

DESPLAZAMIENTO DE LA GANADERÍA POR LA AGRICULTURA EN UNA CUENCA DE LA PAMPA ONDULADA: EFECTOS SOBRE EL ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL Y EROSIÓN HÍDRICA

FILIPE BEHRENDTS KRAEMER^{1*}; CELIO I CHAGAS¹; GUILHEM MARRÉ²; ESTEBAN A PALACÍN¹
& OSCAR J SANTANATOGLIA¹

Recibido: 17-10-12

Recibido con revisiones: 01-02-13

Aceptado: 01-02-13

RESUMEN

En las tierras altas de la Pampa Ondulada el avance de la agricultura, principalmente en siembra directa, ha sido un fenómeno conocido. Sin embargo, resulta escasa la información acerca del cambio de uso de la tierra y la adopción de este sistema de manejo en suelos frágiles que ocupan áreas bajas, otrora bajo uso ganadero. Ello supondría un importante riesgo de erosión hídrica al eliminar los pastizales naturales por cultivos anuales como la soja. Por ello, se estimaron las posibles consecuencias de este cambio a través del estudio de la producción de sedimentos y el escurrimiento en la cuenca del arroyo del Tala (Prov. Buenos Aires). Los resultados muestran que la ganadería se venía realizando principalmente en el área del plano aluvial y por lo tanto el presente análisis se centró en dicho sector (138 km²). Los cambios de agricultura hacia ganadería fueron despreciables, mientras que en el sentido inverso se registró una superficie total de 2506 ha, ubicada principalmente en el sector de deslinde del interfluvio y el plano aluvial. A su vez dicha superficie fue mayor en la subcuenca alta que en la subcuenca media. Se estimó que dicho cambio en el uso de la tierra determinaba un aporte adicional de 250.000 a 500.000 m³ de escurrimiento y de 1100 t de sedimento al año. Dada la cercanía al arroyo del Tala y la extrema fragilidad de las tierras, principalmente de aquellas ubicadas en la cuenca media, las mismas podrían estar exportando mayor cantidad de contaminantes físicos (sedimentos) y químicos (nutrientes, fertilizantes, pesticidas) al arroyo comparado con esas mismas tierras bajo uso ganadero. Si bien el avance de la agricultura en las tierras altas ocurrió de forma paralela a la adopción de sistemas conservacionistas asociados a la siembra directa, los resultados obtenidos muestran un aspecto negativo de la agriculturización que sufrieron algunas tierras frágiles correspondientes al plano aluvial, que también debería ser tenido en cuenta.

Palabras clave. Uso de la tierra; Agriculturización; SIG; Erosión hídrica.

CATTLE PRODUCTION DISPLACEMENT BY ANNUAL CROPPING IN A BASIN BELONGING TO THE ROLLING PAMPA REGION. EFFECTS ON RUNOFF AND SOIL EROSION

ABSTRACT

The area under no-tillage in arable upland soils has been increasing since the 1990 decade in the Rolling Pampa. However, there is scarce information on soil use change and the adoption of no-tillage in fragile lowlands formerly devoted to pastures. The change from rangeland and pastures to soybean production may have promoted land degradation. This is why the possible consequences on runoff and sediment yield were estimated for the Tala basin (Buenos Aires, Argentina). The results show that cattle production was carried out mainly at the lowlands and thus the present analysis was focussed in that area of 138 km². Changes from annual cropping to pastures were negligible while the opposite was verified in 2506 ha. These changes from pasture to cropping were observed mainly in the ecotone between upland soils and lowlands belonging to the valley. Also this change was more evident at the middle basin compared to the upper basin. Additional annual runoff volume of 250.000 a 500.000 m³ and 1100 t sediment yield was estimated as a consequence of this land use change. Owing to the proximity of these lands to the main water course, particularly the fragile soils from the middle basin it follows that physical and chemical water pollution (through nutrients, fertilizers, pesticides) might have increased. In spite of the adoption of conservation practices like no tillage in the upland arable soils, the obtained results highlight some negative consequences regarding the «agriculturization» process that took place in some fragile lowlands from the study area.

Key words. Land use; Agriculturization; GIS; Water erosion.

¹ Cátedra de Manejo y Conservación de Suelos. Facultad de Agronomía UBA. Av. San Martín 4453, (1417). Buenos Aires. Argentina.

² SUPAGRO- Montpellier. France.

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

INTRODUCCIÓN

La erosión hídrica es uno de los procesos de degradación más importantes de la Argentina y afecta las tierras más productivas, principalmente en la región de la «Pampa Ondulada» (SAGyP, 1995). Los suelos arables dominantes de las partes altas de esta cuenca (interfluvios) corresponden a Argiudoles típicos y vérticos con aproximadamente 4% de MO, 60% de limos, 15% de arenas muy finas y 25% de arcillas. Dentro de esta región las llanuras aluviales ocupan un 20% de la superficie total aproximadamente (INTA, 1996 a, b). Recientes estudios de largo plazo empleando técnicas isotópicas de ^{137}Cs en las tierras altas de la cuenca del arroyo del Tala bajo labranza convencional, mostraron una tasa media de erosión entre 11,5 y 36 Mg ha⁻¹ año⁻¹, superando ampliamente la tolerancia de pérdida calculada para esta región (Bujan *et al.*, 2003). Actualmente dichos suelos se encuentran mayoritariamente bajo siembra directa (SD). En los últimos 20 años en la Región Pampeana se produjo un avance de este sistema de manejo en las tierras altas con aptitud agrícola, siendo en la actualidad la técnica que se ha generalizado para sembrar cultivos anuales (Álvarez *et al.*, 2006; Steinbach & Álvarez, 2007). Si bien la bibliografía internacional menciona a la siembra directa como una práctica que permite reducir las pérdidas de suelo respecto de la labranza convencional (Triplett & Dick, 2008), ello se da como consecuencia del mantenimiento de una elevada cobertura edáfica con abundantes residuos vegetales, especialmente en época de lluvias intensas, lo cual no siempre se logra. Por su parte, en algunas tierras bajas que integran las llanuras aluviales, se ha podido advertir el reemplazo de la ganadería extensiva tradicional por cultivos de ciclo anual, en particular el de soja (Díaz Zorita *et al.*, 2002). Esto último se dio en tierras con cierta aptitud para la agricultura, aunque con limitaciones de uso severas a muy severas por erosión hídrica, hidromorfismo y/o alcalinidad edáfica subsuperficial. Si bien el avance de la SD en las tierras altas de la Pampa Ondulada ha sido un fenómeno conocido, resulta escasa la información que se dispone acerca de la magnitud del reemplazo de la ganadería por la agricultura que se produjo en las tierras frágiles que ocupan áreas bajas, como así también, las consecuencias que estos cambios habrían provocado en la dinámica hídrica y erosiva. Aún cuando los cultivos en áreas bajas se realicen bajo un sistema conservacionista como lo es la SD, es de esperar que el balance en términos de erosión, movimientos de sedimentos y otros servicios de la naturaleza, sea menos favorable debido al reemplazo de los pastizales naturales (Chagas *et al.*, 2011; Garcarena

et al., 2010). Además de la pérdida de suelo *in situ*, la erosión hídrica genera sedimentos que pueden adsorber tanto contaminantes químicos como biológicos (Kraemer *et al.*, 2011). Por ello, el cambio de uso de la tierra en zonas bajas aledañas a cuerpos de agua supondría además de aumentos en la erosión real, un incremento en la salida de diversos contaminantes con potencialidad para alterar física, química y biológicamente los cuerpos de agua receptores (Ongley, 1997).

Para poder planificar cualquier sistema de uso sostenible de la tierra es necesario evaluar de forma precisa el riesgo de degradación de las tierras teniendo en cuenta las características geomorfológicas de los diferentes sectores de una cuenca. En tal sentido resulta conveniente realizar evaluaciones cuantitativas de la erosión hídrica y de su posible efecto sobre los sistemas hidrológicos locales mediante el uso de SIG (Palacín *et al.*, 2010), y sensores remotos, los cuales permiten integrar las informaciones espaciales y fisiográficas de una cuenca. En base a lo expuesto, los objetivos del presente estudio han sido: 1) localizar y cuantificar el avance de la agricultura sobre la ganadería ocurrido durante los 20 últimos años, en las subcuencas alta y media del arroyo del Tala (provincia de Buenos Aires); 2) estimar los efectos de dicho cambio en el uso de la tierra sobre el volumen de escurrimiento superficial; 3) estimar la erosión real y el incremento en el aporte de sedimentos de estos sectores, particularmente del plano aluvial de los mismos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Cuenca del Tala

La cuenca del Arroyo del Tala posee una superficie aproximada de 865 km² y se encuentra ubicada en el sector NE de la provincia de Buenos Aires, a 160 km de la Capital Federal, en la región Pampa Ondulada (Cappannini & Domínguez, 1961) (Fig. 1). Ocupa parcialmente los partidos de San Pedro, Ramallo, Bartolomé Mitre y Pergamino. Sus aguas desaguan en el río Baradero, afluente del Paraná. De acuerdo con la clasificación de Köpen, el clima del área es templado húmedo. La precipitación anual media, registrada por el INTA San Pedro durante el período 1965-1997, fue de 1070 mm, concentrada principalmente en primavera, verano y otoño. La forma de la cuenca es rectangular, con ensanchamiento en sus extremos. El cauce principal posee una longitud de 71 km. Algunos parámetros morfométricos de la cuenca se citan a continuación (CFI, 1972): factor de forma: 1,41; pendiente media: 2,47

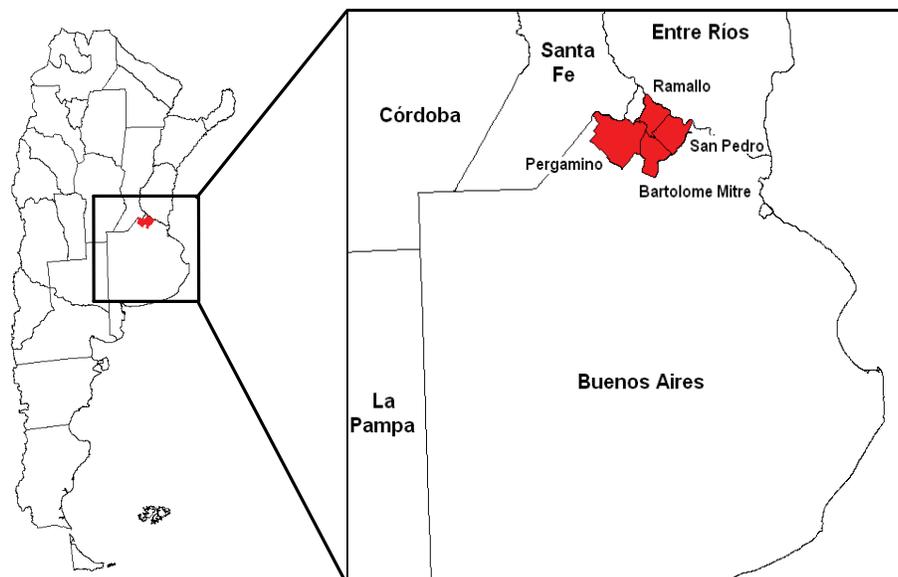


Figura 1. Ubicación de los Partidos que comprenden la cuenca bajo estudio.
Figure 1. Location of the counties related to the watershed under study.

m km⁻¹; coeficiente de compacidad: 1,46; pendiente del cauce principal: 0,93 m km⁻¹; frecuencia de cauces: 0,018 c km⁻²; densidad de drenaje: 0,189 km km⁻²; extensión del flujo superficial: 2,63 km² km⁻¹. Para el presente estudio fueron seleccionadas las subcuencas alta y media, debido a la presunción que en estas áreas se habría dado con mayor énfasis el cambio de uso de la tierra. Las características de estos dos sectores son las siguientes: la subcuenca alta comprende una superficie aproximada de 390 km² y se caracteriza por poseer áreas planas moderadamente bien drenadas destinadas a la agricultura coexistiendo con áreas cóncavas con drenaje pobre destinadas a la ganadería extensiva. En estas últimas los escurrimientos se encauzan a través de zanjones y zanjas hacia el cauce principal del arroyo del Tala. La subcuenca media comprende una superficie aproximada parcial de 116 km² y acumulada con la alta de 506 km². Esta área se caracteriza por poseer sistemas de vaguadas y dorsales paralelas entre sí, con sectores en pendiente con gradientes entre 1 y 2%. El uso agrícola de ambas subcuencas se corresponde con suelos con fases por erosión de Argiudoles vérticos y típicos (INTA, 1996 a, b). A su vez, existen áreas con pendientes menores al 1% ocupadas principalmente por suelos Natracualfes afectados por distinto grado de erosión hídrica. Dichas áreas bajo uso ganadero corresponden al plano aluvial del arroyo del Tala (Chagas, 2007).

Clasificación del uso de la tierra

Para evaluar el cambio de uso de las tierras se utilizaron imágenes satelitales Landsat con una resolución 30 m (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, Brasil), correspon-

dientes al verano 1991 (26 de febrero) y 2009 (10 de enero). Debido a la gran variabilidad de rasgos que presentaba el uso ganadero en las imágenes analizadas y dada su concentración en el plano aluvial, se digitalizaron manualmente los límites del área ocupada por dicho uso de la tierra para cada fecha, para posteriormente clasificar computacionalmente, mediante el software GRASS v6.4 (Neteler & Mitasova, 2004) el interfluvio. Debido a que los lotes agrícolas con diferente cultivo presentan colores contrastantes se decidió incluir ocho clases de color para la agricultura y dos para la ganadería. Eso permitió aumentar la «separabilidad» de las zonas seleccionadas y realizar una clasificación con mayor precisión. La separabilidad se midió con los índices Jeffries-Matusita y Transformed Divergence, cuyos valores van entre 0 y 2. Un valor de más de 1,9 indica una buena separabilidad de una pareja de clases mientras que un valor de menos de 1 indica que dos clases no se pueden distinguir (Richards, 1999). De esta manera, se aumentó la separabilidad hasta alcanzar un nivel aceptable: más de 1,83 para cada pareja de clases y más de 1,90 en 7 casos sobre 8 para 2009; más de 1,94 en 7 casos sobre 8, excepto uno de 1,01, para 1990. Las dos clases de ganadería no resultaron separables entre sí ya que les correspondió un índice entre 0,76 y 1,09. La imagen así clasificada fue corregida mediante la herramienta v. clean, de modo de eliminar las zonas clasificadas que se consideraron demasiado pequeñas para ser un lote: píxeles o grupos de píxeles huérfanos. Para cuantificar el error cometido por esta clasificación, se trabajó a campo ubicando los diferentes lotes con GPS (n: 29) y describiendo su uso actual. De esta manera se calculó el error de clasificación de la zona

de interfluvio en 5,5% correspondiente a 2009. Para 1991, fueron clasificados a mano los mismos lotes recorridos a campo, calculándose un 3,9% de error a través de la interface ENVIRONMENT for Visualizing Images (ENVI). Este último dato si bien es orientativo, resulta coherente con los valores esperados.

Efectos del cambio del uso sobre el volumen de escurrimiento

Para estimar los cambios en el volumen de escurrimiento se utilizó el método de Número de Curva (CN) (USDA SCS, 1985). Para ello se analizó una serie pluviométrica local correspondiente al período 1965-1995, donde la lluvia máxima fue de 265 mm/día (11 de marzo de 1998), obteniéndose así una lluvia diaria con tiempo de retorno de 10 años para la cuenca considerada (precipitación diaria máxima: 164,7 mm/día) (Chagas CI, comunicación personal). A partir de la misma se estimó el valor de lluvia máxima en 24 horas empleando el coeficiente de Evans de 1,13 (Evans, 1971). El valor resultante fue de 185 mm/24hs. Aplicando la metodología del CN se dedujo que los suelos considerados (Argiudoles típicos y vérticos y Natacualfes) forman parte principalmente del grupo hidrológico C dada su importante proporción de arcillas y limos finos en el horizonte Bt. A partir de las Tablas de «uso de la tierra» y «condición» que incluye este método, se seleccionaron dos tipos de uso-manejo-cobertura para simular el cambio desde ganadería a cultivo: 1. Pastos o pastizales, Estado Regular y 2. Cultivos en surcos, Surcos Rectos, Estado Bueno, respectivamente. A partir de estas tablas se estimaron las láminas y los porcentajes de escurrimiento para las tres condiciones de humedad antecedente (AMC I, AMC II y AMC III).

Generación de un mapa de Erosión Hídrica Potencial a nivel de cuenca

Para estimar el impacto de los cambios de uso de la tierra sobre la vulnerabilidad de los suelos a la erosión hídrica, se recolectó en primer término la información necesaria para crear un mapa de erosión potencial (fragilidad) de los suelos de la cuenca, utilizando la metodología de la USLE (Wischmeier & Smith, 1978) pero con el empleo de herramientas específicas de GIS. El factor de erosividad de las lluvias R elegido para la cuenca bajo estudio según Irurtia & Cruzate (2002) fue de $580 \text{ (MJ ha año}^{-1}\text{) (mm h}^{-1}\text{) } 10^{-1}$. El factor fisiográfico $L.S$ fue calculado partir de un modelo digital de elevación de la cuenca (gentileza del Instituto de Clima y Agua, INTA- Castelar) (Fig. 2a) utilizando la fórmula del $L.S$ de Wischmeier & Smith (1978): $L.S = (\lambda / 22,13)^m \cdot (0,006541 \cdot S^2 + 0,045 \cdot S + 0,065)$, donde λ = longitud de la pendiente, S = gradiente de esta pendiente y m = coeficiente que varía de 0,2 a 0,5 dependiendo de S . Para cada píxel, se estimó λ como la longitud máxima entre ese píxel y el punto local más alto. El factor de erodabilidad de los suelos

K fue calculado utilizando los datos de un mapa de suelos a escala 1: 50 000 del INTA (INTA, 1996 a,b) (Fig. 2b). El valor $K \text{ Mg J}^{-1}$ de cada serie de suelos fue calculado a partir del nomograma de Arnoldus (1977), mientras que el valor K de cada complejo fue estimado mediante el promedio ponderado de los K de las series y/o fases que integraban el complejo. Según la metodología de USLE, el uso de la tierra modifica la vulnerabilidad de los suelos a la erosión hídrica a través de los factores C y P . En el presente trabajo se consideró al factor P como constante. Con respecto al factor C , se evaluó la modificación de este parámetro entre los años 1991 y 2009 consignando nuevos valores de C a cada uso (ganadero o agrícola) para aquellos los lotes que cambiaron su uso. Para agricultura se seleccionó un factor C de cultivo de 0,11 (rotación trigo/soja en SD) y para la ganadería se seleccionó un factor C ganadero de 0,04 (pastura) (García Prechac *et al.*, 2009). De esta forma se pudo obtener la superficie por subcuenca que mostró cambios en el uso del suelo y su consecuente modificación en las tasa de erosión actual.

Para poder estimar la cantidad de material edáfico desprendido de las vertientes y transportado efectivamente hacia las aguas del arroyo estudiado, se seleccionó un valor del índice denominado *Sediment Delivery Ratio* (SDR) a partir de un gráfico sintético donde se obtiene el SDR a partir de la superficie la cuenca a analizar (Wischmeier & Smith, 1978). Con el fin de calcular dicho valor para cada subcuenca individual se procedió estimarlo en forma conjunta (subcuencas alta y media) para luego deducir el correspondiente a la cuenca media.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Clasificación del uso de la tierra

El análisis de las imágenes satelitarias permitió advertir una serie de cambios en el uso de la tierra a nivel de la cuenca que se produjeron durante el período 1991-2009 (Fig. 3). En dicho período las tierras ganaderas que pasaron a la agricultura totalizaron 2506 ha, ubicadas principalmente en el plano aluvial del arroyo. Para el mismo período la superficie de tierras agrícolas que pasaron a ganadería resultó despreciable.

Habida cuenta que la ganadería se concentraba en ambas fechas principalmente en el plano aluvial se intensificó el estudio de los cambios producidos en dicho sector de la cuenca. Como se observa en la Figura 3, dicha superficie de cambio se ubicó casi exclusivamente en el ecotono correspondiente al interfluvio/plano aluvial. Un análisis más detallado mostró que el plano aluvial de la subcuenca

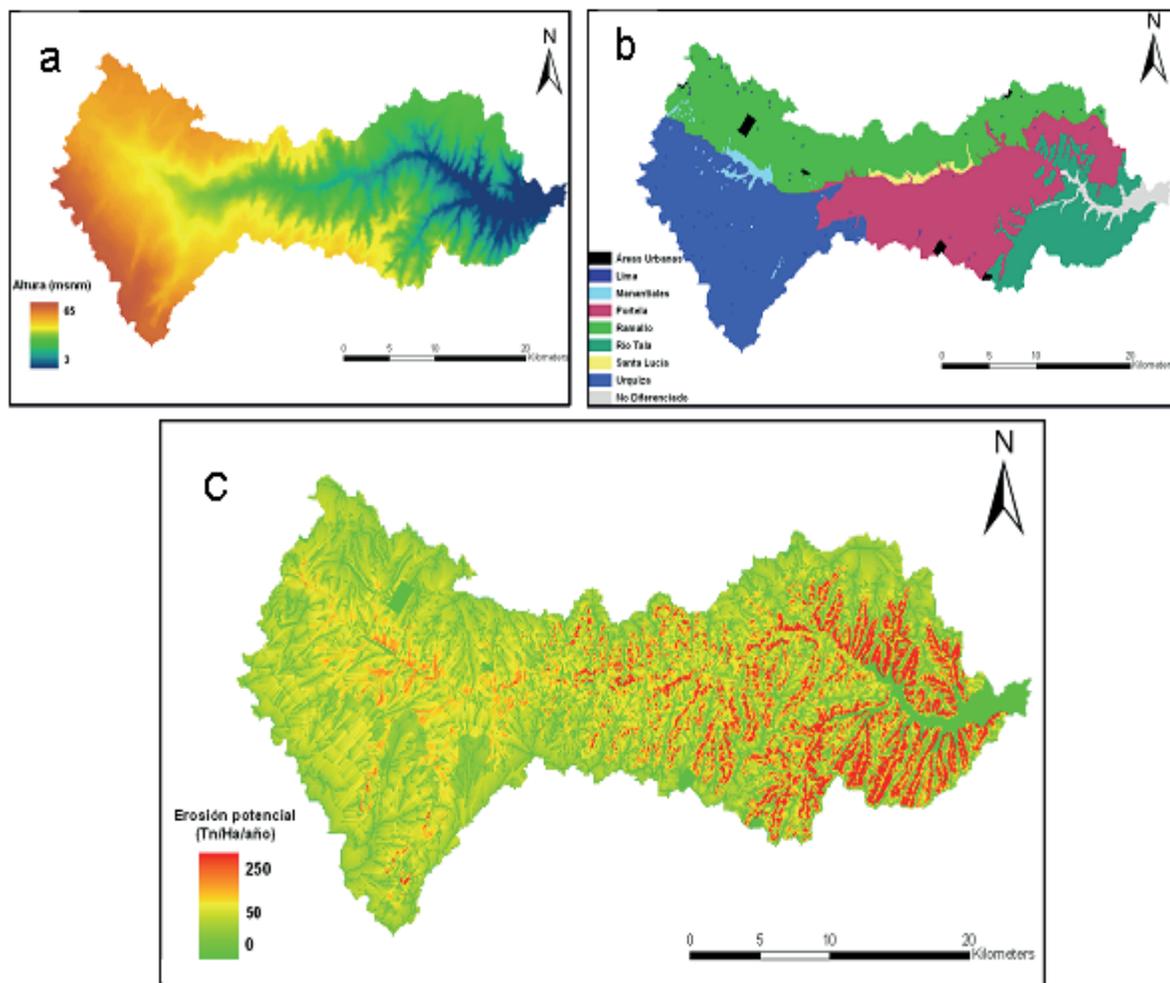


Figura 2. a) Modelo de elevación digital de la cuenca del arroyo del Tala. b) Series de suelos dominantes en la cuenca del arroyo del Tala. c) Mapa de erosión potencial (fragilidad) en t/ha/año.

Figure 2. a) Digital elevation model of del Tala's basin creek; b) Dominant soil series of del Tala's basin creek; c) Potential erosion map (fragility) in T/ha/year.

media presentaba una dinámica proporcionalmente más importante que el de la subcuenca alta, con un cambio hacia la agricultura del 27,8% de sus tierras (741 ha) contra el 15,8% (1765 ha) correspondiente a la subcuenca alta.

Estas cifras podrían indicar una aptitud relativamente mayor de las tierras ecotonales del interfluvio/plano aluvial de la cuenca media respecto de la cuenca alta, para la implementación de cultivos agrícolas comunes. Al cruzar los datos de cambio de uso de la tierra y suelos dominantes surgió que la superficie ganadera que migró hacia la agricultura, correspondía a complejos de suelos con características propias de los ambientes altos combinados con suelos típicos de ambientes bajos. En estos complejos

participaron series tales como Urquiza (41,8%), Ramallo (27,5%) y Portela (24,7%), asociadas a series con aptitud ganadera como Santa Lucía. Algunas de las limitaciones de estos complejos para la implementación de cultivos labrados comunes, incluyen una combinación de factores adversos tales como erosión hídrica, sedimentación, drenaje natural imperfecto a pobre, exceso de sodio y/o sales en el perfil de exploración radical. En tal sentido, la incorporación de estas tierras a la agricultura sin una planificación adecuada podría favorecer la ocurrencia de procesos de degradación física tales como sellado superficial y compactación subsuperficial, además del incremento de escorrentía y erosión hídrica. Estos fenómenos conllevarían

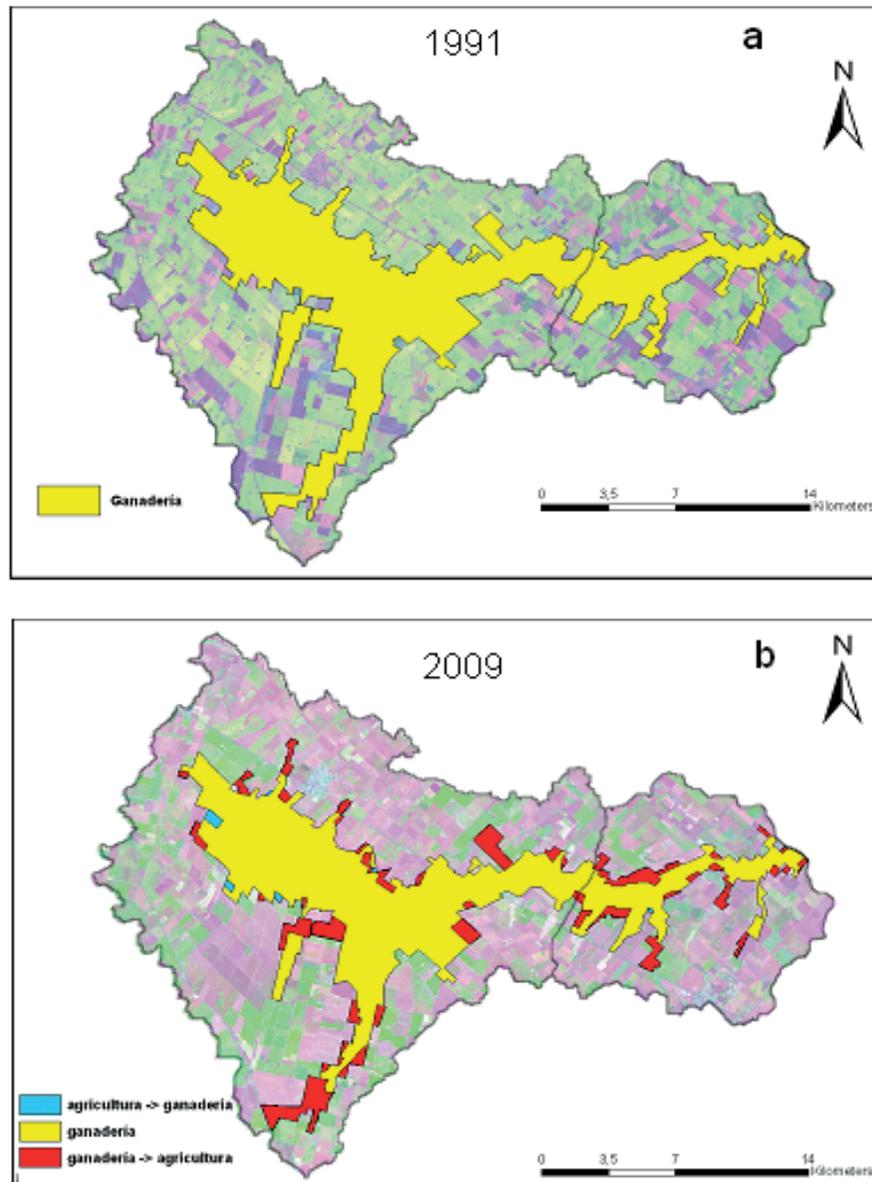


Figura 3. Cambio de uso de la tierra en el plano aluvial de la subcuenca alta y media de la cuenca del arroyo del Tala, entre los años 1991- 2009.
Figure 3. Changes in land use in the alluvial sector of the upper and middle areas of the del Tala's basin creek, between years 1991 and 2009.

a un aumento del volumen de escurrimiento asociado a estos cambios en el uso de la tierra (Tabla 1). Tomando como ejemplo una lluvia máxima en 24 h con un período de retorno de 10 años de 186 mm para San Pedro, el escurrimiento estimado para una condición bajo uso ganadero con pastura o pastizal, con un número de curva (CN) de 79 y régimen de humedad AMCII sería del 67,6% mientras que para la misma situación pero bajo uso agrícola con un cultivo en surco, como podría ser soja, el número de curva

(CN) se elevaría a 85 y el escurrimiento alcanzaría el 77%, es decir un incremento del 14%. Para el caso de AMC I el incremento del escurrimiento por el cambio de uso de la tierra sería aún más elevado llegando a valores de 28,5%. El volumen adicional de escurrimiento estimado oscilaría entre 250.000 y 500.000 m³ de agua (AMC I y AMC II respectivamente) que llegaría a los cursos de agua arrasando una cantidad de sustancias solubles presentes en la superficie de los suelos recientemente cultivados tales

Tabla 1. Incremento del escurrimiento (%) debido al cambio en el uso de la tierra entre los años 1991 y 2009. Metodología de la curva número (USDA, 1985). (CN=número de curva; Q=caudal de escorrentía; AMC I, II, III= antecedentes de humedad baja, media y alta respectivamente).

Table 1. Runoff increase (%) due to land use change between years 1991 and 2009. Curve number methodology (USDA, 1985). (CN=curve number; Q: runoff flow; AMC I, II, III= previous moisture condition: low, medium and high respectively).

Uso	Antecedente de humedad	CN	Q (mm)	Escurrimiento (%)	Incremento por cambio en uso de la tierra (%)
Pastos o Pastizales	AMC I	62	72,7	40,7	
	AMC II	79	120,6	67,6	
	AMC III	90	149,1	83,5	
Cultivos en surco recto	AMC I	70	93,5	52,4	28,5
	AMC II	85	137,5	77,0	14,0
	AMC III	94	160,7	90,1	7,8

como fertilizantes y agroquímicos. Debe tenerse en cuenta que dichas sustancias no estaban presentes cuando los mencionados suelos se encontraban bajo campo natural o pasturas.

Erosión hídrica

A partir de la aplicación de la metodología de la USLE en un sistema de información geográfica (GRASS v 6.4; Neteler & Mitasova, 2004), se elaboró un mapa de erosión potencial para toda la cuenca, donde se observa que los mayores valores de pérdida de suelo se encuentran en los sectores medio y bajos de la cuenca (Fig. 2c). Como el cambio de uso de la tierra se observó de forma más mar-

cada en las subcuencas alta y media, se descartó del presente análisis la subcuenca baja, la cual está destinada principalmente a cultivos anuales, frutales y hortícolas.

Como se observó en la Figura 3 existió una importante conversión de lotes con producción pecuaria a lotes agrícolas principalmente en el plano aluvial. La erosión potencial de los lotes que cambiaron de ganadería hacia agricultura ubicados en la subcuenca alta alcanzaría un valor promedio de $41,2 \text{ t ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ mientras que para la subcuenca media dicho promedio alcanzaría la cifra de $56,8 \text{ t ha}^{-1}\text{año}^{-1}$. Como se observa en la Figura 4, la subcuenca alta presentó una gran cantidad de hectáreas con tasas de erosión potencial agrupadas entre valores de 20-30 a

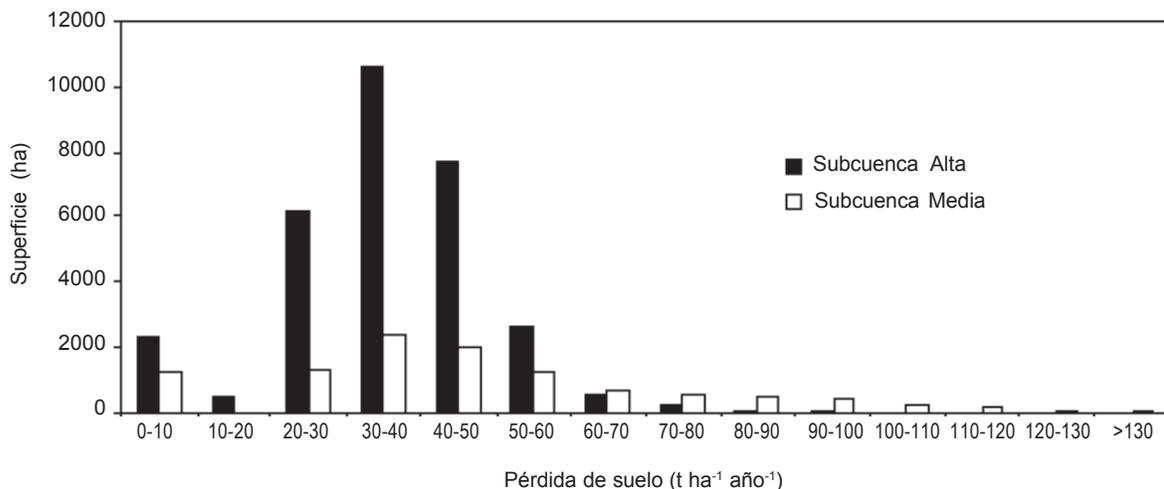


Figura 4. Distribución de la superficie (ha) afectada por distintos niveles de erosión potencial (fragilidad) correspondiente a los lotes que cambiaron su uso en la subcuenca alta (barras negras) y en la subcuenca media (barras blancas).

Figure 4. Distribution of the areas (ha) affected by different levels of potential erosion (fragility) after undergoing a change in land use. Black bars represent the areas in the upper sub-basin while white bars represent the areas in the mid sub-basin.

50–60 t ha⁻¹año⁻¹, mientras que en la subcuenca media los valores se desplazaron hacia mayores tasas pero estuvieron representadas en menos hectáreas. Esta mayor fragilidad podría estar asociada a mayores gradientes y longitudes de pendiente en esta subcuenca.

Entre el año 1991 y 2009, los lotes que cambiaron su uso, principalmente de ganadería a agricultura produjeron un aumento de la vulnerabilidad de dichas tierras de 5087,6 t año⁻¹ en la subcuenca alta y de 2941,2 t año⁻¹ en la subcuenca media. Si bien la mayor superficie afectada por el cambio de uso de la tierra se encontró en la subcuenca alta, las tasas más elevadas de erosión actual se generaron en la cuenca media (Fig. 5). En ambas subcuencas la mayor parte de la superficie que cambió de uso presentaba tasas de erosión actual que rondan las 20 a 60 t ha⁻¹ año⁻¹, valores muy superiores a la tolerancia de pérdida establecida para este tipo de suelos.

En relación al porcentaje de sedimentos transportados hacia el arroyo, la subcuenca alta con una superficie de 390 km² presentó un valor estimado de SDR de 9%. Para ambas subcuencas anidadas, con una superficie total de 506 km², el valor de SDR fue de 8%. La diferencia entre ambas correspondería a lo aportado por la subcuenca media exclusivamente, o sea 184,4 t año⁻¹ (Tabla 2). Teniendo en cuenta que los lotes involucrados se encontraban ocupando un sector definido de ambas subcuencas y por lo tanto no estaban uniformemente distribuidos en toda su superficie se creó un artificio consistente en considerar al plano aluvial como si fuera el total de la subcuenca analizada. Por este motivo se repitió los cálculos de SDR bajo esta premisa. El plano aluvial de la subcuenca alta abarcaba una superficie de 111,7 km² y le correspondería un valor de SDR equivalente a 15%. Por su parte, el plano aluvial de las subcuencas alta más media abarcaba una superficie de

Tabla 2. Aumento de la erosión por el cambio en el uso de la tierra y llegada de sedimentos al arroyo (SDR1 = calculado con la totalidad de la superficie considerada = 537,5 km²; SDR2 = calculado exclusivamente con la superficie del plano aluvial = 138,2 km²).

Table 2. Erosion increase due to land use change and sediment production (SDR1 = calculated with the total area considered = 537,5 km² SDR2 = calculated exclusively according to the alluvial sector = 138,2 km²).

	Erosión potencial promedio (t ha ⁻¹ año ⁻¹)	Superficie de cambio (ha)	Excedente de erosión por cambio en uso de la tierra (C=0,04 a C=0,11)	Producción de sedimentos-subcuenca-SDR1 (t año ⁻¹)	Producción de sedimentos-plano aluvial-SDR2
Subcuenca alta	41,2	1764,9	5087,6	457,9	763,1
subcuenca media	56,8	740,3	2941,2	184,4	360,9

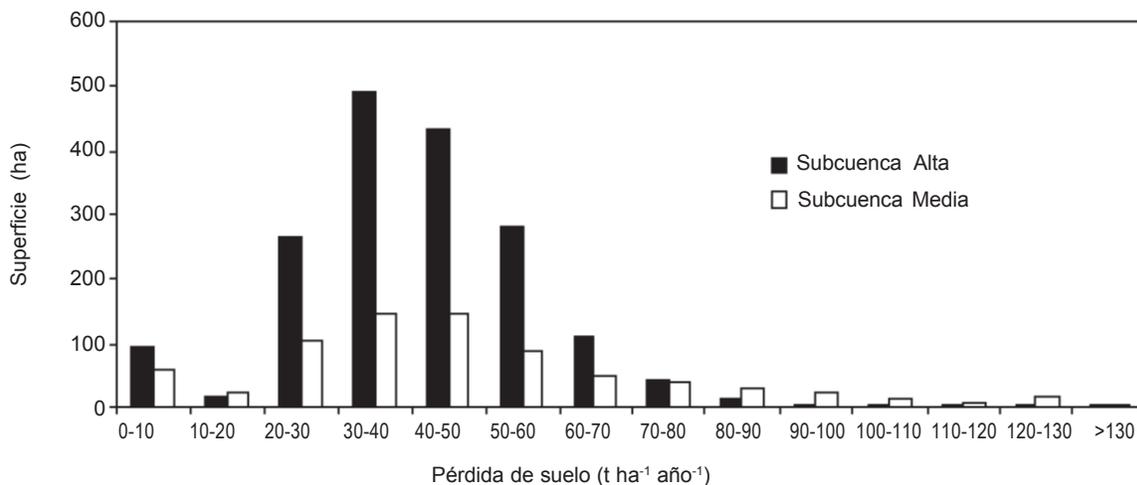


Figura 5. Distribución de superficie (ha) afectada por distintos niveles de erosión hídrica actual (vulnerabilidad) de los lotes que cambiaron de uso en la subcuenca alta (barras negras) y en la subcuenca media (barras blancas).

Figure 5. Distribution of the areas (ha) affected by different levels of actual hydric erosion (vulnerability) after undergoing a change in land use. Black bars represent the areas in the upper sub-basin while white bars represent the areas in the mid sub-basin.

138,2 km², correspondiéndole un valor de SDR equivalente a 14%. Este nuevo cálculo elevó la estimación de generación de sedimentos que llegaban al arroyo en 763,1 t año⁻¹ para la cuenca alta y 361,9 t año⁻¹ para la subcuenca media (Tabla 2).

CONCLUSIONES

Durante el período 1991-2009 se verificó un aumento de la superficie dedicada a cultivos anuales en desmedro de la ganadería en algunas las tierras bajas correspondientes al ecotono interfluvio/plano aluvial del arroyo del Tala. Este efecto se expresó proporcionalmente más en la subcuenca media que en la subcuenca alta y prácticamente no tuvo incidencia en la subcuenca baja. Se estimó que el cambio en el uso de la tierra determinaba un aporte adicional de 250 a 500.000 m³ de escurrimiento y de 1100 t de sedimento al año. Dada la cercanía al arroyo del Tala y la extrema fragilidad de las tierras, principalmente de aquellas ubicadas en la subcuenca media, las mismas podrían estar exportando mayor cantidad de contaminantes físicos (sedimentos) y químicos (nutrientes, fertilizantes, pesticidas) al arroyo comparado con esas mismas tierras bajo uso ganadero. Si bien el avance de la agricultura en las tierras altas ocurrió de forma paralela a la adopción de sistemas de manejo conservacionistas asociados a la siembra directa, los resultados obtenidos muestran un aspecto negativo de la agriculturización que sufrieron algunas tierras frágiles correspondientes al plano aluvial, que también debería ser tenido en cuenta.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido financiado mediante los proyectos UBACyT 0709 y 0937.

BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez, CR; MA Taboada; C. Bustingorri & FH Gutiérrez Boem. Descompactación de suelos en siembra directa: efectos sobre las propiedades físicas y el cultivo de maíz. *Cienc. suelo* [online]. 2006, vol.24, n.1.
- Arnoldus, HMJ. 1977. Predicting soil losses due to sheet and rill erosion. *In: Guidelines for watershed management*. FAO. Conservation Guide, FAO, Rome, 99-124.
- Bujan, A; OJ Santanatoglia; CI Chagas; M Massobrio; M Castiglioni; M Yañez; H Ciallella & J Fernández. 2003. Soil erosion evaluation in a small basin through the use of 137Cs technique. *Soil Till. Res.* 69: 127-137.
- Cappannini, D & O Domínguez. 1961. Los principales Ambientes Geoedafológicos de la Provincia de Buenos Aires. Publicación INTA-CIRN Instituto de Suelos. Pp. 39.
- Chagas, CI. 2007. Calidad y contaminación del agua superficial como recurso para bebida animal en una cuenca representativa de Pampa Ondulada. Tesis Doctoral (Área Toxicología). Facultad de Ciencias Veterinarias, Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires, 9 de agosto de 2007.
- Chagas, CI; FB Kraemer; S Utin; C Iurrtia & OJ Santanatoglia. 2011. Influencia de las propiedades edáficas y la posición en el paisaje sobre la respuesta hidrológica de suelos pertenecientes a una cuenca de la Pampa Ondulada. *Revista Cuadernos del CURIHAM* 17: 15-24.
- Consejo Federal de Inversiones (CFI). 1972. Contribución al conocimiento geohidrológico de la Cuenca del Arroyo del Tala. Estudio de Aguas Subterráneas del Noreste de la Provincia de Buenos Aires, Argentina. Pp 22.
- Díaz-Zorita, M; G Duarte & J Grove. 2002. A review of no-till systems and soil management for sustainable crop production in the sub-humid and semi-arid Pampas of Argentina. *Soil Till. Res.* 65: 1-18.
- Evans, TE. 1971. Consultant's report in hydrology. Program UNDP-FAO. INTA. Arg. 26. Part I. Paraná.
- García Prechac, F; M Hill & C Clerici C. 2009. «EROSION 5.91». www.fagro.edu.uy/~manejo/. 15/05/2011.
- Garciaarena, NA; MC Sasal; MG Wilson & CI Chagas. 2010. «Factor C» de la ecuación universal de pérdida de suelos (USLE) bajo siembra directa. Actualización técnica. Agricultura sustentable. Serie Extensión N° 58 – Ed. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. ISSN 0325-8874.
- INTA, 1996a. Carta de suelos de la Republica Argentina. Hoja 3360-33. PEREZ MILLAN. 78 pp.
- INTA, 1996b. Carta de suelos de la Republica Argentina. Hoja 3360-34. SAN PEDRO. 73 pp.
- Iurrtia, C & G Cruzate. 2002. Aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo en la Provincia de Buenos Aires. Informe Técnico. INTA-Castelar. www.inta.gov.ar/suelos/info/documentos/informes. 01/07/2011
- Kraemer FB. 2011. Transport of faecal indicators microorganisms in a Rolling Pampa basin. The role of physical and chemical properties of soils and sediments». Maestría en Ciencia del Suelo, Escuela para Graduados «Alberto Soriano» Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires, 30 de agosto de 2011.
- Neteler, M & H Mitasova. 2004. «Open Source GIS: A GRASS GIS Approach.» Second Edition. Boston: Kluwer Academic Publishers/Springer. Pp 424.
- Ongley, ED. 1997. Lucha Contra la Contaminación Agrícola de los Recursos Hídricos. Estudio FAO Riego y Drenaje N° 55, FAO, Roma. Pp 116.

- Palacín, EA; CI Chagas; FB Kraemer; MG Castiglioni; MJ Massobrio & OJ Santanotoglia. 2008. Evaluación de la fragilidad y estimación de la vulnerabilidad a la erosión hídrica, en la cuenca del arroyo del Tala, San Pedro, Provincia de Buenos Aires: Aplicación de un modelo a través de un sistema de información geográfica. Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, 13 al 16 de mayo de 2008. En CD.
- Richards, JA. 1999. Remote Sensing Digital Image Analysis, Springer-Verlag, Berlin, Pp 240.
- SAGyP - CFA (Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca - Consejo Federal Agropecuario), 1995. El deterioro de las tierras en la República Argentina. Buenos Aires: Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca, Argentina.
- Triplett GB, & WA Dick, 2008. No tillage crop production: a revolution in agriculture!. *Agronomy J.* 100: S-153-S-165.
- Steinbach, HS & R Álvarez. 2007. ¿Afecta el sistema de labranza las propiedades físicas de los suelos de la Región Pampeana? *Informaciones Agronómicas* 33: 7-12.
- USDA SCS (United States Department of Agriculture Soil Conservation Service). 1985. National Engineering Handbook, Section 4. U.S. Government. Printing Office. Washington DC.
- Wischmeier, WH & DD Smith. 1978. Predicting Rainfall Losses. A guide to conservation planning. Agricultural Handbook No 537. USDA. Pp.58.