

Recurrencia de anegamiento en la depresión del río Salado: subcuenca B4

Flooding recurrence in the Salado river depression: subriver basin B4

P. Vazquez¹, S. Masuelli², G. Platzcek², y O. Boolsen³
pmvazquez@correo.inta.gov.ar

¹INTA, EEA Cuenca del Salado. Av. Belgrano 416 (7203), Rauch. Buenos Aires

²CONAE. Centro Espacial Teófilo Tabanera. Ruta 645 km 8 (5187), Córdoba.

³Servicio Meteorológico Nacional – Fuerza Aerea Argentina. 25 de mayo 658. Capital Federal.

Recibido el 10 de Julio de 2008, aceptado el 17 de Septiembre de 2008

RESUMEN

Se determinó la recurrencia de anegamiento a escala semidetallada de la subcuenca B4, perteneciente a la cuenca baja del río Salado. Para su determinación, se realizó un estudio multitemporal de la evolución de las áreas inundadas durante el período 1985 – 2005 con imágenes Landsat TM5 y ETM7 y la base de datos pluviométricos diarios de 20 estaciones meteorológicas distribuidas en la región. Se definieron 11 clases de recurrencia con un grado de certidumbre del 95%. Se identificó un claro patrón de expansión de las aguas, asociado al tipo de relieve y a la cantidad de lluvia precipitada. Los períodos críticos de inundaciones son otoño e invierno. Los problemas severos comienzan a partir de precipitaciones superiores a los 150 – 200 mm acumuladas durante 30 días, donde estaría anegada el 67 % de la superficie por períodos mayores a 3 meses. Los riesgos son mayores en otoño, por ser una estación más húmeda. Un 25 % de los cultivos son realizados en áreas de recurrencia de anegamiento superior o igual al 40 %, lo que implica la posibilidad de perder 72413 ha. todos los años. Sin embargo, sólo el 7 % de las pasturas y verdeos es realizado en suelos riesgosos. Esto responde a que el recurso forrajero puede ser fácilmente degradado por el pisoteo bajo condiciones de anegamiento. Las estructuras antrópicas contribuyen en un 12 % en el anegamiento regional.

PALABRAS CLAVE: Riesgo de anegamiento, recurrencia, cuenca del río Salado.

ABSTRACT

The recurrence of flooding in a medium detail scale of the subriver basin B4, pertaining to the low river basin of the Salado river. For the determination, a multi-temporal study of the evolution of the areas flooded during period 1985 - the 2005 with images Landsat TM5 and ETM7 and daily pluviometric data base of 20 distributed weather stations in the region was realized. 11 classes of recurrence were detected with a degree of certainty of 95%. A clear pattern of water expansion was identified, associated to relief type and the amount of rain. The critical floods periods were autumn and winter. The severe problems begin after precipitations superior to 150 - 200 mm accumulated in 30 days, where 67 % of the surface would be flooded per periods greater than 3 months. The risks are greater in autumn, because is a humid station. 25 % of the cultures are made in areas of recurrence greater than 40 %, which implies the possibility of losing 72413 has every year. Nevertheless, only the 7 % of pastures is made in risky grounds. This responds to that forage resource can easily be degraded by direct grazing under flooding conditions. The anthropic structures contribute in 12 % in regional flooding.

KEYWORDS: Flooding risk, recurrence, Salado river basin.

INTRODUCCION

La depresión del río Salado es una extensa llanura anegable dominada por la presencia de suelos hidromórficos del suborden Natracuales y Natracualfes (Provincia de Buenos Aires 1981, Miaczynski 1995, Soil Survey Staff 2006) ubicada en el centro-este de la provincia de Buenos Aires, Argentina (36°18'15"S; 58°36'56"W) (figura 1).



Figura 1: Ubicación del área de estudio.

Abarca en gran parte la cuenca media y baja del río Salado, todos los sistemas hidrográficos de sus tributarios y el sistema del río Sanborombón. Es el área de concentración de los escurrimientos superficiales y subsuperficiales por excelencia de un área de 10 millones de hectáreas. La región que más frecuentemente se anega es la subcuenca B4, cuya superficie puede estimarse en 3.5 millones de hectáreas (Posadas 1934, Barbagallo 1983).

El patrón hidrológico de la depresión del Salado esta bien definido en el espacio y en el tiempo, pero las respuestas a dichos eventos no pueden ser explicadas por los conceptos clásicos de la hidrología de superficie (transmisión de un volumen en el tiempo), ya que se trata de una extensa zona plana salpicada

de cubetas y de escasa energía morfogenética (Tricart 1973). Esto se ve claramente si se representa a los procesos de entrada y salida del agua del sistema en un modelo el balance hidrológico.

$$Pp=Et+Es+Rs+Pc+Alm$$

Donde

- Pp: precipitación
- Et: evapotranspiración
- Es: escurrimiento superficial
- Rs: retención superficial (lagunas, cubetas, cañadas)
- Pc: percolación a la napa
- Alm: almacenamiento en el suelo.

Para un sistema hidrológico como el de la depresión del Salado, caracterizado por disipar la energía proveniente de la lluvia por medio de la amortiguación (retención del agua donde cae), se observa que:

$$Pp-(Et +Rs+Pc+Alm)= Es$$

y $Es < 10\%$

Por lo tanto es de esperar que la precipitación caída en la zona no sea evacuada por canales, cañadas y arroyos, sino que el sistema capta el agua y lo transformaría en expansión y disipación ocupando todas las áreas deprimidas de primer orden, para luego, una vez colmatadas éstas, avanzar sobre las siguientes, en función de su altura relativa. Tal cual lo descrito por Posadas (1934), la zona tendría una capacidad estimada de retención de agua en depresiones que según distintos autores rondaría entre los 100 y 300 mm, aunque este dato es estimativo y nunca fue evaluado (Sala 1983).

También es importante destacar que más del 70% de las grandes inundaciones se han observado con eventos extraordinarios de otoño – invierno, con una duración media del período anegado de cinco meses. El resto ocurrieron durante la primavera, pero por condiciones de mayor demanda evapotranspirativa, su duración media descendió a tres meses o menos (Posadas 1934, Barbagallo 1983). Esto refuerza la idea que el principal componente vertical que controla el volumen de agua superficial es la evapotranspiración. La capacidad de infiltración de un horizonte Bt sódico típico de la depresión del Salado, que llegaría a lo sumo a 0.001 mm día, un techo del mismo cercano a los 10 – 20 cm de profundidad, y una velocidad de infiltración básica inferior a los 17 mm h⁻¹ (INTA 1977, Provincia de Buenos

Aires 1981, Vázquez 2001). Seguramente existen vías de flujo preferencial hacia las profundidades, pero son de escasa importancia ante la magnitud de estos eventos. Cuando están húmedos, los suelos arcillosos, y más aún los sódicos, se expanden notablemente ($COLE > 0.110$), cerrando cualquier grieta. Con respecto a las napas, varios autores han probado que en la depresión del Salado no hay relación evidente entre la altura de la napa y el agua acumulada en superficie (Sala et al 1981, Lavado y Taboada 1986). Ellos detectaron que en momentos húmedos y de napas altas, la calidad del agua de la napa ubicada a unos 40 cm de profundidad poseía una composición química totalmente distinta a la superficial y que no había relación existente entre la altura de la freática y el estado hídrico de las distintas comunidades vegetales del pastizal. La tensión capilar es poco significativa en momentos de saturación del suelo si no existe una demanda atmosférica importante, por lo cual dominan los movimientos descendentes del agua. En periodos de alta demanda atmosférica, dominan la evapotranspiración y el ascenso capilar, motivo por el cual suelen observarse aumentos en la conductividad eléctrica y aumento del pH en superficie (Barbagallo 1983).

Todas estas observaciones concuerdan con lo observado en la cuenca del ao. Azul, donde incrementos significativos en el área cubierta por agua se observan sólo al llegar a un determinado milimetraje acumulado (Vázquez 2003). Es evidente entonces que los procesos verticales dominan la dinámica del agua acumulada superficialmente en la depresión del Salado, como son la evapotranspiración y la infiltración profunda y el almacenamiento.

La teledetección ha probado ser una herramienta poderosa al momento de evaluar áreas afectadas por distintas catástrofes. El mapeo de inundaciones puede considerarse como un ejercicio multidisciplinario que involucran estudios de base geomorfológicos y climáticos, complementados por una aproximación aportada por los sensores remotos, muchas veces más sensible que la escala de la información de base disponible (Hudson y Colditz 2003). De hecho, los mapas topográficos del IGM existentes en el área (escala 1:50.000 y equidistancia = 2.5 m) son insuficientes para describir en detalle el relieve y su relación con los sitios donde se almacenará el agua. Con las imágenes RADAR se pueden generar modelos digitales de terreno con excelentes resultados tanto a escalas regionales como locales (Burrough et al. 2000).

La distribución de lluvias es igualmente importante al momento de modelar la anegabilidad, puesto que la distribución de las tormentas nunca es homogénea sobre toda la región, y es fundamental conocer dicha información pues explica el sentido en el que el agua puede avanzar sobre las depresiones de primer y segundo orden (Barbagallo 1983).

A partir de estos antecedentes, se realizó un estudio multitemporal con imágenes de satélite para determinar la recurrencia de anegamiento de la subcuenca B4, perteneciente a la cuenca baja del río Salado.

MATERIALES Y METODOS

INFORMACIÓN DE BASE

Se ha trabajado con información de numerosas fuentes para lograr el mapa de anegamiento definitivo. Las fuentes pueden agruparse en Cartografía disponible, imágenes satelitales y datos de precipitación diaria.

Cartografía disponible.

Cartas topográficas del Instituto Geográfico Militar (IGM)

Información: Límites de partidos, ciudades, caminos primarios y secundarios, curvas de nivel de los partidos de Azul y Rauch (equidistancia 2.5 metros)

Formato: Papel

Escala: 1:50.000

Georreferenciación: Coordenadas planas Gauss-Krüger (sistema Campo Inchauspe).

Cursos de agua del Instituto Nacional del Agua (INA)

Información: Cursos de agua permanentes y semipermanentes, lagunas permanentes y semipermanentes, canales principales y secundarios.

Formato: Digital.

Escala: 1:50.000

Cartas geomorfológicas del INTA.

Información: Mapa geomorfológico de la cuenca baja del río Salado.

Formato: Digital

Escala: 1:50.000.

Imágenes Satelitales facilitadas por la CONAE (proyecto Emergencias Ambientales n° 136)

Información: 60 Imágenes Landsat TM5 y ETM7 (tabla 1)

Path – Row				
22485	22486	22585	22586	22685
Fechas disponibles				
		19860515	19860515	
	19971127	19971127	19971127	
19980303				
	20000104			20000126
20000205		20000228	20000228	
		20000510	20000510	
20001010	20001010	20001102	20001102	20001109
		20010105	20010129	
		20010427	20010427	
		20010513	20010513	
				20010808
20010910	20010911	20010910		
20011122	20011122	20011121	20011121	
		20011223	20011223	
			20020116	
		20020410	20020410	20020330
20020509	20020509			
20020610	20020610			20020624
	20021016	20021007	20021007	
		20021124	20021124	20021115
20021203	20021203	20021226		
				20030118
		20030316		
20030410				
20031027	20031027			
		20031127	20031127	20031127

Tabla 1: Imágenes Landsat TM5 y ETM7 utilizadas en el estudio

Las imágenes disponibles representan períodos de lluvias extraordinarias, eventos húmedos, promedio y secos de cada estación del año.

Mosaico fotográfico de referencia espacial patrón: <http://delenn.gsfc.nasa.gov>

Información: Imágenes Landsat ETM7 pancromáticas (resolución espacial 14.25 m), georreferencia Gauss Krüger faja 5. Diferencia espacial respecto de la señal GPS: 1 píxel.

Datos de precipitación diaria

Información: pluviometría diaria de 20 estaciones provenientes del Servicio Meteorológico Nacional (SMN 2004) (tabla 2 y figura 2).

Estaciones meteorológicas

Localidad	coordenadas	inicio	fin	longitud(años)
Olavaria	36.90°S; 60.30W	01/01/1980	30/09/2004	24.75
Las Flores	36.03S; 59.08W	01/01/1980	30/09/2004	24.75
Azul	36.78S; 59.83W	01/01/1980	30/09/2004	24.75
Mar del Plata	36.00S; 57.58W	01/01/1980	30/09/2004	24.75
Tandil	37.33S; 59.13W	01/01/1980	30/09/2004	24.75
Madariaga	36.99S; 57.10W	01/01/1980	31/12/2003	24.00
Ayacucho	37.14S; 58.49W	01/01/1980	30/09/2004	24.75
Rauch	36.76S; 59.07W	01/01/1980	30/09/2004	24.75
Maipú	36.85S; 57.85W	01/01/1980	30/09/2004	24.75
Guido	36.67S; 57.85W	01/01/1980	29/01/2003	23.08
Belgrano	35.79S; 58.46W	01/01/1980	30/09/2004	24.75
Punta Indio	35.30S; 57.22W	01/01/1980	30/09/2004	24.75
Dolores	36.33S; 57.70W	01/05/1980	30/12/2003	23.66
Castelli	36.11S; 57.77W	01/01/1980	30/12/2003	23.99
Saladillo	35.61S; 59.77W	01/01/1980	31/07/1997	17.58
Tapalqué	36.37S; 60.00W	01/02/1980	31/10/1992	12.75
Alvear	36.04S; 60.00W	01/01/1980	01/12/1992	12.92
Balcarce	37.85S; 58.24W	01/01/1980	30/12/2003	23.99
Bolívar	36.22S; 61.09W	01/01/1980	30/12/2003	23.99
Lezama	35.87S; 57.89W	01/01/1980	30/09/2004	24.75

Tabla 2: Ubicación de las estaciones meteorológicas consultadas y períodos estudiados disponibles.

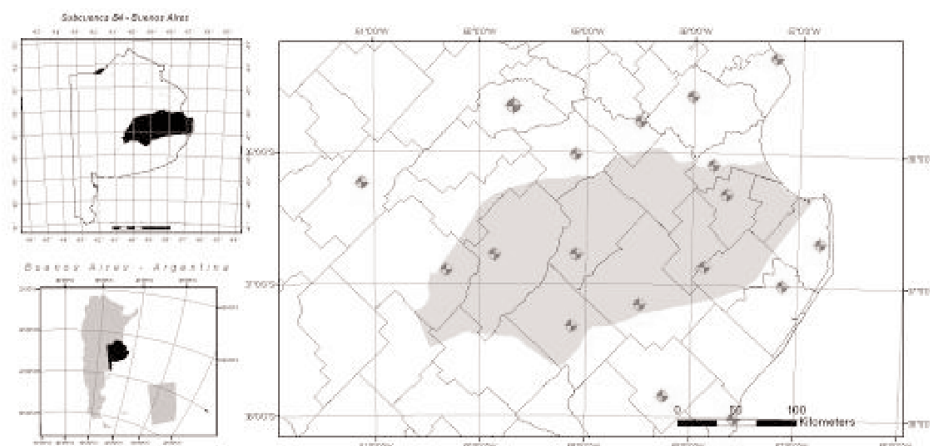


Figura 2: Distribución espacial de las estaciones meteorológicas del SMN en el área de influencia de la subcuenca B4.

PROCESADO DE IMAGENES

Las imágenes fueron georreferenciadas a partir de un mosaico pancromático Landsat ETM7, de 14 m de resolución espacial y error en X e Y de un píxel, por el método rotación, traslación, reescalado, utilizando el algoritmo de vecino más próximo, ya que esta combinación no altera sensiblemente el valor radiométrico de los píxeles. La proyección utilizada fue Gauss Krüger faja 5 (datum Campo Inchauspe). La clasificación de agua se realizó aplicando el método del árbol, el cual consiste en discriminando las clases entre sí en pasos sucesivos, tal cual lo haría un sistema experto, utilizando en cada caso información específica que permiten separar una clase del resto. Lo interesante de este método, a diferencia de la clasificación supervisada, es que no utiliza todas las bandas incluidas en la clasificación para discriminar, sino que se aprovecha de un conocimiento previo del comportamiento espectral de cada clase para extraerlo con precisión. Esto evita el incremento en el desvío estándar de las clases a separar por efecto de incluir información no necesaria, y por ende, una mayor factibilidad de discriminar satisfactoriamente cada clase de su entorno (Skidmore 1989, Chuvieco 2000). Se utilizaron las bandas IRM (banda 5), IRL (banda 7) y el NDVI. La selección obedece a experiencias previas realizadas en la zona por Vázquez *et al* (2006). La zona presenta vegetación que crece

en los cuerpos de agua (palustres) o cultivos forrajeros con un elevado contenido de humedad en sus hojas en determinados momentos del año, por lo que el uso de una sola banda (IRL) es insuficiente para clasificar agua. En términos generales, el IRL se utiliza para identificar cuerpos de agua libre. Los cultivos que presentan elevada humedad en su canopia se confunden con los cuerpos de agua, por lo cual se utiliza el NDVI para identificarlos y eliminarlos de las áreas clasificadas. La banda IRM se utilizó específicamente para identificar cubiertas con vegetación palustre senescente en invierno sobre las lagunas, e incluirlas dentro del área clasificada como agua. Todas ellas fueron corregidas radiométricamente según los algoritmos sugeridos por la NASA (2001). Debido a la escasa información atmosférica disponible para la región, se corrigieron a las imágenes por el método de Chávez (1996) incluido en el módulo ATMOSC del software IDRISI ANDES (2006), el cual solo requiere ingresar datos necesarios para aplicar el método de sustracción del cuerpo oscuro, pero agregándole un procedimiento para estimar los efectos de absorción de los gases atmosféricos y el efecto Rayleigh a partir del coseno del ángulo zenital solar. Basándose en determinaciones de anegamiento previos en el área (Vázquez *et al* 2003), se clasificaron y binarizaron las áreas anegadas en las 60 imágenes disponibles, obteniéndose 29 mosaicos parciales (uno por cada fecha estudiada).

CÁLCULO DE FRECUENCIA RELATIVA Y RECURRENCIA DE ANEGAMIENTO

La frecuencia relativa de anegamiento se calcula sumando la cantidad de veces que un píxel fue clasificado con presencia de agua y dividiendo este resultado por el número de fechas utilizadas en el path - row específico. Sin embargo, esto representa un resultado engañoso. La zona es muy extensa (3.5 millones de hectáreas) y las lluvias no se distribuyen de manera homogénea, por lo cual debe corregirse este aspecto y referirlo a la frecuencia de ocurrencia del evento en particular y limitado al área donde ocurrió la tormenta.

Para calcular la recurrencia de cada evento, se calculó la frecuencia de precipitaciones categorizadas en rangos de 30 mm, desde 0 a 960 mm. Se consideraron períodos acumulativos de 30, 60 y 120 días. Los períodos no son conjuntos excluyentes de datos, se los consideró desplazando cada período un día por vez, similar al cálculo de una media móvil. Luego se calculó su recurrencia acumulada, comenzando desde el evento de mayor milimetraje registrado (tormentas extraordinarias) hasta los períodos sin registro de precipitación (donde se sumaría el 100 por ciento de las recurrencias). Una vez caracterizadas las recurrencias de precipitación para períodos de 30, 60 y 120 días de cada estación meteorológica, se caracterizan las fechas estudiadas en las imágenes de satélite. La recurrencia de cada historia pluviométrica observada se obtiene al integrar las recurrencias a 30, 60 y 120 días en una ecuación lineal. La ecuación se define de la siguiente manera:
Recurrencia anegamiento fecha

$$A = \frac{(rec.30 * \alpha + rec.60 * \beta + rec.120 * \gamma)}{(\alpha + \beta + \gamma)}$$

Donde:

Rec. 30, rec. 60, rec. 120: Recurrencias de precipitaciones acumuladas a 30, 60 y 120 días. α , β y γ : Factor de ponderación de las recurrencias.

Una vez calculada la recurrencia para cada fecha, se definieron las áreas influencia de cada estación meteorológica aplicando polígonos de Thiessen con el software ARC EDITOR 9.2. Esta metodología es

muy simple y a demostrado robustez al momento de estimar datos faltantes de precipitación en áreas con paisajes poco desarrollados (Tabios y Sala 1985). Teegavarapu *et al.* (2005) compararon varias metodologías para estimar datos faltantes de precipitación, concluyendo que este tipo de metodología es adecuada para implementarse en varias situaciones, sobre todo cuando los puntos disponibles a interpolar son escasos. Se crearon 29 imágenes, una por cada fecha estudiada, con la recurrencia de precipitación registrado en cada estación meteorológica.

Una vez definidas, se multiplicó cada máscara de agua con su correspondiente mapa de polígonos de Thiessen donde fueron definidas las recurrencias de precipitación, obteniendo 29 imágenes de recurrencia de precipitación sólo donde había sido identificada agua. Mediante el procedimiento MIN del módulo MAP ALGEBRA AND LOGIC MODELER disponible en el software IDRISI ANDES Ed. (2006) se extrajo para cada *ijésimo* píxel el mínimo valor de recurrencia a partir del cual pudo identificarse como anegado. Esto permitió identificar, por lo tanto, la pluviometría umbral y la estación más riesgosa para cada píxel anegado. Los resultados hallados fueron chequeados sobre 200 establecimientos. El modelo se resume en la figura 3.

RESULTADOS

Tal cual lo expuesto por anteriores autores, el agua presentó un patrón de expansión asociado a la capacidad de retención de agua del paisaje. Esto quedó evidenciado por las diferentes tasas de anegamiento observadas por milímetro de lluvia caído (figura 4). Una vez colmatadas, el agua inunda áreas vecinas hasta alcanzar un nuevo punto de equilibrio, sin evidenciarse escurrimientos de importancia.

La primer área de expansión está comprendida por áreas inundables con 85 mm de lluvia o menos. Representan a esta área los cuerpos de agua permanentes y semipermanentes y ocupan el 16 % del área total (tabla 3). Los suelos dominantes son Cromudertes, Peludertes, Argiacuoles, Argialboles y Natracualfes.

La segunda área de expansión está integrada por áreas anegadas con lluvias acumuladas entre 85 y 132 mm. Hay presencia de lagunas semipermanente de escasa profundidad, desarrolladas sobre relieves extremadamente planos. Los suelos dominantes son Natracualfes y Natracuoles muy alcalinos en superficie. Ocupa el 39 % de la superficie.

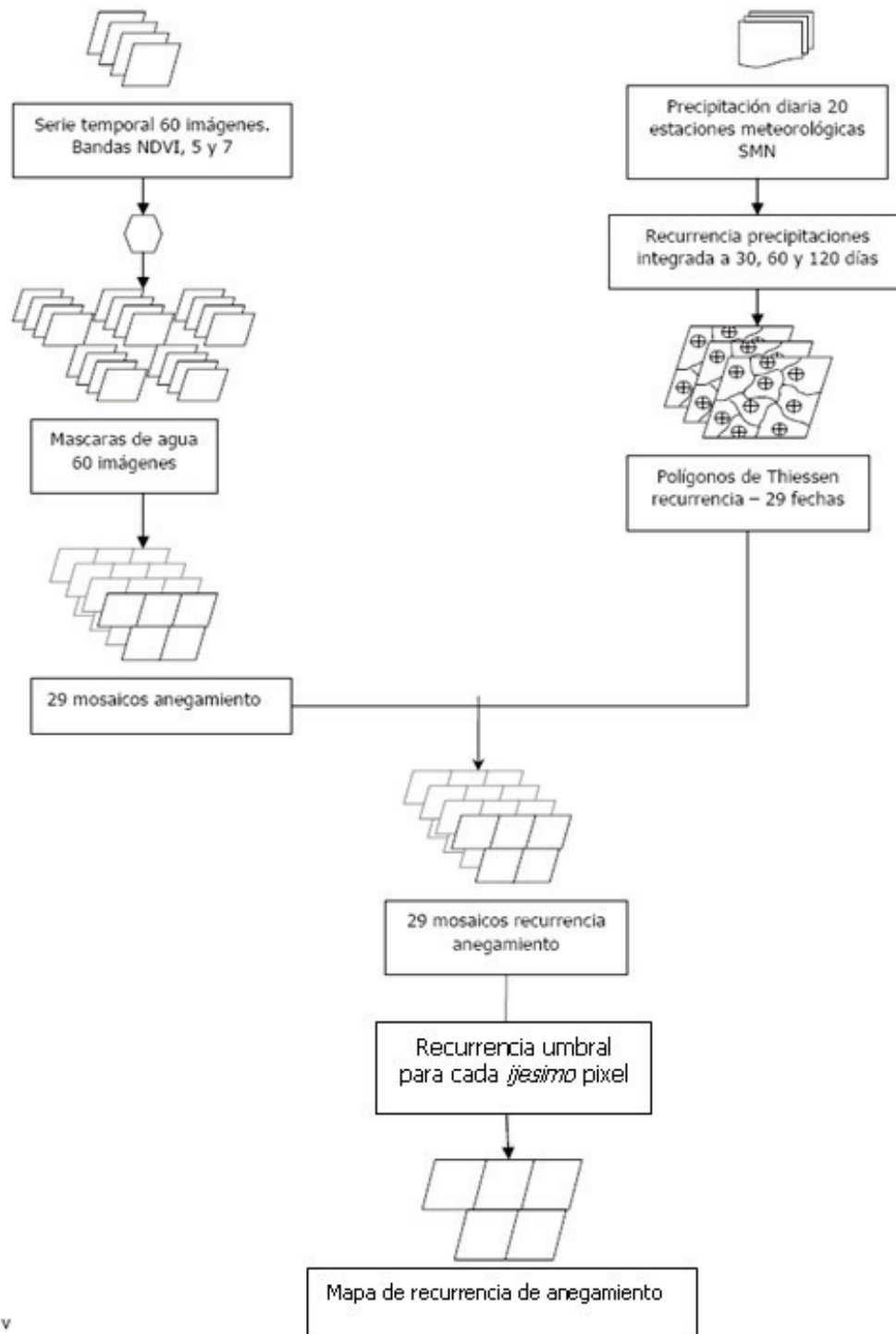


Figura 3: Modelo para determinar recurrencia umbral de anegamiento para cada pixel en el área de la subcuenca B4.

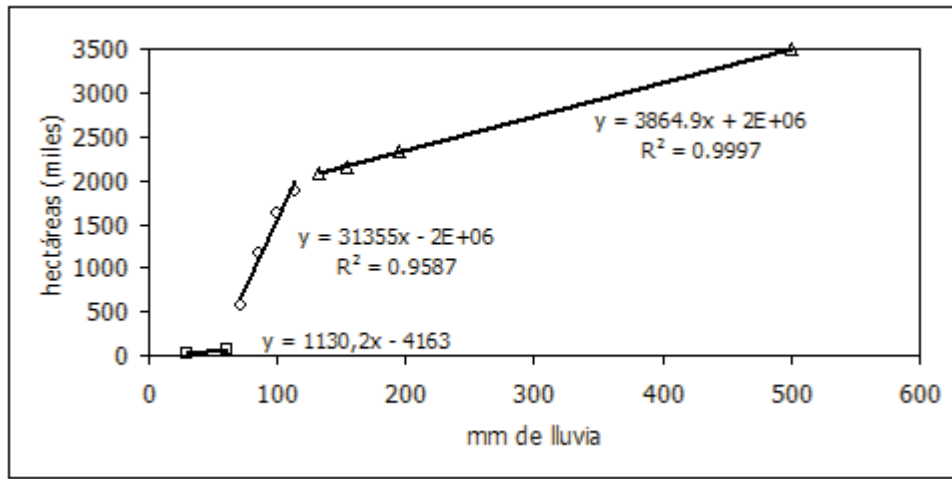


Figura 4: Tasa de anegamiento en función de los milímetros de lluvias caídos

Precipitación acumulada en 30 días (mm)	Recurrencia (%)	Superficie (ha)	Afectación (%)	Afectación acumulada (%)
S/D	S/D	1160842	33	100
195	10	187002	5	67
154	20	73889	2	61
132	30	187259	5	59
114	40	269152	8	54
99	50	442342	13	46
85	60	614010	18	34
72	70	501857	14	16
60	80	33906	1	2
30	100	29743	1	1
Superficie total subcuenca B4		3571777		

Tabla 3: Relación existente entre precipitación acumulada en 30 días, recurrencia porcentual (expresada en ciclos de 30 días al año), superficie afectada para cada recurrencia, grado de afectación porcentual y grado de afectación porcentual acumulado.

La tercer área de expansión esta asociada a áreas anegadas con precipitaciones acumuladas entre 132 y 200 mm. Son sectores suavemente ondulados, con deficiente capacidad de drenaje interno de los suelos pero moderado drenaje superficial. Los suelos dominantes de este sector son Argiudoles acuícos, Hapludoles taptó árgicos y nátricos, asociados con Natracuoles alcalinos en profundidad. Ocupa el 12 % de la superficie.

La cuarta área esta representada por sectores no

anegables o anegables por un período inferior a 15 días en cualquier momento del año, bajo las precipitaciones más importantes determinadas en la región (inundaciones de 1980, 1985, 1993 y 2002). Esto identifica claramente su ubicación en los sectores más altos del paisaje. Los suelos asociados son Argiudoles típicos, Paleudoles petrocálcicos, Hapludoles líticos, Hapludoles típicos y Hapludoles taptó árgicos, todos ellos de buena aptitud agrícola. Ocupa el 33% del área. (figuras 5 y 6).

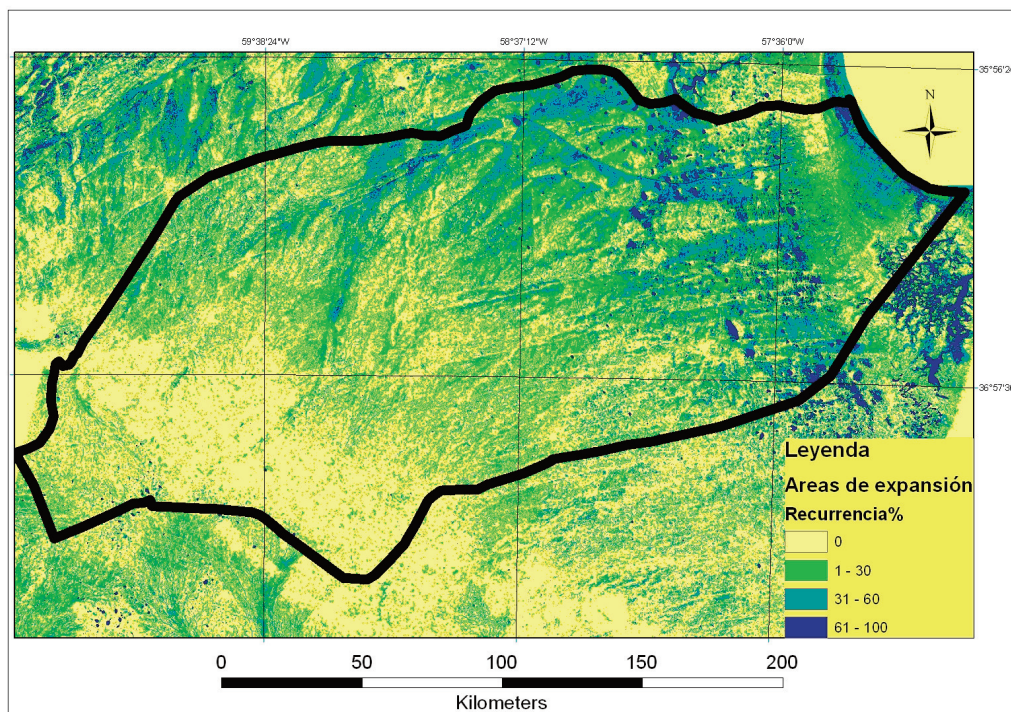


Figura 5: Identificación de áreas de expansión del agua en la subcuenca B4, asociadas a la recurrencia de anegamiento.

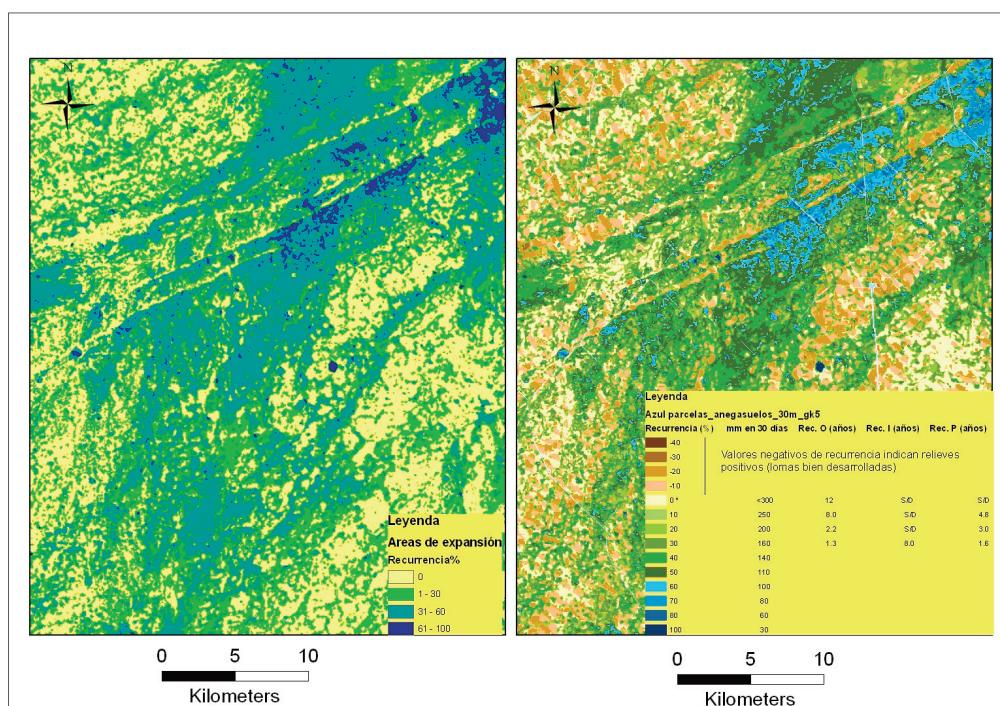


Figura 6: Detalle comparativo entre el mapa de áreas de expansión del agua y el de recurrencia de anegamiento.

De las fechas estudiadas, se detecta claramente que las grandes inundaciones se han dado principalmente en otoño – invierno. En primavera – verano también se dan eventos de importante magnitud, tanto en intensidad de lluvia como en milímetros caídos. La principal diferencia entre éstos dos períodos es la evapotranspiración. Una precipitación de 200 milímetros puede anegar en verano una superficie de 1200000 ha. durante una semana (diciembre 2005 – enero 2006), pero en otoño – invierno ésta puede extenderse por 5 meses (inundación abril – mayo 2002). Por lo tanto, el verdadero riesgo debe referirse a la recurrencia de estos eventos para los períodos críticos.

El análisis de las base de datos pluviométrica diaria (Servicio Meteorológico Nacional, 1980 – 2004) indicó que las recurrencias para un mismo tipo de evento son muy diferentes entre el otoño y el invierno (tabla 4), siendo el otoño el período más crítico del año (meses abril y mayo).

ppt acumulada en 30 días	recurrencia (años)	
	otoño	invierno
Entre 100 y 150 mm	1	2
Entre 150 y 200 mm	2	5
Entre 200 y 300 mm	4	20
Mayor a 300 mm	8	480

Tabla 4: Recurrencia media de eventos pluviométricos que afectan más del 50 % de la superficie de la subcuenca B4, calculada en años, para los períodos otoño e invierno (para 24 años y 20 estaciones meteorológicas).

Los anegamientos prolongados ocurridos durante el período otoño – invernal condicionan el aprovechamiento de las tierras marginales para la agricultura, ya que pueden obligar a resembrar o perder la oportunidad de siembra en los cultivos de invierno, y se puede ver imposibilitada la cosecha de los cultivos de verano por anegamiento o inaccesibilidad.

El avance de la agricultura en los últimos 20 años se realizó sobre zonas muy marginales, incrementándose en un 69 por ciento desde 1986 al 2001 (Cañivano *et al*, 2003). Sin embargo, se desconoce a ciencia cierta la proporción de cultivos realizados para cada nivel de riesgo.

Para el ciclo 2003 – 2004, se evaluó la recurrencia de anegamiento para la superficie ocupada por diferentes usos del suelo determinada por Vázquez *et al* (2006). El 25 % de la agricultura de la subcuenca B4 (72413.19 ha.) se realizó sobre suelos netamente ganaderos, con una recurrencia igual o mayor al 40

%. Estamos ante la presencia de cultivos, principalmente de verano, realizados sobre suelos muy anegables, con elevado contenido de sodio en su perfil, con riesgo de no poder ser cosechados año por medio.

La proporción de cultivos forrajeros realizados sobre suelos muy marginales es inferior a la de los cultivos, llegando solo al 7 %. No se clasificaron pasturas en áreas con recurrencia mayor al 40 %. Si analizamos estos dos resultados, se observa claramente el mayor cuidado prestado a la implantación de pasturas y cultivos forrajeros que a los cultivos. Todo esto está vinculado al manejo, ya que el pisoteo de los animales compromete seriamente la persistencia de los recursos forrajeros, sobre todo en los suelos más marginales.

Para vincular estos resultados con el aspecto inmobiliario, se ponderó la recurrencia de anegamiento a nivel de parcela catastral, de tal manera de poder establecer un valor medio de riesgo para cada unidad parcelaria. El 23 por ciento de las parcelas (equivalente al 31 por ciento de la superficie) conforman un grupo caracterizado por anegarse 50 por ciento o más de su superficie con lluvias menores o iguales a 100 mm (tabla 5).

El conocimiento de la recurrencia de anegamiento para cada hectárea y el valor ponderado de anegamiento a escala parcelaria constituyen una herramienta que permite controlar un importante grado de incertidumbre. Permite tomar decisiones más objetivas al momento de planificar actividades regionales o dentro de un establecimiento, ajustar apotreramientos o incluso tomar decisiones inmobiliarias.

El área afectada por una recurrencia de anegamiento igual o superior al 60 % (tabla 3) representa el 34 % del área total de la subcuenca B4 (1214140 ha). El 12 % de ésta (156040 ha) tiene relación directa con obras de origen antrópico existentes en la región, siendo principalmente los bordos de canales, rutas con escaso entubado o puentes ferroviarios subdimensionados (tabla 6).

Esta subcuenca explica el 86 % de la superficie inundada por efecto de infraestructura en la cuenca baja del río Salado (156000 ha.).

Para verificar los resultados, se chequearon 200 establecimientos con visita a campo junto a los asesores y propietarios, detectándose correctamente el 95 por ciento de las situaciones observadas. Esto responde principalmente a la aplicación de un filtro de mediana de 3x3 al trabajo original para eliminar ruido.

Parcelas catastrales recurrencia de anegamiento (ponderado)	cantidad		Superficie	
	Nº	%	hectáreas	%
? 20	7227	34.28	751104	19.36
21-40	8667	41.11	1920124	49.50
41-60	4201	19.93	1014146	26.14
61-80	970	4.60	187941	4.85
>80	19	0.09	5697	0.15
total	21084		3879012	

Tabla 5: Valoración de las parcelas catastrales del año 2006 ubicadas en la zona de la subcuenca B4 en función de su recurrencia de anegamiento ponderada.

Lugar	Hectáreas anegadas
Intersección Ruta prov. 50 y FF.CC. Roca	1425
Ao. Los Huesos (partidos de Azul - Rauch)	5336
Intersección camino Rauch - Pila y FF.CC. Roca	6563
Canal 9	9972
Intersección ruta prov. 60 y Ao. Langueyú	13900
Canal 11	25753
Ao. Cortaderas (partido de Azul)	42120
Ruta prov. 29 y camino Rauch - Pila	50971
Total	156040

Tabla 6: Superficie anegada con una recurrencia igual o superior al 60 % atribuible a obras de infraestructura.

El grado de detalle del trabajo final es muy superior al de las cartas de suelo escala 1:50.000, ya que permitió identificar la distribución subgrupos de suelo dentro de cada unidad cartográfica, lo cual podría aprovecharse para ajustar la cartografía edafológica de la región.

El error de estimación de área afectada por cada recurrencia se determinó a partir de evaluar 200 esta-

blecimientos in situ (tabla 7). Se comprobó que los límites de las áreas afectadas diferían en promedio respecto de las estimadas, en +- 30 metros. Este error fue introducido cuando los resultados parciales fueron suavizados por un filtro de mediana de 3x3 píxeles. El error medio ponderado fue de 22.5 por ciento, pero si consideramos áreas mayores a 100 hectáreas, el error es de solo 4.77 por ciento (tabla 7).

Superficie		Error ponderado (%)
Áreas clasificadas	Ocupación en la subcuenca B4 (%)	Parcial
Entre 1 y 100 ha.	50	40.2
Entre 101 y 500 ha.	20	8.4
Entre 500 y 1000 ha.	10	4.5
Mayor a 1000 ha.	20	1.2
Error ponderado total		22.5
Error para áreas anegadas mayores a 100 ha.		4.77

Tabla 7: Estimación del error medio de superficie anegada.

CONCLUSIONES

La recurrencia de anegamiento en la subcuenca B4 fue calculada satisfactoriamente. Detectó diversidad de situaciones con un grado de certidumbre del 95%, mientras que el error en el cálculo de los límites de las superficies afectadas por los distintos grados de anegamiento fue de ± 30 metros. Se identificó un claro patrón de expansión de las aguas, asociado al tipo de relieve y a la cantidad de lluvia precipitada. La mayor capacidad de retención de agua se detectó en las áreas ocupadas por lagunas, cubetas, donde cada milímetro caído puede cubrir 1113 ha. Una vez saturado este sistema (con precipitaciones superiores a los 60 milímetros acumulados en 30 días), comienza una gran expansión de la masa de agua superficial, cubriendo cada milímetro de lluvia 31000 ha. aproximadamente. Esta superficie corresponde a extensas zonas planas con una recurrencia de anegamiento del 40 % o mayor, la cual representa, junto con la anterior, el 54 % de la superficie de la subcuenca B4. Los períodos críticos de inundaciones son claramente otoño e invierno, pues los procesos que más condicionan la salida del agua del sistema son los evapotranspirativos. Los problemas severos comienzan a partir de precipitaciones superiores a los 150 – 200 mm, pues implica tener anegada aproximadamente el 67 % de la superficie por períodos del orden de 2 o 3 meses. Si bien ambos períodos son muy riesgosos por la escasa evapotraspiración, los riesgos son mayores en otoño, pues las recurrencias determinadas para una misma precipitación son sensiblemente mayores a las halladas para el invierno.

Estos patrones de anegamiento condicionan claramente el uso del suelo. Un 25 % de los cultivos son realizados en áreas de recurrencia de anegamiento superior o igual al 40 %, lo que implica la posibilidad de perder 72413 ha. todos los años. Este riesgo es tomado principalmente por las expectativas de elevados precios. Solo el 7 % de cultivos forrajeros y pasturas es realizado en suelos riesgosos. Esto responde a que el recurso forrajero puede ser fácilmente degradado por el pisoteo diario bajo condiciones de anegamiento, cosa que sucede todos los años.

Las estructuras antrópicas contribuyen en un 12 % en el anegamiento regional, siendo los principales impedimentos para el movimiento del agua los bordos de los canales 12, 11 y 9, la ruta provincial 29 (entre la localidad de Ayacucho y su cruce con el camino a Casalins) y la línea férrea de Metrovias (ex FF.CC. Roca).

REFERENCIAS

- AMEGHINO F. (1884) Las secas y las inundaciones en la provincial de Buenos Aires. Boletín de la academia de ciencias. Julio de 1884. Argentina.
- ARC VIEW GIS 9.1. (2004). Manual del usuario.
- BARAGALLO, J. (1983). Las áreas anegables de la Pampa Deprimida. Un planteo agrohidrológico para su solución. Coloquio internacional sobre hidrología de grandes llanuras. 11 al 20 de abril de 1983; Olavaria – Argentina. (1): 73 pp.
- BARBAGALLO, J. (1960). Recuperación y praderización de un campo bajo en el partido de Bolívar. INTA. Series informes técnicos n° 10.
- BURROGH, P.; VAN GAANS, P. AND MCMI-LLAN, R. (2000). High-resolution landform classification using fuzzy k-means. Fuzzy Sets and Systems. 113: 37-52.
- CAÑIBANO, A., GANDINI, M., SACIDO, M. Y VAZQUEZ, P. (2003). El crecimiento de la actividad agrícola en la cuenca del arroyo del Azul, Buenos Aires, Argentina. XI Simposio Latinoamericano sobre percepción remota y sistemas de información espacial-Selper Chile.
- CHAVEZ, P.S., (1996). Image-Based Atmospheric Corrections – Revisited and Improved. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 62, 9, 1025-1036.
- CHUVIECO E. (2000). Fundamentos de teledetección espacial. Capítulo 7. Tratamiento digital de imágenes: II. Generación de información temática Ediciones Rialp, S.A. Madrid. Tercera edición. 406-408.
- CLARK LABS – CLARK UNIVERSITY (2006). IDRISI ANDES. User manual.
- FRENGUELLI, J. (1956). Rasgos generales de la morfología de la provincia de Buenos Aires. L.E.M.I.T. Serie 3, n° 62. La Plata.
- HUDSON, P. AND COLDITZ, R. (2003). Flood delineation in a large and complex alluvial valley, lower Pánuco basin, Mexico. Journal of Hydrology. 280: 229-245.
- INTA (1977). La pampa Deprimida. Condiciones de drenaje de sus suelos. Departamento de suelos del INTA. Publicación n° 152. Serie suelos. 162 pp.
- JENSON, S. AND DOMINGUE, J. (1988). Extracting topographic structure from digital eleva-

- tion data for geographic information system analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54:11, 1593-1600.
- LAVADO, R.S. Y TABOADA, M.A. (1988). Water, salt and sodium dynamics in a natraquoll in Argentina. *Catena*. 15 : 577-594.
- MIACZYNSKI, C. 1995. Los suelos hidromórficos e hidrohalmórficos de la provincia de Buenos Aires. *Rev. Fac. Agr.* 15: 23-36.
- POSADAS, C. (1934). La solución al problema de las inundaciones y desagües en la provincia de Buenos Aires. Ministerio de Obras Públicas, La Plata.
- PROVINCIA DE BUENOS AIRES - CONSEJO FEDERAL DE INVERSIONES (1981). Estudio de la zona deprimida del Salado. Informe Final: Estudios de Suelo y Vegetación. Vol 3 (D). La Plata.
- SALA J. (1983). La problemática en las investigaciones geohidrológicas en grandes llanuras con escasa información. Coloquio internacional sobre hidrología de grandes llanuras. 11 al 20 de abril de 1983; Olavaria – Argentina. (1): 21 pp.
- SALA, J. (1980). Geología en cuencas de llanura con énfasis en hidrogeología. Comité de cuencas hídricas. Area del gran Rosario. Rosario.
- SALA, O., SORIANO, A. Y PERELMAN, S. 1981. Relaciones hídricas de algunos componentes de un pastizal de la depresión del Salado. *Rev. Fac. Agr. (Universidad Nacional de Buenos Aires)* 2: 1-10.
- SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL (1980 – 2004). Bases de datos agroclimáticas diarias.
- SKIDMORE A. K. (1989). An expert system classifies eucalyptus forest types using Thematic Mapper data and digital terrain model. *Photogrammetric Eng. and Remote Sensing*. 55: 1149-1464.
- SOIL SURVEY STAFF. (2006). Keys to Soil Taxonomy. 10th ed. USDA, NRCS. Washington D.C. 341 p.
- TABIOS III, G. AND SALAS, J.(1985). A comparative analysis of techniques for spatial interpolation of precipitation. *Water resources Bulletin*. 21: 365-380.
- TEEGAVARAPUA, R S. AND CHANDRAMOULIA, V. (2005). Improved weighting methods, deterministic and stochastic data-driven models for estimation of missing precipitation records. *Journal of Hydrology* 312: 191–206.
- TRICART, J. (1973). La Geomorfología de la Pampa deprimida como base para los estudios edáficos y agronómicos. Edición de INTA. Colección científica XII. Buenos Aires Argentina. 198 pp.
- VAZQUEZ P; COSTA J L; MONTERUBBIANESI G Y GODZ P. (2001). Predicción de la productividad primaria de pastizales naturales de la pampa deprimida utilizando propiedades del horizonte A. *Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo*. 19(2). 136-143.
- VAZQUEZ, P.; I. ENTRAIGAS; M. GANDINI Y E. USUNOFF (2003) “Identificación de patrones de anegamiento en la cuenca del arroyo del Azul mediante el uso de imágenes Landsat”. *Revista de Teledetección de la Asociación Española de Teledetección*, 19:43-50.
- VAZQUEZ, P.; MASUELLI, S. Y PLATZECK, G. (2006) Determinación de patrones espectrales para distintos usos del suelo en ambientes heterogéneos. INTA. Publicación Técnica nº 1. ISSN 1850-6496. 32 pp.