

Varni, M. ¹, Gandini, M. ², Entraigas, I. ¹ y Vázquez, P.³

¹ Instituto de Hidrología de Llanuras (UNCPBA-CIC-Municipalidad de Azul) ² Facultad de Agronomía (UNCPBA); ³ Unidad Operativa Cuenca del Salado (INTA)

CC 44 (7300), Azul, Bs. As. Tel./fax 02281-432666 E-mail: varni@faa.unicen.edu.ar

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo es comparar dos metodologías para reconocer y mapear áreas de anegamiento, a partir del uso de imágenes satelitales Landsat en el área de la cuenca del arroyo del Azul (centro de la provincia de Buenos Aires). Las mismas consisten en asociar las imágenes a condiciones cuantificables como precipitaciones antecedentes o humedad del suelo. Se utilizaron imágenes Landsat 5 TM y 7 ETM+ (escenas 225-85 y 225-86), seleccionándose siete fechas representativas de distintas condiciones hidrológicas. Con las mismas se realizaron clasificaciones mixtas de las imágenes satelitales, obteniéndose, mediante la producción de máscaras binarias, siete imágenes de zonas no anegadas/anegadas. El primer método de cuantificación utilizado se basó en el análisis de frecuencia de precipitaciones ocurridas en períodos de 30, 60 y 120 días desde 1980 al 2000 con datos diarios de la estación meteorológica Azul-Aero perteneciente a la Fuerza Aérea Argentina. A partir de dicho análisis se determinó la frecuencia de las precipitaciones registradas en períodos previos a la fecha de toma de cada imagen; así se asoció cada imagen con la frecuencia de la precipitación antecedente de cada una de ellas. Posteriormente, se combinaron linealmente las imágenes escogiendo coeficientes de ponderación de manera de obtener imágenes combinadas con frecuencias de precipitación antecedente, y luego se relacionaron las áreas anegadas en cada imagen con su frecuencia de precipitación antecedente. El segundo método se basó en el cálculo de un balance de agua en el suelo de período diario desde cuatro meses antes de la fecha de toma de cada imagen, obteniéndose el contenido de humedad de un suelo promedio para la fecha correspondiente a cada imagen. Luego, se realizaron combinaciones lineales píxel a píxel ponderando las imágenes de manera de obtener contenidos de humedad prefijados. Esto permitió obtener relaciones entre áreas anegadas y contenidos de humedad del suelo. Ambos métodos permitieron cuantificar un factor de riesgo para las prácticas agrícolas que se intenten realizar en determinadas zonas de la cuenca. Estos resultados permiten además identificar áreas del ámbito rural donde se requieran prácticas de sistematización hidráulica.

Palabras clave: Landsat, cuenca del arroyo Azul, frecuencia de anegamientos, balance de agua.

INTRODUCCIÓN

La teledetección ha demostrado ser una herramienta poderosa para el estudio de anegamientos (Jensen et al., 1986; Lunetta y Balogh, 1999, Sandar, 2000) gracias al amplio contraste existente entre el agua y el resto del paisaje en el espectro electromagnético. Esta herramienta permite detectar no solamente las áreas anegadas sino también ubicar estructuras y geoformas que no son identificables si no se cuenta con cartas topográficas con un alto grado de detalle. En este caso, las cartas del Instituto Geográfico Militar, escala 1:50000 (equidistancia 2.5 m), no son lo suficientemente detalladas para detectar los poco relevantes patrones del relieve de las llanuras.

El objetivo del presente trabajo es reconocer y mapear áreas de anegamiento a partir del uso de imágenes satelitales Landsat en el área de la cuenca del arroyo del Azul, centro de la provincia de Buenos Aires (Figura 1). Para que estas imágenes de anegamientos permitan su utilización desde un punto de vista cuantitativo y no sólo cualitativo, deberá asociarse cada imagen a un parámetro que exprese cuantitativamente el estado hidrológico de la cuenca. Se han escogido como parámetros la frecuencia de la precipitación antecedente de cada imagen y el contenido de humedad en la fecha de cada imagen de un suelo con capacidad de almacenamiento promedio en la cuenca. De esta manera se podrá identificar el patrón de expansión de las aguas que producen anegamientos y asociar cada límite de expansión a la frecuencia de la pluviometría antecedente o al contenido de humedad en el suelo resultante para cada ocasión, representando una mejora metodológica a lo propuesto por Vázquez et al. (2003).

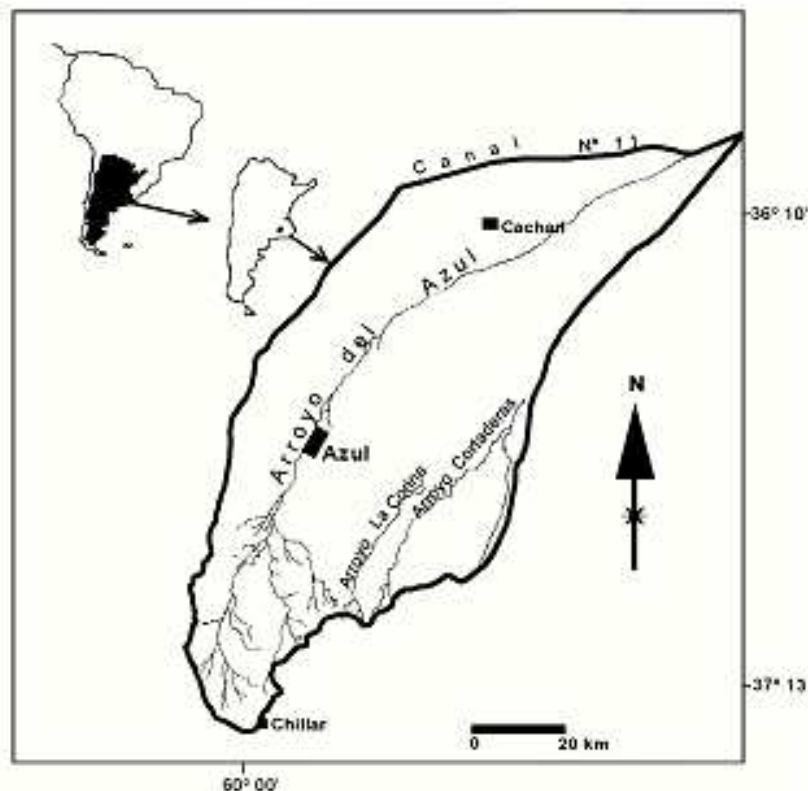


Figura 1. Ubicación de la cuenca del arroyo Azul.

METODOLOGÍA

Para detectar el patrón de expansión de las aguas en la cuenca del arroyo del Azul se realizó un análisis de imágenes Landsat 5 TM y 7 ETM+ (escenas 225-85 y 225-86), seleccionándose aquellas de alta calidad (cobertura de nubes nula). Las imágenes fueron corregidas geoméricamente al sistema de proyección Gauss Krüger (Datum Campo Inchauspe 1969, Argentina Zona 5) para proceder a la construcción de los mosaicos y así cubrir la totalidad del área de estudio. A partir de allí, se realizaron clasificaciones mixtas de las imágenes satelitales, las que se procesaron mediante enmascaramiento y se obtuvo como resultado siete imágenes binarias de zonas no anegadas/anegadas.

La primer metodología propuesta (método de la frecuencia) se basa en un análisis de frecuencia de precipitaciones ocurridas en períodos de 30, 60 y 120 días desde 1981 al 2000 con datos de precipitación diarios de la estación meteorológica Azul-Aero perteneciente a la Fuerza Aérea Argentina, ubicada en el centro del área de estudio. A partir de dicho análisis pudo determinarse la frecuencia de las precipitaciones registradas en los períodos previos a la fecha correspondiente a cada imagen. Asumiendo que el principal factor responsable de la situación de anegamiento correspondiente a cada imagen es la precipitación antecedente, puede asociarse la frecuencia del anegamiento de cada imagen con la frecuencia de la precipitación antecedente de dicha imagen. Las siete máscaras son luego incluidas en una ecuación lineal, cuyo resultado en cada píxel es proporcional a su frecuencia de precipitaciones previas. La ecuación se define de la siguiente manera:

$$MR = M_1 * A_1 + M_2 * A_2 + M_3 * A_3 + M_4 * A_4 + M_5 * A_5 + M_6 * A_6 + M_7 * A_7 \quad (1)$$

donde M_i son las máscaras correspondientes a las siete fechas, A_i los coeficientes de ponderación y MR la máscara resultante. Si los M_i tienen una frecuencia asociada, pueden elegirse los A_i de manera de obtener máscaras resultantes con la frecuencia deseada, siempre que se halle dentro de las frecuencias máxima y mínima de los M_i . Además, se impuso la condición de que toda imagen debía tener una contribución mínima del 5 %.

La segunda metodología propuesta (método del almacenamiento) se basa en el cálculo de un balance hidrológico diario desde cuatro meses antes de la fecha de toma de cada imagen. Se escogió una capacidad de almacenamiento de un suelo promedio para la zona: 100 mm. Se verificó que con cuatro meses el estado final de humedad es independiente al estado inicial (debido a que en ese período siempre ocurren eventos de saturación), para todos los casos analizados. Una vez obtenido el contenido de humedad correspondiente a cada imagen se aplicó aquí también la Ecuación (1) eligiendo los A_i de manera que las máscaras resultantes tuviesen contenidos de humedad prefijados.

RESULTADOS

Método de la Frecuencia

En primer lugar, se realizó el análisis de las precipitaciones diarias registradas entre 1981 y 2000 en la estación meteorológica Azul-Aero. Para cada día de este período se consideraron los 30, 60 y 120 días previos y se realizó un análisis de frecuencia de las precipitaciones ocurridas. Para el período de 30 días, se analizaron 8006 períodos y se obtuvo una precipitación media de 84.5 mm, con una desviación estándar (DE) de 61.8 mm y un valor máximo de 361.5 mm. Para los 60 días se

tomaron 7976 registros, con una media de 168.7 mm, una DE de 94.4 mm y una precipitación máxima de 507.0 mm. Finalmente, analizando los 120 días previos, se obtuvieron 7916 datos con un valor medio de 335.0 mm, una DE de 139.0 mm y un máximo de 746.0 mm. En la Tabla 1 se muestran las frecuencias porcentuales de precipitaciones ordenadas cada 30 mm para los períodos analizados.

Tabla 1. Frecuencia (medida en porcentaje) de precipitaciones en períodos de 30, 60 y 120 días.

Precipitación (mm)	Período		
	30 días	60 días	120 días
30	80.2	94.9	99.5
60	59.1	87.8	98.7
90	38.6	80.0	97.3
120	24.4	65.9	96.1
150	14.3	53.8	92.0
180	8.7	39.6	87.9
210	5.0	30.3	80.2
240	2.3	22.8	72.6
270	0.8	16.2	63.7
300	0.4	10.7	55.2
330	0.1	6.4	48.0
360		3.2	41.2
390		1.5	34.4
420		0.8	28.2
450		0.4	22.4
480		0.1	17.8
510			13.1
540			9.6
570			5.9
600			3.7
630			1.5
660			0.4

Luego de realizado este análisis, se determinaron las frecuencias correspondientes a la precipitación antecedente a cada imagen en los 30, 60 y 120 días previos a la fecha de captación (Tabla 2). En dicha tabla, se destaca la imagen del 24/11/02 porque tiene frecuencias muy pequeñas en los tres períodos analizados; le siguen las imágenes del 14/04/02, 28/02/00 y 18/11/97, con situaciones intermedias; y finalmente, las imágenes del 13/05/01, 24/04/01 y 23/12/01 que son aquellas que corresponden a situaciones más secas, asociadas a las mayores frecuencias.

De las tres frecuencias obtenidas para cada imagen deberá obtenerse una sola en la que, obviamente, deberá tener preponderancia la de los 30 días previos, le seguirá la de los 60 días y la de 120 días será la de menor peso. También deberán diferenciarse dos situaciones: la de los meses fríos y la del período estival, ya que en este último caso la mayor relevancia de la evapotranspiración hace que la influencia de los períodos más prolongados disminuya significativamente. Se asignaron entonces los coeficientes de ponderación 10, 8 y 6 para los períodos de 30, 60 y 120 días en los meses más fríos, respectivamente, y 10, 5 y 2.5 para los meses cálidos. Luego se aplicó la ecuación:

$$f_m = (C_1 * f_{30} + C_2 * f_{60} + C_3 * f_{120}) / (C_1 + C_2 + C_3) \quad (2)$$

donde f_m es la frecuencia media ponderada; f_{30} , f_{60} y f_{120} son las frecuencias de los períodos de 30, 60 y 120 días; y C_1 , C_2 y C_3 son los coeficientes de ponderación. En la Tabla 3 pueden observarse las frecuencias medias ponderadas para cada imagen.

Tabla 2. Fecha de adquisición de las imágenes satelitales, precipitación registrada en 30, 60 y 120 días previos a la fecha de adquisición y frecuencia de la precipitación registrada.

Fecha		Lluvias registradas (mm)		
		1 mes previo	2 meses previos	4 meses previos
28/02/00	Precipitación antecedente	95.1	294.8	443.9
	Frecuencia (%)	36.2	11.7	23.6
24/04/01	Precipitación antecedente	60.2	299.1	435.6
	Frecuencia (%)	59.0	10.9	25.2
13/05/01	Precipitación antecedente	79.4	214.9	397.0
	Frecuencia (%)	45.8	29.1	33.0
23/12/01	Precipitación antecedente	28.6	311.2	552.7
	Frecuencia (%)	81.1	9.1	8.0
14/04/02	Precipitación antecedente	90.4	399.1	560.2
	Frecuencia (%)	38.4	1.1	6.9
7/10/02	Precipitación antecedente	97.2	223.9	286.0
	Frecuencia (%)	35.2	26.8	59.2
24/11/02	Precipitación antecedente	186.8	360.6	553.5
	Frecuencia (%)	7.9	3.2	7.9

Tabla 3. Frecuencia media ponderada de cada imagen.

Imagen	Frecuencia media (%)
28/02/00	27.4
24/04/01	40.4
13/05/01	37.0
23/12/01	50.9
14/04/02	23.2
7/10/02	38.4
24/11/02	6.6

Luego las imágenes se combinaron píxel a píxel según la Ecuación (1), donde los coeficientes A_i se determinaron de manera que las imágenes resultantes correspondiesen a frecuencias de 25, 30, 35 y 40 %. Estas 4 imágenes resultantes presentan valores entre 0 y 1 que fueron luego agrupados de manera que quedaron constituidos 5 grupos finales. En la Tabla 4 se muestran las áreas ocupadas por cada uno de los grupos de clases de anegamiento y en la Figura 2 se observa la distribución espacial de dichos grupos para las distintas frecuencias analizadas.

El grupo 5 está conformado por aquellos píxeles que constituyen las zonas con los

anegamientos más prolongados y que ocupan pequeñas superficies y estarían representando a todos los cuerpos de agua permanentes y semipermanentes de la cuenca. El grupo 4 representa la primera línea de expansión de aguas, y está asociado a zonas bajas aledañas a los cuerpos de agua o, en algunos casos, a cubetas de deflación poco profundas y que actúan como vías de avenamiento muy precarias en la cuenca baja y como vías de avenamiento bien marcadas (cañadas) en la cuenca alta.

Tabla 4. Superficie (ha) ocupada por cada grupo de clases de anegamiento obtenido por el método de frecuencia.

GRUPO	FRECUENCIAS			
	25%	30%	35%	40%
1	454402	518824	559760	567098
2	106604	42489	49492	37752
3	35166	53848	13056	11801
4	26821	8431	1266	6948
5	714	115	133	108

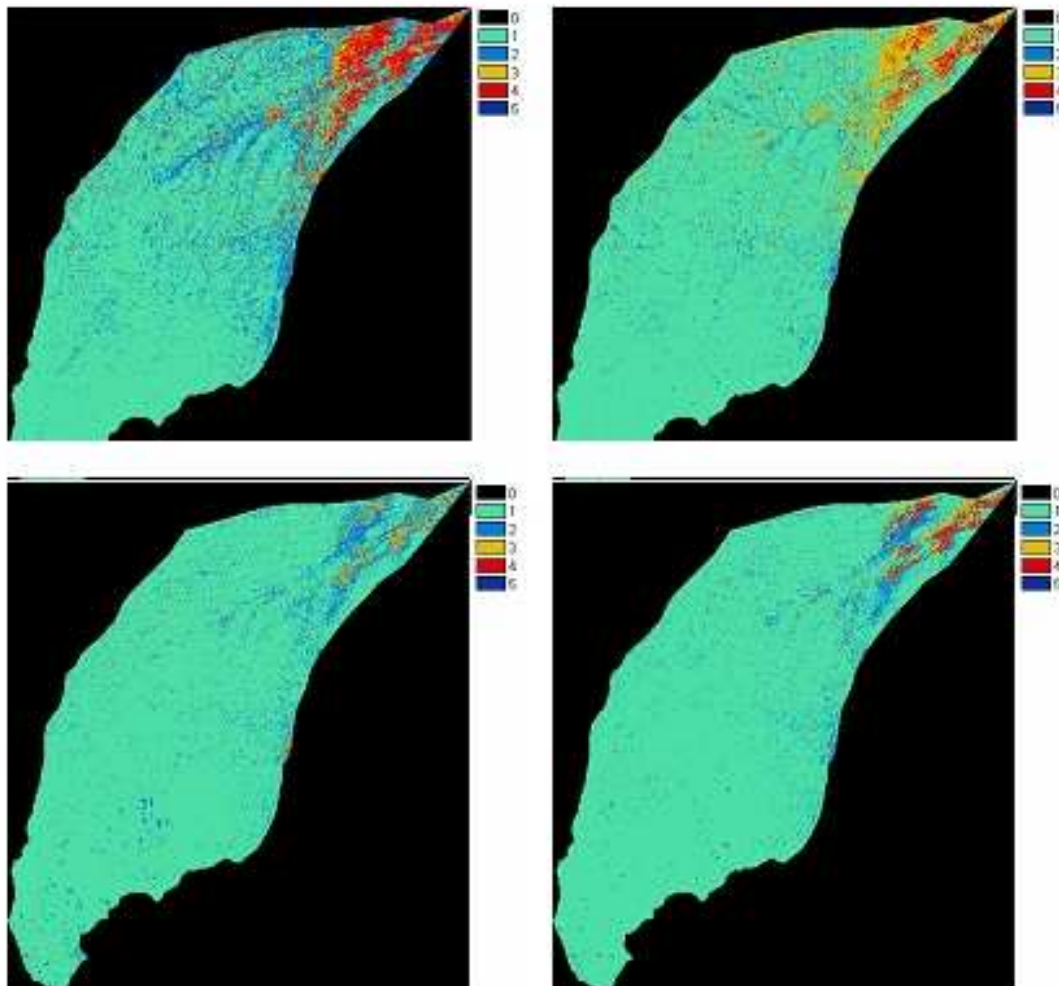


Figura 2. Clases de anegamiento para frecuencias de precipitaciones antecedentes del 25, 30, 35 y 40 % (de izquierda a derecha, y de arriba a abajo). Los números de 1 a 5 indican clases de anegamiento creciente.

El grupo 3 presenta un nuevo incremento en el área ocupada por cada clase y este aumento correspondería a una segunda línea de expansión de aguas, coincidente con áreas muy amplias de bajos extensos y anegables que son inundados cuando la capacidad de almacenaje de agua de lagunas, cubetas y vías de escurrimiento se ve superada. Estas áreas serían cubiertas por las aguas sólo durante inviernos muy húmedos. El grupo 2 está conformado por píxeles que serían cubiertos por las aguas sólo cuando se combinan inviernos y primaveras muy húmedos, en circunstancias excepcionales. Por último, el grupo 1 está conformado por aquellos píxeles que, como fuera señalado anteriormente, corresponden a áreas que no presentaron anegamiento durante el período analizado.

En la Figura 3 se muestra la variación del área de las clases de anegamiento en función de la variación de la frecuencia de las precipitaciones antecedentes. La primera observación que surge es que las superficies no anegables serían muy importantes: varían entre más del 90 % del área de la cuenca para la frecuencia del 40 %, decreciendo al 73 % para una frecuencia del 25 %. Puede verse también que, aunque en general las áreas anegadas de cada clase crecen al disminuir la frecuencia de las precipitaciones, en algún caso esto no ocurre debiéndose a transferencia de áreas de una clase a otra.

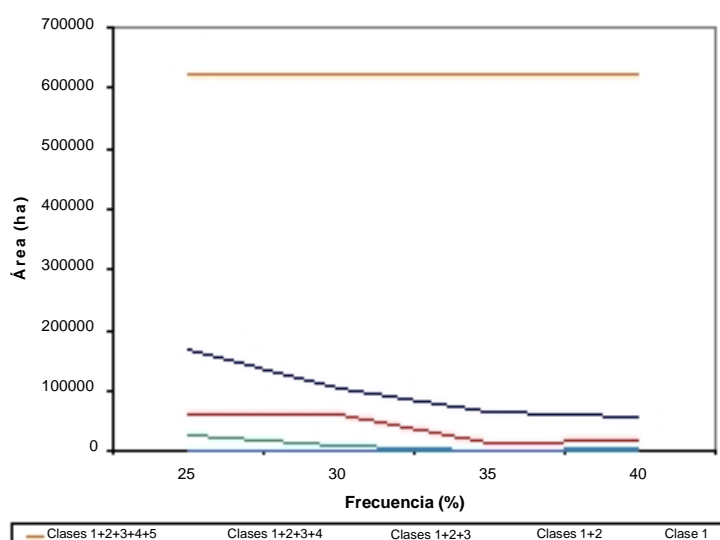


Figura 3. Representatividades areales acumuladas de cada clase para las distintas frecuencias.

Método del balance

Se determinaron las evapotranspiraciones potenciales mensuales mediante el método de Penman modificado por Allen et al. (1998). Esas evapotranspiraciones se dividieron por los días de cada mes para obtener una estimación media de las evapotranspiraciones diarias. Con dichas evapotranspiraciones y las precipitaciones diarias se realizaron balances de agua en un suelo con una capacidad de retención de 100 mm, que puede adoptarse como un valor medio para los suelos de la región (Burgos y Forte Lay, 1978). Todos los parámetros fueron registrados en la estación Azul-Aero del Servicio Meteorológico Nacional. No toda la precipitación ingresa al suelo, ya que se descuenta una cantidad adjudicada al escurrimiento superficial. Éste se determina según el método de Curva Número (USDA Soil Conservation Service, 1985), adoptándose una CN=75 para la condición de humedad intermedia, corrigiéndose a otras condiciones de humedad según la

precipitación ocurrida en los cinco días previos. Todos los balances se iniciaron cuatro meses antes de la fecha de captación de cada imagen con la capacidad de retención colmada, aunque se comprobó que en todos los casos el almacenamiento resultante el día de la imagen era independiente del almacenamiento inicial, ya que siempre se colmaba la capacidad de almacenamiento en algún momento de los cuatro meses. En la Tabla 5 pueden verse los contenidos de humedad de los suelos obtenidos mediante el balance. De manera análoga a lo realizado en el método de frecuencias, se establecieron coeficientes de ponderación A_i para la Ecuación (1) de manera de obtener imágenes combinadas con contenidos de humedad del 60, 70 y 80 %.

Análogamente que en el método de frecuencias, se obtuvo una imagen con píxeles con valores entre cero y uno, con el valor nulo correspondiente a áreas que no estuvieron anegadas en ninguna de las fechas registradas por las imágenes, y con valor unitario en los píxeles con agua en todas las imágenes. También aquí se determinaron 5 grupos de clases, los cuales se muestran en la Tabla 6, junto con el área ocupada por cada grupo para cada contenido de humedad. La descripción de cada grupo debería ser similar a la realizada en el apartado del método de las frecuencias. La distribución espacial de los grupos se ve en la Figura 4.

En la Figura 5 se muestra la variación del área de los grupos de clases de anegamiento en función de la variación de las humedades en un suelo medio. También en este caso el grupo 5, que correspondería a superficies no anegables, tendría áreas importantes y similares a las del método de frecuencias: varían entre el 89 % del área de la cuenca para un 60 % de humedad, decreciendo al 73 % para una humedad del 80 %. Se observa que se producen disminuciones de áreas de algunas clases al aumentar el porcentaje de humedad debido, como se ha dicho con anterioridad, al traspaso de áreas de una clase a otra.

Tabla 5. Humedad almacenada correspondiente a cada imagen.

Imagen	Humedad almacenada (mm)
28/02/00	91.2
24/04/01	87.7
13/05/01	86.6
23/12/01	39.3
14/04/02	76.6
7/10/02	86.6
24/11/02	82.2

Tabla 6. Superficie ocupada por cada grupo de clases de anegamiento obtenido por el método de balance para cada contenido de humedad medio de los suelos de la cuenca.

GRUPO	ALMACENAMIENTO		
	60%	70%	80%
1	555380	533579	454308
2	47343	26619	105807
3	4940	47776	9867
4	8740	8604	52614
5	7305	7129	1111

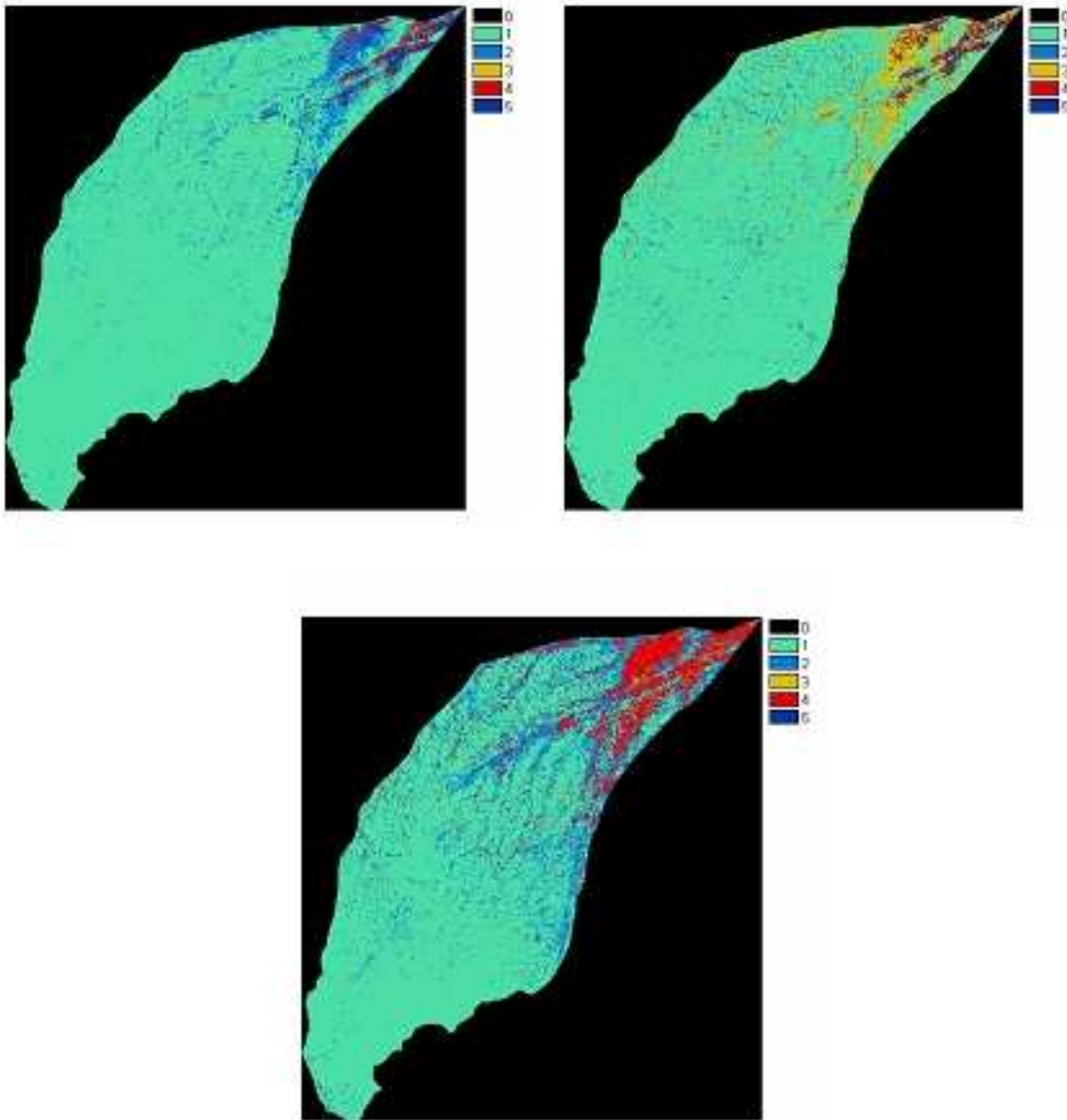


Figura 4. Grupos de clases de anegamiento para contenido de humedad del suelo del 60, 70 y 80 % (de izquierda a derecha, y de arriba a abajo). Los números de 1 a 5 indican clases de anegamiento creciente.

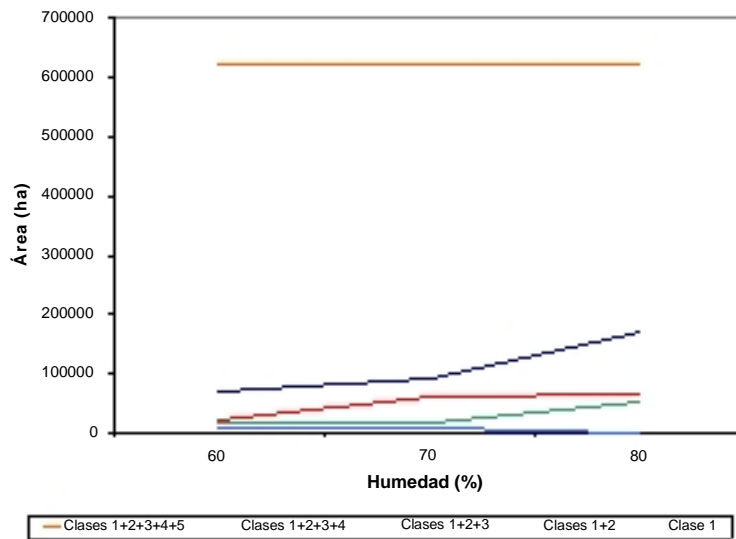


Figura 5. Áreas acumuladas ocupadas por los distintos grupos de clases de anegamientos para los diferentes contenidos de humedad.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Aunque es difícil comparar los resultados de ambas metodologías porque las frecuencias de las precipitaciones antecedentes no tienen necesariamente que guardar una fuerte relación con las humedades del suelo, podemos observar una mejor separación de zonas con el método del balance, para las clases intermedias de anegamiento. En este caso, tiene gran importancia la evapotranspiración, que en el método de frecuencias sólo se tuvo en cuenta parcialmente a través del cambio de coeficientes de ponderación según la época del año cuando se determina una única frecuencia a partir de las frecuencias para uno, dos y tres meses antecedentes, mientras que en el método del balance se la considera explícitamente. Lo anterior parecería indicar que el método del balance de agua en el suelo es más objetivo, aunque debería mejorarse su definición pues se supone la existencia de un único suelo con capacidad de almacenamiento de 100 mm, lo cual, no tiene en cuenta la gran heterogeneidad espacial de los suelos en la cuenca en estudio. Por otra parte, el método se simplifica calculando escurrimientos uniformes para toda la cuenca, siendo que en las zonas de menor pendiente (toda la zona norte de la cuenca) el agua no escurre debido a las mínimas pendientes y permanece en superficie evaporándose pero disminuyendo la capacidad de evapotranspirar del complejo suelo-planta, por lo que el balance subestimaría el agua almacenada en las zonas bajas.

A pesar de las dificultades antes mencionadas, las metodologías presentadas significan un importante aporte para evaluar la probabilidad de anegamiento a nivel regional. De todas maneras, es necesario continuar en el sentido de mejorar la discriminación de la capacidad de infiltración y escurrimiento de los suelos presentes en la zona, para contar con modelos más realistas.

BIBLIOGRAFÍA

Allen, R.G.; L. S. Pereira; D. Raes y M. Smith (1998) *Crop evapotranspiration guidelines for computing crop*

requeriments. Irrigation and Drainage Paper No. 56, FAO, Roma, Italia, 300 pp

- Burgos, J. J. y J. A. Forte Lay** (1978) "*Capacidad de almacenaje de agua en los suelos de la región pampeana*". Taller argentino-estadounidense sobre sequías, Mar del Plata. CONICET.
- Jensen, W.; E. Hodgson; H. Christiansen; J. Mackey; L. Tinney y R. Sharitz** (1986). "*Remote Sensing Inland Wetlands: a Multispectral Approach*". Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 52(1): 87-100.
- Lunetta, R. y E. BALOGH** (1999) "*Application of Multi-Temporal Landsat 5 TM Imagery for Wetland Identification*". Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 65(11): 1303-1310.
- Sandar, A. M** (2000) "*Flood Delineation Using Radarsat data*". Bangladesh Space Research and Remote Sensing Organization (SPARRSO) Report.
- USDA Soil Conservation Service** (1985) National Engineering Handbook, Section 4. U.S. Govt. Printing Office, Washington, DC.
- Vázquez, 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.