

## CAPÍTULO 1

### **El suelo como recurso natural. ¿En qué marco se inserta la biorremediación?**

Miguel A. Taboada<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Suelos, CIRN, INTA

E-mail: taboada.miguel@inta.gob.ar

### **El suelo: ¿un recurso natural (RRNN) renovable?**

A pesar de que los problemas de degradación irreversible de suelos y de pérdida de productividad son conocidos desde la antigüedad, a menudo se sigue pensando a los suelos como un recurso renovable. Ejemplos concretos de degradación irreversible de suelos son las pérdidas por erosión que causan decapitación de los horizontes superficiales que poseen la mayor parte de la materia orgánica y de los nutrientes vegetales, o de salinización en suelos bajo riego.

Solo algunos procesos de degradación de suelos pueden ser considerados reversibles. Por ejemplo, y hasta cierto punto, las pérdidas de fertilidad química asociadas a la extracción de nutrientes. Por el contrario, la mayoría de los procesos de degradación de suelos distan de ser reversibles.

En la Tabla 1 se presenta un listado y clasificación por su tipo de diferentes procesos de degradación de suelos, cada uno con su grado de reversibilidad (Scherr, 1999). Claramente, en nuestro país prevalecen dos procesos de degradación irreversible o poco reversible, como “la pérdida de suelo por erosión por el agua o por viento” y la “alcalinización/salinización”. Entre los poco reversibles, aparecen “los panes de arcilla, zonas compactas”, “agotamiento de nutrientes”, y “desbalance de nutrientes”, mientras que entre los reversibles a bajo costo prevalecen “panes de arcilla”, “zonas compactas”, “reducción de la infiltración/drenaje impedido”, “reducción de la capacidad de almacenaje de agua”, “anegamiento”, “aridificación”, y “pérdida de materia orgánica”. Los procesos de degradación biológico debidos al disturbio del suelo, o al uso de agroquímicos también están muy difundidos, aunque claramente menos estudiados. Toda esta información surge de una publicación reciente de Casas y Albarracín (2015) en la cual se han compilado los trabajos existentes sobre el tema en el país.

A nivel global, se ha publicado recientemente sobre el estado de los suelos del mundo (FAO-ITPS, 2015; Montanarella *et al.*, 2016). De allí surge que a nivel global también la erosión es la principal amenaza sobre el estado de los suelos, en segundo lugar, la pérdida de materia orgánica de los suelos, seguido por el desbalance de nutrientes. De todos ellos, aparece el primero como el único claramente irreversible. No obstante, aparecen otras amenazas a nivel regional o continental que afectan la funcionalidad de los suelos, como por ejemplo, la salinización, la contaminación o el sellado por avance de urbanizaciones.

La efectividad de recuperación posdegradación depende del grado de resiliencia de la propiedad afectada. Difícilmente se logre retornar al punto inicial de cero degradación o condición prístina. Por ejemplo, el nivel inicial de materia orgánica y la condición estructural del suelo.

Debiera ser objeto de discusión en qué medida los problemas de contaminación de suelos y aguas son reversibles y a qué costo.

En el futuro próximo asoman estas nuevas presiones sobre los suelos: a) el aumento de la demanda de alimentos, fibras y biocombustibles por una población creciente que llegará a 9 mil millones de habitantes hacia 2050, y b) el incremento de los denominados eventos extremos (ej. tormentas, inundaciones, sequías, olas de calor, incendios, etc.) asociados al cambio climático (FAO-ITPS 2015; Montanarella *et al.*, 2016).

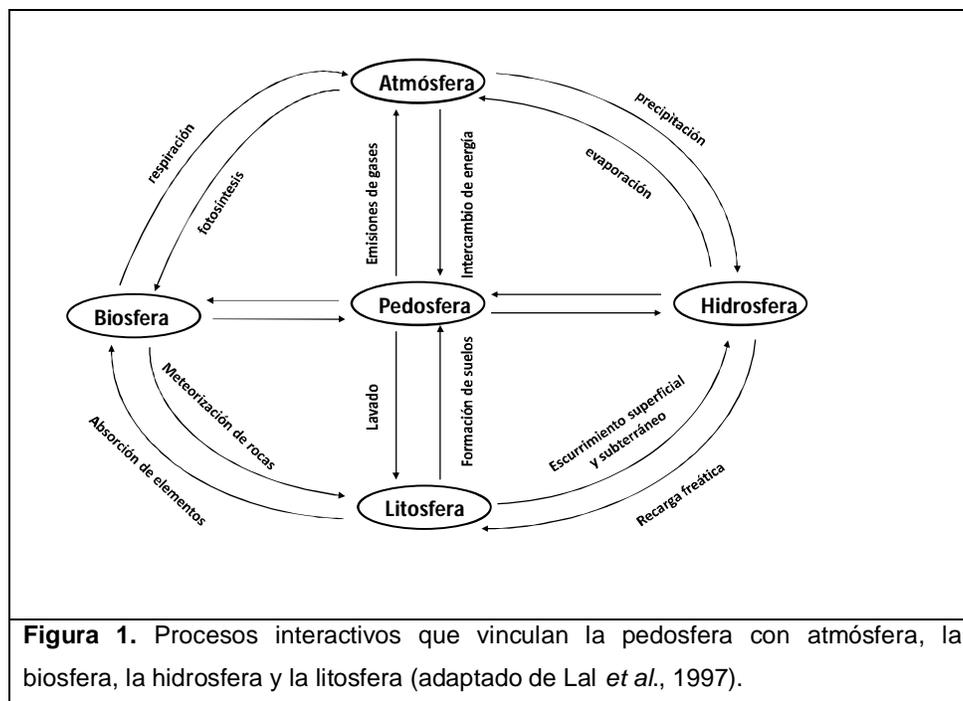
**Tabla 1.**

Reversibilidad relativa de los procesos de degradación de suelos (Scherr 1999)				
Tipo de degradación	Proceso de degradación	Grado de reversibilidad		
		Reversible a bajo costo	Reversible con costo significativo	Irreversible a muy alto costo
Física	Panes de arcilla, zonas compactas		X	
	sellado superficial y encostramiento	X		
	subsidiencia			X
	Pérdida de suelo por erosión por agua o viento		X (solo si es activa)	X
	Deformación del terreno (erosión en cárcavas, movimiento en masa)			X
Agua disponible	Reducción de la infiltración/drenaje impedido		X	
	Reducción de la capacidad de almacenamiento de agua		X	
	anegamiento		X (a escala de lote)	X (a escala de cuenca)
	aridificación		X	
Química	Pérdida de materia orgánica		X	
	agotamiento de nutrientes/lavado	X		
	Desbalance de nutrientes	X		
	atrapamiento de nutrientes		X	
	acidificación		X (si es posible el encalado)	X
	alcalinización/salinización			X
	Eutroficación		X	
Biológica	Reducción de la actividad biológica debido al disturbio del suelo		X	
	Reducción de la actividad biológica debido al uso de agroquímicos			
Polución	Contaminación		X	
	Acumulación de sustancias tóxicas			X

De cualquier manera, no cabe duda de que el suelo debe ser considerado un RRNN no renovable, al menos a una escala humana.

## Evolución de los conocimientos sobre los suelos

El suelo es un recurso natural biogeoquímico dinámico que soporta todos los componentes que comprenden los ecosistemas terrestres, de forma tal que ha sido llamado la piel viva de la Tierra. En su portada del 11 de junio de 2004, la revista *Science* declaró a los suelos como “la frontera final”. Colectivamente, el suelo es conocido como la pedosfera, y los procesos que tienen lugar dentro del suelo están ligados a servicios ecosistémicos como la cantidad y calidad del agua, el intercambio de gases atmosféricos, y son centrales en los ciclos biogeoquímicos de los nutrientes y el carbono que sostienen la vida (Figura 1).



**Figura 1.** Procesos interactivos que vinculan la pedosfera con atmósfera, la biosfera, la hidrosfera y la litosfera (adaptado de Lal *et al.*, 1997).

Si bien el comienzo de la agricultura se remonta al período neolítico (nueve mil años antes de Cristo) y existen evidencia de una primera clasificación de suelos en China unos 4 o 5 mil años antes de Cristo, y ya en el Antiguo Testamento se hace referencia a “tierra de secano y tierra de regadío”, fueron Dokuchaev y sus discípulos de la Escuela Rusa los que asentaron las bases de la Edafología moderna entre finales del siglo 19 e inicios del siglo 20, y reconocieron al suelo como un cuerpo natural organizado, acreedor por sí mismo de un estudio científico. Recién en 1924 se realiza el primer congreso de suelos en Roma, y es a partir de entonces que la Edafología comienza a funcionar como una ciencia, con su metodología propia (Barrios, 1985).

Puede afirmarse que parten de esa época los primeros estudios básicos sobre rocas y minerales y la génesis de los suelos, basado en la influencia prevaleciente del clima (ej. materiales originarios similares dan lugar a suelos diferentes bajo climas distintos). Más adelante se acepta una visión más evolucionista, aceptando la influencia de la vegetación (Barrios, 1985). Cerca de mediados de siglo, Hans Jenny (1941) define cinco factores formadores de suelo, dando lugar a la ecuación general de formación de los suelos:

$$S = f(\text{cl}, \text{b}, \text{mp}, \text{r}, \text{t}) \quad [1]$$

Donde:

S = suelo o característica de él; Cl: = clima; b= material biótico, mp= material parental, r = relieve o topografía, y t= l tiempo.

Se presenta en la Figura 2 un esquema teórico de la evolución de los conocimientos de los suelos, donde esta etapa fundamental aparece en los comienzos. Posteriormente, se generan los primeros sistemas de clasificación de los suelos y su taxonomía (Clasificación Rusa, USDA, 1938) que llevaban a cabo un enfoque en los factores de formación del suelo y su ambiente para clasificación de suelos zonales (determinados por el desarrollo de vegetación y clima), azonales y intrazonales (determinados por su material parental y tiempo de formación). Se diferenciaban entre suelos azonales e intrazonales basados en el desarrollo del perfil del suelo. Se genera la primera clasificación americana de suelos (Thorp y Smith, 1949).

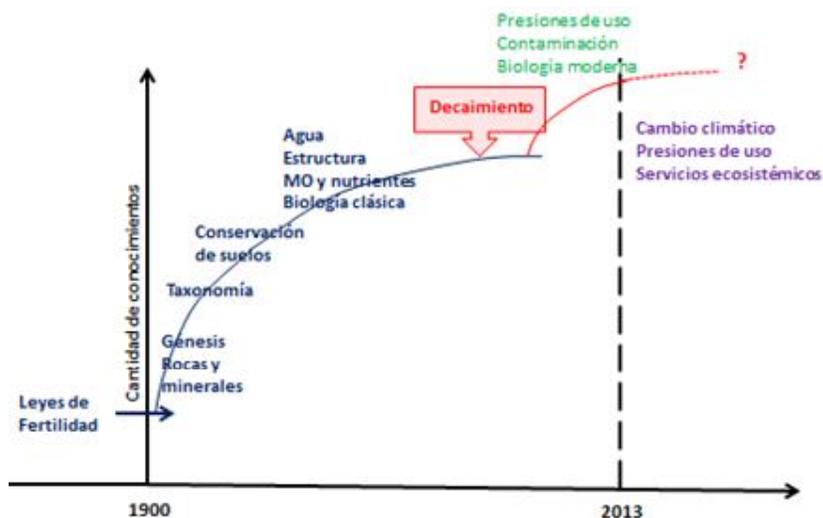


Figura 2. Evolución teórica de los conocimientos de los suelos.

Si bien el conocimiento de la degradación de los suelos viene de la antigüedad, a partir de la desaparición de sociedades primitivas por pérdida de fertilidad de los suelos o por salinización de estos, puede afirmarse que es a partir de 1930, cuando se desata la fenomenal sequía y tormenta de polvo (*dust bowl*) en las planicies sureñas de Estados Unidos, que se toma conciencia de la importancia de conservar los suelos. Aparece la figura del Dr. Hugh Hammond Bennett como líder de los estudios e implementación de prácticas de conservación (American Council of Learned Societies, 1999).

Se ha manifestado en los últimos años un renovado interés en el suelo y en la ciencia del suelo, dado el reconocimiento de que los ciclos biogeoquímicos que ocurren en la superficie de la Tierra influyen el cambio climático global, la degradación y remediación de tierras, el destino y transporte de nutrientes y contaminantes, la conservación del suelo y el agua, el abastecimiento y la seguridad alimentaria, la capacidad de soporte global, la función de los humedales, y muchos otros aspectos pertinentes al manejo y a la conservación de los recursos de tierras y aguas (Science, 2004; Steering Committee for Frontiers in Soil Science Research & National Research Council, 2009).

A partir de la posguerra, en consonancia con el proceso de industrialización de las sociedades desarrolladas, se producen avances sustanciales en conocimientos de las propiedades de los suelos en la relación con su capacidad para sostener la producción de cultivos agrícolas y pasturas. Esta época coincide con la denominada Revolución Verde, que si bien permitió afrontar problemas graves de escasez de alimentos por una creciente población en países en vías de desarrollo, lo hizo a expensas de un uso elevado de insumos basados en combustibles fósiles (ej. fertilizantes minerales, agroquímicos, nuevas variedades de trigo, arroz y maíz, etc.) y el avance de la deforestación en ambientes tropicales y subtropicales (IAASTD, 2009). Un hito de la Revolución Verde es el otorgamiento del Premio Nobel de la Paz 1970 al Dr. Norman E. Borlaug, considerado el padre de la Revolución Verde e inventor de la agricultura moderna (Sampedro, 2009).

Luego de los fuertes avances en el conocimiento de las propiedades físicas, como la provisión de agua a las plantas, las propiedades químicas que incluyen la disponibilidad de nutrientes vegetales y la biología de suelos, puede decirse que se llegó a un estancamiento o *plateau* en el avance de la ciencia del suelo a nivel global hacia fines del siglo 20. Sin embargo, esta situación de estancamiento comenzó a dar un vuelco al final del siglo, cuando se lleva a cabo el llamado "Estudio del Milenio" o

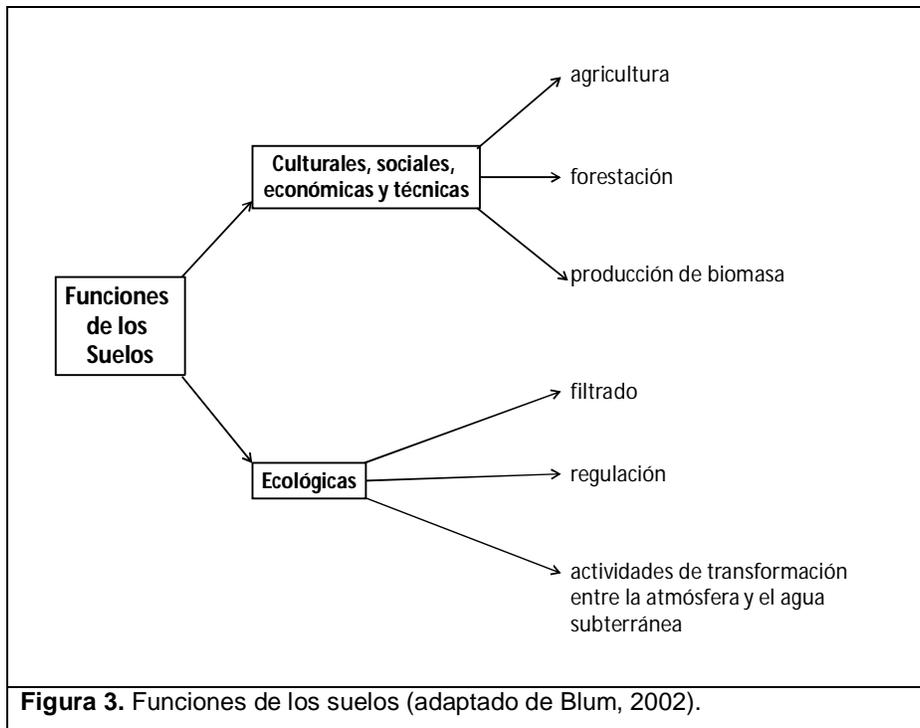
*Millennium Ecosystem Assessment* (MEA, 2005). Este estudio pone de relieve el rol que juegan los suelos en la provisión de servicios ecosistémicos, como el filtrado y provisión de agua, la calidad del aire atmosférico y el almacenamiento de carbono, además de los servicios de provisión de alimentos y fibras.

Se considera que en los próximos 30 a 50 años el principal desafío global será incrementar la productividad agropecuaria para alimentar a una población mundial en aumento, atendiendo a su vez a los crecientes problemas de degradación y contaminación de suelos, aguas y atmósfera. Este desafío será intensificado por el cambio climático, la escasez de agua, la degradación de las tierras, la seguridad energética, y las diferencias ideológicas sobre cómo mejorar la seguridad alimentaria en todo el mundo. A similares conclusiones han arribado una serie de estudios internacionales llevados a cabo para analizar los impactos de la investigación en agricultura (IAASTD, 2009), así como el futuro de la actividad (Mangan *et al.*, 2010) y el de ecosistemas (MEA, 2005).

## **Las funciones de los suelos. Visión actual**

Los suelos son vistos en forma crecientemente importante para el desarrollo mundial, en temas tales como la seguridad alimentaria, el alivio de la pobreza, la degradación de tierras y la provisión de servicios ecosistémicos (Wood *et al.* 2000). Se considera que los suelos ejercen un rol principal en muchos servicios del ecosistema, tales como el ciclado de los nutrientes y la formación de suelos, la provisión de alimentos, madera y fibras, la regulación del clima, las inundaciones y la purificación del agua (MEA, 2005). Por estas razones, existe consenso en que los suelos han resurgido en la agenda global, luego de dos décadas de olvido parcial (Bouma, 2009).

Bouma, (2009) recomienda hacer foco en las funciones de los suelos, más que las amenazas de degradación, a fin de poder concitar la atención del resto de la sociedad. Estas funciones son presentadas en la Figura 3. Pueden ser identificadas seis funciones diferentes de los suelos, tres de ellas de tipo más ecológico, y otras tres más bien relacionadas con aspectos culturales, sociales, económicos y técnicos. Existe necesidad de relacionar con el público a las funciones de tipo ecológico, especialmente de qué manera el suelo funciona respecto a la calidad y disponibilidad de agua (Science, 2004; Steering Committee for Frontiers in Soil Science Research & National Research Council, 2009).



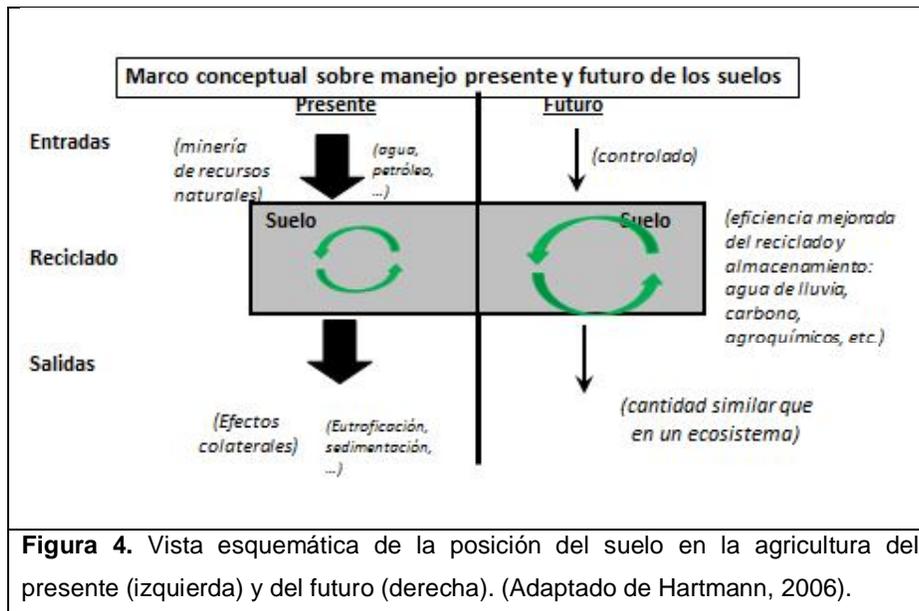
El suelo soporta la más rica biodiversidad sobre la Tierra y funciona como filtro y regulador de contaminantes inorgánicos y orgánicos, así como de microorganismos patógenos y virus. A pesar de su importancia, el suelo permanece como un recurso minusvalorado y menospreciado (Science, 2004; Steering Committee for Frontiers in Soil Science Research & National Research Council, 2009).

Existe una creciente demanda por el reconocimiento de los servicios ecosistémicos, de forma tal que se han vuelto una norma la aparición de antagonismos (*trade-offs*) entre diferentes servicios. Por ejemplo, un país puede incrementar su producción de alimentos convirtiendo un bosque o una selva en agricultura, por ejemplo, pero a expensas de afectar negativamente el aporte de servicios que pueden ser de igual o mayor importancia, tales como proveer agua limpia, leña, destinos ecoturísticos, o regulación de inundaciones y control de sequías (MEA, 2005).

### **Necesidad de reciclar**

El mundo está asistiendo a un decrecimiento de los insumos basados en agua y petróleo en la agricultura moderna. La minería de los recursos naturales no es más aceptable, por lo que la producción de alimentos solo puede ser alcanzada a través de la mejora en el reciclado, tal como se esquematiza en la Figura 4 (Edwards y

Someshwar, 2000; Kashmanian et al., 2000). Se suma a ello el probable o discutible agotamiento de las reservas fósforo (Dibb, 2004) que determinan que se deberá hacer foco en las condiciones y procesos de resiliencia del suelo en un medio natural para introducir estos aspectos en técnicas de manejo alternativas y más sofisticadas (Vance et al., 2003; Mangan et al., 2010). Los agroecosistemas esquemáticos no slo estarán caracterizados por flujos e interrelaciones, sino también por evaluaciones económicas (Hartmann, 2006; Steering Committee for Frontiers in Soil Science Research & National Research Council, 2009).

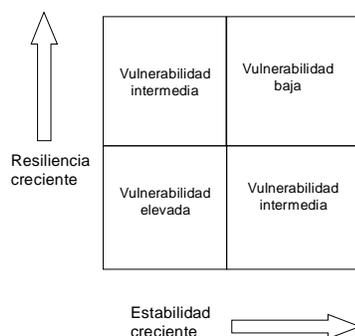


## Vulnerabilidad y resiliencia

Los suelos agrícolas se presentan en ecosistemas que poseen diferente grado de vulnerabilidad a las presiones productivas. Se pueden distinguir los ecosistemas poco frágiles de aquellos que son más frágiles o vulnerables siguiendo el lineamiento propuesto por Viglizzo & Frank (2006). Los ecosistemas poco frágiles son aquellos que poseen suelos fértiles, los cuales se caracterizan por su baja vulnerabilidad y elevada resiliencia o capacidad de recuperación (Figura 5). La vulnerabilidad es un concepto que se asocia con las condiciones del clima que hace que un suelo sea altamente susceptible a sufrir degradación (ej. erosión hídrica y eólica) por mal manejo del mismo. La resiliencia es la capacidad que posee un suelo determinado para recuperar una determinada condición luego de un daño (Kay y Angers, 2000).

Los ecosistemas frágiles se caracterizan por poseer suelos muy vulnerables, poco resilientes, o ambas cosas a la vez (Figura 4). Esta combinación de factores suele darse en los climas tropicales y subtropicales, o en las regiones más áridas. En todas estas regiones los suelos suelen poseer bajos niveles de materia orgánica, y suelen ser también poco fértiles. A pesar de estos graves problemas, la cantidad de información que se produce en estos lugares es varias veces inferior en cantidad y en calidad a la que se genera en los ecosistemas de tierras más fértiles (Hartemink, 2002). Esta escasez de información también se produce en la Argentina, particularmente en las regiones subtropicales, donde las presiones del desmonte para producir cultivos son cada vez mayores (Boletta *et al.*, 2006).

Estas áreas poco fértiles parecen adaptarse mejor para aproximaciones en pequeña escala basadas en la agroecología, en la agroforestación, en el uso de abonos orgánicos y en los métodos de conservación del agua. Existen importantes oportunidades para que la agricultura del futuro pueda ser más productiva, rentable, sustentable y ambientalmente amigable, si se basa más en fuentes de energía y nutrientes disponibles por procesos biológicos. La idea es que el uso de agroquímicos sea mínimo y que suplemente a la biología (Altieri, 2002). Debe extenderse una mayor adopción de la agricultura conservacionista por los agricultores (Knowler & Bradshaw, 2007). Muchos de estos enfoques han probado ser exitosos en otras regiones con ecosistemas frágiles, pero su implementación requiere de investigación local para ser adoptadas por los productores.



**Figura 5.** Esquema que muestra la relación entre vulnerabilidad y resiliencia en los suelos (adaptado de Kay y Angers, 2000).

## **Presiones de uso sobre los suelos y seguridad alimentaria**

La provisión de seguridad alimentaria ha sido reconocida como uno de los grandes desafíos ambientales existentes para el desarrollo sostenible de la humanidad y el planeta Tierra (Godfray *et al.*, 2010; Foley *et al.*, 2011; Pimentel, 2012; Branca *et al.*, 2013; Mc Bratney *et al.*, 2014). Los suelos se relacionan estrechamente con el concepto de seguridad alimentaria, entendida como el aseguramiento de la cantidad, la calidad y la accesibilidad de los alimentos (Mc Bratney *et al.*, 2014). Junto con la seguridad del agua, la seguridad energética, el cambio climático y su mitigación, la protección de la biodiversidad y los servicios ambientales, la seguridad alimentaria forma parte de un concepto más amplio conocido como la seguridad del suelo (Mc Bratney *et al.*, 2014).

El mundo se enfrenta a un problema de sobrepoblación grave, sobre todo en África y Asia. La tasa actual de aumento de la población es del 1,2 %, lo que significa un tiempo de duplicación de 58 años. Por lo tanto, la población actual del mundo de 7 mil millones se duplicará a 14 mil millones en menos de 60 años (Pimentel, 2012). El aumento de la población y el consumo están imponiendo demandas sin precedentes sobre la agricultura y los recursos naturales. Para satisfacer la demanda de alimentos por el aumento de la población mundial, la producción agrícola debe ser duplicada entre 2000 y 2050. De no lograrse, podríamos afrontar nuevamente un desafío similar al planteado hace más de dos siglos por Tomas Malthus (1798), quien postuló que mientras la población crecería a tasas geométricas, los alimentos lo harían a tasas aritméticas, de magnitud muy inferior, generando así un potencial escenario de hambruna con el paso del tiempo.

Las amenazas a la seguridad alimentaria son en gran medida causadas por la degradación de los suelos y de los recursos hídricos asociados, en particular cuando dicha degradación es irreversible o difícilmente reversible, como es el caso de la pérdida de suelo superficial por el viento o el agua la erosión, la deformación del terreno por la erosión en cárcavas o movimiento de masas, la acidificación, la alcalinización/salinización y la contaminación con sustancias tóxicas (Scherr, 1999). Cada año unos 10 millones de hectáreas de tierras de cultivo se pierden debido a la erosión del suelo, reduciendo así la tierra de cultivo disponible para la producción de alimentos. En general, la tasa de pérdida de suelo por degradación es 10 a 40 veces más rápida que la tasa de renovación del suelo. La pérdida de tierras agrícolas por degradación se vuelve dramática en los países o regiones con alta población o con inseguridad alimentaria, como sucede en África, donde la población se prevé un crecimiento de su actual 1,1 mil millones a 4,2 mil millones en 2100.

Suponiendo tecnologías agrícolas similares y niveles de intensificación, deben incorporarse mil millones de hectáreas adicionales de tierras de cultivo (por encima de 1,5 mil millones de hectáreas actualmente cultivadas) para el año 2050 (Tilman *et al.*, 2002). Sin embargo, estos futuros aumentos en la producción de alimentos no se pueden lograr a costa de una mayor degradación de suelos o con prácticas agrícolas no sostenibles, sino sobre la base de la intensificación y la gestión del carbono en el suelo y los nutrientes (Tilman *et al.*, 2002; Godfray *et al.*, 2010; Branca *et al.*, 2013). Un desafío mayor es cerrar las brechas de rendimiento de los cultivos mediante el aumento de la eficiencia de cultivo y la reducción del impacto ambiental de la agricultura (Foley *et al.*, 2011). Recientemente, Aramburu Merlos *et al.* (2015) hallaron brechas de rendimiento con respecto al potencial en secano de entre 30 y 40 % para los cultivos de trigo, maíz y soja en nuestro país.

La provisión de seguridad alimentaria también se ve amenazada por algunos cambios de uso del suelo, como es el caso de la simplificación agrícola impulsada por el mercado, tal como sucede en los países de América del Sur (es decir, Argentina, Brasil, etc.) (Satorre, 2005; Viglizzo y Jobbagy, 2010). A pesar del aumento de la productividad de los diferentes cultivos de cereales en los últimos 30 años en el Cono Sur, gran parte de ese aumento se hizo a expensas de una menor diversidad de productos cosechados. Ello se ve reflejado en la prevalencia del monocultivo de soja, lo que resulta en una elevada susceptibilidad a las perturbaciones de los mercados y del clima (Lavado y Taboada 2009; Viglizzo y Jobbagy, 2010).

La demanda de biocombustibles es un gran motorizador de los cambios de uso de la tierra. El principal motor de esta aceleración de la demanda es la velocidad de crecimiento del consumo *per cápita* en las economías de países emergentes. También han contribuido a esta aceleración los cambios de política en los países de la OCDE que favorecen la expansión de la producción de biocombustibles, a veces a expensas de la producción de cultivos alimentarios (De Luchi, 2012). La soja y el maíz, así como biocombustible de soja y aceite de palma, motorizaron la conversión de tierras agrícolas en América Latina y África (Deluchi, 2012; Miyake *et al.*, 2012). La producción de maíz y de soja se dedican a reservas para el bioetanol y para el biodiésel, que representan una competencia con la producción de alimentos y con el carbono del suelo (Pimentel *et al.*, 2008, 2009; Pimentel y Burgess, 2014).

Es difícil predecir la evolución del estado de los recursos mundiales de suelos en los próximos años, en el contexto de las amenazas y beneficios causados por los cambios. Según lo que se concluye a partir de un trabajo de revisión con un mínimo impacto ambiental realizado por Godfrey *et al.* (2010), la intensificación sostenible es una opción viable para alimentar a 9 mil millones de personas en los próximos 40

años, evitando así un nuevo dilema de Malthus. Para cumplir con este objetivo, deben lograrse a escala global acuerdos sobre políticas de gobernabilidad de los suelos en el futuro próximo.

Las soluciones a que no se cumpla el “dilema Malthusiano” deberían provenir de: a) la limitación de la expansión agrícola; b) el cierre de brechas de rendimiento; c) el aumento de la eficiencia de los cultivos; d) los cambios de dietas; y e) la reducción de los desperdicios (Foley *et al.* 2011). A ello se le suma la preservación de las fuentes de energía y la prevención de nuevas emisiones de gases de efecto invernadero (Godfray *et al.* 2010).

## **Cambio climático y emisiones de gases de efecto invernadero**

Los impactos del cambio climático son un tópico “caliente” para aquellos interesados en la atmósfera, los océanos y las superficies terrestres, pero pocos científicos a nivel mundial están investigando la profundidad de los suelos para explorar posibles efectos sobre las aguas subterráneas. Existen evidencias inequívocas del calentamiento de la superficie terrestre a causa del aumento de la concentración de gases con efecto invernadero (GEI) en la atmósfera. Los suelos pueden ser vistos tanto como sujeto, como objeto de este cambio climático. El rol de sujeto se desempeña de dos formas: a) porque en los suelos se encuentra el principal almacén de carbono de la naturaleza; y b) porque desde los suelos son emitidos los principales GEI que son motivo de mayor preocupación por su poder calentamiento y tiempo de residencia en la atmósfera: el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) y el metano (CH<sub>4</sub>) (Snyder *et al.*, 2009; Smith *et al.*, 2013).

El CO<sub>2</sub> es considerado GEI cuando existen cambios de uso de la tierra (ej. deforestación, forestación, roturación de pastizales) que producen un desbalance entre las entradas y salidas de C del sistema.

El N<sub>2</sub>O es el principal GEI producido por suelos con manejo agrícola, a partir de transformaciones del N que entra anualmente a los suelos. Finalmente, las fuentes de emisiones de CH<sub>4</sub> que pasan por los suelos son las arrozceras inundadas, por un lado, y el derretimiento de *permafrosts*, que son suelos en climas fríos típicos de altas latitudes o alturas.

El rol de objeto se origina en que los suelos sufren los impactos del cambio climático, en particular los denominados extremos (ej. tormentas, huracanes, inundaciones, sequías, olas de calor, incendios) cuya frecuencia se ha incrementado en las últimas

décadas. Dado su imprevisibilidad, las consecuencias del cambio climático sobre los suelos no son fáciles de estimar, pues a menudo interaccionan con otros cambios antrópicos que suceden en forma coetánea (ej. agriculturización, pastoralismo, urbanización). Sin embargo, un criterio para valorar el riesgo es la posibilidad de recuperación posterior del deterioro producido. En ese sentido, pueden señalarse a la erosión hídrica y eólica, el deslizamiento de laderas de montañas, y la salinización y sodificación asociado con cambios en el régimen de aguas superficiales y profundas como los deterioros de más difícil reversibilidad que puede generar o agravar el cambio climático. Gran parte de las estrategias de adaptación a los impactos del cambio climático pasan por evitar o aminorar estos daños, a través de la adopción de prácticas conservacionistas de manejo de suelos, o incluso de la creación de áreas de reserva (ej. parques nacionales, reservas de flora y fauna, sitios Ramsar, etc.) donde se considera que son los servicios ambientales el principal bien para proteger.

Por un lado, la agricultura es particularmente vulnerable al cambio climático. Por otro lado, los suelos juegan un rol fundamental en el ciclo global del carbono. Dependiendo del tipo de uso y manejo, el suelo puede ser fuente de emisión o bien un sumidero de carbono. Además, el suelo y las formas en que este se utiliza producen la liberación de otros gases que también influyen en el efecto invernadero, tales como el metano y el óxido nitroso (Six *et al.*, 2004; Snyder *et al.*, 2009). Algunas de las consecuencias del cambio climático sobre los suelos no son fáciles de estimar; así por ejemplo, la pérdida de suelo está condicionada por la biomasa que reduce el impacto de la gota de lluvia; si bien la erosividad de las precipitaciones podría ser mayor, esta se vería contrarrestada por el incremento de la biomasa derivada de mayor humedad y temperatura.

Los países que adhieren al Procolo de Kyoto, como es el caso de la Argentina, están comprometidos a encarar opciones para mitigar las emisiones GEI. El desafío es cuánto puede mitigarse sin comprometer la seguridad alimentaria y las metas ambientales (Smith *et al.*, 2013).

## **Rol de la biorremediación en los suelos**

Existe consenso que en el futuro se requerirá un manejo agronómico más sofisticado de los suelos. Como se ha mencionado, existe en general una amplia brecha entre el potencial genético de los cultivos y el rendimiento real obtenido a campo, debido a limitaciones de clima, suelo y manejo (Aramburu Merlos *et al.*, 2015). Existe necesidad de evitar la separación existente entre la genética y el manejo, y hay también carencia de agrónomos entrenados.

Las mejores prácticas de manejo (MPM) no deberán ser específicas para regiones, sino diseñadas para campos específicos. Existe potencial para los avances en agricultura de precisión que permitirá a los productores utilizar técnicas de manejo sitio-específico, las cuales permitirán incrementar la productividad. La falta de uniformidad a través de los paisajes determina la necesidad de mejorar el manejo agronómico, cualquiera sea el nivel de tecnología utilizado (Steering Committee for Frontiers in Soil Science Research & National Research Council, 2009).

La biología del suelo es considerada internacionalmente un campo “frontera” en el avance de la ciencia. En la Argentina el área requiere mayor esfuerzo de investigación en cantidad y calidad, no solo en campos considerados de avanzada, como el conocimiento de la genómica de los microorganismos del suelo (Avarre *et al.*, 2007; Liles *et al.*, 2003), sino también en aplicaciones biotecnológicas, como la biorremediación de suelos contaminados, o la fijación de nitrógeno atmosférico. Se requiere saber el impacto de la intensificación de la agricultura sobre la biota de los suelos.

La Figura 6 propone un esquema conceptual donde se visualizan cuáles son los aportes esperados de la biología de suelos en el futuro. A partir de una mayor intensificación de las producciones, se espera un mayor aporte de nitrógeno por captación atmosférica, y mayor reciclado de nutrientes por mecanismos de biodisponibilidad. El probable o discutible agotamiento de los yacimientos de fósforo requerirá recurrir a fuentes de reciclado y de solubilización biológica del nutriente (Vance *et al.*, 2003; Dobb, 2004). En este sentido, se prevé que cada vez más suelos recibirán el aporte de residuos agrícolas, industriales y municipales, que el consabido riesgo de contaminación por elementos potencialmente tóxicos y patógenos (Edwards & Someshwar, 2000; Kashmanian *et al.*, 2000). La biorremediación tendrá un papel principal en la recuperación de tierras afectadas por contaminación difusa y puntual, por ejemplo por exceso de fertilizantes nitrogenados y fosforados, o por residuos de agroquímicos. El avance de la minería y de las urbanizaciones sobre tierras agrícolas requerirá la eliminación de elementos potencialmente tóxicos volcados a los suelos, como metales pesados o químicos orgánicos.



**Figura 6.** Rol de la biorremediación en los suelos.

En definitiva, la biología y la biorremediación tendrán un rol principal en la promoción de la prestación de servicios ecosistémicos por los suelos, sin duda una de las demandas del milenio (MEA, 2005).

## Conclusiones

El siglo 20, cuando ha nacido y desarrollado la Ciencia del Suelo, se ha caracterizado por una visión productivista de los suelos. A fines de ese siglo, se estancó el avance de la Ciencia del Suelo y se cerraron centros de investigación en muchos lugares del mundo.

Los inicios del siglo 21 coinciden con un resurgimiento de la Ciencia del Suelo, incluyendo ahora a los servicios ecosistémicos y el surgimiento de fuertes presiones de uso y en cambio climático.

La biología de suelos y la biorremediación aparecen como temas “frontera” en este resurgimiento de la ciencia del suelo.

Los suelos deben ser considerados recursos no renovables, más en el marco de las nuevas presiones a las que estarán sujetos en el futuro cercano.

## Bibliografía

Altieri, M.A. 2002. Review. Agroecology: the science of natural resource management for poor farmers in marginal environments. *Agriculture Ecosystem Environment* 93, 1–24.

American Council of Learned Societies. 1999. "Hugh Hammond Bennett." *American National Biography*. Volume 2. Nueva York. Oxford University Press, pp. 582-583. Disponible en: <http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/national/about/history/?cid=stelprdb1044395>.

Consultado 16 de septiembre de 2016

Aramburu Merlos, F.; Monzon, J.P.; Mercáu, J.L.; Taboada, M.A.; Andrade, F.H.; Hall, A.H.; Jobbagy, E.; Cassman, K.G.; Grassini, P. 2015. Potential for crop production increase in Argentina through closure of existing yield gaps. *Field Crops Research* 184, 145-154.

Avarre, J.C.; De Lajudie, P.; Béna, G. 2007. Hybridization of genomic DNA to microarrays: a challenge for the analysis of environmental samples. *Journal of Microbiological Methods* 69, 242-248.

Barrios, I. 1985. La Edafología: origen, desarrollo y conceptos. Vasconia: Cuadernos de historia-geografía, (5), 8, p. 113. Disponible en: [www.euskomedia.org/PDFAnlt/vasconia/vas05/05087114.pdf](http://www.euskomedia.org/PDFAnlt/vasconia/vas05/05087114.pdf). Consultado 16 de septiembre de 2016

Blum, W.E.H. 2002. The role of soils in sustaining society and the environment: realities and challenges for the 21st century. Plenary session. Keynote Lecture. 17.º World Congress on Soil Science, Bangkok, Tailandia.

Boletta, P.E.; Ravelo, A.C.; Planchuelo, A.M.; Grilli, M. 2006. Assessing deforestation in Argentine Chaco. *Forest Ecol. Manage.* 228: 108-114.

Bouma, J. 2009. Soils are back on the global agenda: Now what? *Geoderma* 150, 224-225.

Branca, G.; Lipper, L.; Mc Carthy, N.; Jolejole, MC. 2013. Food security, climate change and sustainable land management. A review. *Agronomy Sustainability Development* 33, 635-650.

Casas, R.R.; Albarracín, M.G. 2015 *El deterioro del suelo y del ambiente en la Argentina*. PROSA. Editorial FECIC, Buenos Aires. ISBN 978-950-9149-39-7.

Delucchi, M. 2012. A conceptual framework for estimating the climate impacts of land-use change due to energy crop programs. *Biomass and Bioenergy* 35, 2337-2360.

Dibb, D.W. 2004. ¿Nos quedaremos sin fósforo? *INPOFOS. Informaciones Agropecuarias* 22: 1-3.

Edwards, J.H.; Someshwar, A.V. 2000. Chemical, physical, and biological characteristics of agricultural and forest by-products for land application. pp. 1-62. En W. R. Bartels (ed). *Land application of agricultural, industrial, and municipal by-products*. N.º 6 in the SSSA Book Series. SSSA, Madison, WI.

FAO & ITPS. 2015. Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Technical Summary. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, Roma, Italia (ISBN 978-92-5-108960-6). p. 82.

Foley, J.A.; Ramankutty, N.; Brauman, K.A.; Cassidy, E.S.; Gerber, J.C.; Johnston, M.; Mueller, N.D.; O'Connell, Ch.; Ray, D.K.; West, P.C.; Balzer, Ch.; Bennett, E.M.; Carpenter, S.R.; Hill, J.; Monfreda, Ch.; Polasky, S.; Rockstrom, J.; Sheehan, J.; Siebert, S.; Timan, D.; Zake, D.P.M. 2011. Solutions for a cultivated planet. *Nature* 478, 337-342.

Godfray, H.Ch.J.; Beddington, J.R.; Crute, I.R.; Haddad, L.; Lawrence, D.; Muir, J.F.; Pretty, J.; Robinson, Sh.; Thomas, S.M.; Toulmin, C. 2010. Food security: The challenge of feeding 9 million people. *Nature* 327, 812-817.

Harrier, L.A.; Watson, C.A. 2003. The role of arbuscular mycorrhizal fungi in sustainable cropping systems. *Advances in Agronomy* 79, 185-225.

Hartemink, A.E. 2002. Soil science in tropical and temperate regions. *Advances in Agronomy* 77, 269-291.

Hartmann, Ch. 2006. Future of soil science. En: International Union of Soil Sciences (IUSS) (Ed.). *The Future of Soil Science*. CIP-Gegevens Koninklijke Bibliotheek, Den Haag, pp. 57-59.

International assessment of agricultural knowledge, science and technology for development (IAASTD). 2009. Synthesis report with executive summary: a synthesis of the global and sub-global IAASTD reports / edited by Beverly D. McIntyre. ISBN 978-1-59726-550-8.

Jenny, H. 1941. Factors of soil formation. A system of quantitative pedology. Dover Publications, Nueva York, p. 191.

Kashmanian, R.M.; Kluchinski, D.; Richard, T.L.; Walker, J.M. 2000. Quantities, characteristics, barriers, and incentives for use of organic municipal by-products. p. 127-167. En W. R. Bartels (ed). *Land application of agricultural, industrial, and municipal by-products*. N.º 6 in the SSSA Book Series. SSSA, Madison, WI.

Kay, B.D.; Angers, D.A. 2000. Soil structure. p. A-229-A276. En: M. E, Summer (Ed.) *Handbook of Soil Science*. CRC Press. Boca Raton-London.Nueva York-Washington DC.

Knowler, D; Bradshaw, B. 2007. Farmers' adoption of conservation agriculture: A review and synthesis of recent research. *Food Policy* 32: 25-48.

Lal, R. 1997. Residue management, conservation tillage and soil restoration for mitigating greenhouse effect by CO<sub>2</sub>-enrichment. *Soil and Tillage Research* 43, 81-107.

Lavado, R.S.; Taboada, M.A. 2009. The Argentinean Pampas: A key region with a negative nutrient balance and soil degradation needs better nutrient management and conservation programs to sustain its future viability as a world agresource. *Journal of Soil and Water Conservation* 65, 150A-153A.

Liles, M.R.; Manske, B.F.; Bintrim, S.B.; Handelsman, J.; Goodman, R.M. 2003. A census of rRNA genes and linked genomic sequences within a soil metagenomic library. *Applied Environmental Microbiology* 69, 2684-2691.

Malthus, T.R. 1798. *An essay on the principle of population*. Londres.

Mangan, M.E.; Fernández, A.L.; Van Roekel, R.J.; Kantar, M.B.; Kluver, R.V.III; Yost, M.A.; Ries, L. 2010. 21<sup>st</sup> Century agriculture: balancing productivity and conservation in a changing environment. Member Forum. CSA News. 16-19.

McBratney, A.; Field, D.J.; Koch, A. 2014. The dimensions of soil security. *Geoderma* 213, 203-213.

Millenium Ecosystem Assessment. 2005. Ecosystem and Human Well-Being: Wetlands and Water Synthesis. World Resources Institute, Washington, DC, p. 80.

Miyake, S.; Renouf, M.; Peterson, A.; McAlpine, C. Smith, C. 2012. Land-use and environmental pressures resulting from current and future bioenergy crop expansion: A review. *Journal of Rural Studies* 1-12.

Montanarella, L.; Pennock, D.J.; McKenzie, N.J.; Badraoui, M.; Chude, V.; Baptista, I.; Mamo, T.; Yemefack, M.; Singh Aulakh, M.; Yagi, K.; Young Hong, S.; Vijarnsorn, P.; Zhang, G.L.; Arrouays, D.; Black, H.; Krasilnikov, P.; Sobocká, J.; Alegre, J.; Henriquez, C.R.; Mendonça-Santos, M.L.; Taboada, M.; Espinosa-Victoria, D.; AlShankiti, A.; AlaviPanah, S.K.; Elsheikh, E.A.E.; Hempel, J.; Camps Arbestain, M.; Nachtergaele, F.; Vargas, R. 2016. World's soils are under threat, *SOIL*, 2, 79-82, doi:10.5194/soil-2-79-2016

Pimentel, D. 2012. World overpopulation. *Environmental Development Sustainability* 14, 151-152.

Pimentel, D.; Burgess, M. 2014. Biofuel production using food. *Environmental Development Sustainability* 16:1–3. DOI 10.1007/s10668-013-9505-6.

Pimentel, D.; Williamson, S. Alexander, C.E. 2008. Reducing energy inputs in the US food system. *Human Ecology* 36,459-471.

Pimentel, D.; Marklein, A.; Toth, M.A.; Karpoff, M.N.; Paul, G.S.; McCormack, R.; Kyriazis, J.; Krueger, T. 2009. Food Versus Biofuels: Environmental and Economic Costs. *Human Ecology* 37, 1–12. DOI 10.1007/s10745-009-9215-8

Sampedro, J. 2009. Norman Borlaug, el padre de la 'revolución verde'. *El País*. Disponible en: [http://elpais.com/diario/2009/09/14/necrologicas/1252879201\\_850215.html](http://elpais.com/diario/2009/09/14/necrologicas/1252879201_850215.html). Visitado el 25 de agosto de 2016.

Satorre, E.H. 2005. Cambios tecnológicos en la agricultura argentina actual. *Revista Ciencia Hoy* 15 n.º 87: 24-31.

Scherr, S.J. 1999. Soil Degradation. A Threat to Developing-Country Food Security by 2020? International Food Policy Research Institute. 2020 Vision. Food, Agriculture, and the Environment. Discussion Paper 27, p. 63.

Science. 2004. Soils-The Final Frontier, special issue of *Science*, vol. 304, 11 junio.

Smith, P.; Haberl, H.; Popp, A.; Erb, K-H.; Lauk, Ch.; Harper, R.; Tubiello, F.N.; De Siqueira Pinto, A.; Jafari, M.; Sohi, S.; Masera, O.; Böttcher, H.; Berndes, G.; Bustamante, M.; Ahammad, H.; Clark, H.; Dong, E.A.; Elsidig, E.A.; Mbow, Ch.; Ravindranath, N.H.; Rice, Ch.W.; Robledo Abad, C.; Romanovskaya, A.; Sperling, F.; Herrero, M.; House, J.I.; Rose, S. 2013. Invited Review: How much land-based greenhouse gas mitigation can be achieved without compromising food security and environmental goals? *Global Change Biology* 19, 2285–2302.

- Snyder, C.S.; Bruulsema, T.W.; Jensen, T.; Fixen, P. 2009. Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects. *Agriculture Ecosystems and Environment*. 133:247-266.
- Steering Committee for Frontiers in Soil Science Research, National Research Council. 2009. *Frontiers in Soil Science Research: Report of a Workshop*. National Academy of Sciences. The National Academies Press. Washington, DC. ISBN: 0-309-13892-2, p.80. Disponible en: <http://www.nap.edu/catalog/12666.html>. 02 de Marzo de 2016.
- Thorp, J.; Smith, G.D. 1949. Higher categories of soil classification: Order, Suborder and Great Soil Groups. *Soil Science* 67, 117-126.
- Tilman, D.; Cassman, K.G.; Matson, P.A.; Naylor, R.; Polasky, S. 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature* 418, 671-677.
- Vance, C.P.; Uhde-Stone, C.; Allan, D.L. 2003. Tansley review: Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. *New Phytologist* 157: 423-447.
- Viglizzo, E.F.; Frank, F.C. 2006. Land-use options for Del Plata Basin in South America: Tradeoffs analysis based on ecosystem service provision. *Ecol. Econ.* 57: 140-151.
- Viglizzo, E.F.; Jobbágy, E. 2010. Expansión de la frontera agropecuaria en Argentina y su impacto ecológico-ambiental. Ediciones INTA. Buenos Aires.
- Wood, S.; Sebastian, K. Scherr, S.J. 2000. *Pilot Analysis of Global Ecosystems: Agroecosystems*, International Food Policy Research Institute and World Resources Institute, Washington, DC.