

EFECTOS DE LA EROSIÓN EN LAS PROPIEDADES DEL SUELO.

EFFECTS OF SOIL EROSION ON SOIL PROPERTIES.

Nidia Brunel^{1, 2}, Oscar Seguel³

¹Centro de Desarrollo para el Secano Interior, Universidad Católica del Maule, Talca, Chile.

²Programa de Doctorado en Ciencias Silvoagropecuarias y Veterinarias, Universidad de Chile.

³Departamento de Ingeniería y Suelos, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile, Santiago, Chile. nbrunel@ucm.cl

ABSTRACT

Keywords: soil management; soil productivity; resilience.

Soil is a dynamic environment where a series of ecosystem processes occur that allow the adequate development of crops on it. Soil erosion affects its productivity by altering certain properties, as well as the complex interactions between physical, chemical and biological processes that occur within the pedon due to this damage the topsoil becomes very important because of its features, however, the nature of the subsoil plays a key role for the understanding of the magnitude of the erosive process. All these variables and processes will affect the inherent capacity of the soil to resist and/or recover from the damage caused, since the nature of the interrelationship within this system generates a synergistic effect between soil properties that will be affected by erosion.

RESUMEN

Palabras Claves: manejo del suelo; productividad del suelo; resiliencia.

El suelo es un medio dinámico donde ocurren una serie de procesos ecosistémicos que permiten el adecuado desarrollo de los cultivos que en ellos se sustentan. La erosión del suelo afecta su productividad mediante la alteración de ciertas propiedades, así como de las complejas interacciones entre procesos físicos, químicos y biológicos que se producen dentro del pedón; frente a este daño, el primer horizonte del perfil toma gran importancia por las características que este presenta, no obstante, la naturaleza del subsuelo juega un rol primordial para entender la magnitud del impacto del fenómeno erosivo. Todas estas variables y procesos intervendrán en la capacidad intrínseca del suelo de resistir y/o reponerse al daño ocasionado, ya que la naturaleza de la interrelación dentro de este sistema genera un efecto sinérgico entre las propiedades del suelo que serán afectadas por la erosión.

INTRODUCCIÓN

La erosión del suelo es una de las principales problemáticas ambientales a nivel mundial, la degradación de los ecosistemas afectados involucra indirectamente un impacto económico y social, mientras que los efectos que presenta en el recurso suelo son variados y muchos de ellos se asocian a la pérdida de productividad (den Biggelaar *et al.*, 2004, Jagadamma *et al.*, 2009).

Por definición, la productividad del suelo

relaciona la capacidad del suelo con la producción de un cultivo bajo un sistema de manejo específico (Dudal, 1982, FAO, 1984, Soil Science Society of America, 1997), involucrando intrínsecamente las propiedades o características propias del recurso, en base a ciertos requerimientos de cada cultivo (Oldeman, 1994). Frente a este concepto, algunos autores coinciden en que su interpretación debiera ser una compleja función que incorpore las variables químicas, físicas y biológicas propias de cada suelo y no establecerse sólo en base al cultivo

que este sustente, ya que el suelo, como sistema integrado, involucra no solo una estructura vital para el crecimiento de la planta, sino que una infinidad de interacciones ecosistémicas que entregarán propiedades específicas a cada suelo, definiendo su productividad (FAO, 1984, Gollany *et al.*, 1992, Malhi *et al.*, 1994).

Está ampliamente documentado el efecto de la erosión en la productividad de los suelos agrícolas (Frye *et al.*, 1982, Bakker *et al.*, 2004, Izaurralde *et al.*, 2006, Larney *et al.*, 2009), debido a la alteración de ciertas propiedades del pedón. No obstante, siguiendo la definición del concepto, la mayoría de estos estudios son presentados en base al impacto en la producción del cultivo en estudio, solo algunos autores se han aventurado en establecer relaciones entre productividad y los efectos directos del suelo. Al respecto, Izaurralde *et al.*, (2006) concluyeron que la reducción de rendimiento debido a la erosión simulada fue asociada a la cantidad de nitrógeno (N) y fósforo (P) total y disponible removido, junto con la reducción de la materia orgánica (M.O).

La respuesta de la planta a un proceso erosivo, no solo se asocia a la reducción en la fertilidad del suelo, existen otras propiedades afectadas, que restringirán directa o indirectamente los rendimientos de un cultivo. La alteración de la porosidad, la compactación del suelo y la capacidad del suelo para infiltrar y retener agua son cambios asociados a los primeros horizontes de suelos degradados, que limitan el desarrollo y elongación del sistema radical y son críticos para el normal desarrollo de un cultivo (Arriaga y Lowery, 2003a, Bengough *et al.*, 2006).

La perturbación de una característica física del suelo producto de un fenómeno erosivo, puede no producir una clara relación causa-efecto en la respuesta del cultivo, ya que la combinación de efectos indirectos entre propiedades físicas, químicas y biológicas puede originar resultados inesperados (Mielke y Schepers, 1986). Además, la interacción de los procesos físicos, químicos y biológicos intervendrán en la capacidad propia de cada suelo a resistir alteraciones y/o reponerse al daño, atributo específico de cada suelo conocido comúnmente como resiliencia (Blanco-Canqui y Lal, 2008).

La interacción de las diversas funciones dentro

del suelo, genera un dinámico encadenamiento de los impactos a sus propiedades, lo que impide tratar de establecer una relación entre erosión-productividad a través de la singularidad de sus variables. El propósito de este trabajo es analizar y discutir los diversos impactos de la erosión en las propiedades del suelo, con un enfoque agrícola, mediante una revisión de investigaciones realizadas.

Erosión y Productividad del Suelo

En la práctica, la erosión es un movimiento de suelo superficial, ocasionado por diversos factores, principalmente agentes hídricos y eólicos, que resulta en la reducción de la profundidad del horizonte superior, cambios en las características del suelo y la alteración de su capacidad para soportar el desarrollo de la planta (Christensen y McElyea, 1988).

Dentro de los procesos de degradación de suelos, la erosión hídrica es la más amenazante para la productividad de suelos agrícolas a nivel mundial (Dregne, 1992); afectando 1,12 millones de hectáreas de la superficie productiva del planeta (Daily, 1997). La gota de lluvia impacta la superficie del suelo produciendo un fenómeno de disgregación y arrastre de partículas por escorrentía, resultando en una pérdida de suelo superficial y la alteración de las propiedades de los horizontes afectados; el material removido es depositado en tierras de posiciones más bajas y/o en ecosistemas acuáticos, generando un importante impacto ambiental (Kinnell, 1981, Polyakov y Lal, 2004, Blanco-Canqui y Lal, 2008).

Existe un consenso universal sobre la importancia de los primeros horizontes dentro de un perfil, estos presentan la principal reserva y disponibilidad de nutrientes, materia orgánica y organismos del suelo, mientras que por regla general la proporción de partículas de arcillas presentes en el perfil se incrementa en los horizontes inferiores (Izaurralde *et al.*, 2006). Los resultados obtenidos por Larney *et al.*, (2009) en estudios con erosión simulada muestran que en promedio la disminución del rendimiento para 10 cm de suelo perdido sobre 16 años de estudio fue de 19,5%. Olson (1997) determinó que el subsuelo expuesto por

remoción del horizonte A fue notoriamente más bajo en materia orgánica y más alto en contenido de arcillas que el suelo superficial. Esta breve caracterización del perfil se puede observar con más detalle en el Cuadro 1, presentada por Power *et al.*, (1981).

El horizonte superficial, de clase textural franco limoso, muestra un notorio predominio de las propiedades químicas relacionadas con la fertilidad del suelo; por otra parte destaca el incremento en cerca del 50% del contenido de arcillas en el subsuelo. Considerando la baja diferencia de carbono orgánico que existe entre ambos horizontes, este aumento en la proporción de arcilla es el que puede estar generando una mayor retención de agua en las capas inferiores.

La complejidad para definir características propias del suelo, que determinan su productividad se refleja en las distintas opiniones de investigadores de la materia. El espesor de la capa superior del suelo es adoptado mayoritariamente por algunos autores como un indicador de su calidad y productividad; las propiedades físicas, químicas y biológicas de este horizonte manejan la recepción, abastecimiento y transferencia de agua y energía dentro del suelo, junto con almacenar la principal fuente

de nutrientes presentes en el perfil; sin embargo, el espesor de esta capa superficial será variable según la necesidad del cultivo. (Power *et al.*, 1981, Mielke y Schepers, 1986, Christensen y McElyea, 1988, Larney *et al.*, 2000, Izaurralde *et al.*, 2006).

Por otro lado, se han descrito otras características específicas para establecer una variable de productividad, como la textura y la estructura del suelo, contenido de agua disponible para la planta, abastecimiento de nutrientes, contenido de materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, presencia de microorganismos y profundidad de enraizamiento, entre otros (Christensen y McElyea, 1988, Hairston *et al.*, 1988, Fenton *et al.*, 2005). No obstante, en un sistema trifásico como el suelo, es utópico establecer una relación entre erosión-productividad a través de la singularidad de sus variables, ya que la interacción de las diversas funciones dentro del suelo genera un dinámico encadenamiento de los impactos a sus propiedades.

Erosión y su efecto en las propiedades del suelo

La gota de lluvia que impacta la superficie de un suelo descubierto, produce un efecto

Cuadro 1. Propiedades del horizonte superficial y el subsuelo de un Typic Haploboroll en Temvik, Dakota del Norte (modificado de Power *et al.*, 1981).

Table 1. Properties of topsoil and subsoil in Typic Haploboroll at Temvik, North Dakota (modified of Power *et al.*, 1981).

Propiedades	Suelo superficial	Subsuelo
Carbono orgánico, %	1,5	1,2
N total, %	0,13	0,07
N inorgánico, ppm	12	7
P soluble (NaHCO ₃), ppm	21	5
Arena, %	52,6	24,6
Limo, %	31,1	43,7
Arcilla, %	16,3	31,7
Contenido de agua (cm ³ /cm ³)		
1/3 bar	0,28	0,48
15 bar	0,13	0,22
pH	7,3	7,7

de disgregación y la desestabilización de la estructura del suelo, desencadenando una serie de cambios en los procesos físicos de éste, como la alteración de la porosidad. No obstante, la consecución de efectos en un suelo agrícola erosionado se va desarrollando con las operaciones de labranza en un terreno que ha perdido suelo superficial, labores que en conjunto con la actividad de microorganismos mezclan el material del subsuelo con el remanente del horizonte superior, combinando sus propiedades e induciendo a una serie de alteraciones dentro del perfil, que pueden terminar en una permanente e irreversible alteración y pérdida de las características originales del suelo (Mielke y Schepers, 1986, Cihacek y Swan, 1994, Lowery *et al.*, 1995).

Una propiedad estrechamente relacionada con esta serie de alteraciones dentro del perfil es la materia orgánica, reconocida como un factor elemental en complejas interacciones entre procesos físicos, químicos, y biológicos del suelo (Fenton *et al.*, 2005), jugando un rol crucial tanto en las propiedades físicas (estructuración del suelo, formación y estabilidad de los agregados) como en la propiedades químicas y biológicas (adsorción de nutrientes y nicho ecológico de microorganismos) (Arriaga y Lowery, 2003b).

Impacto en las propiedades físicas

La mezcla de materiales dentro de los horizontes superficiales del perfil, en terrenos erosionados que son cultivados, origina un horizonte superficial Ap, con aportes de material proveniente del horizonte B del pedón original. El material proveniente del horizonte B, en suelos maduros, es rico en arcillas, de poca fertilidad, con bajo contenido de materia orgánica y capacidad de almacenamiento de agua, características que le son transferidas al horizonte superficial (Frye *et al.*, 1982, Mokma *et al.*, 1996).

McDaniel y Hajek (1985) encontraron que el contenido de arcilla en la superficie de suelo incrementó desde 8 a 16% cuando éste fue erosionado moderadamente, el cambio en la distribución del tamaño de las partículas afectó la relación agua-aire del suelo, alterando muchos

de sus procesos sistémicos. La capacidad de agua disponible dentro de los primeros horizontes de un suelo erosionado es probablemente una de las propiedades más afectadas; Gollany *et al.* (1992), en un estudio donde se removieron 0, 30 y 45 cm de suelo superficial, midieron una capacidad de agua disponible de 187, 166 y 132 g kg⁻¹, respectivamente; los investigadores mencionan que este resultado se debió al efecto aditivo del bajo contenido de materia orgánica, el deterioro de la estructura de suelo superficial y la reducción de la porosidad total, concordando en sus conclusiones con otros autores (Mbagwu *et al.*, 1984, Dregne, 1992, Jagadamma *et al.*, 2009).

Por otro lado, existen estudios que han reportado un incremento en la retención de agua en el horizonte superficial de un suelo erosionado (Lowery *et al.*, 1995), resultados que de acuerdo a los autores son en respuesta al aumento del contenido de arcilla en las capas superficiales remanentes, por el aporte de los horizontes inferiores; así, estas partículas adsorberían las moléculas de agua presentes en el suelo y, por su fuerza de cohesión, requerirán de una energía adicional para ser absorbidos por las plantas, comparado con condiciones no erosionadas (Arriaga y Lowery, 2003a).

La proporción porosa del suelo es otra de las propiedades fuertemente afectadas. Como consecuencia de la dispersión y movilización de partículas dentro del perfil, disminuye la cantidad de macroporos debido al taponamiento de estos, transformando su tamaño a diámetros inferiores, generando una disminución en la oxigenación y la conductividad hidráulica del suelo (Mbagwu *et al.*, 1984). Lowery *et al.*, (1995) establecieron una relación directa entre la porosidad y la conductividad hidráulica saturada, ambos parámetros presentaron una disminución con el incremento de la erosión en todos los suelos evaluados, estableciendo además, una relación inversa entre el incremento de la densidad aparente y la reducción de la porosidad y la materia orgánica.

El potencial que presentan los macroporos para incrementar el flujo del agua dentro del suelo y disminuir la pérdida por escorrentía es esencial dentro de un fenómeno erosivo, no obstante, ellos pueden no ser efectivos en su

participación en la infiltración dentro del perfil (Ela *et al.*, 1992). Investigaciones centradas en el rol de esta porción porosa, concluyen que la discontinuidad que presentan desde la superficie del suelo con los horizontes inferiores dentro del perfil impide un movimiento continuo del agua, mientras que el sello superficial producido por la erosión en suelos descubiertos reduce la tasa de infiltración, principalmente por un quiebre en el flujo de los macroporos (Germann *et al.*, 1984, Ela *et al.*, 1992).

Los suelos cultivados son estructuralmente poco estables y forman una costra en la superficie del suelo cuando son expuestos a lluvias; esta tendencia de un suelo a la formación de una costra o sellado superficial y el resultado de la cantidad de escorrentía y pérdida de suelo dependen de diversas propiedades del suelo, así como el manejo y topografía del terreno (Sumner y Stewart, 1992); la materia orgánica podría disminuir la susceptibilidad del suelo a la formación del sellado, pero igualmente importantes resultan las propiedades coloidales de las partículas de arcilla, que al favorecer la estabilidad de los agregados reduce el potencial de un suelo a sellarse, mejorando el intercambio gaseoso y la infiltración del suelo (Sumner y Stewart, 1992, Lado *et al.*, 2004, Ben-Hur y Lado, 2008).

La relación entre los procesos que se desarrollan dentro del suelo, involucra una estrecha correlación con los efectos que se desencadenan en el perfil. Dentro de este contexto, se ha reportado ampliamente que, como resultado de la pérdida de materia orgánica y el incremento en el contenido de arcilla producto de la erosión, la estabilidad de la estructura disminuye, afectando la capacidad de agua disponible y porosidad del suelo e induciendo a un incremento de la densidad aparente (Frye *et al.*, 1982, Mbagwu *et al.*, 1984, Mielke y Schepers, 1986, Rhoton y Lindbo, 1997, Fenton *et al.*, 2005).

Asimismo, se han encontrado diferencias morfológicas notorias en el color de los horizontes afectados por la disminución en su espesor, cambios que implican colores visiblemente más claros en los horizontes Ap que han sido sometidos a ensayos de remoción de suelo (Tanaka y Aase, 1989, Gollany *et*

al., 1992, Rhoton y Lindbo, 1997).

Un estudio realizado por Black y Greb (1968) donde se trabajó con cinco tratamientos de remoción de suelo superficial, en los que se extrajeron 7,6; 15,2; 22,8; 30,4 y 38,1 centímetros de suelo, se observó un marcado cambio de color en seco en los ensayos realizados, presentando colores pardo grisáceo (10 YR 5/2); pardo a pardo grisáceo (10 YR 5/2,5); pardo a pardo grisáceo (10 YR 5/2,5); gris claro (10 YR 7/2) y blanco (10 YR 8/2), respectivamente a los cortes realizados; estos resultados fueron acompañados de una disminución gradual de la temperatura con el incremento de suelo removido, con diferencias que van de 25,3 a 23,5 °C para los tratamientos extremos, respectivamente. Esta reducción de la temperatura, que corresponde a 1,8 °C, fue relacionada por los autores con los colores más claros del suelo, lo que produjo un retardo en la madurez de la planta de 3 a 5 días en los dos tratamientos con mayor remoción de suelo.

Impacto en las propiedades químicas y biológicas

La pérdida de materia orgánica producto de la erosión del suelo es debido principalmente al transporte de sedimento por escorrentía; la remoción del suelo disminuye el contenido de carbono orgánico en las capas superficiales, reduciendo la capacidad de almacenamiento de agua, la diversidad de organismos y la agregación de partículas (Nizeyimana y Olson, 1988, Cihacek y Swan, 1994, Malhi *et al.*, 1994, Rhoton y Lindbo, 1997).

Gollany *et al.*, (1992) ,obtuvieron una reducción de 30 a 13 g kg⁻¹ de C con una remoción de 45 cm de suelo superficial; no obstante, otros estudios han reportado un incremento en este parámetro con procesos de erosión moderada a severa, lo que ha sido atribuido a una mayor interacción entre el carbono orgánico y las partículas de arcilla del suelo; el incremento del contenido de arcillas en la superficie del suelo remanente generaría una mayor estabilidad de las moléculas de carbono (Lowery *et al.*, 1995, Arriaga y Lowery, 2003a).

La conexión entre la reducción de la materia orgánica producto de la erosión con otros efectos

dentro del suelo es amplia, destacándose un incremento de la densidad aparente del suelo y una marcada disminución en la permeabilidad, aireación y capacidad de abastecimiento de agua, entre otros (Chonghuan y Lixian, 1992). Esta relación es aún más estrecha con las propiedades químicas y biológicas del suelo, ya que la materia orgánica es la principal fuente natural de nitrógeno (N) disponible en el suelo, contiene alrededor del 65% del fósforo (P) total, y provee cantidades significativas de azufre y otros nutrientes esenciales para el crecimiento de la planta (Bauer y Black, 1994).

Así como la M.O. constituye la principal fuente de nutrientes en el suelo en estudios de campo en los que no se realizan aplicaciones de fertilizantes (Florchinger, 2000), existe una fuerte influencia de esta propiedad sobre las concentraciones de nutrientes en suelos erosionados (Eck, 1987, Florchinger *et al.*, 2000). En un ensayo de campo realizado por Izaurrealde *et al.*, (2006) las propiedades químicas cambiaron drásticamente con la pérdida simulada de suelo; en el tratamiento de extracción de 20 centímetros de suelo superficial, la concentración de C total descendió cerca de un 40% (40,2 a 25,0 g kg⁻¹) respecto al testigo sin erosión; la misma tendencia presentaron el N y P total, con mayor impacto para el nitrógeno (Cuadro 2).

Arriaga y Lowery (2003a) determinaron

que los sedimentos colectados desde áreas erosionadas son usualmente más ricos en P que en los suelos no alterados. De esta forma, pérdidas de P, calcio (Ca) y magnesio (Mg) se relacionan estrechamente con el incremento de la escorrentía, siendo el sedimento erosionado el que concentra la mayor cantidad de nutrientes, adsorbidos a las partículas coloidales del suelo. El Cuadro 3 muestra los resultados obtenidos en un estudio de Tengberg *et al.*, (1997) donde se trabajó con distintas coberturas de suelo, revelando que la pérdida de Ca y Mg en el sedimento erosionado (SE) es considerablemente más alta que las pérdidas por escorrentía (E), a diferencia del potasio, aunque las diferencias de estas pérdidas son menores.

La erosión reduce la fertilidad del suelo, removiendo físicamente sus nutrientes mediante el arrastre de partículas de los horizontes superiores; no obstante, existe también un efecto indirecto en la disponibilidad de nutrientes, que se desencadena producto de la alteración del nicho ecológico de los organismos del suelo. Los organismos contribuyen en una importante gama de servicios esenciales dentro del suelo, su activa participación en el ciclaje de los nutrientes incrementa la disponibilidad de estos para la planta, además de jugar un importante rol en la modificación de la estructura a través de la bioturbación y el efecto de la dinámica hidráulica del suelo (Barrios, 2007).

Cuadro 2. Características del suelo superficial, posterior a la aplicación de distintos niveles de erosión simulada en Josephburg, Alberta (modificado de Izaurrealde *et al.*, 2006)

Table 2. Characteristics of toposil, after applying various levels of simulated erosion in Josephburg, Alberta (modified of Izaurrealde *et al.*, 2006)

Profundidad de la muestra cm	Suelo superficial removido	Densidad aparente mg m ⁻³	P extraíble	P total	N disponible (NO ₃ -N) mg kg ⁻¹	N Total	C total g kg ⁻¹
0 - 10	0	1,17	23	800	11	3600	40,2
	5	1,21	20	790	11	3110	39,8
	10	1,24	14	720	10	2850	34,3
	15	1,28	12	640	8	2440	29,3
	20	1,31	12	640	6	2050	25,0

Los microorganismos del suelo derivan su energía desde la parte mineralizable de la materia orgánica (Greenland *et al.*, 1992, en Flörchinger *et al.*, 2000) utilizando una fracción de carbono como fuente de energía para su actividad metabólica y alterando la disponibilidad de nutrientes y la estructura del suelo (Paul, 1991 en Bauer y Black, 1994). Producto de la pérdida de C orgánico en suelos erosionados, algunos autores han explicado la reducción del potencial de mineralización del N de los suelos en estudio, esto ya que el 90% de la mineralización del carbono es realizado por microorganismos, como bacterias y hongos, en un trabajo en conjunto con la macro y mesofauna (Brussaard *et al.*, 1997).

Por otro lado, resultados obtenidos por Mummey *et al.*, (2006), mostraron una clara influencia de la presencia de lombrices en el suelo, obteniendo incrementos en alrededor de un 25% en la formación de macroagregados; además, Ela *et al.*, (1992), observaron un incremento del flujo del agua dentro del suelo a través del desarrollo de macroporos, construidos por lombrices, en el perfil. El mejoramiento de algunas propiedades físicas de suelo como rol biológico de sus organismos, son igualmente afectados por la alteración en su nicho ecológico, la que debido a una combinación de limitantes físicas y biológicas dentro del suelo desencadenan, entre otros efectos, un impedimento mecánico, un estrés hídrico y una deficiencia de oxígeno que sin duda produce un ralentizamiento de sus funciones y un impacto adverso en su desarrollo; este perjuicio se extiende a las raíces del suelo, afectando tanto su masa como su longitud (Bengough *et al.*, 2006).

No obstante, a diferencia de los microorganismos, el daño en el desarrollo radicular va a depender estrechamente de las características que presente el subsuelo, ya que su capacidad de exploración les permite extender su profundidad de enraizamiento (Eck, 1987, Izaurrealde *et al.*, 2006).

RESILIENCIA DEL SUELO

La resiliencia del suelo está referida a la habilidad intrínseca de un suelo para recuperarse

desde un estado alterado y retornar a un nuevo equilibrio similar al estado inicial; no obstante, este concepto puede ser interpretado de muchas otras formas, ya que una única definición es compleja debido a que involucra muchos aspectos de la dinámica del suelo en su interacción con el uso sostenible de la tierra (Eswaran, 1994 y Brinkman, 1990, citados por Tengberg *et al.*, 1997, Blanco-Canqui y Lal, 2008).

La degradación temprana del suelo producto de la erosión no es fácil de detectar por simple observación; la baja productividad de un cultivo es el primer escenario de un proceso erosivo, resultado de un deterioro continuo del suelo, donde las medidas de prevención son cada vez menos efectivas (Lyles, 1975, Frye *et al.*, 1982, Bakker *et al.*, 2004). Debido a que no todos los suelos responden de igual forma al estrés aplicado, la severidad del daño producido por la erosión en la productividad del suelo va a estar estrechamente vinculada a diversos factores, siendo los de mayor relevancia el tipo de cultivo y las condiciones de suelo y clima (den Biggelaar *et al.*, 2004).

Los sistemas de producción intensivo encubren los efectos inmediatos de la erosión en la productividad de muchos suelos agrícolas, ya que la aplicación de enmiendas y/o fertilizantes al suelo, impide que los rendimientos obtenidos disminuyan drásticamente; sin embargo, a la larga constituye una resistencia en el tiempo, del suelo erosionado, a la adición de fertilizantes, que podría no reparar íntegramente la productividad perdida (Flörchinger *et al.*, 2000, Fenton *et al.*, 2005).

Larney *et al.*, (1995) concluyeron que la adición de nutrientes a través del uso de fertilizantes no restaura la pérdida de productividad del suelo, lo que puede variar según el grado de erosión, el tipo de suelo, el tipo de cultivo y el nivel de manejo utilizado en el área de estudio. Tiempo más tarde, determinaron que las enmiendas de abono son una alternativa que proveen buena efectividad en la restauración de la productividad del suelo, supliendo las deficiencias de P, Mg, Mn y Zn en las primeras fases de erosión (Larney *et al.*, 2000). Además, el incremento de materia orgánica que aporta este producto reduce significativamente la densidad aparente en las capas superiores y

Cuadro 3. Pérdida de nutrientes anual en la escorrentía (E) y en el sedimento erosionado (SE) durante la temporada de lluvias (modificado de Tengberg *et al.*, 1997).

Table 3. Annual nutrient losses in runoff and the eroded sediment (SE) during the rainy season (modified of Tengberg *et al.*, 1997).

Tratamientos	P		K		Ca		Mg	
	kg ha ⁻¹		kg ha ⁻¹		kg ha ⁻¹		kg ha ⁻¹	
	E	SE	E	SE	E	SE	E	SE
T1	1,02	1,72	2,39	1,60	7,17	16,65	1,43	4,15
T2	0,87	0,93	1,09	1,02	3,75	14,1	0,85	3,91
T3	0,84	0,9	1,77	0,95	7,99	13,11	1,12	3,53
T4	0,36	0,27	0,84	0,39	2,73	4,53	0,36	1,17

(T1: suelo completamente desnudo; T2: Faja de suelo desnudo y 11% de cobertura con malla sombra; T3: Cobertura artificial continua, 18%; T4: Cobertura artificial continua, 30%).

restaura las propiedades estructurales de los suelos erosionados (Arriaga y Lowery, 2003a, Jagadamma *et al.*, 2009).

Antagónicamente, un estudio realizado por Izaurrealde *et al.* (2006) concluyó que la aplicación de fertilizante comercial fue la mejor opción de enmienda para restaurar la productividad de los suelos erosionados artificialmente, seguidos por el abono y la adición de suelo superficial.

Indiferente del producto a utilizar para incrementar la productividad en suelos agrícolas, las características que presentan los horizontes del perfil serán claves para establecer los efectos reales en la recuperación de éste. Si el déficit de nutrientes ha sido el principal resultado de un fenómeno erosivo, la productividad puede ser incrementada a través de algún tipo de enmiendas, no obstante, si las condiciones físicas del subsuelo son adversas, resulta muy difícil restaurar su productividad (Eck, 1987, Pierce *et al.*, 1983). Por lo tanto, un manejo integral dirigido a restaurar la productividad de suelos erosionados requerirá de la atención de las propiedades físicas, químicas y biológicas, tanto del suelo superficial, como del subsuelo (Nizeyimana y Olson, 1988).

Considerando la importancia de las propiedades evaluadas en este artículo, los suelos varían en su habilidad para resistir a las pérdidas de su capacidad productiva producto de la erosión, dependiendo principalmente del

espesor del horizonte superior y las propiedades fisicoquímicas del suelo superficial y subsuelo (Pierce, *et al.*, 1983, Eck, 1987, Nizeyimana y Olson, 1988). Cabe destacar que la cobertura vegetal, como medida precautoria, es uno de los factores más efectivos para aportar a la resiliencia del suelo y mantener su fertilidad, ya que ésta reduce el efecto de la gota de lluvia y disminuye la velocidad del flujo, mejorando la permeabilidad del suelo (Stocking, 1988, Chonghuan y Lixian, 1992) y promoviendo el reciclaje de nutrientes; no obstante, el efecto de esta relación erosión-cobertura no es lineal, y está sujeto a una compleja interacción entre vegetación, pendiente, tipo de suelo y erosión (Stocking, 1988).

DISCUSIÓN

No es posible establecer una simple relación cuantitativa entre el efecto de la erosión hídrica y la productividad del suelo, ya que las propiedades físicas, químicas y biológicas del horizonte superficial propias de cada suelo, determinan una serie de procesos que se desencadenan dentro del perfil, que se conjugan con la interdependencia entre los factores de la erosión (Stocking, 1988, Izaurrealde *et al.*, 2006).

Existen diversas opiniones al respecto,

Cuadro 4. Características del suelo remanente posterior a un fenómeno de erosión simulada.
Table 4. Characteristics of soil after applying simulated erosion.

Ssr	N	P	K	M O	pH	Mn	Zn	B	Ca	Mg	arena	limo	arcilla
cm	mg kg ⁻¹		%			mg kg ⁻¹			cmol(+)/Kg		%		
0	12	7	96	1,60	6,22	4,03	0,50	0,34	6,32	1,81	52	26	23
6	8	5	93	1,05	6,22	3,89	0,71	0,15	6,92	1,97	50	26	25
10	9	5	84	1,11	6,26	3,70	0,32	0,15	7,11	1,91	51	25	25
18	11	4	87	0,98	6,48	1,87	0,22	0,15	10,20	3,02	45	25	31

(Ssr: Espesor de suelo superficial removido)

Izaurrealde *et al.*, (2006) encontraron que el espesor del horizonte superficial fue la característica de suelo que más estrechamente se correlacionó con la productividad de los suelos estudiados en respuesta a un fenómeno erosivo, lo cual está relacionado con la disponibilidad de nutrientes del suelo. Frye *et al.*, (1982), Thompson *et al.*, (1991), Gollany *et al.*, (1992) y Larney *et al.*, (1995) concluyeron que la disminución de la capacidad de abastecimiento de agua dentro del suelo es el principal parámetro que afecta la productividad del suelo, resultado que se asocia al menor contenido de M.O., mayor contenido de arcilla, el deterioro de la estructura y la reducción de la porosidad en el horizonte superficial. Por su parte, Arriaga y Lowery (2003a) fueron más generales en su análisis, sugiriendo que el impacto en la productividad del suelo es mayoritariamente causado por el deterioro de las propiedades físicas del suelo frente a un fenómeno erosivo.

A pesar que existe un consenso mayoritario en que los efectos de la erosión del suelo dependen ampliamente de la calidad del suelo superficial y/o su espesor original, la importancia de la naturaleza del subsuelo juega un rol primordial frente a un proceso de pérdida de suelo. La presencia de un horizonte subsuperficial con propiedades físicas y químicas severamente adversas en comparación con las capas superiores del perfil tendrá una fuerte influencia en la formación del nuevo horizonte (Eck, 1987, Lobo *et al.*, 2005), produciendo notorios disturbios en sus procesos ecosistémicos y suministrando una ambiente desfavorable para el desarrollo de un cultivo.

Un estudio realizado por Brunel *et al.*, (2010, datos no publicados) muestra que la pérdida de suelo superficial tiene un significativo impacto en los primeros quince centímetros del horizonte superior remanente, con diferencias nutritivas frente al perfil original. Los resultados preliminares obtenidos de este ensayo, realizado en un Alfisol del secano interior de la zona Central de Chile, son presentados en la Cuadro 4, donde un análisis realizado a los 15 cm superficiales del suelo remanente muestra que el horizonte residual producto de la remoción de 18 cm de suelo superficial posee niveles más bajos de M.O y micronutrientes, como Mn, Zn, B, en relación al suelo original.

El horizonte inferior, representado por el tratamiento con 18 cm de suelo removido, presenta un mayor aporte de arcillas al horizonte remanente, las que posiblemente presentan una alta capacidad de intercambio catiónico, explicando el aumento en las concentraciones de los iones Ca y Mg.

Un fenómeno erosivo no sólo puede afectar el abastecimiento de nutrientes dentro del horizonte, sino que además su dinámica de disponibilidad para la planta (Izaurrealde *et al.*, 2006). La proporción de arcillas y el contenido de materia orgánica están estrechamente relacionados con esta dinámica de entrega de nutrientes del suelo a la planta y con otros procesos dentro del perfil; sin embargo, los suelos no responderán de la misma manera al estrés aplicado, es aquí donde el concepto de resiliencia del suelo toma mayor relevancia, ya que de no ser por este atributo del suelo, todos los manejos serían inútiles para producir

servicios ecosistémicos a largo plazo (Blanco-Canqui y Lal, 2008). Existen propiedades relevantes que se correlacionan con la resiliencia del suelo frente a un fenómeno erosivo, pero su análisis no es simple y depende de cada caso en particular.

CONCLUSIONES

La degradación de los suelos erosionados es el resultado de un encadenamiento de alteraciones de las variables químicas, físicas y biológicas propias de cada suelo, sin embargo, resulta complejo hablar de los efectos de la erosión en la productividad del suelo sin referirse a los cultivos establecidos. Desde este enfoque, es posible mencionar que la capacidad de abastecimiento de agua y nutrientes del suelo, junto con la profundidad de enraizamiento, son los parámetros de mayor relevancia que afectan la productividad del suelo.

La singularidad de alguna de las características del suelo no permitiría establecer la productividad de este, ni su resistencia a la erosión, ya que la naturaleza de la interrelación dentro de este sistema, genera un efecto sinérgico entre las propiedades del suelo; no obstante, los efectos de la erosión dependerán ampliamente del espesor original y de la calidad del suelo superficial, conjuntamente con la naturaleza del subsuelo.

BIBLIOGRAFÍA

- 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.
- ARRIAGA, F.J., LOWERY, B. 2003b. Erosion and productivity. *New York: Encyclopedia of Water Science* 2nd ed. pp. 222 – 224.
- BARRIOS, E. 2007. Soil biota, ecosystem services and land productivity. *Ecological Economics* 64: 269-285.
- BAKKER, M., GOVERS, G., ROUNSEVELL, M. 2004. The crop productivity–erosion relationship: an analysis based on experimental work. *Catena* 57: 55-76.
- 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.
- BEN-HUR, M., LADO, M. 2008. Effects of soil wetting conditions on seal formation, runoff, and soil loss in arid and semiarid soils – a review. *Australian Journal of Soil Research* 46: 191-202.
- BENGOUGH, A.G., BRANSBY, M.F., HANS, J., MCKENNA, S.J., ROBERTS, T.J., VALENTINE, T.A. 2006. Root responses to soil physical conditions, growth dynamics from field to cell. *Journal of Experimental Botany* 57: 437-447.
- BLACK, A., GREB, B.W. 1968. Soil reflectance, temperature, and fallow water storage on exposed subsoils of a Brown soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 32: 105-109.
- BLANCO-CANQUI, H., LAL, R. 2008. *Principles of Soil Conservation and Management*. Springer Verlag, Germany. 620 p.
- BRUSSAARD, L., BEHAN-PELLETIER, V.M., BIGNELL, D.E., BROWN, V.K., DIDDEN, W., FOLGARAIT, P., FRAGOSO, C., FRECKMAN, D.W., GUPTA, V.V., HATTORI, T., HAWKSWORTH, D.L., KLOPATEK, C., LAVELLE, P., MALLOCH, D.W., RUSEK, J., SODERSTROM, B., TIEDJE, J.M., VIRGINIA, R.A. 1997. Biodiversity and ecosystem functioning in soil. *Ambio* 26(8): 563-570.
- CHONGHUAN, N., LIXIAN, W. 1992. A preliminary study of soil erosion and land degradation. *Proceedings of the Chengdu Symposium*: 439-445.
- CHRISTENSEN, L.A., MCELYEA, D.E. 1988. Toward a general method of estimating productivity–soil depth response relationships. *J. Soil and Water Cons.* 43:199–202.
- CIHACEK, L.J., SWAN, J.B. 1994. Effects of erosion on soil chemical properties in the north central region of the United States. *J. Soil and Water Cons.* 49(3): 259-265.
- DAILY, G. 1997. Restoring value to the world's degrade lands. *Science* 269: 350-354.
- DEN BIGGELAAR C., LAL, R., WIEBE, K., BRENNEMAN, V. 2004. The global impact of soil erosion on productivity. 1: Absolute and relative erosion-induced yield losses. *Advances in Agronomy* 81: 1-48.
- DREGNE, H.E. 1992. Erosion and soil productivity in Asia. *J. Soil and Water Cons.* 47: 8-13.
- DUDAL, R. 1982. Land degradation in a world perspective. *J. Soil and Water Cons.* 37: 245-249.
- ECK, H.V. 1987. Characteristics of exposed subsoil at exposure and 23 years later. *Agron. J.* 79: 1067-1073.
- ELA, S.D., GUPTA, S.C., RAWLS, W.J. 1992. Macropore and surface seal interactions affecting

- water infiltration into soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 714-721
- FAO, 1984: Erosion and soil productivity: a review. Consultants Working Paper N°1, Soil Conservation Programme, United Food and Agriculture Organization, Rome, 98 p.
- FENTON, T.E., KAZEMI, M., LAUTERBACH-BARRETT, M.A. 2005. Erosional impact on organic matter content and productivity of selected Iowa soils. *Soil and Tillage Research* 81(2):163-171.
- FLÖRCHINGER, F.A., LEIHNER, D.E., STEINMÜLLER, N., MÜLLER-SÄMANN, K., EL-SHARKKAWY, M.A. 2000. Effects of artificial topsoil removal on Sorghum, Peanut, and Cassava yield. *J. Soil and Water Cons.* 55(3): 334-339.
- FRYE, W.W., EBELHAR, S.A., MURDOCK, L.W., BLEVINS, R.L. 1982. Soil erosion effects on properties and productivity of two Kentucky soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46: 1051-1055.
- GERMANN, P.F., EDWARDS, W.M., OWENS, L.B. 1984. Profiles of bromide and increased soil moisture after infiltration into soil with macropores. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 237-244.
- GOLLANY, H.T., SCHUMACHER, T.E., LINDSTROM, M.J., EVENSON, P.D., LEMME, G.D. 1992. Topsoil depth and desurfacing effects on properties and productivity of a Typic Argiustoll. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56(1): 220-225.
- HAIRSTON, J.E., SANFORD, J.O., RHOTON, F.E., MILLER, J.G. 1988. Effect of soil depth and erosion on yield in the Mississippi blacklands. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52: 1458-1463.
- 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.
- JAGADAMMA, S., LAL, R., RIMAL, B.K. 2009. Effects of topsoil depth and soil amendments on corn yield and properties of two Alfisols in central Ohio. *J. Soil and Water Cons.* 64(1): 70-80.
- KINNELL, P.I. 1981. Rainfall intensity-kinetic energy relationships for soil loss prediction. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45: 153-155.
- LADO, M., PAZ, A., BEN-HUR, M. 2004. Organic matter and aggregate size interactions in infiltration, seal formation and soil loss. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68(3): 935- 942.
- LARNEY, F.J., IZAURRALDE, R.C., JANZEN, H.H., OLSON, B.M., SOLBERG, E.D., LINDWALL C.W., NYBORG, M. 1995. Soil erosion-crop productivity relationships for six Alberta soils. *J. Soil and Water Cons.* 50(1): 87-91.
- LARNEY, F.J., OLSON B.M., JANZEN, H.H., LINDWALL, C.W., 2000. Early impact of topsoil removal and soil amendments on crop productivity. *Agron. J.* 92: 948-956.
- LARNEY, F.J., JANZEN H.H., OLSON, B.M., OLSON, A.F. 2009. Erosion-productivity-soil amendment relationships for wheat over 16 years. *Soil and Tillage Research* 103(1): 73-83.
- LYLES, L. 1975. Possible effects of wind erosion on soil productivity. *J. Soil and Water Cons.* 30: 279-283.
- LOBO, D., LOZANO, Z., DELGADO, F. 2005. Water erosion risk assement and impact on productivity of a Venezuelan soil. *Catena* 64: 297-306.
- LOWERY, B., SWAN, J., SCHUMACHER, T., JONES, A. 1995. Physical propeties of selected soil by erosion class. *J. Soil and Water Cons.* 50(3): 306-311.
- MALHI, S., IZAURRALDE, R., NYBORG, M., SOLBERG, E. 1994. Influence of topsoil removal on soil fertility and barbey growth. *J. Soil and Water Cons.* 49(1): 96-101.
- MBAGWU, J.S., LAL R., SCOTT, T.W. 1984. Effects of artificial desurfacing on Alfisols and Ultisols in southern Nigeria: II. Changes in Soil Physical Properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 834-838.
- MCDANIEL, 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.
- MIELKE, L.N., SCHEPERS, J.S. 1986. Plant response to topsoil thickness on an eroded loess soil. *J. Soil and Water Cons.* 41(1): 59-63.
- MOKMA, D.L., FENTON, T.E., OLSON, K.R. 1996. Effect of erosion on morphology and classification of soils in the north central United States. *J. Soil and Water Cons.* 51(2): 171-176.
- MUMMEY, D., RILLIG, M., SIX, J. 2006. Endogeic earthworms differentially influence bacterial communities associated with different soil aggregate size fractions. *Soil Biology & Biochemistry.* 38: 1608-1614.
- NIZEYIMANA, E., OLSON, K.R. 1988. Chemical, mineralogical and physical property differences between moderately and severely eroded Illinois Soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52: 1740-1748.
- OLDEMAN, L.R. 1994. The global extent of land degradation. In: *Land Resilience and Sustainable Land Use*. D.J. Greenland and I. Szabolcs (eds). 99-118. Wallingford: CABI.
- OLSON, T.C. 1997. Restoring the productivity of a glacial till soil after topsoil removal. *J. Soil and Water Cons.* 32: 130-132.
- PIERCE, F.J., LARSON, W.E., DOWDY, R.H., GRAHAM, W.A. 1983. Productivity of soils:

- Assessing long-term changes due to erosion. *J. Soil and Water Cons.* 38(1): 39-44.
- POLYAKOV, V., LAL, R. 2004. Modeling soil organic matter dynamics as affected by soil water erosion. *Environment International* 30: 556-574.
- POWER, J. F., SANDOVAL, F.M., RIES, R.E., MERRILL, S.D. 1981. Effects of topsoil and subsoil thickness on soil water content and crop production on a disturbed soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45: 124-129.
- RHOTON, F.E., LINDBO, D.L. 1997. A soil depth approach to soil quality assessment. *J. Soil and Water Cons.* 52(1): 66-72.
- SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA. 1997. *Glossary of Soil Science Terms*. Madison, WI.
- STOCKING, M.A. 1988. Assessing vegetative cover and management effects. In: R. Lal. (Ed). *Soil Erosión Research Methods*. Soil and Water Conservation Society. Ankeny. Iowa. USA. p. 163-185.
- SUMNER, M.E., STEWART, B.A. 1992. *Soil crusting: Chemical and physical processes*. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA. P. 33-92
- TANAKA, D.L., AASE, J.K. 1989. Influence of topsoil removal and fertilizer application on spring wheat yields. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53: 228-232.
- TENGBERG, A., STOCKING, M., FALCI, S.C. 1997. The impact of erosion on soil productivity—An experimental design applied in Sao Paulo State, Brazil. *Geografiska Annaler.* 79: 95-107.
- THOMPSON, A.L., GANTZER, C.J., ANDERSON, S.H. 1991. Topsoil depth, fertility, water management, and weather influences on yield. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55: 1085-1091.