4 cm/mes, mientras que las máximas tasas de descenso de nivel fueron en octubre 1988, noviembre 1995, diciembre 2002, noviembre 2005 y junio 2009 con valores de entre 5,0 y 7,6 cm/mes. Esto nos indica que el nivel freático tiende a ascender hacia la superficie a tasas más veloces que a las que se profundiza y sugiere un comportamiento de tipo pulso. Los niveles freáticos luego de la primer inundación descripta volvieron a valores parecidos a los previos al evento (3,26 m en enero de 1990), mientras que en la segunda inundación los niveles freáticos no descendieron tanto, quedando a niveles más superficiales por un período que se prolongó hasta el final de la serie analizada (2,72 m en noviembre de 2003, siempre < 3 m). También es destacable un tercer período con altos niveles freáticos (1,87 m) en el año 1993-94, el cual estuvo asociado con niveles de inundación significativamente menores que los registrados en 1987 y 2001 (Fig. 6b y Fig 4a).

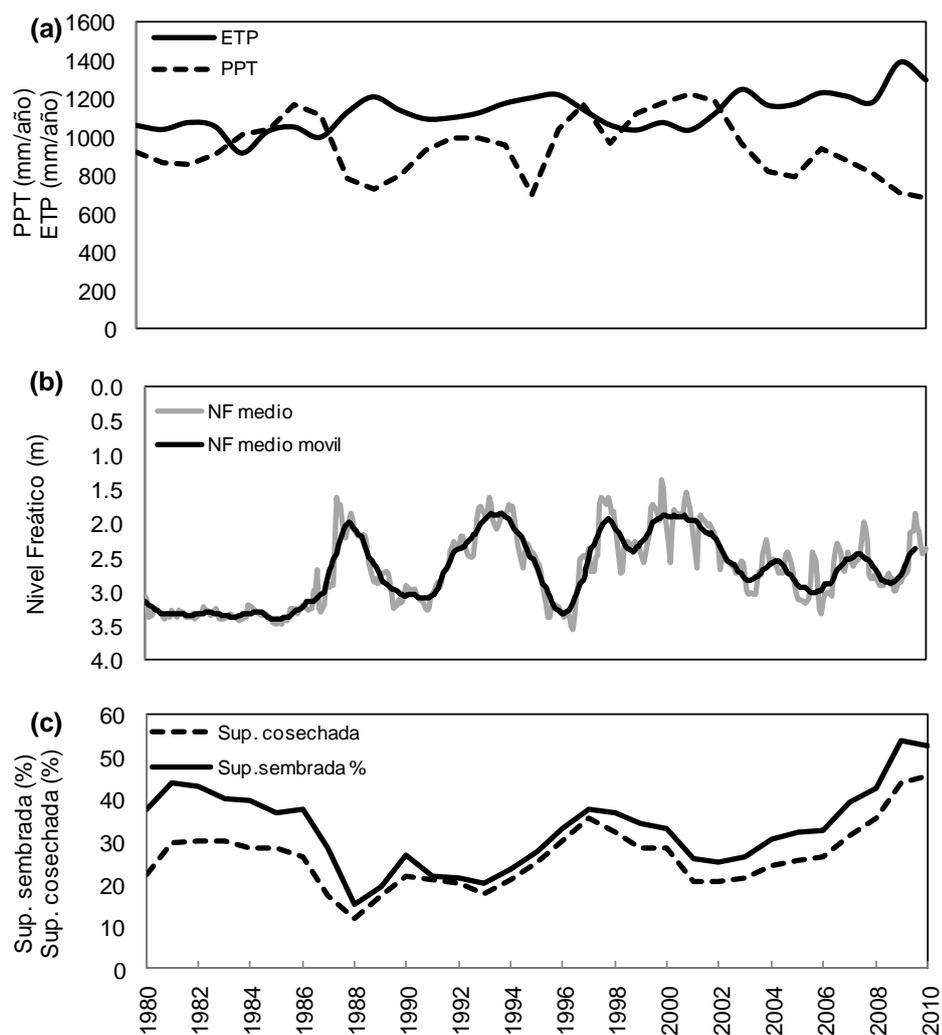


Figura 6: (a) Valores anuales de precipitación y ETP para período Enero-Diciembre. (b) Nivel freático mensual y media móvil de 12 meses. (c) Porcentaje de la superficie sembrada y cosechada de la zona de estudio para el período 1980-2010.

3.3.3. Caracterización de las superficies sembrada y cosechada

La superficie sembrada con cultivos agrícolas presentó grandes fluctuaciones durante el período de estudio, variando entre 14,9 y 53,8%. La superficie cosechada mostró menor variación, fluctuando entre 11,8 y 45,4%. Al inicio del período de estudio (1980-1985) la diferencia entre la superficie sembrada y cosechada fue del 20% aproximadamente (Figura 6). Con la inundación del 1987, se produce una drástica reducción en la superficie sembrada (23%) y en la diferencia entre la superficie sembrada y cosechada (15,8%). La superficie sembrada se mantiene baja y estable en el período 1989-1993 y comienza un gradual ascenso hasta el año 1997-98 (42,8%) a partir del cual se produce nuevamente una fuerte caída en coincidencia con la segunda inundación. Hacia el final del período de estudio se registra un nuevo ascenso del área sembrada y cosechada. Se observa en general, que las mínimas diferencias entre las superficies sembrada y cosechada coinciden con los años de mayor inundación, indicando posiblemente que las áreas sembradas en dichos momentos corresponden a lugares topográficamente altos que tienen bajas chances de perderse por anegamiento y por lo tanto alta probabilidad de que sean finalmente cosechados. Es decir, la

inundación parece afectar más fuertemente la intención de siembra que la falla de áreas sembradas que luego resultan no cosechadas.

3.3.4. Relación entre precipitación, área inundada, variación del nivel freático y uso de la tierra sobre el área inundada (%)

A fin de estudiar la relación entre la inundación y las condiciones hidrológicas y meteorológicas se realizó un análisis de correlación considerando múltiples escalas temporales. Se encontró una fuerte asociación entre la fracción del área inundada y la precipitación, cuyas máximas correlaciones se obtuvieron para periodos de integración de 24 y 36 meses (Tabla 4, Figuras 7 y 8). La inclusión de la evapotranspiración en el análisis, tanto en forma directa como a través del balance PPT-ETP, no mejoró en forma apreciable la explicación de las inundaciones, excepto para los periodos de 6 y 18 meses (Tabla 4, Figuras 7 y 8), sugiriendo que la única variable climática relevante en el análisis es la precipitación. El nivel freático absoluto mostró una asociación alta con el área inundada (mayor inundación con niveles más superficiales) a la escala de 3 meses, perdiendo peso como variable explicativa en períodos más extensos. La variación de nivel freático tuvo también cierto peso explicando la fracción del territorio inundado, con correlaciones cuyo signo sugiere mayor nivel de inundación cuando los niveles freáticos están en ascenso, siendo esta relación máxima en las escalas temporales más prolongadas. Los resultados sugieren un efecto de largo plazo de la precipitación acumulada combinado con otro de plazo corto o más inmediato de las condiciones de nivel freático. Si bien ambas variables control no son independientes entre sí, reflejando una manifestación de los excesos hídricos en distintas escalas temporales, es útil analizarlas en forma separada para reconocer su grado de influencia y temporalidad, a lo que se suma el hecho de que el uso de la tierra y las obras de drenaje pueden desacoplarlas.

Tabla 4: Análisis de correlación entre el % inundado y el nivel freático, Δ nivel freático, PPT, ETP y balance de agua para distintos meses de acumulación. Números en negrita significa valores de $p < 0,05$.

Correlación entre		3 meses	12 meses	24 meses	36 meses
% Inundado	Nivel freático	-0,61	-0,44	-0,08	0,05
	Δ nivel freático	-0,41	-0,39	-0,54	-0,58
	PPT	0,54	0,75	0,85	0,85
	ETP	0,13	-0,42	-0,44	-0,42
	Balance	0,50	0,70	0,77	0,79

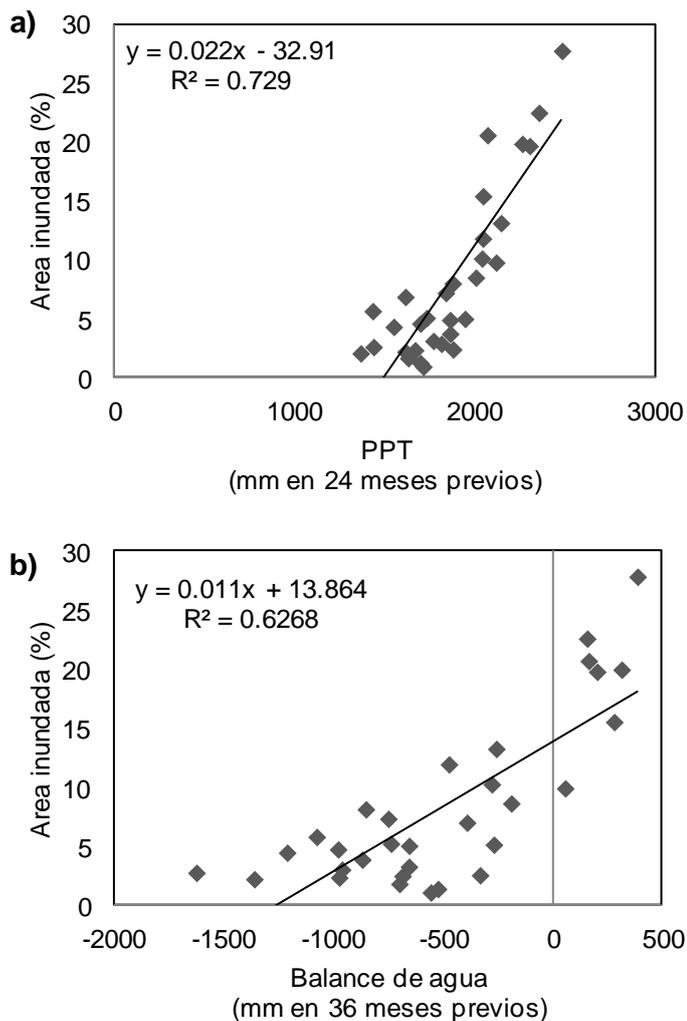


Figura 7: (a) Relación entre el área inundada y PPT para un período de 24 meses acumulados; (b) Relación entre el área inundada y balance para un período de 36 meses acumulados.

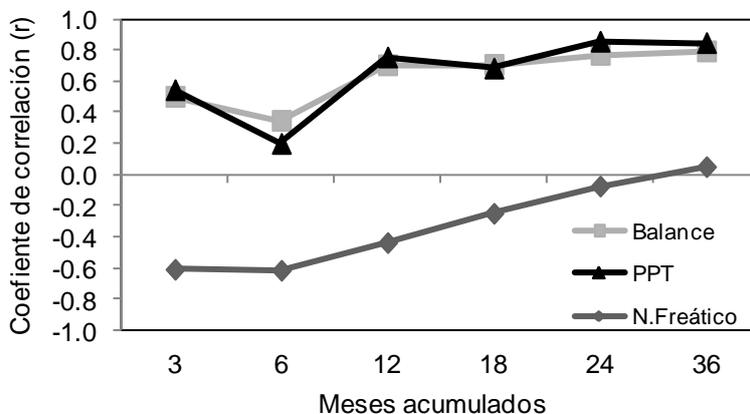


Figura 8: Nivel de asociación (coeficiente de correlación de Pearson) entre porcentaje de área inundada y (i) balance hídrico, (ii) PPT y (iii) nivel freático absoluto, en relación a los diferentes meses acumulados.

Se estudió el comportamiento del nivel freático frente el área inundada (%) particionando dos períodos de tiempo (1980-1995 y 1996-2010), con el fin de evaluar si entre ambos períodos el cambio en el uso de la tierra, especialmente el retroceso de las pasturas y el avance de la siembra directa afectaron esta relación. Se observó que el área inundada y el nivel freático estuvieron relacionados de manera similar en ambos períodos (Figura 9a), registrándose un aumento en la pendiente de la relación a medida que disminuyó la profundidad freática (relación exponencial). Con niveles freáticos profundos (> 3 m), ascensos del nivel se traducen en pequeños aumentos del área inundada (Fig. 9a). En cambio, con niveles más superficiales, los mismos cambios de nivel se traducen en mayores aumentos del área inundada (Fig. 9a). Cabe aclarar que para este análisis se sustrajo un dato correspondiente al año 1986 debido a que no se comportó de manera similar a los demás datos hallados, al mostrar un nivel de inundación muy alto a pesar de los niveles freáticos relativamente profundos de ese año. Posiblemente en esta fecha se capturó un evento de inundación rápida asociado a lluvias muy intensas que causaron encharcamiento por escurrimiento superficial.

Una cuestión interesante que emerge del análisis realizado en el freatómetro ubicado en el departamento Daireaux con una serie histórica de datos desde 1987 hasta el presente, es la diferente relación entre el nivel freático y el área inundada al considerar el proceso de expansión vs. retracción. Se observó que a un mismo nivel de inundación le correspondía un nivel freático más profundo cuando el área inundada se estaba expandiendo que cuando se estaba retrayendo. Por ejemplo, en la inundación del 1991-1995, para 1,23 % de área inundada que es cuando comenzaba la inundación le correspondía un nivel freático de 3,06 m cuando estaba en fase expansiva y un nivel de 2,36 cuando estaba en retracción. Se observó este comportamiento en los tres ciclos de inundación ocurridos durante el período de estudio, registrándose una diferencia media de 0,53 m de profundidad del nivel freático entre la fase de ascenso y descenso (Figura 9b).

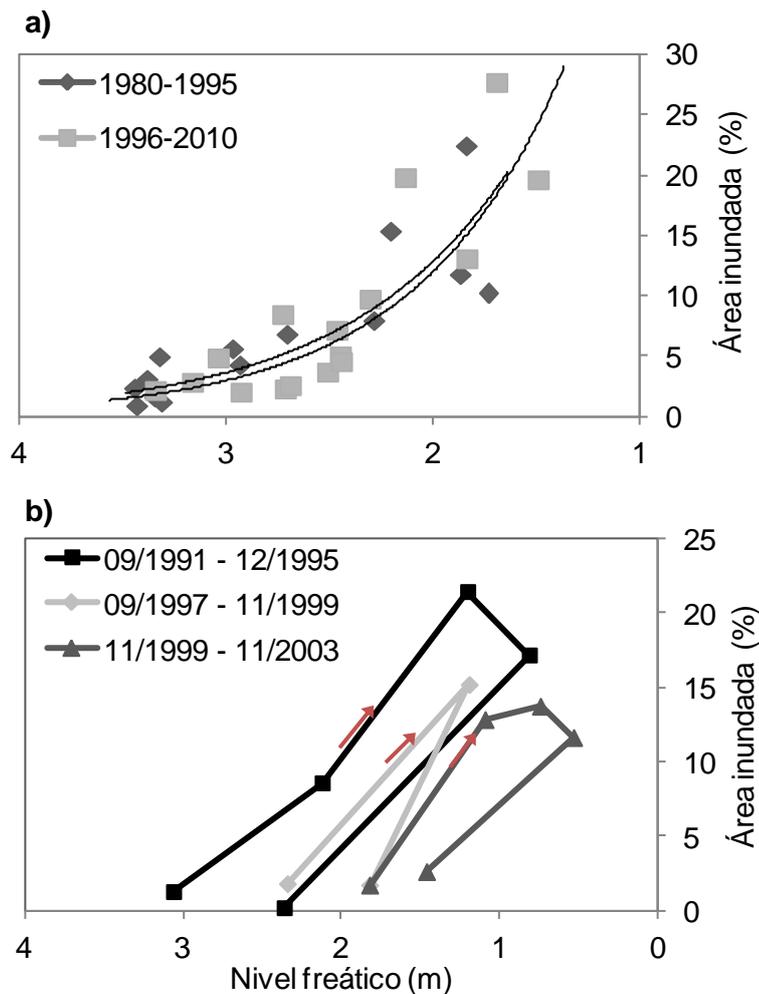


Figura 9: a) Relación entre el nivel freático y el área inundada (%) de toda la zona de estudio para los períodos de 1980-1995 ($r=0,87$; $P<0,05$) y 1996-2010 ($r=0,85$; $P<0,05$); b) Relación entre el nivel freático y el área inundada (%) para la zona de estudio seleccionada en los alrededores del freatómetro ubicado en el departamento Daireaux. Se indica con flechas rojas la trayectoria.

La asociación entre el área inundada (%) y el porcentaje de superficie sembrada y cosechada, fueron débiles, si bien fueron significativos. ($p < 0,05$)(Tabla 5).

Tabla 5: Análisis de correlación entre la fracción del área inundada y la fracción del área sembrada o cosechada y su diferencia.

	% inundado
% sup. Sembrada	-0,39
% Sup. Cosechada	-0,39
Dif. Sup semb - cos	-0,29

4. Discusión

A partir de las imágenes Landsat fue posible realizar un protocolo de clasificación sencillo capaz de distinguir áreas cubiertas por agua del resto del territorio sin previa corrección radiométrica de las bandas del infrarrojo medio, presentando alta confiabilidad en las estimaciones de las áreas inundadas. Este resultado concuerda con lo expuesto por Frazier y Page (2000), quienes pudieron delimitar con la banda 5 cuerpos de agua en llanura de inundaciones fluviales en el sur de Australia obteniendo una precisión de la clasificación muy similar a la clasificación multiespectral (clasificación supervisada de máxima probabilidad). Cabe aclarar que con el sensor Landsat MSS la clasificación pudo estar sobreestimada debido a que la misma se realizó con la banda del infrarrojo cercano, la cual tiene algunas limitaciones en la discriminación de píxeles mixtos y agua con alta turbidez para clasificar los cuerpos de agua (Frazier y Page, 2000). La resolución espacial de Landsat permitió detectar zonas anegadas de menos de una hectárea, sin embargo presenta limitaciones para estudios de mayor resolución temporal debido a que el tiempo de revisita del satélite es de 16 días y a menudo se pierden escenas por la influencia de las nubes.

Este estudio de 30 años permitió identificar fuertes variaciones en la superficie inundada y dos claros ciclos de inundaciones, con un intervalo de 14 años, que se desarrollaron gradualmente hasta cubrir más de una cuarta parte de la región de estudio. Esta característica hidrológica supone un fuerte condicionante de la producción agropecuaria y del bienestar en general de la población, la cual debe adaptarse no solo a estos eventos de inundación sino también a los eventos de sequía que caracterizan la región.

Por ejemplo, el último episodio que tuvo lugar en la zona pampeana en el período 2000-2001 cuando el agua cubrió el 27,7% de la superficie en algunas zonas la producción disminuyó a la mitad por lo que se tradujo en una pérdida económica de ~700 millones de dólares (Scarpati et al. 2008). El uso de la tierra y el incremento de las precipitaciones, que ya se están llevando a cabo en la región pampeana (Viglizzo et al. 2010, Barros et al. 2006), pueden aumentar aún más la vulnerabilidad a las inundaciones.

El análisis de la serie temporal de imágenes Landsat permitió detectar dos grandes inundaciones durante los años 1987 y 2001, La mayor tasa de retracción de la inundación del 2001 respecto a la de 1987 no puede explicarse por las condiciones hídricas que acontecieron durante los años posteriores a las inundaciones dado que los tres años posteriores a la inundación de 1987 fueron significativamente más secos que los de la inundación del 2001 ($PPT_{2002-2004} = 797 \text{ mm/y}$, $PPT_{1988-1990} = 945 \text{ mm/y}$; $BH_{2002-2004} = -336 \text{ mm/y}$, $BH_{1988-1990} = -246 \text{ mm/y}$). Es posible que la mayor cantidad de canales de evacuación de agua que se construyeron como respuesta a la primera de estas inundaciones (Badano, 2010), haya permitido una mejor evacuación los excesos hídricos de la región de estudio hacia zonas más bajas de la región pampeana y una retracción más rápida de la inundación del 2001. Por otra parte es importante destacar que el segundo ciclo de inundación dejó como legado niveles freáticos más superficiales que el primero, lo cual puede deberse en parte al aumento del área ocupada por cultivos anuales con raíces más superficiales que las de las pasturas de alfalfa que estos fueron reemplazando (Viglizzo et al. 2010).

El área inundada estuvo estrechamente asociada a los niveles de precipitación y balance hídrico (Figs. 7 y 8). Es interesante notar también que al estar la precipitación

correlacionada negativamente con la evapotranspiración potencial, los años lluviosos además de generar excesos hídricos también presentan menor demanda atmosférica por lo que los efectos se exacerbarían. Si bien la acumulación de precipitación de los 12 meses previos al momento de cuantificación del área inundada es suficiente para explicar satisfactoriamente su variabilidad, también se encontró que esta asociación se manifiesta hasta con periodos de integración de 3 años, posiblemente a través del efecto de largo plazo de las precipitaciones sobre los niveles freáticos (Aragón et al. 2010, Viglizzo et al. 2009). Es interesante resaltar que no se requieren excesos hídricos exagerados para desencadenar los procesos de inundación como los cuantificados en 1987 y 2001, ya que solo fueron necesarios niveles de precipitación 27% y 32% anuales, respectivamente, superiores a la media histórica para desencadenar dichos eventos. Cabe destacar que en el periodo 1897-2003 en la localidad de Pehuajó, situada en el centro de la zona de estudio, existieron nueve años con excesos mayores al 30% de la media (Taboada et al. 2009), sugiriendo que los procesos de inundación/retracción constituyen una característica hidrológica intrínseca de esta región.

La dinámica del área inundada mostró un estrecho acoplamiento con la dinámica del nivel freático medio a lo largo del período de estudio (Fig. 9). Estudios previos confirman este patrón (Forte Lay et al. 2007), pero sugieren ciertas diferencias cuando se considera la parte alta o baja de la cuenca o cuando el sistema está en la etapa de ganancia o retracción de agua (Aragón et al. 2010, Viglizzo et al. 2009). Es interesante destacar que si bien las inundaciones de 1987 y 2001 estuvieron claramente asociadas con fuertes ascensos de nivel freático, en el año 1993 se registró un ascenso freático similar al de las otras dos inundaciones el cual no tuvo un correlato similar en el área inundada (Figs 4a y 6b). Resulta difícil encontrar una explicación a este particular patrón. Si bien el ascenso freático del 1993 estuvo precedido por dos años con lluvias ~9% por encima de la media ($PPT_{1992-1993} = 1023$ mm/y), dichos niveles fueron notoriamente inferiores a los que produjeron las inundaciones de 1987 y 2001 ($PPT_{1986-1987} = 1196$ mm/y, $PPT_{2000-2001} = 1244$ mm/y). Cabe destacar por otro lado, que el ascenso freático de 1993 ocurrió en un contexto que presentaba una superficie agrícola significativamente inferior a los años 1987 y 2001 (Fig. 6c), si bien la relación de causalidad de ambos procesos no es evidente.

La clasificación con el sensor MODIS no alcanzó a obtener estimaciones de manera satisfactoria del área inundada aplicando la técnica del análisis lineal de mezcla espectral. Sin embargo, estudios realizados en la meseta Tibetana de China y en Corea han podido estimar cuerpos de agua mediante la técnica Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis (MESMA) en forma satisfactoria empleando diferentes productos de MODIS (Cui et al. 2011, Kim et al. 2012). Se considera que esta limitación del análisis de mezcla en el área de estudio se debe a la gran diversidad de coberturas del suelo (cuerpos de agua, suelo descubierto, suelo con rastrojo, zonas salinizadas, pastizales, pasturas, cultivos en distintas etapas de desarrollo, forestaciones, etc.) con comportamientos espectrales singulares. Esta gran diversidad de coberturas de suelo dificultaría el uso satisfactorio de la técnica.

La llanura pampeana muestra recurrentes ciclos de inundación que seguramente volverán a afectarla en el futuro, perturbando la actividad agropecuaria. El control, al menos parcial de estas inundaciones requiere una visión más integrada del sistema ecohidrológico pampeano. Es importante reconocer las oportunidades que brinda la napa freática sobre los cultivos, así como los perjuicios que pueden acarrear su ascenso y posibles episodios de inundación. Sería interesante establecer una red de freatómetros

medios en forma periódica y sostenida para ofrecer un sistema de monitoreo y prevención de inundaciones, anticipándose a futuros eventos de excesos hídricos y planteando mejores estrategias productivas. Es trascendental crecer en el conocimiento de estas interacciones y compatibilizar estrategias agrícolas con estrategias de ordenamiento hidrológico en la llanura pampeana.

5. Conclusiones

Los resultados obtenidos permitieron caracterizar la variación del área inundada en un sector de la Pampa Interior de Buenos Aires. Es evidente que la clasificación simplificada con umbral, empleando los datos de la banda 5 del satélite Landsat TM se pueden utilizar para identificar y mapear cuerpos de agua con alta confiabilidad y de manera expeditiva. Las estimaciones del área inundada generadas a partir del sensor MODIS aplicando la técnica ALME no fueron satisfactorias en comparación con la clasificación realizada con el satélite Landsat.

A partir de las clasificaciones de superficie inundada durante el período de estudio, se logró caracterizar dos grandes ciclos completos de inundación, siendo sus máximos en 1987 y 2001. La dinámica del área inundada y del nivel freático manifestaron un estrecho acoplamiento durante el período de estudio, excepto en el año 1993 cuando se registró un ascenso freático similar al de las otras dos inundaciones pero no tuvo un correlato similar en el área inundada. En las tres inundaciones, la tasa de ascenso del nivel freático fue mayor que la tasa de descenso.

La precipitación es la variable que mayor influencia presentó sobre los ciclos de inundación aun con períodos largos de integración de hasta 3 años. Los eventos de inundación que ocurren en la Pampa Interior serían el resultado combinado de diversos factores, como las precipitaciones, el nivel freático, el balance hídrico, la topografía y el uso del suelo. Es importante tener en cuenta que la dinámica de las inundaciones en esta región no presenta alta frecuencia, siendo su expansión lenta y retracción aún más lenta. Considerando ésta característica del proceso, junto al uso de herramientas como la teledetección serían beneficiosos para implementar un sistema de alerta temprana de seguimiento y así facilitar una política de uso de la tierra y suavizar el impacto indeseado de las inundaciones.

Dado que la clasificación ensayada para separar áreas inundadas con imágenes MODIS no dio resultado, se podría avanzar con otras metodologías, especialmente aquellas que consideren el albedo, variable muy sensible a la presencia de agua en la superficie. Para comprender mejor la relación entre la cobertura del terreno y el área inundada se sugieren plantear modelaciones hidrológicas a nivel de paisaje, apoyadas en códigos como HYDRUS o MODFLOW. Comparar el mapa de inundaciones del Observatorio de Inundaciones Darmouth de la Universidad de Colorado con lo estimado con el satélite Landsat. Este trabajo provee una base sobre la cual esfuerzos de este tipo podrían calibrarse o evaluarse al ofrecer la descripción de variables clave hidrológicas tales como el área inundada o el nivel freático para un período extendido de tiempo.

6. Bibliografía

- Adams, J.B., M.O. Smith, y P.E. Johnson. 1986. Spectral mixture modelling: a new analysis of rock and soil types at the Viking Lander I site. *Journal of Geophysical Research*, 91: 8098-8112.
- Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes, y M.D. Smith. 1998. *Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. FAO: Rome; p. 328.
- Aragón, R., E.G Jobbágy, y E.F Viglizzo. 2010. Surface and groundwater dynamics in the sedimentary plains of the Western Pampas (Argentina). *Ecohydrology*, DOI: 10.1002/eco.149.
- Badano, N.D. 2010. Modelación hidrológica integrada de grandes cuencas de llanura con énfasis en la evaluación de inundaciones. Tesis de grado en Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, UBA.
- Baldi, G., y J.M. Paruelo. 2008. Land use and land cover dynamics in South American temperate grasslands. *Ecology and Society* 13(2): 6.
- Bach, H., F. Appel, K. Fellah, y O. De Fraipoint. 2005. Application of flood monitoring from satellite for insurances. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)* 1, art. No. 1526104, pp. 63-66.
- Barros, V., A. Menendez, y G. Nagy. 2006. *El cambio climático en el Río de la Plata*. Centro de Investigaciones del Mar y la Atmosfera (CIMA): Libros del Zorzal, Buenos Aires, Argentina; 174 p.
- Basualdo, A. y J.A. Forte Lay. 2004. Aumento del área sojera e impacto sobre el balance hídrico regional, X Reunión Argentina y IV Latinoamericana de Agrometeorología: “Agrometeorología y seguridad alimentaria en América Latina”, Mar del Plata, Argentina.
- Bonn, F., y R. Dixon. 2005. Monitoring flood extent and forecasting excess runoff risk with RADARSAT-1 data. *Natural Hazards* 35 (3), pp. 377-393.
- Brunke M, Gonser T. 1997. The ecological significance of exchange processes between rivers and groundwater. *Freshwater Biology* 37(1):1-33.
- Campos, A.N. “Estudio de la dinámica hidrológica de una región arrea del noroeste de la provincia de Buenos aires, Argentina”. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de La Plata. 2013.
- Collado, A.D., E. Chuvieco, y A. Camarasa. (2002). Satellite remote sensing analysis to monitor desertification processes in the crop-rangeland boundary of Argentina. *Journal of Arid Environments* 52, 121-133.
- Contreras, S., Nosetto, M.D., Calderon, S., Jobbágy, E.G., 2008. Impacto de las aguas subterráneas en la producción de agroecosistema: modelización acoplada a través del código VegNap. XXIII Reunión Argentina de Ecología, San Luis, Argentina.
- Contreras S, Jobbágy EG, Villagra PE, Nosetto MD and Puigdefábregas J. 2011. Remote sensing estimates of supplementary water consumption by arid ecosystems of central Argentina. *Journal of Hydrology*, 397:10-22.
- Cui, Q., J. Shi, y Y. Xu. 2011. Estimation of sub-pixel water area on Tibet plateau using multiple endmembers spectral mixture spectral analysis from MODIS data. *Proceedings of SPIE – The International Society of Optical Engineering*, 8006, art n° 80061T.
- Chuvieco, E. 2002. *Teledetección ambiental: la observación de la tierra desde el espacio*. Barcelona, Ariel Ciencia. 586 p.
- Di Bella, C.M., C.M. Rebella, y J.M. Paruelo. “Evapotranspiration estimates using NOAA AVHRR imagery in the Pampa region of Argentina”. *International Journal of Remote Sensing* 21, 4, pp. 791-797. 2000.

- Della Chiesa, T. "Estimación del balance de agua del suelo en la región pampeana utilizando datos provenientes de sensores remotos". Trabajo correspondiente al ciclo de intensificación para acceder al título de ingeniero agrónomo, Universidad de Buenos Aires. 2011.
- Díaz-Zorita, M., M. Pepi, y G. Grosso. 1998. Estudio de las precipitaciones en el oeste bonaerense. EEA INTA: Buenos Aires, INTA, Villegas, Argentina; 15 p.
- Ferone JM, Devito KJ. 2004. Shallow groundwater-surface water interactions in pond-peatland complexes along a Boreal Plains topographic gradient. *Journal of Hydrology* 292: 75–95.
- Forte Lay, J.A., E. Kruse, y J.L. Aiello. 2007. Hydrologic scenarios applied to the agricultural management of the northwest of the Buenos Aires Province, Argentina. *GeoJournal*, 70: 263-271.
- Frappart F., Calmant S., Cauhopé M., Seyler F. and Cazenave A., Validation of ENVISAT RA-2 derived water levels over the Amazon basin, *Remote Sensing of Environment*, 100, 252-264, 2006.
- Frazier, P.S., y K.J. Page. 2000. Water body detection and delineation with Landsat TM data. *Photogrammetric, Engineering and Remote Sensing*, vol 66, n° 12: 1461-1467.
- Gianinetto, M., P. Villa, y G. Lechi. 2006. Postflood damage evaluation using Landsat TM and ETM+ data integrated with DEM. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing* 44 (1), pp. 236-243.
- Hall, A. J., C. M. Rebella, C. M. Ghersa, y J.-P. Culot. 1992. Field crop systems of the Pampas. Pages 413-450 en C. J. Pearson, editor. *Field crop ecosystems*. Elsevier, Amsterdam.
- Herrera, L.P., V.G. Hermida, G.A. Martínez, P. Láttera, y N. Maecira. 2005. Remote sensing assessment of *Paspalum quadrifarium* grasslands in the Flooding Pampa Argentina. *Rangeland Ecology and Management* 58 (4), pp. 406-412.
- Horwitz, H.M., R.F. Nalepka, P.D. Hyde, y J.P. Morgenstern. 1971. Estimating the proportion of objects within a single resolution element of a multispectral scanner. *Seventh International Symposium on Remote Sensing of Environment*, pp. 1307-1320.
- Iriondo, M. 1999. Climatic changes in the South American plains: records of a continent-scale oscillation. *Quaternary International* 57/58: 93–112.
- Jobbágy, E.G., y C. Santoni. 2006. La (nueva) agricultura y la hidrología en la llanura chaco pampeana: Desafíos para las próximas décadas. *XXII Reunión Argentina de Ecología: Hechos y Perspectivas*.
- Jobbágy, E.G., Noretto, M.D., Santoni, C., y G. Baldi. 2008. El desafío ecohidrológico de las transiciones entre sistemas leñosos y herbáceos en la llanura Chaco-Pampeana. *Ecología Austral – Sección Especial "Problemas Ambientales"*, 18:305-322.
- Jun, J.N., D.C. Seo, y H.S. Lim. 2004. Calculation of agricultural land flooding disaster area by typhoon from KOMPSAT-1 EOC satellite image data. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)* 7, pp 4678-4681.
- Kim, S., Cong, H.N., Heo, J. 2012. Multiple endmember spectral mixture analysis model applied to water cover mapping using MODIS data. *33rd Asian Conference on Remote Sensing 2012, ACRS 2012*, 1, pp. 769-770.
- Kruse, E., J. A. Forte Lay, y J. L. Aiello. 2005. Water table fluctuations: an indicator of hydrological behavior in the northwest region of Buenos Aires province (Argentina), *Sustainability of Groundwater Resources and its Indicators*, IAHS Publication, 302, 2005.

- Kuligowski, R.J. 2006. Satellite rainfall estimates for global flood monitoring and prediction. Proceedings of SPIE. The International Society for Optical Engineering 6412.
- Kummerow C, Barnes W, Kozu T, Shiue J, Simpson J. 1998. The tropical rainfall measuring mission (TRMM) sensor package. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 15: 809–817.
- Lacava, T., M. Greco, E.V. Di Leo, G. Martino, N. Pergola, F. Sannazzaro, y V. Tramutoli. 2005. Monitoring soil wetness variations by means of satellite passive microwave observations: The HYDROPTIMET study cases. *Natural Hazards and Earth System Science* 5 (4), pp. 583-592.
- Marsh, S.E., P. Switzer, W.S. Kowalick, y R.J.P. Lyon. 1980. Resolving the percentage of component terrains within single resolution elements. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 46: 1079-1086.
- Mu, Q., Zhao M., y S.W. Running. “Improvements to a MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration Algorithm”. *Remote Sensing of Environment*, 115, pp. 1781-1800. 2011.
- Nosetto, M.D., E.G. Jobágy, y J.M. Paruelo. “Land-use change and water losses: the case of grassland afforestation across a soil textural gradient in central Argentina”. *Global Change Biology* 11, pp. 1101–1117. 2005.
- Nosetto, M.D., E.G. Jobágy, R.B. Jackson, y G.A. Sznaider. 2009. Reciprocal influence of crops and shallow ground water in sandy landscapes of the Inland Pampas. *Field Crop Research* 113: 138–148. DOI: 10.1016/j.fcr.2009.04.016.
- Nosetto, M.D., E.G. Jobágy, A.B. Brizuela, y R.B. Jackson. 2012. The hydrologic consequences of land cover change in central Argentina. *Agricultural, Ecosystems and Environment*, 154: 2-11.
- Overton, I.C. 2005. Modelling floodplain inundation on a regulated river: Integrating GIS, remote sensing and hydrological models. *River Research and Applications* 21 (9): 991-1001.
- Paruelo, J.M., y Sala, O.E. 1990. Caracterización de las inundaciones en la Depresión del Salado: dinámica de la capa freática. *Turrialba*, 40:5-11.
- Paruelo, J.M., J.P. Guerschman, G. Piñeiro, E.G. Jobágy, S.R. Verón, G. Baldi, y S. Baeza. 2006. Cambios en el uso de la tierra en Argentina y Uruguay: marcos conceptuales para su análisis. *Agrociencia*, Vol. X N°2: 47-61.
- Pringle, C.M. 2001. Hydrologic connectivity and the management of biological reserves: a global perspective. *Ecological Applications* 11(4): 981–998.
- Quarmby, N.A., J.R.G. Townshend, J.J. Settle, K.H. White, M. Milnes, T.L. Hindle, y N. Silleos. 1992. Linear mixture modeling applied to AVHRR data for crop area estimation, *International Journal of Remote Sensing*, 13 pp. 415-425.
- Raffo, J.M. 1954. Variaciones de la napa freática en relación con la precipitación, la presión atmosférica y la temperatura. Pp 99-110. En: *Fluctuation des nappes aquifères*. Publ. N° 37. Louvain, 1954, 604 pp.
- Sandoz, A., y N. Thauvin. 2006. Wetland habitat and flooding duration satellite monitoring. European Space Agency, (special Publication) (ESA) SP (SP-634).
- Sala, J.M., N. González, y E. Kruse. 1983. Generalización hidrológica de la Provincia de Buenos Aires. En: *Coloquio sobre Hidrología de Grandes Llanuras*. II: 973-1009. PHI – UNESCO. Olavarría.
- Salvador, V. 2010. Evaluación de la dinámica hidrológica de la pradera pampeana en respuesta a cambios en el uso de la tierra. Tesis de maestría en Manejo y Conservación de Recursos Naturales para la Agricultura. Área de Ciencias de las Plantas y Recursos Naturales. Mar del Plata, UNMDP.pv.

- Scarpati, O.E., J.A. Forte Lay, y A.D. Capriolo. 2008. La inundación del año 2001 en la Provincia de Buenos Aires, Argentina, *Mundo Agrario*, Centro de Estudios Rurales, UNLP. 9, 17 [<http://www.mundoagrario.unlp.edu.ar>], vol.9, n.17, pp. 00-00. ISSN 1515-5994.
- Settle, J.J. y N.A. Drake. 1993. Linear mixing and the estimation of ground cover proportions. *International Journal of Remote Sensing*: 14 pp. 1159-1177.
- Shimabukuro, Y.E., y J.A. Smith. 1991. The least-squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 29 pp. 16-20.
- Soriano A, Leon RJC, Sala OE, Lavado RS, Deregibus VA, Cahuepe M, Scaglia OA, Velazquez CA, Lemcoff JH. 1991. Río de la Plata Grasslands. In *Natural Grasslands: Introduction and Western Hemisphere. Ecosystems of the World*, Coupland RT (ed). Amsterdam: Elsevier; 367–407.
- Swenson, S., J. Wahr, y P.C.D. Milly. 2003. Estimated accuracies of regional water storage variations inferred from gravity recovery and climate experiment (GRACE). *Water Resource Research* 39(8): 1223.
- Taboada, M.A., F. Damiano, y R.S. Lavado. 2009. Inundaciones en la Región Pampeana. Consecuencia sobre los suelos. 2009. pag. 103-127. En: Taboada y Lavado (Ed.). *Alteraciones de la fertilidad de los suelos: el halomorfismo, la acidez, el hidromorfismo y las inundaciones*. EFA, Buenos Aires. ISBN 978-950-29-1162-5.
- Tapley, B.D., S. Bettadpur, J.C. Ries, P.F. Thompson, y M.M. Watkins. 2003. GRACE measurements of mass variability in the Earth System. *Science* 23(5683): 503–505.
- Viglizzo, E.F., y F.C. Frank. 2006. Ecological interactions, feedbacks, thresholds and collapses in the Argentine Pampas in response to climate and farming during the last century. *Quaternary International* 158(1): 122–126.
- Viglizzo, E.F., Z.E. Roberto, F.A. Lértora, E.L. Gay, y J. Bernardos. 1997. Climate and land-use change in field crop ecosystems of Argentina. *Agricultural, Ecosystems and Environment* 66: 61–70.
- Viglizzo, E.F., F. Lértora, A.J. Pordomingo, J.N. Bernardos, Z.E. Roberto, y H. Del Valle. 2001. Ecological lessons and applications from one century of low external-input farming in the Pampas of Argentina. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 83: 65-81.
- Viglizzo, E.F., F.C. Frank, L.V. Carreño, E.G. Jobbágy, H. Pereyra, J. Clatt, D. Pincén, y M.F. Riccard. 2010. Ecological and environmental footprint of 50 years of agricultural expansion in Argentina. ***Global Change Biology***. 17 (2), 959-973.
- Viglizzo, E.F., E.G. Jobbágy, L.V. Carreño, F.C. Frank, L. de Oro, y V.S. Salvador. 2009. The dynamics of cultivation and floods in arable lands of central Argentina. *Hydrology & Earth System Science* 13, 491-502.
- Viglizzo EF, Frank FC, Carreño LV, Jobbágy EG, Pereyra H, Clatt J, Pincén D, Ricard MF. 2011. Ecological and environmental footprint of 50 years of agricultural expansion in Argentina. ***Global Change Biology***, 17:959-973.
- Weissling, B.P., H. Xie, K.E. Murray. 2007. A multitemporal remote sensing approach to parsimonious streamflow modeling in a southcentral Texas watershed, USA. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 4 (1), pp. 1-33.