

Estimación de pérdidas de suelo por erosión hídrica en tres diferentes sistemas de manejo hortícola del sur de Uruguay

Hill Mariana, Clérics Carlos, Mancassola Victoria, Sánchez Gabriela

Universidad de la República, Facultad de Agronomía, Departamento de Suelos y Aguas. Garzón 780, 12900 Montevideo, Uruguay. Correo electrónico: mhill@fagro.edu.uy

Recibido: 1/9/13 Aceptado: 11/12/14

Resumen

Los principales sistemas actuales de producción hortícolas del sur de Uruguay son poco sustentables debido a problemas de erosión hídrica, lo que determina la necesidad de generación de tecnologías adecuadas para su mitigación. La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo es una herramienta que permite estimar las pérdidas de suelo, siendo adaptada y validada para sistemas agrícolas extensivos, forestales y pastoriles en Uruguay, pero no para sistemas hortícolas. A través de la versión revisada RUSLE (Renard *et al.*, 1997), se estimaron las relaciones de pérdida de suelo y a partir de estas, el Factor C para tres manejos diferentes. Las mediciones se hicieron en tres predios hortícolas (rotación hortícola ganadera, rotación hortícola y hortícola convencional) durante los años 2008 y 2009. El objetivo de este trabajo es generar información local para estimar las pérdidas de suelo por erosión hídrica y posibles impactos del cambio climático a causa del aumento en la erosividad promedio de la lluvia, en sistemas hortícolas tradicionales y en los sistemas propuestos por el proyecto EULACIAS. Se estimaron reducciones de pérdidas de suelo de 30 %, lo que significó alcanzar niveles tolerables. Se propuso la inclusión de pasturas en la rotación como una práctica que, además de disminuir la pérdida de suelo en 60 % respecto de sistemas tradicionales, permitiría la adaptación y mitigación al cambio climático debido al aumento de la erosividad promedio de la lluvia.

Palabras clave: erosión, horticultura, cambio climático

Summary

Estimating Soil Loss by Water Erosion in Three Different Horticultural Management Systems in Southern Uruguay

The current major horticultural production systems of southern Uruguay are little sustainable due to water erosion problems, which determines the need for generation of appropriate mitigation technologies. The Universal Soil Loss Equation is a tool to estimate soil loss that has been adapted and validated for field, forest and pastoral farming systems in Uruguay, but not for horticultural systems. Through the revised version RUSLE (Renard *et al.*, 1997) the relations of soil loss, and from these, the C Factor for three different management were estimated. Measurements were made in three horticultural systems (livestock horticultural rotation, horticultural rotation, and conventional horticulture) during 2008 and 2009. The aim of this work is to generate local information to estimate soil loss from water erosion and potential impacts of climate change due to increased average rainfall erosivity in traditional horticultural systems and the systems proposed by EULACIAS project. Soil loss reductions of 30 % were estimated, which meant achieving tolerable levels. We propose the inclusion of pasture in the rotation as a practice that, in addition to reducing soil loss by 60 % compared to traditional systems, allows adaptation and mitigation to climate change due to increased average rainfall erosivity.

Keywords: erosion, horticulture, climate change

Introducción

La erosión de suelos es uno de los principales problemas ambientales en el Uruguay, relacionado a las actividades agropecuarias. Los daños que provoca la erosión no solo se manifiestan donde ella se produce, sino en diferentes posiciones del ecosistema. Además de daños ambientales, existen otros relacionados a efectos de excesos de agua (inundaciones), a sedimentos y a productos químicos asociados a estos, que se depositan en las zonas bajas y en los cuerpos de agua superficiales. Aunque en muchos casos estos daños (en el sitio y en el ambiente circundante) no se manifiestan en el corto plazo, son reales y crecen a lo largo del tiempo (Brady y Weil, 2002). También la oxidación acelerada de la materia orgánica del suelo removido *in situ* por la erosión, así como del sedimento durante su transporte y deposición, introducen en la atmósfera CO_2 , contribuyendo al efecto invernadero (Lal *et al.*, 1998). Estimaciones realizadas para Uruguay indican que entre 60 y 95 % de las pérdidas de carbono en sistemas de rotación que incluyen cultivos anuales y pasturas son debidas a la erosión (Clérical *et al.*, 2004).

En el caso de los sistemas de producción hortícolas del sur de Uruguay el problema de la erosión tiene particularidades de gravedad. La disponibilidad de recursos, la evolución del mercado y las propuestas tecnológicas dominantes han llevado a los productores hortícolas a una intensificación y especialización progresiva de sus sistemas productivos, en los que se destaca el crecimiento de la superficie hortícola sobre la total del predio y la ausencia de planificación del uso del suelo en el mediano y largo plazo. Una de las principales consecuencias de esta estrategia seguida por la mayoría de los productores ha sido el deterioro de la fertilidad (física, biológica y química) del suelo (Dogliotti *et al.*, 2005). La única forma de mantener los rendimientos en condiciones de suelo cada vez más limitantes para los cultivos ha sido incrementar el uso de insumos y de riego. Este aumento de los costos de producción en un contexto de precios de los productos hortícolas decrecientes (CAMM, 2010), ha contribuido a disminuir el ingreso familiar de los productores hortícolas. La situación descrita induce a la no sustentabilidad de la mayoría de los sistemas actuales de producción de hortalizas en el sur de Uruguay (Dogliotti *et al.*, 2006).

En el proyecto EULACIAS, (European Latin-American Project for Co-Innovation of Agro-ecosystems) de diseño y evaluación de sistemas de producción intensivos sustentables (EULACIAS, 2009) se proponen herramientas básicas de planificación en el mediano y largo plazo del uso del

suelo. Estas consisten en la introducción de: rotaciones de cultivos y pasturas (cuando sea posible), cultivos de cobertura, abonos verdes, y aportes externos de materia orgánica, así como prácticas mecánicas como el acortamiento de la longitud de los camellones y el cambio en la inclinación de la pendiente en los cuadros de plantación. Los objetivos de todas ellas son: cortar el ciclo y el desarrollo de enfermedades y plagas comunes a algunos cultivos, hacer un uso racional del suelo, y hacer el mejor uso posible de los recursos organizándolos de manera que se mantengan en el tiempo y en el espacio (Aldabe, 2000). Para poder comparar, evaluar y seleccionar sistemas de uso y manejo alternativos antes de pasar a la fase de implementación, es esencial contar con herramientas que permitan predecir el impacto que estos sistemas tendrán en las áreas económica, social, productiva y ambiental. Particularmente en el área ambiental, se cuenta con la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE según su denominación original, Wischmeier y Smith, 1978) y su versión revisada (RUSLE, Renard *et al.*, 1997), que permite evaluar 'exantes' el efecto que diferentes sistemas alternativos de uso y manejo del suelo, como los diseñados por el proyecto EULACIAS, tendrían sobre la erosión, y compararlos con los sistemas actuales. Dicho modelo y su versión revisada fueron desarrollados en EEUU para estimar tasas de erosión para combinaciones de localidad-suelo-topografía-uso y manejo. Es el más utilizado en el mundo para la toma de decisiones en planificación del uso y manejo de suelos para minimizar la erosión y ha sido calibrado y validado para sistemas agrícolas extensivos y agrícolas pastoriles en Uruguay (Durán y García Préchac, 2007; Hill *et al.*, 2008). La magnitud del trabajo realizado con este modelo en el país, ha permitido elaborar un programa de computación (EROSION 5.91) que contiene la información disponible sobre todos los factores y las rutinas de cálculo, para facilitar su aplicación por los usuarios (García Préchac *et al.*, 2009). Sin embargo este modelo hasta ahora no se había adaptado para sistemas de producción hortícolas.

A través de un proyecto financiado por el Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca - Proyecto de Producción Responsable (MGAP-PPR), «Calibración del modelo USLE/RUSLE para estimar las pérdidas de suelo por erosión en sistemas de producción hortícolas y frutícolas», se realizaron determinaciones para revertir la limitante anterior, generando información para ser utilizada en sistemas hortícolas. Para el uso de la herramienta a nivel nacional es necesario contar con valores del Factor C determinados localmente, ya que los cultivos hortícolas tienen particularidades

como ser plantados en canchales, mayoritariamente bajo riego y en muchos casos sobre suelos degradados.

El objetivo de este trabajo es presentar valores del Factor C para sistemas hortícolas, obtenidos localmente y utilizarlos para estimar la pérdida de suelo por erosión hídrica en sistemas tradicionales y en sistemas más sustentables, así como en escenarios de cambio climático con aumento de erosividad de la lluvia, de manera de apoyar la toma de decisiones a nivel predial.

Materiales y métodos

Suelo

Los datos utilizados para estimar erosión hídrica con el modelo citado, son los correspondientes a un Brunosol Eutrítico Típico LAc (Typic Argiudoll) de la Unidad Toledo de la Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay a escala 1:1.000.000 (MAP, 1976; Durán *et al.*, 1999) (Cuadro 1). La tolerancia de pérdida de suelo estimada para este suelo es de 7 Mg ha⁻¹ año⁻¹, pero cuando existe evidencia de degradación, fundamentalmente erosión, el umbral se reduce a 5 Mg ha⁻¹ año⁻¹ (Puentes, 1981). La tolerancia a la pérdida de suelo se utiliza para comparar con las estimaciones de pérdida de suelo obtenidas con USLE/RUSLE. Para que un sistema se considere sustentable debe tener pérdidas de suelo estimadas inferiores a la tolerancia.

El porcentaje de materia orgánica de 0 a 20 cm de profundidad en los suelos donde se realizaron las mediciones fue entre 1,3 y 2,4 %. Estos suelos, en condiciones naturales, tienen un contenido de materia orgánica de 3,1 a 8,2 % (Silva, 1998), por lo que presentan una importante degradación ya que han perdido 67 % de materia orgánica.

Estimación de la pérdida de suelo: modelo USLE y su versión revisada RUSLE

El modelo se basa en la Ecuación (1):

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (1)$$

donde: A es la pérdida de suelo promedio anual por unidad de superficie y se expresa en Mg ha⁻¹ año⁻¹. El Factor R, erosividad de la lluvia, es el producto acumulado promedio anual de la energía cinética por la máxima intensidad de las lluvias erosivas en 30 minutos mayores a 13 mm (EI30), en MJ mm ha⁻¹ hr⁻¹ año⁻¹. El Factor K, erodabilidad del suelo, es la cantidad promedio de suelo perdido por unidad de Factor R (Mg hr⁻¹ año⁻¹ MJ⁻¹ mm⁻¹), cuando el suelo en cuestión es mantenido permanentemente desnudo, con laboreo secundario a favor de la pendiente. Los demás factores son relaciones a estándares sin unidades. El Factor L, longitud de la pendiente, es la relación entre la erosión con una longitud de pendiente dada y la que ocurre en el estándar de 22,1 m de longitud, a igualdad de los demás factores. El Factor S, inclinación de la pendiente, es la relación entre la erosión con una inclinación de pendiente dada y la que ocurre en el estándar de 9 % de inclinación, a igualdad de los demás factores. El Factor C, uso y manejo, es la relación promedio anual entre la erosión de un suelo con un determinado sistema de uso y manejo y la que ocurre en las condiciones estándar en que se definió el Factor K, a igualdad de los demás factores. El Factor P, práctica mecánica de apoyo, es la relación entre la erosión que ocurre con una determinada práctica mecánica de apoyo y la que ocurre con la condición estándar de laboreo a favor de la pendiente, a igualdad de los demás factores (Wischmeier y Smith, 1978).

Determinación del Factor C

Para el cálculo del Factor C, se determinó la Relación de Pérdida de Suelo (RPS) a partir de la versión revisada RUSLE (Renard *et al.*, 1997), Ecuación (2). La RPS está referida a la relación entre un suelo con un uso y manejo particular y ese mismo suelo mantenido permanentemente desnudo.

$$RPS = UP \cdot CV \cdot CR \cdot R \cdot CA \quad (2)$$

Cuadro 1. Factor K de USLE, pendientes asociadas, suelos dominantes de la unidad y su correspondiente en el Soil Taxonomy para la unidad Toledo.

Factor K ¹ Mg.MJ mm ha ⁻¹ hraño ⁻¹	Pendiente %	Suelo dominante ²	Soil Taxonomy ³
0,39	2 a 6	Brunosol Eutrítico Típico LAc	Typic Argiudoll

¹Factor K (Puentes, 1981). ²Carta de Reconocimiento de suelos del Uruguay 1:1.000.000 (MGAP-DSA, 1976). ³Soil Taxonomy (Durán *et al.*, 1999).

donde:

UP = subfactor uso previo

CV = subfactor cobertura vegetal

CR = subfactor cobertura por residuos

R = subfactor rugosidad superficial

CA = subfactor contenido de agua

Para el cálculo de los subfactores se midió la fracción de la superficie cubierta por la parte aérea de la vegetación (Stocking, 1988), la altura de la vegetación, la superficie cubierta por residuos (Hartwig y Laflen, 1978) y la rugosidad al azar (Allmaras *et al.*, 1966). A su vez se tomó de tablas la masa de raíces vivas (Allmaras *et al.*, 1966; Dogliotti, 2003) y el subfactor contenido de agua en el suelo se consideró 1 para cultivos con riego y 0,5 para cultivos en seco.

El trabajo de campo se realizó durante los años 2008 y 2009, en tres predios. Los suelos corresponden en los predios 1 y 2 a un Brunosol subéutrico típico AcL, FrAc, LAc (Paquic vertic Argiudolls), y el predio 3 a un Brunosol subéutrico lúvico Fr, FrL (Abruptic Argiudolls).

En los predios con manejo conservacionista, los camellones en los cuadros estaban orientados en sentido perpendicular a la pendiente principal. Las dimensiones de los camellones en los tres predios son similares, respondiendo a características de los implementos utilizados, generalmente el ancho de los camellones es de 0,90 m, el alto de 0,20 m y el ancho del entresurco de 0,85 m. Por lo tanto la superficie ocupada por el camellón y entresurco fue de 55 % y 45 % respectivamente.

Dado que los cultivos hortícolas son de ciclo corto (90-140 días), las mediciones en cada cultivo se realizaron cada quince días en el surco y entresurco por separado. Para el cálculo del Factor C, se dividió cada cultivo en diferentes periodos y en esos periodos se determinó la RPS, que multiplicada por el valor de EI30 y el valor asignado para contenido de agua (correspondiente a los meses ocupados por cada período del cultivo) da como resultado el Factor C de cada período. Sumados estos resultados para el total de los cultivos de la rotación, se pondera por los años de la rotación y la superficie ocupada por el surco (Ecuación 3) y entresurco (Ecuación 4). Para el caso de verdes y pasturas se utilizaron los valores del Factor C obtenidos

en las calibraciones del modelo realizadas para agricultura y pasturas (Durán y García Préchac, 2007), y se ponderaron por surco y entresurco de la misma forma que los cultivos hortícolas. La suma de los valores del Factor C del surco y del entresurco da como resultado el Factor C del sistema evaluado (Ecuación 5).

Sistemas de uso y manejo

Las rotaciones seleccionadas para estimar las pérdidas de suelo por erosión hídrica fueron:

Predio 1 - Rotación hortícola pastoril/ganadera (RHG), propuesta por EULACIAS. Cultivos hortícolas, abonos verdes y praderas: pradera (trébol rojo (*Trifolium pratense*), lotus (*Lotus corniculatus* var. San Gabriel) y festuca (*Festuca arundinacea*) - cebolla (*Allium cepa*) - avena (*Avena sativa*) - melón (*Cucumis melo*).

Predio 2 - Rotación hortícola conservacionista (RHC), propuesta por EULACIAS. Cultivos hortícolas y abonos verdes: coliflor (*Brassica oleracea* var. *botrytis*) - moha (*Setaria italica*) - cebolla (*Allium cepa*) - avena (*Avena sativa*) - tomate encañado (*Lycopersicon esculentum*).

Predio 3 - Secuencia de cultivos hortícolas, Horticultura Convencional (HC). Cultivos hortícolas: coliflor (*Brassica oleracea* var. *botrytis*) - tomate encañado (*Lycopersicon esculentum*) - brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica*). En el Cuadro 2 se presenta un esquema de las rotaciones.

En todos los sistemas se utilizó laboreo convencional, que consistió en arada como laboreo primario y laboreo secundario realizado en base a rastras de discos y de dientes.

Estimación de pérdida de suelo

Se utilizó el programa EROSION 5.91 (García Préchac *et al.*, 2009), que estima pérdidas de suelo a partir del modelo USLE/RUSLE con información calibrada y validada para Uruguay (Durán y García Préchac, 2007). A los efectos de obtener estimaciones de pérdidas de suelo A, se tomaron como factores topográficos L = 20, 50, 100 m, y S = 1, 3, 5 %, y como factor P en los predios conservacionistas perpendicular a la pendiente (P = 0,5), y en el convencional a favor de la pendiente (P = 1). Los Factores R se

$$\text{Factor C}_{\text{surco}} = [\sum(\text{EI30}_{\text{Surco}} \cdot \text{cont de agua}_{\text{Surco}} \cdot \text{RPS}_{\text{Surco}})] \cdot \text{años}_{\text{rotación}}^{-1} \cdot \text{Sup}_{\text{surco}} \%^{-1} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{Factor C}_{\text{EntreSURCO}} &= \\ &= [\sum(\text{EI30}_{\text{EntreSURCO}} \cdot \text{cont de agua}_{\text{EntreSURCO}} \cdot \text{RPS}_{\text{EntreSURCO}})] \cdot \text{años}_{\text{rotación}}^{-1} \cdot \text{Sup}_{\text{EntreSURCO}} \%^{-1} \quad (4) \end{aligned}$$

$$\text{Factor C}_{\text{SISTEMA}} = \text{FC}_{\text{SURCO}} + \text{FC}_{\text{EntreSURCO}} \quad (5)$$

Cuadro 2. Rotaciones y secuencia de cultivos propuestas en el trabajo

1 Manejo: Rotación Hortícola-Ganadera (RHG), duración 8 años														
Año	1 a 4			5		6			7		8			
Mes	abr	mayo-abr	may-junio	julio-dic	ene-feb	mar-ago	set-oct	nov-mar	abr-jun	julio-dic	enero	feb-jun	jul-oct	nov-mar
Cultivo	Laboreo	pradera de 4	Laboreo	Cebolla	Laboreo	Avena	Laboreo	Melón	Laboreo	Cebolla	Laboreo	Avena	Laboreo	Melón

2 Manejo: Rotación Hortícola Conservacionista (RHC), duración 3 años										
Año	1			2			3			
Mes	abril	may-set	octubre	nov-mar	abr-jun	jul-dic	ene-feb	mar-ago	set-oct	nov-mar
Cultivo	Laboreo	coliflor	Laboreo	Moha	Laboreo	Cebolla	Laboreo	Avena	Laboreo	Tomate

3 Manejo: Secuencia de cultivos Hortícola Convencional (HC), duración 3 años													
Año	1			2				3					
Mes	abril	mayo-set	octubre	nov-abr	mayo	jun-oct	nov	dic-abr	mayo	jun-set	octubre	nov-mar	
Cultivo	Laboreo	Coliflor	Laboreo	Tomate	Laboreo	Coliflor	Laboreo	Tomate	Laboreo	Brócoli	Laboreo	Tomate	

ingresaron manualmente en el programa a partir de datos de las localidades predeterminadas en el Programa EROSION 5.91. Se consideraron valores de R simulando condiciones de cambio climático, manejando distintos porcentajes de incremento en comparación al valor de referencia. Asimismo, para las precipitaciones, los estudios de proyecciones sobre el cambio climático, indican la gran incertidumbre de los resultados, ya que básicamente los modelos trabajan con distintos escenarios de emisiones de dióxido de carbono. A partir de la información disponible para la región, Bidegain *et al.* (2014) señalan que la variabilidad aumenta en todas las escalas temporales analizadas, por lo tanto la capacidad de adaptación depende del análisis de la variabilidad más que de las tendencias interanuales o decadales; de todos modos la variabilidad interanual se incrementará. Por lo que estos autores, de acuerdo a resultados de un conjunto de modelos globales, proyectan para la región un aumento de 10 a 20 % en el acumulado anual de precipitaciones (sobre todo en la estación de verano, donde se producen las tormentas más erosivas) para fines del siglo XXI, y un aumento en la intensidad de las precipitaciones.

Por lo tanto, para el análisis de la erosión hídrica en escenarios de cambio climático, se consideraron tres situaciones:

- Suponiendo que la erosividad promedio de la lluvia va a ser: 10 % y 50 % mayor a la actual.
- Suponiendo que la erosividad promedio de la lluvia sería igual a la de los años de máxima erosividad.

A esos efectos se tomó para cuatro localidades la máxima erosividad respecto a la media, que fue en promedio 78 % más (Sorrondégui, 1996).

En todos los casos se considera igual distribución interanual de la lluvia.

Resultados y discusión

En el Cuadro 3 se muestra el Factor C calculado para los tres manejos. Este valor indica la susceptibilidad de la rotación a la erosión hídrica sin tener en cuenta los demás factores del modelo, por lo que está mostrando aspectos relacionados al uso y manejo del suelo.

El sistema RHG es el que presenta el menor Factor C, ya que el suelo permanece cubierto y sin laboreo en la

Cuadro 3. Factor C de RUSLE, para la Rotación Hortícola Ganadera (RHG), Rotación Hortícola Conservacionista (RHC) y Hortícola Convencional (HC).

Manejo	Duración de la rotación	Cultivos hortícolas en la rotación (años)	Abonos verdes en la rotación (%)	Factor C (Nº)
Rotación Hortícola Ganadera (RHG)	8	40	1	0,106
Rotación Hortícola Conservacionista (RHC)	3	60	2	0,214
Hortícola Convencional (HC)	3	100	0	0,310

Cuadro 4. Erosión anual estimada para la Rotación Hortícola Ganadera (RHG), Rotación Hortícola Conservacionista (RHC) y Hortícola Convencional (HC) en tres situaciones de pendiente.

	RHG	RHC	HC
Pendiente (%)	Pérdida de suelo ($\text{Mg ha}^{-1}\text{año}^{-1}$)		
1	2,5	5,0	7,2
3	7,2	14,5	21,1
5	12,5	25,2	36,4

Factor: $P = 1$; $L = 50$ m; $R = 382$ $\text{mm ha}^{-1} \text{hr}^{-1} \text{año}^{-1}$. La tolerancia de pérdida de suelo es de 5 o 7 $\text{Mg ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ según se trate de suelos degradados o no degradados respectivamente (Puentes, 1981).

etapa de pasturas. Si se comparan las rotaciones RHC y HC con la RHG, el Factor C es dos y tres veces mayor respectivamente. Esto es debido a que no hay pasturas incorporadas al sistema, lo que implica que todos los años se laborea el suelo para la instalación de los cultivos determinando baja cobertura durante gran parte del año. Dependiendo de las características del cultivo, varía la velocidad con que se cubre el surco y en algunos casos, el entresurco puede permanecer descubierto durante todo el ciclo. El menor valor del Factor C en el sistema RHC respecto al HC se explica por la presencia de abonos verdes (generalmente avena) que además del aporte de nutrientes que realizan al sistema, mejoran las propiedades físicas del mismo y mantienen el suelo cubierto en el invierno (Calegari y Peñalva, 1994).

El tamaño de los predios hortícolas dificulta la posibilidad de incorporar ganadería, por lo que esta práctica no sería adaptable a gran parte de los establecimientos. Sin embargo, existen alternativas para el destino de las pasturas, como la producción de semilla forrajera o de heno, que podrían incorporarse al sistema.

En el Cuadro 4 se presenta la pérdida de suelo estimada para los tres manejos, considerando 50 m de largo de pendiente, tres situaciones de inclinación de pendiente: 1, 3 y 5 %, que están dentro del rango de pendientes de los predios hortícolas de la zona y un Factor R correspondiente a Montevideo 382 $\text{mm ha}^{-1} \text{hr}^{-1} \text{año}^{-1}$, y un Factor $P = 1$. Con pendientes menores al 1 %, las pérdidas de suelo estimadas no superan la tolerancia (7 $\text{Mg ha}^{-1}\text{año}^{-1}$) en las rotaciones RHC y RHG, mientras que están en ese orden de tolerancia para HC (Cuadro 4). Esto indica que camellones de hasta 50 m con pendientes de hasta 1 % no estarían

presentando mayores riesgos de erosión en los manejos consideradas en este suelo. Para esta última, en caso de una situación de degradación, donde la pérdida tolerable sería hasta 5 $\text{Mg ha}^{-1}\text{año}^{-1}$, no sería recomendable la HC. Para la pendiente de 3 %, sólo la RHG está en el entorno de la tolerancia, mientras que en los demás manejos se la supera en un rango de aproximadamente dos a cinco veces (Cuadro 4). Si se considera la tolerancia admisible para suelos degradados, ninguno de estos manejos sería viable en la situación topográfica considerada. Esto explicaría, en parte, los altos niveles de erosión que se encuentran en los predios hortícolas de la Región. Si se considera 5 % de pendiente en 50 m de largo de ladera, las pérdidas de suelo estimadas fueron 12,5; 25,2 y 36,4 $\text{Mg ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ para RHG, RHC y HC respectivamente.

Lo anterior indica que la situación es compleja en estos sistemas hortícolas y, además de las propuestas de rotaciones, es conveniente realizar prácticas mecánicas de apoyo. Una de ellas sería realizar los laboreos perpendicular al sentido de la pendiente (Factor $P=0,5$), reduciendo así la erosión estimada en un 50 %, lo que lleva a niveles tolerables la pérdida de suelo en el sistema RHC para la pendiente de 3 % pero es insuficiente para el sistema HC en ambas pendientes (3 y 5 %). Si se parte de una situación de suelo degradado las pérdidas de suelo se encuentran por encima de la tolerancia en todos los casos presentados.

Otra práctica recomendada sería el acortamiento del largo de pendiente a través de la construcción de terrazas o acortando los cuadros de plantación. En la Figura 1 se presenta la erosión anual estimada para distintos largos (10, 20 y 30 m) e inclinación de pendiente (3 y 5 %)

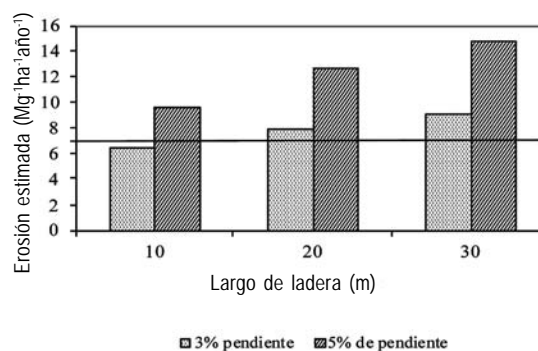


Figura 1. Erosión promedio anual estimada por USLE/RUSLE para distintos largos de ladera e inclinación de pendiente bajo el manejo HC. La línea horizontal indica la pérdida de suelo tolerable (7 $\text{Mg ha}^{-1}\text{año}^{-1}$).

Cuadro 5. Pérdida de suelo estimada para los manejos: Rotación Hortícola Ganadera (RHG), Rotación Hortícola Conservacionista (RHC) y Hortícola Convencional (HC) en distintas condiciones de erosividad de la lluvia.

Erosividad de la lluvia		Uso y manejo		
		RHG	RHC	HC
Situación en referencia (mm ha ⁻¹ hr ⁻¹ año ⁻¹) al año promedio		C:0,106	C: 0,214	C:0,310
		Pérdida de suelo (Mg ha ⁻¹ año ⁻¹)		
Promedio histórico	382	2,7	5,5	7,9
Aumento de 10 %	424	3,0	6,1	8,8
Aumento de 50 %	573	4,1	8,2	11,9
Máx. prom. Histórico	680	4,8	9,7	14,1

P = 0,5, L = 20 m, inclinación de la pendiente = 3 %.

manteniendo los demás factores constantes en el sistema HC (P=0,5; C=0,310).

Se observa que en las estimaciones realizadas para pendientes de 5 %, en el sistema HC no se logran tasas de erosión tolerables en los largos de pendiente de 10 m aún con el laboreo realizado perpendicular al sentido de la pendiente, por lo cual se pone de manifiesto que dicho sistema no es sostenible en esas pendientes aún aplicando las prácticas mecánicas de apoyo.

En cuanto a los efectos del cambio climático, Mullan *et al.* (2012) indican que los efectos se pueden separar en directo, dado por proyecciones que señalan el incremento en el poder erosivo de las lluvias, y de forma indirecta, por cambios en el uso del suelo, de forma de adaptarse a la variabilidad del régimen climático. En el Cuadro 5 se presenta la pérdida de suelo para los sistemas RHG, RHC y HC con camellones de 20 m, 3 % de inclinación de pendiente y laboreo en contorno (P = 0,5) para cuatro situaciones de erosividad de la lluvia, de manera de analizar los efectos en un escenario de cambio climático.

En el caso del uso y manejo más conservacionista (RHG), el aumento de R en los rangos analizados no aumenta la erosión estimada por encima del nivel de tolerancia, tanto para suelos degradados como para los no degradados, ya que con la máxima erosividad de la lluvia la pérdida de suelo sería 4,8 Mg ha⁻¹ año⁻¹. Esto indicaría que esta mejora del uso del suelo para disminuir los riesgos de erosión se adaptaría al cambio climático. Otra ventaja adicional sería su mitigación a través del secuestro de carbono en la fase de pasturas (Salvo *et al.*, 2010).

Conclusiones

Los sistemas hortícolas convencionales presentan un alto riesgo de erosión de acuerdo a la estimación realizada por el modelo con los Factores C calculados para Uruguay. Esto concuerda con la situación de erosión actual severa en dichos sistemas, ya que presentan una larga historia de uso agrícola intensivo. Esto se vería agravado en un escenario de cambio climático que afecte la erosividad de la lluvia.

Incluir una pastura en el sistema tiene un alto impacto en reducir la erosión y es una práctica de adaptación y mitigación al cambio climático, ya que la erosión promedio anual estimada no sobrepasa la tolerancia del suelo en los escenarios de máxima erosividad estudiados.

En los sistemas que incorporan abonos verdes y en los que incluyen pasturas se reduce la tasa de erosión estimada en 30 % y 60 % respectivamente para todas las situaciones de pendiente analizadas.

Los camellones deben realizarse en contorno y construirse terrazas para acortar la longitud de la pendiente, dado que la mayoría de los sistemas se realizan con laboreo, lo que implica períodos con el suelo descubierto y con alta susceptibilidad a la erosión hídrica.

Agradecimientos

Al Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca - Proyecto Producción Responsable por la financiación del proyecto de investigación que dio lugar a este trabajo.

Al proyecto EULACIAS y sus integrantes que aportaron los predios en los que se realizaron las mediciones, así como el apoyo para la ejecución del mismo.

Bibliografía

- Aldabe L.** 2000. Producción de hortalizas en Uruguay. Montevideo : Épsilon. 269p.
- Allmaras RR, Burwell RE, Larson WE, Holt RF.** 1966. Total Porosity and random roughness of the interrow zone as influenced by tillage. Washington : USDA. 22p. (Conservation Research Report ; N° 7).
- Bidegain M, Crisci C, del Puerto L, Inda H, Mazzeo N, Taks J, Terra R.** 2014. Clima de cambios : Nuevos desafíos de adaptación en Uruguay : Volumen 1 : Variabilidad climática de importancia para el sector productivo [En línea]. FAO, MGAP. Consultado octubre 2014. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/field/009/as253s/as253s.pdf>.
- Brady N, Weil R.** 2002. The nature and properties of soils. 13th ed. New Jersey : Prentice May. 960p.
- Calegari A, Peñalva M.** 1994. Abonos verdes, importancia agroecológica y especies con potencial de uso en el Uruguay. Canelones : MGAP. 151p.
- CAMM.** 2010. Comisión administradora del Mercado Modelo. [En línea]. Consultado diciembre 2010. Disponible en: <http://www4.mercadomodelo.net/datos/index.php>
- Cléricsi C, Baetghen W, García Préchac F, Hill M.** 2004. Estimación del impacto de la Soja sobre erosión y carbono orgánico en suelos agrícolas del Uruguay. En: XIX Congreso Argentino de Ciencia del Suelo. Paraná : Asociación Argentina de Ciencia del Suelo. 10p.
- Dogliotti S.** 2003. Exploring options for sustainable development of vegetable farms in South Uruguay. [Tesis de doctorado]. Wageningen : Wageningen University. 145p.
- Dogliotti S, González L, Peluffo S, Aldabe L.** 2006. Diseño, implementación y evaluación de sistemas de producción hortícolas sustentables. En: Validación de alternativas tecnológicas para la producción hortícola sostenible en la región sur. Montevideo : INIA. (Serie Actividades de Difusión ; n° 468). pp. 2-9.
- Dogliotti S, Van Ittersum MK, Rossing WAH.** 2005. Exploring options for sustainable development at farm scale: a case study for vegetable farms in South Uruguay. *Agricultural Systems*, 86, 29 – 51.
- Durán A, García Préchac F.** 2007. Suelos del Uruguay, origen, clasificación, manejo y conservación. Vol II. Montevideo : Hemisferio Sur. 358p.
- Durán A, Califra A, Molfino JH.** 1999. Suelos del Uruguay según Soil Taxonomy [En línea]. Consultado abril 2007. Disponible en: <http://www.fagro.edu.uy/~edafologia/suelosROU.pdf>
- EULACIAS.** 2009. [En línea]. Consultado diciembre 2009. Disponible en: <http://www.eulacias.org/>.
- García Préchac F, Hill M, Cléricsi C, Hill E.** 2009. EROSION versión 5.91, Programa de computación para el uso de la USLE/RUSLE en la Región Sur de la Cuenca del Plata [En línea]. Consultado diciembre 2009. Disponible en: <http://portal.fagro.edu.uy/index.php/ensenanza-suelosyagua/curso-de-manejo-y-conservacion-de-suelos-y-aguas>.
- Hartwig GR, Lafien JM.** 1978. A meterstick method for measuring crop residue cover. *Journal of Soil and Water Conservation*, 32: 260 - 264.
- Hill M, García Préchac F, Terra J, Sawchik J.** 2008. Incorporación del efecto del contenido de agua en el suelo en el modelo USLE/RUSLE para estimar erosión en Uruguay. *Agrociencia*, 12(2): 57 – 67.
- Lal R, Kimble JM, Follet RF, Cole CV.** 1998. The potencial of U.S. cropland to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect. Chelsea : Ann Arbor Press. 128p.
- MAP.** 1976. Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay. Tomo III : Descripción de las unidades de suelos. Montevideo : MAP. 452p.
- Mullan D, Favis-Mortlock D, Fealy R.** 2012. Addressing key limitations associated with modelling soil erosion under the impacts of future climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 156: 18 - 30.
- Puentes R.** 1981. A framework for the use of the Universal Soil Loss Equation in Uruguay [Tesis de maestría]. College Station : Texas A & M University. 80p.
- Renard KG, Foster GR, Weesies GA, Mc Cool DK, Yonder DC.** 1997. Predicting Soil Erosion by Water: A guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Washington : USDA. (Agriculture Handbook ; 703).
- Salvo L, Hernández J, Ernst O.** 2010. Distribution of soil organic carbon in different size fractions, under pasture and crop rotations with conventional tillage and no till systems. *Soil and Tillage Research*, 109(Z): 116–122.
- Silva A.** 1998. La materia orgánica del suelo. Montevideo : Facultad de Agronomía. 34p.
- Sorrondegui CM.** 1996. Erosividad de las lluvias en la región noreste del Uruguay [Tesis de grado]. Montevideo : Universidad de la República. 81p.
- Stocking MA.** 1988. Assessing vegetative cover and management effects. En: LAL R. [Ed.] Soil erosion research methods. Iowa : SWCS-ISSS. pp. 163-185.
- Wischmeier WH, Smith DD.** 1978. Predicting rainfall erosion losses, a guide to conservation planning. Washington: USDA. 58p. (Agricultural Handbook ; N° 537).