

NÚMEROS DE CURVA DE ESCURRIMIENTO DETERMINADOS PARA UNA MICROCUENCA AFORADA CON SUELOS ARGIUDDOLES DE PERMEABILIDAD MODERADA

Daiana Sainz ^{1,2*}, Filipe Behrends Kraemer ^{2,3}, Patricia Carfagno ¹,
Maximiliano Eiza ⁴, Celio Chagas ²

1 Instituto de Suelos - Centro de Investigación de Recursos Naturales, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Argentina,

2 Cátedra de Manejo y Conservación de Suelos, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires,

3 Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Argentina,

4 Estación Experimental Agropecuaria Balcarce – Centro Regional Buenos Aires Sur. Argentina,

RESUMEN

El escurrimiento asociado a la erosión hídrica determina a menudo un costo ambiental debido a la pérdida de agua, suelo, nutrientes y materia orgánica de las tierras agrícolas, así como el transporte de contaminantes hacia los cuerpos de agua. Un procedimiento utilizado para estimar escurrimiento superficial en microcuencas es el método del Número de Curva (CN) (USDA) el cual es empleado en diversos modelos hidrológicos de estimación de erosión hídrica y de generación y transporte de contaminantes. Debido a su carácter empírico, resulta necesario contar con valores calibrados para las condiciones locales en las que el mismo se aplica. Se registraron 20 meses continuos de aforos en una microcuenca agrícola dominada por la Serie Arroyo Dulce bajo siembra directa (SD) continua de la cual no había información hidrológica previa. El periodo analizado se caracterizó por incluir 83 lluvias, algunas muy intensas con periodo de retorno de 10 años y se registraron 13 eventos de escurrimiento que permitieron contrastar las hipótesis planteadas. Por un lado, se corroboró una tendencia al comportamiento hidrológico de tipo “estándar” tal como lo menciona Hawkins y otros investigadores, asociándose a un escurrimiento de tipo “hortoniano”. Por otra parte, los CN obtenidos resultaron coherentes con las propiedades intrínsecas del suelo dominante, la Serie Arroyo Dulce, un Argiudol típico profundo y de moderada permeabilidad. Los CN tendieron a valores entre 60 y 70 para lluvias extraordinarias y la mediana se ubicó en CN=71 con valores extremos entre 63 (suelo seco) y 87 (suelo húmedo). La comparación con los resultados obtenidos previamente en una microcuenca aforada con suelos Argiudoles vérticos de la Serie Ramallo (mediana=CN 82), permitió separar claramente ambas series

Palabras claves: infiltración, siembra directa, Pampa Ondulada.

RUNOFF CURVE NUMBERS DETERMINED FOR A SMALL GAUGED WATERSHED WITH MODERATELY PERMEABLE ARGIUDDOLL SOILS

ABSTRACT

The runoff associated with water erosion often determines an environmental cost due to the loss of water, soil, nutrients, and organic matter from agricultural land as well as the transport of pollutants to water bodies. A widely used procedure for estimating surface runoff in small watersheds is the curve number method (CN) (USDA) which is used in various hydrological models, water erosion estimation and contaminant generation and transport models. Due to its empirical nature, it is necessary to have calibrated values for the local conditions in which it is applied. We registered 20 continuous months of runoff measurements in

* Autor de contacto:
dsainz@agro.uba.ar

Recibido:
15-06-21

Recibido con revisiones:
21-03-22

Aceptado:
03-03-22

a small agricultural gauged watershed dominated by the Arroyo Dulce series under continuous no tillage of which there was no prior hydrological information. The period analyzed was characterized by the occurrence of 83 rains some of them very intense with a return period of 10 years and there were 13 runoff events that allowed to contrast the hypotheses raised. On the one hand, a trend of standard hydrological behavior was corroborated as mentioned by Hawkins and other researchers, associated with a "hortonian" runoff response. Moreover, the CNs obtained were consistent with the intrinsic properties of the dominant soil, the Arroyo Dulce series, a deep typical Argiudoll with moderate permeability. CN tended to values between 60 and 70 for extraordinary rainfall and the median was located at CN-71 with extreme values between 63 (dry soil) and 87 (wet soil). Comparison with the results previously obtained in a small, gauged watershed with vertic Argiudoll soil of the Ramallo Series (median CN 82), made it possible to clearly separate both series.

Keywords: infiltration, no tillage, undulating pampa.

INTRODUCCIÓN

El escurrimiento asociado a la erosión hídrica determina costos ambientales y económicos tanto para la agricultura como para la sociedad civil. En este sentido, dichos costos implican pérdida de agua, suelo, nutrientes y materia orgánica de las tierras agrícolas y, al mismo tiempo, favorecen el transporte de sustancias contaminantes hacia los cuerpos de agua (Chagas et al., 2014; Ongley, 1997). Uno de los procedimientos ampliamente utilizados para estimar escurrimiento superficial en microcuencas es el método del Número de curva (CN) (United States Department of Agriculture [USDA], 1985, 2004) el cual permite predecir la escurrimiento a partir de información de suelos, usos de la tierra y condiciones de humedad antecedente, frente a la incidencia de una lluvia dada. Este método es utilizado en diversos modelos hidrológicos (estimación de erosión hídrica y de generación y transporte de contaminantes). Asimismo, permite estimar la respuesta de una cuenca frente a eventos máximos con cierta probabilidad de ocurrencia. Su utilización se ha extendido en el mundo empleándose, por ejemplo, para estimar escurrimiento bajo usos tan diversos como horticultura (Romero et al., 2007), cuencas forestales (Tedela et al., 2012) y áreas urbanas.

Recientemente Mishra et al. (2018) resumieron algunos aspectos que merecen reverse respecto de este método, tanto desde el punto de vista hidrológico como estructural, a saber: definición de los criterios de condición de humedad antecedente (AMC), procedimientos para estimar los valores de CN, definición de la abstracción inicial y su estimación (0,2S), estimación de la retención máxima (S), relación entre la duración de la tormenta y proceso de infiltración, relación entre las pendientes y CN, entre otras consideraciones. Es por ello que este método es evaluado y analizado con frecuencia por la comunidad científica de modo de definir más claramente algunos de estos aspectos (M. G. Ares, comunicación personal; Van Mullem et al., 2002; Soulis et al., 2009). Dado el carácter empírico de este método, resulta de vital importancia contar con valores calibrados para las condiciones locales en las que el mismo se aplica (Hawkins, 1993; Van Mullen et al., 2002).

En Argentina, es muy escaso el número de microcuencas aforadas que permiten calibrar el modelo de CN. Para poder hacerlo, es necesario contar con un cúmulo importante de registros de escurrimientos superficiales, pares ordenados de lluvia-escurrimiento medidos in situ con los cuales realizar esta verificación y particularmente conocer la respuesta de la microcuenca ante eventos extraordinarios de precipitaciones (e.g. lluvias máximas diarias con un periodo de retorno no inferior a 10 años). Esta información permite, por un lado, obtener valores de S y por ende de CN para condiciones medias (AMCII) y extremas de humedad (AMCI y AMCIII), siguiendo los procedimientos citados por Hawkins (1993) y Van Mullem et al. (2002). Por otro lado, se puede analizar la tendencia de las relaciones entre lluvias y valores de CN asociados a las mismas. Esto permite clasificar a las microcuencas por su respuesta hidrológica dentro de alguna de las siguientes categorías: estándar, complaciente o violento de acuerdo con la forma de dicha respuesta. En ese sentido Ares et al. (2012, 2014) y Chagas et al. (2008), siguiendo los procedimientos antes citados, analizaron lluvias y escurrimientos para microcuencas de Pampa Serrana y Pampa Ondulada. Para este último caso, el suelo predominante es un Argiudol vértico de la Serie Ramallo con un horizonte argílico fuertemente arcilloso, el comportamiento registrado fue típicamente el denominado "estándar". El mismo se caracterizó por tender a un valor de CN asintótico en la medida que las lluvias asociadas fueran de mayor volumen. Esto se asocia con un modelo de generación hortoniano del escurrimiento el cual también permite suponer que la mayor parte de la cuenca participa armónicamente del proceso de infiltración/escurrimiento. En ese sentido, dicha cuenca mostró una tendencia hacia valores de CN de 82, independientemente de si se tratara de labranza convencional o siembra directa (SD). Por el contrario, la cuenca de la Pampa Serrana bajo SD continua y dominada por Argiudoles típicos, ricos en carbono orgánico y con

texturas favorables al proceso de entrada del agua en el suelo, mostró un comportamiento mixto estándar/complaciente, cuya tendencia frente a lluvias crecientes, era hacia valores de CN muy bajos y, en consecuencia, favorables al proceso de infiltración.

Respecto de la escala de análisis, vale la pena destacar la importancia de complementar información hidrológica y edáfica a diferentes niveles de estudio, tales como microcuenca, lote y parche (Sainz, 2020). El comportamiento hidrológico de un determinado suelo frente a la incidencia de la lluvia intensa, por sí solo, no permite estimar adecuadamente la respuesta hidrológica de una microcuenca dominada por ese mismo suelo. Experimentos parciales sobre un Argiudol vértico de la Serie Ramallo como los de Chagas et al. (2004, 2011), De La Vega et al. (2004) y Peleretegui et al. (2003) cobran entidad cuando se pueden contrastar con registros de lluvia/escorrimento continuos a nivel de microcuenca bajo condiciones variables de cobertura y humedad antecedente. En tal sentido, los aforos de una microcuenca dominada por la serie Ramallo bajo labranza convencional desde 1991 a 1999 mostraron una gran variabilidad temporal de los escurrimientos condicionado en mayor medida por la sucesión de periodos de barbecho con suelo rugoso recientemente labrado, cama de siembra refinada o cultivo en distinta etapa fenológica y humedad edáfica variable. Por el contrario, durante el periodo bajo SD desde 2000 a 2005, la microcuenca escurrió en fase con el nivel de lluvias diarias mostrando cierta independencia de las variaciones en la cobertura vegetal viva o muerta y la humedad edáfica, reflejando así una mayor estabilidad relativa (Chagas et al., 2008). Los resultados hallados permiten suponer que se pueden comparar registros de mediano plazo de cuencas bajo SD continua que correspondan a suelos contrastantes, pudiendo inferir el comportamiento hidrológico de los respectivos suelos dominantes, mediante el análisis de las respectivas curvas de lluvia/escorrimento. Esa información es vital para nuestras aéreas productivas, en las cuales se utilizan las tablas de conversión del método del Soil Conservation Service (SCS) original sin ninguna comprobación posible de su adaptabilidad a nuestras condiciones. En línea con lo anterior, el coeficiente de escurrimiento también resulta una variable hidrológica útil para caracterizar la respuesta hidrológica de una determinada cuenca (Ares et al., 2012, 2014; Chagas et al., 2011; Castiglioni et al., 2006).

Recientemente se obtuvieron 20 meses continuos de registros hidrológicos en una microcuenca agrícola ubicada en el centro del partido de Arrecifes, dominada por la serie Arroyo Dulce (Argiudol típico) bajo SD continua. Se trata de un suelo representativo de la vertiente Este del Río Arrecifes en la Pampa Ondulada, con propiedades edáficas diferentes a la de otros suelos de esta región. En tal sentido la Serie Arroyo Dulce presenta un horizonte argílico con moderado contenido de arcilla y se encuentra a una profundidad superior a la de otros Argiudoles de dicha región.

Por lo expuesto hasta aquí, el objetivo de este trabajo fue caracterizar la respuesta hidrológica de dicha microcuenca ante lluvias de diferente magnitud e intensidad. Para ello se plantearon las siguientes hipótesis:

- La microcuenca ubicada en la cuenca del río Arrecifes muestra un comportamiento hidrológico estándar;
- Los Números de Curva (CN) correspondientes a las lluvias y escurrimientos superficiales medios para esta microcuenca resultan coherentes con el moderado contenido de arcilla del horizonte argílico de la Serie Arroyo Dulce.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación y descripción del sitio de estudio

El área bajo estudio se encuentra al norte de la ciudad de Arrecifes, en el centro del partido homónimo, provincia de Buenos Aires. Los suelos presentes en dicho ambiente pertenecen principalmente a la Serie Arroyo Dulce (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria [INTA], 1974). El concepto central de esta Serie abarca suelos oscuros, muy profundos, con aptitud agrícola, en un paisaje de lomas extendidas, en posición de loma de la Subregión de Pampa Ondulada alta, formado en sedimentos loésicos, franco limoso (horizontes A1 [0-14 cm]: Arcilla (<2 µm): 20,6%; Limo (2-50 µm): 63,9%; Arena (50-2000 µm):15,5 % ; A2 [14-34 cm]: Arcilla: 24,6%; Limo: 62,6%; Arena: 12,8%); AB [34-45 cm]: Arcilla: 26,8%; Limo 57,9 %; Arena: 15,3%); BAt [45-78 cm]: Arcilla: 32,4%; Limo:53,2 %; Arena:14,4 %); Bt1 [58-77 cm]: Arcilla:39,8 %; Limo:48,2 %; Arena:12 %); Bt2 [77-97 cm]: Arcilla: 39,4%; Limo :46,6 %; Arena:14 %); BC1 [97-119 cm]: Arcilla: 26,1 %; Limo: 53,5%; Arena: 20,4 %), no alcalino, no salino, con gradiente de 0 a 3 %; clasificación taxonómica: Argiudol típico, familia fina, illítica, térmica (USDA NRCS, 2004). Se reconocen fases de erosión.

Descripción de la microcuenca bajo estudio

Se trata de una microcuenca primaria que pertenece a la cuenca del Arroyo Los Ingleses, afluente del río Arrecifes. Posee una superficie aproximada de 2,3 km² (Figura 1), dominada por fases algo inclinadas y erosionadas de dicha Serie de suelo. Las pendientes del terreno no superan 3 % de gradiente. El uso de la tierra de la microcuenca es principalmente agrícola consistiendo en secuencia de cultivos anuales con prevalencia de soja (*Glycine max* (L.) Merr.) bajo SD. Una rotación habitual en la zona es trigo (*Triticum aestivum* L.) /soja-maíz (*Zea mays* L.)-soja.

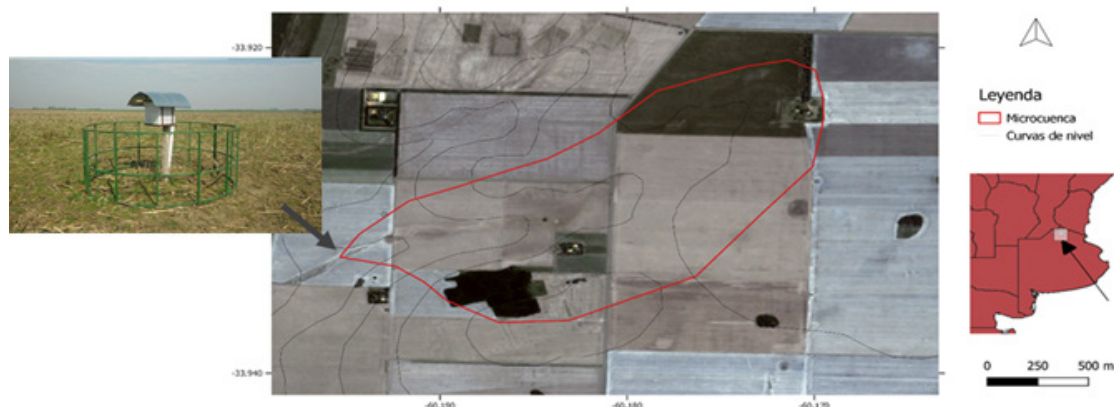


Figura 1. Microcuenca estudiada perteneciente a la cuenca del Arroyo Los Ingleses, afluente del río Arrecifes. Imagen Google Earth y curvas de nivel con equidistancia de 2,5 m y de 1,25 m en la cabecera de la misma (no mostrada). El cierre de la microcuenca se realizó en el punto de instalación del limnógrafo registrador de escurrimientos (indicado con una flecha).

Figure 1. Micro basin studied belonging to the Arroyo Los Ingleses basin, a tributary of the Arrecifes River. Google Earth image and contour lines with equidistance of 2,5 meters and 1,25 m at the head of the basin (not shown). The closure of the micro basin was carried out at the point of installation of the runoff recording water gauge (indicated with an arrow).

Registro de lluvias y escurrimientos

El periodo analizado abarcó desde el 27/10/2016 al 31/5/2018. Las lluvias se registraron localmente mediante un pluviómetro ubicado dentro del área de la microcuenca, en el establecimiento agropecuario correspondiente a la Fundación Stegmann de Arrecifes (Buenos Aires). Los registros se compararon con las mediciones pluviométricas diarias y los registros históricos de precipitaciones registrados por instrumental meteorológico perteneciente a la estación experimental de INTA San Pedro (INTA, 2019).

El registro de los escurrimientos se realizó mediante un limnógrafo automático dotado de un sensor piezo-resistivo, colocado en un pozo en el eje de la vaguada central de la microcuenca. Dicho sitio se seleccionó cuidadosamente procurando que la vaguada en ese sector presentara un cauce relativamente homogéneo y rectilíneo, al menos en un trayecto de 200 metros y una pendiente relativamente constante. En una memoria tipo EEPROM se registró la altura por encima del sensor (h) a intervalos de 30 minutos. Dicha altura se transformó a caudal líquido, a través de una curva/calado de agua confeccionada especialmente para el área de trabajo, utilizando el modelo de Manning (Schwab et al., 1990).

Previo a la instalación del limnógrafo, se realizó el relevamiento topográfico detallado a campo midiendo el gradiente medio de la pendiente del cauce aguas arriba y aguas abajo del sensor y las secciones transversales del cauce principal de la microcuenca. La rugosidad del cauce se estimó mediante el empleo de tablas específicas. El ajuste de pares ordenados de altura de agua y caudal estimado por Manning, para la microcuenca bajo estudio (curva altura/caudal) se realizó mediante un modelo polinómico de segundo grado ($y=ax^2+bx+c$) (Figura 2).

Cálculo de los Números de Curva (CN)

A partir de registros de precipitación y escurrimiento de la microcuenca, se determinaron los valores de S (retención máxima) a través de la ecuación (2) propuesta por Yoo et al. (1993). A su vez Hawkins (1993) y Van Mullem et al. (2002) propusieron otra ecuación similar a la anterior que arrojaba resultados equivalentes. Dichas ecuaciones surgen de despejar S en la ecuación cuadrática (1) del modelo original propuesto por el SCS del USDA (1985). A partir de los valores de S obtenidos de la ecuación (2), se calcularon los CN empleando la ecuación (3)

$$Q = (P - 0,2S)^2 / (P + 0,8S) \quad (\text{Ecuación 1})$$

$$S = 5P + 10Q - 10(Q^2 + 1,25PQ)^{1/2} \quad (\text{Ecuación 2})$$

$$CN = 25400 / (254 + S) \quad (\text{Ecuación 3})$$

donde S: retención potencial máxima (mm); P: lluvia (mm) y Q: escurrimiento superficial (mm).

Análisis estadístico

Se ajustaron modelos de regresión lineal mediante el uso de InfoStat (InfoStat, 2002). En todos los casos, el estimador de tamaño de efecto que se utilizó fue R^2 .

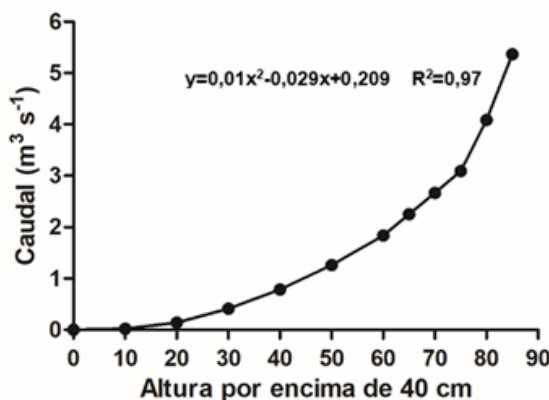


Figura 2. Curva de caudal (q) vs altura de agua registrada por encima del sensor del limnógrafo (h=40 cm).

Figure 2. Flow curve (q) vs water height registered above the water level sensor (h=40 cm).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el periodo analizado (octubre de 2016 - mayo de 2018) se contabilizaron 83 eventos de lluvia que totalizaron 2176 mm. Entre ellos se destacan las precipitaciones del 25/12/2016 (165 mm día⁻¹) y del 16/1/2017 (155 mm día⁻¹) cuyo periodo de retorno es de 10 años. Este dato surge de comparar dichas lluvias con el análisis de una serie de casi 50 años de lluvias diarias correspondientes a la Estación Experimental Agropecuaria INTA San Pedro (1965-2014).

El lapso de tiempo en el cual se registraron lluvias y escurrimientos en este trabajo fue relativamente breve (20 meses continuos). Sin embargo, dada la magnitud extraordinaria de las precipitaciones ocurridas y el hecho de contar con las respuestas hidrológicas respectivas ante esos mismos eventos, torna a los resultados obtenidos como válidos para contrastar las hipótesis planteadas en este trabajo. En línea con lo anterior, al observar la distribución de lluvias por intervalos de intensidad diaria y su volumen correspondiente (Tabla 1), se advierte que el 72 % de ellas fueron mayores a 13 mm día⁻¹. De igual manera, esos eventos acumularon el 92 % de mm totales registrados en el período. Cabe recordar que el límite considerado por Wischmeier y Smith (1978) como lluvias erosivas es de 13 mm, coincidiendo con lo observado por Behrends Kraemer et al. (2018) para el área de San Pedro (Bs. As.).

Respecto a los registros limnográficos, sólo 13 eventos de lluvia provocaron escurrimientos de magnitud mensurable a la salida de la microcuenca (Tabla 2). Los mismos representaron el 15 % del total de las 83 lluvias registradas en el periodo estudiado y correspondieron a 1 evento en primavera, 5 en verano, 6 en otoño y 1 evento en invierno. Las estaciones del año en que se produjeron la mayoría de los escurrimientos (verano y otoño) coinciden con los meses de mayor erosividad de las lluvias para esta región (Behrends Kraemer et al., 2018; Marelli, 2012). Al comparar estas cifras con las registradas durante 6 años en una mi-

crocuencia bajo SD continua, con predominancia de Argiudoles vérticos de San Pedro (Buenos Aires) (2000 al 2005 inclusive) (Chagas et al., 2008), se advierte que la proporción de eventos que generaron exceso de agua fueron similares entre ambas microcuencas, ya que en aquella microcuencia el 14 % de las 463 lluvias registradas también provocó algún grado de escurrimiento.

La estimación del escurrimiento a partir de la lluvia diaria y el análisis de los pares ordenados de precipitación diaria/escurrimiento correspondientes a los 83 eventos de lluvia registrados en Arrecifes permitieron ajustar adecuadamente una relación lineal ($y=0,366x-6,78$ $R^2=0,79$ $n=83$). Al comparar esta ecuación con la que obtuvieron Chagas et al. (2008) para la microcuencia aforada de San Pedro bajo SD ($y=0,488x-4,29$ $R^2=0,7$ $n=463$), se advierte que la microcuencia bajo estudio escurrió a partir de lluvias de mayor valor umbral que la de San Pedro (abscisas al origen de 18,5 mm vs 8,8 mm, respectivamente) y con una pendiente más reducida que esta última (0,366 vs 0,488). Las relaciones halladas explican aproximadamente el 70 % de la variabilidad analizada para ambas microcuencas, sin embargo, no permiten predecir adecuadamente un valor probable de escurrimiento diario para lluvias de alta intensidad diaria. La razón de ello es que ocurren lluvias relativamente intensas sobre suelo seco y/o muy cubierto que en general no provocan escurrimientos y complejizan los valores predictivos de la ecuación para el fin propuesto al ser incluidos en el modelo. Por este motivo se graficaron sólo los eventos que produjeron escurrimientos mensurables (Figura 3). Conforme a este criterio, la ecuación que se obtuvo para la microcuencia bajo estudio en Arrecifes fue $y=0,496x-14,39$ $R^2=0,95$ $n=13$. Al comparar esta ecuación con la que obtuvieron Chagas et al. (2008) para la microcuencia aforada de San Pedro incluyendo sólo las lluvias que provocaron escurrimientos durante el periodo bajo SD (2000-2005) $y=0,653x-12,97$ $R^2=0,76$ $n=64$, se advierte nuevamente una importante diferencia entre ambas. La microcuencia bajo estudio escurrió a partir de lluvias de mayor valor umbral que las de San Pedro (abscisas al origen de 29 mm vs 19,9 mm respectivamente), cuya pendiente fue más reducida que esta última (0,496 vs 0,6529). Estos resultados exponen las mejores condiciones de infiltración del agua en el suelo de la Serie Arroyo Dulce (Argiudol típico) respecto a las de la Serie Ramallo (Argiudol vértico).

Otro aspecto importante para destacar corresponde a la definición de la condición de humedad antecedente. Numerosos autores señalan críticas por la manera en que se define esta importante condición en el manual original del USDA (lluvia acumulada los 5 días previos al evento considerado). Como puede observarse en la Tabla 2, la condición más frecuente en que se encontraba la cuenca previa a la lluvia considerada era una condición I (seca, 7 eventos) y no una condición II (húmeda, 3 eventos). Esto coincide con lo reportado por Chagas et al. (2008) para San Pedro y lo señalado por numerosos autores entre ellos Silveira et al. (1997) en el sentido de definir la condición AMC II como la condición más frecuente en que se producen los escurrimientos y no como la magnitud de lluvias previas. En este sentido, se observa que aquellas lluvias que provocaron mayor escurrimiento absoluto en la microcuencia ocurrieron bajo condición I o intermedias entre I y II. Esta anomalía podría ser corregida parcialmente si se ampliara el periodo utilizado para contabilizar las lluvias previas (por ejemplo 10 días, Chagas et al., 1998), entre otros procedimientos posibles. Sin embargo, para que este ajuste tuviera validez, requeriría contar con una serie más extensa de registros de lluvia y escurrimientos, lo cual excede las posibilidades y el objetivo del presente trabajo.

Tabla 1. Intervalos de intensidad diaria (mm d^{-1}), número de lluvias y volumen total (mm) correspondiente el periodo evaluado (octubre de 2016 a mayo de 2018).

Table 1. Daily intensity intervals (mm d^{-1}), number of rains and total volume (mm) corresponding to the evaluated period (October 2016 to May 2018).

Intervalos de intensidad (mm d^{-1})	Número de lluvias	Volumen total (mm)
Menores a 13	23	167
13-50	52	1332
51-100	6	357
Más de 100	2	320
Total	83	2176

Tabla 2. Eventos de lluvias (mm) que produjeron escurrimientos mensurables (mm) para el periodo comprendido entre el 27/10/2016 y 30/05/2018 que fueron registrados mediante el limnógrafo. CN: número de curva; S: retención máxima (mm); AMC: condición antecedente de humedad: I seca, II intermedia, III húmeda.

Table 2. Rainfall events (mm) that produced measurable runoff (mm) for the period between 10/27/2016 and 05/30/2018 that were recorded by the water gauge (limnigraph). CN: curve number; S: maximum retention (mm); AMC: antecedent moisture condition: I dry, II intermediate, III humid.

Fecha del evento	Lluvia (mm)	Escorrimento (mm)	CN	S (mm)	AMC
25/12/2016	165	72,2	66,3	129,1	I/II
1/1/2017	47	5,4	71,1	102,9	I/II
16/1/2017	155	57,1	63	149,2	I
14/2/2017	45	5,2	72	98	I
9/3/2017	48	5,8	71	103	I
8/4/2017	30	3,6	80	64	I
10/04/2017	86	35,1	77,6	73,5	III
12/5/2017	51	8,1	72,8	94,9	II
20/5/2017	42	9,6	80,4	62	I
9/9/2017	57	6,4	66,6	126	I
1/10/2017	34	11,3	87	36	I
29/4/2018	34	1,3	70,1	108,6	II
10/5/2018	55	12,8	76	80	II

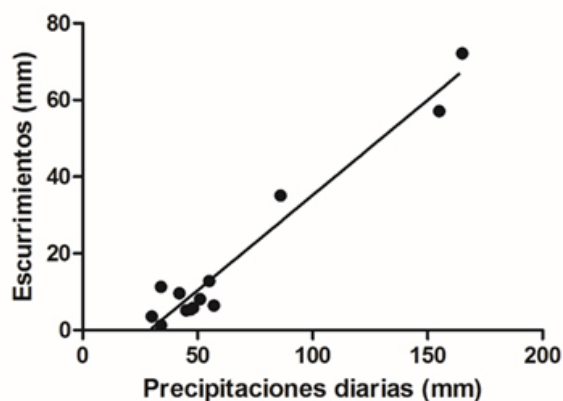


Figura 3. Relación entre los eventos de precipitaciones diarias (mm) y los escurrimientos mensurables (mm) generados en el periodo analizado (octubre de 2016 a mayo de 2018).

Figure 3. Relationship between daily rainfall events (mm) and measurable runoff (mm) generated in the analyzed period (October 2016 to May 2018).

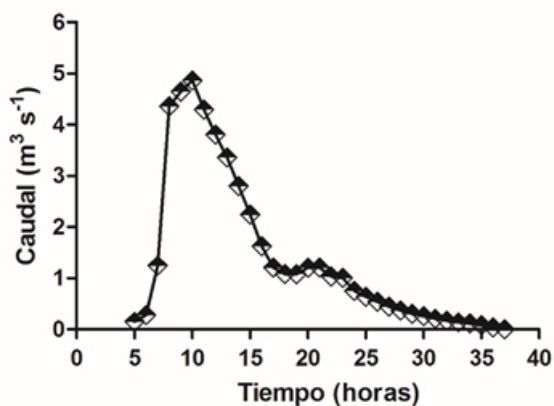


Figura 4. Hidrograma-caudal ($m^3 s^{-1}$) y tiempo (horas)- correspondiente al evento del 25 de diciembre de 2016.

Figure 4. Hydrograph-flow ($m^3 s^{-1}$) and time (hours) - corresponding to the event of December 25, 2016.

Para ejemplificar el tiempo de concentración (TC) de la microcuenca estudiada se presenta el mayor hidrograma obtenido para el periodo analizado (Figura 4). Se advierte una rápida respuesta, lo que evidenciaría un TC no excesivamente prolongado. Este tipo de respuesta rápida resulta similar a la observada en otras microcuencas estudiadas de la Pampa Ondulada (Chagas et al., 2010) y la Pampa serrana (Ares et al., 2012). En un trabajo anterior en el que se estudiaron modelos de predicción del TC para microcuencas de Pampa Ondulada (Castiglioni et al., 1998), se concluyó que uno de los modelos de estimación de TC propuesto por Sheridan para áreas de las planicies costeras (coastal plains) del SE de los Estados Unidos, era el que mejor se ajustaba a las condiciones locales estudiadas, caracterizadas por pendientes largas de escaso gradiente. En tal sentido, puede advertirse que la duración total del presente hidrograma estimada en 35 horas evidencia el importante retardo que sufre el escurrimiento en finalizar su circulación por la cuenca a pesar del rápido incremento inicial del caudal ya mencionado.

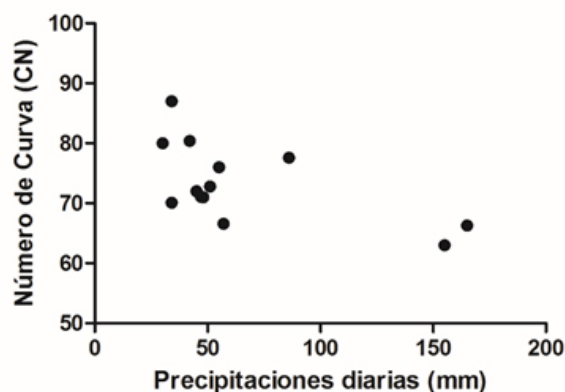


Figura 5. Valores de Número de Curva (CN) para la microcuenca empleando el método citado por Hawkins (1993) para el periodo analizado (octubre de 2016 a mayo de 2018).

Figure 5. Curve Number (CN) values for the micro-basin using the method cited by Hawkins (1993) for the analyzed period (October 2016 to May 2018).

Los valores de CN hallados para esta microcuenca de acuerdo con su comportamiento hidrológico siguen una tendencia hacia un patrón "estándar" conforme al criterio de Hawkins (1993) y Van Mullen et al. (2002). Dicho comportamiento se evidencia en que los CN observados decrecen ligeramente a medida que las precipitaciones se incrementan, manteniendo una tendencia hacia valores de CN de 60 a 70 aún con las lluvias extraordinarias que superaron 150 mm día⁻¹ (Figura 5). Esto significa que la cuenca aporta de manera integral y armónica a la generación de escurrimientos. El comportamiento "complaciente" no corresponde a esta cuenca pues dicho patrón se define cuando los CN se reducen en forma marcada a medida que se consideran lluvias de volumen creciente, y no se aprecia una tendencia a alcanzar un valor estable. Tal como señalan Van Mullen et al. (2002) ese comportamiento indicaría la existencia de una fuente parcial fija de escurrimiento que ocuparía un área relativamente pequeña de la cuenca lo cual no es el caso.

De acuerdo con los autores antes mencionados, los valores de CN a los que tiende una microcuenca con comportamiento estándar permitirían utilizar dicho valor como CN representativo de esa unidad experimental. En tal sentido, los CN de 60-70 resultan intermedios a los observados para el Argiudol vértico de San Pedro de muy lenta permeabilidad (CN=82) (Chagas et al., 2008) y el Argiudol típico de Azul con excelente condición estructural superficial y moderada permeabilidad (CN<60) (Ares et al., 2014).

A fin de corroborar la información obtenida a partir de la tendencia observada en la Figura 5, se realizó un segundo procedimiento de estimación de CN, el cual fue mencionado por Ares et al. (2005) y Chagas et al. (2008). El mismo consistió en ordenar en forma creciente los pares de datos lluvia/escurrimiento (Tabla 2) y calcular con ellos los CN correspondiente a la mediana y los extremos superior e inferior de esa misma serie ordenada de pares de datos. El método permitió estimar un CN para una situación intermedia de AMC (asimilable a AMCII), un CN para altos valores de AMC (asimilable a AMC III) y un CN para bajos valores de AMC (asimilable a AMC I). Los resultados obtenidos fueron 71, 87 y 63, respectivamente. El CN de 71 coincide con lo señalado para el Grupo Hidrológico B (sin barreras físicas subsuperficiales importantes) en los manuales del USDA (1985, 2004) bajo condiciones de buena cobertura vegetal. A su vez la amplitud

observada entre los CN asimilables a AMC I (63) y AMCIII (87), también se vio reflejada en las Tablas de USDA. Estos resultados reafirman la adecuación de los procedimientos seguidos, para poder caracterizar el comportamiento hidrológico de la microcuenca estudiada. Por lo expuesto, queda clara la importancia que posee la condición hídrica previa como condicionante de la respuesta hidrológica de dicha microcuenca ante una lluvia determinada.

CONCLUSIONES

Los resultados del registro y análisis de lluvias y escurrimientos permitieron corroborar ambas hipótesis planteadas a pesar del corto periodo evaluado (20 meses). Pare ello fue fundamental contar con registros correspondientes a lluvias extraordinarias con un periodo de retorno de 10 años.

La respuesta hidrológica de la microcuenca en el periodo estudiado mostró una tendencia a seguir un patrón "estándar", evidenciando un comportamiento armónico de toda su superficie a la generación de escurrimientos. Esto se dedujo al observar que los Números de Curva registrados, disminuían ligeramente conforme al aumento de las precipitaciones, tendiendo a valores entre 60 y 70 aún ante lluvias extraordinarias.

Los Números de Curva obtenidos resultaron coherentes con las características físicas de la Serie de suelos predominante en la microcuenca (Arroyo Dulce), los cuales se consideran favorables para la infiltración del agua en el suelo, al tratarse de una Serie con horizonte argílico profundo y moderadamente textural en comparación con otros Argiudoles de la Pampa Ondulada.

Desde el punto de vista del manejo y la conservación del suelo, se puede afirmar que el método de CN resultó adecuado para determinar la respuesta hidrológica de la microcuenca estudiada. Ello habilitaría su uso como metodología sencilla y confiable para estimar escurrimientos en microcuencas similares a nivel regional bajo siembra directa continua, permitiendo emplearse en modelos hidrológicos, de estimación de erosión hídrica y/o de transporte de contaminantes.

AGRADECIMIENTOS

A la Fundación Stegman, C. Contreras, F. Becerra, M. Mohr (y familia) y M. Sabio por la colaboración permanente. Este trabajo fue financiado parcialmente a través del proyecto UBACYT 20020170100533BA y módulo de Erosión Hídrica PNS 1134022 de INTA.

REFERENCIAS

- Ares, M. G., Varni, M. y Chagas, I. (2014). Erosión hídrica en una microcuenca agrícola bajo siembra directa del centro de la provincia de Buenos Aires. *Ciencia del Suelo*, 32 (2), 259–270.
- Ares, M. G., Varni, M., Chagas, C. L. y Entraigas, I. (2012). Runoff curve number calibration of a 116 km² agricultural basin, Buenos Aires province, Argentina. *Revista Agrociencia*, 46(6), 535-541.
- Ares, M. G., Varni, M., Usunoff, E. y Vives, L. (2005). Cálculo del número de curva en subcuencas del arroyo del Azul, provincia de Buenos Aires. *Cuadernos del Curiham*, 1, 39-47.
- Behrends Kraemer, F., Chagas, C. L., Ibañez, L., Carfagno, P. y Vangeli, S. (2018). Análisis de la erosividad de las lluvias para el Partido de San Pedro (Bs. As.). *Ciencia del Suelo*, 36(1),124-137.
- Castiglioni, M.G., Chagas, C. L., Massobrio, M. J., Santanatoglia, O. J. y Buján, A. (2006). Análisis de los escurrimientos de una microcuenca de Pampa Ondulada bajo diferentes sistemas de labranza. *Ciencia del Suelo*, 24(2), 169-176.
- Castiglioni, M. G., Massobrio, M., Chagas, C. L. y Santanatoglia, O.J. (1998). Predicción de hidrogramas modificando el tiempo de concentración de una microcuenca de Pampa Ondulada, con pendientes menores al 2 %. *Ciencia del Suelo*, 16(2),134-136.
- Chagas, C. I., Behrends Kraemer, F., Santanatoglia, O. J., Paz, M. y Moretton, J. A. (2014). Biological water contamination in some cattle production fields of Argentina subjected to runoff and erosion. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 12(4), 1008-1017.
- Chagas, C. I., Behrends Kraemer, F., Utin, S., Irurtia, C. y Santanatoglia, O. J. (2011). Influencia de las propiedades edáficas y la posición en el paisaje sobre la respuesta hidrológica de suelos pertenecientes a una cuenca de la Pampa Ondulada. *Revista Cuadernos del CURIHAM* 17, 15-24.
- Chagas, C.I., Irurtia, C., Thisted, J., Santanatoglia, O. J., Mássobrio, M. J., Castiglioni, M. G. y Buján, A. (2004). Movimiento horizontal y vertical de agua y partículas en un Argiudol bajo siembra directa. *Ciencia del Suelo*, 22(2), 117-122.
- Chagas, C. I., Santanatoglia, O. J., Castiglioni, M. G., Massobrio, M. J., Buján, A. y Irurtia, C. (2008). Número de Curva de escurrimiento para

- una microcuenca de Pampa Ondulada bajo labranza convencional y siembra directa. *Ciencia del Suelo*, 26(1), 63-69.
- Chagas, C. I., Santanatoglia, O. J., Castiglioni, M. G., Massobrio, M. J., Palacin, E. A., Behrends Kraemer, F. B. y Bujan, A. (2010). *Comparación del escurrimiento de dos microcuencas agrícolas de Pampa Ondulada con diferente energía geomórfica, durante un periodo húmedo*. Primer Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras. Azul (Bs As, Argentina)
- Chagas, C.I., Santanatoglia, O. J., Massobrio, M. J., Castiglioni, M. G. y Buján, A. (1998). Influencia de las lluvias previas, sobre el comportamiento hidrológico de una microcuenca. En R. H. Balbuena, S. H. Benez y D. Jorajuria (Eds.) *Avances en el Manejo del Suelo y el Agua en la Ingeniería Rural*. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata.
- De la Vega, G., Castiglioni, M. G., Massobrio, M. J., Chagas, C. I., Santanatoglia, O. J. y Iruña, C. (2004). Infiltración de un Argiudol vértico bajo siembra directa en condiciones variables de cobertura y humedad inicial. *Ciencia del Suelo*, 22(1), 52-55.
- Hawkins, R. H. (1993). Asymptotic determination of runoff curve numbers from data. *Journal Irrigation and Drainage Engineering*, 119(2), 334-345.
- InfoStat. (2002). P v1.1. InfoStat, v. 1.1. Grupo InfoStat, FCA. Universidad Nacional de Córdoba.
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (1974). *Carta de Suelos de la República Argentina E 1:50.000*.
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (2019). Instituto de Clima y Agua. *Serie de datos climáticos de la Estación Experimental Pergamino*.
- Marelli, H. (2012). *Estimación del potencial erosivo en la Provincia de Córdoba a través de la EUPS*. Publicación INTA Marcos Juárez.
- Mishra, S. K., Singh, V. P. y Singh, P. K. (2018). Revisiting the Soil Conservation Service Curve Number Method. En V. Singh, S. Yadav y R. Yadava (Eds.) *Hydrologic Modeling. Water Science and Technology Library, vol 81*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-10-5801-1_46
- Ongley, E. D. (1997). Lucha Contra la Contaminación Agrícola de los Recursos Hídricos. *Estudio FAO Riego y Drenaje* N° 55
- Peleretegui, M. F., Plaza de Ayala, R. y Chagas, C. I. (2003). Rugosidad y cobertura superficial de un Argiudol Vértico de la Pampa Ondulada (Buenos Aires, Argentina) sometido a lluvias naturales. *Ciencia del Suelo*, 21(1), 30-33.
- Romero, P., Castro, G. y Gómez, J. A. (2007). Curve Number values for olive orchards under different soil management. *Soil Science Society of America Journal*, 71(6), 1758-1769.
- Sainz, D. S. (2020). *Movimiento de sedimentos y de algunos contaminantes químicos asociados al escurrimiento superficial, en suelos agrícolas de una microcuenca perteneciente al Río Arrecifes (Buenos Aires)* [Tesis de Maestría en Ciencias del Suelo] Escuela para Graduados de la Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires.
- Schwab, G., Frevert, R., Edminster, T. y Barnes, K. (1990). *Ingeniería en conservación de suelos y aguas*. Noriega-Limusa.
- Silveira, L., Genta, J. L. y Charbonnier, F. (1997). *Condición de humedad antecedente del suelo en el método de la curva número*. Workshop sobre Química Ambiental y Salud Congreso Internacional sobre Aguas. Workshop sobre Química Ambiental y Salud. Facultad de Derecho y Ciencias Sociales, Universidad de Buenos Aires.
- Soulis, K. X., Valiantzas, J. D., Dercas, N. y Londra, P. A. (2009). Investigation of the direct runoff generation mechanism for the analysis of the SCS-CN method applicability to a partial area experimental watershed. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(5), 605-615.
- Tedela, N. H., Mc Cutcheon, S. C., Rasmussen, T. C., Hawkins, R. H., Swank, W. T., Campbell, J. L., Adams, M. B., Jackson, C. R. y Tollner, E. W. (2012). Runoff Curve Number for 10 small forested watersheds in the mountains of the eastern United States. *Journal of Hydrologic Engineering*, 17, 1188-1198.
- United States Department of Agriculture SCS. (1985). *National Engineering Handbook, Section 4*. U.S. Government. Printing Office.
- United States Department of Agriculture NRCS. (2004). *Estimation of direct runoff from storm rainfall*. National Engineering Handbook Part 630. Hydrology.
- Van Mullem, J. A., Hawkins, R. H., Hjelmfelt, A. T. y Quan, D. D. (2002). *Runoff Curve Number method: Beyond the handbook*. Second Federal Interagency Hydrologic Modelling Conference, Las Vegas.
- Yoo, K. H., Soon, K. S. y Soileau, J. M. (1993). Runoff curve numbers determined by three methods under conventional and conservation tillage. *Transactions of the ASAE* 36(1), 57-63.
- Wischmeier, W. H. y Smith, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning*. U.S.D.A. Agricultural Research Service Handbook 537.