

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE RIO CUARTO**  
**FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA**



Proyecto de Trabajo Final presentado para optar al Grado de Ingeniero  
Agrónomo”

Modalidad: Proyecto

**PÉRDIDA DE SUELO POR EROSIÓN HÍDRICA EN FUNCIÓN DE LA  
INTENSIDAD DE LLUVIA**

Alumna: Hardweig, Laura Etelvina

DNI: 34.969.997

Directora: Ing. Agr. M.Sc. Cholaky, Carmen

Río Cuarto – Córdoba

Diciembre / 2016

UNIVERSIDAD NACIONAL DE RIO CUARTO  
FACULTAD DE AGRONOMIA Y VETERINARIA

CERTIFICADO DE APROBACIÓN

**PERDIDA DE SUELO POR EROSION HIDRICA EN FUNCION DE LA INTENSIDAD DE  
LLUVIA**

Autor: Laura Etelvina Hardweig

DNI: 34.969.997

Director: Ing. Agr. M.Sc. Carmen Cholaky

Aprobado y corregido de acuerdo con las sugerencias de la Comisión Evaluadora:

Ing. Agr. Américo Degioanni \_\_\_\_\_

Lic. en Geología. Jorge González \_\_\_\_\_

Fecha de presentación: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

---

Secretario Académico

## ***Agradecimientos***

*A mis padres Hugo y Sonia, y mis hermanos Marcos y Andrés, por el esfuerzo, comprensión y confianza,*

*A mi hermana Betiana, que desde el cielo me guía,*

*A mi directora, Carmen Cholaky, por su dedicación, colaboración y enseñanzas depositadas en mí,*

*A mis compañeros y amigos, por el estímulo y apoyo incondicional en esta etapa.*

*Y por supuesto a la Facultad de Agronomía y Veterinaria, Universidad Nacional de Río Cuarto, por brindarme la oportunidad de formarme profesionalmente.*

## ÍNDICE GENERAL

<b>Índice general</b>		IV
Índice de tablas		V
Índice de figuras y fotos		.VI
Resumen		VII
Summary		VIII
<b>1-Introducción</b>		1
1.1 Planteo del problema	1	
1.2 Antecedentes	3	
<b>2-Hipotesis y Objetivos</b>		6
<b>3-Materiales y Métodos</b>		7
3.1 Caracterización del área de estudio	7	
3.2 Tratamientos y diseño experimental	9	
3.3 Variables estudiadas	10	
3.4 Análisis estadístico	12	
<b>4-Resultados y Discusión</b>		14
4.1 Lámina total infiltrada	14	
4.2 Velocidad de infiltración final	15	
4.3 Pérdida de suelo	17	
4.4 Lámina escurrida y coeficiente de escurrimiento	20	
<b>5-Conclusión</b>		23
<b>6-Bibliografía</b>		24
<b>7-Anexos</b>		28

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Características morfológicas del suelo desarrollado bajo la Siembra directa (SD), pendiente “Pozo del Carril”	28
Tabla 2.	Propiedades químicas, físico-químicas y físicas del suelo desarrollado en Siembra directa (SD), pendiente “Pozo del Carril”	29
Tabla 3.	Efecto de la intensidad de lluvia, de la lámina total precipitada y de la energía de la precipitación, sobre la lámina total infiltrada media y la profundidad de mojado	14
Tabla 4.	Efecto de la intensidad de lluvia y el contenido de humedad antecedente, sobre la velocidad de infiltración final	16
Tabla 5.	Efecto de la intensidad de lluvia sobre la pérdida de suelo e Índice de erosión	18
Tabla 6.	Coefficiente de Correlación de Pearson	19
Tabla 7.	Análisis de regresión simple	20
Tabla 8.	Efecto de la intensidad de lluvia sobre la lámina escurrida total y el coeficiente de escurrimiento	21

## INDICE DE FIGURAS Y FOTOS

### Figuras

Figura 1.	Esquema de ubicación del sitio Experimental	7
Figura 2.	Imagen satelital, que muestra la Ciudad de Río Cuarto y el campo experimental “Pozo del Carril”	8
Figura 3.	Imagen satelital, que muestra el ensayo de rotaciones y labranzas en el campo experimental “Pozo del Carril”	10
Figura 4.	Esquema básico del microsimulador de lluvias	11

### Fotos

Foto 1.	Vista del lote donde se realizó el presente trabajo	30
Foto 2.	Vista de la superficie del suelo al finalizar la simulación de precipitación de intensidad de 20 mm/h	30
Foto 3.	Vista de la superficie del suelo al finalizar la simulación de precipitación de intensidad de 40 mm/h	31
Foto 4.	Vista de la superficie del suelo al finalizar la simulación de precipitación de intensidad de 60 mm/h	31
Foto 5.	Lámina colectada producto de escurrimiento en tratamiento de 60 mm/h	32
Foto 6.	Vista de la superficie del suelo al finalizar la simulación de precipitación de intensidad de 100 mm/h	32
Foto 7.	Lámina colectada producto de escurrimiento en tratamiento de 100 mm/h	33

## RESUMEN

El presente trabajo se realizó en el campo de Docencia y Experimentación de la Universidad Nacional de Río Cuarto, “Pozo del Carril” ubicado en cercanías del paraje La Aguada (32° 58' 02,89’’S y 64° 36' 12,42’’O, a 638 msnm.), Departamento Río Cuarto, Provincia de Córdoba, y tuvo como objetivo general evaluar el impacto de la intensidad de lluvia sobre la infiltración, escurrimiento y pérdida de suelo por erosión hídrica, en un Hapludol típico manejado bajo siembra directa continua por más de 20 años. Los objetivos específicos planteados fueron, simular la intensidad de lluvia mediante un micro simulador de lluvia y relacionar la intensidad de lluvia simulada con la velocidad final de infiltración, lámina escurrida y pérdida de suelo. El estudio se llevó a cabo sobre un rastrojo de soja que cubría el suelo en un 60 %, utilizando un diseño completamente aleatorizado, donde los tratamientos estuvieron constituidos por un solo factor: intensidad de lluvia (mm/h), con cuatro niveles: 20 mm/h, 40mm/h, 60mm/h, y 100mm/h, con 4 repeticiones por tratamiento. Los resultados indicaron que en lluvias de alta intensidad (60 mm/h), escurre el 28 % de la lámina aplicada y se pierde 0,31 t/ha de suelo, y en lluvias de muy alta intensidad (100 mm/h), escurre el 57 % y la pérdida de suelo es de 0,62 t/ha., mientras que en lluvias de baja y media intensidad (20 y 40 mm/h respectivamente) no se observa escurrimiento ni pérdidas de suelo. A partir de estos resultados se concluye que precipitaciones de intensidad igual o mayor a 60 mm/h contribuyen a aumentar las pérdidas de agua por escurrimiento y las pérdidas de suelo por erosión hídrica.

Palabras claves: erosión hídrica, escurrimiento, pérdida de suelo, intensidad de lluvia, simulador de lluvia.

## SUMMARY

### SOIL LOSS DUE TO HYDRIC EROSION IN RELATION TO RAINING INTENSITY

The present study was carried out in the Teaching and Experimentation field of Rio Cuarto National University, called "Pozo del Carril" which is situated near paraje La Aguada ( $32^{\circ} 58' 02,89''$ S y  $64^{\circ} 36' 12,42''$ O, a 638 msnm.), in Rio Cuarto Department, in the province of Cordoba. The main objective was to evaluate the impact of raining intensity over infiltration, draining and soil loss due to hydric erosion, in a typical Hapludol under a continuous direct sowing for more than 20 years. The specific objectives were to simulate the raining intensity through a rainfall simulator and relate the raining intensity with the final speed of infiltration, draining laminae and soil loss. The study was carried out on a soya stubble that covered the soil in a 60 %, using a completely aleatory design, where the treatments were constituted by a single factor: raining intensity (mm/h), with four levels: 20 mm/h, 40 mm/h, 60 mm/h y 100 mm/h, with four replicates per treatments. The results indicate that in high intensity rains (60 mm/h) the 28%, of the applied laminae drains and the 0,31 t/ha of soil is lost, and during very high intensity rains (100 mm/h), the 57% of the laminae drains and the 0,62 t/ha of soil is lost. However in low and medium intensity rains (20 and 40 mm/h respectively) there is neither draining nor soil loss. From these results, it is concluded that precipitations of equal or greater intensity of 60 mm/h contribute to increase the loss of water through draining and the soil loss through hydric erosion

Keywords: hydric erosion, draining, soil loss, raining intensity, rainfall simulator.

## 1-INTRODUCCION

### 1.1 Planteo del problema

La pérdida de suelo por erosión hídrica supone en la actualidad un grave problema medioambiental a nivel global. (Dumas Salazar, 2012).

Durante el presente siglo y lo que fue el siglo XX, la erosión ha avanzado de manera preocupante, afectando la sustentabilidad de las actividades agrícolas y especialmente al suelo, que ve modificado su textura, fertilidad y los coloides (Gómez, 2013).

De manera simultánea a los perjuicios sobre los cultivos agrícolas (perjuicios ambientales), afecta las actividades socioeconómicas en su conjunto debido a inundaciones, torrentes, contaminación de aguas o acumulación de sedimentos en ríos o represas (Kugler, 1983).

En la República Argentina el 37,5 % del territorio se encuentra afectado por erosión hídrica y eólica lo cual representa 105 millones de hectáreas en total, presentando un incremento de un 82 % de tierras sujetas a estos procesos respecto a 1990. La erosión hídrica es la que más creció en este cuarto de siglo, con un incremento de 34,6 millones de hectáreas, en grados ligeros y moderados, (Casas, 2015 a).

En la provincia de Córdoba, las áreas agrícolas con un grado significativo de erosión hídrica abarcan una superficie de 3,2 millones de hectáreas, lo que representa un incremento de 1,2 millones de hectáreas (61%) respecto a lo estimado por Marelli (1996). En términos relativos a la evaluación de Marelli (1996), la erosión leve habría disminuido un 76 %, mientras que los grados moderados y severos se habrían incrementado entre 137 y 248 %, respectivamente en dicho período (Cisneros *et. al.*, 2015).

El suelo es uno de los ecosistemas más complejos y diversos que existe en la naturaleza. (Zerbino y Altier, 2006). Su intenso uso bajo sistemas agrícolas, la ausencia de rotaciones con cultivos que hagan aportes voluminosos de materia orgánica y el excesivo laboreo para la preparación de la cama de siembra, son factores que determinan el aumento de las pérdidas de suelo por erosión y/o degradación de sus propiedades físico-químicas (Casas, 2005).

La región central Argentina se caracteriza por presentar condiciones de relieve, suelos y clima que predisponen a la degradación de los suelos por erosión hídrica y eólica. Los materiales originarios de los suelos se caracterizan por presentar baja estabilidad, asociados a pendientes fuertes y climas de alta erosividad que definen fenómenos graves de erosión.

La erosión hídrica es el proceso por el cual se produce el desprendimiento, transporte, y deposición de las partículas del suelo por acción de la energía cinética de la gota de lluvia y de la gravedad. De acuerdo al grado, la misma puede ser laminar, la cual suele ser más difícil de detectar; en surcos, cuando forma pequeños cauces; y en cárcavas o barrancas, cuando los cauces se unen arrastrando importantes proporciones de suelo Cisneros *et al.* (2012). La importancia relativa de este

proceso se relaciona a un gran número de factores, principalmente la intensidad de la lluvia y la energía cinética, la tasa de infiltración y el escurrimiento, las propiedades intrínsecas del suelo y las condiciones superficiales tales como humedad del suelo, rugosidad, cobertura, gradiente y largo de la pendiente, (Assouline y Ben-Hur, 2006).

En la próxima década debemos producir alimentos en 10 millones de hectáreas adicionales para poder abastecer a la población creciente. Teniendo en cuenta que las tierras fértiles están todas cultivadas, se debe avanzar sobre áreas con mayores riesgos de degradación (Taboada, 2013).

En vastas regiones de la Argentina se viene observando con preocupación una reactivación de los procesos de erosión del suelo producto principalmente de los cambios producidos en el uso del suelo, simplificación o falta de rotaciones y el sobrepastoreo en regiones secas. En la región pampeana húmeda y subhúmeda, el abandono de la rotación de cultivos ha generado consecuencias negativas en el incremento de la erosión de los suelos, el balance de la materia orgánica, la fertilidad y la eficiencia hídrica (Casas, 2015 b).

Uno de los mayores problemas de los suelos dedicados a la producción intensiva de cultivos agrícolas, es que pierden su estructura y forman costras superficiales debido a que los agregados pierden su estabilidad (Silva et al., 2000).

En la provincia de Córdoba, y particularmente en el suroeste de la misma los cambios en la tenencia de la tierra con la disminución del tamaño de los predios provocaron modificaciones de gran importancia en el uso y manejo del suelo. La intensificación del uso agrícola en suelos con una alta fragilidad natural (Cantú *et al.*, 1998) provocó una disminución del contenido de carbono orgánico, aumento de la densidad aparente y la consecuente disminución de la porosidad (Bricchi, 1996 a). La porosidad estructural del suelo es dinámica y está afectada por factores exógenos como el clima a través de los ciclos de humedecimiento-secado y/o congelamiento-descongelamiento, los sistemas de cultivos a través de sus efectos sobre el sistema radical, y por el manejo del suelo a través de la labranza, manejo de los residuos y tránsito agrícola (Taboada, 2008).

La región presenta un régimen climático con tendencia al incremento de las precipitaciones y una intensidad y erosividad de las mismas en primavera-verano que provoca un incremento de los volúmenes de escurrimiento y constituye un alto riesgo de erosión que favorece la degradación de los suelos por erosión hídrica (Cantú, y Becker, 1999).

La siembra directa apareció como respuesta técnica al problema de degradación de los suelos labrados y erosionados de la región pampeana (Sasal, 2013), ya que produce un mejoramiento de las propiedades físicas e hídricas del suelo, a través de la acumulación de materia orgánica y del mantenimiento de una estructura estable al impacto de las gotas de lluvia y de su porosidad. A esto hay sumarle el efecto protector de los rastrojos de los cultivos en superficie, los cuales evitan el impacto directo de las gotas de lluvia sobre la superficie del suelo, evitando la destrucción de los agregados y la formación de “sellos o costras”. De esta forma se garantiza una alta infiltración del agua y el almacenamiento en el perfil (Michelena e Irurtia, 2011). Sin embargo Marelli (2001),

sostiene que la eficiencia en el control de la erosión hídrica del sistema de siembra directa ocurrirá siempre y cuando se obtengan coberturas superficiales adecuadas, ya que de lo contrario las pérdidas de suelo sufridas serán similares a las registradas bajo sistemas de labranza convencional. En el mismo sentido Álvarez (2015), relata que aún quedan tareas pendientes por realizar, ya que hay prácticas agronómicas que no se llevan a cabo de manera correcta y que siguen afectando al ambiente: “Deberíamos hacer cultivos que dejen más residuos (como el maíz) y doble cultivos (trigo/soja), porque el monocultivo de soja deja muy poco residuos en el suelo que lo protejan de la erosión”, sostiene Álvarez.

Por medio del presente trabajo se planteó contribuir en el conocimiento sobre las pérdidas de suelo y agua por erosión hídrica considerando diferentes intensidades de lluvias probables de ocurrir en la región, en una rotación históricamente agrícola bajo siembra directa, en suelos representativos de la llanura fuertemente ondulada del centro-sur de la provincia de Córdoba, Argentina.

## 1.2 Antecedentes

Numerosos investigadores han evaluado pérdidas de suelo y agua bajo diferentes condiciones:

Chagas (1995) mediante un simulador de lluvias, evaluó el efecto de la rugosidad superficial, el tamaño de agregados y la estabilidad estructural sobre la erosión laminar bajo dos condiciones de degradación estructural de un Argiudol típico en Marcos Juárez: degradado (agricultura continua durante 15 años) y no degradado (rotación agrícola-ganadera con dos ciclos de pastura de 5 años de duración) y dos condiciones de rugosidad superficial: lisa y rugosa. Los resultados indicaron que la presencia de agregados grandes en superficie (cama rugosa) disminuyó en un 70% y 68% el escurrimiento superficial y la erosión, respectivamente, en comparación con la superficie lisa, mientras que la estabilidad estructural no tuvo un efecto muy sobresaliente ya que una diferencia de 63% en el nivel de degradación de los suelos, sólo redujo un 25% el volumen de escurrimiento y no afectó la pérdida total de suelo.

Aoki y Sereno (2006), estudiaron el proceso de velocidad de infiltración en un Haplustol típico franco limoso de Córdoba mediante la utilización de un microsimulador de lluvia, en dos condiciones de uso: monocultivo de soja en labranza convencional y bosque nativo, simulando diferentes intensidades de lluvia. Observaron que en la situación con monocultivo de soja el comportamiento de la velocidad de infiltración para intensidades inferiores a 60 mm/h puede dividirse en tres segmentos diferenciados en el tiempo: una primera etapa donde la velocidad de infiltración permanece constante, una segunda etapa donde los valores caen rápidamente y una tercera etapa de estabilización final de las medidas. Observaron además que la primera etapa se prolongaba en el tiempo a medida que la intensidad de la lluvia simulada descendía. Estos autores sostienen que la formación de sello superficial tiene un impacto marcado sobre la velocidad de infiltración inicial (primer etapa del

proceso), la cual es de gran importancia en la recarga de agua en el perfil antes de que se inicie el escurrimiento.

En la situación de bosque nativo, con intensidades de lluvia iguales o inferiores a 130 mm/h, con bajo contenido de humedad, estos autores no observaron este comportamiento en la dinámica de la infiltración en el lapso de 1 hora de ensayo, permaneciendo constante la magnitud de la velocidad de infiltración, con valores en el orden de la intensidad de lluvia aplicada. En esta situación solo se observó la etapa de descenso de la velocidad de infiltración cuando los valores de intensidad impuestos fueron superiores a 130 mm/h.

De acuerdo a estos autores, estas diferencias observadas en las situaciones de uso y entre el efecto de las diferentes intensidades de precipitación simuladas, indican la existencia de un valor crítico de energía de lluvia acumulada, con el cual se produce un cambio físico-químico de los agregados del suelo, asociado al contenido de materia orgánica y a la estabilidad de la estructura frente al impacto de la gota de lluvia, así como a la densidad y porosidad total de la capa superficial

Becker (2006), realizó la medición directa y sistemática bajo precipitación natural por evento de la pérdida de suelo y escurrimiento por erosión hídrica laminar, en la pendiente Pozo del Carril, perteneciente a el campo de Docencia y Experimentación de la Universidad Nacional de Río Cuarto, "Pozo del Carril" en cercanías del paraje La Aguada, provincia de Córdoba durante cuatro ciclos (1999-2000, 2000-2001; 2001-2002; 2002-2003), considerando las siguientes variables: tipo de labranza ( siembra directa, labranza reducida y labranza convencional), fertilización ( fertilizado y no fertilizado), y pastoreo del rastrojo (pastoreado y no pastoreado) y sus combinaciones. Los eventos analizados considerados potencialmente erosivos presentaron una duración muy variable alcanzando hasta 82 horas y las intensidades máximas registraron valores entre 15,2 mm/h y 98,4 mm/h. A partir de esto concluyó que las pérdidas de suelo y los escurrimientos fueron mayores en eventos de alto volumen, duración e intensidad con baja cobertura vegetal y en tratamientos con alta susceptibilidad a la formación de sello, mientras que las pérdidas de suelo y los escurrimientos fueron bajos en eventos de alto volumen, duración intermedia y baja intensidad máxima, independiente de la cobertura vegetal y especialmente en condiciones de baja humedad antecedente. También pudo observar a campo que en tormentas con volúmenes inferiores a 15 milímetros los colectores no captaron lámina de agua ni de sedimentos.

De La Vega et al. (2004), evaluaron el efecto de la cobertura superficial sobre la dinámica de la infiltración en un Argiudol típico de la Serie Ramallo, provincia de Buenos Aires, manejado en siembra directa continúa utilizando dos tratamientos: uno con cobertura superficial y otro sin cobertura superficial y encontraron diferencias ampliamente significativas a favor del tratamiento con cobertura en variables como, duración de la etapa de infiltración inicial, tasa final de infiltración, coeficiente de escurrimiento, y pérdidas de suelo medias.

Michelena e Irurtia (2011), estudiaron el efecto de la siembra directa sobre la erosión de los suelos, través del uso de un simulador de lluvia aplicando una lluvia de 60 mm/hora sobre suelos con

rastrojos de trigo en Ramírez (Entre Ríos) y Arequito (Santa Fe) y con rastrojo de maíz en Bengolea (Córdoba), con texturas franco arcillosa, franco limosa y areno franca y observaron que la siembra directa controla la erosión hídrica en tierras con relieve ondulado, ya que el mejoramiento de las propiedades físicas e hídricas del suelo producido por la siembra directa permite que la mayor parte del agua de lluvia infiltre y esté disponible para los cultivos, disminuyendo sensiblemente la pérdida de agua por escurrimiento superficial y la erosión.

En referencia a lo antes planteado, Merrill *et al.* (2002) encontraron que el riesgo de erosión disminuye marcadamente a partir de un 40% de cobertura superficial, reduciendo principalmente la capacidad de los agentes erosivos (i.e. energía cinética de la lluvia y velocidad de escurrimiento superficial) de generar el desprendimiento de las partículas del horizonte superficial y de transportarlas en el agua de escurrimiento.

Ohanian (2014), en el mismo sitio en el que se llevó a cabo el presente trabajo, simulando precipitaciones de alta intensidad 100 mm/h, evaluó el efecto de la rotación (agrícola y agrícola-ganadera) y la cobertura (0 y 100%) sobre las pérdidas de suelo, nutrientes y agua por erosión hídrica.

Bermúdez *et al.* (2016) en la Provincia de Salta, evaluaron como varía la tasa de escorrentía y de erosión de suelos en respuesta a la ocurrencia de incendios forestales, a una intensidad de lluvia simulada, a la pendiente y a la humedad del suelo.

Cisneros *et al.* (2004) mediante el modelo RUSLE-2, evaluaron la incidencia en los cambios en el uso de los suelos y la tecnología de producción agrícola en el periodo 1986-1999 sobre la erosión hídrica en las cuencas del sur de Río Cuarto, y concluyeron que la tendencia hacia la especialización y cambio en el uso del suelo, con predominio de cultivos oleaginosos podría poner en riesgo la capacidad productiva del recurso suelo.

Marelli (2003), a través de la "USLE/RUSLE" evaluó el potencial erosivo en la provincia de Córdoba en la zona donde se realizó el presente trabajo (planicie periserrana proximal). Las pérdidas de suelo promedio de los tratamientos "Suelo Desnudo", "Maíz-Soja" y "Pasturas base alfalfa" fueron 95.3 tn.ha-1.año-1, 12.4 tn.ha-1.año-1 y 1.9 tn.ha-1.año-1 respectivamente.

## **2-HIPOTESIS Y OBJETIVOS**

### 2.1 Hipótesis

- Lluvias de alta intensidad incrementan la pérdida de suelo por erosión hídrica en una rotación agrícola manejada bajo siembra directa continua durante 20 años.

### 2.2 Objetivos:

General:

- Evaluar el impacto de la intensidad de lluvia sobre la infiltración, escurrimiento y pérdida de suelo por erosión hídrica en una rotación agrícola con un manejo en siembra directa continua.

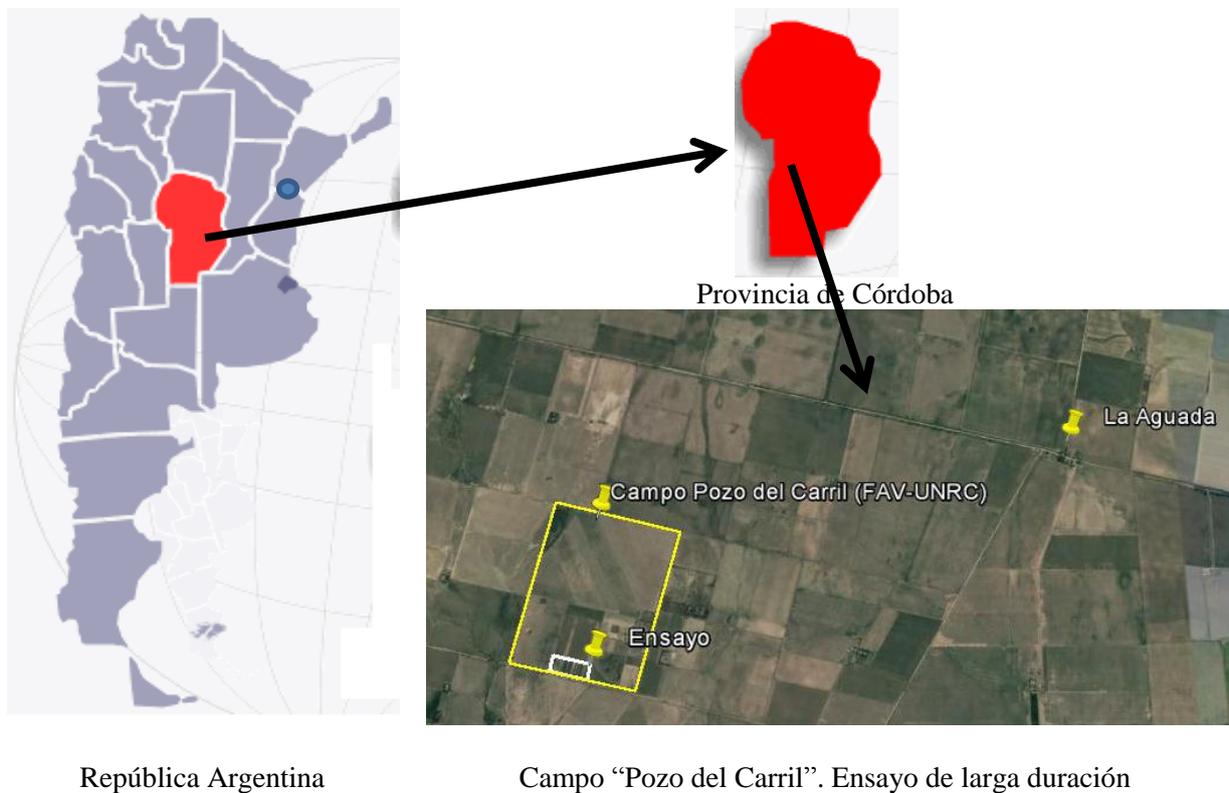
Específicos:

- Simular la intensidad de la lluvia mediante un microsimulador de campo.
- Relacionar la intensidad de la lluvia simulada con la velocidad final de infiltración, lámina escurrida y pérdida de suelo.

### 3-MATERIALES Y METODOS

#### 3.1 Caracterización del área de estudio

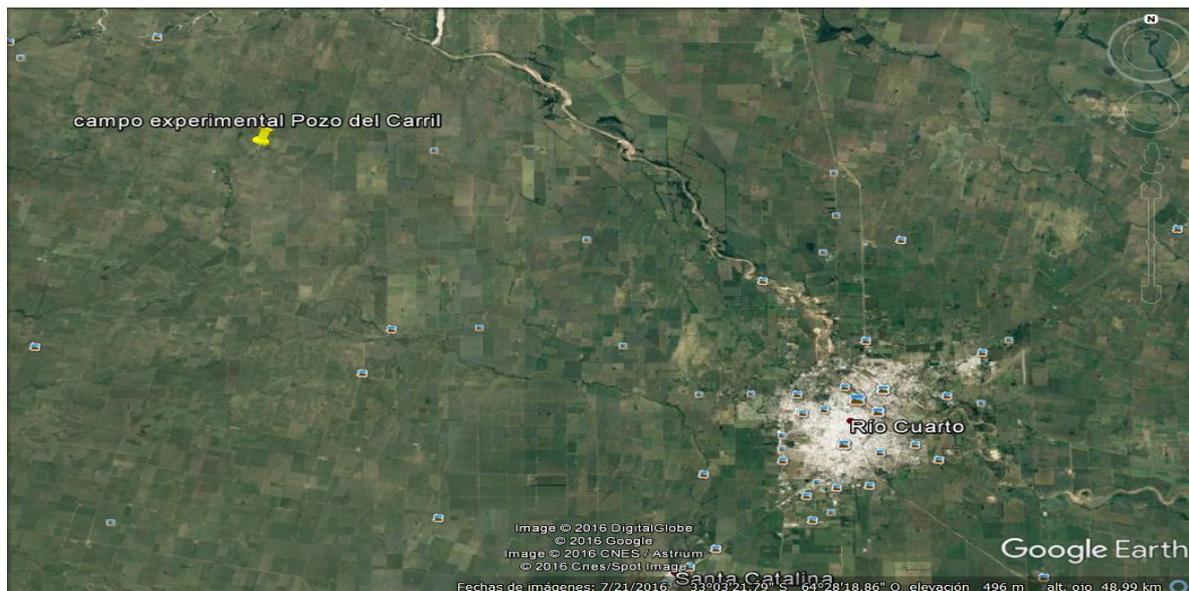
El proyecto se realizó en el campo de Docencia y Experimentación de la Universidad Nacional de Río Cuarto, “Pozo del Carril” en cercanías del paraje La Aguada ( $32^{\circ} 58' 02,89''S$  y  $64^{\circ} 36' 12,42''O$ , a 638 msnm.)(figura 1), Departamento Río Cuarto, Provincia de Córdoba, Argentina (figura 1).



**Figura 1. Esquema de ubicación del sitio Experimental**

Se identifica la provincia de Córdoba, el campo Experimental “Pozo del Carril” y el ensayo de larga duración.

Geomorfológicamente, el área se caracteriza por presentar un relieve muy complejo de moderado a fuertemente ondulado constituido por sedimentos loésicos areno-limosos muy finos del Holoceno Medio a Alto, dispuestos en forma mantiforme sobre los que se desarrollan Hapludoles de baja evolución (Cantú, 1998).



**Figura 2. Imagen satelital, que muestra la Ciudad de Río Cuarto y el campo experimental “Pozo del Carril”.** Fuente: Google earth.

Los suelos presentan un horizonte superficial de escaso espesor y una importante erosión antecedente. Además se caracterizan por presentar una elevada proporción de arena muy fina lo que le confiere una alta susceptibilidad natural a los procesos de erosión hídrica (Becker, 2006).

El suelo del sitio experimental es un Hapludol típico franco arenoso muy fino, con permeabilidad moderada y bien drenado.

Las características morfológicas y analíticas fueron descritas por Becker (2006) y se presentan en la tabla 1 y 2 presentes en el anexo.

El área presenta un clima templado húmedo, con un régimen de precipitación de tipo monzónico, con una media anual que alcanza los 900 mm y un pequeño déficit hídrico e importantes excesos hídricos. Las precipitaciones presentan una fuerte concentración en primavera- verano (81%), con una gran variación temporal y espacial y una marcada estación seca en invierno. La actualización de los datos climatológicos indica la continuidad de una tendencia al aumento de las precipitaciones en las últimas décadas.

El régimen de temperatura es de tipo mesotermal con una temperatura media anual de 16,5 °C de acuerdo a la Estación Agrometeorológica de la UNRC (Serie 1976 – 1995). La temperatura máxima media es de 22,9 °C en el mes de enero y la temperatura mínima media de 9,1 °C en el mes de julio, Becker, (2006).

De julio a noviembre predominan los vientos de dirección NE-SO, en menor frecuencia del S-N y del SO-NE; de diciembre a junio, el predominio es de N-S, en menor medida del NE-SO, S-N y del

SO-NE. Las mayores velocidades se registran en los meses de julio a noviembre con valores medios de 18-22 km.h-1. La frecuencia de granizo es de 1 en 5 a 10 años, (Seiler *et al.*, 1989).

Las problemáticas ambientales de las tierras del área se asocian a procesos de erosión hídrica grave y muy grave con presencia de cárcavas de variada magnitud, con suelos muy desagregados superficialmente, con elevada susceptibilidad a la formación de densificaciones y en algunos sectores localizados existe la presencia de calcáreo cercano a la superficie, debido a la interacción del relieve ondulado, precipitaciones de alta intensidad, suelos con predominio de materiales muy finos y sistemas de producción agrícola-ganaderos, basados en una larga historia de laboreo permanente, (Cantero, *et al.*, 1998).

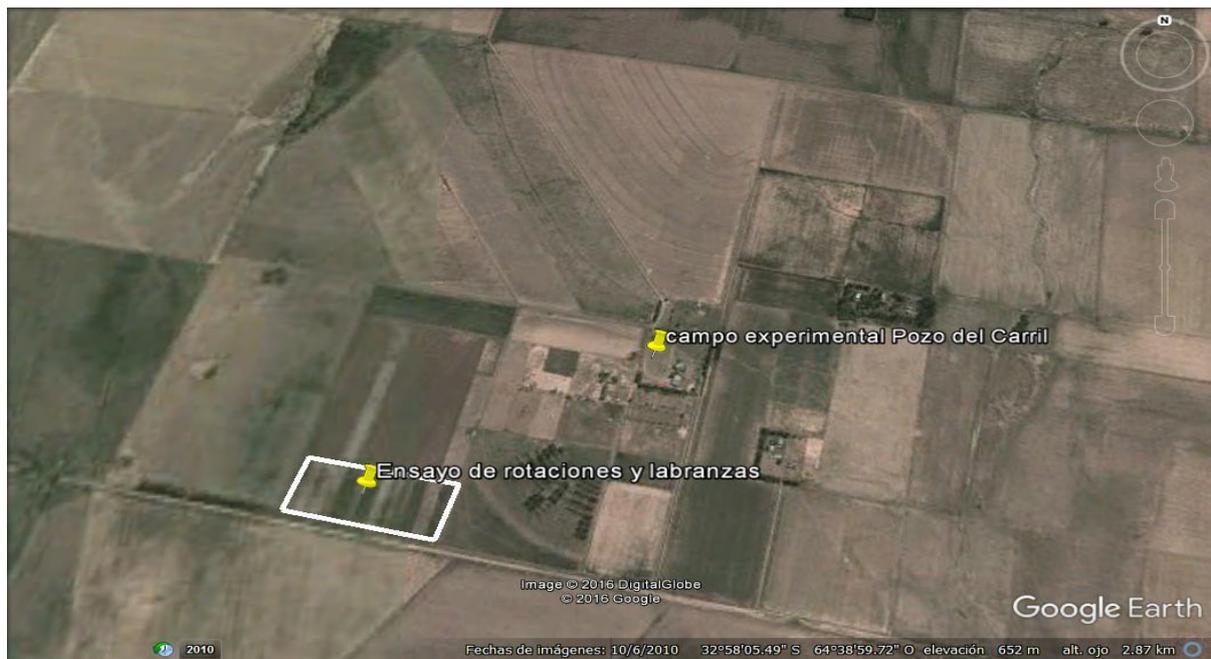
Dadas estas características del área, la aptitud de uso de sus tierras está condicionada al ordenamiento hidrológico de las cuencas, a la consolidación de la red de drenaje y al manejo de las condiciones físicas de los suelos para aumentar la captación e infiltración de agua. (Cantero, *et al.*, 1986).

La vegetación natural pertenecía al Espinal (bosque de leñosas y pastizales) (Cabrera, 1976) del que sólo quedan vestigios. La actividad principal fue históricamente agrícola-ganadera y a partir del año 2000 se produjo una profundización de la agriculturización en desmedro de la ganadería. En este contexto, se incrementó la utilización de la siembra directa (SD) con respecto al resto de los sistemas de labranza, (Cantú *et al.*, 2007). El uso actual de la tierra es predominantemente agrícola extensivo con predominio de cultivos estivales, (Becker *et al.*, 2008).

### 3.2 Descripción de los tratamientos y diseño experimental

El trabajo se realizó en el ensayo de rotaciones y labranzas (figura 3) implementado desde 1994 hasta la fecha, sobre una situación bajo rotación agrícola pura en base a maíz-soja, manejada con siembra directa continua desde 1994, el cual se ubica en el relieve en la posición de media loma, y al momento de realizar el ensayo contaba con un rastrojo de soja con 60 % de cobertura compuesta por rastrojo de soja y restos de rastrojo de maíz que perduran del año anterior (foto1). Este ensayo

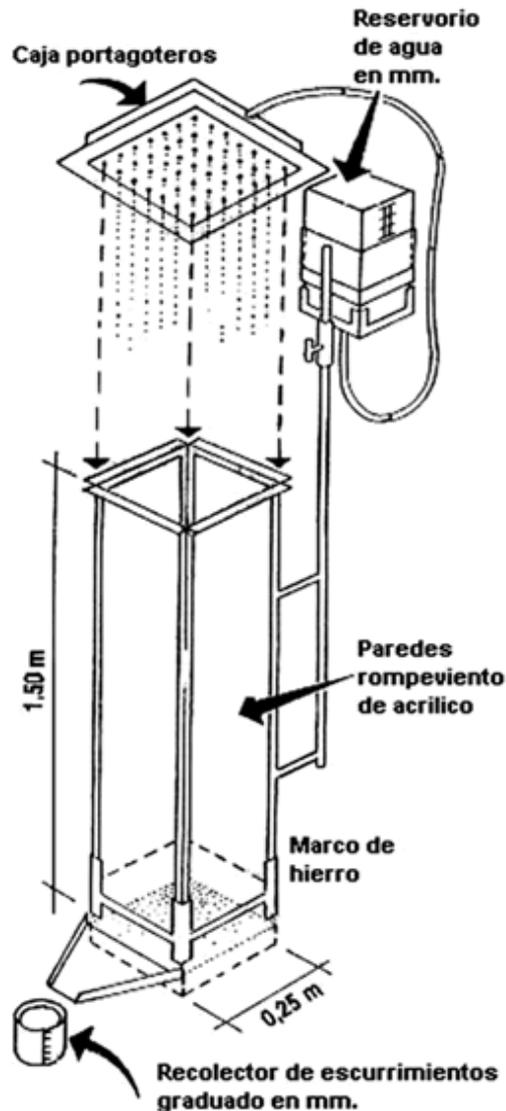
El diseño experimental llevado a cabo fue un diseño completamente aleatorizado, donde los tratamientos estuvieron constituidos por un factor: intensidad de lluvia (mm/h), con cuatro niveles: 20 mm/h, 40mm/h, 60mm/h, y 100mm/h.



**Figura 3. Imagen satelital, que muestra el ensayo de rotaciones y labranzas en el campo experimental “Pozo del Carril”. Fuente: Google earth.**

### 3.3 Variables estudiadas

Mediante un microsimulador de lluvias (Iruetia y Luque, 2005), se simularon precipitaciones de intensidad correspondiente a los 4 niveles antes mencionados sobre parcelas de  $0,25 \text{ m}^2$ . que duraron en promedio, una hora y media. En la figura 4 se muestra el esquema del simulador de lluvia, diseñado por Iruetia y Luque (1994), similar al utilizado en el presente estudio.



**Figura 4: Esquema básico del microsimulador de lluvias (Iruetia y Luque, 1994)**

A intervalos regulares de aproximadamente cinco minutos durante el lapso de simulación se registró la lámina llovida y se tomó lectura y recogió la lámina escurrida junto a los sedimentos erodados del recipiente colector.

A partir de la información recabada se determinaron las siguientes variables:

-Lámina total precipitada: es la cantidad total de agua precipitada en la hora y media de simulación.

-Lámina de agua infiltrada: se obtuvo a partir de la diferencia entre la precipitación total producida y la lámina de agua escurrida. Se expresó en milímetros.

-Velocidad de infiltración: se obtuvo del promedio de las tres últimas velocidades parciales de infiltración, cercanas a la hora y media de simulación y se expresó en milímetros por hora (mm.h-1). La velocidad parcial de infiltración se logró partir de la relación entre la lámina parcial de agua infiltrada y el tiempo parcial de simulación. También se expresó en (mm.h-1).

- Lámina de agua escurrida: se obtuvo a través de la sumatoria de las láminas parciales de escurrimiento (mm) a lo largo de toda la duración de la simulación. Se expresó en milímetros (mm).

- Pérdida de suelo por erosión hídrica: el agua de escurrimiento junto con el material erodado fue colocado en botellas de plástico (foto 5 y7) y llevado a laboratorio. Aquí se dejaron decantar alrededor de 2 días. Una vez sucedido esto se desechó la mayor cantidad de agua posible y se llevó a estufa a 105 °C para su secado hasta peso constante para determinar el peso de los sedimentos transportados por el agua de escurrimiento. La pérdida de suelo fue expresada en tn.ha-1.

- Coeficiente de escurrimiento, se estimó a partir de la relación entre los milímetros totales escurridos y los llovidos. Se expresó en coeficiente. La relación es la siguiente, (Cisneros *et al.*, 2012):

$$C = (\text{mm escurridos/mm llovidos}) * 100$$

-Humedad edáfica antecedente: se efectuó la extracción de muestras de suelo y posteriormente se llevaron a estufa 105°C hasta obtener peso constante.

-Profundidad de humedecimiento de la lámina infiltrada: en el perfil de suelo donde fue realizada cada simulación de lluvia se realizó una calicata, donde se midió la profundidad de humedecimiento (cm) de la lámina de agua infiltrada (mm). Esta variable se expresó en centímetros (cm);

-Cobertura superficial: mediante el método de la transecta (Laflen *et al.*, 1981), se llevaron a cabo las mediciones de cobertura superficial sobre los restos del cultivo de soja implantado en 2013. De los datos recabados se efectuó un promedio de cobertura superficial.

-Energía de precipitación: fue calculada tomando en cuenta la constante del aparato (13 kj/m<sup>2</sup>.m), Iruetia y Luque, (2005).por ejemplo:

$$\begin{aligned} \text{Si en 1000 mm de lluvia} & \dots\dots\dots 13\text{kJ/m}^2 \\ \text{en 20 mm} & \dots\dots\dots X = 0,26 \text{ kJ/m}^2 \end{aligned}$$

- Índice de erosión: relaciona la masa removida de suelo con la energía que descargan las gotas de lluvia al impactar contra el suelo, Iruetia y Luque, (2005). Se expresó en gramos de suelo removido por kilojoule de energía aplicada. Se calculó mediante la siguiente formula:

$$\text{IE (g/Kj): } \frac{\text{gr (sedimento)}}{\text{mm lluvia}} * 4 * 0,013$$

### 3.4 Análisis estadístico

Los datos fueron analizados mediante el programa estadístico Infostat (Di Rienzo *et al.*, 2011), con el cual se realizaron ANOVAS, comparaciones de medias a través del test DGC con un nivel de significancia del 5 %, y para el caso de energía de precipitación versus pérdida de suelo y lámina escurrida versus pérdida de suelo se realizó tanto el análisis de correlación que fue valorado a través

del coeficiente de correlación de Pearson, con un nivel de significancia del 5 %, como el análisis de regresión lineal simple.

## 4-RESULTADOS Y DISCUSION

### 4.1 Lámina total infiltrada

El análisis estadístico de los resultados indicó que hubo efecto de la intensidad de lluvia sobre la lámina total infiltrada media y la profundidad de mojado, resultando significativamente menor cuando la intensidad fue de 20 mm/h respecto a las restantes intensidades, mientras que para las intensidades de 40, 60 y 100 mm/h, no se evidenciaron diferencias estadísticamente significativas (tabla 3). Este resultado para lámina total infiltrada media puede explicarse, como se puede apreciar en la tabla 3, por el menor milimetraje total de la lluvia de 20 mm/h, y la menor energía de precipitación, lo cual definió que toda la lluvia infiltrara, mientras que en el resto de las lluvias, si bien no hubo diferencias significativas en la lámina total infiltrada, si las hubo en la lámina total precipitada en el mismo tiempo, pudiéndolo asociar a la mayor energía promedio de lluvia, que se incrementó a medida que lo hizo la intensidad de precipitación, la cual generó que la lámina total infiltrada se redujera a medida que aumentó la intensidad de la lluvia en un 28% y 62% para la intensidad alta y muy alta respectivamente. Si bien el suelo presentaba una cobertura superficial promedio de 60%, este nivel de protección mecánica de la superficie solo fue eficiente para lluvias de baja y media intensidad y energía (20 y 40 mm/h), (foto 2 y 3) no así para las de alta y muy alta intensidad (60 y 100 mm/h) (foto 4 y 6).

Tabla 3: Efecto de la intensidad de lluvia, de la lámina total precipitada y de la energía de la precipitación, sobre la lámina total infiltrada media y la profundidad de mojado.

Intensidad (mm/h)	Lámina total precipitada (mm)	Energía de precipitación (Kj/m <sup>2</sup> )	Lámina total infiltrada media (mm)	Profundidad de mojado (cm)
20	33,15	0,26	33,15 (A)	13,6 (A)
40	66,68	0,52	66,68 (B)	30,0 (B)
60	99,95	0,78	71,75 (B)	31,4 (B)
100	166,95	1,3	62,75 (B)	30,0 (B)
			p<0,0001 n=16 CV:12,34%	p<0,0001 n=16 CV:12,53%

Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre intensidades de lluvia según test DGC ( $p \geq 0,05$ ).

Estos resultados son coincidentes con los obtenidos por Bermúdez *et al.*, (2016) en la Provincia de Salta, quienes evaluaron mediante el uso de un simulador de lluvia tres intensidades de lluvia (75, 110 y 145 mm/h), sobre dos estados de ladera: quemada y no quemada y concluyeron que la capacidad de infiltración fue menor en áreas de laderas quemadas y se incrementó en la medida en que se aumentaba la intensidad de lluvia hasta alcanzar un máximo de 144,23 mm/h en áreas de laderas no quemadas.

En lo que respecta a la profundidad de mojado, el resultado obtenido para las intensidades de 40, 60 y 100 mm/h puede deberse a condiciones internas del perfil, ya que el mismo cuenta con estructura laminar gruesa fuerte, dura y firme en el horizonte Ap y también a capas compactadas que limitan el ingreso de agua al perfil, permitiendo una profundización de la lámina infiltrada de alrededor de 30 cm de profundidad.

En este sentido Gómez (2011), describió el perfil cultural del suelo bajo siembra directa en el campo experimental “Pozo del Carril”, donde se realizó esta experiencia, pudiendo identificar tres capas, una superficial con estructura débil y alto grado de pulverización, y dos capas subsuperficiales uniformemente compactadas.

Por su parte, Ohanian (2014), en el mismo sitio en el que se llevó a cabo el presente trabajo, simulando precipitaciones de 100 mm/h, observo que la profundidad de humedecimiento (cm) fue mayor en la rotación agrícola (41,00 cm) con respecto a la agrícola-ganadera (36,25 cm), mientras que para la condición con cobertura, la profundidad hasta donde infiltró el agua fue 40,87 cm, y para el estado sin cobertura 36,37 cm.

En relación al efecto de la condición física del perfil sobre la capacidad de infiltración, Yimer *et al.*, (2008) en un Andisol, estudiaron el efecto de tres usos de la tierra: agrícola, ganadero-pastoril y forestal, sobre la infiltración acumulada y la tasa de infiltración, encontrando diferencias significativas entre ellos. La mayor infiltración acumulada (cm) fue en el tratamiento Forestal con 45,72 cm, siguiéndole el Agrícola (12,98 cm) y por último el Ganadero pastoreado con 12,98 cm. Estas diferencias los autores se las atribuyeron a la compactación y a la degradación estructural en superficie, que traen aparejada la pérdida de macroporosidad.

#### 4.2 Velocidad de infiltración final

El análisis estadístico de los resultados indicó que existió efecto de la intensidad de lluvia sobre la velocidad de infiltración final, mostrando diferencias estadísticamente significativas para las cuatro intensidades evaluadas (tabla 4).

Tabla 4: Efecto de la intensidad de lluvia y el contenido de humedad antecedente, sobre la velocidad de infiltración final

Intensidad (mm/h)	Contenido de humedad antecedente (%)	Velocidad de infiltración final (mm/h)
20	16	20 (A)
40	13	39,9 (B)
60	14	26,33(C)
100	17	11,23 (D)
		p<0,0001 n=16 CV:7,46

Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre intensidades de lluvia según test DGC ( $p \geq 0,05$ )

Se pudo observar que en las intensidades de 20 mm/h y 40mm/h la velocidad de infiltración final promedio fue similar a la intensidad de lluvia aplicada, mientras que para las intensidades de 60 mm/h y 100 mm/h la velocidad de infiltración final promedio disminuyó marcadamente, correspondiendo al 50% y 10%, respectivamente de la intensidad de precipitación. Esto puede ser atribuido a que la experiencia fue realizada sobre una rotación agrícola con una historia de más de 20 años de siembra directa, con compactación por el tráfico sumado a la no remoción del suelo produjo un aumento en la densidad aparente, formación de agregados grandes o gruesos, baja porosidad total y de macroporos, los cuales junto a la estabilidad estructural están altamente correlacionados con las propiedades hidráulicas del suelo.

En este sentido Becker (2006), observó una marcada disminución en la velocidad de infiltración, en las mediciones realizadas bajo siembra directa asociándolo a los altos niveles de compactación y la falta de remoción.

Por su parte, Bricchi (1996 b) afirmó que en un Hapludol típico compactado se disminuyó 7 veces la cantidad de poros tubulares ( $>0,5\text{mm}$ ), muchos de ellos representados por bioporos. Por otro lado la misma autora indicó disminución del 68% de poros mayores a  $60 \mu\text{m}$ , y del 93% en la conductividad hidráulica, por efecto de la compactación en suelos agrícolas.

Aoki y Sereno (2006), estudiaron el proceso de velocidad de infiltración en un Haplustol típico franco limoso de Córdoba mediante la utilización de un microsimulador de lluvia, en dos condiciones de uso: monocultivo de soja en labranza convencional y bosque nativo, simulando diferentes intensidades de lluvia. Encontraron diferencias entre las situaciones de uso y entre el efecto de las

diferentes intensidades de precipitación simuladas, indicando la existencia de un valor crítico de energía de lluvia acumulada, con el cual se produce un cambio físico-químico de los agregados del suelo, asociado al contenido de materia orgánica y a la estabilidad de la estructura frente al impacto de la gota de lluvia, así como a la densidad y porosidad total de la capa superficial. De acuerdo a los resultados obtenidos en el presente trabajo, esa energía crítica estaría en el orden de  $0,78 \text{ KJ m}^{-2}$  correspondiendo a la intensidad de 60mm/h, ya que fue a partir de ella que se evidenció una reducción marcada de la velocidad de infiltración respecto a la velocidad o intensidad de la lluvia.

La velocidad de infiltración obtenida difiere con respecto a los valores presentados por Ohanian (2014), ya citado anteriormente, quien observó, con lluvias simuladas de 100 mm/h, que la velocidad de infiltración final en la misma rotación agrícola que la de este trabajo, fue de 58,50 mm/h, variando entre 45,27 mm/h y 51,30 mm/h, para las condiciones sin y 100% de cobertura superficial de rastrojo de maíz. Las diferencias podrían estar asociadas a variaciones en el contenido hídrico que presentaba el perfil al momento de la medición, a la diferente cobertura superficial y tipo de cobertura, o a que la condición física del perfil se alteró con respecto a aquella situación.

Yimer *et al.*, (2008), hallaron que la mayor tasa de infiltración fue en el tratamiento Forestal con  $2,67 \text{ cm.min}^{-1}$ , siguiéndole el Ganadero pastoreado ( $0,67 \text{ cm.min}^{-1}$ ) y por último el Agrícola con  $0,61 \text{ cm.min}^{-1}$ . Estas diferencias, al igual que para la infiltración acumulada; los autores se las atribuyeron a la compactación y a la degradación estructural en superficie, que traen aparejada la pérdida de macroporosidad.

En lo que respecta al contenido de humedad antecedente se puede apreciar que los valores fueron relativamente similares, y no mostraron una tendencia clara en relación a la velocidad de infiltración, ya que por ejemplo entre lluvias extremas, el contenido de humedad del suelo fue prácticamente igual, mientras que la velocidades de infiltración difirieron marcadamente.

#### 4.3 Pérdida de suelo

El análisis estadístico de los resultados indicó que hubo efecto de la intensidad de lluvia sobre la pérdida de suelo, mostrando diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos.

Se pudo observar que para lluvias de baja y media intensidad (20 y 40 mm/h, respectivamente) no se produjeron pérdidas de suelo, mientras que para lluvias de alta y muy alta intensidad (60 y 100 mm/h, respectivamente), se registraron pérdidas de suelo que mostraron diferencias estadísticamente significativas (tabla 5).

Tabla 5: Efecto de la intensidad de lluvia sobre la pérdida de suelo e Índice de erosión.

Intensidad (mm/h)	Pérdida de suelo (t/ha)	Índice de erosión (g/Kj)
20	0(A)	0
40	0 (A)	0
60	0,31(B)	39,74
100	0,62 (C)	47,69
	p<0,0001 n=16 CV:10,93	

Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre intensidades de lluvia según test DGC ( $p \geq 0,05$ )

Estos resultados son coincidentes con los obtenidos por Becker (2006), quien observó que las menores pérdidas por erosión hídrica en la pendiente Pozo del Carril se registraron en eventos naturales de bajo volumen e intensidad de precipitación, mientras que las pérdidas de suelo fueron mayores para eventos de alto volumen, duración e intensidad.

Considerando los eventos analizados por la autora mencionada en el párrafo anterior, en el periodo (1999-2003), se puede concluir que las intensidades evaluadas en el presente trabajo se presentarían con la siguiente frecuencia: 20 mm/h - 25%; 40 mm/h - 25%; 60 mm/h - 43,75%; y 100 mm/h - 6,25%. De acuerdo a esto, se puede sostener que en el 50% de los eventos pluviales que se producen en la región de estudio, sería de esperar que se produjeran pérdidas de suelo.

Ohanian (2014), encontró que la pérdida de suelo fue mayor en el suelo desnudo que en el tratamiento de 100% de cobertura, con 2,42  $\text{tn}\cdot\text{ha}^{-1}$  y 0,48  $\text{tn}\cdot\text{ha}^{-1}$  respectivamente, y en lo que se refiere a las rotaciones en la agrícola-ganadera la producción de sedimentos fue 2,09  $\text{tn}\cdot\text{ha}^{-1}$ , mientras que en la agrícola fue sensiblemente menor, 0,83  $\text{tn}\cdot\text{ha}^{-1}$ . Los resultados correspondientes a la rotación agrícola con cobertura mostrarían similitud con los valores obtenidos en el presente trabajo.

Betancourt *et al.* (2000) trabajando con lluvia simulada y tres intensidades, 50  $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ , 70  $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$  y 120  $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ , demostraron que para todos los casos la mayor producción de sedimentos correspondió a las parcelas de suelo descubierto, siguiéndole en magnitud las parcelas de alfalfa, pasto nativo y Grama rhodes, en orden decreciente; a su vez evidenciaron que el aumento de la intensidad de precipitación, incrementa en forma directa la erosión hídrica.

Sasal *et al.* (2008) trabajando en un Argiudol ácuico de la provincia de Entre Ríos estudiaron las pérdidas de suelo en siembra directa en el siguiente esquema de cultivos: soja continua; soja continua

con cultivo de cobertura otoño-invernal (trigo) (T/S); maíz-trigo/soja (M-T/S); maíz continuo; pastura (con cortes manuales) y suelo descubierto; resultando sus pérdidas de suelo de 2,4 t.ha<sup>-1</sup>, 0,5 t.ha<sup>-1</sup>, 0,3 t.ha<sup>-1</sup>, 1,8 t.ha<sup>-1</sup>, 0,5 t.ha<sup>-1</sup> y 15,3 t.ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Los autores definieron que las mismas fueron muy bajas, aún con elevadas e intensas precipitaciones. Sin embargo, el tratamiento descubierto, superó el límite de tolerancia admitido por el Sistema de Conservación de Suelos de EE.UU, de 11.2 t.ha<sup>-1</sup> (Hall *et al.*, 1985). El maíz continuo con más de 3 veces la producción de materia seca que los demás sistemas tuvo una pérdida de suelo equiparable a la soja continua, por lo tanto y en consecuencia, estos determinaron que, más importante que la cantidad de materia seca cubriendo el suelo durante el ciclo del cultivo sumado a los residuos sobre la superficie después de su cosecha, resulta el tiempo de ocupación con cultivos y raíces vivas. Si bien los valores de pérdida de suelo obtenidos en la presente experiencia pueden ser considerados bajos, según el criterio antes mencionado, aún sería posible reducirlos, si en las condiciones de estudio se introdujeran cultivos invernales de cobertura. Si bien los resultados encontrados de pérdida de suelo fueron bajos, se debe tener en cuenta que la energía máxima aplicada en una lluvia simulada es aproximadamente el 48 % del valor de una lluvia real, Carfagno *et al.* (2016), por lo que se puede inferir que las pérdidas de suelo ante lluvias reales pueden ser mayores a las encontradas en el presente trabajo, pudiendo superar el límite de tasa de erosión tolerable de 1-2 t.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> propuesto por (Walter y Stutzel, 2009).

En el mismo sentido, De La Vega *et al.*, (2004) comprobaron que la concentración de sedimentos en el agua escurrida del tratamiento sin cobertura (1983,8 mg.l<sup>-1</sup>) fue significativamente mayor a la registrada en el suelo cubierto (536,6 mg.l<sup>-1</sup>), correspondiendo estos valores a pérdidas de suelo medias de 7000 kg.ha<sup>-1</sup> y de 1300 kg.ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

Tabla 6: Coeficiente de correlación de Pearson

Variable 1	Variable 2	N	Pearson	p-valor
Energía de precipitación	Pérdida de suelo	4	0,97	0,03
Lámina escurrida	Pérdida de suelo	16	0,97	8,9 E <sup>-9</sup>

Se puede observar una correlación positiva y significativa muy buena entre las variables analizadas (tabla 6).

Tabla 7: Análisis de regresión lineal simple

Variable 1	Variable 2	Ecuación	N	R <sup>2</sup>	ECPM
Energía de precipitación (x)	Pérdida de suelo (Y)	$Y = -0,23 + 0,65x$	4	0,94	3%
Lámina escurrida (x)	Pérdida de suelo (Y)	$Y = 0,01 + 0,04x$	16	0,91	1%

A partir de los datos observados en la tabla 7 se aprecia que la ecuación obtenida entre energía de precipitación y pérdida de suelo, no tiene sentido físico ya que no podría tener ordenada al origen negativa. Esto puede ser atribuido a que se trabajó con pocos pares de datos.

En cuanto al análisis de lámina escurrida y pérdida de suelo se observó que la pérdida de suelo se incrementa a medida que se aumenta la lámina escurrida.

#### 4.4 Lámina escurrida y coeficiente de escurrimiento

El análisis estadístico de los resultados muestra que existió efecto de la intensidad de lluvia tanto sobre la lámina escurrida total como sobre el coeficiente de escurrimiento, encontrando diferencias estadísticamente significativas entre las intensidades de 60 y 100 mm/h mientras que en las intensidades de 20 y 40 mm/h no se registró escurrimiento y por ende no se calculó el coeficiente de escurrimiento (tabla 8).

Tabla 8: Efecto de la intensidad de lluvia sobre la lámina escurrida total y el coeficiente de escurrimiento.

Intensidad (mm/h)	Lámina escurrida total (mm)	Coeficiente de escurrimiento
20	0 (A)	0 (A)
40	0 (A)	0 (A)
60	28,20 (B)	0,28 (B)
100	104,20 (C)	0,57 (C)
	p<0,0001 n=16 CV:20,41%	p<0,0001 n=16 CV:38,89

Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre intensidades de lluvia según test DGC ( $p \geq 0,05$ )

Se puede observar que en la intensidad de 60 mm/h el 28% de la lámina aplicada se pierde por escurrimiento (foto 5), mientras que en la intensidad de 100 mm/h se pierde el 57% (foto 7), contra pérdida nula de lámina aplicada en las intensidades de 20 y 40 mm/h. Esta situación puede deberse a la cobertura de suelo (60%) la cual no es suficiente para proteger al suelo de la energía cinética de la lluvia en intensidades altas y muy altas, lo cual sumado a la baja estabilidad de los agregados superficiales, da lugar a la liberación de partículas y la consecuente formación de sellos superficiales, lo cual limita el ingreso de agua al perfil favoreciendo en escurrimiento.

En relación a esto, Cisneros *et al.*, (2012) concluyeron: “la cobertura protege la superficie del suelo de los efectos erosivos de la lluvia y del viento generando un impedimento para que la gota no impacte directamente sobre el suelo y reduzca la rugosidad en superficie”. “De este modo evita el desprendimiento de las partículas y la obstrucción de poros por la migración de las mismas, mantiene condiciones propicias para la infiltración de agua en el perfil y disminuye las pérdidas de agua por escurrimiento”.

El incremento de la lámina escurrida con intensidades de lluvias altas y muy altas, coincide con lo expresado por Becker (2006), ya citado anteriormente, quien encontró que los mayores volúmenes de escurrimiento se registraron en eventos naturales de alto volumen, duración e intensidad.

En relación a lo expresado anteriormente, Chagas, (1995) mediante un simulador de lluvias, evaluó el efecto de la rugosidad superficial, el tamaño de agregados y la estabilidad estructural sobre la erosión laminar bajo dos condiciones de degradación estructural de un Argiudol típico en Marcos Juárez: degradado (agricultura continua durante 15 años) y no degradado (rotación agrícola-ganadera con dos ciclos de pastura de 5 años de duración) y dos condiciones de rugosidad superficial: lisa y

rugosa. Los resultados indicaron que la presencia de agregados grandes en superficie (cama rugosa) disminuyó en un 70% y 68% el escurrimiento superficial y la erosión, respectivamente, en comparación con la superficie lisa, mientras que la estabilidad estructural no tuvo un efecto muy sobresaliente ya que una diferencia de 63% en el nivel de degradación de los suelos, sólo redujo un 25% el volumen de escurrimiento y no afectó la pérdida total de suelo.

A partir de la relación entre el riesgo de erosión producida en situaciones con diferente grado de protección superficial, respecto a una condición de superficie sin cobertura, Merrill *et al.* (2002), estimaron el potencial relativo de erosión en relación a la cobertura superficial. El riesgo de erosión disminuye marcadamente a partir de un 40% de cobertura superficial, reduciendo principalmente la capacidad de los agentes erosivos (i.e. energía cinética de la lluvia y velocidad de escurrimiento superficial) de generar el desprendimiento de las partículas del horizonte superficial y de transportarlas en el agua de escurrimiento. Con respecto a esto en el presente trabajo se pudo observar que si bien la cobertura superficial era del 60% solo pudo amortiguar el efecto de los agentes erosivos en lluvias de baja y media intensidad.

## **5-CONCLUSIONES**

Para las condiciones de suelo-cobertura e intensidades de lluvia simuladas, se concluye:

-La hipótesis planteada se cumple parcialmente, ya que sólo lluvias de alta y muy alta intensidad (iguales o superiores a 60 mm/h), producen escurrimiento, pérdida de suelo, y disminución de la velocidad final de infiltración.

-En lluvias de baja y media intensidad la lámina precipitada iguala a la lámina infiltrada. En lluvias de alta y muy alta intensidad la lámina infiltrada se reduce un 28% y 62% respectivamente.

- La velocidad de infiltración final es del orden del 50% y 10% de la intensidad de precipitación en lluvias de alta y muy alta intensidad respectivamente, mientras que en lluvias de baja y media intensidad, la velocidad de infiltración es igual a la intensidad de lluvia.

-Lluvias de alta y muy alta intensidad producen pérdida de suelo y láminas de escurrimiento que oscilan entre el 30 y 60% de la precipitación.

- Las lluvias de muy alta intensidad (100 mm/h) duplican el volumen de agua escurrida y la pérdida de suelo respecto a las precipitaciones de alta intensidad (60 mm/h).

## **6-BIBLIOGRAFIA**

- ALVAREZ, C. 2015; La siembra directa podría causar inundaciones? En: <http://sobrelatierra.agro.uba.ar/la-siembra-directa-podria-causar-inundaciones/> Consultado el 7/09/2016
- AOKI, A.M. y R. SERENO. 2006. Evaluación de la infiltración como indicador de calidad desuelo mediante un microsimulador de lluvias. En: <http://www.scielo.org.ar/scieloOrg/php/reference.php?pid=S1668-298X2006000100004&caller=www.scielo.org.ar&lang=pt>. Consultado el 12/02/2014
- ASSOULINE S. y M. BEN-HUR. 2006. Effects of rainfall intensity and slope gradient on the dynamics of interrill erosion during soil surface sealing. *Catena* 66:211-220
- BECKER, A. 2006. Evaluación del proceso de degradación de suelos por erosión hídrica en una subcuenca representativa de la región pedemontana del suroeste de la provincia de Córdoba, argentina. Tesis doctoral. Fac. de Ciencias Exactas, Físico Químicas y Naturales, Universidad Nacional de Río Cuarto, Río Cuarto, Argentina. 799 p.
- BECKER, A.R., N.G. BOSCHETTI, M.P. CANTÚ, B.J. PARRA y C.E. QUINTERO. 2008. Pérdida de carbono orgánico y fosforo por erosión hídrica bajo diferentes sistemas de manejo de suelos. XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Potrero de los Funes, San Luis, Argentina.
- BERMÚDEZ, R., A. TÁLAMO, y A CHÁVEZ. 2016. Respuesta a lluvias simuladas en laderas quemadas y no quemadas (Salta-Argentina). XXV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Río Cuarto, Córdoba, Argentina. p. 358
- BETANCOURT, P., J.L. OROPEZA, B. FIGUEROA, V. ORDAZ, C. ORTIZ, y A. HERNANDEZ, 2000. Perdidas de suelo y potencial hidrológico en parcelas con coberturas vegetativas de especies forrajeras. *Revista Terra Latinoamericana* 2000 volumen 18, número 3.
- BRICCHI, E. 1996 a. Soil Compaction: Effects on Structure and Porosity. In: *Prosc. 15 th World Congress of Soil Science, México* .Vol. 2b, Page 92.
- BRICCHI, E. 1996 b. Relaciones entre la compactación, morfología y propiedades físicas de un Hapludol típico de Río Cuarto. Tesis para obtención del título Magíster Scientiae-Área Ciencias del Suelo. UBA.
- CABRERA, A. L. 1976. Regiones fitogeográficas Argentinas. *Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería*. Tomo II, Fasc. 1. Ed. Acme, Buenos Aires.
- CANTERO GUTIERREZ, A., E.M. BRICCHI, V.H. BECERRA, J.M. CISNEROS y H.A. GIL. 1986. Zonificación y descripción de las tierras del departamento de Río Cuarto. (Córdoba). FAV-UNRC. 80p.

- CANTERO GUTIERREZ, A., M.P. CANTÚ, J.M. CISNEROS, J.J. CANTERO, M. BLASARÍN, A. DEGIOANI, J. GONALEZ, V. BECERRA, H. GIL, J. DE PRADA, S. DEGIOANNI, C. CHOLAKY, M. VILLEGAS, A. CABRERA y C. ERIC. 1998. Las tierras y aguas del sur de Córdoba. Propuestas para un manejo sustentable. 1ra ed. Ed. Masters SRL, Córdoba, Argentina. 119p.
- CANTU, M. 1998. Estudio Geocientífico para la Evaluación Ambiental y Ordenación Territorial de una Cuenca Pedemontana. Caso: Cuenca del Arroyo La Colacha, Departamento Río Cuarto, Provincia de Córdoba. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Río Cuarto. 376 páginas
- CANTU, M. y A. BECKER 1999. El impacto del uso intensivo de la tierra en áreas templadas del centro de la República Argentina. CD Conferencia Internacional Científica Medio Ambiente Siglo XXI. 7 páginas. Santa Clara, Cuba.
- CANTU, M., A. BECKER, y H. SCHIAVO 1998. La fragilidad natural del suelo y el uso del territorio como factores condicionantes del proceso de erosión en la región pampeana subhúmeda, Argentina. Prosc. CD, 16º Congreso Mundial de la Ciencia del Suelo, Montpellier, Francia. Simposio nº: 31. 7 páginas.
- CANTÚ, M.P., A. BECKER, J.C. BEDANO Y H.F. SCHIAVO. 2007. Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices. Departamento de Geología, Universidad Nacional de Río Cuarto, Ruta 36 km 601, (X5804BYA) Río Cuarto, Córdoba. mcantu@exa.unrc.edu.ar. Ciencia del suelo. 25(2): 173-178.
- CARFAGNO, P., M. EIZA, G. DÁVILA, C. IRURTIA, R. MICHELENA, L. MÁZ, R. D. CÁSERES, V. SAUER, H. SANCHEZ y A. QUIROGA. 2016. Determinación del índice de erosión con lluvias simuladas y su relación con la infiltración. XXV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Río Cuarto, Córdoba, Argentina. p. 271
- CASAS, R. 2005. La transformación de la agricultura argentina. Ciencia hoy. Vol. 15. Nº 87. ISS 1666-5171
- CASAS, R. 2015 a. La erosión del suelo en la Argentina. En: el deterioro del suelo y el ambiente en la Argentina. Tomo II. PROSA-FECIC, Buenos Aires, Argentina. 456 p.
- CASAS, R. 2015 b. La erosión, un daño ambiental que vuelve a aumentar. En: [http://www.clarin.com/rural/agricultura/erosion-agricultura-argentina-suelos\\_0\\_1387061565.html](http://www.clarin.com/rural/agricultura/erosion-agricultura-argentina-suelos_0_1387061565.html). Consultado 16/08/2016
- CHAGAS, C. I. 1995. Efectos de la rugosidad superficial, el tamaño de los agregados y la estabilidad estructural sobre la erosión entre surcos en un Argiudol. Ciencia del suelo. 13: 85-90.
- CISNEROS, J.M., J.D. DE PRADA, A. DEGIOANNI, A. CANTERO GUTIERREZ, H. GIL, M.A. REYNERO, F. SHAH y B. BRAVO URETA. 2004. Erosión hídrica y cambios de uso en los suelos de Córdoba. Evaluación mediante el modelo RUSLE 2. XIX Congreso Argentino de Ciencias del Suelo. Paraná (Entre Ríos). En CD.

- CISNEROS, J., C. CHOLAKY, A. CANTERO GUTIÉRREZ, J. GONZÁLEZ, M. REYNERO, A. DIEZ y L. BERGESIO. 2012. Erosión hídrica. Principios y técnicas de manejos. Ed. Unirío, Fac. Agronomía y Veterinaria, Univ. Nacional de Río Cuarto, Argentina. Versión digital.
- CISNEROS, J., A. DEGIANNI, J. GONZALEZ, C. CHOLAKY, J. CANTERO, A. CANTERO, J.L. TASSILE y R. CASAS. 2015 Degradación de suelos en la provincia de Córdoba. En: El deterioro del suelo y el ambiente en la Argentina Tomo I. PROSA-FECIC, Buenos Aires, Argentina 608 p.
- DE LA VEGA, G., M. G. CASTIGLIONI, M.J. MASSOBRIO, C.I. CHAGAS, O.J. SANTANATOGLIA y C. IRURTIA. 2004. Infiltración en un Argiudol Vértico bajo siembra directa en condiciones variables de cobertura humedad inicial. Ciencia del suelo. 22: 52 – 55.
- DI RIENZO J.A., F. CASANOVES, M.G. BALZARINI, L. GONZALEZ, M. TABLADA y C.W. ROBLEDO. 2011. Infostat versión 2011. Grupo Infostat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL En: <http://www.infostat.com.ar>
- DUMAS SALAZAR, A. 2012. Riesgo de erosión hídrica en la Cuenca hidrográfica del río Mundo. Tesis Trabajo Fin de Máster. En: <http://eprints.ucm.es/17468/> Consultado: 22/02/2014
- GÓMEZ, M.A. 2011. Efecto de la labor de descompactación superficial sobre el almacenamiento de agua en un Hapludol típico del sur cordobés manejado en siembra directa. Tesis de Grado. Fac. de Agronomía y Veterinaria, Universidad Nacional de Río Cuarto, Río Cuarto, Argentina. 44 p.
- GÓMEZ, N. 2013. En: [http://www.diarioepoca.com/notix2/noticia/303714\\_la-erosion-una-amenaza-que-avanza.htm](http://www.diarioepoca.com/notix2/noticia/303714_la-erosion-una-amenaza-que-avanza.htm) Consultado: 23/02/2014
- GOOGLE EARTH. 2016. Versión 1.3.28.15 de Google Earth. Visitado el 7/09/2016 y el 31/10/2016.
- HALL G.F., T.J. LOGAN y K.K. YOUNG. 1985. Criteria for determining tolerable erosion rates. In: Soil Erosion and crop productivity. Ed. Follet and Stewart. ASA-CSSA-SSSA. Madison, USA. 173-188.
- IRURTIA, C.B. Y J. L. LUQUE. 1994. Instrucciones para el uso del microsimulador de lluvias. INTA Castelar, Buenos Aires, Argentina: 14 p.
- IRURTIA, C.B. Y J. L. LUQUE. 2005. Instrucciones para el uso del microsimulador de lluvias. INTA Castelar, Buenos Aires, Argentina: 14 p.
- KUGLER, W.F. 1983. Conservación de suelo y el agua e inundaciones en la cuenca del plata. Operativo paraguas, IDIA, Corrientes. 70p
- LAFLEN, J. M.; M. AMENIYA y E. A. HINTA. 1981. Measuring crop residue cover. J. Soil Water Conservation 36: 341-343.
- MARELLI, H. J. 1996. Provincia de Córdoba. El deterioro del ambiente en la Argentina. PROSA-FECIC. 519 p.

- MARELLI, H. 2001. El agua y la siembra directa. Siembra Directa en el Cono Sur. PROCISUR. 450p.
- MARELLI, H. 2003. Estimación del potencial erosivo en la provincia de Córdoba a través de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE). Publicación INTA Marcos Juárez.
- MERRILL, S.D., J.M. KRUPINSKY and D.L. TANAKA. 2002. Soil coverage by residue indiverse crop sequences under No-till. USDA-ARS. Annual Meeting of ASA-CSSA-SSSA, IN, USA. 61:7-13
- MICHELENA, R. y C.B. IRURTIA 2011. La Siembra Directa controla la erosión y mejora la fertilidad del suelo. En: <http://inta.gov.ar/documentos/la-siembra-directa-controla-la-erosion-y-mejora-la-fertilidad-del-suelo/> Consultado: 23/02/2014
- OHANIAN, I. 2014. Perdida de suelo por erosión hídrica en función de la rotación y de la cobertura superficial de rastrojos. Tesis de Grado. Fac. de Agronomía y Veterinaria, Universidad Nacional de Río Cuarto, Río Cuarto, Argentina. 76 p.
- SASAL, M. C., M. G. WILSON, N. A. GARCIARENA, H. A. TASI, y O. PAPANOTTI. 2008. Esguerrimiento y pérdidas de suelo en sistemas de cultivo bajo siembra directa: efecto de algunas propiedades edáficas superficiales. INTA EEA, Entre Ríos, Argentina. En Actas del XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Potrero de Funes, San Luis (pp. 13-16).
- SASAL, C. 2013. Siembra directa: la elegida para conservar el suelo. En: <http://intainforma.inta.gov.ar/?p=18029> Consultado: 23/02/2014
- SEILER, R.A., R.A. FABRICIUS, V.H. ROTONDO, Y M.G. VINOCUR. 1995. Agrometeorología de Río Cuarto 1974/1993. Volumen I. FAV-UNRC. pp. 68.
- SILVA, L. A., N. C. GUTIERREZ y C. VENIALGO. 2000. Densidad relativa y estabilidad de agregados en cultivos anuales y perennes en la serie Zanatta – Meson de Fierro, Chaco. Univ. Nacional del Nordeste. Fac. de Ciencias Agrarias. Argentina.
- TABOADA, M.A. 2008. Influencia de la textura y la estructura de los suelos sobre la fertilidad física. En: Fertilidad Física de los Suelos. Taboada, A., C. Alvarez (Eds.) Editorial Facultad de Agronomía UBA, Buenos Aires, Argentina. 237p.
- TABOADA, M. A. 2013.Siembra directa: la elegida para conservar el suelo. En: <http://intainforma.inta.gov.ar/?p=18029> Consultado: 23/02/2014
- WALTER, C. y H. STÜTZEL. 2009. A new method for assessing the sustainability of land-use systems (II): Evaluating impact indicators. Ecological Economics 68: 1288-1300.
- YIMER, F., I. MESSING, S. LEDIN y A. ABDELKADIR. 2008. Effects of different land use types on infiltration capacity in a catchment in the highlands of Ethiopia. Soil Use Manage. 24:344-349.
- ZERBINO, S. y N. ALTIER, 2006. La biodiversidad del suelo. 8-9. Suplemento Tecnológico. Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA). La Estanzuela. Uruguay.

## 7-ANEXOS

**Tabla 1. Características morfológicas del suelo desarrollado bajo la siembra directa (SD), pendiente “Pozo del Carril”.**

---

**Ap** (0-8 cm); color pardo oscuro (10YR3/3) en húmedo y pardo a pardo oscuro (10YR 4/3) en seco; franco arenoso; estructura en bloques angulares gruesos moderados con laminación; ligeramente duro, firme; seco; límite inferior abrupto y suave. Se ha observado que después de 4 años la estructura es laminar gruesa fuerte, dura y firme.

**A2** (8-14 cm); color pardo oscuro (10YR3/3) en húmedo y pardo (10YR 5/3) en seco; franco arenoso; estructura en bloques angulares gruesos moderados que rompen a bloques angulares menores; firme; ligeramente plástico, ligeramente adhesivo; seco; límite inferior abrupto y suave.

**Bw1** (14-29 cm); color pardo grisáceo oscuro (10YR 4/2) en húmedo y pardo (10YR 5/3) en seco; franco arenoso; estructura en prismas simples irregulares y bloques angulares, muy gruesos que rompen a bloques angulares y prismas simples gruesos y medios, moderados; ligeramente duro, friable; ligeramente plástico, ligeramente adhesivo; abundantes lamelas discontinuas y onduladas arcillo-húmicas de 2 a 3 mm de espesor, horizontales y subhorizontales que en ciertos puntos se entrecruzan; seco; límite inferior abrupto y suave.

**Bw2** (29-41 cm); color pardo a pardo oscuro (10YR 4/3) en húmedo y pardo amarillento (10YR 5/4) en seco; franco arenoso; estructura en prismas simples irregulares gruesos, moderados que rompen a bloques menores; blando, friable; escasos barnices arcillo-húmicos, finos sobre las caras de agregados; fresco; límite inferior claro y suave.

**BC** (41-65 cm); color pardo a pardo oscuro (10YR 4/3) en húmedo y pardo amarillento (10YR 5/4) en seco; franco arenoso; estructura en bloques subangulares, finos, moderados a débiles que rompen a bloques menores débiles; blando en seco, muy friable en húmedo; fresco; límite inferior claro y suave.

**C** (65-85 cm); color pardo (10YR 4/4) en húmedo y pardo claro (10YR 6/3) en seco; franco arenoso; estructura en bloques angulares irregulares muy finos y muy débiles; blando, muy friable; fresco; límite inferior abrupto y suave.

**Ck** (85+ cm); color pardo amarillento (10YR 5/4) en húmedo y pardo claro (10YR 6/3) en seco; franco arenoso; estructura masiva; blando, friable; fresco a húmedo; alto contenido de carbonatos libres.

---

**Tabla 2. Propiedades químicas, físico-químicas y físicas del suelo desarrollado en Siembra directa (SD), pendiente “Pozo del Carril”.**

Horizonte	Ap	A2	Bw1	Bw2	BC	C	Ck
Profundidad (cm)	0-8	8-14	14-29	29-41	41-65	65-85	85+
Carbono orgánico (%)	0,92	0,56	0,53	0,72	0,24	0,12	-
Nitrógeno total (%)	0,10	0,08	0,08	-	-	-	-
Relación C/N	9,2	7,00	6,63	-	-	-	-
Arcilla ≤ 2m (%)	17,48	12,30	12,50	14,80	13,02	14,50	14,30
Limo, 2-50 m (%)	30,32	25,20	26,10	24,30	25,20	29,60	29,80
Arena muy fina, 50-100 m (%)	52,80	61,50	55,60	60,40	60,80	55,30	55,30
Arena fina, 100-250 m (%)	0,60	0,70	2,20	0,50	0,80	0,60	0,40
Arena media, 250-500 m (%)	0,25	0,30	3,10	-	0,10	0,10	0,20
Arena gruesa, 500-1000 m (%)	0,08	0,10	0,50	-	-	0,40	-
Arena muy gruesa, 1-2 mm (%)	0,01	0,10	-	-	0,20	-	-
pH en agua (1:2,5)	6,00	6,57	6,82	6,88	7,09	8,08	8,32
Cationes de Intercambio							
(meq/100g)							
Ca <sup>++</sup>	6,80	7,65	8,33	8,96	9,02	8,59	-
Mg <sup>++</sup>	2,52	1,60	1,60	1,71	1,95	2,04	-
Na <sup>+</sup>	0,38	0,43	0,30	0,30	0,29	0,26	0,25
K <sup>+</sup>	2,07	1,98	1,57	1,61	1,60	1,58	1,46
Suma de bases (meq/100g)	11,77	11,66	11,80	12,58	12,90	12,44	-
CIC (meq/100g)	12,03	11,30	10,53	12,90	11,20	11,00	10,50
Saturación con bases (%)	98	100	100	100	100	100	-



Foto 1: Vista del lote donde se realizó el trabajo con el microsimulador de llluvias.



Foto 2: Vista de la superficie del suelo al finalizar la simulación de precipitación de intensidad de 20 mm/h.



Foto 3: Vista de la superficie del suelo al finalizar la simulación de precipitación de intensidad de 40 mm/h.



Foto 4: Vista de la superficie del suelo al finalizar la simulación de precipitación de intensidad de 60 mm/h. Nótese el sello superficial en el sector de abajo a la derecha de la imagen.



Foto 5: Lámina colectada producto de escurrimiento en el tratamiento de 60 mm/h. Nótese que el volumen escurrido correspondió al volúmen de tres botellas aproximadamente.



Foto 6: Vista de la superficie del suelo al finalizar la simulación de precipitación de intensidad de 100 mm/h. Nótese el encharcamiento superficial.



Foto 7: Lámina colectada producto de escurrimiento en tratamiento de 100 mm/h. El número de botellas indica el volúmen total escurrido que duplica al obtenido con intensidad de 60 mm/hora.