

Escurrimiento superficial de la cuenca alta del Arroyo Pergamino.  
Impacto del uso de la tierra y la posición en el paisaje sobre  
la calidad del agua y los sedimentos

*Tesis presentada para optar al título de Magister de la Universidad de Buenos Aires,  
Área Ciencias del suelo*

Maria Liliana Darder  
Ing. Agrónoma - UBA - 2010

Lugar de trabajo: EEA INTA Pergamino



Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano  
Facultad de Agronomía – Universidad de Buenos Aires

## COMITÉ CONSEJERO

Director de Tesis

**Adrian Enrique Andriulo**

Ingeniero Agrónomo (Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Rosario, Argentina).

Magister Scientiae en Ciencia del Suelo (Universidad Nacional del Sur, 1987, Bahía Blanca, Argentina).

Doctor (Ph.D.) en Ciencia del Suelo (Institut National Agronomique Paris - Grignon, 1995, París, Francia).

Co-director de Tesis

**Mario Guillermo Castiglioni**

Ingeniero Agrónomo (Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires, Argentina).

Magister en Ciencias del Suelo (Escuela para Graduados Alberto Soriano, Universidad de Buenos Aires)

Consejero de Estudios

**Maria Carolina Sasal**

Ingeniera Agrónoma (Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Rosario)

Magister en Ciencias del Suelo (Escuela Graduados Alberto Soriano, Universidad de Buenos Aires)

Doctor en Agronomía (Escuela para Graduados Alberto Soriano, Universidad de Buenos Aires).

## JURADO DE TESIS

JURADO

**Oscar José Santanatoglia**

Ingeniero Agrónomo (Facultad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina)

JURADO

**Olga Susana Heredia**

Ingeniera Agrónoma (Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires, Argentina)

Magister en Ciencias del Suelo (Escuela Graduados Alberto Soriano, Universidad de Buenos Aires)

Doctora (Escuela Graduados Alberto Soriano, Universidad de Buenos Aires)

JURADO

**Sergio Montico**

Ingeniero Agrónomo (Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Rosario)

Doctor en Ingeniería (Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Rosario)

Fecha de defensa de la tesis: 18 de ABRIL de 2018

*Dedicada a Malena*

## AGRADECIMIENTOS

A mi mamá y a mis hermanos, por sus valiosos consejos y constante apoyo.

A mi compañero Rober por su apoyo afectivo

A todo el equipo que colaboró con las tareas a campo: Diego Colombini, Fabio Villalba, Mario Castiglioni, Leticia García, Jimena Dalpiaz, Fernando Rimatori, Adrian Andriulo que fueron con la mejor predisposición y compartimos largas, cansadoras y muy divertidas jornadas durante los 150 ensayos de simulación.

A Alicia Irizar, Luis Milesi y Silvina Restovich que me brindaron conocimientos siempre que los necesité.

Al grupo del Laboratorio de Calidad de Alimentos, Suelo y Agua por su soporte técnico.

A Juliana Torti, Leticia García y Jimena Dalpiaz por su colaboración en los análisis de químicos de suelo y agua.

A Leandro Hanuch y Aberto Rondán por su ayuda con los análisis físicos de suelo.

A Silvia Re por facilitarme todos los partes meteorológicos.

A Iris Ballestrase, por su colaboración en las búsquedas bibliográficas.

A María José Beribe, por su colaboración con los análisis estadísticos.

A Ana Clara Caprile por los mapas e utilización del GPS geodésico para la medición de las pendientes de los terrenos.

A los dueños y encargados de los establecimientos rurales que permitieron el ingreso a los campos para la realización de los muestreos.

A la EPG, que en la persona de Celio Chagas, me convocó para hacer un intercambio estudiantil en la Universidad Rural de Río de Janeiro, donde realicé análisis de elementos traza para este trabajo de tesis

A Mariana Beaudeant y Emiliano Labate por permitirme ser parte de su familia durante mi estadía en Buenos Aires.

A INTA, por haberme permitido realizar esta maestría.

Y un agradecimiento muy especial a Adrián Andriulo, Mario Castiglioni y Carolina Sasal por haber confiado en mí, por su paciencia, dedicación e invalorable aportes en esta tesis.

*Declaro que el material incluido en esta tesis es, a mi mejor saber y entender, original producto de mi propio trabajo (salvo en la medida en que se identifique explícitamente las contribuciones de otros), y que este material no lo he presentado, en forma parcial o total, como una tesis en ésta u otra institución*

## ÍNDICE GENERAL

<b>Índice de figuras .....</b>	<b>III</b>
<b>Índice de tablas .....</b>	<b>IV</b>
<b>Abreviaturas .....</b>	<b>VII</b>
<b>Resumen .....</b>	<b>VIII</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>IX</b>
<b>CAPÍTULO 1.....</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN GENERAL .....</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.2 Hipótesis .....	8
1.3 Objetivo general.....	9
1.4 Objetivos específicos .....	9
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>10</b>
<b>MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>10</b>
<b>MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>11</b>
2.1 Descripción del área de estudio .....	11
2.1.1 Suelos .....	13
2.1.2 Clima .....	16
2.2 Ensayos de simulación de lluvia realizados a campo .....	18
2.2.1 Elección de las intensidades de lluvia aplicadas y duración de cada ensayo.....	19
2.2.2 Sitios de muestreo .....	20
2.2.3 Variables analizadas en cada ensayo de simulación .....	22
2.3 Estimación de la pendiente del terreno .....	23
2.4 Análisis de suelo, agua, sedimento y material vegetal.....	24
2.4.1 Muestreo .....	24
2.4.2 Análisis de laboratorio.....	24
2.4.2.1 Suelo .....	24
2.4.2.2 Agua de escurrimiento.....	26
2.4.2.3 Sedimento .....	26
2.5 Análisis Estadístico .....	27
<b>CAPÍTULO III .....</b>	<b>29</b>
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>29</b>
<b>RESULTADOS.....</b>	<b>30</b>
<b>3.1 Comportamiento de las precipitaciones en el partido de Pergamino durante la década 2001-2010.....</b>	<b>30</b>

<b>3.2 Caracterización de los suelos en los ambientes bajo estudio .....</b>	<b>33</b>
3.2.1. Propiedades edáficas medias en los diferentes ambientes.....	33
3.2.2. Propiedades edáficas en diferentes anchos de franja en los bajos.....	37
3.2.3 Propiedades edáficas en ambientes de loma y media loma bajo distintos sistemas de sucesión de cultivos analizados .....	40
<b>3.3 Infiltración y escurrimiento.....</b>	<b>45</b>
3.3.1 Ambiente ganadero (bajo) .....	45
3.3.2 Ambiente agrícola (media loma y loma) .....	49
3.4 Calidad del agua de escurrimiento.....	56
3.4.1 Ambiente ganadero (bajo) .....	56
3.4.2 Ambiente agrícola (media loma y loma) .....	58
<b>3.5 Calidad y cantidad de los sedimentos escurridos .....</b>	<b>60</b>
3.5.1 Sector ganadero (bajo).....	60
3.5.2 Ambiente agrícola (loma y media loma) .....	63
3.5.2.1 Nutrientes y Carbono.....	63
3.5.2.2 Elementos traza.....	67
<b>3.6 Coeficientes de enriquecimiento.....</b>	<b>69</b>
3.6.1 Ambiente ganadero (bajo) .....	69
3.6.2 Sector agrícola (loma y media loma).....	71
3.6.2.1 Nutrientes y Carbono.....	71
3.6.2.2 Elementos traza.....	74
<b>3.7 Analisis multivariado .....</b>	<b>75</b>
Análisis de componentes principales.....	76
3.7.1. Ambiente ganadero (bajo) .....	76
3.7.2 Ambiente agrícola (loma y media loma) .....	78
<b>CAPÍTULO 4.....</b>	<b>81</b>
<b>CONCLUSIONES GENERALES .....</b>	<b>81</b>
<b>CONCLUSIONES GENERALES .....</b>	<b>82</b>
4.1.1 Comportamiento de las precipitaciones en el partido de Pergamino.....	82
4.1.2 Caracterización de los suelos.....	82
4.1.3 Infiltración y escurrimiento .....	83
4.1.4 Calidad del agua de escurrimiento.....	85
4.1.5 Cantidad y calidad de los sedimentos escurridos .....	85
4.1.6 Coeficientes de enriquecimiento .....	87
4.1.7 Analisis multivariado.....	88

4.2 Importancia del trabajo actual .....	88
4.3 Futuras investigaciones derivadas del presente trabajo.....	89
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>90</b>
Citas bibliográficas .....	91

## Índice de figuras

Figura 2.1 Regiones hidrogeológicas de la provincia de Buenos Aires. ....	11
Figura 2.2 Ubicación geográfica de la cuenca del arroyo Pergamino. ....	12
Figura 2.3 Ubicación de la cuenca alta del arroyo Pergamino y detalle de las ocho microcuencas. ....	13
Figura 2.4 Mapa de tipos de suelo y su capacidad de uso en la cuenca alta del arroyo Pergamino. ....	15
Figura 2.7: Ubicación de los ensayos de simulación de lluvia para las dos intensidades (30 mm h <sup>-1</sup> y 60 mm h <sup>-1</sup> ). ....	21
Figura 2.8: Simulación de lluvia en el sector bajo del paisaje. ....	22
Figura 2.9: GPS Geodésico. ....	23
Figura 2.10: Muestra de suelo (a), recolección de escurrimientos (b) y extracción de la biomasa aérea sobre el suelo (c). ....	24
Figura 2.11: Determinación de elementos traza durante pasantía (en el marco del convenio FAUBA-URRJ) realizada en marzo de 2014 en la Universidad Rural de Rio de Janeiro (Brasil). ....	26
Figura 3.1. Coeficiente de variación del volumen anual de las precipitaciones, calculado por décadas para Pergamino. ....	31
Figura 3.2. Precipitación anual de correspondiente a la década 2001-2010. ....	32
Figura 3.3. Coeficientes de enriquecimiento de nitrógeno (CEN) de los sedimentos en función de las concentraciones de nitrógeno edáfico para la franja ancha. ....	71
Figura 3.4. Coeficientes de enriquecimientos de nitrógeno CEN (a), fósforo CEP (b) y carbono CEC (c) de los sedimentos en función de las concentraciones de nitrógeno, fósforo y carbono edáfico para el sector agrícola. ....	74
Figura 3.5. Análisis de componentes principales del ambiente ganadero entre franjas angosta y ancha (CP1) para cada intensidad de lluvia, 30 y 60 mm h <sup>-1</sup> (CP2). ....	77
Figura 3.6. Análisis de componentes principales del ambiente agrícola entre la posición de loma y media loma (ML) del paisaje (CP1) para para cada manejo de cultivo (CP2), monocultivo de soja (S) y rotación de cultivos (R) con intensidad de lluvia de 60 mm h <sup>-1</sup> .....	79
Figura 3.7. Análisis de componentes principales del ambiente agrícola entre la posición de loma y media loma (ML) del paisaje (CP1) para para cada manejo de cultivo (CP2), monocultivo de soja (S) y rotación de cultivos (R) con intensidad de lluvia de 30 mm h <sup>-1</sup> .....	80



## Índice de tablas

Tabla 2.1: Superficie de cada microcuenca .....	13
Tabla 2.2: Dosis promedio de nutrientes de fertilizantes minerales utilizados por las empresas agrícolas medianas (151 – 500 ha) para los cultivos típicos de la cuenca del Arroyo Pergamino. Fuente: (Cabrini & Calcaterra, 2009).....	16
Tabla 2.4: Número de simulaciones de lluvia realizadas para cada intensidad (30 mm h <sup>-1</sup> y 60 mm h <sup>-1</sup> ), en cada posición del paisaje y para los distintos usos de la tierra analizados. ...	21
Tabla 3.1. Precipitación total anual y precipitaciones con características erosivas (> 25 mm h <sup>-1</sup> ) (cantidad, milímetros y porcentaje respecto al total).....	32
Tabla 3.2: Características químicas superficiales promedio de los suelos ubicados en las tres posiciones del paisaje: loma (n: 55), media loma (n: 55) y bajo (n: 49). .....	33
Tabla 3.3: Cantidad anual de elementos traça (promedio y desvío estándar) aportados por los fertilizantes para una rotación típica de la región (8 S1 <sup>a</sup> +1T/S2 <sup>a</sup> +1M).....	35
Tabla 3.4: Resultados de algunas variables físicas correspondientes al estrato superficial de los suelos de los tres ambientes analizados. ....	35
Tabla 3.5: Características químicas superficiales de los suelos ubicados en las tres franjas del bajo. ....	37
Tabla 3.6: Resultados de algunas variables físicas correspondientes al estrato superficial de los suelos ubicados en las tres franjas del bajo.....	38
Tabla 3.7 Propiedades químicas de los suelos ubicados en los diferentes anchos de franja en el sector bajo del paisaje (Años 2011 y 2013).....	39
Tabla 3.8. Propiedades físicas de los suelos ubicados en los diferentes anchos de franja en el sector bajo del paisaje (Años 2011 y 2013).....	39
Tabla 3.9 Propiedades químicas de los suelos con diferentes manejos (monocultivo de soja: S y rotación de cultivos: R), según la posición en el paisaje (media loma y loma) y en 2011. ....	43
Tabla 3.10 Propiedades químicas de los suelos con diferentes manejos (monocultivo de soja: S y rotación de cultivos: R), según la posición en el paisaje (media loma y loma) y en 2013. ....	43
Tabla 3.11 Propiedades físicas, pendiente y contenido de materia seca presente en los suelos con diferentes manejos (monocultivo de soja: S y rotación de cultivos: R), de acuerdo a la posición en el paisaje (media loma y loma) en 2011.....	44
Tabla 3.12 Propiedades físicas, pendiente y contenido de materia seca presente en los suelos con diferentes manejos (monocultivo de soja: S y rotación de cultivos: R), de acuerdo a la posición en el paisaje (media loma y loma) en 2013.....	44
Tabla 3.13 Resultados de algunos de los parámetros que surgen de los ensayos de simulación de lluvia, realizados en franjas de diferente ancho correspondientes al ambiente bajo. ..	45
Tabla 3.14. Coeficientes de variación (%) de las distintas propiedades evaluadas, según la intensidad de lluvia y de acuerdo al distinto ancho de franja considerado. ....	46
Tabla 3.15: Coeficientes de correlación entre distintos parámetros que surgieron de las simulaciones de lluvia (60 mm h <sup>-1</sup> ), con propiedades de los suelos del bajo en 2011. ....	48
Tabla 3.16: Coeficientes de correlación entre distintos parámetros que surgieron de las simulaciones de lluvia (30 mm h <sup>-1</sup> ), con propiedades de los suelos del bajo en 2013. ....	48
Tabla 3.17: Parámetros que surgieron de los ensayos de infiltración con una intensidad de lluvia de 60 mm h <sup>-1</sup> , realizados en los ambientes de loma y media loma con dos secuencias de cultivos diferentes (S: monocultivo de soja y R: rotación).....	49

Tabla 3.18: Parámetros que surgieron de los ensayos de infiltración con lluvia de $30 \text{ mm h}^{-1}$ , realizados en los ambientes de loma y media loma con dos secuencias de cultivos diferentes (S: monocultivo de soja y R: rotación).....	52
Tabla 3.19. Coeficientes de variación (%) de las distintas propiedades evaluadas, según la intensidad de lluvia, posición en el paisaje y de acuerdo a la distinta sucesión de cultivos implementada. ....	53
Tabla 3.20: Coeficientes de correlación entre los parámetros surgidos de los ensayos de infiltración con algunas propiedades del suelo bajo uso agrícola (sector media loma y loma) para la intensidad de $60 \text{ mm h}^{-1}$ . ....	54
Tabla 3.21: Coeficientes de correlación de las variables infiltración y escurrimiento con algunas propiedades del suelo bajo uso agrícola (sector media loma y loma) para la intensidad de lluvia de $30 \text{ mm h}^{-1}$ .....	54
Tabla 3.22. Infiltración y escurrimiento en los sectores agrícola y ganadero para cada intensidad de lluvia (1 hora). ....	55
Tabla 3.23 Concentración y cantidad de nutrientes exportados en los ensayos de infiltración, realizados con dos intensidades de lluvia en las distintas franjas en que se dividió el ambiente bajo.....	56
Tabla 3.24: Coeficientes de correlación entre los nutrientes exportados por el agua de escurrimiento (en concentración) con las propiedades de los suelos de la posición de bajo (ambiente ganadero), para una intensidad de lluvia de $60 \text{ mm h}^{-1}$ .....	57
Tabla 3.25: Coeficientes de correlación entre los nutrientes exportados en el agua de escurrimiento (en concentración) con las propiedades de los suelos de la posición de bajo (ambiente ganadero), para la intensidad de lluvia de $30 \text{ mm h}^{-1}$ (2 horas de lluvia simulada). ....	57
Tabla 3.26: Concentración y cantidad de nutrientes en el agua de escurrimiento (para monocultivo de soja: S) y rotación de cultivos: R) en dos posiciones del paisaje (media loma y loma) y con una intensidad de lluvia de $60 \text{ mm h}^{-1}$ .....	58
Tabla 3.27 Concentración y cantidad de nutrientes exportados por el agua de escurrimiento en la loma y media loma, a partir de los ensayos de infiltración realizados con una intensidad de lluvia de $30 \text{ mm h}^{-1}$ (S: monocultivo de soja y R: rotación). ....	59
Tabla 3.28: Coeficientes de correlación entre la concentración de nutrientes en el agua de escurrimiento con las propiedades de los suelos bajo uso agrícola (media loma y loma) para una intensidad de lluvia de $60 \text{ mm h}^{-1}$ .....	60
Tabla 3.29: Coeficientes de correlación entre la concentración de nutrientes en el agua de escurrimiento con las propiedades de los suelos bajo uso agrícola (media loma y loma) para una intensidad de lluvia de $30 \text{ mm h}^{-1}$ .....	60
Tabla 3.30 Cantidad de sedimentos (SE) perdidos como resultado de las simulaciones de lluvia efectuadas en el sector bajo, juntamente con la concentración y cantidad de nutrientes y carbono presentes en los mismos.....	60
Tabla 3.31: Coeficientes de correlación entre la concentración de nitrógeno, fósforo y carbono en sedimentos (Nse, Ptse y Cse) y la cantidad de sedimentos erosionados (SE), con distintas propiedades de los suelos del bajo (uso ganadero), para una intensidad de lluvia de $60 \text{ mm h}^{-1}$ .....	62
Tabla 3.32 Coeficientes de correlación entre la concentración de nitrógeno, fósforo y carbono en sedimentos (Nse, Ptse y Cse) y la cantidad de sedimentos erosionados (SE), con las propiedades de los suelos del bajo (uso ganadero), para una intensidad de lluvia de $30 \text{ mm h}^{-1}$ .....	63
Tabla 3.33 Cantidad de sedimentos erosionados (SE) como resultado de las simulaciones de lluvia efectuadas con una intensidad de $60 \text{ mm h}^{-1}$ en el sector loma y media loma,	

juntamente con la concentración y cantidad de nutrientes (Nse y Ptse) y carbono (Cse) presentes en los sedimentos (S: monocultivo de soja y R: rotación).....	63
Tabla 3.34 Cantidad de sedimentos erosionados (SE) como resultado de las simulaciones de lluvia efectuadas con una intensidad de 30 mm h <sup>-1</sup> en el sector loma y media loma, juntamente con la concentración y cantidad de nutrientes y carbono (Nse, Ptse y Cse) presentes en los sedimentos (S: monocultivo de soja y R: rotación).....	64
Tabla 3.35 Coeficientes de correlación entre la cantidad de sedimentos erosionados (SE) y sus nutrientes asociados (Nse, Ptse y Cse), con algunas propiedades de los suelos agrícolas, para una intensidad de lluvia de 60 mm h <sup>-1</sup> .....	66
Tabla 3.36 Coeficiente de correlación de la concentración de nitrógeno, fósforo y carbono en sedimentos (Nse, Ptse y Cse) en sedimentos y cantidad de sedimentos erosionados (SE), con algunas variables de infiltración y escurrimiento y con algunas propiedades del suelo en la posición de loma y media loma (uso agrícola) para la intensidad de 30 mm h <sup>-1</sup> .....	66
Tabla 3.37 Concentración y cantidad de elementos traza en sedimentos: cobre (Cuse), zinc (Znse), manganeso (Mnse) y hierro (Fese) provenientes de los manejos: monocultivo de soja (S) y rotación de cultivos (R) en dos posiciones del paisaje (ML: media loma y L: loma) con una intensidad de lluvia de 60 mm h <sup>-1</sup> .....	67
Tabla 3.38 Concentración y cantidad de elementos traza en sedimentos: cobre (Cuse), zinc (Znse), manganeso (Mnse) y hierro (Fese), provenientes de los manejos: monocultivo de soja (S) y rotación de cultivos (R) en dos posiciones del paisaje (ML: media loma y L: loma) con una intensidad de lluvia de 30 mm h <sup>-1</sup> .....	68
Tabla 3.39 Coeficientes de enriquecimiento para nitrógeno, fósforo y carbono (CEN, CEP y CEC, respectivamente) de la posición baja del paisaje para dos intensidades de lluvia (30 mm h <sup>-1</sup> y 60 mm h <sup>-1</sup> ).....	70
Figura 3.3. Coeficientes de enriquecimiento de nitrógeno (CEN) de los sedimentos en función de las concentraciones de nitrógeno edáfico para la franja ancha.....	71
Tabla 3.40 Coeficientes de enriquecimiento para nitrógeno, fósforo y carbono (CEN, CEP y CEC respectivamente) de la posición media loma y loma del paisaje, con monocultivo de soja (S) y rotación de cultivos (R), para la intensidad de lluvia de 60 mm h <sup>-1</sup> .....	73
Tabla 3.41 Coeficientes de enriquecimiento para nitrógeno, fósforo y carbono (CEN, CEP y CEC respectivamente) de la posición media loma y loma del paisaje, con monocultivo de soja (S) y rotación de cultivos (R) para la intensidad de lluvia de 30 mm h <sup>-1</sup> .....	73
Tabla 3.42 Coeficientes de enriquecimiento para cobre, zinc, manganeso e hierro (CECu, CEZn, CEMn y CEFe respectivamente) de la posición media loma y loma del paisaje para la intensidad de lluvia de 60 mm h <sup>-1</sup> bajo monocultivo de soja (S) y rotación de cultivos (R) .....	75

## Abreviaturas

L: Loma  
ML: Media loma  
B: bajo  
R: rotación de cultivos  
S: monocultivo de soja  
Coef esc.: Coeficiente de escurrimiento  
Vol esc.: volumen de escurrimiento  
TIE Tiempo transcurrido hasta el inicio del escurrimiento  
Ia: Infiltración acumulada  
Ib: Tasa de infiltración de equilibrio o infiltración básica  
CN: Curva número  
MS: biomasa vegetal sobre el suelo  
SE: masa de sedimento  
Csu: Carbono total del suelo  
Nsu: Nitrógeno total de suelos  
N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>su: Nitratos del suelo  
Ptsu: Fósforo total del suelo  
Pesu: Fósforo extractable del suelo  
CESu Conductividad eléctrica del suelo  
Na<sup>+</sup>: Sodio intercambiable del suelo  
Dap: Densidad aparente  
H: Humedad gravimétrica de suelo  
ET: Elementos traza  
Cusu: Cobre del suelo  
Mnsu: Manganeso del suelo  
Fesu: Hierro del suelo  
Znsu: Zinc del suelo  
Nag: Nitrógeno total en agua  
N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>ag: Nitratos en agua  
Ptag: Fósforo total en agua  
Cse: Carbono total en sedimento  
Nse: Nitrógeno total en sedimento  
Ptse: Fósforo total en sedimento  
Cuse: Cobre en sedimento  
Mnse: Manganeso en sedimento  
Fese: Hierro en sedimento  
Znse: Zinc en sedimento  
CEC: coeficiente de enriquecimiento en carbono  
CEN: coeficiente de enriquecimiento en nitrógeno  
CEP: coeficiente de enriquecimiento en fósforo

## Resumen

En la subregión Pampa Ondulada, la erosión hídrica es uno de los procesos de degradación de las tierras más relevantes. Los procesos de escurrimiento y erosión favorecen, además de la pérdida de suelo, la de otros componentes edáficos como carbono, nutrientes y elementos traza, que pueden provocar la contaminación de los cuerpos de agua. El objetivo general del presente estudio fue: Caracterizar a partir de ensayos de simulación de lluvia, el volumen y la calidad del escurrimiento superficial de los suelos de la cuenca alta del arroyo Pergamino, ubicados en distintas posiciones del paisaje y bajo diferentes usos y manejos de la tierra. Se evaluaron las características de los escurrimientos provenientes de simulaciones de lluvia realizadas bajo dos intensidades (30 y 60 mm h<sup>-1</sup>), considerando dos esquemas de rotación en ambientes con aptitud agrícola (posiciones de loma y media loma) y diferentes anchos de franja riparia en el ambiente ganadero (posición de bajo). Se determinaron las características físicas y químicas de los suelos (espesor 0-5 cm), la biomasa aérea superficial y la pendiente de cada sitio de muestreo y las características de los escurrimientos (cantidad y calidad de agua y sedimento). Se comprobó un aumento en los coeficientes de escurrimiento, a medida que el ambiente analizado se encontraba más cercano al curso de agua. Solo hubo diferencias entre los dos esquemas de rotación en el escurrimiento y en la cantidad de suelo perdido en la posición de loma, cuando se aplicó la mayor intensidad de lluvia. El ancho de franja en el sector ganadero tuvo un efecto significativo sobre la cantidad y calidad del sedimento escurrido, independientemente de la intensidad de lluvia aplicada. En el ambiente agrícola, la concentración de nutrientes y carbono y sus cantidades totales perdidas, no difirieron entre los dos esquemas de rotación, independientemente de la posición en el paisaje y de la intensidad de lluvia aplicada.

**Palabras claves:** Simulación de lluvia, intensidad de lluvia, erosión laminar

## Abstract

In the Pampa Ondulada subregion, water erosion is one of the most important land degradation processes. The processes of runoff and erosion also favor soil loss, other edaphic components such as carbon, nutrients and trace elements, which can promote contamination of water stream. The general objective of the present study was to characterize, through rainfall simulation tests, the volume and quality of the soil surface runoff of the Pergamino upper basin, located in different landscape positions and under different soil uses and management. The characteristics of the runoff from rain simulations carried out under two intensities (30 and 60 mm h<sup>-1</sup>) were evaluated, considering two rotation schemes in environments with agricultural aptitude (upland and mid slope topographic positions) and different widths of riparian strip in the cattle environment (toe slope position). Physical and chemical soil characteristics (depth 0-5 cm), surface aerial biomass and the slope of each sampling site, and runoff characteristics (quantity and quality of water and sediment) were determined. An increase in runoff coefficients was observed, as the analyzed environment was closer to the watercourse. There were only differences between the two rotation schemes in the runoff and the amount of soil lost in the upland position, only when the highest rainfall intensity was applied. The width of strip in the livestock sector had a significant effect on the quantity and quality of the eroded sediment, regardless of the applied rain intensity. In the agricultural environment, nutrients and carbon concentrations and their total lost amounts did not differ between the two rotation schemes, regardless of the position in the landscape and the applied rain intensity.

**Key words:** Rain simulation, rain intensity, sheet water erosion

**CAPÍTULO 1**  
**INTRODUCCIÓN GENERAL**

---

## INTRODUCCIÓN

---

El suelo constituye uno de los componentes fundamentales de los ecosistemas terrestres y conjuntamente con la biodiversidad y el clima establece su calidad. La generación de información edáfica da sustento a la evaluación y al manejo de las tierras (Backhaus *et al.*, 2002; Hennings, 2002). La relación entre el uso de la tierra, su degradación y la producción de alimentos merece especial valoración en la agricultura y particularmente en el funcionamiento global del ambiente (Pimentel *et al.*, 1995; King, 2007). En efecto, aproximadamente 85% de las tierras agrícolas del planeta están degradadas por erosión, salinización y compactación, entre otros procesos (Walker & Salt, 2006). En Argentina se estima que actualmente existen 64,6 millones de ha afectadas por erosión, de las cuales el 32 % presenta grado severo/grave, aproximadamente equivalente a 51 veces la superficie de las Islas Malvinas (Casas & Albarracín, 2015; Panigatti, 2015). En la región pampeana y especialmente en la subregión Pampa Ondulada, la erosión hídrica es uno de los procesos de degradación de tierras más relevantes (Michelena *et al.*, 1989). Honorato (2000) señala que los procesos erosivos se caracterizan por ser relativamente lentos, intermitentes y recurrentes en el tiempo, ya que están asociados a la ocurrencia de lluvias o de tormentas de viento. Son a la vez progresivos, ya que se va perdiendo el suelo superficial. Esto significa que se trata de procesos irreversibles y su recuperación es a menudo imposible. En la Pampa Ondulada Argentina, la erosión afecta a más del 30% de las tierras (Irurtia *et al.*, 1988), siendo dominante como subproceso la erosión laminar o mantiforme. Este tipo de erosión superficial es provocada por el impacto de la gota de lluvia y moviliza sedimentos livianos, partículas poco densas y de escaso tamaño tales como agregados muy pequeños, limos, arcilla y coloides orgánicos. Este es difícil de predecir porque los efectos de sellamiento superficial que dependen de la estabilidad estructural, afectan diferencialmente al desprendimiento y al transporte del suelo desprendido (Nearing *et al.*, 1990).

La variable climática con mayor influencia en los procesos de erosión hídrica es la lluvia (Morgan, 2005). Sin embargo, no todas las tormentas son iguales, por lo que existen algunas más erosivas que otras. Variables como la cantidad de agua caída (mm), la energía e intensidad de una lluvia ( $\text{mm h}^{-1}$ ), son las que determinan la erodabilidad del evento. Así, ante la ocurrencia de una lluvia cuya intensidad es relativamente baja, la tasa de infiltración no será superada, por lo que no se producirá escurrimiento superficial, sin generarse el proceso



de erosión laminar, en surcos y la formación de cárcavas. A su vez, las gotas formadas en dicha lluvia no producirán un desprendimiento del suelo relevante, pues al ser estas de un tamaño medio menor a las desarrolladas en lluvias de alta intensidad, no contarán con suficiente energía cinética como para desprender partículas del suelo. Por otro lado, las lluvias intensas, no solo presentan una alta energía de desprendimiento, sino que también generan escorrentía superficial, dando lugar a los procesos erosivos anteriormente mencionados (García-Chevesich, 2008).

Hudson (1982) menciona que la intensidad de la lluvia a partir de la cual esta se torna erosiva es de  $25 \text{ mm h}^{-1}$ . En efecto, en un clima templado el 95 % del agua caída lo hace a intensidades bajas, mientras que el 5% restante puede causar erosión. Mientras que en un clima tropical, sólo 60% de la lluvia cae con baja intensidad, y el 40% restante contribuye a la erosión. Dicho autor también menciona que otro factor que diferencia a las lluvias erosivas de los climas templados y tropicales es su intensidad media, siendo esta de alrededor de 35 y 60  $\text{mm h}^{-1}$ , respectivamente. En nuestra región sería necesario caracterizar mejor las lluvias particularmente en función de los cambios en el régimen de precipitaciones ocurridos durante las últimas décadas (Magrin *et al.*, 2005a, Seager *et al.*, 2010; Barros, 2010).

El agua de lluvia ejerce su acción erosiva sobre el suelo mediante el impacto de las gotas de lluvia y mediante la escorrentía generada por el agua que no infiltra en el suelo (Suarez, 1980). Debido a la acción de la lluvia, los agregados del suelo son desintegrados en partículas más pequeñas, las que tapan los poros formando un sello superficial, provocando de esta manera una disminución en la tasa de infiltración y el aumento del escurrimiento superficial. Por su parte, el agua que escurre se carga de partículas del suelo en función de su velocidad, las que son posteriormente depositadas en lugares más bajos o conducidas hasta reservorios de agua o arroyos (Derpcsh, 2004, Vilches *et al.*, 2011).

Estas características del proceso generan costos ambientales en el lugar y fuera de los ambientes donde ocurre el proceso de erosión. Por un lado, la erosión hídrica genera una disminución de la productividad de las tierras, debido a la pérdida del horizonte superficial del suelo junto con sus nutrientes (Casas, 2003). A su vez, la depositación de los sedimentos desprendidos y acarreados por el agua de escurrimiento, reduce la capacidad de conducción de agua de los cauces que drenan los excesos de agua, con el consiguiente aumento en los riesgos de inundación. En 1988, Lal enunció, para suelos de África, que los dos efectos más importantes de la erosión sobre el suelo, son la degradación física y la pérdida de nutrientes y materia orgánica.

Los sedimentos transportados como resultado de este proceso de degradación, pueden generar contaminación, a partir de las sustancias químicas que quedan adsorbidas a las partículas transportadas (USEPA 1983, Nearing et al. 1991, Ongley, 1997, Carpenter *et al.*, 1998; Lavado & Zubillaga, 2008). El incremento en los niveles de nitrógeno y fósforo en los cuerpos de agua, da como resultado su eutrofización. El arrastre de fertilizantes y plaguicidas conlleva numerosos elementos traza, entre ellos numerosos metales pesados (Gimeno Garcia *et al.*, 2001; Andrade *et al.*, 2005). Adicionalmente y como consecuencia del proceso erosivo, al producirse la rotura de los agregados en sus constituyentes primarios, el carbono asociado a las partículas de arcilla puede ser más fácilmente liberado como dióxido de carbono, incrementando su concentración en la atmósfera (Morgan, 2005).

Los diferentes procesos de erosión, acelerados a partir de la intervención del hombre en la naturaleza, y su impacto productivo y ambiental operan a diferentes escalas espaciales y temporales. Según Stroosnijder (2005) hay cinco escalas relevantes para el estudio de los mismos: escala puntual ( $1 \text{ m}^2$ ), donde se evalúa la erosión laminar o en el entre surco; escala de parcela de escurrimiento ( $<100 \text{ m}^2$ ), que comprende también la erosión en surcos; escala de ladera y/o lote ( $< 1 \text{ ha}$ ), incorporando la depositación de sedimentos; y escala de pequeñas cuencas ( $<50 \text{ ha}$ ), donde se incluye además el efecto de la variabilidad de suelos y procesos. De acuerdo a lo señalado, las mediciones de escurrimiento y de erosión deben hacerse a la escala apropiada según el objetivo del estudio.

Una de las herramientas que pueden utilizarse para evaluar y cuantificar el proceso de escurrimiento y erosión son los simuladores de lluvia. La simulación de lluvia constituye un recurso científico-técnico viable para estudiar problemas ambientales donde el agua es el factor principal (Cepeda, 1999). Los simuladores de lluvia son equipos diseñados con la finalidad de aplicar agua en forma similar a la lluvia natural, bajo condiciones controladas, empleándose para investigar la respuesta de los diferentes suelos y de las distintas prácticas de manejo a la acción de las precipitaciones (Meyer, 1988). En este sentido y dependiendo de la superficie de análisis que abarque dicha herramienta, se podrán evaluar algunos componentes del proceso de erosión. Su uso presenta la ventaja de que se puede acelerar la obtención de resultados y controlar la cantidad y tipo de precipitación. Sin embargo, y dada la variación espacial de las propiedades edáficas, es necesario realizar varias repeticiones de los ensayos en los distintos ambientes del área a evaluar.

Las simulaciones de lluvia han sido extensamente utilizadas para la cuantificación de la escorrentía y de los procesos de erosión a diferentes escalas espaciales y para distintos

eventos de tormenta (Seeger, 2007), como también para determinar el impacto de la actividad humana sobre el suelo y la vegetación (Bergkamp *et al.*, 1996). Para poder evaluar el proceso de erosión laminar, se hace necesario trabajar con simuladores de lluvia con tamaños de parcela menores o iguales a 1 m<sup>2</sup> (Calvo Cases *et al.*, 1988, Nearing *et al.* 1991). En este sentido, los simuladores de lluvia implementados sobre microparcels están destinados a cuantificar los siguientes procesos: infiltración, escurrimiento, desprendimiento de partículas por impacto de la gota de lluvia y el correspondiente transporte de sedimentos suspendidos en el agua de escurrimiento.

Los análisis realizados con este tipo de herramientas han abarcado comparaciones de escurrimiento y erosión bajo diferentes condiciones climáticas (Boix-Fayos *et al.*, 1994; Imeson *et al.*, 1998), la caracterización hidrológica y de la erosión de diferentes unidades y elementos del paisaje (Cerdà *et al.*, 1998), el efecto de los cambios en el uso de la tierra (Lasanta *et al.*, 2000) y el estudio del comportamiento hidrológico de costras superficiales formadas durante el período de barbecho (Ries *et al.*, 2000; Ries & Langer, 2002; Seeger, 2007; Ries & Hirt, 2008). Las simulaciones de lluvia también han sido herramientas útiles para la parametrización y calibración de modelos de erosión de base física (Loch *et al.*, 2000; Seeger & Ries, 2002). Estos trabajos se han realizado con especial énfasis en analizar unos pocos parámetros de interés, como por ejemplo el grado de cobertura vegetal y su composición o la presencia de determinadas características en la superficie del suelo (Seeger, 2007).

En nuestro país también se ha utilizado dicha herramienta con distintos propósitos: estudiar el efecto de la cobertura en las distintas etapas del proceso de infiltración en tierras bajo siembra directa (De la Vega *et al.*, 2004), ajustar parámetros del modelo de infiltración de Green & Ampt (1911) (Castiglioni *et al.*, 2006), evaluar el proceso de infiltración en distintos ambientes de una microcuenca de la Pampa Ondulada (Castiglioni *et al.*, 2006), analizar la variabilidad temporal de dicho proceso (Castiglioni *et al.*, 2012), determinar la dinámica de escurrimiento y fragilidad de tierras con aptitud ganadera y con distinta historia de uso de la Pampa Ondulada (Chagas *et al.*, 2011), evaluar la pérdida de nutrientes en diferentes suelos del caldenal pampeano bajo distinto uso (Adema *et al.*, 2001), comparar resultados medidos en pastizales semiáridos del noroeste de la Patagonia con los estimados por el modelo WEPP (Chartier & Rostagno, 2010), determinar el efecto de la labranza sobre el escurrimiento superficial de las fracciones particuladas y disueltas de fósforo (Chagas *et al.*, 1999), analizar pérdidas de fósforo y glifosato por escurrimiento (Sasal *et al.*, 2015) y para

determinar en laboratorio el movimiento horizontal y vertical de las partículas desprendidas del suelo (Chagas *et al.*, 2004).

A partir de 1970, los suelos de la región pampeana han sido escenario de varios procesos interrelacionados que ocurrieron prácticamente en simultáneo. Se introdujo en el país el cultivo de soja. La buena adaptación de esta especie y sus precios internacionales favorables, favorecieron el proceso de “agriculturización”. Con el aumento de la superficie cultivada con soja, se obtuvo un desplazamiento de la ganadería hacia ambientes más marginales o su intensificación en sistemas confinados o semiconfinados (Conte *et al.*, 2008; Moscuza, 2010; Heredia, 2010), al mismo tiempo que hubo una descapitalización ganadera y liquidación de stocks. De esta manera, aumentó la presión de la actividad cría bovina extensiva sobre tierras imperfectas a mal drenadas, las que se ubican al borde de los cursos de agua, en las áreas rivereñas. Los animales que allí se encuentran, tienen acceso directo a los cursos de agua y a las posibles cárcavas que se generan en dichos ambientes, permaneciendo largo tiempo dentro del agua y en sus alrededores (Trimble & Mendel, 1995) lo que incrementa los procesos erosivos (Zaimes *et al.*, 2004, Chagas *et al.*, 2010; Darder *et al.*, 2012). Esto afecta negativamente la calidad del agua, la morfología del canal, la hidrología, la estructura del suelo adyacente y la vegetación dentro y en los alrededores del arroyo. Los impactos negativos incluyen aumento de nutrientes por depositación de orina y materia fecal dentro del arroyo, el pisoteo, con incremento de bancos de erosión y reducción de la vegetación, destrucción de las márgenes y compactación del suelo por el pisoteo (Belsky *et al.*, 1999).

La predominancia del monocultivo de soja en la Pampa Ondulada, con largos barbechos invernales, promueve el incremento porcentual de la superficie bajo suelo descubierto, aumentando su susceptibilidad al proceso de erosión, aún bajo siembra directa. En este sentido, Rienzi (2006) encontró en Argiudoles típicos de esta subregión, que si bien la evolución del proceso erosivo se reducía por la acción de la cobertura, este efecto era significativo a partir de valores de cubierta vegetal mayores al 60%. Por su parte, Sasal *et al.* (2010) analizando resultados de escurrimiento provenientes de parcelas, reportaron que las menores pérdidas de agua por escorrentía no estaban relacionadas directamente con la cantidad de rastrojo dejado en superficie por los distintos cultivos, sino que este proceso estaba más condicionado por el tiempo de ocupación de la vegetación viva sobre el terreno. De esta manera, los largos barbechos invernales favorecían la generación de escurrimiento respecto a aquellas situaciones con cultivos en desarrollo durante todo el año. En la década

del '90 se inició el período de “intensificación” de la agricultura, con la incorporación de nuevas tecnologías de fertilización y aumento en el consumo de fertilizantes y plaguicidas (Viglizzo *et al.*, 2003; Conte *et al.*, 2008; Heredia, 2010). Es muy posible que todas estas modificaciones hayan producido cambios en la estructura y funcionamiento de los arroyos pampeanos, con el consiguiente deterioro de la calidad de sus aguas (Viglizzo *et al.*, 2001, Viglizzo *et al.*, 2003; Cisneros *et al.*, 2012). Si bien es abundante la información generada acerca de los cambios físicos del suelo obtenidos como resultado de secuencias de cultivos contrastantes, son pocos los trabajos realizados en esta región, con la finalidad de evaluar a campo su efecto sobre los procesos de erosión, escurrimiento y contaminación.

Debido al aumento progresivo en el uso de agroquímicos y a la expansión de la frontera agrícola (Paruelo *et al.*, 2005), existe una necesidad creciente de identificar los elementos del paisaje que más contribuyen a la contaminación de las aguas superficiales, para aplicar prácticas de manejo capaces de reducir las cargas de contaminantes a niveles aceptables. De esta manera se pueden prevenir mayores daños a la calidad del agua de los arroyos que atraviesan las cuencas. A su vez, es importante conocer la cantidad de nutrientes, elementos traza y carbono que se exportan por erosión en las distintas secuencias de cultivo implementadas en la Pampa Ondulada, para poder implementar las prácticas necesarias que reduzcan la emisión de dichos elementos. De esta manera, se evitarían pérdidas de productividad de los cultivos y aumentos en los costos por la utilización de fertilizantes que compensen las pérdidas por erosión.

Para prevenir y/o mitigar los efectos de la eutrofización (EPA, 2000; Withers & Lord, 2002), es necesario identificar las relaciones causa-efecto entre las fuentes de nutrientes y su impacto sobre el cuerpo de agua, ya que las condiciones de flujo o la calidad del agua no son sólo indicadores del estado de los sistemas fluviales, sino también de los ecosistemas terrestres adyacentes (Zhou *et al.*, 2012). Los arroyos pampeanos poseen algunas características distintas de los arroyos de clima templado del hemisferio norte, dado que poseen menores caudales y sedimentos finos en el fondo (principalmente arcillas y limo). Se originan en depresiones poco profundas y están alimentados principalmente por la escorrentía subsuperficial. Además poseen escasa vegetación riparia en las nacientes y bajo ingreso de materia orgánica alóctona. Por estos motivos, es esperable que los arroyos regionales exhiban características funcionales particulares (Feijoó *et al.*, 1999). Estos cursos de bajo orden y pequeña escala, constituyen el sistema más apropiado para realizar estudios de calidad de agua ligados al uso del suelo. Estos sistemas lóticos son elementos hidrológicos muy

importantes del paisaje, debido a que conectan el ambiente terrestre con los ríos más grandes. Adicionalmente, suelen estar sujetos a pulsos de inundación en los cuales ocurre el desborde de las aguas hacia la llanura aluvial, situación que modifica los ciclos biogeoquímicos de nutrientes, la productividad de macrófitas y la diversidad biológica, entre otros (Mitsch *et al.*, 2008). Este fenómeno natural sólo es posible si existe conectividad entre el cuerpo de agua y la ribera. La extensión, ancho y continuidad longitudinal de la vegetación son algunos de los atributos más importantes de las comunidades riparias. La vegetación contribuye con su sistema radical a la retención de contaminantes (Mendoza *et al.*, 2015) y estabiliza las márgenes disminuyendo la erosión hídrica (Elosegi & Díez, 2009).

El arroyo Pergamino está situado en el norte de la provincia de Buenos Aires, siendo un arroyo típico de la Pampa Ondulada. La cuenca perteneciente a este curso de agua, también experimentó en las últimas décadas el crecimiento de la producción agrícola. Este arroyo se presenta erosionado y desgastado, incorporando a su caudal gran cantidad de partículas, arcilla y material calcáreo, aumentando aguas abajo el contenido de arena (CESA, 2004). Dentro de la cuenca del Arroyo Pergamino se han realizado algunos estudios de agua superficial y subterránea. Los mismos han mostrado una disminución de su calidad, revelando concentraciones de elementos que superan algunos umbrales para diferentes usos (Galindo *et al.*, 2007; Reynoso *et al.*, 2009). No obstante, estos estudios no pudieron determinar de qué manera incidió cada una de las posibles fuentes sobre el aporte total de elementos traza, nutrientes y carbono.

## 1.2 Hipótesis

**H1)** En la cuenca alta del Arroyo Pergamino, la asociación entre el tipo de suelo y el paisaje explica la variabilidad del escurrimiento del agua y su calidad respecto al uso y manejo del suelo.

**H2)** En el ambiente con aptitud ganadera, la distancia al curso de agua es inversamente proporcional a la cantidad y calidad de sedimento generado.

**H3)** El escurrimiento en las partes bajas del paisaje con uso ganadero, es superior al del sector agrícola, independientemente de la intensidad de lluvia.

**H4)** En el ambiente con aptitud agrícola, la secuencia de cultivos en la posición de media loma, modifica la infiltración acumulada independientemente de la intensidad de lluvia.

### 1.3 Objetivo general

Caracterizar, a partir de ensayos de simulación de lluvia, el volumen y la calidad del escurrimiento superficial de los suelos de la cuenca alta del arroyo Pergamino, ubicados en distintas posiciones del paisaje y bajo diferentes usos y manejos de la tierra.

### 1.4 Objetivos específicos

- Analizar el comportamiento de las precipitaciones en el partido de Pergamino durante la década 2001-2010.
- Caracterizar algunas propiedades físicas y químicas del suelo superficial, la pendiente general y la cantidad de biomasa vegetal aérea de los distintos sitios donde se realizó el estudio.
- En el ambiente con aptitud ganadera, analizar el efecto sobre la cantidad y calidad de los escurrimientos de diferentes anchos de franja riparia respecto al curso de agua.
- En el ambiente con aptitud agrícola, analizar en la posición de loma y media loma el comportamiento de distintas sucesiones de cultivo (rotación y monocultivo de soja) respecto a la cantidad y calidad de los escurrimientos producidos.
- Analizar concentración y cantidad de  $Nt$ ,  $N-NO_3^-$  y  $Pt$ , provenientes de los escurrimientos y en los sedimentos generados por las simulaciones de lluvia.
- Explorar en los sitios bajo agricultura, la concentración de algunos elementos traza en el sedimento erosionado, y su relación con la concentración de dichos elementos en el suelo.

**CAPÍTULO II**  
**MATERIALES Y MÉTODOS**

---



## MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Descripción del área de estudio

La cuenca del arroyo Pergamino es una cuenca típica, de acuerdo a indicadores hidrológicos como: divisoria de aguas definida, red de drenaje desarrollada y punto de descarga único (Uriburu Quirno *et al.*, 2010). Pertenece a la región hidrogeológica ubicada en el centro de la subregión denominada Pampa Ondulada, caracterizada por un relieve suavemente ondulado con pendientes largas (700-1500 m) y undireccionales, variables en el intervalo de 0,5 a 3%. Esta subregión posee una condición fisiográfica que facilita el drenaje superficial hacia el NE (Cuenca del Plata) y limita los anegamientos al delta del Paraná y a las planicies de inundación de ríos importantes como el Luján, Reconquista, Matanza, Paraná y de la Plata (Instituto Nacional del Agua [INA], 2007; Reynoso y Andriulo, 2010) (Figura 2.1).

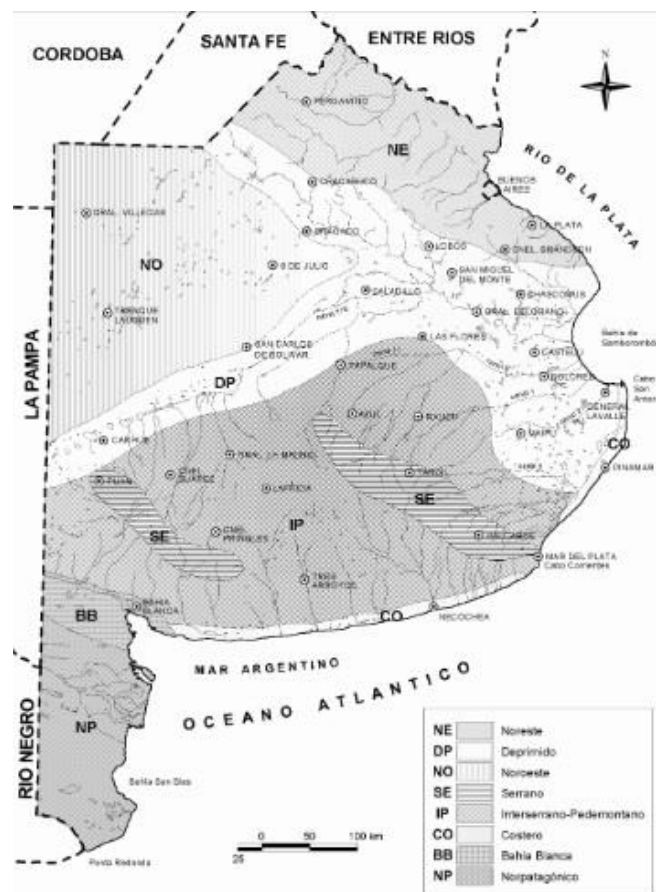


Figura 2.1 Regiones hidrogeológicas de la provincia de Buenos Aires.

Tiene una superficie aproximada de 2.092 km<sup>2</sup> y está ubicada dentro de la cuenca del río Arrecifes (cuenca de 10.336 km<sup>2</sup>), que recibe como tributarios a los ríos Rojas, Salto y al arroyo Pergamino (Galindo *et al.*, 2007) (Figura 2.2). Este último, tras recorrer 19 km desde su nacimiento en la Laguna del Pescado, atraviesa la ciudad homónima y desemboca en el río Arrecifes, después de un recorrido total de 109 km.

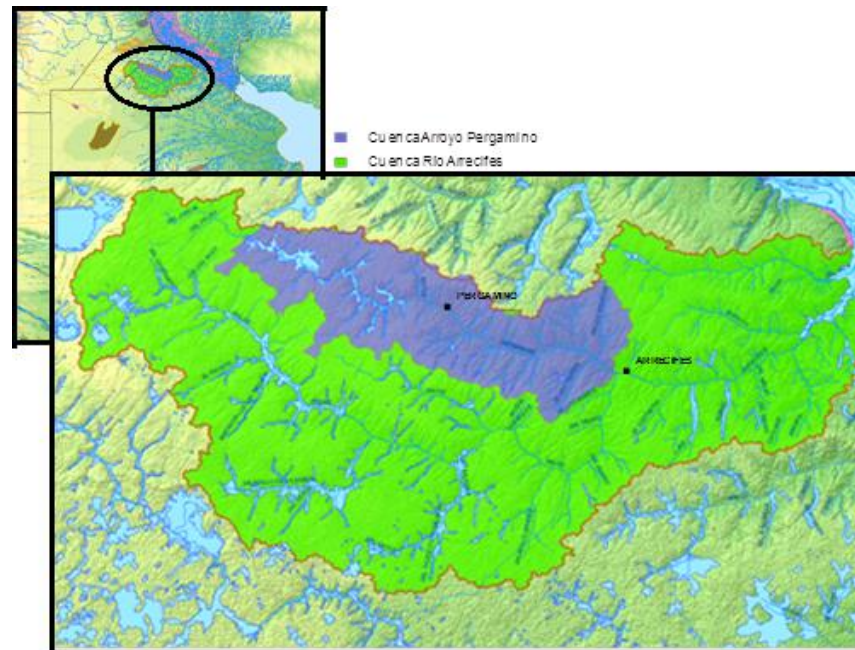


Figura 2.2 Ubicación geográfica de la cuenca del arroyo Pergamino.

El área de estudio se ubicó en la cuenca alta del arroyo Pergamino, abarcando una superficie aproximada de 110 km<sup>2</sup>. A su vez, dentro de dicha área se delimitaron 8 microcuencas (Figura 2.3) con diferentes superficies (Tabla 2.1).

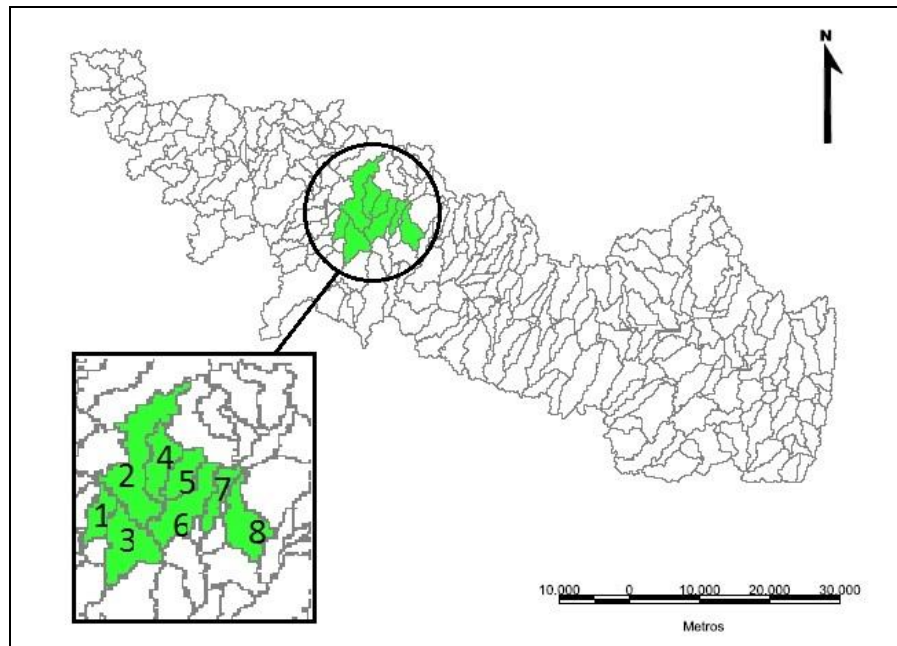


Figura 2.3 Ubicación de la cuenca alta del arroyo Pergamino y detalle de las ocho microcuencas.

Tabla 2.1: Superficie de cada microcuena

Microcuena	Superficie (ha)
1	622
2	2370
3	1400
4	891
5	662
6	1292
7	570
8	1169

### 2.1.1 Suelos

#### *Características edáficas*

Los suelos de la cuenca son Molisoles, profundos, pudiendo alcanzar hasta 2 m sin presentar limitaciones dentro del perfil, lo que permite un alto almacenamiento de agua. Estos suelos se han desarrollado sobre materiales loésicos de distinta granulometría según sea el área de depositación considerada, siendo en general de textura más gruesa sobre la margen derecha del arroyo Pergamino, donde domina la Serie Rojas, los cuales presentan mejores características físicas que los desarrollados sobre la margen izquierda del mencionado arroyo,

donde prevalece la Serie Pergamino. Al ser esta última serie más vulnerable, se decidió realizar el estudio sobre dicho sector.

En las posiciones altas del paisaje predominan los Argiudoles típicos, familia fina illítica térmica (INTA, 1972) con textura franco limosa, excepto el horizonte B textural, que presenta más del 35% de arcilla, textura franco arcillo limosa y permeabilidad lenta. Las lomas se corresponden con la serie Pergamino (Unidades cartográficas Pe y Pe 13), siendo su capacidad de uso I-I/2 y I-2, respectivamente. Las medias lomas corresponden a complejos conformados por distintas fases por erosión de la serie Pergamino (Unidades cartográficas Pe 2, 8, 15, 16 y 17), con capacidades de uso IIe (moderadamente erosionada), IIs (ligeramente afectada por alcalinidad), IIIs (afectada por alcalinidad), IIIes (moderadamente erosionada y afectada por alcalinidad) y IIIs (afectada por alcalinidad), respectivamente (INTA, 1972).

En las posiciones bajas del paisaje, los suelos forman asociaciones y complejos muy heterogéneos, que contienen proporciones variables de los suelos encontrados en las tierras altas, entremezclados con Alfisoles salinos y alcalinos, típicos de los bordes del arroyo. Estos suelos se corresponden con los complejos de suelos Arroyo Pergamino (Co3) y Arroyo Sin nombre (Co5) (INTA, 1972), que están localizados en áreas con pendientes del 0 a 1%, aumentando su grado cerca de los cursos de agua (hasta el 2%). Las áreas más cercanas al curso de agua tienen algunos suelos aluvionales alcalinos parcialmente edafizados, es decir con escaso desarrollo de horizontes. En general, estos complejos ubicados en las posiciones bajas, son imperfectamente drenados y se usan predominantemente para ganadería, siendo sus principales limitaciones la alcalinidad y cierto grado de erosión. A los mismos se los ha incluido en las subclases IVws y VIws de capacidad de uso (INTA, 1972) (Figura 2.4). Además, existe un porcentaje menor de unidades cartográficas correspondientes a otras series de suelos, poco representativas y de escasa superficie (serie Lima, Las Gamas, etc.) (Figura 2.4).

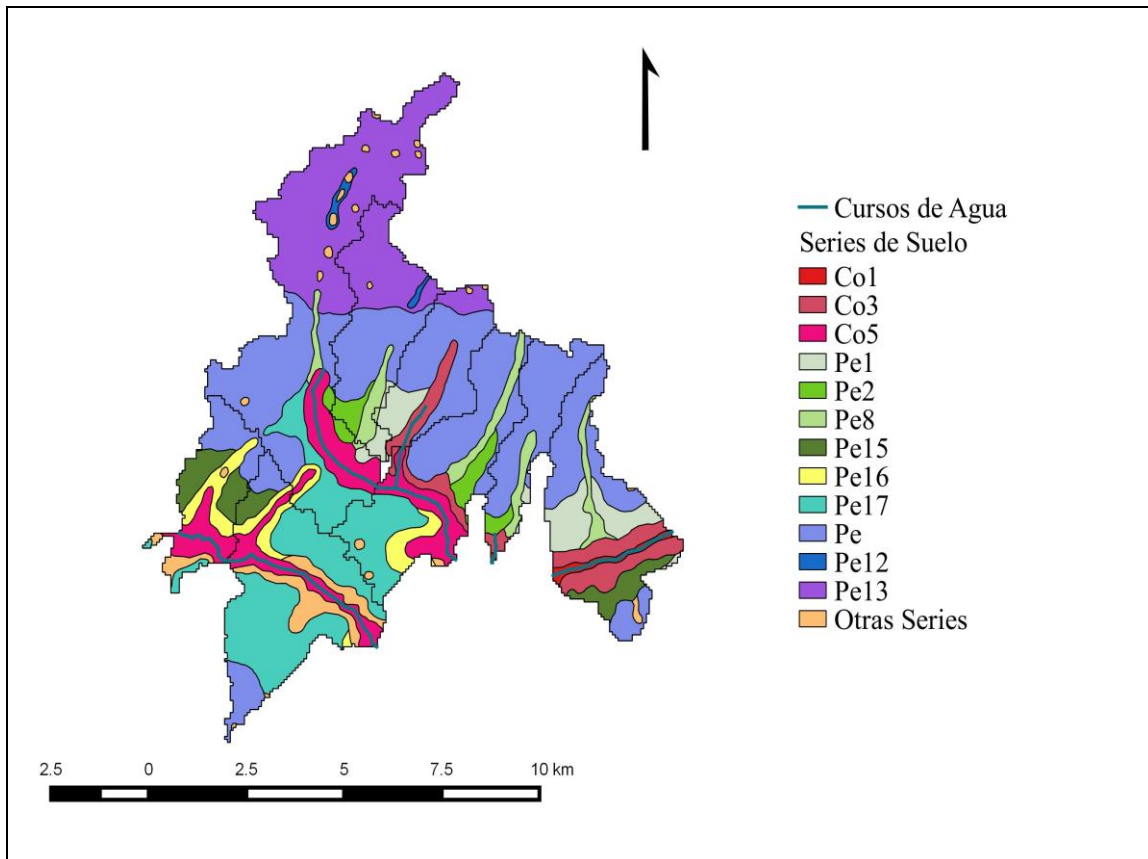


Figura 2.4 Mapa de tipos de suelo y su capacidad de uso en la cuenca alta del arroyo Pergamino.

### *Uso del suelo*

En general, los suelos de la subregión Pampa Ondulada tuvieron un nivel elevado de fertilidad natural. Sin embargo, la falta de una fertilización balanceada, los bajos niveles de reposición de nutrientes del suelo, sumados a la pérdida de materia orgánica, han conducido a la disminución de la fertilidad, registrándose descensos de un 45% y 42% de NT y PT respectivamente, para un suelo de Pergamino bajo 80 años de agricultura (Andriulo *et al.*, 1996). En los últimos años, la aplicación de fertilizantes se ha incrementado notablemente (Capelle, 2011), pero en comparación con otras regiones agrícolas del mundo (E.E.U.U. o países europeos), las dosis utilizadas son modestas, de tal manera que no se llegan a reponer los nutrientes exportados con cereales y oleaginosas. Por lo tanto, la producción agraria Argentina aún se hace a expensas de la fertilidad natural de los suelos (Heredia, 2010).

El área seleccionada para el presente estudio no tiene influencia de asentamientos urbanos y es representativa de la producción agropecuaria regional. En las partes altas del paisaje, el uso actual de la tierra es predominantemente agrícola. Desde mediados de la

década del 90 se registró un proceso de intensificación agrícola, caracterizado por el uso creciente de agroquímicos junto a la adopción de la siembra directa (FAO, 2004). Las rotaciones incluyen los cultivos de maíz, trigo, soja y sorgo, con predominancia de soja. Generalmente, los cultivos son sembrados sin laboreo, siendo la siembra directa un sistema de implantación de cultivos muy difundido. El trigo y el maíz se fertilizan con dosis variables de P y N, mientras que la soja se fertiliza con P (Tabla 2.2). Las dosis medias de fertilizantes fosforados que generalmente se aplican son  $19 \text{ kg ha}^{-1}$  de fósforo para trigo y maíz,  $10 \text{ kg ha}^{-1}$  para soja de 1° y 2°, mientras que para los recursos forrajeros las dosis son menores a las utilizadas en agricultura. Las dosis más altas corresponden a los cultivos que ocupan la menor superficie (trigo: 13% y maíz: 15%), fertilizándose el 99% y 98% de la superficie sembrada, respectivamente. La soja, si bien ocupa el mayor porcentaje de la superficie (soja de 1°: 57% y soja de 2°: 16%), utiliza dosis más bajas y se fertiliza un porcentaje menor de la superficie sembrada: 88% y 21% de la superficie es fertilizada para soja de 1° y de 2°, respectivamente (Cabrini & Calcaterra, 2009). Las dosis promedio de fertilizantes nitrogenados que se aplican son de  $61 \text{ kg ha}^{-1}$  de N para trigo y maíz, mientras que para los recursos forrajeros, las dosis son menores que las utilizadas en agricultura (Cabrini & Calcaterra, 2009), siendo la soja fertilizada con nitrógeno en muy pocas ocasiones (Restovich *et al.*, 2012).

Aunque en muy bajo porcentaje, en esta región se practica el riego por aspersión (Abraham & Gramicci, 2007). Sin embargo, durante los años en que se realizó el trabajo del presente estudio, no se practicó riego complementario dentro de las microcuencas seleccionadas. Por su parte, la ganadería ocupa fundamentalmente los sectores bajos del paisaje (Manuel-Navarrete *et al.*, 2005; Rearte, 2007).

Tabla 2.2: Dosis promedio de nutrientes de fertilizantes minerales utilizados por las empresas agrícolas medianas (151 – 500 ha) para los cultivos típicos de la cuenca del Arroyo Pergamino. Fuente: (Cabrini & Calcaterra, 2009).

Nutrientes	Trigo	Maíz	Soja 1 <sup>a</sup>	Soja 2 <sup>a</sup>
	Dosis ( $\text{kg ha}^{-1}$ )			
Nitrógeno	67	73	0	0
Fósforo	20	22	9	4

### 2.1.2 Clima

A lo largo del siglo XX diferentes autores han clasificado las características bioclimáticas de la Tierra de diferentes formas, con diferentes objetivos y basándose en

distintos criterios. Entre las clasificaciones más importantes se encuentra la de Köppen (1918) que incluye variables de temperatura y precipitación media, siendo la zona de estudio de clima templado, con temperaturas medias diarias que oscilan entre 10 y 12 °C en el invierno y 23 a 25 °C en el verano y una humedad relativa entre 70 y 73%. La precipitación media anual histórica es de 984 mm (período 1910-2015) (Estación meteorológica EEA Pergamino, INTA), siendo las estaciones más lluviosas: primavera, verano y otoño. Sin embargo, la irregularidad de las precipitaciones y las altas temperaturas hacen que se produzcan, generalmente en el verano (diciembre-enero), déficits hídricos de diferente magnitud (Reynoso & Andriulo, 2009). En los últimos diez años se ha comprobado la ocurrencia de ciclos muy húmedos, seguidos de ciclos muy secos (Portela *et al.*, 2006; Darder *et al.*, 2016).

Para estudiar el comportamiento de las precipitaciones se analizaron datos históricos de precipitaciones a partir de los cuales se calculó el coeficiente de variación decádica desde el año 1930 hasta el año 2010. Se analizaron los registros de precipitaciones horarias recopilados en la estación meteorológica (Figura 2.5 a) desde el año 2001 hasta el año 2010 y se separaron las lluvias que presentaron una intensidad mayor a 25 mm h<sup>-1</sup>, aplicando la escala propuesta por Hudson (1982). Los registros fueron generados a partir del pluviógrafo del tipo sifón (Figura 2.5 b) que posee en el interior del depósito donde se recoge la precipitación una plumilla que registra la hora de comienzo y de finalización de la precipitación, así como su intensidad (l m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>). Se determinó el número de lluvias caídas con una intensidad mayor a 25 mm h<sup>-1</sup> para cada año y el porcentaje relativo de la lámina caída a partir de dichas lluvias respecto al total anual. También se calculó su intensidad media, y la cantidad de lluvias promedio por año, dentro del rango de 25 y 45 mm h<sup>-1</sup>.

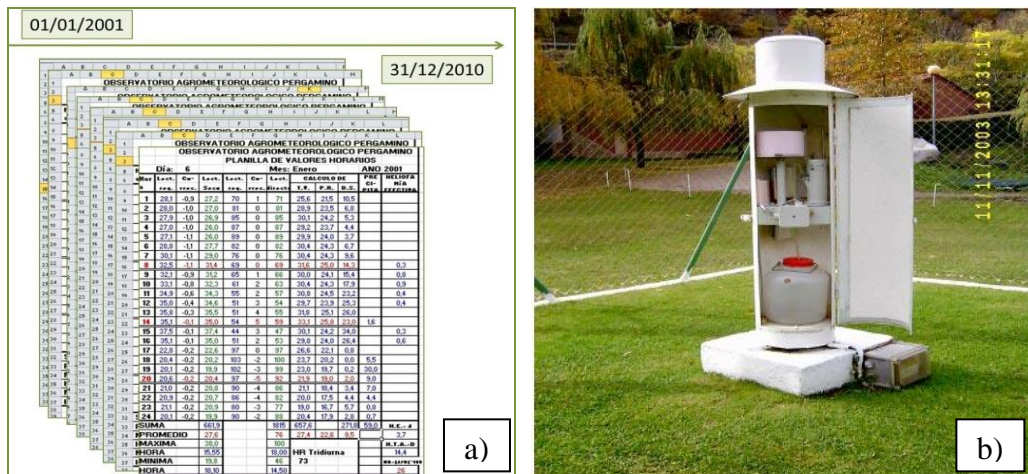


Figura 2.5: a) Partes meteorológicos analizados (n= 746). b) Pluviógrafo

## **2.2 Ensayos de simulación de lluvia realizados a campo**

Con el objetivo de analizar el comportamiento de la relación lluvia/escurrimiento en los distintos ambientes y usos de la tierra existentes, se realizaron simulaciones de lluvia mediante un microsimulador (Figura 2.6). La selección de este artefacto se debió a que sus dimensiones facilitan su traslado y a que no es tan pequeño como para aportar resultados con alta variabilidad. En este sentido, Irurtia & Mon (2004) recomiendan para disminuir la variación en los resultados de las determinaciones de infiltración, equipos no menores a los 20-30 cm de diámetro o de ancho. A su vez, la ventaja que ofrece esta metodología, es que incluye el efecto del impacto de la gota de lluvia sobre el suelo, lo que la acerca a las condiciones que ocurren normalmente a campo respecto a la relación lluvia/escurrimiento. En la parte superior del simulador está ubicado el portagoteros de acrílico, en cuya base están los 49 picos formadores de gotas, los cuales son tubos de plástico con un diámetro interno de 0,5 mm, que forman gotas con 4,7 mm de diámetro que caen desde 150 cm de altura sobre parcelas enmarcadas por un bastidor metálico de 50 cm de lado. Estas parcelas se clavan cuidadosamente a 6 cm de profundidad, sobresaliendo 5 cm por encima de la superficie (Irurtia & Mon, 2004). Las mismas presentan una abertura en uno de sus laterales, para poder recoger el agua de escurrimiento en un recipiente graduado. De esta manera, teniendo en cuenta la cantidad de lluvia aplicada y el volumen de agua escurrida para un mismo intervalo de tiempo (5 minutos), se puede determinar la lámina de agua infiltrada en las distintas etapas del ensayo, como también estimar la tasa de infiltración y sus cambios en función del tiempo transcurrido.



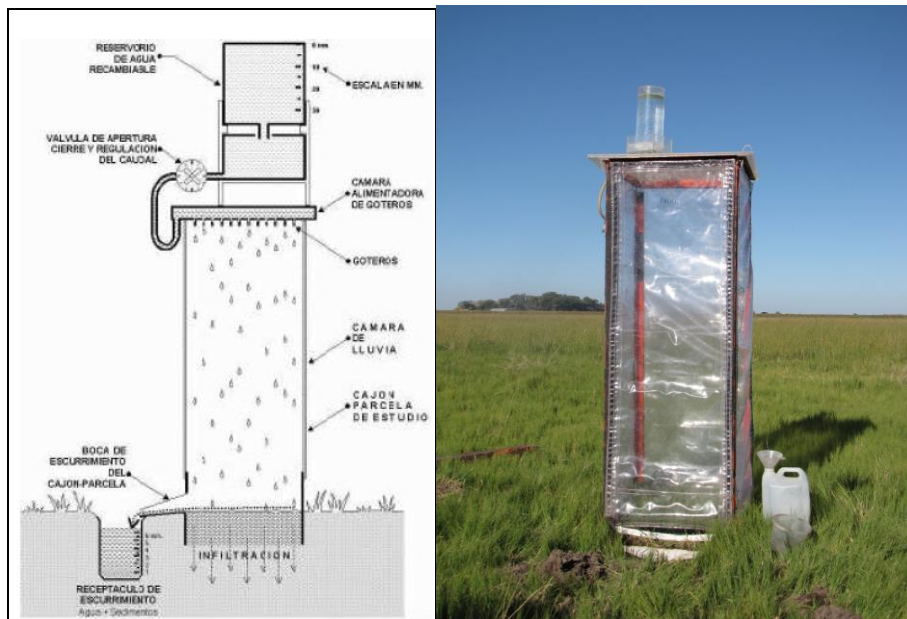


Figura 2.6: Microsimulador de lluvia (Irurtia & Mon, 2004).

### 2.2.1 Elección de las intensidades de lluvia aplicadas y duración de cada ensayo

La elección de las intensidades de lluvia surgió de un análisis realizado con los partes meteorológicos diarios del período 2001-2010, generados por el área de Agrometeorología (INTA-EEA Pergamino). Para realizar dicho análisis, primero se identificaron las máximas intensidades de lluvia horaria diaria, agrupándolas en intervalos de intensidad creciente a partir de los  $10 \text{ mm h}^{-1}$ , dado que valores menores no corresponden a lluvias de carácter erosivo (Wischmeier & Smith, 1978). De acuerdo a los resultados de dicho análisis se comprobó que las intensidades de lluvia menores a  $45 \text{ mm h}^{-1}$  fueron predominantes en todos los años (entre el 77 y 99%). A su vez, los valores medios dentro de las intensidades de  $10$  y  $45 \text{ mm h}^{-1}$  y entre  $45$  y  $100 \text{ mm h}^{-1}$  fueron  $30$  y  $60 \text{ mm h}^{-1}$ , respectivamente. En consecuencia, dichas intensidades de lluvia ( $30 \text{ mm h}^{-1}$  y  $60 \text{ mm h}^{-1}$ ) fueron elegidas para las simulaciones como representativas para nuestra región de lluvias de intensidad moderada y elevada.

La duración de cada ensayo de simulación de lluvia fue de una hora para los de mayor intensidad y de dos horas para los de menor intensidad. Estos lapsos de tiempo se establecieron para poder recolectar una cantidad de escurrimiento significativa y obtener una cantidad de sedimentos suficiente para su posterior análisis en laboratorio.

### 2.2.2 Sitios de muestreo

Para poder abarcar la variabilidad de los suelos presentes dentro del área bajo estudio, en cada microcuenca se separaron distintos ambientes según su posición en el paisaje: bajo, media loma y loma. También se contempló el diferente uso de la tierra.

En las posiciones bajas del paisaje, el uso de la tierra es el pastoreo para engorde mediante el aprovechamiento de pasturas naturales. Las lomas y medias lomas están bajo agricultura continua, con alternancia de cultivos bajo siembra directa. Los manejos más frecuentes son los típicos encontrados en la Pampa Ondulada. Estos consisten en monocultivo de soja o una alta proporción de dicho cultivo respecto a los restantes (S) y rotaciones de cultivos que combinan S, maíz (M) y trigo (T) en proporción variable (R). Dentro de estas secuencias se encontraron algunos lotes donde hubo anteriormente otros cultivos como cebada, raigrás, manzanilla, avena, arveja y centeno.

Por lo tanto, para evaluar el efecto del manejo del suelo sobre las características y calidad del escurrimiento generado por la aplicación de lluvia simulada, se seleccionaron tanto en loma como en media loma, lotes con dos usos de la tierra contrastantes: S y R, realizando las determinaciones luego de la cosecha de M o de S.

A su vez, con el objetivo de poder analizar dentro de los bajos el efecto de la distancia respecto al curso de agua o la dimensión de la franja pastoreada, se estudiaron en forma separada tres sectores paralelos al Arroyo Pergamino: franja angosta (0-6 m), franja media (0-30 m) y franja ancha (0-100 m).

Los muestreos se realizaron en lugares que tuvieran una cobertura representativa del tipo de uso de la tierra seleccionado. Las fechas de realización de los mismos fueron: marzo de 2011, para aquellos correspondientes a la aplicación de una lluvia simulada con una intensidad de  $60 \text{ mm h}^{-1}$ , y marzo de 2013 para los que la intensidad de lluvia fue de  $30 \text{ mm h}^{-1}$ . El trabajo de campo correspondiente a cada año se efectuó en el menor tiempo posible, con la intención de que no se presentaran diferencias en el contenido de humedad inicial del suelo entre las distintas determinaciones. En cada sitio donde se realizó el ensayo de simulación de lluvia, se determinó a su vez la pendiente del terreno y otras variables edáficas detalladas más adelante. Dado que el objetivo del trabajo no fue comparar el efecto de la aplicación de distintas intensidades de lluvia, los lugares seleccionados para medir la tasa de infiltración del suelo en muchos casos no coincidieron entre las dos intensidades analizadas. En la Figura 2.7 se muestran los sitios donde fueron realizadas las determinaciones.

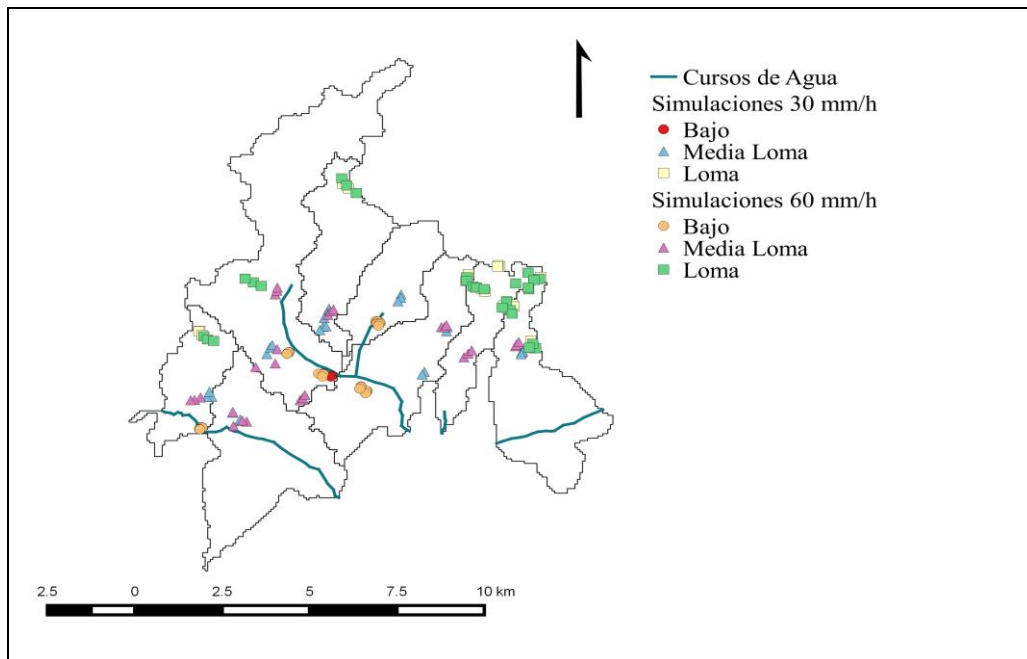


Figura 2.7: Ubicación de los ensayos de simulación de lluvia para las dos intensidades ( $30 \text{ mm h}^{-1}$  y  $60 \text{ mm h}^{-1}$ ).

Para cada sitio de muestreo se realizaron 3 repeticiones. En total se realizaron 85 simulaciones a  $60 \text{ mm h}^{-1}$ , efectuándose estas en lomas (28), medias lomas (28) y bajos (29), mientras que a  $30 \text{ mm h}^{-1}$  se hicieron 74 simulaciones en lomas (27), medias lomas (27) y bajos (20). La diferencia en la cantidad de simulaciones realizadas en los bajos (figura 2.8) entre intensidades de lluvia, se debe a que a  $30 \text{ mm h}^{-1}$  solamente se eligieron dos anchos de franja paralela al curso de agua (angosta y ancha) (Tabla 2.4).

Tabla 2.4: Número de simulaciones de lluvia realizadas para cada intensidad ( $30 \text{ mm h}^{-1}$  y  $60 \text{ mm h}^{-1}$ ), en cada posición del paisaje y para los distintos usos de la tierra analizados.

Posición	Ancho franja/manejo	Intensidad ( $\text{mm h}^{-1}$ )	
		60	30
Año		2011	2013
Bajo	Angosta	10	10
	Media	9	-
	Ancha	10	10
Media Loma	S	9	6
	R	19	21
Loma	S	15	15
	R	13	12



Figura 2.8: Simulación de lluvia en el sector bajo del paisaje.

### 2.2.3 Variables analizadas en cada ensayo de simulación

Con la información proveniente de estos ensayos se estimaron los siguientes parámetros:

- **Tiempo transcurrido hasta el inicio del escurrimiento (minutos) (TIE):** minutos hasta que la parcela del simulador de lluvia comenzó a desagotar el exceso de agua superficial en el vaso recolector.
- **Infiltración acumulada (mm) (Ia):** lámina de agua de lluvia que ingresó en el suelo durante el período del ensayo.
- **Tasa de infiltración de equilibrio o infiltración básica (mm h<sup>-1</sup>) (Ib):** Promedio de la tasa de infiltración de las tres últimas lecturas realizadas antes de finalizar el ensayo, las cuales siempre presentaron alta estabilidad en la tasa de infiltración.
- **Coefficiente de escurrimiento (%) (Coef esc.):** relación porcentual entre los milímetros de escurrimiento y los de lluvia total aplicada.
- **Volumen de escurrimiento (l ha<sup>-1</sup>) (Vol esc.):** Transformación del valor obtenido para lámina de escurrimiento, sabiendo que 1 mm ha<sup>-1</sup> = 10000 l ha<sup>-1</sup>.
- **Curva número (CN):** Si bien el método de la curva número (CN) fue desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (USDA-NRCS 2010) para predecir el escurrimiento en superficies que oscilan entre las 0,0971 y 18600 ha, en el presente trabajo se empleó dicha metodología con la finalidad de comparar los resultados de los distintos tratamientos analizados. Para ello, a partir de los datos de lámina de escurrimiento y de lluvia de cada simulación efectuada, se calculó el valor de S

(retención potencial máxima al comienzo de la tormenta), aplicando la siguiente ecuación (Yoo *et al.*, 1993):

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

Siendo P: lámina de lluvia (mm) y Q: lámina de escurrimiento (mm)

Posteriormente, los valores de S fueron transformados a CN mediante la siguiente fórmula (Hawkins, 1993):

$$CN = 25400 / (254 + S)$$

### 2.3 Estimación de la pendiente del terreno

Para estimar la pendiente general (%) de cada lote donde se realizaron las simulaciones, se lo recorrió, tomándose 10 puntos con su altura para construir un mapa de curvas de nivel de cada lote y obtener la dirección de la pendiente predominante. Para todas las mediciones se utilizó un GPS geodésico (Figura 2.9).



Figura 2.9: GPS Geodésico.

## 2.4 Análisis de suelo, agua, sedimento y material vegetal

### 2.4.1 Muestreo

En el mismo momento de la realización de los ensayos de simulación de lluvia, se tomaron muestras de los primeros 5 cm del suelo contiguo a cada parcela para evaluar distintas propiedades físicas y químicas edáficas (Figura 2.10 a). Esta profundidad fue elegida teniendo en cuenta que se está midiendo erosión laminar. Es esperable que las modificaciones edáficas se produzcan muy cerca de la superficie del suelo.

Al cabo de una hora o dos horas de simulación de lluvia, según la intensidad elegida, se recuperó el líquido y el sedimento escurrido para calcular el volumen de escurrimiento (Vol esc.) y la masa de sedimento transportada (SE) (Figura 2.10 b). Este último parámetro se obtuvo por filtración del agua escurrida, secado a 40°C del sedimento retenido, y posteriormente pesado del mismo. Cuando se contó con una masa suficiente de sedimento, se lo destinó al análisis de elementos.

A su vez, a la finalización de cada ensayo, se extrajo la biomasa vegetal sobre el suelo (Figura 2.10 c) que se encontraba dentro de cada parcela. Esta se llevó a estufa a 40 °C durante 48 horas y luego se pesó, determinando el peso de la materia seca (MS), la cual se expresó en  $\text{kg ha}^{-1}$ .



Figura 2.10: Muestro de suelo (a), recolección de escurrimientos (b) y extracción de la biomasa aérea sobre el suelo (c).

### 2.4.2 Análisis de laboratorio

#### 2.4.2.1 Suelo

Sobre las muestras de los primeros cinco centímetros de suelo, tomadas al lado de cada parcela se hicieron las siguientes determinaciones:

- **Carbono total (Csu)**, combustión seca, utilizando un analizador elemental marca LECO (Nelson & Sommers, 1996)

- **Nitrógeno total (Nsu)**, combustión seca, utilizando un analizador elemental marca LECO (Nelson & Sommers, 1996).
- **Nitratos (N-NO<sub>3</sub>su)**, método destilación (Bremner, 1960). Citado por Black, CA eds. (1965).
- **Fósforo total (Ptsu)**, digestión con ácido perclórico y colorimetría (Sommers & Nelson, 1972)
- **Fósforo extractable (Pesu)**, método pH < 7 Bray & Kurtz N°1 pH > 7 Olsen, citado por Black, CA eds. 1965
- **pH**, método potenciométrico (relación suelo: agua 1:2.5). Autor SSSI, 1930, citado por Black AC eds. 1965.
- **Conductividad eléctrica (CEsu)**, método potenciométrico (relación suelo: agua 1:2.5). Autor SSSI, 1930, citado por Black AC eds. 1965.
- **Sodio intercambiable (Na)**, método de saturación de amonio. Autores Schollenberger & Simon, 1945, citado por Black CD eds. 1965.
- **Humedad gravimétrica (H)**: cálculo gravimétrico en base seca. (Hillel, 1980).
- **Textura- (Porcentaje de arena, arcilla y limo)** Método Pipeta de Robinson (Robinson, 1922), determinación del tamaño de partícula por sedimentación. (arcilla: < 2 μm, limo: 2 – 50 μm y arenas: 50 – 2000 μm.)
- **Densidad aparente (Dap)** estimada a partir de la MO y textura (Adams, 1973).

$$\rho_b = \frac{100}{\%OM / \rho_{OM} + 100 - \%OM / \rho_m}$$

$$\rho_{OM} = 0.224 \text{ g cm}^{-3}$$

$$\rho_m = 1.35 + 0.0045 * \%arena - 0.00006 * (44.7 * \%arena)^2 + 0.06 * \log(5)$$

$$\rho_m = 2.6 \text{ g cm}^{-3}$$

- **Elementos traza (ET)**: Cobre (Cusu), Manganeseo (Mnsu), Hierro (Fesu) y Zinc (Znsu), digestión por el método de agua regia (McGrath & Cunliffe, 1985) y con ácido concentrado en horno de microondas, con control de temperatura y presión, conforme al método EPA 3051 (USEPA, 1996) (Figura 2.11).

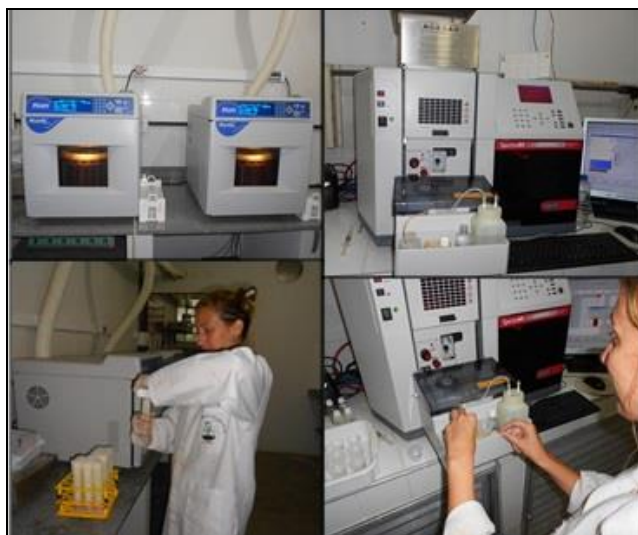


Figura 2.11: Determinación de elementos traza durante pasantía (en el marco del convenio FAUBA-URRJ) realizada en marzo de 2014 en la Universidad Rural de Rio de Janeiro (Brasil).

#### 2.4.2.2 Agua de escurrimiento

Sobre las muestras de agua de escurrimiento, recolectadas a la salida de la parcela, se hicieron las siguientes determinaciones:

- **Nitrógeno total (N<sub>ag</sub>)**, método Kjeldahl, digestión con aleación Devarda sobre muestra sin filtrar (ISO 10048 y SIS 02 81 01).
- **Nitratos (N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>ag)**, método colorimétrico del ácido fenoldisulfónico sobre muestra filtrada por filtro de membrana de acetato de celulosa de 0.45µm. (APHA-AWWA-WPCF, 1989).
- **Fósforo total (P<sub>tag</sub>)**, digestión con ácido sulfúrico-ácido nítrico y colorimetría en muestra sin filtrar (APHA-AWWA-WPCF).

#### 2.4.2.3 Sedimento

Sobre el sedimento obtenido por filtrado del agua escurrida, se hicieron las siguientes determinaciones:

- **Carbono total (C<sub>se</sub>)** por combustión seca, utilizando un analizador elemental marca LECO (Nelson & Sommers, 1996)
- **Nitrógeno total (N<sub>se</sub>)** por combustión seca, utilizando un analizador elemental marca LECO (Nelson & Sommers, 1996)



- **Fósforo total (Ptse)** con la técnica de digestión con ácido perclórico y colorimetría (Sommers & Nelson, 1972)
- **Metales pesados:** Cobre (Cuse), Manganeso (Mnse), Hierro (Fese) y Zinc (Znse). Digestión por el método de agua regia (McGrath & Cunliffe, 1985) y con ácido concentrado en horno de microondas, con control de temperatura y presión, conforme al método EPA 3051 (USEPA, 1996).

Con esta información se calculó el coeficiente de enriquecimiento (CEn), obtenido mediante el cociente entre la concentración de un elemento (C, N, Pt, Cu, Mn, Fe, Zn) en el sedimento y su concentración en el suelo:

$$CE_x = \frac{([elemento\ x]_{sedimento})}{([elemento\ x]_{suelo})}$$

## 2.5 Análisis Estadístico

Los análisis estadísticos se realizaron con el software Infostat (2015). Se realizó análisis de varianza de las propiedades físicas y químicas del espesor 0-5 cm, parámetros que caracterizaron a los escurrimientos y la biomasa vegetal y se compararon las medias de diferentes posiciones del paisaje (loma, media loma y bajo) y franjas (ancha, media y angosta) de la posición bajo mediante test LSD Fisher ( $p < 0,05$ ). Los criterios de clasificación para cada intensidad de lluvia fueron la posición del paisaje y la secuencia de cultivo en el manejo agrícola y el ancho de franja en el uso ganadero. También se calcularon los coeficientes de variación de cada variable analizada (CV). Además, se realizó un análisis de correlación de Pearson entre los parámetros que surgieron de las simulaciones de lluvia con las propiedades del suelo, pendiente del terreno y biomasa vegetal.

A modo de síntesis de los resultados obtenidos, se hizo un análisis estadístico multivariado, el cual fue usado para describir y analizar observaciones multidimensionales obtenidas al relevar información sobre varias variables para cada una de las unidades o casos en estudio. Con el análisis de componentes principales se examinó la interdependencia de las variables medidas y se trató de encontrar una representación gráfica óptima de la variabilidad de los datos de una tabla de **49, 55 y 55** observaciones para uso ganadero, agrícola con

moderada y elevada intensidad, respectivamente, y **34** variables para todos los casos. Se buscó un nuevo conjunto de variables (componentes principales) no correlacionadas que explicaran la estructura de la variación de los datos. Para incluir dichas, se consideró un valor absoluto mínimo de cada autovector de 0,20.

**CAPÍTULO III**  
**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

---

## RESULTADOS Y DISCUSION

---

Para comprender la magnitud del proceso de escurrimiento/erosión en el paisaje, en la cuenca alta del arroyo Pergamino primero se analizó la evolución de la variabilidad anual decádica de las precipitaciones y los cambios en la cantidad de lluvias de moderada y elevada intensidad de la última década previa al inicio de este trabajo. Luego, se caracterizaron los suelos de los ambientes agrícola y ganadero, determinando las propiedades edáficas superficiales (0-5 cm), la producción de biomasa aérea al momento de muestreo y las pendientes generales de los sitios de muestreo (el número de muestras compuestas totales fue de 159, separadas en 49, 55 y 55 para ambientes de bajo, media loma y loma, respectivamente). Seguidamente, se estudiaron las variables de escurrimiento e infiltración para cada ambiente, separando en el ambiente agrícola dos manejos contrastantes: rotación y monocultivo y en el ambiente ganadero 3 anchos de franjas paralelos a los cursos de agua. Se simularon lluvias de elevada y moderada intensidad, siendo estas de 60 y 30 mm h<sup>-1</sup>, respectivamente. Se determinó la calidad del agua de escurrimiento y de los sedimentos. Se calcularon los coeficientes de enriquecimiento de C, N, P y elementos traza. Por último se realizó un análisis de componentes principales con todas las variables medidas para cada intensidad de lluvia en el ambiente agrícola y en el ganadero.

### **3.1 Comportamiento de las precipitaciones en el partido de Pergamino durante la década 2001-2010.**

La variabilidad en el volumen de las precipitaciones anuales de las últimas décadas en Pergamino fue creciente, con su máxima expresión en la década de 2000. La Figura 3.1 muestra el coeficiente de variación del volumen de las precipitaciones, calculado por década. Para 1990 y 2000 el coeficiente de variación fue del 27 y 32%, respectivamente, mientras que en las anteriores este varió entre el 15 y 21%.

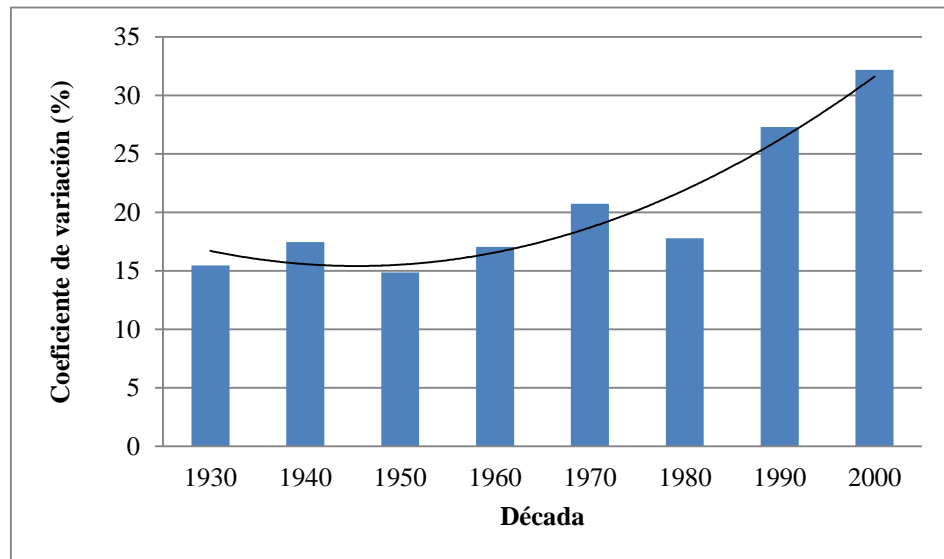


Figura 3.1. Coeficiente de variación del volumen anual de las precipitaciones, calculado por décadas para Pergamino.

A su vez, la variabilidad interanual de las precipitaciones superó ampliamente a las variaciones entre décadas y de largo plazo. En este sentido, en el período analizado se registraron casos como los de los años 2001 y 2002, con láminas anuales por encima del 50% de la media histórica (970,2 mm del período 1910-2010) y el del año 2008, con un volumen de lluvias un 50% más bajo que el promedio histórico (Figura 3.2). Existen predicciones para las próximas décadas de importantes cambios en la distribución e intensidad de las lluvias. Estos cambios climáticos afectan los procesos hidrológicos de las cuencas hídricas y la erosión hídrica de las tierras. Los cambios pueden abarcar modificaciones en las características y estructura de las lluvias, en cuanto a incremento en la cantidad, intensidad y distribución (Magrin *et al.* 2005b, Michelena, 2011). Al analizar el número de lluvias según su intensidad, se encontró que el promedio de lluvias con una intensidad dentro del rango 20-40 mm h<sup>-1</sup> (intensidad moderada) fue de 19 lluvias por año.

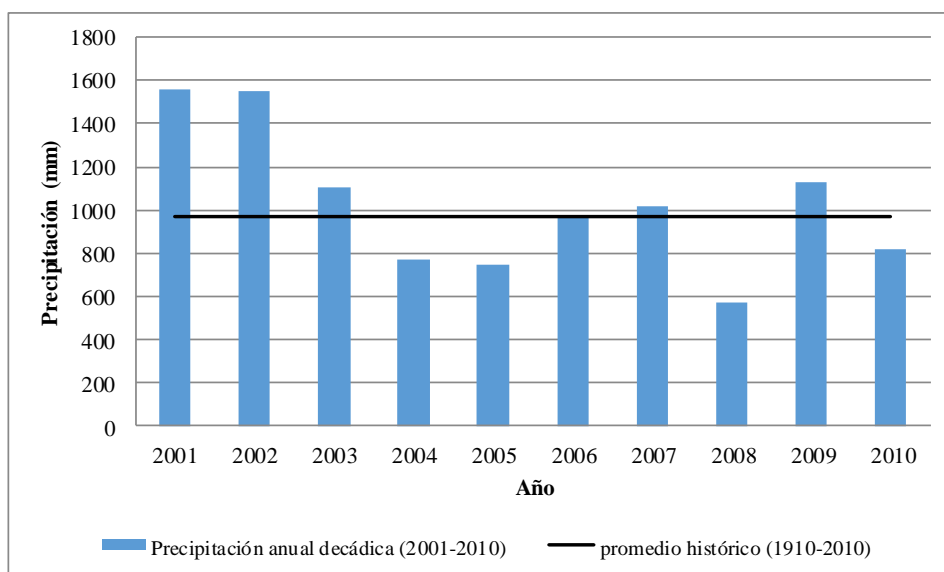


Figura 3.2. Precipitación anual de correspondiente a la década 2001-2010.

Considerando el umbral de intensidad de lluvias  $< 25 \text{ mm h}^{-1}$  como no erosivas (Hudson, 1982), se encontró en promedio que el 16% del total de la lluvia anual caída en la década 2001-2010, superó el umbral de intensidad, pudiendo generar procesos de erosión. A su vez, la intensidad media de dichos eventos fue de  $46 \text{ mm h}^{-1}$  ( $193,3/4,2*100$ ) (Tabla 3.1), lo que ubicaría a la región de Pergamino bajo un clima templado en tránsito hacia uno subtropical. Sin embargo y como se observa en la Tabla 3.1, estos resultados fueron muy distintos en los diferentes años de la década analizada, pasando este tipo de lluvias erosivas de representar el 0 % (2005) hasta el 53,3% (2002) del total de la lámina anual caída.

Tabla 3.1. Precipitación total anual y precipitaciones con características erosivas ( $> 25 \text{ mm h}^{-1}$ ) (cantidad, milímetros y porcentaje respecto al total).

Año	Precipitación total (mm)	Precipitaciones $> 25 \text{ mm h}^{-1}$		
		Nº	Cantidad (mm)	(%)
2001	1597	7	395	24,7
2002	1493	13	796	53,3
2003	1021	7	223	21,8
2004	801	3	146	18,3
2005	718	0	0	0
2006	921	3	97	10,6
2007	1020	2	60	5,9
2008	545	1	40	7,3
2009	1104	4	115	10,4
2010	716	2	61	8,5
<b>Promedio</b>	<b>993,6</b>	<b>4,2</b>	<b>193,3</b>	<b>16,1</b>

## 3.2 Caracterización de los suelos en los ambientes bajo estudio

### 3.2.1. Propiedades edáficas medias en los diferentes ambientes

Las propiedades químicas superficiales de los suelos se diferenciaron de acuerdo a las posiciones que éstos ocupan en el paisaje (Tabla 3.2). En efecto, con la excepción del Znsu, Csu y Pesu, se observaron diferencias significativas en las restantes propiedades entre los suelos de la posición baja y los ubicados en la loma y media loma. Por su parte, solo hubo diferencias en el Pesu entre bajo y media loma, mientras que para el Znsu y Csu no se encontraron diferencias de acuerdo a la posición que ocupan los suelos en el paisaje.

Los ambientes bajos están ocupados por suelos alcalinos y con cierta tendencia a la salinidad, mientras que en las posiciones de loma y media loma dominan los suelos bien drenados, libres de sales y ligeramente ácidos o con pH neutros. Así, el pH, la CE y el contenido de  $\text{Na}^+$  de los suelos correspondientes a los bajos, presentaron los mayores valores medios ( $p < 0,05$ ). Losinno *et al.* (2002) trabajando en la misma zona, encontraron que la mayor CE de los suelos correspondientes a las posiciones deprimidas del paisaje, se producía por efecto del ascenso capilar de las soluciones salinas contenidas en el agua freática. El aumento del pH se explica a su vez, porque la solución del suelo en estos ambientes está compuesta por sales predominantemente bicarbonatadas sódicas.

Tabla 3.2: Características químicas superficiales promedio de los suelos ubicados en las tres posiciones del paisaje: loma (n: 55), media loma (n: 55) y bajo (n: 49).

Posición	pH (1:2.5)	CE dS m <sup>-1</sup>	Na cmol kg <sup>-1</sup>	Csu g kg <sup>-1</sup>	Ptsu ppm	Nsu %	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> su mg kg <sup>-1</sup>	Pesu mg kg <sup>-1</sup>	Cusu mg kg <sup>-1</sup>	Znsu mg kg <sup>-1</sup>	Mnsu mg kg <sup>-1</sup>	Fesu mg kg <sup>-1</sup>
Bajo	8,9 a	1,3 a	9,7 a	23,1 a	234,2 c	0,3 a	2,9 c	14,4 b	13,9 b	51,0 a	586,0 c	19601 b
Media loma	6,1 b	0,2 b	0,2 b	20,8 a	297,4 a	0,2 b	15,0 a	30,1 a	18,9 a	53,3 a	709,9 b	23969 a
Loma	6,0 b	0,1 b	0,1 b	21,5 a	261,4 b	0,2 b	9,8 b	19,8 b	20,0 a	56,0 a	789,4 a	24841 a

Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) entre posiciones en el paisaje.

CE: conductividad eléctrica, Na: sodio intercambiable, Csu: carbono total del suelo, Nsu: nitrógeno total del suelo, N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>su: nitrógeno de nitratos del suelo, Ptsu: fósforo total del suelo, Pesu: fósforo extractable del suelo, Cusu: cobre del suelo, Znsu: zinc del suelo, Mnsu: manganeso del suelo y Fesu: hierro del suelo.

Por su parte, y a pesar del efecto dispersante del  $\text{Na}^+$  sobre los coloides del suelo y al efecto negativo sobre la producción de materia seca de los suelos con características

hidrohalomórficas, el contenido de Csu del suelo superficial no fue diferente en las distintas posiciones del paisaje. A su vez, el Nsu y el  $N-NO_3^-$  su de las posiciones bajas registraron los valores medios más altos y más bajos, respectivamente, respecto a los de la loma y/o media loma ( $p < 0,05$ ). Estos resultados indican un efecto significativo de la exportación del nitrógeno por parte de la cosecha de granos en los suelos agrícolas, que no es compensado por las bajas dosis nitrogenadas provenientes de los fertilizantes. También, el menor nivel de Nsu en los suelos agrícolas, es el resultado de las condiciones más favorables para su mineralización en las posiciones relativamente más altas del paisaje. A su vez, las diferencias encontradas pudieron deberse a una migración de este nutriente por escurrimiento desde las posiciones altas hacia las bajas, hecho que podrá verificarse más adelante al analizar los resultados de simulación de lluvia.

El Ptsu al igual que el  $N-NO_3^-$  su resultaron inferiores en la loma con respecto a la media loma, probablemente como consecuencia de la mayor exportación de P bajo agricultura continua durante un largo periodo de tiempo en dicho ambiente, en comparación con el de media loma, que ingresó posteriormente en agricultura continua. Desde mediados de la década de los 90, el cultivo de soja avanzó sobre esos ambientes, ya descritos en materiales y métodos (INTA, 1972). Por su parte, las tasas de exportación en la loma serían superiores a las registradas en media loma (Milesi *et al.*, 2015). Los ambientes de las terrazas bajas que bordean los arroyos son post-pampeanos y con menor riqueza en P. También son muy vulnerables y están sujetos a los cambios en los cursos de agua; en consecuencia, es probable que este elemento se movilice con los sedimentos (Auge, 2004; Vázquez, 2002).

El Pesu siguió una tendencia muy similar al Ptsu, aunque la significancia estadística de las diferencias en el contenido medio de Pesu entre loma y bajo fue menor ( $p < 0,15$ ). También, cuando el valor de pH es igual o mayor a 8,0, disminuye la disponibilidad de Pesu (Picone, 2005).

La mayor pobreza en el contenido de metales pesados del material originario post pampeano con respecto al pampeano, podría ser una causa de los menores contenidos de Mnsu, Fesu y Cusu en los suelos de las posiciones bajas respecto a los restantes. Si bien el contenido de Znsu en los suelos de la posición baja no difirió de aquellos ubicados en la loma, hubo una similar tendencia que la encontrada en los restantes metales pesados ( $p < 0,11$ ). El contenido de Mnsu disminuyó en la posición de media loma, mostrando probablemente el resultado del proceso de erosión hídrica superficial, que no se manifestó en el Fesu. En la Tabla 3.3 se muestran los aportes promedio estimados para diferentes elementos traza



provenientes de los fertilizantes para una secuencia típica de la región (García, 2015). Como puede observarse, la media de ET aportados anualmente por los fertilizantes minerales sería muy baja aun considerando la suma del valor medio y del desvío estándar.

Tabla 3.3: Cantidad anual de elementos traza (promedio y desvío estándar) aportados por los fertilizantes para una rotación típica de la región (8 S1<sup>a</sup>+1T/S2<sup>a</sup>+1M).

	As	Cd	Pb	Cu	Mn	Mo	V	Zn
	g ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>							
Promedio	0,3	1,8	0,2	1,4	14,2	0,6	70,1	7,2
DE	0,2	1,6	0,1	0,6	5,8	0,2	54,7	4,0

As: Arsénico; Cd: Cadmio; Pb: Plomo; Cu: Cobre; Mn: Manganeseo; Mo: Molibdeno; V: Vanadio; Zn: Cinc; DE: Desvío Estándar. DE: desvío estándar; 8 S1<sup>a</sup>+1T/S2<sup>a</sup>+1M: Ocho cultivos de Soja de primera siembra + un doble cultivo Trigo/Soja de segunda siembra + un Maíz.

En la Tabla 3.4 se observan los resultados de algunas variables físicas (densidad aparente, humedad gravimétrica y textura) correspondientes a los primeros 5 cm de profundidad de los suelos de los distintos ambientes analizados, junto con los valores de la pendiente y MS.

Tabla 3.4: Resultados de algunas variables físicas correspondientes al estrato superficial de los suelos de los tres ambientes analizados.

Posición en el paisaje	Dap	H	Arcilla	Arena	Limo	Pendiente	MS
	g cm <sup>-3</sup>	%	%	%	%	%	kg ha <sup>-1</sup>
Bajo	1,21 a	30,6 a	8,5 c	40,1 a	51,3 a	1,04 a	3211,1 b
Media loma	1,15 b	27,9 ab	18,6 b	18,1 b	63,1 a	0,96 a	9336,0 a
Loma	1,13 b	26,4 b	21,4 a	16,5 b	62,1 a	0,07 b	8464,0 a

Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) entre posiciones en el paisaje. Dap: Densidad aparente, H: humedad gravimétrica, MS: Biomasa aérea sobre el suelo. Arcilla:  $< 2 \mu\text{m}$ . Arena:  $50 - 2000 \mu\text{m}$ . Limo:  $2 - 50 \mu\text{m}$

Si bien la clase textural del estrato superficial de los suelos correspondientes a todas las posiciones evaluadas fue franco limosa, la distribución de partículas varió en cada situación. Se observa en la Tabla 3.4 que el suelo del bajo presentó un mayor contenido de arena y un menor porcentaje de arcilla que los suelos de la loma y media loma. Por su parte, en la media loma presentaron un menor contenido de arcilla que los de la loma, mientras que en el porcentaje de limo no hubo diferencias entre los suelos de las tres posiciones evaluadas. Las diferencias observadas en la composición textural superficial del suelo del bajo respecto a la de las otras dos posiciones, se deben fundamentalmente a dos fenómenos típicos de las llanuras de inundación, ubicadas en las zonas de transición acuático-terrestre: a) la influencia

del aporte de sedimentos provenientes del arroyo Pergamino cuando éste se comporta como influente y b) el fenómeno de erosión, que arrastra partículas más finas al curso de agua, en la mayor parte del tiempo. A su vez, observando los resultados de contenido de arcilla, se comprueba que el efecto selectivo de la erosión también se manifiesta en la posición de media loma.

Por su parte, los suelos del bajo presentaron una mayor densificación con respecto a los suelos de loma y media loma, sin encontrar diferencias estadísticas significativas entre estas dos últimas posiciones. Los valores más elevados de Dap en el ambiente bajo, pueden explicarse por el mayor contenido de arena y menor porcentaje de arcilla de los suelos correspondientes a esta posición del paisaje respecto a los restantes. Sumado a estas características, que le dan a dichos suelos una alta fragilidad a la ocurrencia de procesos de degradación física, estos presentan una elevada concentración de sodio en superficie, lo que los hace aún más susceptibles al desencadenamiento de dicho proceso. Además, en estos ambientes la ganadería ejerce una fuerte presión originada por la pezuña de los animales, que en momentos de alta humedad del suelo provoca mayor densificación. En los suelos pastoreados bajo condición de humedad saturada, el tránsito de animales causa daños por amasado del suelo («poaching»), el cual se verifica por pérdidas en la porosidad y la estabilidad estructural (Scholefield *et al.*, 1985; Greenwood & Mc Kenzie, 2001).

Los suelos de la loma tuvieron una menor humedad superficial respecto a los del bajo, ubicándose los correspondientes a la media loma en valores intermedios, sin diferenciarse estos en su contenido de agua respecto a los de los otros dos sitios mencionados. Este comportamiento diferencial, puede ser explicado por la presencia de una capa freática relativamente más cercana a la superficie del suelo a medida que se desciende en el paisaje, y por lo tanto a una mayor posibilidad de ascenso de agua capilar en los sectores más deprimidos del paisaje. A su vez, los sectores bajos del paisaje son receptores de los escurrimientos provenientes de las posiciones altas, contribuyendo este comportamiento a que los suelos de los bajos presenten mayores contenidos hídricos.

La pendiente promedio de los lotes ubicados en el bajo y la media loma no fue distinta, pero dicha propiedad fue diferente en la loma, esto caracteriza el paisaje de esta subregión. Respecto al contenido de MS, los sectores de loma y media loma mostraron valores similares, dado que en ambas posiciones se encuentra el mismo tipo de suelos aunque en diferentes fases, además de presentar ambas posiciones similar uso de la tierra. Contrariamente, en el bajo se registró un menor contenido de MS que en las posiciones más

altas, debido a las características diferenciales que presenta el horizonte superficial de estos suelos, ya manifestadas con anterioridad: mayor contenido de  $\text{Na}^+$  y pH más elevado.

### 3.2.2. Propiedades edáficas en diferentes anchos de franja en los bajos

Al comparar los resultados de las características químicas superficiales de los suelos ubicados en las tres franjas paralelas al curso de agua y con diferentes distancias al mismo (Tabla 3.5), se encontraron diferencias sólo en CE, Csu y Pesu. La franja angosta tuvo mayor CE y superior contenido de Pesu, en comparación con la media y la ancha, resultando lo contrario con el Csu ( $p < 0,05$ ). Estos resultados son característicos en las márgenes de las nacientes de los cursos de agua de la Pampa Ondulada: escasa vegetación riparia y vegetación riparia en las nacientes y bajo ingreso de materia orgánica alóctona (Pesu), elevada presencia de sales por la incidencia del curso de agua cercano (CE) y con baja producción de materia seca por mayor presencia de sales y de sodio, además de estar sometidos a procesos de erosión (Csu).

Tabla 3.5: Características químicas superficiales de los suelos ubicados en las tres franjas del bajo.

<b>Franja</b>	pH (1:2.5)	CE dS $\text{m}^{-1}$	$\text{Na}^+$ cmol $\text{kg}^{-1}$	Csu g $\text{kg}^{-1}$	Nsu %	N- $\text{NO}_3^-$ su mg $\text{kg}^{-1}$	Ptsu ppm	Pesu mg $\text{kg}^{-1}$
Angosta	9,1 a	1,8 a	10,5 a	13,2 b	0,21 a	2,34 a	224,6 a	20,6 a
Media	8,8 a	1,1 b	11,5 a	26,9 a	0,31 a	1,89 a	239,4 a	10,6 b
Ancha	8,9 a	1,1 b	8,0 a	31,3 a	0,30 a	3,89 a	241,6 a	12,1 b

Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) entre las franjas paralelas al curso de agua en la posición baja del paisaje.

CE: conductividad eléctrica,  $\text{Na}^+$ : sodio intercambiable en suelo, Csu: carbono total en suelo, Nsu: nitrógeno total en suelo, N- $\text{NO}_3^-$ su: nitrógeno de nitratos en suelo, Ptsu: fósforo total en suelo, Pesu: fósforo extractable en suelo.

En la Tabla 3.6 se observan los valores medios de distintas variables físicas, la pendiente y la MS, discriminadas de acuerdo a la distancia de los suelos del bajo respecto al curso de agua. La distribución de partículas de los suelos presentes en los tres sectores evaluados, se diferenció en las franjas extremas (angosta y ancha), particularmente para arena y limo. En este sentido, los suelos correspondientes a la franja más cercana al curso de agua presentaron mayor contenido de arena y menor de limo que aquellos correspondientes al sector más lejano a dicho curso. Por su parte, los suelos del sector intermedio no se diferenciaron en su composición textural de los correspondientes a los otros dos sitios evaluados. La Dap fue mayor en el suelo de la franja más próxima al curso de agua respecto a los pertenecientes a las franjas media y ancha, cuyos valores a su vez no difirieron entre sí.

Algo diferente sucedió con la humedad edáfica (H), dado que esta fue mayor en la franja ancha respecto a la angosta y media, cuyo contenido hídrico no difirió entre sí. Esta diferencia en humedad no se debería a la textura sino a la existencia de elevada variabilidad edáfica en los momentos de muestreo.

Tabla 3.6: Resultados de algunas variables físicas correspondientes al estrato superficial de los suelos ubicados en las tres franjas del bajo.

Franja	Dap g cm <sup>-3</sup>	H %	Arcilla %	Arena %	Limo %	Pendiente %	MS kg ha <sup>-1</sup>
Angosta	1,35 a	26,0±7,6b	7,8 a	43,9 a	48,3 b	1,80 a	1904 b
Media	1,10 b	26,6±5,4 b	8,6 a	39,0 ab	52,4 ab	0,74 b	4631 a
Ancha	1,13 b	37,1±14,4 a	9.2 a	36,9 b	53,9 a	0,41 c	3878 a

Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) entre los suelos de las distintas franjas

Dap: Densidad aparente, H: humedad gravimétrica, MS: Biomasa aérea sobre el suelo. Arcilla:  $< 2 \mu\text{m}$ . Arena:  $50 - 2000 \mu\text{m}$ . Limo:  $2 - 50 \mu\text{m}$

Una de las posibles causas de las diferencias encontradas en la Dap, es que los suelos de la franja angosta están en contacto permanente con el curso de agua, cuyo contenido salino es de aproximadamente  $5 \text{ dS m}^{-1}$  (Torti, 2014), hecho que limita las posibilidades de crecimiento vegetal. También, los animales se concentran durante mayor tiempo en la franja angosta para tomar agua del arroyo, por lo que el efecto de su pisoteo en el suelo casi saturado también constituye una limitación para el crecimiento vegetal, lográndose así una mayor densificación. Por su parte, la H más elevada de la franja ancha encontrada en el momento de muestreo, probablemente pueda explicarse por una mayor retención de agua del suelo presente en dicho sector, debido a una textura más fina en un paisaje muy plano.

La pendiente fue la característica que presentó mayores diferencias entre las franjas, generando el siguiente orden: Franja Angosta  $>$  Franja Media  $>$  Franja ancha. Por su parte, la biomasa presente en la superficie del suelo de las franjas media y ancha fue mayor que la correspondiente a la franja angosta, sin encontrarse diferencias entre las primeras dos.

La comparación de los dos años de muestreo mostró pequeñas diferencias en algunas de las propiedades químicas y físicas de las distintas franjas (Tablas 3.7 y 3.8). En 2011 la concentración de  $\text{N-NO}_3^-$  su se diferenció entre los anchos de franja angosta y ancha, mientras que el Pesu fue mayor en la franja angosta respecto a las otras dos. A su vez, el Csu fue menor en los suelos correspondientes al área más cercana al arroyo Pergamino, mientras que la CE fue superior en dicha posición con respecto a la franja media, no presentando las restantes propiedades diferencias significativas entre los suelos correspondientes a los distintos anchos

de franja. En lo concerniente a las propiedades físicas (Tabla 3.8), el contenido de H fue menor en las franjas angosta y media respecto de la ancha.

En 2013, también el contenido de H y las concentraciones de Csu y Nsu fueron menores en la franja angosta que en la ancha. Sin embargo, no hubo diferencias en las propiedades químicas restantes, aunque éstas siguieron las mismas tendencias que en los sitios muestreados en 2011 (Tablas 3.7 y 3.8). En ambos momentos, la franja angosta presentó menor contenido de materia seca superficial, y mayor pendiente y Dap que la franja ancha. Sin embargo, la diferencia de MS encontrada entre las franjas en los sitios de intensidad de lluvia moderada fue muy inferior que la diferencia encontrada entre franjas cuando la intensidad de lluvia fue elevada

Tabla 3.7 Propiedades químicas de los suelos ubicados en los diferentes anchos de franja en el sector bajo del paisaje (Años 2011 y 2013).

Año	Ancho de franja	pH (1:2.5)	CE dS m <sup>-1</sup>	Na <sup>+</sup> cmol kg <sup>-1</sup>	Csu g kg <sup>-1</sup>	Nsu %	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> su mg kg <sup>-1</sup>	Ptsu ppm	Pesu mg kg <sup>-1</sup>
2011	Angosta	8,9 a	2,2 a	14,1 a	12,0 b	0,28 a	1,0 b	230,8 a	25,19 a
	Media	8,8 a	1,1 b	10,5 a	26,9 a	0,31 a	1,9 ab	239,4 a	10,6 b
	Ancha	8,9 a	1,2 ab	12,3 a	32,8 a	0,28 a	3,0 a	247,6 a	10,63 b
2013	Angosta	9,3 a	1,6 a	6,3 a	14,5 b	0,15 b	3,6 a	218,4 a	15,93 a
	Ancha	8,9 a	1,1 a	5,6 a	29,8 a	0,31 a	4,8 a	235,7 a	13,62 a

Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) entre los suelos ubicados en distintos anchos de franja, para una misma fecha.

CE: conductividad eléctrica, Na<sup>+</sup>: sodio intercambiable, Ctsu: carbono total, Nsu: nitrógeno total, N-NO<sub>3</sub>-su: nitrógeno de nitratos en suelo, Ptsu: fósforo total en suelo, Pesu: fósforo extractable en suelo.

Tabla 3.8. Propiedades físicas de los suelos ubicados en los diferentes anchos de franja en el sector bajo del paisaje (Años 2011 y 2013).

Año	Ancho de franja	Dap g cm <sup>-3</sup>	H %	Arcilla %	Arena %	Limo %	Pendiente %	MS kg ha <sup>-1</sup>
2011	Angosta	1,28 a	27,0 b	7,8 a	43,9 a	48,3 a	1,80 a	1776 b
	Media	1,10 b	26,6 b	8,5 a	39,1 a	52,4 a	0,74 b	4631 a
	Ancha	1,08 b	39,1 a	9,2 a	36,9 a	53,9 a	0,36 c	4088 a
2013	Angosta	1,42 a	25,1 b	7,8 a	43,9 a	48,3 a	1,80 a	2033 b
	Ancha	1,17 b	35,1 a	9,2 a	36,9 a	53,9 a	0,46 b	3370 a

Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) entre los suelos ubicados en distintos anchos de franja, para una misma fecha.

Dap: Densidad aparente, H: humedad gravimétrica, MS: Biomasa aérea sobre el suelo. Arcilla:  $< 2 \mu\text{m}$ , Arena:  $50 - 2000 \mu\text{m}$ , Limo:  $2 - 50 \mu\text{m}$

De los resultados del sector ganadero muestreo de 2011, los suelos de la franja angosta tuvieron mayor CE, Pesu, Dap y pendiente, al mismo tiempo que presentaron menor

contenido de Csu, y nitratos, humedad inicial, y materia seca superficial. En el muestreo de 2013, al analizar lo sucedido solamente en los suelos de la franja angosta y ancha, se mantuvieron las diferencias observadas previamente en Csu, Dap, H, pendiente y MS.

### ***3.2.3 Propiedades edáficas en ambientes de loma y media loma bajo distintos sistemas de sucesión de cultivos analizados***

A continuación, se buscó corroborar si los resultados obtenidos en diferentes años de muestreo (2011 y 2013) resultaban en situaciones edáficas equiparables. Las Tablas 3.9, 3.10, 3.11 y 3.12 presentan los valores medios de las propiedades edáficas superficiales en dos sistemas de sucesión de cultivos analizados (S o R), según la posición que ocupan los suelos en el paisaje. En el ambiente de loma en 2011, Cusu y Mnsu presentaron una menor concentración en S respecto a R (Tabla 3.9), en 2013 se observó una menor concentración de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>su y Mnsu en R en la media loma y en la loma, respectivamente (Tabla 3.10). También en 2013, en la media loma hubo menor CE en R respecto a S (Tabla 3.10).

Según estos resultados, la diferente sucesión de cultivos no afectó el contenido de carbono superficial de los suelos, independientemente de la posición que estos ocupan en el paisaje. En este sentido, Kraemer (2015) trabajando con Argiudoles bajo SD de las localidades de Pergamino (Pcia. de Bs.As.) y Montebuey (Pcia. de Córdoba), tampoco encontró diferencias en el contenido de carbono superficial entre sucesiones de cultivos que presentaban una frecuencia diferente de los cultivos de soja y maíz. Por su parte, Novelli (2013), analizando el comportamiento del carbono en Argiudoles y Vertisoles de Entre Ríos bajo SD con distintos índices de intensificación en la secuencia de cultivos, tampoco encontró efectos de las diferentes sucesiones de cultivos sobre el stock de carbono superficial. Luo *et al.* (2010), indicaron que cuanto mayor es la diversidad de cultivos (en calidad y cantidad), mayor sería la diversidad microbiana y la tasa de descomposición de la materia orgánica, produciéndose una marcada disminución en los stocks de Csu.

En el presente trabajo los valores de Cu se encontraron dentro del rango normal, entre 2-60 mg kg<sup>-1</sup>, de la misma manera que el Zn, que se mantuvo dentro del rango 25-200 mg kg<sup>-1</sup> (Bowie & Thorntom, 1985). Sin embargo, según la EPA (US Environmental Protection Agency) este elemento se encuentra en la lista de contaminantes prioritarios. En general, la movilidad de los elementos traza (ET) es muy baja, quedando acumulados en los primeros centímetros del suelo, siendo lixiviados a los horizontes inferiores en muy pequeñas

cantidades (Huertos & Baena, 2008). La disponibilidad de los elementos depende de las características del suelo donde se encuentra (Föstnet, 1987), siendo los siguientes algunos de los parámetros edáficos que influyen:

pH: La mayoría de los elementos traza tienden a estar más disponibles a pH ácido porque son menos fuertemente adsorbidos.

Materia Orgánica: Reacciona con los metales formando complejos de cambio. La adsorción puede ser tan fuerte que quedan estabilizados, como en el caso del Cu, o forman quelatos muy estables como en el caso del Zn.

Textura: Los suelos arcillosos retienen más ET por adsorción o en el complejo de cambio de los minerales de la arcilla. Por el contrario, los suelos arenosos carecen de capacidad de fijación.

En cuanto a las propiedades físicas de los suelos en 2011 (Tabla 3.11), tanto en la loma como en la media loma no hubo diferencias en Dap, H y composición textural de los suelos que presentaron los distintos sistemas de sucesión de cultivos (R o S). Sólo se pudo comprobar una pendiente ligeramente mayor en R respecto a S en la media loma, mientras que en ambas posiciones el contenido de materia seca superficial fue siempre mayor ( $p < 0,05$ ) en R en relación a S. A su vez, en el muestreo de 2013 (Tabla 3.12), tampoco hubo diferencias entre los distintos manejos en la Dap y H. Solo se observó un ligero y mayor contenido de arcilla en R respecto a S en la media loma y también un ligero y mayor gradiente en la pendiente de R en la loma. De la misma manera que en 2011, en R hubo mayor contenido de MS superficial en ambas posiciones del paisaje. Sin embargo, la cantidad de MS en 2011 fue muy superior respecto a la encontrada en los sitios en 2013.

Kraemer (2015) al analizar sucesiones de cultivo contrastantes en suelos limosos de la pradera pampeana bajo SD, tampoco encontró efectos del diferente manejo sobre la Dap superficial. Por su parte, Sasal *et al.* (2009), al analizar el comportamiento superficial y subsuperficial de la Dap en un Argiudol ácuico de la Pcia. de Entre Ríos con 15 años bajo SD, tampoco encontraron diferencias en este parámetro entre distintas sucesiones de cultivos: monocultivo de soja, monocultivo de maíz, trigo/soja, maíz-trigo/soja.

Lo analizado previamente, permitió corroborar que los muestreos que fueron realizados en años diferentes (2011 y 2013), se llevaron a cabo en sitios con equiparables condiciones edáficas, con la excepción de algunas diferencias en propiedades atribuibles al momento de muestreo (H, CE, MS), y pequeñas diferencias de concentración en Cu y Mn en la posición de loma.

En el muestreo de 2011 la producción de materia seca aérea fue mucho más importante, en cualquier posición del paisaje, que en el muestreo de 2013, debido a que 2011 fue bastante más húmedo que 2013. Las diferentes situaciones de manejo (R o S) de las posiciones elevadas del paisaje respondieron a la definición que le daban los productores. De esa manera, la práctica de la rotación de cultivos no estuvo definida en forma estricta (se encuestó a los productores para conocer la historia agrícola de cada lote en los últimos 10 años); en realidad se trataba de situaciones que contuvieron proporciones más o menos variables de soja. Así, mientras el llamado monocultivo de soja (S) tendió a coincidir con la realidad, en el caso de las rotaciones (R), por el contrario, las proporciones de soja tendieron a ser más bien elevadas.



Tabla 3.9 Propiedades químicas de los suelos con diferentes manejos (monocultivo de soja: S y rotación de cultivos: R), según la posición en el paisaje (media loma y loma) y en 2011.

Posición en el paisaje	Manejo	pH	CE	Na <sup>+</sup>	Csu	Nsu	Ptsu	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> su	Pesu	Cusu	Znsu	Mnsu	Fesu
		(1:2.5)	dS m <sup>-1</sup>	cmol kg <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>	%	ppm	mg kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>
Media Loma	S	6,0 a	0,1 a	0,2 a	21,1 a	0,23 a	373,8 a	18,9 a	26,4 a	18,6 a	53,0 a	635,5 a	23683,2 a
	R	6,3 a	0,1 a	0,2 a	21,6 a	0,22 a	354,3 a	18,5 a	36,1 a	17,9 a	54,7 a	726,2 a	24477,9 a
Loma	S	6,3 a	0,1 a	0,1 a	20,4 a	0,22 a	286,3 a	11,8 a	13,6 a	18,2 b	54,2 a	705,2 b	24862,3 a
	R	6,2 a	0,1 a	0,1 a	21,4 a	0,22 a	295,8 a	11,9 a	19,0 a	21,4 a	57,1 a	910,6 a	25456,8 a

Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) entre manejos para una misma posición en el paisaje.

CE: conductividad eléctrica, Na<sup>+</sup>: sodio intercambiable, Csu: carbono total, Nsu: nitrógeno total, N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>su: nitrógeno de nitratos en suelo, Ptsu: fósforo total en suelo, Pesu: fósforo extractable en suelo, Cusu: cobre en suelo, Znsu: zinc en suelo, Mnsu: manganeso en suelo y Fesu: hierro en suelo.

Tabla 3.10 Propiedades químicas de los suelos con diferentes manejos (monocultivo de soja: S y rotación de cultivos: R), según la posición en el paisaje (media loma y loma) y en 2013.

Posición en el paisaje	Manejo	pH	CE	Na <sup>+</sup>	Csu	Nsu	Ptsu	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> su	Pesu	Cusu	Znsu	Mnsu	Fesu
		(1:2.5)	dS m <sup>-1</sup>	cmol kg <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>	%	ppm	mg kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>
Media Loma	S	6,1 a	0,2 a	0,3 a	21,4 a	0,22 a	244,0 a	15,2 a	31,1 a	19,4 a	53,8 a	690,7 a	22602,2 a
	R	6,0 a	0,1 b	0,2 a	19,8 a	0,20 a	284,4 a	10,3 b	26,1 a	19,0 a	51,8 a	715,5 a	24191,3 a
Loma	S	5,8 a	0,1 a	0,1 a	21,8 a	0,20 a	227,5 a	8,7 a	19,3 a	19,7 a	57,2 a	843,5 a	24240,6 a
	R	5,7 a	0,1 a	0,1 a	22,7 a	0,19 a	235,4 a	7,5 a	29,2 a	21,0 a	55,6 a	738,5 b	25456,8 a

Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) entre manejos para una misma posición en el paisaje.

CE: conductividad eléctrica, Na<sup>+</sup>: sodio intercambiable, Csu: carbono total, Nsu: nitrógeno total, N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>su: nitrógeno de nitratos en suelo, Ptsu: fósforo total en suelo, Pesu: fósforo extractable en suelo, Cusu: cobre en suelo, Znsu: zinc en suelo, Mnsu: manganeso en suelo y Fesu: hierro en suelo.

Tabla 3.11 Propiedades físicas, pendiente y contenido de materia seca presente en los suelos con diferentes manejos (monocultivo de soja: S y rotación de cultivos: R), de acuerdo a la posición en el paisaje (media loma y loma) en 2011.

Posición en el paisaje	Manejo	Dap g cm <sup>-3</sup>	H %	Arcilla %	Arena %	Limo %	Pendiente %	MS kg ha <sup>-1</sup>
Media loma	S	1,15 a	30,0 a	18,1 a	20,9 a	60,9 a	0,74 b	9066,7 b
	R	1,13 a	31,2 a	18,9 a	17,3 a	63,9 a	1,00 a	12246,3 a
Loma	S	1,15 a	28,3 a	21,5 a	17,1 a	61,4 a	0,07 a	6864,0 b
	R	1,13 a	29,9 a	21,0 a	15,9 a	63,1 a	0,08 a	12529,2 a

Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) entre manejos para una misma posición en el paisaje.

Dap: Densidad aparente, H: humedad gravimétrica, MS: Biomasa aérea sobre el suelo. Arcilla:  $< 2 \mu\text{m}$ , Arena:  $50 - 2000 \mu\text{m}$ , Limo:  $2 - 50 \mu\text{m}$

Tabla 3.12 Propiedades físicas, pendiente y contenido de materia seca presente en los suelos con diferentes manejos (monocultivo de soja: S y rotación de cultivos: R), de acuerdo a la posición en el paisaje (media loma y loma) en 2013.

Posición en el paisaje	Manejo	Dap g cm <sup>-3</sup>	H %	Arcilla %	Arena %	Limo %	Pendiente %	MS kg ha <sup>-1</sup>
Media loma	S	1,14 a	26,6 a	16,3 b	18,7 a	65,0 a	0,85 a	4920, 0 b
	R	1,12 a	19,4 a	19,4 a	17,6 a	63,0 a	1,04 a	8080,0 a
Loma	S	1,13 a	22,9 a	22,9 a	15,6 a	61,5 a	0,06 b	6037,3 b
	R	1,12 a	20,2 a	20,2 a	17,4 a	62,4 a	0,09 a	9093,3 a

Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) entre manejos para una misma posición en el paisaje

Dap: Densidad aparente, H: humedad gravimétrica, MS: Biomasa aérea sobre el suelo. Arcilla:  $< 2 \mu\text{m}$ , Arena:  $50 - 2000 \mu\text{m}$ , Limo:  $2 - 50 \mu\text{m}$

### 3.3 Infiltración y escurrimiento

Los resultados correspondientes a la respuesta hidrológica de los distintos ambientes bajo diferentes usos de la tierra y bajo dos intensidades de lluvia simulada se detallan a continuación. En los mismos sitios se realizaron simulaciones con lluvia de elevada intensidad en 2011 y de moderada intensidad en 2013.

#### 3.3.1 Ambiente ganadero (bajo)

En la Tabla 3.13 se detallan algunos parámetros correspondientes a los resultados de las simulaciones de lluvia, realizadas a dos intensidades de lluvia sobre los suelos ubicados en diferentes anchos de faja del ambiente bajo. Dado que al aplicar 60 mm h<sup>-1</sup> no se encontraron diferencias entre los resultados de la franja media y ancha, en los ensayos de infiltración de 30 mm h<sup>-1</sup> solo se hicieron determinaciones en las franjas angosta y ancha.

Tabla 3.13 Resultados de algunos de los parámetros que surgen de los ensayos de simulación de lluvia, realizados en franjas de diferente ancho correspondientes al ambiente bajo.

Intensidad mm h <sup>-1</sup>	Duración ensayo (Hora)	Franja	Coef esc. %	Vol esc. l m <sup>-2</sup>	CN	Ia mm	Ib mm h <sup>-1</sup>	TIE min
60	1	Angosta	80,1 a	48,09 a	96 a	11,9 b	4,5 b	4 b
		Media	59,0 b	35,48 b	89 b	24,5 a	7,8 a	8 ab
		Ancha	67,6 b	40,55 b	92 ab	19,5 a	6,8 a	9 a
30	1	Angosta	58,2 a	18,22 a	94 a	12,7 a	-	5 a
		Ancha	41,6 a	12,72 a	83 a	17,8 a	-	18 a
	2	Angosta	74,1 a	44,33 a	94 a	15,5 a	1,0 a	5 a
		Ancha	54,9 a	32,99 a	83 a	27,0 a	8,4 a	18 a

Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) entre los suelos de las distintas franjas para cada intensidad de lluvia y tiempo de duración de la misma.

Coef esc.: Coeficiente de escurrimiento, Vol esc.: volumen de escurrimiento, CN: curva número, Ia: infiltración acumulada, Ib: infiltración básica; TIE: tiempo hasta inicio de escurrimiento.

Con una intensidad de lluvia de 60 mm h<sup>-1</sup>, el Coef esc. y el Vol esc. fueron significativamente mayores en la franja angosta ( $p < 0,05$ ), sin que se encontraran diferencias entre los otros dos sitios considerados. En consecuencia, el valor de la CN (que aumenta a medida que disminuye la permeabilidad del suelo) siguió la misma

tendencia, aunque solamente se presentaron diferencias significativas entre la franja angosta y la media. Contrariamente, los parámetros Ia e Ib tuvieron el menor valor en la franja angosta ( $p < 0,05$ ) sin encontrar diferencias entre las dos restantes. A su vez, el TIE observado en la franja angosta solo fue significativamente menor ( $p < 0,05$ ) al registrado en la ancha.

Respecto a los resultados obtenidos con una intensidad de  $30 \text{ mm h}^{-1}$ , los valores medios de todas las variables de la Tabla 3.13, no mostraron diferencias significativas entre anchos de franja, independientemente de la duración de lluvia considerada (1 o 2 horas). No obstante, se pudo observar una tendencia similar a la encontrada con la aplicación de una intensidad de  $60 \text{ mm h}^{-1}$ . En este sentido, las diferencias porcentuales en los resultados de las variables de la Tabla 3.13 entre anchos de franja extremos (angosta y ancha), fueron mayores con  $30 \text{ mm h}^{-1}$  respecto a cuándo se aplicó una intensidad mayor. Según estos comentarios y de acuerdo a lo observado en la Tabla 3.14, se puede inferir que esta menor capacidad de separar estadísticamente el comportamiento hidrológico de los suelos de ambos sectores del bajo a partir de una menor intensidad de lluvia aplicada, se debió probablemente a que en dichas circunstancias aumentó significativamente la variabilidad de los resultados de la franja ancha.

Tabla 3.14. Coeficientes de variación (%) de las distintas propiedades evaluadas, según la intensidad de lluvia y de acuerdo al distinto ancho de franja considerado.

Parámetro	Intensidad $60 \text{ mm h}^{-1}$			Intensidad $30 \text{ mm h}^{-1}$	
	Franjas			Franjas	
	Ancha	Media	Angosta	Ancha	Angosta
Coef esc.	16	29	13	55	16
Vol esc.	16	29	14	55	16
CN	3	7	3	24	4
Ia	34	40	54	67	47
Ib	43	140	106	160	87
TIE	63	47	82	109	50

Coef esc.: Coeficiente de escurrimiento, Vol esc.: volumen de escurrimiento, CN: curva número, Ia: infiltración acumulada, Ib: infiltración básica; TIE: tiempo hasta inicio de escurrimiento.

Del análisis de la Tabla 3.14 se puede deducir que los resultados de todos los parámetros correspondientes a la franja ancha, aumentaron su variabilidad al disminuir la intensidad de lluvia, lo que ocurrió ligeramente y solo para algunas propiedades en la

franja angosta. También se puede comprobar que para una misma intensidad de lluvia, la variabilidad de los resultados estuvo asociada al sitio analizado y según el parámetro tenido en cuenta. De esta manera y bajo  $60 \text{ mm h}^{-1}$ , la franja media presentó mayor variabilidad para Coef esc., Vol esc., CN e Ib, mientras que la angosta tuvo un mayor coeficiente de variación para Ia y TIE.

De acuerdo con los resultados de la Tabla 3.13, el sector más cercano al curso de agua es el que tiene potencial de generar mayores excesos hídricos ante la presencia de eventos de lluvia. Esto se debe a que el suelo presente en dicho sector, manifestó una menor tasa de infiltración básica y acumulada y una disminución en el tiempo a partir del cual empezó a escurrir, generando coeficientes y volúmenes de escurrimiento superiores y un valor de CN mayor. Sin embargo, para intensidades de lluvia moderadas, las que son más frecuentes en la región bajo estudio, no se pusieron de manifiesto estas diferencias en forma significativa, posiblemente debido a la mayor variabilidad de los resultados ante la ocurrencia de lluvias de menor intensidad.

La franja angosta, con menor contenido de carbono en el suelo superficial (Tabla 3.7), con una pendiente más pronunciada, mayor densidad aparente y con menor cobertura (expresada como peso de la biomasa vegetal sobre la superficie del suelo) (Tabla 3.8), generó este mayor escurrimiento, a pesar de presentar dicho sector un menor contenido hídrico superficial inicial que la franja ancha (Tabla 3.8). Por su parte, entre los dos sectores más lejanos al curso de agua, no se encontraron diferencias en el comportamiento hidrológico (Tabla 3.13), pese a que la humedad edáfica inicial y la pendiente fueron distintas entre ambas situaciones (Tabla 3.8).

Por su parte, al realizar el análisis de correlación entre los distintos parámetros surgidos de los ensayos de infiltración con diferentes propiedades del suelo superficial (textura, carbono orgánico, pH, Dap,  $\text{Na}^+$ , CE, H), con la cobertura (MS) y la pendiente, se comprobó que la asociación entre las variables dependió de la intensidad de lluvia aplicada (Tablas 3.15 y 3.16). De esta manera, con una aplicación de lluvia de  $60 \text{ mm h}^{-1}$  se pusieron de manifiesto algunas propiedades (pendiente, Dap, y Csu) que influyeron sobre el proceso de escurrimiento (Tabla 3.15), mientras que a una intensidad de  $30 \text{ mm h}^{-1}$ , se corroboró fundamentalmente una correlación significativa entre la CE y el Csu con los distintos parámetros asociados al escurrimiento (Tabla 3.16). Además, la Ib se asoció negativamente con el  $\text{Na}^+$  intercambiable y la Ib, TIE y CN con la Dap (Tabla 3.16). Estos resultados estarían indicando que cuando las lluvias presentan una

intensidad elevada, además de la Dap y Csu, la pendiente (dentro de los valores encontrados en la región) es un factor relevante para el proceso de escurrimiento. En cambio bajo lluvias moderadas deja de tener importancia el gradiente de las pendientes, teniendo más relevancia la CE. No obstante, en ningún caso los coeficientes de correlación superaron el valor de 0,6.

La cantidad de biomasa vegetal presente sobre la superficie del suelo no se asoció significativamente con el comportamiento hidrológico de los suelos, aunque se observó cierta vinculación de dicho parámetro bajo lluvia intensa con el Coef. esc. ( $p < 0,13$ ).

Tabla 3.15: Coeficientes de correlación entre distintos parámetros que surgieron de las simulaciones de lluvia ( $60 \text{ mm h}^{-1}$ ), con propiedades de los suelos del bajo en 2011.

Parámetros	Pendiente	CE	Dap	Csu
Coef. esc.	0.37 **	ns	0.58 ***	-0.53 ***
Vol. esc.	0.37 **	ns	0.58 ***	-0.53 **
Ia	-0.38 **	ns	-0.59 ***	0.53 ***
Ib	ns	ns	-0.33*	0.37 **
TIE	-0.43 **	-0.40**	-0.54 ***	0.47 **
CN	ns	ns	0.55 ***	-0.50 ***

Coef. esc.: coeficiente de escurrimiento. Vol. esc.: escurrimiento. Ia: Infiltración acumulada. Ib: infiltración básica. TIE: tiempo hasta el inicio del escurrimiento. CN: curva número. CE: conductividad eléctrica del suelo. Dap: densidad aparente. Csu: carbono orgánico en suelo. \*  $p < 0,10$ , \*\*  $p < 0,05$ , \*\*\*  $p < 0,001$  ns: no significativa.

Tabla 3.16: Coeficientes de correlación entre distintos parámetros que surgieron de las simulaciones de lluvia ( $30 \text{ mm h}^{-1}$ ), con propiedades de los suelos del bajo en 2013.

Parámetros	CE	Dap	Csu	Na <sup>+</sup>
Coef. esc.	0,44 **	ns	-0,39***	ns
Vol. esc.	0,44 **	ns	-0,39***	ns
Ia	-0,44 **	ns	0,39***	ns
Ib	-0,42 ***	-0,48 **	0,50 **	-0,38 **
TIE	-0,42 ***	-0,43 **	-0,45 **	ns
CN	0,43 ***	0,40 ***	-0,43 ***	ns

Coef. esc.: coeficiente de escurrimiento. Vol. esc.: escurrimiento. A: Infiltración acumulada. Ib: infiltración básica. TIE: tiempo hasta el inicio del escurrimiento. CN: curva número. CE: conductividad eléctrica del suelo. Dap: densidad aparente. Csu: carbono orgánico en suelo. Na<sup>+</sup>: sodio en suelo. \*  $p < 0,10$ , \*\*  $p < 0,05$ ; \*\*\*  $p < 0,01$  ns: no significativa.

Utin (2009) y Chagas *et al.* (2011) realizaron ensayos de simulación de lluvia con alta intensidad ( $60 \text{ mm h}^{-1}$ ), tanto en sectores bajos (típicamente ganaderos) como

en sectores de loma (ocupados por Argiudoles vérticos) de la cuenca del arroyo del Tala (Pcia. de Bs. As.), aunque bajo la condición de suelo desnudo. También observaron que los suelos con elevada Dap y alto contenido de  $\text{Na}^+$  (suelos ganaderos degradados), presentaban mayor volumen de escurrimiento y mayor Coef. Esc. (84%) que los restantes suelos analizados (ganaderos no degradados y agrícolas), con Coef. Esc. de 40 %. Además, los autores analizaron la variación temporal de la tasa de infiltración, verificando que en los suelos sódicos existe una rápida caída de la velocidad de infiltración en los primeros minutos del ensayo, alcanzando luego una Ib casi nula.

Los resultados obtenidos indican que los suelos de la franja angosta son los que en mayor medida contribuirían a los excesos de agua que alimentan el curso de agua (Arroyo Pergamino), no sólo por su cercanía al mismo sino porque presentan características más adversas (mayor Dap, menor cobertura, menor contenido de arcilla, mayor contenido de sodio, menor contenido de carbono y mayor pendiente) respecto a los ubicados en las restantes franjas del bajo. Estos resultados fueron significativos con lluvias de mayor intensidad.

### 3.3.2 Ambiente agrícola (media loma y loma)

En la Tabla 3.17 se detallan los resultados provenientes de los ensayos de simulación de lluvia realizados en los suelos de loma y media loma con una intensidad de lluvia de  $60 \text{ mm h}^{-1}$ , comparando dos secuencias de cultivos diferentes: S y R.

Tabla 3.17: Parámetros que surgieron de los ensayos de infiltración con una intensidad de lluvia de  $60 \text{ mm h}^{-1}$ , realizados en los ambientes de loma y media loma con dos secuencias de cultivos diferentes (S: monocultivo de soja y R: rotación).

Intensidad de lluvia $\text{mm h}^{-1}$	Posición en el paisaje	Manejo	Coef. esc. %	Vol. esc. $\text{l m}^{-2}$	CN	Ia mm	Ib $\text{mm h}^{-1}$	TIE min
60	Media Loma	S	49,9 a	30,04 a	86 a	30,18 a	19,8 a	8 a
		R	41,4 a	24,87 a	79 a	35,2 a	23,0 a	14 a
	Loma	S	39,5 a	23,59 a	80 a	36,25 b	22,5 b	16 a
		R	19,2 b	11,57 b	67 b	48,52 a	41,5 a	23 a

Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) entre manejos para una misma posición en el paisaje. Coef esc.: coeficiente de escurrimiento, Vol esc.: volumen de escurrimiento, CN: curva número, Ia: infiltración acumulada, Ib: infiltración básica, TIE: tiempo hasta el inicio del escurrimiento.

El diferente uso de la tierra tuvo un efecto significativo sobre el comportamiento hidrológico del suelo solamente en la posición loma. En este sentido y salvo el TIE, los restantes parámetros mostraron que el monocultivo de soja (S) presentó mayores Coef esc., CN y Vol esc., disminuyendo la infiltración acumulada y básica. Dado que las distintas propiedades analizadas en los suelos de la loma no fueron diferentes entre ambas sucesiones de cultivo, el comportamiento observado podría atribuirse al contenido de materia seca superficial, que fue el único parámetro de los analizados que mostró el efecto diferencial de ambos tratamientos (Tablas 3.9 y 3.11). En la media loma sucedió algo similar en cuanto a la similitud entre las propiedades de los suelos de R y S, con la excepción de que R presentó una ligera pero significativa mayor pendiente respecto a S y en que la proporción de rastrojos en R fue un 35 % superior a los determinados en S, mientras que en la loma dicha relación fue de un 83 % (Tablas 3.9 y 3.11). No obstante la falta de diferencias estadísticas, los resultados de los ensayos de infiltración en la media loma presentaron la misma tendencia que los encontrados en la loma, pero el efecto de los tratamientos evaluados fue mucho menor. De esta manera, mientras el coeficiente y volumen de escurrimiento en S fueron en la loma el doble respecto a R, en la media loma dicho aumento fue de solo un 20%. De la misma manera, la infiltración básica y acumulada de R en la loma fueron respectivamente un 33 % y un 84 % mayor respecto a lo encontrado en S, mientras que en la media loma dicha diferencia entre tratamientos fue de solo un 16 %. En este sentido, los efectos de una diferente proporción de rastrojos y de gradientes de pendiente entre tratamientos pudieron haber contribuido a disminuir el efecto del monocultivo sobre el comportamiento hidrológico encontrado en el suelo de la loma.

Salvando las diferencias con el trabajo actual, en el que se compararon suelos bajo SD con marcadas diferencias de cobertura, De la Vega *et al.* (2004), realizando simulaciones de lluvia a  $60 \text{ mm h}^{-1}$  en un Argiudol vértico bajo siembra directa de San Pedro (Pcia. de Buenos Aires), también encontraron que el coeficiente de escurrimiento difería entre tratamientos con y sin cobertura superficial. En dicho trabajo el escurrimiento del suelo descubierto fue mayor ( $p < 0,05$ ) respecto al cubierto, encontrando también diferencias en la Ib, siendo ésta mayor ( $p < 0,05$ ) en el suelo cubierto ( $20,1 \text{ mm h}^{-1}$ ) respecto a la obtenida en el tratamiento descubierto ( $10,6 \text{ mm h}^{-1}$ ). A su vez, en el mismo trabajo, los autores encontraron diferencias entre tratamientos en el tiempo hasta el inicio del escurrimiento, registrando en el suelo cubierto mayor



tiempo hasta encharcamiento ( $p < 0,05$ ) (26 minutos) respecto al descubierto (11 minutos). La misma tendencia se observó en el presente trabajo, aunque no se pudo demostrar estadísticamente.

En la posición de media loma, la mayor biomasa de rastrojos presentes en R (Tabla 3.11), no moderó el escurrimiento con intensidades de lluvia elevadas. Esto puede indicar que aún con pendientes del 1%, el efecto de la pendiente en suelos de textura franca limosa, representa una variable mucho más importante en la producción de escurrimiento que la biomasa presente en la superficie del suelo, como también respecto a las posibles diferencias edáficas que pudieron generarse a partir de una sucesión de cultivos diferente. Bradford & Huang (1994), trabajando en Argiudoles bajo SD, demostraron que el manejo del rastrojo tenía un mayor efecto sobre la dinámica de infiltración respecto a la influencia ejercida por el manejo del suelo. Por su parte, Sasal *et al.* (2010) trabajando en parcelas de escurrimiento correspondientes a la EEA INTA Paraná, sobre un Argiudol ácuico con 3,5% de pendiente, determinaron que la cantidad de rastrojos dejada sobre la superficie del suelo por diferentes sucesiones de cultivos bajo siembra directa (21.382, 5.895, 8.670 y 6.214 kg ha<sup>-1</sup> para maíz, soja y las secuencias T/S y M-T/S, respectivamente), no era el principal indicador que explicara el escurrimiento y la erosión producidas. En este sentido, el maíz continuo si bien triplicó la cantidad de materia seca dejada en superficie respecto a las restantes sucesiones de cultivos, presentó un volumen de escurrimiento y una pérdida de suelo equiparables a lo aportado por las parcelas con soja continúa. En dicho estudio, también se observó que otras propiedades físicas de los suelos, como la Dap, la distribución de poros y la conductividad hidráulica saturada, tampoco explicaban los resultados obtenidos. Como consecuencia, los autores resaltaron la importancia del tiempo de ocupación de la vegetación viva y de la actividad radical sobre los procesos de escurrimiento y erosión, respecto a la cantidad de materia seca sobre el suelo. En este sentido, son muchos los trabajos que mencionan el efecto del tiempo de ocupación de los cultivos y de sus raíces en crecimiento sobre distintas propiedades físicas edáficas (Novelli *et al.*, 2013; Kraemer *et al.*, 2015).

En la Tabla 3.18 se detallan los resultados provenientes de los ensayos de simulación de lluvia realizados en los suelos de la loma y media loma con una intensidad de lluvia de 30 mm h<sup>-1</sup>, comparando las dos secuencias de cultivos, R y S.

Tabla 3.18: Parámetros que surgieron de los ensayos de infiltración con lluvia de  $30 \text{ mm h}^{-1}$ , realizados en los ambientes de loma y media loma con dos secuencias de cultivos diferentes (S: monocultivo de soja y R: rotación).

Duración del ensayo h	Posición en el paisaje	Manejo	Coef esc. %	Vol esc. $\text{l m}^{-2}$	CN	Ia mm	Ib $\text{mm h}^{-1}$	TIE min
1	Media loma	S	25,1 a	0,68 a	84 a	20,9 a	-	14 a
		R	36,3 a	0,11 a	88 a	18,6 a	-	11 a
	Loma	S	6,6 a	0,19 a	63 a	28,06 a	-	37 a
		R	4,8 a	0,14 a	65 a	28,60 a	-	30 a
2	Media loma	S	46,5 a	2,78 a	84 a	32,1 a	8,3 a	14 a
		R	56,9 a	3,42 a	88 a	25,9 a	5,0 a	11 a
	Loma	S	17,3 a	1,04 a	63 a	49,7 a	19,2 a	37 a
		R	17,3 a	1,04 a	65 a	49,5 a	19,6 a	30 a

Coef esc.: coeficiente de escurrimiento, Vol esc.: volumen de escurrimiento, CN: curva número, Ia: infiltración acumulada, Ib: infiltración básica, TIE: tiempo hasta el inicio del escurrimiento. Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) entre manejos (S: soja R: rotación de cultivos) para una misma posición en el paisaje y duración del ensayo.

Según se observa, tanto en la loma como en la media loma, no hubo diferencias significativas en los distintos parámetros analizados entre las dos secuencias de cultivo, independientemente de la duración del ensayo (1 o 2 horas). Por lo tanto, de manera diferente a lo sucedido con la intensidad de aplicación de lluvia de  $60 \text{ mm h}^{-1}$ , a esta intensidad no se expresaron los efectos generados en el suelo por las distintas secuencias de cultivos analizadas.

Como se puede observar en la Tabla 3.18, en la posición loma y para dos horas de duración del ensayo (60 mm de lluvia total caída), los parámetros surgidos de la simulación de lluvia presentaron valores similares entre R y S. Este comportamiento es diferente al visto en la misma posición cuando se aplicó una intensidad de precipitación superior pero igual lámina de lluvia aplicada (Tabla 3.17).

En la Tabla 3.19 se detallan los coeficientes de variación (%) correspondientes a cada parámetro, según la posición en el paisaje, la intensidad de lluvia aplicada y la sucesión de cultivos implementada.

Tabla 3.19. Coeficientes de variación (%) de las distintas propiedades evaluadas, según la intensidad de lluvia, posición en el paisaje y de acuerdo a la sucesión de cultivos implementada.

Parámetro	Intensidad 60 mm h <sup>-1</sup>				Intensidad 30 mm h <sup>-1</sup>			
	Loma		Media loma		Loma		Media loma	
	R	S	R	S	R	S	R	S
Coef. esc.	96	57	61	30	105	134	34	50
Vol. esc.	96	57	61	30	105	134	34	49
CN	20	15	18	6	23	27	9	11
Ia	23	37	43	30	22	28	45	43
Ib	38	76	84	62	52	63	96	83
TIE	85	44	105	41	62	46	61	53

Coef. esc.: coeficiente de escurrimiento. Vol. esc.: Volumen de escurrimiento. CN: curva número. Ia: Infiltración acumulada. Ib: infiltración básica. TIE: tiempo inicio de escurrimiento.

La variabilidad promedio de los resultados de escurrimiento (Coef. esc. y Vol. esc.) fue mayor en las tierras agrícolas respecto a las ganaderas, mientras que para los de infiltración (Ia e Ib) ocurrió lo contrario. Por su parte, la heterogeneidad promedio de los resultados obtenidos con menor intensidad de lluvia fue mayor respecto a los registrados con 60 mm h<sup>-1</sup>, salvo para el caso de la TIE. La posición en el paisaje también fue otro factor que influyó sobre la variabilidad de los resultados, teniendo el escurrimiento un coeficiente de variación mayor en la loma, mientras que para los parámetros asociados a la infiltración (Ia e Ib) la heterogeneidad fue menor. Por su parte, el efecto de la sucesión de cultivos en el área agrícola (R o S) sobre la variabilidad de los resultados dependió de la posición en el paisaje y de la intensidad de lluvia aplicada.

Según se observa en las Tablas 3.9, 3.10, 3.11 y 3.12, en R hubo mayor contenido de MS. Sin embargo, y según los análisis de correlación realizados, no se comprobaron vinculaciones significativas entre los distintos parámetros derivados de las simulaciones de lluvia con la biomasa aérea sobre la superficie del suelo, independientemente de la intensidad de lluvia aplicada (resultados no presentados). A su vez, se observa en las tablas 3.20 y 3.21 que la asociación entre los parámetros hidrológicos y algunas propiedades edáficas dependió de la intensidad de lluvia aplicada. De esta manera, con lluvias de mayor intensidad tuvieron más importancia aquellas propiedades ligadas a la génesis del suelo, como la distribución de partículas, mientras que a menor intensidad de la lluvia cobraron mayor relevancia aquellos parámetros ligados al uso de la tierra (Dap y Csu), el contenido de humedad inicial y el contenido de arcilla. Según estos resultados, con lluvias de alta intensidad, a mayor

contenido de arcilla y menor contenido de arena en los suelos de los ambientes altos de la cuenca, aumentaría la infiltración y disminuiría el escurrimiento. Por su parte, con lluvias más leves en cuanto a su intensidad, incrementos en la Dap, la pendiente y la humedad inicial, o disminuciones en el contenido de carbono y de arcilla, generarían mayores excesos hídricos causantes de escurrimiento en las partes altas de la cuenca. Es de hacer notar que entre estos parámetros, la pendiente fue la que obtuvo mayor valor en el coeficiente de correlación.

Tabla 3.20: Coeficientes de correlación entre los parámetros surgidos de los ensayos de infiltración con algunas propiedades del suelo bajo uso agrícola (sector media loma y loma) para la intensidad de 60 mm h<sup>-1</sup>.

	Arcilla	Arena
Coef esc	- 0,35 ***	0,28 **
Vol esc.	- 0,36 ***	0,28 **
Ia	0,35 ***	-0,28 **
Ib	0,27 **	-0,23 *
TIE	ns	ns
CN	-0,29 **	0,30 **

Coef esc.: coeficiente de escurrimiento. Vol esc.: Volumen de escurrimiento. Ia: Infiltración acumulada. Ib: infiltración básica. TIE: tiempo inicio de escurrimiento. CN: curva número.

\* p < 0.10, \*\* p < 0.05; \*\*\* p < 0.01 ns: no significativa

Tabla 3.21: Coeficientes de correlación de las variables infiltración y escurrimiento con algunas propiedades del suelo bajo uso agrícola (sector media loma y loma) para la intensidad de lluvia de 30 mm h<sup>-1</sup>.

	Dap	Csu	Arcilla	Pendiente	H
Coef esc.	0,43 ***	-0,32 **	-0,35 **	0,70***	0,43***
Vol esc.	0,43 ***	-0,32 **	-0,35**	0,70***	0,43***
Ia	-0,43 ***	0,32 **	0,35 ***	-0,70***	-0,43***
Ib	-0,38 ***	0,28 **	0,28 **	-0,63***	-0,38***
TIE	-0,30 **	0,23 *	0,27 *	-0,65***	-0,30**
CN	0,38 ***	-0,28 **	- 0.31 **	0,68***	0,38***

Coef esc.: coeficiente de escurrimiento. Vol esc.: Volumen de escurrimiento. Ia: Infiltración acumulada. Ib: infiltración básica. TIE: tiempo inicio de escurrimiento. CN: curva número. Dap: densidad aparente. Csu: Carbono total en suelo. H: humedad gravimétrica del suelo.

\* p < 0.10, \*\* p < 0.05; \*\*\* p < 0.01 ns: no significativa

En la tabla 3.22 se observan los resultados de infiltración y escurrimiento con las dos intensidades lluvia, 30 y 60 mm h<sup>-1</sup>, luego de una hora de simulación, para los

diferentes ambientes seleccionados. Como puede observarse, el escurrimiento bajo uso agrícola representa aproximadamente la mitad del escurrimiento bajo uso ganadero, tanto para lluvias de elevada como de moderada intensidad. Las propiedades de los suelos que se correlacionaron con las variables de infiltración y escurrimiento bajo cada tipo de uso explican este comportamiento: en los bajos, los molisoles se entremezclan con Alfisoles con tendencia a la salinidad y alcalinidad, que limitan el ingreso de agua al suelo (Hodgson, 1987). La literatura coincide en que el escurrimiento desde los suelos de texturas más finas es mayor que en aquellos de textura arenosa (Evenari *et al.*, 1971). En el presente trabajo se observó lo contrario, donde el ambiente ganadero ubicado en el sector bajo tiene el doble de la cantidad de arena y menos de la mitad de arcilla que los sectores del ambiente agrícola (loma y media loma).

Tabla 3.22. Infiltración y escurrimiento en los sectores agrícola y ganadero para cada intensidad de lluvia (1 hora).

Intensidad de lluvia mm h <sup>-1</sup>	Uso	Coef. esc. %	Vol. esc. l m <sup>-2</sup>	Ia mm
60	Agrícola	37,1 a	22,3 a	37,8 a
	Ganadero	69,2 b	41,6 b	18,5 b
30	Agrícola	18,8 a	5,8 a	23,7 a
	Ganadero	49,1 b	15,2 b	15,3 b

Coef. esc.: coeficiente de escurrimiento. Vol. esc.: Volumen de escurrimiento. Ia: Infiltración acumulada.

Del estado del suelo y de la vegetación que sustentan, depende la dinámica del agua, en este sentido Tadmor & Shana (1969) encontraron que el promedio anual de escurrimiento desde microcuencas sin cobertura es del orden de 30% de la precipitación media anual, mientras que con cobertura vegetal alcanza el 10%; además, concluyeron que la mayor infiltración se produce como consecuencia de que la vegetación y los residuos retardan la velocidad de escurrimiento (Adema *et al.*, 2008). En coincidencia, Zanchi (1988), realizando ensayos de escurrimiento y pérdidas de suelos en parcelas ubicadas en Italia, con tres diferentes secuencias de cultivos (trigo, maíz y pastura), reportó una notable eficacia de la pastura para reducir el escurrimiento y la pérdida de suelo en comparación con los otros cultivos, siendo los coeficientes de escurrimientos de 46.5 %, 51.5 % y 38.9 % para trigo, maíz y pastura respectivamente, para un promedio de eventos de lluvias anuales de 9 años. Chartier *et al.*, (2000), trabajando con el modelo WEPP en suelos arenosos, en pasturas de Chubut, encontraron diferencias en

coeficientes de escurrimientos entre intensidades de lluvia similares a las de este trabajo (25 mm h<sup>-1</sup> y 55 mm h<sup>-1</sup>), alcanzando porcentajes menores (entre 7,45 y 32,62%), que pueden explicarse por la textura de estos suelos.

### 3.4 Calidad del agua de escurrimiento

Los resultados de calidad de agua de los escurrimientos producto de los ensayos de simulación lluvias realizados en todos los ambientes en 2011 y 2013 se presentan a continuación.

#### 3.4.1 Ambiente ganadero (bajo)

Los análisis químicos del agua de escurrimiento se presentan en la Tabla 3.23.

Tabla 3.23 Concentración y cantidad de nutrientes exportados en los ensayos de infiltración, realizados con dos intensidades de lluvia en las distintas franjas en que se dividió el bajo.

Intensidad de la lluvia mm h <sup>-1</sup>	Duración del ensayo hora	Franja	Concentración de nutrientes			Cantidad de nutrientes		
			Ptag mg l <sup>-1</sup>	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ag mg l <sup>-1</sup>	Nag mg l <sup>-1</sup>	Ptag kg ha <sup>-1</sup>	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ag kg ha <sup>-1</sup>	Nag kg ha <sup>-1</sup>
60	1	Angosta	0,3 a	0,0 a	1,8 a	0,14 a	0,00±0,0 a	0,9±0,3 a
		Media	0,3 a	0,6 a	3,4 a	0,11 a	0,2±0,6 a	0,9±1,1 a
		Ancha	0,4 a	1,1 a	2,6 a	0,16 a	0,4±0,9 a	1,4±1,4 a
30	2	Angosta	0,6 a	4,1 a	5,7 a	0,27 a	1,8±1,3 a	2,5±0,4 a
		Ancha	0,4 a	4,0 a	6,5 a	0,13 a	1,3±2,6 a	2,1±0,6 a

Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas (p<0,05) entre franjas para una misma intensidad de lluvia. Ptag: fósforo total en agua, N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>ag: nitrógeno de nitrato en agua, Nag: nitrógeno total en agua.

No se encontraron diferencias significativas entre los diferentes anchos de franja y para ninguna de las dos intensidades de lluvia aplicada, en la concentración y cantidad de nutrientes analizados en el agua escurrida. Independientemente de la intensidad de la lluvia, la calidad del agua de escurrimiento que circula sobre el suelo es la misma para toda la posición baja del paisaje.

Por otro lado, se observó una asociación diferente de acuerdo a la intensidad de lluvia aplicada, entre las variables del suelo y los nutrientes exportados por el agua de escurrimiento (Tablas 3.24 y 3.25). Con elevada intensidad de lluvia, se asociaron mayor pendiente, menor pH, mayor contenido de arena, menor contenido de limo y menor concentración N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>su hubo mejor calidad de escurrimiento. El aumento de

$\text{Na}^+$  y la disminución de Ptsu afectaron negativamente la concentración de Ptag (Tabla 3.24). Con moderada intensidad de lluvia, el aumento de MS produjo menores concentraciones de Ptag y  $\text{N-NO}_3^- \text{ag}$  mientras que cuanto más rico en Ptsu fue el suelo disminuyó la concentración de Nag mejorando en ambos casos la calidad del escurrimiento (Tabla 3.25). Valores similares fueron reportados por Torti (2014 en el arroyo Pergamino durante el periodo 2010-2012. En la salida de estas 8 microcuencas siempre encontró eutrofización, con valores medios de  $5,1 \pm 3,4$  y  $0,78 \pm 0,43 \text{ mg l}^{-1}$  para Nag y Pag, respectivamente. Estos valores fueron comparados utilizando los valores guía de Forsberg y Riding (1980), quienes indican que un curso de agua está eutrofizado cuando las concentraciones de Nag y de Pag resultan  $> 0,6$  y  $> 0,025 \text{ mg l}^{-1}$ , respectivamente.

Tabla 3.24: Coeficientes de correlación entre los nutrientes exportados por el agua de escurrimiento (en concentración) con las propiedades de los suelos de la posición de bajo (ambiente ganadero), para una intensidad de lluvia de  $60 \text{ mm h}^{-1}$ .

	Ptag	$\text{N-NO}_3^- \text{ag}$	Nag
Pendiente	ns	-0,33 *	-0,32 *
pH	0,47 **	0,39 **	0,43 **
$\text{Na}^+$	0,39 **	ns	ns
Ptsu	-0,32 *	ns	ns
$\text{N-NO}_3^- \text{su}$	0,38 **	0,45 **	0,49 ***
Arena	-0,36 *	-0,36 *	-0,37 *
Limo	0,35*	0,38**	0,39**

Ptag: fósforo total en agua.  $\text{N-NO}_3^- \text{ag}$ : nitrógeno de nitratos en agua. Nag: nitrógeno total en agua.  $\text{Na}^+$ : sodio del suelo. Ptsu: Fósforo total en suelo.  $\text{N-NO}_3^- \text{su}$ : nitrógeno de nitratos en suelo. \*  $p < 0,10$ , \*\*  $p < 0,05$ ; \*\*\*  $p < 0,01$  ns: no significativa

Tabla 3.25: Coeficientes de correlación entre los nutrientes exportados en el agua de escurrimiento (en concentración) con las propiedades de los suelo de la posición de bajo (ambiente ganadero), para la intensidad de lluvia de  $30 \text{ mm h}^{-1}$  (2 horas de lluvia simulada).

	Ptag	$\text{N-NO}_3^- \text{ag}$	Nag
Ptsu	ns	ns	-0,44*
MS	-0,59 **	-0,48 **	ns

Ptag: fósforo total en agua.  $\text{N-NO}_3^- \text{ag}$ : nitrógeno de nitratos en agua. Nag: nitrógeno total en agua. Ptsu: Fósforo total en suelo. MS: biomasa aérea sobre superficie del suelo. \*  $p < 0,10$ , \*\*  $p < 0,05$ ; \*\*\*  $p < 0,01$  ns: no significativa.

### 3.4.2 Ambiente agrícola (media loma y loma)

En la Tabla 3.26 se muestran los resultados obtenidos de la calidad del agua de escurrimiento, generada a partir de las simulaciones de lluvia realizadas en la loma y media loma con una intensidad de 60 mm h<sup>-1</sup>.

Tabla 3.26: Concentración y cantidad de nutrientes en el agua de escurrimiento para monocultivo de soja (S) y rotación de cultivos (R) en dos posiciones del paisaje (media loma y loma) y con una intensidad de lluvia de 60 mm h<sup>-1</sup>.

Intensidad de la lluvia (mm h <sup>-1</sup> )	Posición en el paisaje	Manejos	Concentración de nutrientes			Cantidad de nutrientes		
			Ptag mg l <sup>-1</sup>	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ag mg l <sup>-1</sup>	Nag mg l <sup>-1</sup>	Ptag kg ha <sup>-1</sup>	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ag kg ha <sup>-1</sup>	Nag kg ha <sup>-1</sup>
60	Media Loma	S	0,3 a	4,7 a	6,1 a	0,1 a	1,4 a	1,8 a
		R	3,2 a	5,6 a	7,9 a	0,4 a	1,4 a	1,9 a
	Loma	S	1,7 a	4,9 a	8,9 a	0,2 a	1,2 a	2,1 a
		R	0,6 a	4,4 a	7,2 b	0,1 a	0,5 b	0,8 b

Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas (p<0,05) entre manejos para una misma posición en el paisaje.

Ptag: fósforo total en agua, N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> ag: nitrógeno de nitrato en agua, Nag: nitrógeno total en agua

Solamente se encontraron diferencias significativas entre las dos secuencias de cultivo evaluadas en la loma. En dicha posición, la concentración de Nag en el agua de escurrimiento resultó ser más elevada en S que en R. A su vez, debido al mayor volumen de escurrimiento bajo S (Tabla 3.17), la cantidad de Nag fue 2.5 veces mayor en dichos lotes. Por otra parte, si bien la concentración de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> ag no difirió entre secuencias de cultivo en la posición loma, la diferencia en el volumen de escurrimiento producido por ambos tratamientos, generó que la cantidad de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> ag perdida por escurrimiento también fuera mayor en S. En la media loma, de la misma manera que lo visualizado previamente con la cantidad de agua escurrida, la secuencia de cultivos no generó diferencias en las características químicas del agua escurrida. Marelli et al. (1989), indicaron que el N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> ag se pierde mayormente por percolación, pero cuando el suelo sufre procesos de sellamiento o presencia de porosidad horizontalmente orientada, este nutriente es exportado en mayor medida con el agua de escurrimiento.

En la Tabla 3.27 se detallan los resultados de concentración y cantidad de nutrientes exportados por el agua de escurrimiento, correspondientes a los ensayos de infiltración realizados en la loma y media loma con intensidad de lluvia de 30 mm h<sup>-1</sup>.



Tabla 3.27 Concentración y cantidad de nutrientes exportados por el agua de escurrimiento en la loma y media loma, a partir de los ensayos de infiltración realizados con una intensidad de lluvia de 30 mm h<sup>-1</sup> (S: monocultivo de soja y R: rotación).

Intensidad de la lluvia (mm h <sup>-1</sup> )	Posición en el paisaje	Manejo	Concentración de nutrientes			Cantidad de nutrientes		
			Ptag	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ag mg l <sup>-1</sup>	Nag	Ptag	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ag kg ha <sup>-1</sup>	Ntag
30	Media loma	S	0,3 a	1,0 a	6,2 a	0,1 a	0,3 a	1,7 a
		R	0,3 a	1,2 a	6,5 a	0,1 a	0,4 a	2,2 a
	Loma	S	0,7 a	0,2 a	6,5 a	0,1 a	0,02 a	0,7 a
		R	0,8 a	0,2 a	6,8 a	0,1 a	0,02 a	0,7 a

Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas (p<0,05) entre manejos para una misma intensidad de lluvia y una misma posición en el paisaje.

Ptag: fósforo total en agua, N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>ag: nitrógeno de nitrato en agua, Nag: nitrógeno total en agua

La intensidad de lluvia de 30 mm h<sup>-1</sup> no provocó diferencias entre las dos secuencias de cultivos evaluadas ni en la concentración ni en la cantidad de nutrientes exportados por fuera de las parcelas de los ensayos de infiltración, independientemente de la posición en el paisaje.

Cuando la intensidad de la lluvia fue moderada, la proporción del N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>ag con respecto al Nag perdido en el escurrimiento fue muy baja en la loma (3%) y baja en la media loma (17,5%), hecho que no ocurrió cuando la intensidad de la lluvia fue elevada: la proporción de N mineral fue 58 y 74 % en loma y media loma, respectivamente. Por lo tanto, a intensidades de lluvia moderadas (30 mm h<sup>-1</sup>), el N orgánico soluble constituye la forma de N que más se pierde.

Por otro lado, se observó una asociación de acuerdo a la intensidad de lluvia aplicada, entre las variables del suelo y la concentración de nutrientes exportados por el agua de escurrimiento (Tablas 3.28 y 3.29). Con lluvias intensas, el contenido de arcilla y la pendiente explicaron incrementos en Ptag, Nag, y N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>ag, mientras que contenidos de Na<sup>+</sup> superiores disminuyeron el Nag (Tabla 3.28). Por su parte con lluvias moderadas (Tabla 3.29), los aumentos de pendiente, Dap y pH diluyeron el Ptag y aumentaron la concentración de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>ag. En forma inversa, los aumentos de Csu concentraron Ptag y diluyeron N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>ag. Los sitios con mayor concentración de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>su aumentaron el N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>ag, mientras que el aumento de arcilla condujo a una menor concentración en N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>ag y un porcentaje superior de limo disminuiría el Nag.

Tabla 3.28: Coeficientes de correlación entre la concentración de nutrientes en el agua de escurrimiento con las propiedades de los suelos bajo uso agrícola (media loma y loma) para una intensidad de lluvia de 60 mm h<sup>-1</sup>.

	Ptag	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ag	Nag
Pendiente	ns	0,24 ***	ns
Na <sup>+</sup>	ns	ns	-0,42 *
Arcilla	0,27 **	ns	0,25 ***

Ptag: fósforo total en agua. N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> ag: Nitrógeno de nitratos en agua. Nag: nitrógeno total en agua. Na<sup>+</sup>: sodio del suelo. \* p < 0,10, \*\* p < 0,05; \*\*\* p < 0,01 ns: no significativa.

Tabla 3.29: Coeficientes de correlación entre la concentración de nutrientes en el agua de escurrimiento con las propiedades de los suelos bajo uso agrícola (media loma y loma) para una intensidad de lluvia de 30 mm h<sup>-1</sup>.

	Ptag	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ag	Nag
Pendiente	-0,63 *	0,66 *	Ns
Dap	-0,45 *	0,49 *	Ns
pH	-0,38 **	0,48 ***	Ns
Csu	0,38 **	-0,42 *	Ns
N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> su	ns	0,37 **	Ns
Arcilla	ns	-0,40 **	Ns
Limo	ns	ns	-0,33 ***

Ptag: fósforo total en agua. N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> ag: nitrógeno de nitratos en agua. Nag: nitrógeno total en agua. Dap: Densidad aparente del suelo. Csu: Carbono total en suelo. N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>su: nitrógeno de nitratos en suelo. \* p < 0,10, \*\* p < 0,05; \*\*\* p < 0,01 ns: no significativa

## 3.5 Calidad y cantidad de los sedimentos escurridos

### 3.5.1 Sector ganadero (bajo)

En la Tabla 3.30 se detallan los resultados de la cantidad de sedimentos perdidos de las parcelas correspondientes a los simuladores de lluvia, conjuntamente con su concentración y cantidad de nutrientes. En la misma se comparan estos resultados entre las distintas franjas en que se dividió el sector bajo, para las dos intensidades de aplicación de lluvia simulada.

Tabla 3.30 Cantidad de sedimentos (SE) perdidos como resultado de las simulaciones de lluvia efectuadas en el sector bajo, juntamente con la concentración y cantidad de nutrientes y carbono presentes en los mismos.

Intensidad de la lluvia (mm h <sup>-1</sup> )	Franja	SE kg ha <sup>-1</sup>	Concentración			Cantidad		
			Nse %	Ptse ppm	Cse %	Ntse kg ha <sup>-1</sup>	Ptse kg ha <sup>-1</sup>	Cse kg ha <sup>-1</sup>
60	Angosta	4512,2 a	0,13 c	562,4 b	1,40 c	5,05 a	2,32 a	56,42 a
	Media	77,8 b	0,43 b	874,2 a	3,56 b	0,31 b	0,07 b	3,69 b

	Ancha	33,9 b	0,69 a	1142,9 a	6,45 a	0,22 b	0,04 b	2,14 b
30	Angosta	2794,6 a	0,28 b	410,0 b	2,47 b	4,33 a	0,81 a	40,51 a
	Ancha	41,9 b	0,52 a	584,3 a	4,78 a	0,25 b	0,03 b	2,33 b

Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) entre franjas para una misma intensidad de lluvia.

SE: masa de sedimento erosionado. Nse: nitrógeno en sedimento, Ptse: fósforo total en sedimento y Cse: carbono en sedimento

Los suelos correspondientes a la franja más cercana al curso de agua (franja angosta) fueron los que perdieron mayor cantidad de sedimentos, independientemente de la intensidad de lluvia aplicada. De esta manera, con una lluvia de  $60 \text{ mm h}^{-1}$ , los suelos de la franja angosta perdieron 90 veces más sedimentos que los correspondientes a las franjas media y ancha, sin encontrar diferencias en la cantidad de suelo perdido entre estas dos últimas mencionadas. Por su parte, cuando la intensidad de lluvia fue de  $30 \text{ mm h}^{-1}$ , dicha relación descendió a 40. De la misma manera, Echeverría *et al.* (2000), comparando suelos bajo pasturas en la localidad de Bahía Blanca, encontró que suelos con menor contenido de arcilla y MO tuvieron mayor pérdida de suelo ( $9.120 \text{ kg ha}^{-1}$ ). La influencia de estos parámetros y el manejo de los suelos sobre la estabilidad de agregados ha sido descripta y mencionada por diferentes autores (Tisdall & Oades, 1982; Buschiazio *et al.*, 1995; Silenzi *et al.*, 2000), lo que explicaría en gran parte los resultados obtenidos en el presente trabajo. Respecto a la influencia de la intensidad de lluvia sobre el suelo perdido, Kleinman *et al.*, (2006) reportó valores de pérdida de suelo de  $13,42$  y  $38,56 \text{ kg ha}^{-1}$ , para lluvias de intensidad horaria de  $30 \text{ mm}$  y  $70 \text{ mm}$  respectivamente, en pasturas de una microcuenca en USA con  $6 \%$  de pendiente. Estos mismos autores también pudieron comprobar el efecto de la intensidad de lluvia sobre la pérdida de nutrientes en sedimentos, con valores de Ptse:  $0,04$  y  $0,08 \text{ kg ha}^{-1}$  y Nse:  $0,12$  y  $0,21 \text{ kg ha}^{-1}$  para cada intensidad de lluvia, respectivamente, similares a los encontrados en las franjas medias y anchas de este trabajo.

Con respecto a los nutrientes presentes en los sedimentos perdidos por escurrimiento, la franja angosta presentó menor concentración ( $p < 0,05$ ) de Nse, Ptse y Cse con las dos intensidades de lluvia aplicada. A su vez, a  $60 \text{ mm h}^{-1}$  la franja ancha generó una mayor concentración de Ntse y Cse en los sedimentos que la franja media, sin encontrar diferencias entre ambas para el Ptse. Sin embargo, debido a la mayor cantidad de sedimentos exportados, la cantidad de Nse, Ptse y Cse perdidos por escurrimiento fue significativamente mayor en el sector más cercano al curso de agua, independientemente de la intensidad de lluvia. Por razones similares, no hubo

diferencias entre la cantidad de sedimentos exportados entre las franjas media y ancha.

Comparando los resultados obtenidos entre ambas intensidades de lluvia, se comprueba que los sedimentos perdidos en la franja angosta fueron sensiblemente menores ante una lluvia moderada, mientras que en la franja ancha esto no sucedió. Por su parte, con respecto a los nutrientes perdidos, solo el Ptse en la franja angosta y en menor medida el Cse en el mismo sector, mostraron modificaciones evidentes ante cambios en la intensidad de lluvia aplicada, siendo menores el Ptse y Cse perdidos con  $30 \text{ mm h}^{-1}$ .

A diferencia de lo ocurrido con la calidad del agua de escurrimiento, hubo propiedades de suelo comunes que se relacionaron significativamente con la calidad y la cantidad de sedimentos generados por las dos intensidades de lluvia aplicada (pendiente, MS, Dap, Csu, H y Ptsu) (Tablas 3.31 y 3.32). Sin embargo, también hubo algunas propiedades edáficas que no coincidieron, de acuerdo a las dos intensidades de lluvia aplicada, en su vinculación con la concentración de nutrientes en el agua de escurrimiento (CE, Nsu y  $\text{N-NO}_3^-$ su).

Solamente para uso ganadero se encontraron correlaciones entre los valores de carbono (C) y fósforo (P) del suelo y del sedimento, sin encontrarse correlaciones para el nitrógeno (N).

Tabla 3.31: Coeficientes de correlación entre la concentración de nitrógeno, fósforo y carbono en sedimentos (Nse, Ptse y Cse) y la cantidad de sedimentos erosionados (SE), con distintas propiedades de los suelos del bajo (uso ganadero), para una intensidad de lluvia de  $60 \text{ mm h}^{-1}$ .

	Nse	Ptse	Cse	SE
Pendiente	-0,74 ***	-0,53 ***	-0,78 ***	0,75 ***
MS	0,55 ***	0,44 **	0,54 ***	-0,60 ***
Dap	-0,50 ***	-0,44 **	-0,49 **	0,48 ***
Csu	0,76 ***	0,75 ***	0,78 ***	-0,58 ***
Pesu	-0,62 ***	ns	-0,58 ***	0,66 **
Ptsu	ns	0,46 **	ns	ns
$\text{N-NO}_3^-$ su	0,51 ***	ns	0,54 ***	-0,44 **
H	0,39 **	0,53 ***	0,44 **	-0,38 **
Arcilla	ns	0,33 *	ns	ns
CE	ns	ns	ns	0,45 **

Nse: nitrógeno total en sedimentos. Ptse: fósforo total en sedimentos. Cse: Carbono en sedimentos. SE: masa de sedimentos erosionados. MS: biomasa aérea sobre superficie. Dap: densidad aparente. Csu: Carbono en suelo. Pesu: fósforo extractable en suelo. Ptsu: fósforo total en suelo.  $\text{N-NO}_3^-$ su: nitrógeno de nitratos en suelo. CE: Conductividad eléctrica del suelo.

\*  $p < 0.10$ , \*\*  $p < 0.05$ ; \*\*\*  $p < 0.01$  ns: no significativa

Tabla 3.32 Coeficientes de correlación entre la concentración de nitrógeno, fósforo y carbono en sedimentos (Nse, Ptse y Cse) y la cantidad de sedimentos erosionados (SE), con las propiedades de los suelos del bajo (uso ganadero), para una intensidad de lluvia de 30 mm h<sup>-1</sup>

	Nse	Ptse	Cse	SE
Pendiente	-0,55 **	-0,44*	-0,64 ***	0,40 *
MS	0,62 ***	0,62 ***	0,76 ***	-0,69 ***
Dap	-0,65 ***	-0,61 ***	-0,76 ***	0,44 **
Csu	0,64 ***	0,61***	0,75 ***	-0,44 **
Ptsu	ns	0.43 *	ns	ns
H	0,45 *	0,61 ***	0,50 **	ns
Arcilla	ns	ns	ns	-0,45 **
Nsu	0,64 ***	0,61 ***	0,75 ***	0,45 **

Nse: nitrógeno total en sedimentos. Ptse: fósforo total en sedimento. Cse: Carbono en sedimento. SE: masa de sedimentos erosionados. MS: biomasa aérea sobre el suelo. Dap: densidad aparente. Csu: Carbono en suelo. Ptsu: fósforo total en suelo. H: humedad gravimétrica del suelo. Nsu: nitrógeno del suelo. \* p < 0.10, \*\* p < 0.05; \*\*\* p < 0.01 ns: no significativa

### 3.5.2 Ambiente agrícola (loma y media loma)

#### 3.5.2.1 Nutrientes y Carbono

En la Tabla 3.33 se observan los resultados de los sedimentos escurridos (SE) y la concentración y cantidad de nutrientes (Ptse y Nse) y carbono (Cse) presentes en ellos, como consecuencia de los ensayos de simulación de lluvia (60 mm h<sup>-1</sup>) realizados en los suelos presentes en la loma y media loma con dos secuencias de cultivo diferentes, rotación y monocultivo de soja (R y S).

Tabla 3.33 Cantidad de sedimentos erosionados (SE) como resultado de las simulaciones de lluvia efectuadas con una intensidad de 60 mm h<sup>-1</sup> en el sector loma y media loma, juntamente con la concentración y cantidad de nutrientes (Nse y Ptse) y carbono (Cse) presentes en los sedimentos (S: monocultivo de soja y R: rotación).

Posición en el paisaje	Manejo	SE kg ha <sup>-1</sup>	Concentración			Cantidad		
			Nse %	Ptse ppm	Cse %	Nse kg ha <sup>-1</sup>	Ptse kg ha <sup>-1</sup>	Cse kg ha <sup>-1</sup>
Media Loma	S	74,7 a	0,4 a	916,4 a	5,1 a	0,3 a	0,07 a	4,1 a
	R	74,6 a	0,4 a	891,4 a	4,7 a	0,4 a	0,09 a	4,9 a
Loma	S	60,3 a	0,4 a	805,8 a	4,8 a	0,3 a	0,06 a	3,3 a
	R	18,5 b	0,4 a	841,0 a	5,1 a	0,2 a	0,04 a	2,3 a

Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas (p < 0,05) entre rotaciones para una misma intensidad de lluvia y una misma posición en el paisaje.

SE: Masa de sedimentos erosionados, Nse: nitrógeno en sedimento, Ptse: fósforo total en sedimento, y Cse: carbono en sedimento.

A partir de su análisis, se desprende que el efecto de la distinta sucesión de cultivos solo se manifestó en la loma y únicamente en la cantidad de sedimentos erosionados. En este sentido, los suelos correspondientes a dicho ambiente y bajo S, presentaron una pérdida de sedimentos tres veces superior a R. Por su parte, el carbono y los nutrientes asociados a los sedimentos exportados por fuera de las parcelas por el efecto de la lluvia aplicada, respondieron de la misma manera en ambos ambientes, sin haber efecto del sistema de rotación implementado. En la media loma, el diferente uso de la tierra no generó una producción de sedimentos distinta. Cabe aclarar que en algunos sitios de muestreo correspondientes a la posición de loma y bajo R se generaron pocos sedimentos dado el bajo coeficiente de escurrimiento de dichos sitios (el Coef esc. fue de 19.2%, Tabla 3.16), lo que determinó que el número de muestras analizadas fuera pequeño. En la Tabla 3.34 se detallan los resultados de los sedimentos erosionados y la concentración y cantidad de nutrientes presentes en ellos, como resultado de los ensayos de simulación de lluvia a  $30 \text{ mm h}^{-1}$ , realizados en los sectores de loma y media loma con las dos secuencias de cultivo.

Tabla 3.34 Cantidad de sedimentos erosionados (SE) como resultado de las simulaciones de lluvia efectuadas con una intensidad de  $30 \text{ mm h}^{-1}$  en el sector loma y media loma, juntamente con la concentración y cantidad de nutrientes y carbono (Nse, Ptse y Cse) presentes en los sedimentos (S: monocultivo de soja y R: rotación).

Posición en el paisaje	Manejo	SE kg ha <sup>-1</sup>	Concentración			Cantidad		
			Nse %	Ptse ppm	Cse %	Nse kg ha <sup>-1</sup>	Ptse kg ha <sup>-1</sup>	Cse kg ha <sup>-1</sup>
Media Loma	S	76,1 a	0,6 a	827,4 a	6,2 a	0,4 a	0,06 a	4,6 a
	R	73,7 a	0,6 a	875,2 a	6,6 a	0,4 a	0,06 a	4,5 a
Loma	S	53,3 a	0,6 a	783,4 a	5,9 a	0,8 a	0,08 a	7,0 a
	R	29,1 a	0,6 a	753,1 a	5,3 a	0,4 a	0,04 a	4,2 a

Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) entre manejos para una misma intensidad de lluvia y una misma posición en el paisaje.

SE: Masa de sedimentos erosionados, Nse: nitrógeno en sedimento, Ptse: fósforo total en sedimento, y Cse: carbono en sedimento.

Con lluvia de intensidad moderada, no se obtuvieron diferencias entre los dos manejos estudiados, tanto en la cantidad de sedimentos como en la concentración y cantidad de nutrientes (Nse y Ptse) y Cse, independientemente de la posición en el paisaje.

Cabe aclarar que en todo el paisaje agrícola, la cantidad de sedimento escurrida y su composición en Nse, Pse y Cse resultaron moderadas con las dos intensidades de

lluvia analizadas. A su vez, comparando los valores de las Tablas 3.33 y 3.34 no se observa un efecto de la diferente intensidad de lluvia sobre estas variables. En este sentido, la cantidad de suelo perdido en las parcelas fue bastante similar en ambas situaciones, con lluvias menos intensas la cantidad de Nse y Cse en la loma fue mayor y en media loma fue similar, mientras que la pérdida de Ptse tendió a ser similar bajo ambos regímenes de lluvia.

Coincidiendo con este trabajo, se encontró que las concentraciones de N y P solubles en el agua de escurrimiento son mucho menores que las concentraciones de estos nutrientes en los sedimentos (Burwell *et al.*, 1975). Al respecto, Harter (1968) encontró que la mayoría del P perdido por erosión hídrica se encontraba adsorbida en los sedimentos. De esto puede deducirse que todas las prácticas que controlan o reducen las pérdidas de sedimentos, también son efectivas para reducir las pérdidas de P (Adema, 2008).

Los sedimentos perdidos en los suelos agrícolas fueron sensiblemente menores a los ocurridos en la franja angosta del bajo, pero similares a los observados en las restantes dos franjas de ese mismo ambiente. Un comportamiento similar se pudo comprobar respecto a la pérdida de nutrientes, que presentó un similar orden de magnitud entre suelos agrícolas y ganaderos, con la excepción de la franja angosta correspondiente a estos últimos, la que fue sensiblemente superior.

En la Tabla 3.35 y 3.36 se detallan los resultados del análisis de correlación realizado entre los sedimentos perdidos y los nutrientes asociados, respecto a otras propiedades. Con elevada intensidad de lluvia, la cantidad de sedimento escurrido se relacionó con el tipo de suelo, expresado a través de la textura del suelo y propiedades del medio (pH, CE y  $\text{Na}^+$ ), y la MS producida: hubo mayor pérdida de sedimentos cuando la textura fue más limosa, el suelo más alcalino debido a una mayor concentración de sales sódicas y cuando hubo menor biomasa sobre el suelo. Distintos estudios demuestran la importancia de la vegetación como agente biológico protector del suelo, disminuyendo la erosión debido a que disipa la energía de gota de lluvia, retarda la velocidad del escurrimiento y aumenta la permeabilidad del suelo (Blackburn *et al.*, 1986; Ruan *et al.*, 2001; Meyer *et al.*, 1995)

La concentración de Nse, Pte y Cse se relacionaron inversamente con algunas de las propiedades mencionadas. De esta manera, Sharpley (1985) entre otros, observaron que los sedimentos erosionados usualmente contienen mayor proporción de nutrientes

que la capa superficial del suelo original. Además, cuando la concentración de  $\text{N-NO}_3^-$  su resultó elevada, también lo fueron los nutrientes y el C de los sedimentos erosionados (Tabla 3.35).

Con moderada intensidad de lluvia, existió la misma tendencia entre la MS, los SE y la concentración de Nse y Ptse. La cantidad y calidad del sedimento escurrido tuvo una menor vinculación con las propiedades del suelo en comparación con lluvias de elevada intensidad y en los casos que existió, en general ésta resultó significativa al 10 % (Tabla 3.36). Darder (2010) en parcelas de escurrimiento de Paraná, reportó pérdidas de Nse que variaron entre  $2,1 \text{ kg ha}^{-1}$ ,  $3,5 \text{ kg ha}^{-1}$  y  $11,5 \text{ kg ha}^{-1}$  en una pastura, en S y R respectivamente, durante un año húmedo. Tiscareno-Lopez *et al.* (2004) calcularon pérdidas de Nse de  $25$  y  $6 \text{ kg ha}^{-1}$  para suelo descubierto y con 100% de residuos de cobertura, respectivamente. Estos autores indicaron que pérdida de N asociada a los sedimentos no estuvo relacionada con la fertilización nitrogenada. De la misma manera, Eghball *et al.* (2002), observaron que la aplicación de fertilizantes no afectó la pérdida de N. Balkcom *et al.* (2003) reportaron en Iowa que las abundantes lluvias de primavera fueron la razón principal para las pérdidas de N en maíz.

Tabla 3.35 Coeficientes de correlación entre la cantidad de sedimentos erosionados (SE) y sus nutrientes asociados (Nse, Ptse y Cse), con algunas propiedades de los suelos agrícolas, para una intensidad de lluvia de  $60 \text{ mm h}^{-1}$

	Nse	Ptse	Cse	SE
MS	0,31 **	0,35 **	ns	-0,30 **
pH	-0,39 ***	-0,34 **	-0,48***	0,26 **
CE	ns	ns	ns	0,29 **
$\text{Na}^+$	ns	ns	ns	0,45 ***
$\text{N-NO}_3^-$ su	0,28*	0,51 ***	0,33 **	ns
Limo	-0,28 *	-0,29 *	-0,40 ***	0,25 *
Arcilla	ns	ns	ns	-0,23 *
Arena	ns	ns	0,28 *	ns

SE: masa de sedimentos erosionados. Nse: nitrógeno total en sedimentos. Ptse: fósforo total en sedimentos. Cse: Carbono en sedimentos. MS: biomasa aérea sobre el suelo. CE: Conductividad eléctrica del suelo.  $\text{Na}^+$ : Sodio del suelo.  $\text{N-NO}_3^-$ su: nitrógeno de nitratos en suelo.

\*  $p < 0.10$ , \*\*  $p < 0.05$ ; \*\*\*  $p < 0.01$  ns: no significativa

Tabla 3.36 Coeficiente de correlación de la concentración de nitrógeno, fósforo y carbono en sedimentos (Nse, Ptse y Cse) en sedimentos y cantidad de sedimentos erosionados (SE), con algunas variables de infiltración y escurrimiento y con algunas propiedades del suelo en la posición de loma y media loma (uso agrícola) para la intensidad de  $30 \text{ mm h}^{-1}$

	Nse	Ptse	Cse	SE
MS	0,31 *	0,27 *	ns	-0,27 *



H	ns	0,28 *	ns	ns
Dap	ns	ns	ns	0,27 *
Csu	ns	ns	ns	-0,23 *
Nsu	ns	0,28*	0,44***	ns

Nse: nitrógeno en sedimentos. Ptse: fósforo total en sedimentos. Cse: Carbono en sedimentos. SE: masa de sedimentos. MS: biomasa aérea sobre el suelo. H: humedad gravimétrica del suelo. Dap: densidad aparente. Csu: Carbono del suelo. Nsu: Nitrógeno del suelo. \* p < 0.10, \*\* p < 0.05; \*\*\* p < 0.01 ns: no significativa

### 3.5.2.2 Elementos traza

El uso de pesticidas, fertilizantes, biosólidos u otras sustancias con elevados tenores de metales pesados, puede provocar la contaminación de suelos y aguas con dichos elementos (De Siervi *et al.*, 2002). Los productos fitosanitarios aplicados a suelos agronómicos transitan diferentes caminos, una parte es interceptada por el material vegetal, otra puede ir directa o indirectamente a la atmósfera y una última parte alcanza la superficie del suelo. En cuencas sometidas a lluvias intensas y que generan escurrimientos, se observa que pesticidas afines a la matriz edáfica tenderán a sufrir movimientos horizontales, mientras que el resto tenderá a moverse verticalmente en profundidad (Lampman, 1995, Pereira *et al.*, 1995; USEPA, 1997).

Los valores medios de los elementos traza en sedimentos, provenientes de las muestras recogidas del escurrimiento en las parcelas con la mayor intensidad de lluvia aplicada se muestran en la Tabla 3.35, mientras que las obtenidas con la menor intensidad de lluvia se detallan en la Tabla 3.36. Con la aplicación de 60 mm h<sup>-1</sup>, el único elemento que presentó diferencias de concentración entre usos de la tierra distintos fue el Znse, que en la posición de media loma obtuvo un valor mayor en S respecto a R. Además, Cuse y Mnse difirieron en la cantidad exportada en los sedimentos de estos elementos entre manejos para las posiciones de loma y media loma, respectivamente. En la Tabla 3.38 se comprueba que con la aplicación de 30 mm h<sup>-1</sup>, no hubo diferencias entre tratamientos en la concentración ni en la cantidad de los cuatro metales pesados analizados, en ninguna de las dos posiciones consideradas.

Tabla 3.37 Concentración y cantidad de elementos traza en sedimentos: cobre (Cuse), zinc (Znse), manganeso (Mnse) y hierro (Fese) provenientes de los manejos: monocultivo de soja (S) y rotación de cultivos (R) en dos posiciones del paisaje (ML: media loma y L: loma) con una intensidad de lluvia de 60 mm h<sup>-1</sup>.

Posición	Manejo	Concentración				Cantidad			
		Cuse	Znse	Mnse	Fese	Cuse	Znse	Mnse	Fese
		mg kg <sup>-1</sup>				g ha <sup>-1</sup>			
ML	S	29,0 a	178,1 a	901,1 a	21887,6 a	2,1 a	12,9 a	62,2 b	1745,7 a
	R	26,1 a	127,7 b	895,2 a	19418,4 a	4,3 a	20,4 a	144,6 a	2990,1 a
L	S	31,3 a	138,2 a	1225,2 a	19095,8 a	4,7 a	20,6 a	183,7 a	2854,4 a
	R	30,2 a	148,3 a	1164,0 a	16887,4 a	2,4 b	11,4 a	89,9 a	1306,7 a

Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre manejos para una misma intensidad de lluvia y una misma posición en el paisaje. ML: media loma; L: loma.

Encontrar mayor concentración de Zn en los sedimentos de la media loma bajo S podría resultar de una mayor cantidad de formas fácilmente desprendibles durante el proceso de degradación estructural de la superficie del suelo, provocado por el impacto de la energía de la lluvia intensa. Bajo S hubo menor MS y pendiente, y una tendencia a menor pH y mayor contenido de arena que bajo R, factores que pueden haber aumentado su movilidad (Tablas 3.9 y 3.11). Numerosos trabajos señalan a la disminución de pH como responsable del aumento de la movilidad de Zn en los sedimentos (Salomons & Forstner 1984; Calmano *et al.*, 1993; Du Laing *et al.*, 2007).

La variabilidad en la cantidad de los sedimentos escurridos no permitió analizar diferencias en la cantidad de Zn entre manejos diferentes para esta posición del paisaje. En el caso de las diferencias en las cantidades entre manejos encontradas para el Mn en la media loma y el Cu en la loma, se las consideró como producto del sesgo de haber analizado solamente los sitios que tuvieron mayor cantidad de sedimentos.

Tabla 3.38 Concentración y cantidad de elementos traza en sedimentos: cobre (Cuse), zinc (Znse), manganeso (Mnse) y hierro (Fese), provenientes de los manejos: monocultivo de soja (S) y rotación de cultivos (R) en dos posiciones del paisaje (ML: media loma y L: loma) con una intensidad de lluvia de 30 mm h<sup>-1</sup>

Posición	Manejo	Concentración				Cantidad			
		Cuse	Znse	Mnse	Fese	Cuse	Znse	Mnse	Fese
		mg kg <sup>-1</sup>				g ha <sup>-1</sup>			
ML	S	32,1 a	274,2 a	1085,5 a	20778,0 a	3,1 a	26,9 a	101,2 a	1985,5 a
	R	30,9 a	187,2 a	1024,8 a	19878,2 a	9,0 a	52,9 a	302,3 a	3641,0 a
L	S	34,6 a	145,8 a	1125,9 a	20921,0 a	7,2 a	29,4 a	264,6 a	4475,9 a
	R	29,7 a	124,0 a	1046,5 a	26309,3 a	2,7 b	10,1 a	98,0 a	2703,3 a

Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre manejos para una misma intensidad de lluvia y una misma posición en el paisaje.

A 30 mm h<sup>-1</sup>, hubo la misma tendencia para la concentración de Znse en los sedimentos de erosión, aunque no llegó a ser significativa ( $p < 0.13$ ). La misma hipótesis

utilizada para explicar las diferencias entre las cantidades de Cuse y Mnse con elevada intensidad de lluvia puede aplicarse para justificar la falta de diferencias entre las cantidades informadas de los cuatro metales pesados con intensidad moderada.

Considerando 19 eventos anuales de lluvia moderada (promedio de la última década), se estima que las pérdidas en ET para el sector agrícola son de: 46-171, 190-1007, 1178-5700 g ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> para Cu, Zn y Mn en sedimentos. Garcia (2015), analizando la contaminación por ET en la cuenca alta del arroyo Pergamino, estimó pérdidas por exportación, debidas a la cosecha de cultivo, para secuencias típicas de la zona (Tabla 3.3), valores promedio de 44, 150 y 140 g ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> de Cu, Zn y Mn. Por lo tanto, se detecta una gran pérdida en ET por erosión, más que por extracción del cultivo. El suelo se estaría empobreciendo en los 3 elementos pero más que nada en Zn y Mn.

### 3.6 Coeficientes de enriquecimiento

#### 3.6.1 Ambiente ganadero (bajo)

En la Tabla 3.39 se detallan los coeficientes de enriquecimiento para nitrógeno, fósforo y carbono (CEN, CEP y CEC), correspondientes a las distintas franjas en que se dividió el sector bajo del paisaje y para las dos intensidades de lluvia aplicada. Los valores medios coinciden con los reportados por Darder *et al.* (2010), en pasturas de parcelas de escurrimiento de la EEA INTA Paraná, con suelos Argiudol ácuico con 2% de pendiente.

Los CEN, CEP y CEC fueron mayores ( $p < 0,05$ ) en la franja ancha independientemente de la intensidad de lluvia aplicada, no difiriendo los resultados para CEP y CEC con la franja media cuando se aplicaron las lluvias intensas. Por un lado, estos resultados se dieron a pesar que no existieron diferencias de concentración elemental edáfica entre anchos de franja antes de los ensayos de simulación de lluvia (Tabla 3.3). Por otro lado, las tablas 3.31 y 3.32 muestran como  $P_{su}$  y  $C_{su}$  explican el 46 y 78% de la variación de concentración de  $P_{se}$  y  $C_{se}$  en la simulación de 60 mm h<sup>-1</sup> de intensidad, respectivamente y como a 30 mm h<sup>-1</sup>  $N_{su}$ ,  $P_{su}$  y  $C_{su}$  explican el 64, 43 y 75% de la variabilidad de las concentraciones de  $N_{se}$ ,  $P_{se}$  y  $C_{se}$ , respectivamente. Posiblemente, en las franjas anchas, en el momento de la simulación, se desprendieron

partículas más finas, más ricas en elementos que las que se desprendieron en las franjas angostas. Numerosos autores han reportado que el sedimento es mucho más rico en elementos químicos y nutrientes, y en material fino arcillo-limoso que el suelo original (Santanatoglia et al, 1996; Weir 2002). Debido a que la mayoría de los nutrientes están adsorbidos sobre los coloides orgánicos e inorgánicos, la erosión de los sedimentos más finos provoca una movilización importante de nutrientes (Sharpley, 1985; Mathan & Kannan, 1993). Girmay *et al.* (2009) mostraron que las pérdidas de C no dependían del total de sedimentos erosionados sino de la concentración de C en el suelo original, con valores de CEC promedio de 1.6. En cambio, Avnimelech y Mc Henry (1984) reportaron una tendencia decreciente en el CEC para suelos y sedimentos en cuencas hidrográficas de EEUU, indicando valores de 1,07 1,09 y 1,37 para CEC, CEN y CEP, menores a los reportados por Sharpley (1982) en suelos similares, por ejemplo CEN: 1,41. Adema *et al.* (2001) en pastizales de Anguil reportó valores de 2,2, 2,2 y 0,93 para CEC, CEN y CEP respectivamente. Do Prado (1992), realizando cálculos por fórmulas (Stocking, 1984) indicó valores de 1,1 – 3,9, 1,1 – 4,2 y 1,9 – 5,8 CEC, CEN y CEP, respectivamente. En todos los casos, las pérdidas de nutrientes y C fueron mayores a las cantidades en el suelo original. Estos altos coeficientes reflejan una importante pérdida de fertilidad del suelo (Becker et al., 2008).

Tabla 3.39 Coeficientes de enriquecimiento para nitrógeno, fósforo y carbono (CEN, CEP y CEC, respectivamente) de la posición baja del paisaje para dos intensidades de lluvia (30 mm h<sup>-1</sup> y 60 mm h<sup>-1</sup>)

Intensidad (mm h <sup>-1</sup> )	Franja	CEN	CEP	CEC
60	Angosta	0,6 b	2,5 b	1,8 a
	Media	1,5 b	3,7 a	1,5 a
	Ancha	3,0 a	4,7 a	2,0 a
30	Angosta	1,9 a	1,9 b	1,9 a
	Ancha	1,7 a	2,5 a	1,8 a

Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) entre anchos de franja para cada intensidad de lluvia y la posición bajo del paisaje.

Respecto al efecto de la intensidad de lluvia aplicada sobre el coeficiente de enriquecimiento de estos elementos, se observó un comportamiento dispar. De esta manera, mientras en la franja ancha los coeficientes fueron inferiores con la intensidad de lluvia de 30 mm h<sup>-1</sup> (especialmente en CEN y CEP), en la franja angosta se registró mayor CEN, menor CEP y no se registraron cambios en el CEC con lluvias de intensidad moderada.

Se encontró una relación entre los valores de CEN y la provisión de Nsu, para la franja ancha (Figura 3.3). Dicha relación no se encontró para el CEC ni para CEP en ninguna de las franjas estudiadas. De la misma manera, Weir (2002) en suelo franco limoso de Marcos Juárez, con pendientes menores (1 y 2%), no encontró relación entre el CEC y el C edáfico. En este trabajo, los suelos con concentraciones de Nsu <0,30% tuvieron elevados CEN. Luego de superado ese umbral, y aún con valores mayores de Nsu no hubo cambios en el CEN. Es decir que independiente de la provisión de N edáfico, los sedimentos siempre tuvieron concentraciones de aproximadamente tres veces mayores que las del suelo de la franja ancha. Una tendencia decreciente similar fue reportada por Avnimelech & Mc Henry (1984) para suelos y sedimentos en cuencas de EEUU y Darder *et al.* (2011) en Argiudoles ácuicos de Paraná.

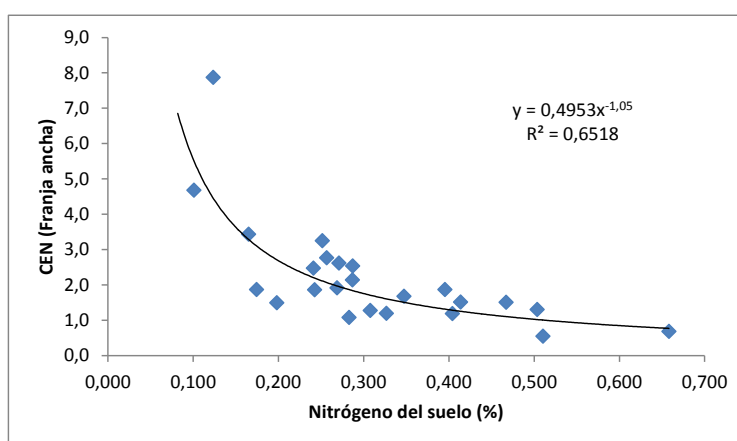


Figura 3.3. Coeficientes de enriquecimiento de nitrógeno (CEN) de los sedimentos en función de las concentraciones de nitrógeno edáfico para la franja ancha.

### 3.6.2 Sector agrícola (loma y media loma)

#### 3.6.2.1 Nutrientes y Carbono

En las Tablas 3.40 y 3.41 se detallan los coeficientes de enriquecimiento determinados para nitrógeno, fósforo y carbono (CEN, CEP y CEC), de acuerdo a las dos intensidades de lluvia implementadas para las distintas posiciones en el paisaje evaluadas y teniendo en cuenta dos sucesiones de cultivo analizadas. No se observó efecto de la sucesión de cultivos implementada sobre los coeficientes de enriquecimiento, tanto en la loma como en la media loma y a las dos intensidades de lluvia aplicadas. Los valores de estos coeficientes para la intensidad de 60 mm h<sup>-1</sup> oscilaron entre 1,9 y 2,1 para CEN, 2,5 a 2,9 para CEP y 2,4 a 2,6 para el CEC, lo cual

indica un menor enriquecimiento de N en los sedimentos erosionados respecto a fósforo y carbono. A una intensidad de lluvia aplicada menor, los coeficientes de enriquecimiento de los distintos elementos tendieron a parecerse más entre sí, aunque el CEP mostró ser algo mayor al CEN. También se comprueba al comparar las Tablas 3.38 y 3.39 que al aplicar una lluvia moderada, los coeficientes de enriquecimiento fueron más elevados (sobre todo CEN y CEP). Darder *et al.* (2010), realizando estudios en parcelas de escurrimiento de la EEA INTA Paraná, donde obtuvieron valores similares a los presentados en este trabajo, donde las CEP fueron de 1,2, 2,5 y 2,4 para un pastura, una rotación M-T/S y una soja continua, respectivamente. Resultados similares fueron reportados por Massey & Jackson (1952), Massey *et al.* (1953), Hudson & Jackson (1959), Lal (1976). Chagas (1995) encontró valores menores de CEC (entre 0,91 y 1,33) en un experimento realizado en EEA INTA Marcos Juárez con suelos Argiudoles típicos y con pendiente menor a 0,5% en 2 tratamientos con diferente nivel de estabilidad estructural.

Al comparar estos resultados con lo ocurrido en los sectores bajos del paisaje, bajo  $30 \text{ mm h}^{-1}$ , se establecieron las mayores diferencias. En este sentido, todos los coeficientes de enriquecimiento fueron menores en la franja angosta y ancha respecto a lo determinado en los suelos agrícolas. Por su parte, bajo una intensidad de lluvia aplicada mayor, los resultados de dicha comparación fueron más variables y dependieron del nutriente considerado. Para el CEC se repitió lo ya observado bajo  $30 \text{ mm h}^{-1}$ , el CEP fue mayor en la franja ancha respecto a lo observado en los suelos agrícolas, mientras que el CEN fue menor en la franja angosta y media y mayor en la ancha respecto a lo encontrado en los sectores más altos del paisaje. Con respecto al CEP, numerosos estudios han demostrados el enriquecimiento en P de los sedimentos de escurrimiento superficial en experimentos de erosión de diferentes escalas (Massey & Jackson, 1952; Sholtenberg & While, 1953; Sharpley, 1985; Kronvang, 1990; Quinton *et al.*, 2001). Además, se demostró que la concentración de fósforo disminuye en los sedimentos a medida que aumenta de la erosión (Sharpley, 1980; Sharpley, 1985; Quinton *et al.*, 2001). Sin embargo, Miller *et al.* (2009), no encontraron tal relación cuando se comparó el contenido de Pse con la carga de sedimento total en 13 suelos de Europa, probablemente debido a que el efecto del tipo de suelo sobre el contenido de fósforo fue más dominante. Estos resultados fueron corroborados por Quinton *et al.* (2001), Sharpley (1980) y Sharpley (1985) quienes encontraron, en experimentos de

laboratorio con simuladores de lluvias, que la presencia de arcilla rica en P contribuye al enriquecimiento de los sedimentos, aunque, el enriquecimiento de arcilla no pudo explicar completamente el enriquecimiento de los sedimentos.

Tabla 3.40 Coeficientes de enriquecimiento para nitrógeno, fósforo y carbono (CEN, CEP y CEC respectivamente) de la posición media loma y loma del paisaje, con monocultivo de soja (S) y rotación de cultivos (R), para la intensidad de lluvia de 60 mm h<sup>-1</sup>.

Intensidad	Posición	Manejo	CEN	CEP	CEC
60	Media Loma	S	1,9 a	2,5 a	2,5 a
		R	2,1 a	2,7 a	2,4 a
	Loma	S	2,0 a	2,9 a	2,4 a
		R	2,0 a	2,9 a	2,6 a

Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre manejos para una misma intensidad de lluvia y una misma posición en el paisaje.

Tabla 3.41 Coeficientes de enriquecimiento para nitrógeno, fósforo y carbono (CEN, CEP y CEC respectivamente) de la posición media loma y loma del paisaje, con monocultivo de soja (S) y rotación de cultivos (R) para la intensidad de lluvia de 30 mm h<sup>-1</sup>.

Intensidad	Posición	Manejo	CEN	CEP	CEC
30	Media Loma	S	2,6 a	3,4 a	2,9 a
		R	3,2 a	3,9 a	3,4 a
	Loma	S	2,9 a	3,5 a	2,8 a
		R	3,2 a	3,2 a	2,4 a

Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre manejos para una misma intensidad de lluvia y una misma posición en el paisaje.

La Figura 3.4 a, b y c muestra las relaciones que se encontraron entre los valores de CEN, CEP y CEC y la provisión de N<sub>su</sub>, P<sub>su</sub> y C<sub>su</sub>, respectivamente, en el sector agrícola. Las mismas demostraron que con concentraciones menores a 0,25 % de N<sub>su</sub>, 300 ppm de P<sub>su</sub> y 23 g kg<sup>-1</sup> de C<sub>su</sub> los valores CEN, CEP y CEC resultaron elevados. Superados esos umbrales los valores se mantuvieron constantes. En todos los casos los valores fueron entre 2 y 3 veces superiores a los encontrados en el suelo.

Darder *et al.* 2010, realizando estudios en parcelas de escurrimiento de la EEA INTA Paraná, donde obtuvieron valores similares a los presentados en este trabajo, con concentraciones de P<sub>su</sub> <300 ppm, obtuvieron elevados CEP. Luego de superado este umbral, aún con valores de P<sub>su</sub> mayores a 400 ppm no hubo cambios en el CEP. Es decir, independientemente de la provisión de P edáfico, los sedimentos siempre tuvieron concentraciones de P aproximadamente 2 veces mayores que la del suelo. Resultados similares fueron obtenidos en parcelas de escurrimiento de la EEA INTA Marcos Juárez

con suelos Argiudoles típicos con 2% de pendiente (Weir, 2002). Al respecto, Avnimelech y McHenry (1984) reportaron CEC y CEN provenientes de 41 suelos, como una función inversa al contenido inicial en los suelos de origen, ajustándose a un modelo exponencial negativo, lo cual significa que los suelos más pobres en C y N tienen mayor enriquecimiento en sus sedimentos y viceversa.

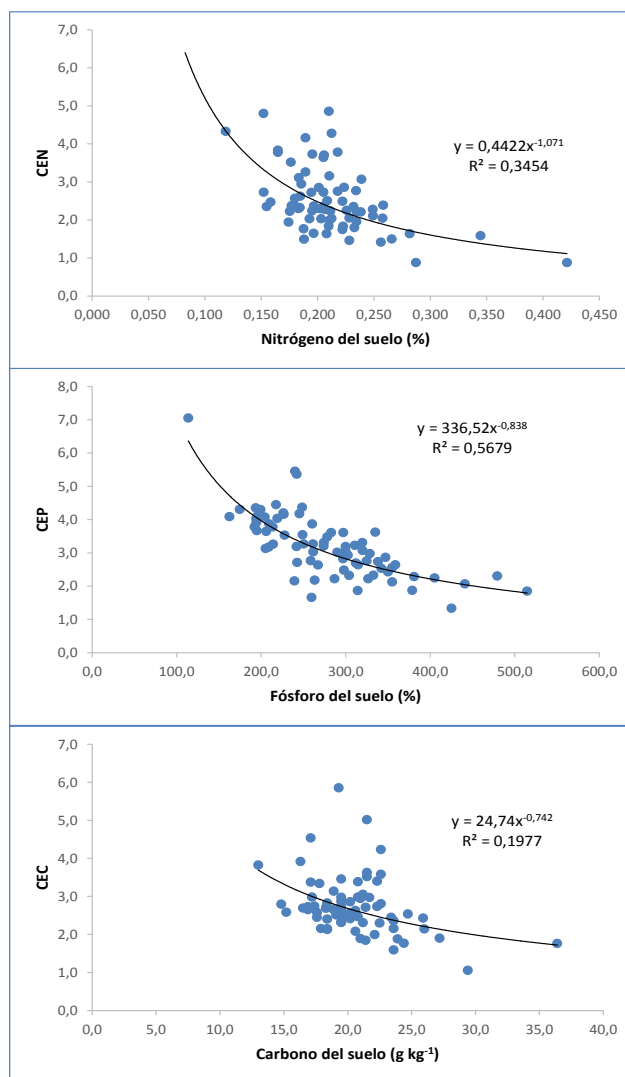


Figura 3.4. Coeficientes de enriquecimientos de nitrógeno CEN (a), fósforo CEP (b) y carbono CEC (c) de los sedimentos en función de las concentraciones de nitrógeno, fósforo y carbono edáfico para el sector agrícola.

### 3.6.2.2 Elementos traza

En general, en el sector agrícola no hubo efecto de la intensidad de la precipitación ni de la posición en el paisaje sobre los coeficientes de enriquecimiento de CECu, CEMn y CEFé excepto con alta intensidad para CEZn en la media loma (Tabla 3.42 y 3.43). Los valores medios estuvieron alrededor de 1,5, 2-5, 1,4 y 0,9 para Cu, Zn,



Mn y Fe, respectivamente. Estos resultados mostraron que los sedimentos se enriquecieron relativamente más en Zn y menos en Fe y en forma intermedia en Cu y Mn.

Si bien estos resultados no permiten diferenciar coeficientes de enriquecimiento de elementos traza debido a diferentes usos de la tierra o posiciones del paisaje, se brinda información para inferir sobre la movilidad de los metales pesados analizados. El Fe es el elemento estructuralmente más inmóvil que tiene un efecto muy marcado sobre la estabilidad de la estructura, ofreciendo una gran resistencia a su movilidad (Roca, 2007). Por su parte, el Zn, como se mencionó anteriormente (Tabla 3.9) estuvo influido por la disminución del pH en la media loma bajo S. Como una consecuencia, este elemento tiene mayor probabilidad de perderse.

Tabla 3.42 Coeficientes de enriquecimiento para cobre, zinc, manganeso e hierro (CECu, CEZn, CEMn y CEFé respectivamente) de la posición media loma y loma del paisaje para la intensidad de lluvia de 60 mm h<sup>-1</sup> bajo monocultivo de soja (S) y rotación de cultivos (R)

Intensidad	Posición	Manejo	CECu	CEZn	CEMn	CEFe
60	Media Loma	S	1,5 a	3,2 a	1,3 a	0,9 a
		R	1,5 a	2,5 b	1,3 a	0,8 a
	Loma	S	1,7 a	2,5 a	1,7 a	0,8 a
		R	1,4 a	2,6 a	1,3 a	0,7 a

Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre manejos para una misma intensidad de lluvia y una misma posición en el paisaje.

Tabla 3.431 Coeficientes de enriquecimiento para cobre, zinc, manganeso e hierro (CECu, CEZn, CEMn y CEFé respectivamente) de la posición media loma y loma del paisaje para la intensidad de lluvia de 30 mm h<sup>-1</sup> bajo monocultivo de soja (S) y rotación de cultivos (R)

Intensidad	Posición	Manejo	CECu	CEZn	CEMn	CEFe
30	Media Loma	S	1,7 a	5,4 a	1,6 a	0,9 a
		R	1,6 a	3,4 a	1,4 a	0,8 a
	Loma	S	1,6 a	2,5 a	1,3 a	0,9 a
		R	1,5 a	2,2 a	1,4 a	1,0 a

Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre manejos para una misma intensidad de lluvia y una misma posición en el paisaje.

### 3.7 Analisis multivariado

De acuerdo a Wischmeier y Smith (1978), la magnitud de la erosión hídrica en un sitio está determinada por la combinación de variables físicas, ambientales y de manejo, tales como: 1) clima, principalmente la magnitud e intensidad de la lluvia; 2)

suelo, en especial su resistencia al desprendimiento y su capacidad de infiltración, percolación y almacenamiento de agua; 3) topografía, longitud y gradiente de la pendiente; 4) cobertura de vegetación, de broza y su manejo. Para tener una visión integradora de los resultados obtenidos se presentan los correspondientes al análisis multivariado de componentes principales. Las variables son las propiedades que se midieron (del suelo, del agua, la MS, del escurrimiento líquido y sólido) y los criterios de clasificación para cada intensidad (60 y 30 mm h<sup>-1</sup>) son la posición en el paisaje, el ancho de franja en los ambientes ganaderos y el uso de la tierra (R o S) en las tierras con aptitud agrícola.

### **Análisis de componentes principales**

Permite analizar la interdependencia de variables métricas y encontrar una representación gráfica óptima de la variabilidad de los datos de una tabla de n observaciones y p columnas o variables. El análisis de componentes principales (ACP) trata de encontrar, con pérdida mínima de información, un nuevo conjunto de variables (componentes principales) no correlacionadas que expliquen la estructura de variación en las filas de la tabla de datos.

#### **3.7.1. Ambiente ganadero (bajo)**

En la Figura 3.5 se muestra el análisis en función del ancho de franja (CP1) y de la intensidad de lluvia (CP2). Estos primeros dos componentes explicaron el 93,4% de la variación de los datos. El Componente Principal 1 (CP1) separó la franja ancha de la angosta.

En la franja angosta, los factores inherentes al tipo de suelo (contenido de arena y de sales del suelo) y su relativamente más elevada pendiente, limitaron el ingreso de agua y aumentaron la cantidad de sedimentos y su contenido en C y N. En contraposición, en la franja ancha (media) hubo más infiltración acumulada que estuvo relacionada con mayores contenidos de humedad, arcilla, limo y C del suelo, mayor biomasa aérea, y con sedimentos más ricos en C y N.

El Componente Principal 2 (CP2) separó las dos intensidades de lluvia aplicadas. En este sentido, con una intensidad de lluvia moderada se asociaron la concentración y la cantidad de nutrientes exportados en el agua de escurrimiento mientras que con elevada intensidad cobraron importancia 3 variables edáficas: los contenidos de sodio intercambiable, de N y P totales del suelo (a mayor contenido de  $\text{Na}^+$  y nutrientes edáficos mayores pérdidas). Presencia de sodio en el complejo de intercambio favorecería el sellamiento superficial del suelo, incrementando el escurrimiento y por ende la capacidad de transporte. En este caso en particular, el sellamiento superficial sería también el responsable de la presencia de elevada cantidad de suelo superficial disponible para ser desprendido y transportado en forma de sedimento, debido al efecto de dispersión (Levy et al., 1994).

La CP1 permitió explicar la mayor parte de la variabilidad en los resultados (65%), mientras que la CP2 presentó una importancia menor (28%). De esta manera, la posición respecto al curso de agua resultó ser más importante en determinar las diferencias observadas en el trabajo, respecto a la influencia de la intensidad de lluvia aplicada.

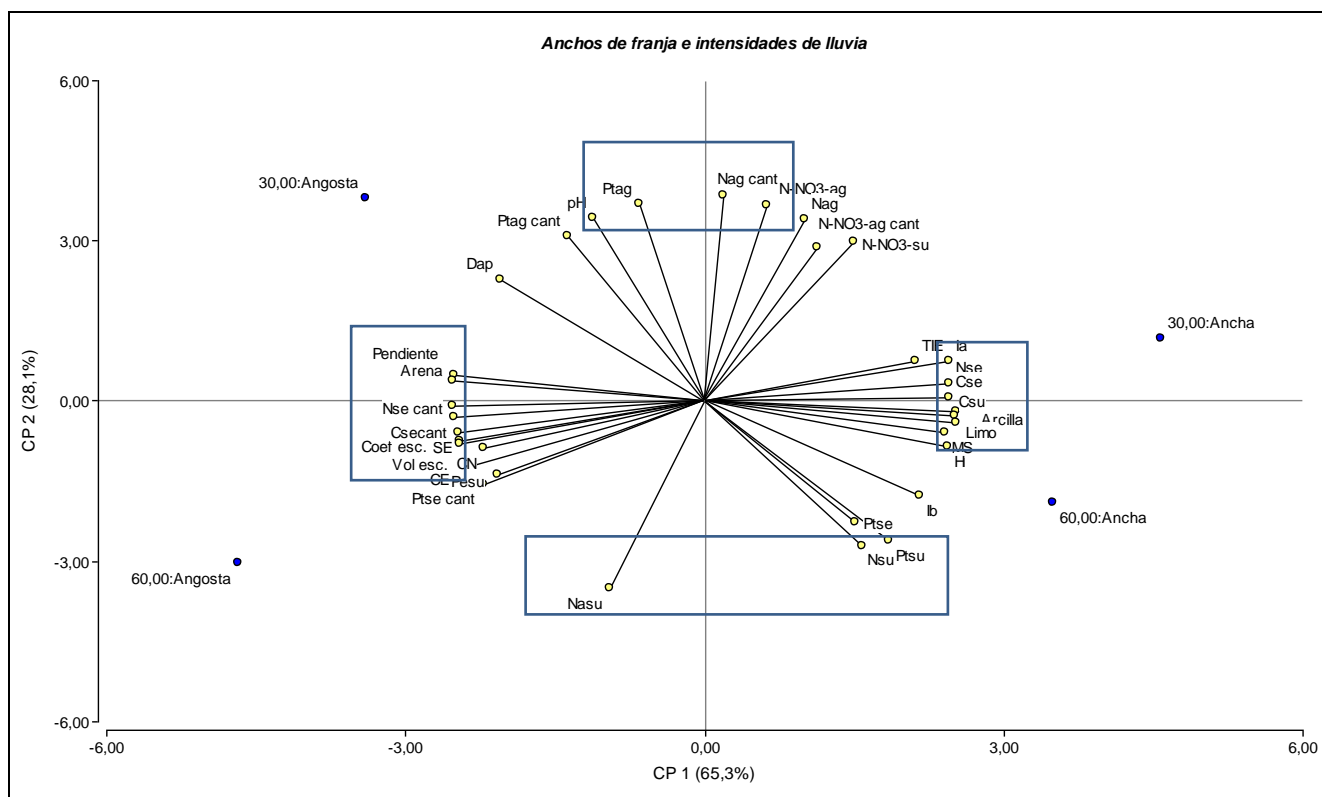


Figura 3.5. Análisis de componentes principales del ambiente ganadero entre franjas angosta y ancha (CP1) para cada intensidad de lluvia, 30 y 60  $\text{mm h}^{-1}$  (CP2)

### 3.7.2 Ambiente agrícola (loma y media loma)

En el sector agrícola se analizaron por separado los dos muestreos de suelo y los ensayos de simulaciones de lluvia con las diferentes intensidades de lluvia. La figura 3.6 muestra el análisis de componentes principales con los datos obtenidos en 2011 y los ensayos de simulación a  $60 \text{ mm h}^{-1}$ . Los dos primeros componentes principales explicaron el 80% de la variabilidad total en las observaciones.

En el CP1 se dispusieron las posiciones en el paisaje. De esta manera, los suelos de la media loma con mayor pendiente, se asocian con escurrimiento (volumen y coeficiente), curva número, producción de sedimentos y algunos nutrientes. Por su parte en la loma, la mayor infiltración y el superior tiempo de retardo hasta el inicio del escurrimiento, se asocian con menor pendiente y de un mayor contenido de arcilla superficial. Además, a medida que el suelo se presenta más rico en nutrientes, mayores son las cantidades perdidas de estos elementos en los sedimentos.

El CP2 separó las sucesiones de cultivo: en el monocultivo, la densidad aparente y el contenido de arena jugaron un rol clave en la repartición del flujo de agua mientras que en la rotación el contenido de limo, de Csu, de Pesu, la humedad inicial, la conductividad eléctrica, la biomasa de rastrojos (aérea) sobre la superficie y la concentración de nutrientes en sus diferentes formas en el agua de escurrimiento son las que más explicaron el flujo de agua y su composición.

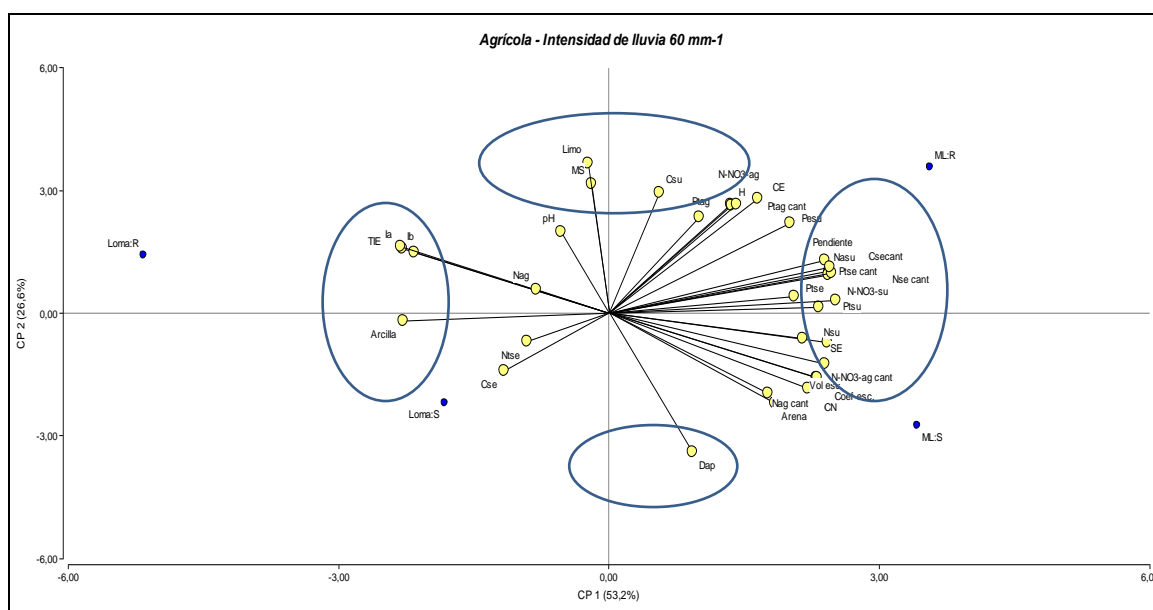


Figura 3.6. Análisis de componentes principales del ambiente agrícola entre la posición de loma y media loma (ML) del paisaje (CP1) para para cada manejo de cultivo (CP2), monocultivo de soja (S) y rotación de cultivos (R) con intensidad de lluvia de  $60 \text{ mm h}^{-1}$

El CP1 toma en cuenta el 53 % de la variabilidad total, mientras que el CP2 el 27 %. De esta manera en el ambiente agrícola, la posición en el paisaje condicionó más los resultados obtenidos que el uso diferencial de la tierra.

La figura 3.7 muestra el análisis de componentes principales con los datos obtenidos en 2013 y los ensayos de simulación a  $30 \text{ mm h}^{-1}$ . Con CP1 y CP2 se explicó el 86% de la variabilidad total en las observaciones. Al igual que con mayor intensidad de lluvia, el CP1 dispuso la posición en el paisaje. En Loma, tomaron importancia las infiltraciones básica y acumulada y el tiempo de retardo hasta el inicio del escurrimiento así como la concentración de Pt en agua. En las posiciones de ML, la pendiente, la CN y el pH del suelo jugaron un rol clave en relación al reparto y al volumen de escurrimiento y a los contenidos y cantidades de  $\text{N-NO}_3^-$  en el agua y en las cantidades de Nt en los sedimentos. De esta manera, en las posiciones de loma, se favoreció el ingreso de agua al suelo y la pérdida de Pt en el agua de escurrimiento. En la media loma, el aumento de la pendiente y de la curva número causó un aumento del coeficiente y del volumen de escurrimiento, los cuales resultaron concentrados en  $\text{N-NO}_3^-$  ag y con mayor cantidad de las dos formas de N.

En el CP2 se separaron las sucesiones de cultivo. De manera distinta a lo sucedido cuando se analizaron los resultados obtenidos con simulaciones de lluvia con una intensidad de  $60 \text{ mm h}^{-1}$ , a esta intensidad se observó un menor efecto del uso de la tierra sobre las propiedades analizadas.

El monocultivo de S se asoció a las variables edáficas humedad, Csu y formas de P mientras que R afectó la Dap, la concentración de C y nutrientes de los sedimentos y la cantidad de Pt en agua. De esta manera, se corrobora el efecto positivo de la rotación sobre la compactación y la disminución de pérdida de C y nutrientes en los sedimentos del escurrimiento. También el efecto negativo de S sobre la retención de agua superficial y la provisión de C y nutrientes edáficos.

El CP1 explicó el 65 % de la variabilidad total, mientras que el CP2 el 21 %. De esta manera, aun con intensidad de lluvia moderada se corrobora que en el ambiente

agrícola, la posición en el paisaje condicionó más los resultados obtenidos que el uso diferencial de la tierra.

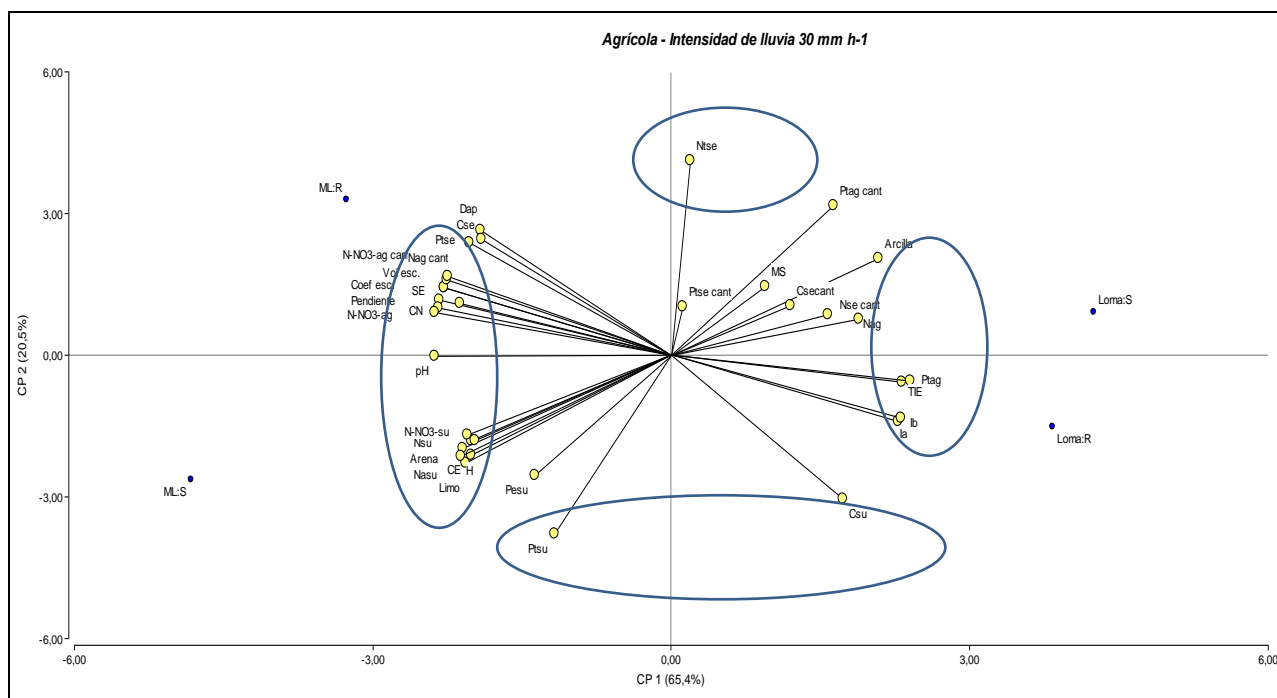


Figura 3.7. Análisis de componentes principales del ambiente agrícola entre la posición de loma y media loma (ML) del paisaje (CP1) para para cada manejo de cultivo(CP2), monocultivo de soja (S) y rotación de cultivos (R) con intensidad de lluvia de 30 mm h<sup>-1</sup>

La mayor parte de la variabilidad en el escurrimiento y su calidad fue explicada por propiedades de suelo y el paisaje asociado con él (su pendiente). Y esto ocurrió con cualquiera de las intensidades de lluvia analizadas, aunque variaran las propiedades y su significancia estadística. Así, en el ambiente ganadero, los atributos del suelo estuvieron relacionados con la H al momento de muestreo, la textura, el contenido de Na intercambiable, el pH, C y N orgánicos, el P total y N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>. En el ambiente agrícola, los atributos de suelo a moderada intensidad fueron H, Dap, pH, C orgánico, P total y Pext.; y con elevada intensidad se agregaron a los anteriores, Na, N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> y textura. El único factor más relacionado con el uso/manejo fue la biomasa aérea sobre el suelo (MS) excepto en el ambiente agrícola con moderada intensidad.

**CAPÍTULO 4**  
**CONCLUSIONES GENERALES**

---

## CONCLUSIONES GENERALES

---

### 4.1.1 Comportamiento de las precipitaciones en el partido de Pergamino

El análisis de la variabilidad decádica de las precipitaciones para el período 1930-2009 mostró una clara tendencia al aumento, con su máxima expresión en la década del 2000. La variabilidad interanual de las precipitaciones constituye, sin duda, una gran fuente de variación del clima y supera ampliamente a los cambios derivados de las variaciones entre décadas y las variaciones de largo plazo.

Cuando las lluvias se agruparon según su intensidad en lluvias mayores a 25 mm h<sup>-1</sup> (Hudson, 1982), se encontró que en promedio el 16% de la lámina de lluvia caída durante un año correspondía a precipitaciones con potencialidad erosiva y que su intensidad media era de 46 mm h<sup>-1</sup>, condiciones que ubican a esta subregión en un clima templado en tránsito hacia uno subtropical. Además, la variabilidad del número de lluvias anuales con potencial erosivo durante la década fue muy elevada (CV= 94%), desde un año sin registrarse este tipo de tormentas (2005) hasta el año 2002 con un 53,3% de la lámina anual caída con características erosivas.

De estos resultados surge, a partir de la existencia de un clima templado con tendencia a subtropical y de la posibilidad de la ocurrencia de lluvias erosivas con extremada variabilidad interanual, sumado a las condiciones geomorfológicas e hidrológicas de la Pampa Ondulada, la necesidad de buscar sistemas productivos que mejor se adapten a dichas condiciones.

### 4.1.2 Caracterización de los suelos

La comparación entre las propiedades de los suelos en las tres posiciones del paisaje, mostró diferencias significativas, principalmente entre los del bajo y los correspondientes a las posiciones de loma y media loma. Los suelos del bajo tuvieron un pH más elevado que se correspondió con el mayor contenido de Na<sup>+</sup> intercambiable, fueron más salinos (>CE) y tuvieron menor Ptsu, N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>su, Cusu, Mnsu y Fesu que los suelos de las posiciones más elevadas. Sin embargo, el Ntsu fue mayor y el Csu no difirió con respecto a los de la loma y media loma. Además, los suelos del bajo presentaron mayor Dap, humedad al momento de muestreo (H), arena y pendiente que



aquellos bajo uso agrícola, sucediendo lo contrario para el contenido de arcilla y la biomasa aérea superficial (MS).

Al dividir el sector bajo en diferentes anchos de franja se pudo comprobar que existieron diferencias significativas entre la franja más angosta con respecto a las franjas media y ancha en algunas propiedades, sin encontrar mayormente cambios entre éstas dos últimas. Tomando en cuenta las dos fechas de muestreo en los ambientes agrícolas, tanto en la loma como en la media loma, en general no se visualizaron diferencias en las propiedades de los suelos correspondientes a las dos secuencias de cultivos analizadas. Fundamentalmente, y de manera independiente a la fecha de muestreo y posición en el paisaje, siempre se determinó menor contenido de MS en S que en R.

Con estos resultados se comprobó que los sitios de muestreo en diferentes posiciones del paisaje se correspondieron con diferentes tipos de suelo. Las propiedades edáficas analizadas se mantuvieron con valores medios similares en los dos momentos de muestreo. Sin embargo, algunas de ellas, como el contenido de arcilla, y del paisaje (pendiente) difirieron entre manejos de una misma posición, ocasionando un posible aumento de la variabilidad intrínseca dentro de un mismo manejo, que podría complicar la visualización de diferencias resultantes en los ensayos de simulación de lluvia. A diferencia de las variables del suelo y del paisaje, la MS fue claramente diferenciada entre manejos (bajo S < que bajo R) en cualquiera de las posiciones analizadas, y en la franja angosta con respecto a la media/ancha, indicando un neto efecto del manejo y del uso del suelo sobre la productividad vegetal.

#### **4.1.3 Infiltración y escurrimiento**

Los resultados correspondientes a los ensayos de simulación con elevada y moderada intensidad de lluvia indicaron un aumento del coeficiente de escurrimiento a medida que se estaba más cerca del curso de agua: este parámetro varió entre 5 y 40 % en la loma, entre 25 y 50 % en la media loma y entre 40 y 80 % en el bajo en la primera hora de simulación y para las dos intensidades de lluvia analizadas. En loma y bajo 60 mm h<sup>-1</sup>, el coeficiente de escurrimiento en R fue la mitad que en S, mientras que dicha propiedad no difirió entre manejos con 30 mm h<sup>-1</sup>. En ML no hubo diferencias entre manejos para ninguna de las dos intensidades de lluvia aplicadas. En el bajo, con 60 mm h<sup>-1</sup>, el coeficiente de escurrimiento de la franja angosta fue superior al de los anchos de

franja restantes, mientras que con  $30 \text{ mm h}^{-1}$  no se observaron diferencias significativas entre las distintas posiciones de dicho sector. Las diferencias entre manejos y franjas se apreciaron fundamentalmente bajo  $60 \text{ mm h}^{-1}$  debido a que el coeficiente de escurrimiento presentó un menor coeficiente de variación que el correspondiente a  $30 \text{ mm h}^{-1}$ . A su vez, las diferencias en los resultados se explicaron en parte por el efecto de las siguientes propiedades:

- en el ambiente agrícola, a mayor contenido de arcilla y de Csu y menores contenidos de arena, Dap, humedad y pendiente, disminuyó el coeficiente de escurrimiento y aumentó la tasa de infiltración.
- en el ambiente ganadero, a menores valores de CE, Dap y pendiente y mayor contenido de Csu disminuyó el coeficiente de escurrimiento

Se demostró que el coeficiente de escurrimiento fue entre 1,9 y 2,6 veces mayor en el ambiente ganadero que en el agrícola, para las intensidades de lluvia elevada y moderada de la misma duración, respectivamente. De esta manera, estos dos ambientes aumentaron sus diferencias en el coeficiente de escurrimiento cuando la intensidad de lluvia fue moderada, ya que los agrícolas disminuyeron dicho parámetro en un 49 % mientras que los ganaderos en solo un 29 % al bajar la intensidad de lluvia a  $30 \text{ mm h}^{-1}$ . Esto muestra la mayor fragilidad de los suelos del ambiente bajo para la producción de escurrimiento, dado que ante una disminución en la intensidad y en el volumen de lluvia de un 50 %, solo disminuyeron un 29 % en su capacidad de producir escurrimiento. La menor biomasa aérea sobre el suelo, la mayor pendiente y las características físico-químicas (menor contenido de arcilla, mayor densidad aparente, CE, pH y  $\text{Na}^+$ ) de los suelos correspondientes a los ambientes ganaderos respecto a los agrícolas, explicaron estos resultados.

De acuerdo con ello, la Ib resultó ser lenta a moderada en el ambiente del bajo y moderada en los ambientes agrícolas. La única excepción la marcó el manejo bajo rotación en la posición de loma con un valor rápido de Ib. En consecuencia, las lluvias con moderada intensidad son capaces de generar un importante volumen de escurrimiento.

Por todo lo expresado, se demostró que el escurrimiento del sector ganadero (Coef. esc., Vol. esc. e Ia) fue significativamente mayor que el del sector agrícola, resultando ampliamente aprobada la hipótesis que enunciaba: “*El escurrimiento en las*

*partes bajas del paisaje con uso ganadero, es superior al del sector agrícola, independientemente de la intensidad de lluvia.”*

En las posiciones de media loma, el manejo agrícola (rotación vs monocultivo) no tuvo efecto sobre el ingreso acumulado de agua al suelo (Ia), tanto con lluvias de moderada como de elevada intensidad. La mayor variabilidad de los resultados de Ia en las rotaciones explicaron estos resultados, rechazándose la hipótesis planteada: *“En el ambiente con aptitud agrícola, la secuencia de cultivos en la posición de media loma, modifica la infiltración acumulada, independientemente de la intensidad de lluvia.”*

#### **4.1.4 Calidad del agua de escurrimiento**

En general, el agua de escurrimiento tuvo concentraciones menores de Nag y Pag en el bajo (1,8-6,5 y 0,3-0,6 mg l<sup>-1</sup>) respecto a las concentraciones determinadas en media loma (6,0-8,0 y 0,3-3,2 mg l<sup>-1</sup>) y loma (6,5-9,0 y 0,6-1,7 mg l<sup>-1</sup>). Estas concentraciones estuvieron por debajo del límite de contaminación del agua de escurrimiento establecidos en 30 y 10 mg l<sup>-1</sup> para Nag y Pag, respectivamente, independientemente de la intensidad de las lluvias (Giupponi, 1998). Estas concentraciones convertidas en cantidades, al ser afectadas por los respectivos volúmenes de escurrimiento, arrojaron valores que variaron entre 0,7 y 2,5 y entre 0,1 y 0,4 kg ha<sup>-1</sup> para Nag y Pag, respectivamente, para todas las posiciones y manejos analizados, durante un evento de lluvia. Tomando como límites de contaminación del agua superficial por nutrientes, valores 10 y 5 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> para Nag y Pag, respectivamente (INTA, 2006, Proyecto AEGA 1663), el promedio de lluvias anuales de moderada intensidad serían suficientes para contaminar los cursos de agua, al menos desde las posiciones más cercanas.

#### **4.1.5 Cantidad y calidad de los sedimentos escurridos**

El ancho de franja riparia tuvo un efecto significativo sobre la cantidad y calidad del sedimento en cualquiera de las dos intensidades de lluvia analizadas. Así, la franja más cercana y angosta (0-5 m) se diferenció marcadamente de la ancha (0-100 m), perdiendo entre 67 y 133 veces más sedimentos para lluvias de intensidad moderada y elevada, respectivamente. En la franja angosta, una sola precipitación puede aportar

entre 3 y 4,5 Mg ha<sup>-1</sup>. Considerando un año con lluvias promedio de intensidad moderada, se alcanzarían entre 57 y 85 Mg ha<sup>-1</sup> de sedimento aportado directamente al arroyo, lo cual se considera como un grado de erosión actual alta (Michelena *et al.*, 1989). Además y de acuerdo a las mediciones realizadas en el presente trabajo, se perdieron provenientes de la franja angosta 17, 27 y 17 veces más cantidad de N, P y C, respectivamente con moderada intensidad de lluvia y 23, 58 y 26 veces más cantidad de N, P y C, respectivamente con elevada intensidad de lluvia. Estos resultados son contundentes y advierten sobre la necesidad de proteger las franjas más cercanas a los cursos de agua, para retardar la pérdida de suelo y nutrientes asociados por erosión, disminuir la eutrofización y preservar la vida silvestre ripariana. El ancho de franja riparia tuvo un efecto significativo sobre la cantidad y calidad del sedimento en cualquiera de las dos intensidades analizadas. Esto permitió corroborar la hipótesis: “*En el ambiente con aptitud ganadera, la distancia al curso de agua es inversamente proporcional a la cantidad y calidad de sedimento generado.*”

Los sitios de R en la loma del sector agrícola, mostraron una cantidad de sedimentos erosionados tres veces menor que en S, solamente con lluvia de elevada intensidad ya que no existieron diferencias entre R y S con lluvias moderadas. Tampoco en la media loma existieron diferencias en la pérdida de suelo entre manejos contrastantes, independientemente de las características de las lluvias. En general, los valores de erosión resultaron de poca importancia y no difirieron entre intensidades de lluvia, debido a que los ensayos se realizaron bajo suelo cubierto. En este sentido y al realizar los mismos en forma inmediatamente posterior a la cosecha de los cultivos de verano, la cantidad de biomasa presente sobre la superficie del suelo resultó abundante, y poco dependiente del cultivo antecesor. Por ello, no se registraron diferencias contrastantes en la cantidad de suelo perdido ante intensidades de lluvia diferentes. Además, las simulaciones de lluvia se realizaron a nivel de microparcela, la cual no permite la expresión de la erosión en surcos o cárcavas, típica de la pampa ondulada.

Las concentraciones de nutrientes y carbono y sus cantidades totales perdidas, no difirieron entre manejos en cualquier posición ni ante las dos intensidades de lluvia simulada, mostrando un bajo aporte hacia los cursos de agua.

Los cantidades medias anuales de elementos traza (ET) contenidos en los sedimentos erosionados del sector agrícola, calculadas en la cuenca alta del arroyo Pergamino, para un año característico con lluvias de intensidad moderada, igualaron o

superaron a las cantidades anuales extraídas por las cosechas y superaron ampliamente a las cantidades aportadas por los fertilizantes. Esto demuestra que el suelo del sector agrícola se está empobreciendo marcadamente en ET.

#### **4.1.6 Coeficientes de enriquecimiento**

Gran parte de los nutrientes que ingresan en los cursos de agua representa el resultado de la erosión de las partículas del suelo en la cuenca, junto con nutrientes adsorbidos y su movimiento de los suelos de las tierras altas. A medida que las partículas desprendidas se mueven aguas abajo, se someten a una segregación selectiva de tamaño y los nutrientes están sujetos a la desorción y adsorción selectiva entre las partículas y el agua. Durante el transporte, ocurre un enriquecimiento de partículas de arcilla así como también de P, N, y C. En el sector agrícola, los sedimentos se enriquecieron en N, P y C con respecto al suelo de origen, sin registrarse efecto del manejo ni de la posición en el paisaje. En promedio, fueron 1,9-3,2, 2,5-3,9 y 2,4-3,4 veces más concentrados en N, P y C, respectivamente. En cambio, en el sector ganadero, los sedimentos de la franja angosta se enriquecieron mucho menos en N y P (en el caso del N fue menor a la unidad, indicando un enriquecimiento negativo o pérdida durante el proceso de erosión) mientras que el enriquecimiento de C fue similar en todos los anchos de franja. Los dos regímenes de simulación de precipitaciones tuvieron el mismo efecto sobre el empobrecimiento de nutrientes. Cuando las partículas son desprendidas y transportadas hacia el sistema acuático, puede esperarse un cambio en el contenido de MO. Y esto está indicando que cuando el suelo está degradado, el material erodado es un destino de dichos nutrientes, contribuyendo de esta manera a su liberación en el ambiente. En la ruta de la erosión del sector agrícola, los valores umbrales de N, P y C totales a partir de los cuales no hubo enriquecimiento fueron 0,25%, 300 ppm y 25 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente. Mientras que en el sector ganadero, existieron valores umbrales solamente para N de 0,25 % en la franja ancha.

Los coeficientes de enriquecimiento de los sedimentos en Cu, Zn, Mn y Fe del sector agrícola, fueron de 1,4-1,7, 2,2-5,4, 1,3-1,7 y 0,7-1,0, respectivamente, indicando que el Cu, el Zn y el Mn terminan liberándose en el ambiente. Esto está indicando que las determinaciones de Cu, Zn y Mn deberían ser periódicamente controladas para asegurar un suministro adecuado para la demanda de los cultivos.

#### **4.1.7 Análisis multivariado**

En el ambiente ganadero, la posición (ancho de franja) respecto al curso de agua, resultó ser mucho más importante que la influencia de la intensidad de lluvia aplicada, para explicar la variación en el escurrimiento superficial (cantidad y calidad de agua y de sedimentos) observada en este trabajo. De la misma manera, en el ambiente con agricultura continua, en cualquiera de las intensidades de lluvia aplicada, la posición en el paisaje explicó más la variación de los resultados obtenidos que el manejo diferencial de la tierra, quedando demostrada la hipótesis: *“En la cuenca alta del Arroyo Pergamino, la asociación entre el tipo de suelo y el paisaje explica la variabilidad del escurrimiento del agua y su calidad respecto al uso y manejo del suelo.”*

#### **4.2 Importancia del trabajo actual**

Estos resultados son novedosos, dado que al inicio del presente trabajo, no existía información local sistematizada que combinara efectos de uso y manejo de la tierra en diferentes posiciones del paisaje y con diferentes intensidades de lluvia. La mayor parte de los estudios de escurrimiento superficial se realizan en situaciones controladas (dispositivos experimentales especialmente diseñados, simulaciones de lluvia en condiciones de laboratorio, cálculos a partir de la utilización de modelos de erosión, ensayos dentro de una misma unidad cartográfica, momento de muestreo único, entre los más importantes). Para identificar el impacto del uso de la tierra y la posición en el paisaje sobre la calidad del agua y los sedimentos se utilizaron 8 microcuencas contiguas, dentro de las cuales se eligieron en forma balanceada situaciones similares (posición/manejo-uso/intensidad de lluvia simulada/año de muestreo) que permitieron caracterizar una gran superficie agropecuaria, representativa de la hidromorfología y de los sistemas productivos imperantes en un marco climático variable.

La herramienta utilizada en la simulación de lluvia resultó apropiada para comparar diferentes situaciones de uso y manejo de suelo, que reflejan pérdidas de suelo debidas, principalmente, al proceso de erosión laminar.

En esta tesis, casi todas las situaciones de manejo agrícola existentes en la cuenca del Arroyo Pergamino fueron tenidas en cuenta, marcando la diferencia con los ensayos de campo, que se realizan controlando situaciones contrastantes de manejo

después de un tiempo suficiente de estabilización. Su contribución al conocimiento es que las prácticas agrícolas actuales no constituyen verdaderas rotaciones de cultivos y que no son suficientes para garantizar un buen funcionamiento hídrico de los agroecosistemas, principalmente en las posiciones de media loma. Por lo tanto, es necesario intensificarlas, adaptando el manejo a sus condiciones inherentes.

Con respecto al uso ganadero de los sectores bajos, la metodología elegida de comparar diferentes anchos de franja resultó efectiva e indicó la necesidad urgente de dejar de practicar la ganadería en los primeros 5 m que bordean al curso de agua y de reemplazarla por algún tipo de clausura que permita evitar la muy elevada pérdida de sedimentos y nutrientes, y la consecuente eutrofización del curso de agua adyacente.

### **4.3 Futuras investigaciones derivadas del presente trabajo**

El conjunto de variables obtenidas en este trabajo constituye una base de datos muy valiosa para la estimación de la erosión a nivel de cuenca, utilizando modelos de simulación complejos, los cuales podrían ser calibrados y validados y en interface con sistemas de información geográfica. La base obtenida permitirá explorar más profundamente el proceso de erosión que el obtenido a partir de la ecuación universal de pérdida de suelo, dado que en ésta, para el cálculo del factor topográfico, se utilizan lotes experimentales considerándolos uniformes en pendiente y longitud de flujo superficial.

La identificación espacial de la producción de sedimentos permitirá focalizar acciones y recursos técnicos integrales en áreas donde se producen mayor cantidad de sedimentos. En este sentido, el trabajo de modelización puede constituir una herramienta útil para delimitar zonas críticas de intervención que permitirían facilitar el desarrollo de estrategias y toma de decisiones integrales en el manejo de cuencas.

Este trabajo forma parte de un estudio más amplio que evalúa la contribución de los sistemas de producción que dominan en la cuenca superior del arroyo Pergamino a la degradación de la calidad de suelos y agua. La evolución de mediano y largo plazo del flujo de contaminantes (sedimentos, nutrientes, plaguicidas y elementos traza) en su cuenca alta podrá ser integrada, proponiendo un ordenamiento de este territorio para la conservación de los servicios ecosistémicos.

## **BIBLIOGRAFIA**

---



## Citas bibliográficas

- Abraham, M. A.; J. P. Gramicci. 2007. Riego en Argentina (2a aproximación): distribución del área regada a escala provincial y regional. 12 p. SAGPyA en ([www.sagpya.mecon.gov.ar](http://www.sagpya.mecon.gov.ar)) Consultado 09/09/2011.
- ACUMAR (Autoridad de Cuenca Matanza Riachuelo) 2012. Medición del estado del agua superficial y subterránea. Análisis e interpretación de los resultados. Disponible en:  
[www.acumar.gov.ar/.../CDCA\\_ACUMAR\\_INFO\\_AGUA\\_ENERO\\_2](http://www.acumar.gov.ar/.../CDCA_ACUMAR_INFO_AGUA_ENERO_2).
- Adams W.A. 1973. The effect of organic matter on the bulk and true density of some uncultivated podzolic soils. *J Soil Sci*, 24 (1973), pp. 10-17.
- Adema, EO; FJ Babinec & N Peinemann. 2001. Pérdida de nutrientes por erosión hídrica en dos suelos del Caldenal Pampeano. *Ciencia del Suelo* 19: 144-154.
- Adema. EO, Babinec F., Buschiazzo, D., Martin M. & Peinemann N. 2008. Erosión hídrica en suelos del candéal.
- Albaladejo J., M. Martinez Mena, A. Roldan, & V. Castillo. 1998. Soil degradation and desertification induced by vegetation removal in a semiarid environment. *Soil Use and Manage.* 14: 1-6.
- Andrade ML; E Fernández Covelo & MF Alonso Vega. 2005. Influencia del manejo agrícola intensivo en la contaminación del suelo. *Revista Pilquen Sección Agronomía Año VII. N° 7, 2005.*
- Andriulo A.; J. Galantini; F. Abrego y F. Martínez. 1996. Exportación y balance edáfico de nutrientes luego de 80 años de agricultura continúa. XIII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del suelo. Aguas de Lindóia. San Pablo. Brasil.
- APHA-AWWA-WPCF American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA) y Water Pollution Control Federation (WPCF). 1989. Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. Trad. Ed. S.A. Díaz de Santos. Eds. APHA-AWWA-WPCF. Edición 17ª. 10V.
- Arriaga, F.J., Lowery, B. 2003a. Soil physical properties and crop productivity of an eroded soil amended with cattle manure. *Soil Sci.* 168: 888–899.
- Auge, M. 2004. Regiones hidrogeológicas. República Argentina y provincias de Buenos Aires, Mendoza y Santa Fe. 104 p

- Avnimelech Y, and J. R. McHenry. 1984. Enrichment of transported sediments with organic carbon, nutrients, and clay. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 359-266.
- Backhaus, R., Bock, M., Weiers, S. 2002. The spatial dimension of landscape sustainability. *Environment, Development and Sustainability*, 4: 237-251.
- Balkcom K.S., Blackmer A.M., Hansen D.J., Morris T.F. and A.P. Mallarino 2003. Testing soils and cornstalks to evaluate nitrogen management on the watershed scale. *J. Environ. Qual.* 32, 1015–1024.
- Barros, V.R., 2010: El Cambio Climático en Argentina (Capítulo 3). En: *Agro y Ambiente: una agenda compartida para el desarrollo sustentable*. Foro de la Cadena Agroindustrial Argentina, Buenos Aires, Argentina.
- Bauer, A., Black, A.L. 1994. Quantification of the effect of soil organic matter content on soil productivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 185-193.
- Becker, A; E Díaz; MP Cantú; C Meyers & C Cholaky. 2006. Aplicación del modelo WEPP en la predicción de erosión hídrica en el Suroeste de Córdoba, Argentina. XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, 5 pp.
- Belsky AJ, Matzke A. y Uselman S. 1999. Survey of livestock influences on stream and riparian ecosystems in the western United States. *Journal of Soil and Water Conservation*, 54: 419-431.
- Bergkamp, G., Cammeraat, L.H., Martinez-Fernandez, J., 1996. Water movement and vegetation patterns on shrubland and an abandoned field in two desertification-threatened areas in Spain. *Earth Surf. Process. Landf.* 21: 1073–1090.
- Black, C.A. 1965. (Ed). *Methods of Soils Analysis Part II. Chemical and Microbiological Properties*.
- Blackburn WH, Thurow TL, Taylor CA. 1986. Soil erosion on rangeland. En: *Proc. Use of Cover, Soil and Weather Data in Range. Monitor. Symp. Soc. for Range Manage*, Denver, CO. USA. p: 31-39.
- Boix-Fayos, C., Calvo Cases, A., Imeson, A.C., Soriano-Soto, M.D., 1994. Relaciones entre propiedades de los suelos y producción de escorrentía en un gradiente climático en la provincia de Alicante. *Cuatern. Geomorfol.* 8 (1–2): 97–107.
- Bowie, S.H. & Thornton (1985): *Environmental Geochemistry and Health*. Kluwer Academic Publ. Hingham. MA.

- Bradford, J. M. and C. Huang. 1994. Interrill soil erosion as affected by tillage and residue cover. *Soil Tillage Res.* 31: 353-361.
- Bremner J. M. 1960. Determination of nitrogen in soil by de Kjeldahl method. *J. Agric. Sci.* 55: 11-33.
- Buschiazzo, DE; SB Aimar & K Stahr, 1995. Factores que afectan la estabilidad estructural de suelos de la Región Semiárida Pampeana Central (Argentina). *Ciencia del Suelo* 13:66:69.
- Bwruell, R. E., D. R. Timmons, and R. F. Holt. 1975. Nutrient transport in surface runoff as influenced by soil cover and seasonal periods. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 39: 523-528.
- Cabrini, S. M. y C. P. Calcaterra. 2009. Sistemas de producción en el partido de Pergamino. Valoración económica del impacto sobre la capacidad productiva de los suelos. Ediciones EEA INTA Pergamino, Buenos Aires, Argentina. ISSN 1851- 6955 N° 12.
- Calmano W., Hong J., Forstner U., 1993, Binding and mobilization of heavy metals in contaminated sediments affected by pH and redox potential, *Wat. Sci. Tech.* 28, 223-235.
- Calvo Cases, A., Gisbert, J., Palau, E., Romero, M., 1988. Un simulador de lluvia portátil de fácil construcción. In: Sala, M., Gallart, F. (Eds.). *Métodos y técnicas para la medición en el campo de procesos geomorfológicos*, pp. 6–15.
- Capelle, J.M. 2011. “Fertilización fosfatada de trigo”. Trabajo Final. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Católica Argentina. Disponible en: <http://bibliotecadigital.uca.edu.ar/repositorio/tesis/fertilizacion-fosfatada-trigo-juancapelle.pdf> (15-08-2013).
- Carpenter, S. R.; N. E. Carraco; D. L. Correl; R. W. Howarth; A. N. Sharpley; V. H. Smith. 1998. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen, *EcoL Applic.* 8: 558-568.
- Casas R 2003. Sustentabilidad de la agricultura en la Región Pampeana. INTA-EEA Balcarce.
- Casas R. & G. Albarracín. 2015. El deterioro del suelo y del ambiente en Argentina. Tomos I y II. FECIC. ISBN: 978 – 950 – 9149 – 40 – 3.

- Castiglioni MG, Massobrio MJ, Chagas CI, Santanatoglia OJ, Bujan A, 2006. Infiltración del agua bajo labranza cero del suelo en una microcuenca agrícola de Argentina. *Revista Terra* 24 (3): 423-430.
- Castiglioni M. G.; M. M. Massobrio; C. I. Chagas; O. J. Santanatoglia; E. A. Palacín; A. Buján. 2007. Comportamiento de la conductividad hidráulica efectiva en un Argiudol bajo siembra directa. XXIº Congreso Nacional del Agua. Tucumán, 15 al 19 de Mayo de 2007.
- Castiglioni, M.G.; Sasal, M.C.; Wilson, M.G.; A.Paz Gonzalez; Oszust, J. 2012. Temporal variability of physical properties on an Aquic Argiudoll under no tillage. 2012. European Geosciences Union (EGU) General Assembly. 22-27 abril 2012. Viena. Austria. *Geophysical Research Abstracts* Vol. 14.
- Centro de estudios Sociales y ambientales (CESA). 2004. Estudio de Caso: Pergamino. Informe Final IAI – ENSO Argentina. Cap. IV 35 pp
- Cepeda, M. 1999. Simulador de lluvia para demostrar sus efectos de erosión en el suelo. México. 10 p. (Folleto Técnico N° 3).
- Cerdà, A., Schnabel, S., Ceballos, A., Gomez-Amelia, D. 1998. Soil hydrological response under simulated rainfall in the Dehesa Land System (Extremadura, SW Spain) under draught conditions. *Earth Surf. Process. Landf.* (23): 195–209.
- Chagas CE. 1995. Efecto de la rugosidad superficial, el tamaño de agregados y la estabilidad estructural sobre la erosión entre surcos en un argiudol. *Ciencia del suelo* 13: 85 – 90.
- Chagas, CI; OJ Santanatoglia; MJ Massobrio; MG Castiglioni & A Buján. 1998. Influencia de las lluvias previas, sobre el comportamiento hidrológico de una microcuenca. En: Balbuena et al. (ed.) *Avances en el Manejo del Suelo y el Agua en la Ingeniería Rural*. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata. PP 314-322.
- Chagas C I, Lavado R S, Revilla C A, Macias G J. 1999. Movimiento superficial de fósforo en suelos de la Pampa Ondulada. *Ciencia del suelo* 17 (2): 46-53
- Chagas, CI; OJ Santanatoglia; MJ Massobrio; MG Castiglioni, A Buján y Yañez M 2000. Variables climáticas que inciden en la generación de escurrimientos de una microcuenca de la Pampa Ondulada, Buenos Aires, Argentina. XI conferencia de la organización internacional para la conservación del Suelo.

- Chagas, C.I., Santanatoglia, O.J., Massobrio, M.J., Castiglioni, M.G., Buján, A., Irurtia, C. 2003. Escurrimiento estacional en una microcuenca de llanura en función de factores asociados al clima y a las labranzas. -VII Congreso Argentino de Ingeniería Rural, CADIR 2003. Balcarce, 7 al 9 de mayo de 2003.
- Chagas C I, Irurtia C, Thisted J, Santanatoglia O J, Massobrio M J, Castiglioni M G, Buján A. 2004. Movimiento horizontal y vertical de agua y partículas en un Argiudol bajo siembra directa. *Ciencia del suelo* 22 (2): 114-119.
- Chagas CI, Santanatoglia OJ, Moretton J, Paz M, Behrends Kraemer F, 2010. Movimiento superficial de contaminantes biológicos de origen ganadero en la red de drenaje de una cuenca de Pampa Ondulada. *Ciencia del Suelo* 28:23-31.
- Chagas, Celio I.; Kraemer, Filipe B.; Utin, Santiago; Irurtia, Carlos; Santanatoglia, Oscar 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. *Cuadernos del Curiham*, Vol. 17, Año 2011.
- Chartier M P y Rostagno C. 2010. Evaluación del modelo wepp para predecir la erosión hídrica en pastizales semiáridos del noreste de la Patagonia. *Ciencia del suelo* 28(1): 91-103.
- Cisneros, J.; Cholaky, C.; Cantero Gutiérrez, A.; González, J.; Reynero, M.; Diez, A.; Bergesio, L. 2012. Erosión hídrica. Principios y técnicas de manejo. UniRío Editora, 286 p.
- Conte, A.S.; M. Etcheparreborda; M. Marino y F. Vázquez Rovere. Oleaginización de la agricultura argentina. Disponible en: <http://www.laargentinaenmapas.com.ar> (2008).
- Correa, NM, Scheneiter, J.O. 2013. Nitrogen and radiation use efficiency in temperate pastures for low quality soils. *Proceedings of the 22nd International Grassland Congress*. Sydney, Australia. PP 1515-16.
- Cousido, MA. 2010. Contaminación de cuencas con residuos industriales: estudio del caso Matanza Riachuelo, Argentina. *Revista CENIC. Ciencias Químicas*, vol. 41, 2010, pp. 1-11. Disponible en: [www.redalyc.org/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve](http://www.redalyc.org/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve). Consultada 30/03/2012.

- Darder, M.L. 2010. Perdida de fosforo, nitrógeno y carbono en sedimentos de diferentes secuencias de cultivo bajo siembra directa. Tesis de Grado para acceder al título de Ingeniero Agrónomo. Facultad de agronomía, Universidad de Buenos Aires.
- Darder M.L.; M.C. Sasal; A.E. Andriulo; M.G. Wison y C.I. Chagas. 2010. Coeficientes de enriquecimientos de fósforo, nitrógeno y carbono de sedimentos erosionados en diferentes secuencias de cultivos bajo siembra directa. II Congreso Argentino de la Ciencia del Suelos. Rosario. Santa Fe. Argentina.
- Darder, M.L.; A. Andriulo; M. Castiglioni; D. Colombini; F. Villalba; F. Rimatori; J. Dalpiaz; L. García y L. Milesi. 2012. La distancia al curso de agua y la pérdida de elementos por erosión. XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata. Argentina.
- Darder M.L., Re S., Andriulo A. 2016. El clima en Pergamino: ¿algo nuevo para decir?. Revista RTA INTA Pergamino, Vol. 10: 36-39 p. Disponible en:  
<http://www.calameo.com/read/004612594142e8417d9d8>
- De la Vega G, Castiglioni M G, Massobrio M J, Chagas C I, Santanatoglia O J, Irurtia C. 2004. Infiltración en un Argiudol Vértico bajo siembra directa en condiciones variables de cobertura y humedad inicial. Ciencia del Suelo 22(1): 52-55.
- De Siervi M., A. F. de Iorio & C. I. Chagas 2005. Heavy Metals in Sediments and Runoff Waters in Soils of the Matanza River Basin, Argentina. Communications in soil Science and Plant Analysis. Pages 2303-2314. Download citation <http://dx.doi.org/10.1080/00103620500250742>
- Derpsch, R. 2004. Entender el proceso de la erosión y de la infiltración de agua en el suelo (en línea). Disponible en <http://www.rolf-derpsch.com/erosion-es.html>.
- Do Prado Wildner, L., Da Veiga, M., 1992. Conservación y rehabilitación de tierras en América Latina. Erosión y pérdida de fertilidad del suelo. <http://www.fao.org.htm1992>
- du Laing G, de Vos R, Vandecasteele B, Lesage E, Tack FMG, Verloo MG. Effect of salinity on heavy metal mobility and availability in intertidal sediments of the Scheldt estuary. Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2008. 77:589–602. doi: 10.1016/j.ecss.2007.10.017.
- Echeverría N., Vallejos A. & Silenzi J. 2000. Erodabilidad de suelos del sur de la Región Semiárida argentina.

- Eghball, B., Gilley, J.E., Baltensperger, D.D., Blumenthal, J.M., 2002. Long-term manure and fertilizer application effects on phosphorus and nitrogen in runoff. *Trans. ASAE* 45, 687–694
- Elosegi, A. & J. Díez. 2009. La vegetación terrestre asociada al río: el bosque de ribera. En: A. Elosegi y S. Sabater (eds.) *Conceptos y técnicas en ecología fluvial*, 311-321 pp. Fundación BBVA, Bilbao.
- EPA (Environmental Protection Agency). 2000. Nutrient criteria technical guidance manual. Rivers and stream. Office of Water and Office of Science and Technology (ed.). Washington. USA. 152 pp.
- Evenari, M.; Shanan, L.; Tadmor, N. 1971. *The Negev, the Challenge of a Desert*. Harvard University Press, 207 p.
- FAO. 2004. Uso de fertilizantes por cultivo en Argentina. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/W2598S/W2598S00.htm>
- Feijoó C.S.; A. Giorgi; M.E. García and F. Momo. 1999. Temporal and spatial variability in streams of a pampean basin. *Hydrobiologia*. 394:41-52.
- Forsberg, C. and S.O. Ryding. 1980. Eutrophication parameters and trophic state indices in 30 Swedish waste receiving lakes. *Archiv für hydrobiologie*. 89:189-207.
- Föstner, U. (1987): Changes in metal mobilities in aquatic and terrestrial cycles. In “Metal Speciation, Separation and Recovery”, J.W. Patterson & R. Passino, eds. Lewis publ. Chelsea, Michigan, 3-26.
- Galán Huertos, E. & Romero Baena, A. (2008). Contaminación del suelo por metales pesados. *Revista de la Sociedad Española de Mineralogía*, Macla 10: 48-60.
- Galindo G.; C. Sainato; C. Dapeña; J. L. Fernandez-Turiel; D. Gimeno; M. Pomposiello; H. Panarello. 2007. Surface and groundwater quality in the northeastern region of Buenos Aires Province, Argentina. *Journal of South American Sciences* 23: 336-345.
- García, L. S. 2015. Contenido de elementos traza en las aguas superficiales y subterráneas de la cuenca del arroyo Pergamino y su relación con el uso de la tierra. Tesis de Maestría. Centro de Estudios Transdisciplinarios del Agua Facultad de Ciencias Veterinarias – Universidad de Buenos Aires.
- García-Chevesich, P. 2008. *Procesos y control de la erosión*. Outskirts Press. Denver, CO. 274 p.

- Jimeno-García, E.; V. Andreu; R. Boluda. 2001. Impacto de la Actividad agrícola sobre el aporte de Metales pesados en suelos agrícolas del parque natural de la Albufera de Valencia. *Dossier Agraris ICEA-Sòls contaminats*. 177-186.
- Giupponi C. (1998), Environmental evaluation of alternative cropping systems with impact indices of pollution. *European Journal of Agronomy*, vol. 8, pp. 71-82 (ISSN 1161-0301).
- Greenwood, KL & BM Mc Kenzie. 2001. Grazing effects on soil physical properties and the consequences for pastures: a review. *Aust. J. Exptl. Agric.*, 41: 1231-1250.
- Harter, R. D. 1968. Adsorption of phosphorus by lake sediment. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 32: 514-518.
- Hennings, V. 2002. Accuracy of coarse-scale land quality maps as a function of the upscaling procedure used for soil data. *Geoderma*, 107: 177-196.
- Heredia, O.S. 2010. Consecuencias de la intensificación agropecuaria sobre los suelos. En: *Aspectos Ambientales de las Actividades Agropecuarias*. Agro Vet (ed.). 2ª edición. Buenos Aires. Argentina. 71-91.
- Hillel D., 1980. *Fundamentals of Soil Physics*. Academic Press, New York.
- Hodgson, J.M. 1987. Muestreo y descripción de suelos, 32-34. Ed. Reverté, s.a.
- Honorato R. 2000. *Manual de edafología*. Cuarta edición. Ediciones Universidad Católica de Chile. Santiago-Chile. 195p.
- Hudson N. Edición, ilustrada. Editor, Reverte, 1982. ISBN, 8429110275, 9788429110272., 352 páginas.
- Hudson, N.W., Jackson, D.C., 1959. Results achieved in the measurement of erosion and runoff in Southern Rhodesia. *Proceeding of the Third Inter-African Soils Conference, Dalaba*. pp. 575–583.
- Imeson, A.C., Lavee, H., Calvo, A., Cerdà, A., 1998. The erosional response of calcareous soils along a climatological gradient in southeastern Spain. *Geomorphology* (24): 3–16.
- INA (Instituto Nacional del Agua). 2007. *Estudio integral de la Cuenca del río Arrecifes*. Secretaría de Obras Públicas. Subsecretaría de Recursos Hídricos. Argentina. 1:1-91.



- Infostat (2015). Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M., Robledo C.W. InfoStat versión 2015. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria) 2006- Cartera de proyectos 2006-2009 Vulnerabilidad ambiental por contaminación por nutrientes en distintas eco-regiones. Link: [file:///E:/impresion\\_pe.asp.html](file:///E:/impresion_pe.asp.html) (accedido dic. 2016)
- INTA Cartas de Suelo de la República Argentina. 1972. Hoja 3360-32 Pergamino 106p
- Irurtia CB, Mon R, 2004. Aplicación de simuladores de lluvia portátiles, para determinar infiltración del suelo a campo. En: Filgueira, RR, Micucci FG (Eds). Metodologías físicas para la investigación del suelo: penetrometría e ifiltrometría. Universidad de La Plata, Argentina. Primera edición. Pp 131-144.
- Irurtia, C.; R. Mon. 1994. Microsimulador de lluvia para determinar infiltración a campo. Publicación N° 176. SAGPyA, INTA. CIRN, Instituto de Suelos, Castelar. Argentina. 18 p.
- Irurtia C.; Berón R.; Costamagna O. y Glave A. 1988. Provincia de Buenos Aires. En: A. Prego (ed.) El Deterioro del Ambiente en la República Argentina. Prosa-FECIC. pp. 55-64
- IZAURRALDE, R.C., MALHI, S.S., NYBORG, M., SOLBERG, E.D., QUIROGA, M.C. 2006. Crop performance and soil properties in two artificially eroded soil in North-Central Alberta. *Agron. J.* 98(5): 1298-1311.
- King, A.D. Colonial Urban Development. London and New York: Routledge Library Editions, 2007.
- Kleinman, P.J.A.; Srinivasan, M.S.; Dell, C.J.; Schmidt, J.P.; Sharpley, A.N.; Bryant, R.B. 2006. Role of rainfall intensity and hydrology in nutrient transport via surface runoff. *Journal of Environmental Quality* 35: 1248-1259.
- Köppen, W., 1918: Classification of climates according to temperature, precipitation and seasonal cycle. *Petermanns Geogr. Mitt.*, 64, 193-203, 243-248.
- Kraemer, FB. 2015. Influencia de los factores composicionales y la evolución estructural en el comportamiento hidro-físico de suelos con distinta intensidad y secuencia de cultivos bajo siembra directa. Tesis de Doctor. Universidad de Buenos Aires, Área Ciencias Agropecuarias. FAUBA. Argentina.

- Kronvang, B. 1990. Sediment-associated phosphorus transport from two intensively farmed catchment areas. p. 311–330. In J. Boardman (ed.). Soil erosion on agricultural land. John Wiley & Sons, Chichester, UK.
- Lal, R. 1976. Soil erosion on Alfisols in Western Nigeria. IV. Nutrient element losses in runoff and eroded sediment. *Geoderma*, 16:403-17.
- Lal R (Ed.), 1994. Soil erosion research methods. SWCS (Ankney, IOWA), ISSS.340 p.
- Lal, R., 1988. Soil erosion research methods. Chapter 9. Monitoring soil erosion's impact on crop productivity. Soil and water conservation Society.7515 northeast Akeny road. Iowa.USA
- Lasanta, T., García-Ruiz, J.M., Pérez-Rontomé, C., Sancho-Marcén, C., 2000. Runoff and sediment yield in a semi-arid environment: the effect of land management after farmland abandonment. *Catena* 38: 265–278.
- Lampman W. (1995). Susceptibility of groundwater to pesticide and nitrate contamination in predisposed areas of southwestern Ontario. *Water Qual. Res. Jour. Canada* 30, 443-468.
- Lavado, RS & MS Zubillaga. 2008. Efecto ambiental de la actividad industrial, la vida urbana y la producción agropecuaria. Pp. 365-394. En: Giuffré, L (ed.). *Agrosistemas: Impacto ambiental y sustentabilidad*. Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires.
- Levy GJ, Levin J, Shainberg I. 1994. Soil formation and interrill soil erosion. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58:203-209
- Loch, R.J., 2000. Using rainfall simulation to guide planning and management of rehabilitated areas: Part I. Experimental methods and results from a study at the northparkes mine, Australia. *Land Degrad. Dev.* 11: 221–240.
- Lossino, B., Heredia, O., Sainato, C., Giuffré, L., Galindo, G., 2002. Impacto potencial del riego con agua subterránea sobre los suelos en la cuenca del arroyo Pergamino, Provincia de Buenos Aires, Argentina. *Ecol. Austral* v.12 n.1 Córdoba ene./jun. 2002.
- Luo, Z; E Wang & OJ Sun. 2010. Soil carbon change and its responses to agricultural practices in Australian agro-ecosystems: a review and synthesis. *Geoderma* 155: 211-223.
- Magrin, G.O., M.I. Travasso and G.R. Rodríguez, 2005a: Changes in climate and crop production during the 20th century in Argentina. *Climatic Change*, 72, 229-249.

- Magrin, G.O.; M. Travasso; G. López; G. Rodríguez & A. Lloveras. 2005b. Vulnerabilidad de la producción agrícola en la Región Pampeana Argentina. 2da Comunicación Nacional Sobre El Cambio Climático, Buenos Aires 84 pp. ([http://www.inta.climayagua.inta.gob.ar/impactos\\_del\\_cambio\\_climatico\\_en\\_la\\_produccion\\_agropecuaria](http://www.inta.climayagua.inta.gob.ar/impactos_del_cambio_climatico_en_la_produccion_agropecuaria)).
- Manuel-Navarrete, D.; G. Gallopin; M. Blanco; M. Díaz-Zorita; D. Ferraro, H. Herzer; P. Láttera; J. Morello; M. R. Murmis; W. Pengue; M. Piñeiro; G. Pdestá; E. H. Satorre; M. Torrent; F. Torres; E. Viglizzo; M. G. Caputo; A. Celis. 2005. Análisis sistémico de la agriculturización en la pampa húmeda argentina y sus consecuencias en regiones extra-pampeanas: sostenibilidad, brechas de conocimiento e integración de políticas. CEPAL - Serie Medio Ambiente y Desarrollo N° 118. Naciones Unidas. Santiago de Chile, Chile. 65 p.
- Massey, H.F. y Jackson, M.L. 1952. Selective erosion of soil fertility constituents. *Soil Sci Soc. Am. Proc.* 16:353-56.
- Mathan KK, Kannan N. 1993. Influence of rainfall on nutrient loss in sediment and runoff water in two watersheds under contrasting landscape systems. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 41: 606-608.
- McDadiel, T.A., Hajek, B.F. 1985. Soil erosion effects on crop productivity and soil properties. In: *Erosion and soil productivity*. Publ. 8-85. ASAE, St. Joseph, MI, 45-58 pp.
- McGrath S, Cunliffe C.H., 1985. Simplified methods for the extraction of metals Fe, Zn, Cu, Ni, Cd, Pb, Cr, Co y Mn from soils and sewage sludges. *Journal of Science and Food Agriculture, Québec* V36, p.794-798, 1985.
- Mendoza, R., I. García, L. de Cabo, C. Weigandt & A.Fabrizio de Iorio. 2015. The interaction of heavy metals and nutrients present in soil and native plants with arbuscular mycorrhizae on the riverside in the Matanza-Riachuelo River Basin (Argentina). *Science of the Total Environment* 505: 555-564.
- Meyer L.D. 1988. Rainfall simulators for soil conservation research. Chapter 4. En: *Soil Erosion Research Methods*. R. Lal (ed.). Soil and Water Conservation Society, Ankeny, Iowa.
- Meyer LD, 1985. Interrill erosion rates and sediment characteristics. En El-Swaify (ed.) *Int. Conferencia on soil erosion and conservation*. Honolulu. Hawaii

- Meyer LD, Dabney SM, Harmon WC. 1995. Sediment trapping effectiveness of stiffgrass hedges. *Trans. ASAE* 38:809-815.
- Michelena RO, Irurtia CB, Pittaluga A, Vavruska F, Sardi ME, 1988. Degradación de suelos en el sector norte de La Pampa Ondulada. *Ciencia del Suelo* 6. Pág. 60-66.
- Michelena, R. Irurtia, Mon, R y F. Vavruska. 1989. Degradación de suelos en el norte de la región pampeana. EEA-INTA Pergamino, publ. t.c. N° 6, Buenos Aires Argentina.
- Michelena R. Eiza M. y Carfagno P. 2011. Erosión Hídrica. Relación con el cambio climático.  
<https://ced.agro.uba.ar/ubatic/sites/default/files/files/Servicios%20ecosistemicos/Eje%20Tematico%203.pdf>
- Milesi Delaye, L.A., Caprile, A.C., Torti, M.J., Andriulo, A.E., 2015. ¿Es la producción agropecuaria de la cuenca superior del arroyo Pergamino la responsable de la degradación de suelos y agua?, en: IV Congreso Internacional de Servicios Ecosistémicos en los Neotrópicos. p. 4.
- Miller N., Quinton J.N., Barberis E., Presta M. 2009 Variability in the Mobilization of Sediment and Phosphorus across 13 European Soils. Published in *J. Environ. Qual.* 38:742-750 (2009).
- Mitsch, W.J., L. Zhang, D.F. Fink, M.E. Hernandez, A.E. Altor, C.L. Tuttle & A.M. Nahlik. 2008. Ecological engineering of floodplains. *Ecohydrology & Hydrobiology* 8(2-4): 139-147.
- Morgan R. 2005. Soil erosion and conservation. Tercera Edición. Blackwell Publishing. Pp 299.
- Moscuzza, C. 2010. Intensificación de la producción agropecuaria. En: Aspectos Ambientales de las Actividades Agropecuarias. Agro Vet (ed.). 2ª edición. Buenos Aires. Argentina. 43-56.
- Nearing, M .A.; Lane, L. J.; Alberts, E. E. y Laflen, J. M. 1990. Prediction technology for soil erosion by water: status and research needs. *Soil Sci. Soc. Am. J.*54: 1702-1711.
- Nearing MA, Brandford JM, Parker SC. 1991. Soil detachment by shallow flow at low slopes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55:339-344.

- Nelson, DW and Sommers, L.E.1996. Total Carbon, Organic carbon and organic matter. In: Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods-SSA Book series nº5. Bartels managing ed.
- Novelli, LE. 2013. Intensificación de las secuencias de cultivos en un Molisol y un Vertisol: cambios en la estabilidad estructural y en el almacenaje de C en agregados. Tesis de Doctor. Universidad de Buenos Aires, Área Ciencias Agropecuarias. FAUBA. Argentina.
- Ongley, E.D. 1996. Lucha contra la contaminación agrícola de los recursos hídricos. Estudio FAO riego y drenaje. Disponible en:  
<http://www.fao.org/W2598S/W2598S00.htm> (Enero 2009).
- Panigatti, JL. 2015. Aspectos de la erosión de los suelos en Argentina. Ed. Fauba. Buenos Aires. 70pp.
- Paruelo, JM; JP Guerschman & S Verón. 2005. Expansión agrícola y cambios en el uso del suelo. *Ciencia Hoy* 15:14-23.
- Pereira, E., Y. Moura, J. Costa, J. Mahony & R. Thormann. 1995. The Sto. Domingo mine: A study of heavymetals contamination in the water column and sediments of the Chanca River Basin by discharge from an ancient cupriferos pyrite mine (Portugal). *Mar. Freshwater Res.* 46: 145-151.
- Picone L. 2005. Propiedades del suelo relacionadas con la fertilidad. Capítulo 1. In: *Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos*. Ed: H. Echeverría y F. García. Ed. INTA, pp 3-18..
- Pimentel, D., Harvez, C., Resosudarmo, P., Sinclair, K., Kurz D., McNair M., Crist S., Sphpritz L; Fitton L., Saffouri R. and Blair R. 1995. Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. *Science*, 267:1117-1123, 1995.
- Portela, S., Andriulo, A., Sasal, M., Mary, B. y Jobbágy, E. 2006. Fertilizar vs. organic matter contribution to nitrogen leaching in cropping systems of the pampas: 15N application in field lysimeters. *Plant Soil* 289: 265-277.
- Prosser, I.P., Dietrich, W.E. and Stevenson, J., 1995. Flow resistance and sediment transport by concentrated overland-flow in a grassland valley. *Geomorphology* 13, 71-86.
- Quinton, J.N., J.A. Catt, and T.M. Hess. 2001. The selective removal of phosphorus from soil: Is event size important? *J. Environ. Qual.* 30:538–545.

- Ratto, S; M, Ernesto; G, Moscatelli; D, Abbruzese; H, Bardi; M, Bossi; P, Bres; G, Córdón; MP, Murruni; K, Potarsky & F, Williams. 2004. Evaluación de la contaminación orgánica e inorgánica en un suelo aluvial de la costa del Riachuelo, Buenos Aires, Argentina. *Ecol. Austral* [online]. 2004, vol.14, n.2, pp. 179-190. ISSN 1667-782X.
- Rearte, D (2007). *La Producción de Carne de Argentina*, INTA, Bs.As.
- Reis, H. T., Sheldon, K. M., Gable, S. L., Roscoe, J., & Ryan, R. M. (2000). Daily well-being: The role of autonomy, competence, and relatedness. *Personality and Social Psychology Bulletin*, 26, 419–435.
- Restovich, S.B.; A.E. Andriulo and S.I. Portela. 2012. Introduction of cover crops in a maize-soybean rotation of the Humid Pampas: Effect on nitrogen and water dynamics. *Field Crops Research*. 128:62-70.
- Reynoso, L & A Andriulo. 2009. Estado actual de la calidad del agua en la cuenca del arroyo pergamino. Disponible en:  
[http://www.inta.gov.ar/pergamino/info/documentos/2009/Calidad\\_agua\\_Cuenca\\_APerg\\_jun09.pdf](http://www.inta.gov.ar/pergamino/info/documentos/2009/Calidad_agua_Cuenca_APerg_jun09.pdf).
- Rienzi, E.A. (2006). Cobertura del suelo y su relación con la producción de sedimentos y la relación de enriquecimiento. III Congreso Iberoamericano sobre Control de la Erosión y los Sedimentos (CICES). Buenos Aires. Argentina.
- Ries, J.B., Langer, M., Rehberg, C., 2000. Experimental investigations on water and wind erosion on abandoned fields and arable land in the central Ebro Basin, Aragón/Spain. *Z. Geomorphol. N.F.* 121: 91–108.
- Ries, J.B., Langer, M., 2002. Runoff generation of abandoned fields in the Central Ebro Basin. Results from rainfall simulation experiments. In: García-Ruiz, J.M., Jones, J.A.A., Arnáez Vadillo, J. (Eds.), *Environmental Change and Water Sustainability*. Instituto Pirenaico de Ecología (CSIC), Zaragoza, pp. 65–82.
- Ries, J.B., Hirt, U., 2008. Permanence of soil surface crusts on abandoned farmland in the Central Ebro Basin/Spain. *Catena* 72: 282–296.
- Robinson, G.W. (1922). A new method for the mechanical analysis of soils and other dispersions. *J. Agr. Sci.*, 12:306-321.

- Roca, N.; Pazoz, M. S. y Bech, J. Disponibilidad de cobre, hierro, manganeso, zinc en suelos del NO argentino. *Cienc. Suelo* [online]. 2007, vol.25, n.1 [citado 2016-09-24], pp. 31-42. ISSN 1850-2067. Disponible en:  
<[http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S185020672007000100005&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S185020672007000100005&lng=es&nrm=iso)>.
- Ruan H, Ahuja LR, Green TR, Benjamin JG. 2001. Residue cover and surface-sealing effects on infiltration: numerical simulations for field applications. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 853-861.
- Sainato, C.M., Losinno B.N., Galindo, G., Landini, A. M. y Fazio, A.M. 2006. Geofísica aplicada a la evaluación de la Vulnerabilidad a la contaminación en zonas rurales de la provincia de Buenos Aires, Argentina. *Aguas Subterráneas* 20 (2): 71-82.
- Salomons, W. and Forstner, U. (1984). *Metals in the hydrocycle*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, ISBN 3540127550.
- Santanatoglia OJ, Chagas CI, Rienzi, Castiglioni, R Sbatella. 1996. Características de los sedimentos producidos por erosión hídrica en una micro cuenca del arroyo del Tala (Provincia de Buenos Aires-Argentina). *Ciencia del suelo* 14:42.46.
- Sasal, MC; MG Castiglioni, J P Ferreiro, MG Wilson y J Oszust 2009. Propiedades hidrológicas edáficas bajo diferentes cultivos en siembra directa. *Estudios en la Zona no Saturada del Suelo*. Vol IX, O. Silva et al. Barcelona, 18 a 20 de Noviembre, 2009.
- Sasal, MC; MG Castiglioni & MG Wilson. 2010. Effect of crop sequences on soil properties and runoff on natural rainfall erosion plots under no tillage. *Soil & Tillage Research* 108: 24-29.
- Sasal, M.C.; Demonte L.; Cislighi, A.; Gabioud, E.A.; Oszust, J.D.; Wilson, M.G.; Michlig, N.; Beldomenico, H.R.; Repetti, M.R. 2015. Glyphosate loss by runoff and its relationship with phosphorous fertilization. *J. Agric. Food Chem.* 63 (18): 4444-4448.
- Schlesinger, WH; JF Reynolds; GL Cunningham; LF Huennke; WM Jarrell; RA Virginia & WG Whitford. 1990. Biological feedbacks in global desertification. *Science* 247: 1043-1048.

- Scholefield, D; P M Patto & DM Hall. 1985. Laboratory research on the compressibility of four topsoils from grassland. *Soil Tillage Res.* 6: 1-16.
- Seager, R., N.Naik, W. Baethgen, A. Robertson, Y. Kushnir, J. Nakamura, S. Jurburg. 2010. Tropical Oceanic Causes of Interannual to Multidecadal Precipitation Variability in Southeast South America over the Past Century. *J. Climate*, vol. 23, pp. 5517-5539, 2010.
- Seeger, M., Ries, J.B., 2002. Runoff generation on abandoned fields in the Central Ebro Basin – results from modelling. In: García-Ruiz, J.M., Jones, J.A.A., Arnáez, J. (eds.), *Environmental Change and Water Sustainability*. Instituto Pirenaico de Ecología, CSIC, Zaragoza, pp. 83–97
- Seeger, M. 2007. Uncertainty of factors determining runoff and erosion processes as quantified by rainfall simulations. *Catena* 71:56–67
- Sharpley AN. 1980. The enrichment of soil phosphorus in runoff sediment. *J. environ. Qual.*, 9:299-526.
- Sharpley A N. 1985. The selective erosion of plant nutrients in runoff. *J. Environ. Qual.* 24:920-951.
- Sheridan J.M., 1994. Hydrograph time parameters for flatland watersheds. *Transaction of the ASAE* 37 (1): 103-113.
- Silenzi, JC; CA Puricelli; NE Echeverría; T Grossi & AG Vallejos. 2000. Degradación y recuperación de dos suelos de la Región Semiárida Pampeana Argentina como resultado de distintos usos y manejos. XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo Mar del Plata).
- Sholtenberg, N.L., and J.L. While. 1953. Selective loss of plant nutrients by erosion. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 29:209–213.
- Sommers, L.E.; Nelson, DDW. 1972. “Determination of total phosphorous in soil. *Soil Sci. Am. Proc.* 36 902-904.
- Stocking, M.A. 1988. Assessing vegetative cover and management effects. In: R. Lal. (Ed). *Soil Erosion Research Methods*. Soil and Water Conservation Society. Ankeny. Iowa. USA. p. 163-185.
- Stroosnijder L. 2005. Measurement of erosion: Is it possible? *Catena* 64: 162–173
- Suárez, F. 1980. *Conservación de suelos*. 3a. edición. San José, Costa Rica. Editorial IICA. 315 p.



- Tadmor, N. H., & Shanan, L., 1969. Runoff inducement in an arid region by removal of vegetation. *Proc. Soil Sci. Soc. Am.* 33(5), 790–793.
- Tiscareno-López M., Velázquez-Valle M., Salinas-García J. and Báez-González A.D. 2004. Nitrogen and organic matter losses in no-till corn cropping systems. *J. Am. Water Ressour. Assoc.* 40, 401–408.
- Tisdall, JM & JM Oades. 1982. Organic matter and water-stable agregates in soils. *J. Soil Sci.* 33:141-163.
- Torti, M. J. 2014. Composición química del arroyo Pergamino y su relación con el uso del suelo de la cuenca. Tesis de Maestría. Centro de Estudios Transdisciplinarios del Agua, Facultad de Ciencias Veterinarias – Universidad de Buenos Aires.
- Trimble, S. W. y A. C. Mendel.1995. The cow as a geomorphic agent: A critical review. *Geomorphology*, 13: 233-253.
- U.S.E.P.A. 1983. Hazardous waste land treatment. SW 874. 670p. Municipal Environmental Research laboratory - Office of research and development. Cincinnati, Ohio.
- U.S.E.P.A. 1996. Soil screening guidance: Technical background document. Washington DC: EPA office of solid Waste and Emergency Response, 1996, 168p.
- U.S.E.P.A. 1997. Exposure Factor Handbook. Environmental Protection Agency. USEPA/600/P-95/002.
- Uriburu Quirno, M.; F. Damiano; J. Borús; H. Lozza y J. Villarreal. 2010. Modelación hidrológica en modo actualizado del arroyo Pergamino. I Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras. Azul. Buenos Aires. Argentina.
- Utín S. Escurrimiento y producción de sedimentos en suelos contrastantes de la cuenca del Arroyo del Tala, Provincia de Buenos Aires. Tesis de grado, título de Ing. Agrónomo, UBA. Noviembre de 2009.
- Vázquez, M. 2002. Balance y fertilidad fosfora en suelos productivos de la Región Pampeana. *Informaciones agronómicas del cono sur*, n° 16.
- Viglizzo, E.F.; A.L. Pordomingo; M.G. Castro and F.A. Lértora. 2003. Environmental assessment of agriculture at a regional scale in the pampa of Argentina. *Environmental Monitoring and Assessment.* 87: 169-195.

- Viglizzo, E.F.; F. Lértora; A.J. Pordomingo; J.N. Bernardos; Z.E. Roberto and H. Del Valle. 2001. Ecological lessons and application from one century of low external-input farming in the pampas of Argentina. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 83: 65-81.
- Vilches, C., A. Giorgi, M. Mastrángelo y L. Ferrari. 2011. Non-point Contamination Homogenizes the Water Quality of Pampean streams. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 87:147-151
- Walker, B. and D. Salt. 2006. Resilience thinking: sustaining ecosystems and people in a changing world.
- Weir, E. 2002. Pérdida de suelo y agua en parcelas de escurrimiento. 2º taller de contaminación por agroquímicos. 23 de Agosto de 2002. AIANBA. Pergamino. Bs. As.
- Wischmeier, W.H. and D.D. Smith 1978. Predicting rainfall erosion losses, a guide to conservation planning. *Agricultural handbook 537*. United States Department of Agriculture. Washington. D.C.
- Withers, P.J.A. and E.I. Lord. 2002. Agricultural nutrient inputs to rivers and groundwaters in the UK: policy, environmental management and research needs. *The Science of the Total Environment*. 9(24):282-283
- Yoo, KH; KS Soon & JM Soileau. 1993. Runoff curve numbers determined by three methods under conventional and conservation tillage. *Trans. ASAE* 36(1): 57-63.
- Zaimes, G.N., R.C. Schultz y R.M. Isenhardt. 2004. Stream bank erosion adjacent to riparian forest buffers, row-crop fields, and continuously-grazed pastures along Bear Creek in central Iowa, *Journal of Soil and Water Conservation*, 59 (1): 19–27.
- Zanchi, C. 1988. The cropping pattern and its role in determining erosion risk: experimental plot results from the Mugello valley (central Italy). *Sediment Budgets (Proceedings of the Porto Alegre Symposium, December 1988) IAHS Publ. no. 174*, 1988.
- Zhou, T. J. Wu & S. Peng. 2012. Assessing the effects of landscape pattern on river water quality at multiple scales: A case study of the Dongjiang River watershed, China. *Ecological Indicators* 23: 166–175.

