

**XXIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
CARTAGENA DE INDIAS, COLOMBIA, SEPTIEMBRE 2008**

**ELABORACIÓN DE MAPAS DE CN E INFLUENCIA DE LA AGREGACIÓN
ESPACIAL MEDIANTE MODELACIÓN MATEMÁTICA DISTRIBUÍDA**

***Carlos M. Scuderi⁽¹⁾, Hernán R. Stenta⁽¹⁾, Gerardo A. Riccardi⁽²⁾⁽³⁾, Erik D. Zimmermann⁽²⁾⁽⁴⁾,
Pedro A. Basile⁽²⁾⁽⁴⁾, Marina L. García⁽¹⁾ y Juan P. Rentería⁽⁵⁾***

(1) Becario Doctoral CONICET, (2) Profesor Adjunto FCEIyA, (3) Investigador CIC-CIUNR,

(4) Investigador CONICET, (5) Docente Investigador FCEIyA

Departamento de Hidráulica. Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hydroambientales (CURIHAM)

Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura (FCEIyA). Universidad Nacional de Rosario

Riobamba 245 bis, 2000, Rosario, Santa Fe, Argentina. e-mail: cscuderi@fceia.unr.edu.ar

RESUMEN: El empleo de técnicas de sensores remotos en conjunto con la utilización de un Sistema de Información Geográfica (SIG) permite manipular gran cantidad de información distribuida espacialmente de forma rápida y eficiente. En este trabajo se aplican estas tecnologías para generar mapas de valores distribuidos de CN a partir de imágenes satelitales Landsat. A través de simulación matemática distribuida, es evaluado el efecto al considerar un CN distribuido o un CN medio único. Los análisis efectuados para la sección de control de ambas cuencas, indican que al considerar las variables caudal máximo, volumen de escurrimiento y tiempo al pico; las diferencias máximas relativas se hallan en el orden del 10%.

ABSTRACT: The use of remote sensing techniques altogether with the use of a Geographic Information System (GIS) allows manipulating large amounts of spatial distributed information quickly and efficiently. In this study, these technologies were applied to generate maps of distributed CN values from Landsat imagery. Distributed mathematical modeling was applied to assess the effect of consider a value of unique average CN or a distributed one. The analysis done in the control section of both basins, indicate that when considering the variables maximum flow rate, volume of runoff and time to peak, the differences are around of 10%.

PALABRAS CLAVES: método del número de curva (CN), imágenes satelitales, modelación matemática distribuida

INTRODUCCIÓN

El procesamiento y análisis de imágenes satelitales poseen múltiples aplicaciones en trabajos de estudio, proyecto y evaluación de recursos hídricos. Pudiendo citarse, entre otros, algunos usos como la determinación de parámetros distribuidos espacialmente para su incorporación en modelos matemáticos hidrológicos, el seguimiento temporal tanto de cuerpos de agua como del crecimiento de la vegetación y del estado de humedad del suelo, las modificaciones en el uso y manejo de los suelos, etc. El empleo de estas técnicas de sensoreamiento remoto se ve potenciado cuando se utiliza en conjunto con un Sistema de Información Geográfica (SIG), logrando la manipulación de gran cantidad de información distribuida espacialmente de forma rápida y eficaz. Las principales funciones del SIG son permitir el intercambio de información almacenada en diferentes formatos (archivos de texto, planillas de cálculo, bases de datos, programas de diseño asistido por computador tipo CAD) utilizados ampliamente en hidrología; la disminución de los tiempos de procesamiento (costo computacional); y la consulta y generación de nueva información en forma relativamente sencilla para el usuario.

El estudio minucioso del proceso de transformación lluvia-caudal permite conocer que parte de la lluvia total es interceptada por la vegetación, que fracción es almacenada superficialmente en depresiones, que proporción se infiltra y por último que porcentaje contribuye al escurrimiento superficial. A través de modelación matemática distribuida es posible cuantificar estos procesos y estimar la propagación del escurrimiento superficial; la misma, resulta de sumo interés cuando se trata de reproducir crecidas históricas, implementar sistemas de alerta contra inundaciones en tiempo real, estudiar alternativas y realizar proyectos de obras hidráulicas, evaluar el comportamiento de la cuenca cuando son alterados la red de drenaje y el uso del suelo, etc.

Durante el transcurso de una tormenta, la estimación de las pérdidas (intercepción, almacenamiento superficial e infiltración) presenta un alto nivel de incertidumbre dada la dificultad de cuantificación de las variables involucradas en dichos procesos. Un procedimiento para obtener las pérdidas durante una tormenta y estimar a partir de ellas el escurrimiento superficial, tanto en cuencas rurales como urbanas, es el desarrollado por el SCS (Soil Conservation Service) de los EEUU (Chow et al., 1994). El método utiliza un parámetro, el número de curva (CN), que representa las características medias del complejo suelo-vegetación; estando relacionado con el estado de humedad del suelo, el uso y las prácticas de manejo del mismo (Riccardi, 2004). La valoración del número de curva y el conocimiento de la distribución espacial del mismo es uno de los parámetros de entrada necesarios para el uso de modelos matemáticos distribuidos con la finalidad de modelar los procesos de transformación lluvia-caudal y propagación del flujo.

Dentro de la temática presentada, es posible enumerar algunos trabajos; Ferrer Juliá et al. (1998) han obtenido mapas de CN en seis cuencas experimentales de España con la finalidad de estudiar las diferencias que presentan dichas estimaciones del parámetro CN a partir de diferentes fuentes de información; Zimmermann (2000), Zimmermann y Riccardi (2000) y Riccardi (2001) han desarrollado diferentes modelos matemáticos hidrológicos-hidráulicos distribuidos espacialmente que utilizan el parámetro CN para evaluar las pérdidas y determinar el escurrimiento superficial; Pandey et al. (2003) han utilizado un SIG para construir diferentes capas de información de entrada, una de grupo hidrológico del suelo, otra de vegetación y una tercera de la condición de humedad antecedente, para la aplicación del método del SCS en una cuenca rural de 2793 has ubicada en el estado de Jharkhand (India); Zimmermann et al. (2004) han empleado técnicas de sensoriamiento remoto y SIG conjuntamente con la modelación matemática hidrológica distribuida para el estudio del saneamiento hídrico en áreas inundables de la localidad de Chañar Ladeado (Santa Fe, Argentina); Vouilloud y Brizuela (2005) han delimitado zonas con características erosivas homogéneas en un sector de los alrededores de la localidad de La Paz (Entre Ríos, Argentina).

OBJETIVOS

El presente trabajo plantea como primer objetivo elaborar mapas distribuidos de parámetro CN para diferentes épocas del año (verano – invierno), en cuencas de la región sur de la Pcia. de Santa Fe (Argentina) con la finalidad de mejorar el grado de detalle y la calidad de la información a ser utilizada en la modelación matemática distribuida de los procesos de transformación lluvia caudal y propagación de crecidas.

El segundo objetivo busca analizar las modificaciones, si las hubiere, en la respuesta hidrológica de las cuencas en estudio debidas a los efectos de agregación espacial del parámetro CN por medio de modelación matemática hidrológica – hidráulica distribuida. Respecto de la agregación espacial de datos y parámetros, Stenta et al. (2008) indican que en general este proceso puede influenciar en la respuesta hidrológica de la cuenca modelada; es decir, una cuenca modelada con diferentes escalas puede presentar alteraciones en los resultados debido a la agregación espacial.

La información necesaria para elaborar los mapas de CN con que se dispone está constituida por imágenes satelitales, cobertura del suelo (a través del conocimiento de campo y firmas espectrales), uso y tipos del suelo. En tanto que para efectuar la modelación matemática distribuida se cuenta con la constitución topográfica detallada de la cuenca (MDT), red hídrica, obras hidráulicas (cunetas, canales, alcantarillas y puentes), obras que afectan el escurrimiento natural de las aguas (terraplenes viales y ferroviarios), tormentas e hidrogramas asociados.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción de las cuencas en estudio

Las cuencas de los Arroyos Ludueña y Saladillo, pertenecientes al sector suroeste de la provincia de Santa Fe (Argentina), se hallan ubicadas en la Llanura Pampeana; siendo el río Paraná el curso receptor de ambas. La región, una extensa planicie con escasa pendiente del orden de $0,5 \text{ m.km}^{-1}$ a $3,0 \text{ m.km}^{-1}$, es especialmente apta para la agricultura, la ganadería y el establecimiento de grandes núcleos urbanos por contar con tierras fértiles y fuentes seguras de agua para consumo humano. La precipitación media anual es del orden de 960 mm (serie 1876-2006, estación Rosario Aero). Estas características hacen de la agricultura el principal uso del suelo, destacándose fundamentalmente la producción de soja, maíz y trigo. Ambos sistemas se encuentran atravesados por gran cantidad de terraplenes tanto viales como ferroviarios, evidenciando una fuerte presión antrópica.

Zimmermann et al. (1995) señalan que el uso del suelo de la región ha sufrido un cambio sustancial a partir del año 1970, donde se ha pasado del cultivo de pasturas para ganadería a una agricultura extensiva, modificando la hidrología superficial de la cuenca; observando además que pareciera ser que estos hechos han producido una disminución en el tiempo de concentración de la cuenca junto a una creciente impermeabilización, con el consiguiente aumento de caudales y disminución en el tiempo de concentración del sistema.

La cuenca del Arroyo Ludueña (Fig. 1) se halla ubicada entre los paralelos $32^{\circ} 45'$ y $33^{\circ} 08'$ S y los meridianos $61^{\circ} 04'$ y $60^{\circ} 39'$ O. Su área de aporte es de aproximadamente 694 Km^2 y la elevación varía entre 70 m y 18 m sobre el nivel del mar. La red hídrica principal está constituida por el arroyo Ludueña y los canales Ibarlucea y Salvat, con una longitud aproximada de 140 km. El suelo predominante es de tipo arcilloso-limoso presentando condiciones de permeabilidad moderada a moderadamente lenta (Pouey, 1998), con pendiente media del orden de $1,0 \text{ m.km}^{-1}$. El caudal base del arroyo Ludueña es de $0,50 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, alcanzándose en crecidas ordinarias los $80 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ y en extraordinarias ($R > 50$ años) caudales superiores a los $400 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ (Riccardi et al., 2002).

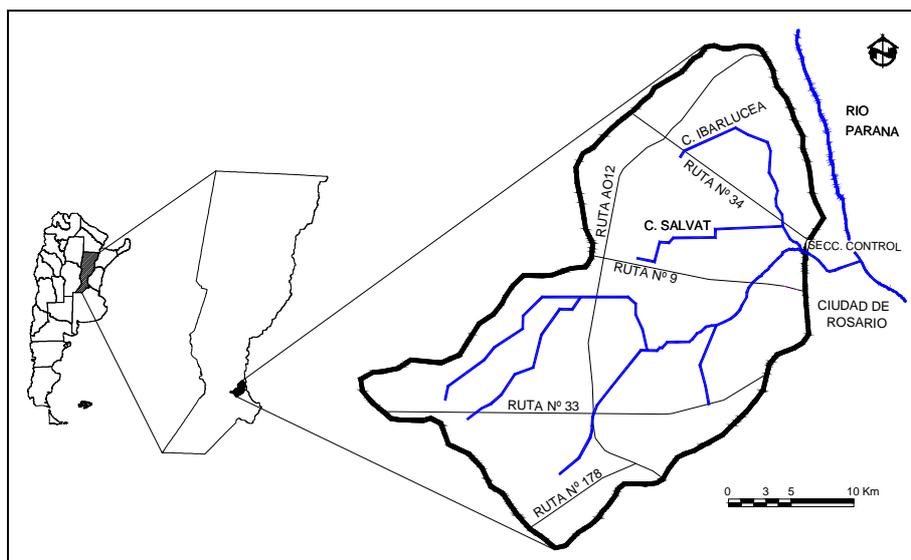


Figura 1.- Cuenca del Arroyo Ludueña

La cuenca del arroyo Saladillo se encuentra situada entre los paralelos $32^{\circ} 55' S$ y $33^{\circ} 30' S$ y los meridianos $60^{\circ} 35' O$ y $61^{\circ} 55' O$ (Fig. 2). Posee un área de contribución de aproximadamente 3144 km^2 , mientras que la elevación varía entre 116 m y 19 m sobre el nivel del mar. La red hídrica presenta diversos cauces naturales y artificiales, constituyendo el arroyo Saladillo el cauce principal con una longitud de 145 km en dirección sudoeste a noreste y pendiente media de 0.6 m.km^{-1} . Los suelos en general, son bien drenados con permeabilidad moderada a moderadamente lenta; en tanto que en los valles de inundación se encuentran suelos con drenaje imperfecto. El caudal base del arroyo es de $1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, registrándose un valor de $1140 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en el evento ocurrido en abril de 1986.

En ambas figuras, se representa en color azul y trazo grueso los cursos de agua (tanto naturales como artificiales), en color negro y trazo grueso el límite de cuenca, y en color negro y trazo fino los terraplenes que cruzan la región (rutas y ferrocarriles).

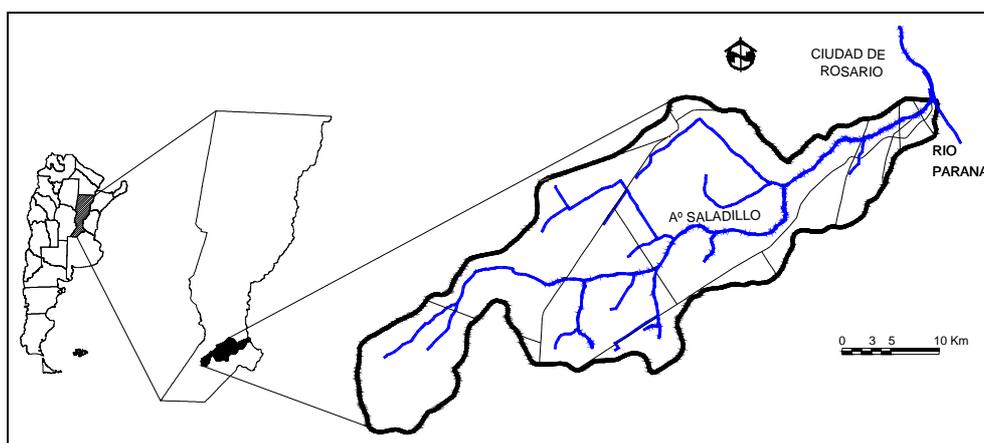


Figura 2.- Cuenca del Arroyo Saladillo

Tratamiento de imágenes

Las imágenes disponibles pertenecen a la misión Landsat 5 Sensor TM (path 227, row 083) correspondientes a las fechas 04/02/1992 y 20/06/2001, con resolución espacial de $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$. Para cada una de ellas será elaborado un mapa de clases de cobertura del suelo; tarea que implica aplicar a las imágenes los siguientes procesos: (a) corrección radiométrica, (b) corrección geométrica o georreferenciación y (c) clasificación de las diferentes coberturas de suelo. El procesamiento se efectuó utilizando el software ENVI v3.5.

(a) Corrección radiométrica

La corrección radiométrica es utilizada para permitir la comparación entre imágenes registradas por diferentes sensores y en diferentes épocas del año, consiguiendo según Chander y Markham (2003) llevar las imágenes a un mismo “sistema de referencia radiométrico”. El resultado de este procedimiento es lograr niveles de reflectividad para cada píxel, existiendo un paso intermedio que consiste en la transformación del número de cuenta digital (CD) a radiancia; los mismos fueron calculados según la ecuación 1 (Chander y Markham, op cit.):

$$L_{\lambda} = Gain.CD + Bias \quad [1]$$

donde: L_{λ} es la radiancia espectral del sensor para cada banda [$W.m^{-2}.sr^{-1}.mm^{-1}$]; $Gain$ está dado en [$W.m^{-2}.sr^{-1}.mm^{-1}.CD^{-1}$]; CD es el valor de cuenta digital de cada píxel para cada banda [adimensional]; y $Bias$ está dado en [$W.m^{-2}.sr^{-1}.mm^{-1}$]. Los valores de $Gain$ y $Bias$ son factores de escala propios de cada banda, suministrados en el archivo ‘header’ de cada imagen; los mismos surgen de la corrección efectuada a los sensores montados en el satélite debido al deterioro propio del transcurso del tiempo.

Obtenidos los valores de radiancia para cada píxel en cada banda, el siguiente paso es el cálculo de los valores de reflectividad al tope de la atmósfera (RTA); tarea que permite disminuir la variabilidad entre escenas mediante una normalización de la irradiancia solar. La reflectividad es calculada mediante la ecuación 2 (Chander y Markham, op cit.):

$$R_{\lambda} = \frac{\pi.L_{\lambda}.d^2}{E_{SUN}.sen(\theta)} \quad [2]$$

donde: R_{λ} es la reflectividad al tope de la atmósfera [%]; π es la constante 3.1415 [adimensional]; L_{λ} fue descrito anteriormente; d es la distancia Sol-Tierra [unidades astronómicas]; E_{SUN} es la irradiancia exoatmosférica solar media [$W.m^{-2}.mm^{-1}$]; y θ es el ángulo de elevación solar [rad]. La magnitud d varía en función de la época del año, en tanto que el valor de E_{SUN} es función del tipo de sensor y de la banda considerada; ambos valores están tabulados en Chander y Markham (op cit.).

(b) Corrección geométrica

La etapa siguiente consistió en unificar los sistemas de proyección debido a que gran cantidad de los datos disponibles (archivos vectoriales con límite de cuenca, terraplenes y red hidrográfica y archivos poligonales de tipos de suelo) se hallaban en el sistema Gauss Krugger Faja 5 (GK-5) para el caso de la cuenca del A° Ludueña; mientras que para la cuenca del A° Saladillo la información estaba representada en el sistema GK-4,5 (faja de proyección con punto de tangencia intermedio a los de las fajas 4 y 5, ya que la cuenca atraviesa ambas fajas del sistema de proyección). Se optó por convertir los valores de RTA de cada banda suministrados en el sistema Universal Transversal Mercator 20 Sur (UTM-20S) para la primera cuenca a GK-5, en tanto que para la segunda a GK-4,5. Esta operación fue ejecutada empleando el módulo “Convert Map Projection” (método de resampleo del vecino más próximo) que posee el software ENVI v3.5, verificando posteriormente algunos puntos de coordenadas conocidas tales como cruces de rutas y cruces de cursos de agua con caminos, estableciendo de esta manera la confiabilidad del procedimiento efectuado.

A modo de ejemplo, en la Fig. 3 se observa el sector correspondiente a la cuenca del A° Ludueña (banda 1, imagen Landsat 5 TM) de fecha 04/02/1992, luego de aplicarse las correcciones radiométricas y geométricas; y superponer los vectores de límite de cuenca (línea de trazo), redes hidrográficas (línea punteada) y terraplenes viales y ferroviarios (línea continua).



Figura 3.- Imagen Landsat 5 TM, banda 1, fecha 04/02/1992. Cuenca del A° Ludueña.

(c) Clasificación de coberturas

En función del uso del suelo, de la topografía y teniendo en cuenta el objetivo de estimar el valor del número de curva (CN), fueron determinadas cinco clases de cobertura de suelo:

- CLASE 1: Suelo húmedo no cultivable (freática poco profunda, bajos, márgenes de cursos);
- CLASE 2: Suelo cultivable con vegetación nula o escasamente desarrollada;
- CLASE 3: Vegetación desarrollada (principalmente cultivos de soja y maíz);
- CLASE 4: Suelo desnudo con escasa humedad o seco;
- CLASE 5: Espejos de agua.

Los píxeles correspondientes a los centros poblados fueron eliminados de la clasificación mediante la utilización de una máscara debido a la alta dispersión en los valores de RTA que presentaban. Para obtener el mapa temático de cobertura del suelo, en el cual los valores de RTA para cada píxel son transformados en clases, fue aplicado el método de clasificación supervisada. La determinación de polígonos o regiones de entrenamiento con similar respuesta espectral, para cada imagen, estuvo basada en la nueva imagen generada a través de la composición de bandas 432 “falso color”, la información suministrada por la librería espectral digital del US Geological Survey y el conocimiento de campo de la región. La operatoria seguida fue proponer zonas de reflectividad homogénea para cada banda (se trabajó con todas las bandas, excepto la banda 6 “termal”) y determinar los valores medios y desvíos estándar de la “firma espectral” surgida, corroborando de esta manera la uniformidad de las muestras. En la Fig. 4 son presentados para la cuenca del A° Ludueña, los valores medios de RTA para las distintas bandas de la imagen de fecha 04/02/1992.

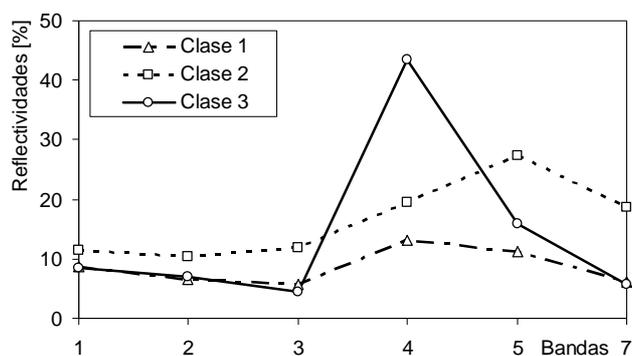


Figura 4.- RTA según bandas, fecha 04/02/1992. Cuenca del A° Ludueña.

Luego de realizada la clasificación, el mapa de clases de cobertura del suelo para cada cuenca fue obtenido aplicando sobre la misma una máscara (archivo en formato vectorial conteniendo los límites de la cuenca) utilizando el programa Envi v3.5. Los resultados de esta operación son mostrados en la Tabla 1, en forma de porcentaje en cada cuenca para ambas imágenes.

Tabla 1.- Distribución de coberturas del suelo (%)

Clase	Cuenca A° Ludueña		Cuenca A° Saladillo	
	04/02/1992	20/06/2001	04/02/1992	20/06/2001
1	19.1	29.2	26.2	13.9
2	41.6	28.0	35.4	46.9
3	39.3	7.0	37.3	7.8
4	-	35.6	-	30.0
5	0.0	0.2	1.2	1.4

En la imagen correspondiente al 04/02/1992 (verano) no fue posible distinguir la Clase 4, suelo desnudo con escasa humedad o seco; ya que el uso del suelo en esta época es dedicado preponderantemente a la agricultura (Clases 3 y 2).

Mapas de suelo

Los suelos de la región son predominantemente de tipo arcilloso-limosos presentando condiciones de permeabilidad moderada a moderadamente lenta, con escasas pendientes. La discretización espacial de las asociaciones de suelo para cada cuenca fue confeccionada mediante digitalización de las cartas de suelo (escala 1:50000) provistas por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria INTA(1972 a 1978). Las cartas de suelo fueron escaneadas, georreferenciadas y posteriormente digitalizadas con un software tipo CAD; generando de esta manera un archivo vectorial donde cada asociación está representada mediante un polígono particular. Teniendo en cuenta las características físicas, químicas y la composición textural de cada asociación de suelo, 14 asociaciones para la cuenca del A° Ludueña y 69 asociaciones para la cuenca A° del Saladillo, cada una de ellas fue clasificada según el grupo hidrológico definido en el método del CN por el SCS. Las características de los grupos analizados reproducidas en Chow et. al. (1994) son:

- Grupo C: margas arcillosas, margas arenosas poco profundas, suelos con bajo contenido orgánico y suelos con alto contenido de arcilla;
- Grupo D: suelos que se expanden significativamente cuando se mojan, arcillas altamente plásticas y ciertos suelos salinos.

El criterio para asignar cada asociación a un determinado Grupo de suelo del método CN, fue basado en la publicación del NEH (2007) determinando que cuando la capa impermeable se encuentra a profundidades menores de 30 cm de la superficie la asociación puede clasificarse dentro del Grupo D, cuando la profundidad se encuentra entre 40 cm y 50 cm de la superficie la asociación puede clasificarse como Grupo C, y cuando se presenta a profundidades intermedias a las anteriores, la asociación puede clasificarse como perteneciente al Grupo C/D.

En la cuenca del A° Ludueña fue posible identificar un 55.5 % de suelos del Grupo C, 14.7 % de suelos del Grupo D y 29.8 % de suelos que presentan características intermedias entre ambos, denominados Grupo C/D. A su vez para la cuenca del A° Saladillo se halló un 30.7 % de suelos pertenecientes al Grupo C, un 17.9 % de suelos relacionados al Grupo D y un 51.4 % de suelos dentro del Grupo C/D. En la Fig. 5 se exhiben los mapas de Grupos de suelo generados mediante el Sistema de Información Geográfica Ilwis v3.3 (2005) a partir de las cartas de suelo convertidas a formato raster y de la clasificación de cada asociación en uno de los tres grupos analizados; en color amarillo se representa el Grupo C, en azul el Grupo C/D y en magenta el Grupo D.

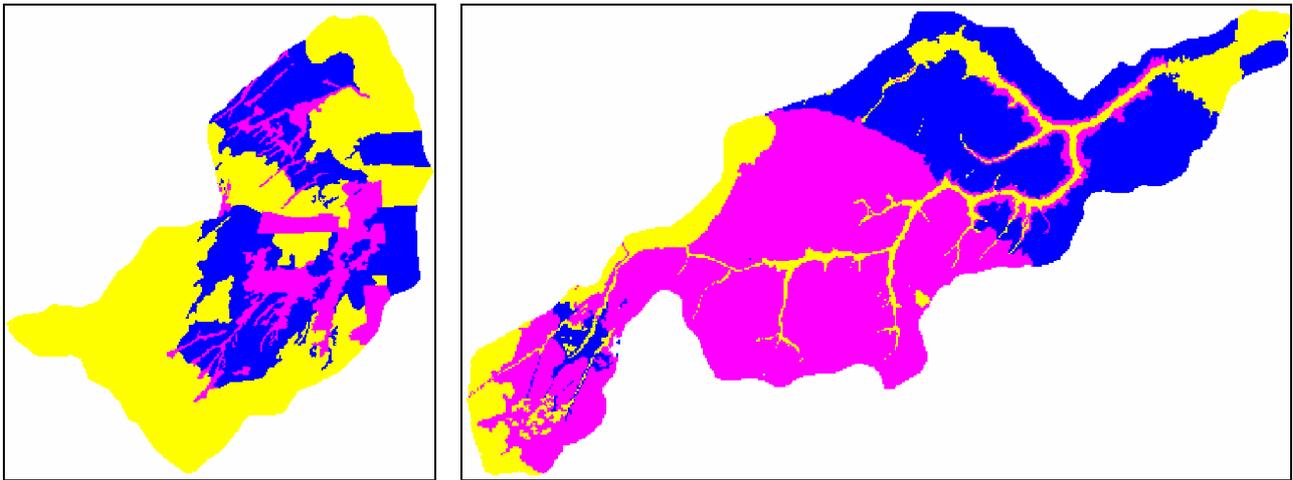


Figura 5.- Grupos de suelo según el SCS. (a) Cuenca del A° Ludueña. (b) Cuenca del A° Saladillo

Asignación de valores de CN

La elección de valores de CN depende además de la cobertura del suelo y del grupo hidrológico, de la condición de humedad antecedente en que se hallaba la cuenca antes de la ocurrencia del evento pluviométrico. Al efectuar el análisis de la condición de humedad antecedente, fue utilizada una modificación del método original propuesto por el SCS introducida en el trabajo de Scuderi et al. (2006); la misma consiste en considerar la precipitación con antecedencia de 30 días respecto a la fecha de ocurrencia del evento, en vez de los 5 días sugeridos por el método. Esto se debe a que plantear solo 5 días anteriores a la fecha del evento, produce precipitaciones netas que no alcanzan a generar los limnigramas observados; una posible explicación a este hecho puede ser que el tipo de suelo de la región (arcilloso-limoso) aparentemente posee una gran capacidad de retención de humedad.

Los valores de CN fueron preliminarmente seleccionados con base en la normativa TR-55 (1986), y posteriormente se calibraron para los eventos de fecha 17/03/1994 en la cuenca del A° Ludueña (condición I de humedad antecedente) y de fecha 22/04/1986 en la cuenca del A° Saladillo (condición II de humedad antecedente) a través de modelación matemática distribuida; los resultados según Clase de cobertura y Grupo de suelo son presentados en las Tablas 2 y 3.

Tabla 2.- Valores de CN calibrados para la tormenta del 17/03/1994 (condición I)

Clase	Grupo C	Grupo C/D	Grupo D
1	57	58	59
2	55	56	57
3	53	54	55
4	57	58	59
5	100		

Tabla 3.- Valores de CN calibrados para la tormenta del 22/04/1986 (condición II)

Clase	Grupo C	Grupo C/D	Grupo D
1	76	77	77
2	74	75	76
3	73	74	74
4	76	77	77
5	100		

Cabe acotar que el valor de CN igual a 100, estipulado para la Clase 5 (espejos de agua), es independiente del grupo de suelo y de la condición de humedad antecedente.

Generación de Mapas de CN

La operación de asignación del valor del parámetro CN a cada píxel de la cuenca, fue realizada con el programa Ilwis v3.3 (2005); para lo cual cada mapa de coberturas de suelo fue importado (ya en formato raster) al igual que los mapas de Grupos de suelo (originalmente en formato de polígono y posteriormente convertido a formato raster). Con estos mapas se efectuó el cruzamiento o intersección de la información (a través del comando CROSS) generando un nuevo mapa de información con valores de CN y una tabla de valores asociada al mismo. En la Fig. 6 se presentan los mapas de CN obtenidos para ambas cuencas (imagen de 04/02/1992) luego de aplicar el procedimiento descrito, por otra parte en la Tabla 4 es expuesta la misma información en forma de distribución porcentual.

Tabla 4.- Distribución de valores de CN (%)

CN	Cuenca A° Ludueña		Cuenca A° Saladillo	
	04/02/1992	20/06/2001	04/02/1992	20/06/2001
53	27.3	20.1	16.5	11.4
54	9.7	12.0	16.8	13.5
55	22.0	12.4	13.7	10.0
56	13.1	7.3	18.5	5.7
57	16.7	7.6	11.4	22.6
58	7.1	37.4	15.5	27.7
59	4.1	3.2	7.6	9.1

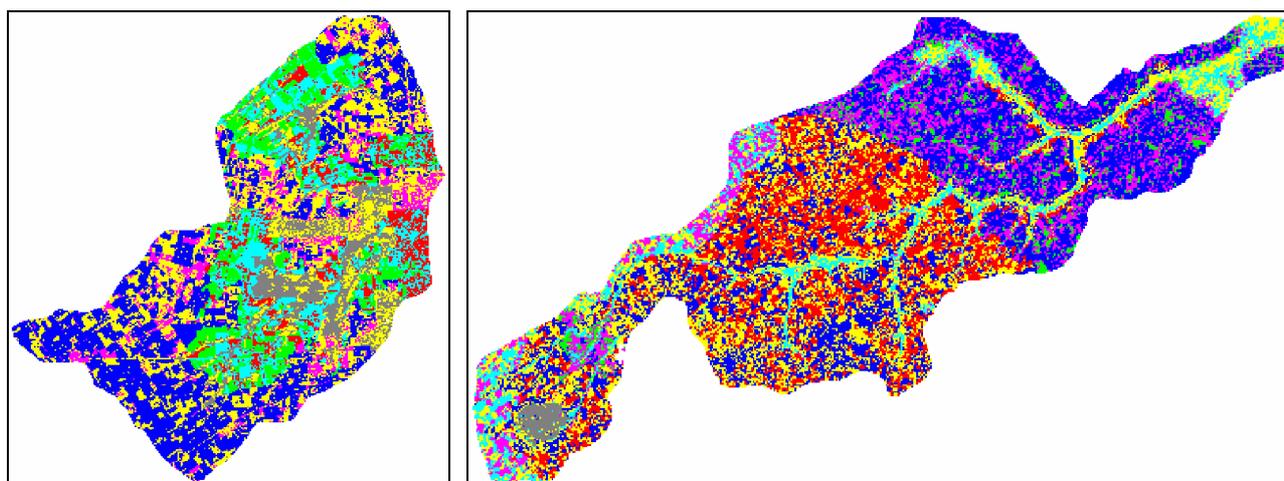


Figura 6.- Mapas de CN, imagen 04/02/1992. (a) Cuenca del A° Ludueña. (b) Cuenca del A° Saladillo

Estudio de la respuesta hidrológica

Conjuntamente con la elaboración de los mapas de CN fueron modeladas las cuencas de los arroyos Ludueña y Saladillo utilizando un modelo matemático distribuido, físicamente basado denominado CTSS8 (Riccardi, 2000). El mismo, permite la definición de un gran número de celdas cuadrangulares interconectadas entre sí que constituyen unidades de escurrimiento dentro de la cuenca. Ambas cuencas fueron discretizadas con cuatro tamaños de grilla con la finalidad de cuantificar el grado de incidencia que tiene la agregación espacial del parámetro CN en la respuesta hidrológica de las mismas. En la cuenca del A° Ludueña se constituyeron tamaños de grilla de 125 m, 250 m, 500 m y 1000 m y en la cuenca del A° Saladillo los tamaños de grilla son de 250 m, 500 m, 1000 m y 2000 m; incorporando las características hidráulicas y geométricas de los cursos de agua, terraplenes y alcantarillas.

La topografía se definió a partir de la digitalización de cartas topográficas del Instituto Geográfico Militar (IGM), las curvas de nivel fueron vectorizadas y estos datos convertidos a archivos de texto para generar un modelo digital del terreno (MDT). El MDT se completó por medio de relevamientos de campaña en sectores con déficit de información topográfica.

En ambas cuencas, y para cada tamaño de grilla definido, se modelaron dos tormentas de diseño correspondientes a recurrencias de 10 y 50 años cada una (Stenta et al., 2005). Para lo cual se consideró una condición III de humedad antecedente, que puede ser estimada a través de la ecuación 3 (Chow et al., 1994):

$$CN(III) = \frac{23.CN(II)}{10 + 0,13.CN(II)} \quad [3]$$

La comparación fue realizada en la sección de control de ambas cuencas, analizando el caudal máximo o pico (Q_{\max}), el volumen de escurrimiento (V_e) y el tiempo al pico (T_p) de los hidrogramas generados en condiciones de diseño.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados presentados a continuación se circunscriben solamente a los tamaños de grilla de 125 m para la cuenca del A° Ludueña, y de 250 m para la cuenca del A° Saladillo; es decir las discretizaciones con mayor nivel de detalle para cada una de ellas.

La primer comparación realizada surge de aplicar sobre ambas cuencas los mapas de valores distribuidos de CN o un único valor medio de CN. En la Fig. 7 se presentan los resultados aplicados a ambas tormentas de diseño a partir de la imagen de 04/02/1992 para la cuenca del A° Ludueña, en tanto que en la Fig. 8 se presentan los mismos resultados para la cuenca del A° Saladillo.

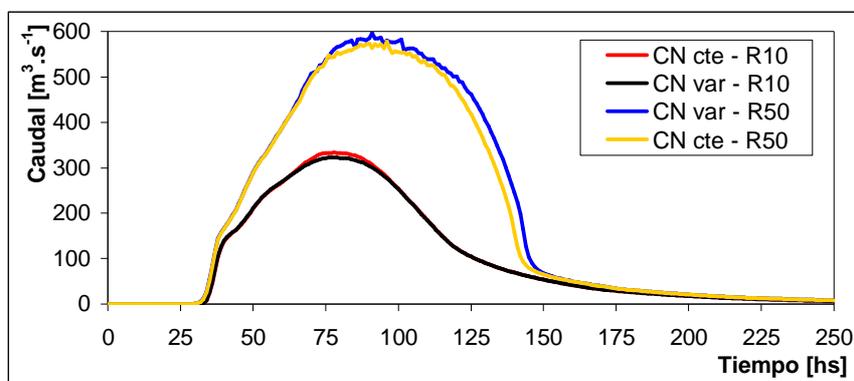


Figura 7.-Cuenca del A° Ludueña, 04/02/1992.

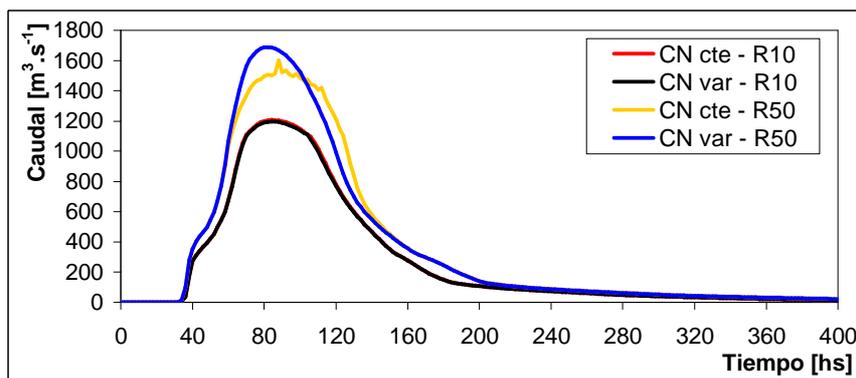


Figura 8.-Cuenca del A° Saladillo, 04/02/1992.

En la Tabla 5 se encuentra el resumen de las variables analizadas para ambas cuencas en el caso de la obtención del mapa de CN elaborado con base en la imagen de 04/02/1992.

Tabla 5.- Variables analizadas. Imagen 04/02/1992

Variable	Cuenca A° Ludueña				Cuenca A° Saladillo			
	R = 10 años		R = 50 años		R = 10 años		R = 50 años	
	CN cte	CN var	CN cte	CN var	CN cte	CN var	CN cte	CN var
Qmáx. [m³.s⁻¹]	333.1	322.2	577.9	596.4	1202.1	1195.5	1603.0	1564.6
Ve [Hm³]	90.7	89.8	172.7	180.9	395.9	397.5	531.1	533.8
Tp [hs]	78	77	96	91	84	84	88	96

Una segunda comparación fue efectuada, para R=10 años, a partir de ambas imágenes para evaluar las diferencias cuando se consideran valores de CN distribuidos y constantes. En la Fig. 9 se exponen los resultados surgidos de dicha comparación para la cuenca del A° Ludueña, mientras que la Fig. 10 aplica el mismo análisis a la cuenca del A° Saladillo. La Tabla 6 presenta el resumen de estos resultados para ambas cuencas.

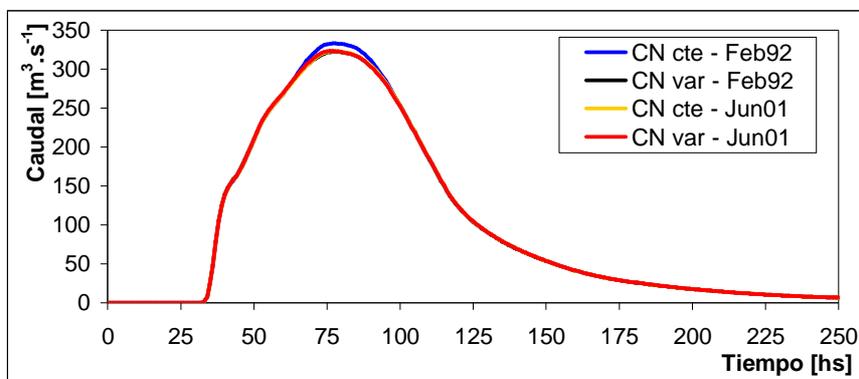


Figura 9.-Cuenca del A° Ludueña, R=10 años.

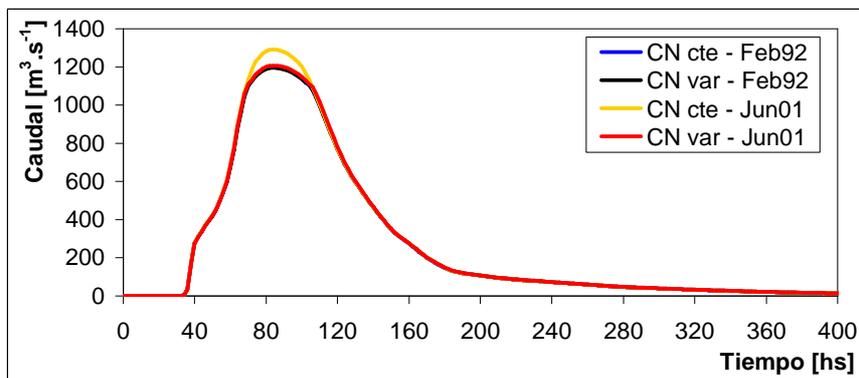


Figura 10.-Cuenca del A° Saladillo, R=10 años.

Tabla 6.- Variables analizadas. Recurrencia 10 años

Variable	Cuenca A° Ludueña				Cuenca A° Saladillo			
	Imagen Feb 92		Imagen Jun01		Imagen Feb 92		Imagen Jun01	
	CN cte	CN var	CN cte	CN var	CN cte	CN var	CN cte	CN var
Qmáx. [m³.s⁻¹]	333.1	322.2	322.9	323.3	1202.1	1195.5	1291.6	1207.5
Ve [Hm³]	90.7	89.8	89.8	89.9	395.9	397.5	408.8	401.3
Tp [hs]	78	77	77	77	84	84	84	84

El análisis de los resultados indica que la mayor diferencia relativa porcentual que se produce, para la imagen de 04/02/1992, en ambas cuencas entre la situación de considerar CN distribuido y CN constante es de 3,4 % para el caudal pico, de 4,8 % para el volumen escurrido y de 9,1 % para el tiempo al pico.

Por otro lado, si esta comparación se realiza ahora para ambas imágenes pero esta vez para el caso de recurrencia de 10 años, se tiene que la diferencia máxima relativa porcentual para el caudal pico es de 7,0%, para el volumen escurrido es de 1,9 % y para el tiempo al pico es de 1,3%.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A partir de los resultados obtenidos, puede inferirse que en todas las comparaciones realizadas para estas dos cuencas, la mayor diferencia relativa porcentual, al considerar caudales máximos es del 7,0 %, para volúmenes de escurrimiento es del 4,8 % y para los tiempos al pico es de 9,1 %.; por lo tanto puede decirse que los errores se encuentran en el orden del 10 %.

Un paso siguiente en la investigación es establecer si el uso del parámetro CN en forma distribuida (en vez de un CN medio) produce variaciones en las variables estudiadas en el caso de puntos internos de la cuenca; tarea que la modelación matemática distribuida utilizada permite realizar.

En términos de variación temporal, al analizar ambas cuencas, no se han encontrado diferencias significativas entre la utilización de valores de CN en época de verano o de invierno. Por otro lado, la agregación espacial del parámetro CN, por modificación de los tamaños de grilla, no afecta sustancialmente los hidrogramas en la sección de control en ambas cuencas.

La detección de áreas con mayor variabilidad temporal del parámetro CN permite conocer las zonas donde es probable que los cambios en el uso y cobertura del suelo, y por ende en los valores de CN, puedan tener una mayor influencia en la respuesta hidrológica. Por lo que es recomendable proponer el seguimiento y análisis de dichas áreas en forma más detallada.

Se destacan la importancia y potencialidad de esta metodología a la hora de mejorar la representación de parámetros en la cuenca para su incorporación en modelos matemáticos hidrológicos distribuidos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado en el marco del Proyecto de Investigación en Ciencia y Técnica Orientado PICTO 2004 n° 23187 financiado por el FONCyT (Argentina).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Chander, G. y Markham, B.** (2003). "Revised Landsat 5 TM Radiometric Calibration Procedures and Post-Calibration Dynamic Ranges". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 41, N. 11, pp 2674-2677.
- Chow, V. T., Maidment, D. y Mays, L.** (1994). *Hidrología Aplicada*. McGraw Hill Interamericana S.A., Santa Fe de Bogotá, Colombia, 584 pp.
- ENVI v3.5.** (2001). The Environment for Visualizing Images. Research Systems, Inc.
- Ferrer Juliá, M., Ruiz Verdú, A., Dimas Suárez, M. y Estrela Monreal, T.** (1998). "Aportación de la Teledetección para la determinación del parámetro hidrológico del número de curva". *Ingeniería del Agua*, Vol. 5, Num. 1, pp 35-46.
- ILWIS v3.3 Academic.** (2005). ITC, RSG/GSD, www.itc.nl/ilwis/.
- INTA (1972 a 1988).** *Cartas de Suelo de la República Argentina*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.

- NEH.** (2007). National Engineering Handbook, Chapter 7: Hydrologic Soil Groups. USDA. NRCS. http://directives.sc.egov.usda.gov/media/pdf/H_210_630_7.pdf
- Pandey, A., Chowdary, V. M., Mal, B. C. y Dabral, P. P.** (2003). "Estimation of runoff for agricultural watershed using SCS Curve Number and Geographic Information System". Map India Conference 2003, 8 pp.
- Pouey, N.** (1998). *Erosión Hídrica en cursos de llanura sobre lechos cohesivos*. UNR Editora, Rosario, Argentina, 164 pp.
- Riccardi, G. A.** (2000). "Un Sistema de Simulación Hidrológica-Hidráulica Cuasi-2D Multicapa para Ambientes Rurales y Urbanos," *XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Tomo II*, Córdoba, Argentina, pp. 159-168.
- Riccardi, G. A.** (2001). *Un sistema de modelación Hidrológica-Hidráulica cuasidimensional para ambientes rurales y urbanos*. Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, 279 pp.
- Riccardi, G. A., Scuderi, C. M. y Stenta, H. R.** (2002). "Modelado de escurrimiento superficial con alto nivel de detalle en la cuenca del arroyo Ludueña, Santa Fe, Argentina". *XIX Congreso Nacional del Agua*, T33, Villa Carlos Paz, Córdoba, Argentina.
- Riccardi, G. A.** (2004). *Hidrología en Medios Antropizados*. Libro electrónico, Cap 4, Universidad Nacional de Rosario, <http://c-virtual.fceia.unr.edu.ar/>.
- Scuderi, C. M., Riccardi, G. A. y Zimmermann, E. D.** (2006). "Pronóstico preliminar de crecidas en tiempo pseudo real en una cuenca de llanura". *XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Ciudad Guayana, Venezuela, 10 pp.
- Stenta, H. R., Rentería, J. P. y Riccardi, G. A.** (2005). "Plataforma computacional para gestión de información en la simulación hidrológica-hidráulica del escurrimiento superficial". *XX Congreso Nacional del Agua y III Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur*, Mendoza, Argentina. CD-ROM Cap. Hidrología, T 74, pp 1-13. ISBN 987-22143-0-1.
- Stenta, H. R., Riccardi, G. A. y Basile, P. A.** (2008). "Similitud Hidrológica en el Escurrimiento Superficial en Cuencas Rurales mediante Modelación Matemática Distribuida", *XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Cartagena de Indias, Colombia (en revisión).
- TR-55.** (1986). Technical Release 55. *Urban Hydrology for small watershed*. Second Edition.
- US Geological Survey.** (2007). <http://speclab.cr.usgs.gov/spectral.lib04/spectral-lib04.html>.
- Vouilloud, F. A. y Brizuela, A. B.** (2005). "Identificación de áreas con características erosivas semejantes utilizando teledetección y Sistemas de Información Geográfica". *Cuadernos del CURIHAM*, ISSN 1514-2906, Vol. 11(1), pp 1-8.
- Zimmermann, E. D., Basile, P. A., Riccardi, G. A.** (1995). Análisis de la Modificación en la Respuesta Hidrológica del Sistema del Arroyo Ludueña provocada por cambios en el Uso del Suelo. Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales (CURIHAM), FCEIyA, UNR, Rosario, Argentina.
- Zimmermann, E. D.** (2000). "Aplicación y Calibración del Modelo SHALL3 en el Sistema Hidrológico del Arroyo Ludueña, Santa Fe, Argentina". *XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Asociación Internacional de Investigaciones Hidráulicas División Latinoamericana, IAHR*. Vol II., pp 713-722, Córdoba, Argentina. ISBN 950-33-0267-6.
- Zimmermann, E. D. y Riccardi, G. A.** (2000). "Modelo de Simulación Hidrológica Superficial y Subterránea para Áreas de Llanura". *XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Asociación Internacional de Investigaciones Hidráulicas División Latinoamericana, IAHR*. Vol II, pp 169-178, Córdoba, Argentina. ISBN 950-33-0267-6.
- Zimmermann, E. D., Rentería, J. P., Stenta, H. R., Riccardi, G. A.** (2004). "Uso de sistemas de Información geográfica e Imágenes Satelitales y su Aplicación en Hidrología. Caso de Estudio: Sector Norte de Chañar Ladeado (Santa Fe, Argentina)". *Cuadernos del CURIHAM*, ISSN 1514-2906, Vol 10, pp 85-95.