EL HORIZONTE DEL SUELO

THE HORIZON OF THE SOIL

Segundo Urquiaga[1], Claudia P. Jantalia[1], Walter Luzio L.[2], Bruno J. R. Alves[1], Robert M. Boddey[1].

E-mail: urquiaga@cnpab.embrapa.br
[1]Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, EMBRAPA-Agrobiología. Cx. Postal 74.505, CEP 23.851-970, Seropédica, RJ, Brasil. Telf. ++55-51-2682 1500. Fax ++55-21-2682 1230
[2]Universidad de Chile. E-mail: wluzio@uchile.cl

Key words: soil degradation, soil fertility, soil management, food production, agricultural frontier, global warming, sustainability

Abstract

Soil and water together comprise the natural resource base for food production for the world´s population. For this reason the conservation of these finite resources is essential to maintain or improve the global food supply.. However, since the beginning of large scale agriculture these resources have been undervalued, being seen as infinite in terms of both quantity and quality. Consequently, overexploitation has contributed to degradation and/ or losses that are now reflected in a loss of productive capacity. Soil degradation has contributed significantly to global warming, mainly through the emission of large quantities of CO^2 to the atmosphere, but now this environmental effect is acting indirectly against the expansion of the agricultural frontier to the detriment of the poorest small land areas. As a result of the increasing incidence of drought and losses of soil fertility, hunger in the World is increasing and today affects around 1 billion people, and could become significantly worse in the middle term. Under traditional soil management practices, the degraded soils cannot produce enough food to meet demand. Therefore, a new approach is required for the management of the 10% of the world´s land that is used for food production, , Studies must be carried out to develop new soil management techniques to optimize its productive capability, in perfect harmony with the other components of the agricultural system, giving special attention to replenishment of soil nutrients and plant adaptation to biotic and abiotic stresses.

Palabras clave: degradación de suelos, fertilidad de suelos, hambre, frontera agrícola, calentamiento global, manejo de suelos, sustentabilidad

Resumen

El suelo, junto con el agua, son los principales factores relacionados con la producción de alimentos que dispone la humanidad. Por eso es necesario conservarlo y mejorarlo. No obstante esto, el hombre desde el inicio de la agricultura nunca le dio su verdadero valor, pues lo consideró inacabable en su extensión y fertilidad, y por su inadecuado uso contribuyó a su degradación y/o a su pérdida, que se refleja en la disminución significativa de su capacidad productiva. La degradación de los suelos contribuyen emitiendo gases de efecto invernadero para el calentamiento global, y hoy en día esta problemática se está volcando contra las necesidades de expansión de la frontera agrícola a las pocas áreas potenciales restantes. Como los problemas frecuentes de sequía, y empobrecimiento del suelo, el hambre que ya afecta a cerca de 1 Ghab. de la población mundial podrá empeorar significativamente. Bajo el manejo tradicional, los suelos empobrecidos ya no atienden más la demanda de la producción de los alimentos necesarios. Por ello, el Horizonte del suelo, limitado a sólo 10% de la tierra del planeta, los estudios caminarán para el desarrollo de tecnologías que permitan optimizar su manejo, en perfecta armonía con los otros componentes de la producción agrícola.

Introducción

El suelo junto con el agua es uno de los recursos naturales que más ha influido y continua influyendo en el desarrollo de la humanidad. Hoy en día se puede decir que el desarrollo de los pueblos esta directamente relacionado con la riqueza de sus suelos y la disponibilidad de agua. No existen pueblos desarrollados en suelos pobres, mas tampoco podemos quedarnos aceptando esta generalidad pues para eso está la tecnología que nos permite optimizar los factores más favorables controlando el impacto negativo de los factores más desfavorables, ya sea para la producción de alimentos como para el propio bienestar de la humanidad.

Con el crecimiento de la población mundial se ha incrementado también el área cultivada, avanzando para las áreas con suelos cada vez mas pobres, inclusive marginales, aumentando la deforestación y degradación de tierras (erosión, acidificación, salinidad, desertificación, entre otros), afectando el medio ambiente. El Panel Internacional de Cambios Climáticos del globo (IPCC) considera que la agricultura viene contribuyendo con 20% para el cambio climático global (CCG). Se debe destacar también que el CCG esta dificultando cada vez más la agricultura, para lo cual esfuerzos intensos vienen siendo realizados visando el desarrollo de técnicas que permitan una agricultura sostenible.

Con relación al tema propuesto para desarrollar sobre El Horizonte del suelo, en este prestigioso Congreso, entendiendo el tema dentro del contexto de la extensión y futuro del recurso suelo agrícola. En esta oportunidad se hará un análisis de los principales factores relacionados con su extensión, uso, manejo, pérdidas, degradación y recuperación, y posibilidades de expansión, considerando el suelo como uno de los principales recursos naturales disponibles para la producción de alimentos de la humanidad, destacándose que justamente el crecimiento de la población ha causado y continua causando una fuerte presión sobre el destino del recurso suelo.

Inicio de la Agricultura.

Se considera que al inicio de la humanidad, cuando el hombre vivía de la caza hasta llegar a organizarse en sociedad había abundante disponibilidad de alimentos. El paso mayor que dio el hombre fue cuando aprendió a sembrar y cosechar, y a domesticar y criar los animales de su interés, dejando de ser nómada a vivir en sociedad. Esto significó el invento o descubrimiento de la

agricultura, lo cual es considerado como uno de principales pasos del hombre para el desarrollo de la humanidad, tan importante como el manejo del fuego y el desarrollo del lenguaje (Roberts, 1993).

Diferentes partes del mundo alcanzaron la agricultura a diferentes tiempos. Los más viejos rastros de plantas cultivadas datan de 10 mil años antes de Cristo y han sido encontrados en el Sud-Este Asiático, y han sido formas antiguas de mijo y arroz, siendo ambos cultivos todavía muy importantes en la región. Cerca de 8 mil años más tarde el hombre Centroamericano y Sud Americano aprendieron a cultivar variedades primitivas de papa y maíz. Mucho más es conocido, sin embargo, los estadios iniciales de la agricultura del cercano Oriente, donde cerca de 9 mil años antes de Cristo muchos de los cultivos de cereales de grano que aún utilizamos, como trigo y cebada salvajes y otras gramíneas, fueron ampliamente difundidos, no solo dentro de la región sino hasta el Sud-Este europeo y dentro del valle del río Nilo. Siete mil años antes de Cristo, las primeras plantaciones y cultivos empezaron en la antigua Mesopotania, y de allí las técnicas agrícolas rápidamente se difundieron para el resto de Europa y las Islas Británicas. Desde la antigüedad hasta nuestros días la dificultad en la comunicación ha contribuido a la baja difusión de las técnicas agrícolas. Actualmente, por ejemplo, sea por razones económicas o no, hay muchos agricultores cuya herramienta agrícola principal es el azadón, cuando no sus propias manos, y en estas circunstancias reina la pobreza y la desnutrición, comparado con los agricultores altamente tecnificados, donde una sola familia puede manejar hasta 200 hectáreas (Arthus-Bertrand, 2004).

El sistema más primitivo de la agricultura fue la migratoria basado en la deforestación y la quema. Las áreas de florestas inicialmente utilizadas poseían suelos fértiles y ricos en materia orgánica. Los cultivos eran sembrados entre los troncos y raíces de los árboles. Luego de algunos años el suelo quedaba empobrecido y la agricultura se mudaba para otra área. Esto fue por mucho tiempo la agricultura que podía ser practicada, pero con el pasar del tiempo los agricultores aprendieron a labrar la tierra y así consiguieron cultivar la misma área por varios años, lo cual contribuyó para la vida del hombre en sociedad (Roberts, 1993). De esta forma, desde su inicio, la agricultura afectó la biodiversidad, promoviendo la multiplicación y preservación de las especies de interés, y con la quema comenzó a contribuir para las emisiones de CO_2 para la atmósfera, el inicio del calentamiento global.

Con el dominio de variedades seleccionadas por sus características favorables, por ser más productivas por ejemplo, hubo aumento en la disponibilidad de alimentos. Esto fue el gran salto de la agricultura que trajo un marcado aumento en la disponibilidad de alimentos después de la caza. Mayor disponibilidad de alimentos trajo consigo aumento en la población lo que a su vez indujo a una mayor demanda de alimentos. Un círculo vicioso. El hombre no era más que un miembro de la biodiversidad, con comportamiento más animal que racional, y al inicio seguramente el hombre ni siquiera sabía de la importancia del recurso suelo en la forma como hoy lo valorizamos. Con el pasar del tiempo, los grupos de vidas se organizaron y se inició la civilización, cuando ya el suelo comenzó a ser valorizado, tal como quedó demostrado por los terrazas Mayas, Incas y Aztecas, nuestros antepasados más cercanos.

Crecimiento poblacional y demanda de alimentos.

Siendo el suelo uno de los principales factores relacionados con la producción de alimentos, su Horizonte, en el contexto de este trabajo, sólo podrá ser adecuadamente comprendido teniendo en cuenta la demanda por alimentos para atender el crecimiento poblacional de las diferentes regiones y del mundo como un todo.

En el espacio de último siglo el pobla-

ción del planeta se ha transformado marcadamente. En la época romana, en el mundo existían cerca de 250 Mhab., 15 siglos más tarde, en el Renacimiento, la población ultrapasó los 500 Mhab. Fueron necesarios 15 siglos para doblar la población. Alrededor del año 1810 la población alcanzó 1Ghab. En 1930, 2 mil Mhab. y en 1975, 4 mil Mhab. Actualmente somos alrededor 6 mil Mhab.. Según las tasas de crecimiento actual (1.2% por año), la población se puede doblar a cada 55 años, mas las NNUU consideran que la población mundial podrá estabilizarse por alrededor de 8 mil Mhab. dentro de 50 años. La desaceleración del crecimiento está asociada más a los programas de control de la natalidad (Arthus-Bertrand, 2004). En la actualidad se considera que alrededor de 900 Mhab., equivalente a 14% de la población mundial, sufren de mal nutrición, la mayoría en Asia, pero la región del Sub-Sahara es donde el hambre prevalece sobre el 30%, y donde el número absoluto de mal nutridos aumenta a cada año (FAO, 2004).

La seguridad alimentaria es definida como la situación «Cuando toda la población, dispone todo el tiempo de acceso físico y económico a suficiente, seguro y nutritivo alimento, para reunir su dieta necesaria y referencia alimenticia para una vida activa y saludable» (FAO, 2003). En rigor este concepto es bastante complejo y muchas veces difícil de ser atendido, siendo que, como pasa en África, gran parte de la mal nutrición y hambre están más relacionadas con pobreza y desigualdad en el acceso a los alimentos (FAO, 1993, Matson *et al.*, 1997), asunto que no será tratado en este trabajo. De todas formas, parece una paradoja que justamente la población que tiene más contacto con el suelo o agricultura sea la que más sufre por hambre. Cerca de 50% de la población del mundo con hambre está en las familias de los pequeños agricultores, 20% con los sin tierra, 10% pastores, pescadores y habitantes de la floresta, y 20% es urbana. De todos ellos, 75% se encuentran en Äfrica (Arthus-Bertrand, 2004).

La importancia de las causas del hambre varía entre regiones, y se resume en lo siguiente:

a) Los bajos rendimientos agrícolas parece ser la causa principal en África tropical, y áreas remotas de Asia, América Latina y el Caribe.

b) Pobreza y desempleo son las principales causas en la mayoría del Sur y Sud-Este de Asia, América Latina, Asia Central y Oriente medio.

Adicionalmente se debe desatacar que las enfermedades endémicas como SIDA y malaria también contribuyen para disminuir las fuerzas para el trabajo y para la mal nutrición (Sanchez & Swaminathan, 2005, Stocking, 2003)

Hay un consenso que la investigación agrícola es el mejor camino para reducir el hambre en el mundo.

Los suelos agrícolas. Presente y futuro.

A continuación se hace un análisis sobre El Horizonte del Suelo, o mejor de dicho hasta donde podemos contar con la tierra disponible para uso en la agricultura, así como sobre los factores principales que afectan su capacidad productiva.

Por su extensión los principales suelos del mundo son los Aridisoles, Inceptisoles, Alfisoles, Entisoles, Oxisoles y Ultisoles, los cuales suman 81% del área de la tierra (Cuadro 1, Lal, 1997). Los suelos agrícolamente más productivos y de alta fertilidad son los Inceptisoles, Entisoles, Molisoles, Histosoles y Andisoles que constituyen 33% de los suelos del mundo, los cuales están localizados justamente en las regiones templadas, en las áreas de dominio de los países desarrollados. Sin duda que esta riqueza debe haber influído también en el desarrollo de estos países. Ahora, en las regiones tropicales, donde está localizada la mayoría de los países en desarrollo, los suelos son generalmente pobres como los

Oxisoles, Ultisoles y Andisoles. Es importante destacar que de acuerdo con el Cuadro 2, son justamente los suelos más pobres que actualmente vienen alimentando o tratando de alimentar a mas de 80% de la población del mundo. Por eso, el desafío mayor por ahora, y que se mantendrá por mucho tiempo, será el desarrollo tecnológico para el establecimiento de una agricultura productiva y sustentable, en equilibrio con el medio ambiente.

Cuadro 1. Distribución de los suelos según la Órden en las regiones tropical y templada del mundo[a].

Orden	Área en el mundo		Área tropical		Área templada	
	Mha	%	Mha	%	Mha	%
Alfisoles	1828.3	13.5	641.1	35.1	1187.2	64.9
Andisoles	255.2	1.9	168.3	65.9	86.9	34.1
Aridisoles	3174.3	23.5	911.7	28.7	2262.6	71.3
Entisoles	1492.1	11.0	325.6	21.8	1166.5	78.2
Histosoles	174.5	1.3	28.6	16.4	145.90	83.6
Inceptisoles	2158.0	16.0	456.5	21.2	1701.5	78.8
Mollisoles	548.0	4.1	23.4	4.3	524.6	95.7
Oxisoles	1177.2	8.7	1151.2	97.8	26.0	2.2
Spodosoles	487.8	3.6	4.0	0.8	483.8	99.2
Ultisoles	1133.0	8.4	901.8	79.6	231.2	20.4
Vertisoles	328.7	2.4	218.9	66.6	109.8	33.4
Otros	764.4	5.6	135.8	17.8	628.6	82.2
Total	13,521.5	100.0	4966.9		8554.6	

[a]Adaptado de Lal, 1997.

Cuadro 2. Distribución de las tierras arables en uso y la población por regiones en el mundo (Calculado de FAO, 1993 y Arthus-Bertrand, 2004)

Región	Tierra arable		Población	
	Mha	%	Mhab.	%
África	163.6	12.1	863.8	14
América del Norte y Central	264.4	19.6	308.5	5
América del Sur	96.8	7.2	617.0	10
Asia (sin ex - URSS)	424.8	31.4	3578.6	58
Europa (sin ex - URSS)	122.6	9.1	493.6	8
Oceanía	51.6	3.8	61.7	1
URSS (sin Asia y Europa)	227.5	16.8	246.8	4
Mundo	1351.3	100.0	6170	100.0

Hasta hace apenas 40 años, para atender la creciente demanda de la producción de alimentos agrícolas del mundo dos grandes estrategias eran aplicadas; la expansión de la frontera agrícola y la tecnificación, esta última basada en el mejoramiento genético de los cultivos y en la aplicación de fertilizantes, proceso conocido como Revolución verde como se tratará más adelante. En lo que respecta a la expansión agrícola, se debe mencionar que el área actualmente cultivada en el mundo equivale a aproximadamente un décimo de toda la tierra del planeta (1351 Mha), lo cual no significa que se dispone todavía de mucha tierra para ser incorporada a la agricultura. Contra esto se tiene principalmente el factor ambiental, que como se verá más adelante, el hombre ha superado el límite de la deforestación o de la degradación del suelo y medio ambiente, que ahora se está volviéndose contra el propio progreso de la agricultura.

De acuerdo con las informaciones del Cuadro 3, la mayoría de las oportunidades para abrir nuevas áreas agrícolas para cultivos anuales ya han sido agotadas, lo cual es especialmente correcto para las áreas densamente pobladas de Asia y Europa. Solamente en las regiones del Sub-Sahara y América del sur existen inmensas áreas inexploradas, siendo que sólo algunas de estas tierras serían eventualmente incorporadas a la agricultura. Se debe destacar también que en la populosa Asia, hogar de mitad de la población del mundo, existe muy poca área con potencial de ser incorporada para la producción de cultivos anuales. Justamente, el sur de Asia, particularmente en el Sud-Oeste, alrededor de 21 Mha bajo cultivo no deberían estar siendo explotadas, pues por ser muy áridas o por su inadecuada topografía son muy vulnerables para ser degradadas o perdidas por erosión (Borlaug & Dowswell, 1994).

Cuadro 3. Potencial de tierras agrícolas (Mha) en los países en vías de desarrollo[a].

Área	África	Asia			América		Total
		Sud-Oeste	Sud-Este	Central	Sur	Central	
Potencial cultivable	789	48	297	127	819	75	2155
Bajo cultivo	168	69	274	113	124	36	784
No cultivado	621	0	23	14	695	39	1392
% de la región	79	0	8	11	85	52	
% de todas las regiones	29	0	1	0.5	32	2	65

[a]Adaptado de Borlaug & Dowswell (1994).

Al final de los años 60, cuando se consideraba que la frontera agrícola del mundo había llegado prácticamente a su fin, en América del Sur se descubre que los suelos del Bioma Cerrados localizados en la parte central de Brasil, tenían buenas posibilidades de ser incorporados a la agricultura, se abrió la posibilidad de una nueva frontera agrícola, con posibilidad de ser expandida para más de 20Mha. Hoy en día esto es una realidad. Los suelos del Cerrado, en su mayoría Oxisoles y Ultisoles, son extremamente ácidos, con altos contenidos de aluminio, muy pobres en nutrientes, pero con topografía plana y de muy buena estructura y drenaje. La vegetación natural varía desde inmensas áreas con pasturas (de baja calidad forrajera) hasta áreas con vegetación arbórea densa. Del total del área de esta frontera agrícola, cerca de 50% son consideradas «arables», o mejor dicho cerca de 100 Mha son adecuadas para la producción de cultivos anuales y el restante para pasturas y otros cultivos perennes. Todo esto fue posible principalmente gracias a resultados relevantes de intensos trabajos de investigación en manejo de suelos (encalado, fertilización, etc.) y cultivos (selección de variedades, etc.), y más recientemente se incluyó también sistemas de labranza conservacionistas (Siembra directa). Actualmente más de 45% de la producción de granos del país, equivalente a 49 Tg provienen de esta región, producida en apenas 17.8 Mha de suelos del Cerrado (Cuadro 4), restando todavía 83 Mha para ser explotada en la producción de cultivos anuales. Justamente por el Bioma Cerrados, América Latina permanece como el líder mundial en área potencialmente cultivable, o mejor dicho, el horizonte en la disponibilidad de suelos agrícolas en la región todavía es grande.

Cuadro 4. Área cultivada y producción de los principales cultivos del Cerrado[a].

	Cerrado		Brasil		% Contribución del
	Área (10^3 ha)	**Producción** (Gg)	Área (10^3 ha)	Producción (Gg)	Cerrado en la **Producción Nacional**
Arroz	1,368	3,504	3,961	13,200	27
Café	778	753	2,319	2,160	35
Frijol	504	783	3,757	3,034	26
Maíz	3,131	12,312	11,479	35,614	35
Trigo	105	212	2,460	5,164	4
Soja	11,984	31,587	22,835	50,966	62
Total	17,870	49,151	46,811	110,138	45

[a]Fuente: Instituto Brasilero de Geografia y Estadística (IBGE), (www.sidra.ibge.gov.br, 02/08/2005)

Otra posibilidad de expansión de la frontera agrícola en el mundo sería la explotación de las inmensas áreas que corresponde a los Aridisoles, que ayudaría mucho al Sud-Sahara, a través de la irrigación tal como se desarrolló en gran intensidad en Israel y en pequeñas áreas de diversas regiones semiáridas del mundo. En el siglo pasado las zonas irrigadas del mundo se multiplicaron por 7, especialmente en India, China, Oriente medio, Perú y Brasil, entre otras. Las irrigaciones consumen actualmente 70% del agua dulce utilizada en el mundo, debido a las grandes demandas de la agricultura. Son necesarios 1,500 toneladas de agua por cada tonelada de granos de trigo producido, y el triple para una tonelada de arroz. En varios países en desarrollo, donde la irrigación es vital, las superficies irrigadas absorben casi la totalidad del consumo de agua. A pesar de las ventajas de la irrigación, en que 16% de las tierras agrícolas responden por 40% de la producción agrícola mundial (Arthus-Bertrand, 2004), hoy en día no es fácil su extensión debido a la limitación de agua dulce disponible, a no ser a través de sistemas súper eficientes como la fertirrigación y la agricultura de precisión.

Se debe destacar también que la práctica de la irrigación agrícola no siempre es adecuadamente aplicada, y por eso es generalmente la causa principal de la salinización de los suelos. Se estima que 60 Mha del área agrícola irrigada del mundo, de las cuales 75% se sitúan en Asia, estén siendo perdidas por salinidad o mal drenaje (Arthus-Bertrand, 2004). Un ejemplo desastroso sobre el inadecuado uso del agua dulce, y que afecta el medio ambiente se tiene en el mar de Aral, en Casaquistán, que era el cuarto mayor lago del mundo, con una superficie de 66,500 km2, pero después de la construcción en los años 60 de una vasta red de irrigación, especialmente destinada al cultivo de algodón en la región, el caudal de los ríos Amou Daria y Syr Daria que abastecían el mar de Aral bajaron a niveles preocupantes, el lago perdió 50% de su superficie, 75% de su volumen de agua, y lo que está restando son inmensas áreas salinas(Arthus-Bertrand, 2004). Por lo mencionado anteriormente, el problema de la salinización y mal drenaje de los suelos es hoy como el cáncer que está minando y llevando a la pérdida de inmensas áreas productivas del mundo. En América Latina, en Perú por ejemplo, es fácil observar como el mal drenaje y la salinidad está llevando inmensas áreas de influencia de las irrigaciones a ser perdidos o a disminuir significativamente su capacidad productiva, fenómeno que va justo contra la manutención y expansión de la frontera agrícola.

Por otro lado, lo que se observa hoy en día es que inmensas áreas de la amazonía vienen siendo deforestadas irresponsablemente, con la justificación de expandir la frontera agrícola , pero en este caso el problema está más asociado por presión de la economía global empujando a los agricultores a nuevas áreas visando compensar el empobrecimiento de los suelos de las áreas intensamente manejadas (Arthus-Bertrand, 2004).

Al mismo tiempo que la preocupación por la alimentación de la población mundial también crece la preocupación por el cambio climático global

Desarrollo agrícola y medio ambiente. Calentamiento global.

La expansión de las tierras agrícolas es ampliamente reconocida como una de las significativas alteraciones humanas del ambiente terrestre. El área total de tierra cultivada en el mundo se incrementó en 466% desde el año 1700 al año 1980 (Matson *et al.*, 1997). En cuanto la tasa de expansión, ésta ha disminuido en la últimas 3 décadas, el rendimiento de los cultivos ha aumentado significativamente, por encima de la tasa de crecimiento de la población mundial (Grigg, 1993 y Matson *et al.*, 1997). Esto ha ocurrido gracias al desarrollo científico y tecnológico basado ampliamente en la intensificación del manejo de la tierra actualmente en explotación, acompañado por el

uso de variedades de alto rendimiento, fertilizantes químicos y pesticidas, irrigación y mecanización (Matson *et al.*, 1997).

Desafortunadamente, la antigua práctica de la deforestación todavía se aplica intensamente en las áreas tropicales del mundo y equivale a 15.2 Mha/año, lo cual no se realiza para aumentar la producción de alimentos para las poblaciones locales sino para producir básicamente cereales destinados para la alimentación, a bajo costo, el ganado o animales de los países desarrollados (Arthus-Bertrand, 2004). Como es sabido, tanto la deforestación como la actividad agrícola extensiva, que domina en los países en desarrollo, han sido consideradas como las principales causas de la degradación de los suelos y el deterioro ambiental de significativas extensiones de tierra del planeta. Dentro de esto se destaca la práctica de explotar los nutrientes del suelo con nula o mínima reposición a través de la fertilización y prácticas apropiadas de manejo como la rotación de cultivos. En la mayoría de los países en desarrollo los productos agrícolas son producidos a expensas del empobrecimiento (degradación) de los suelos. Un buen ejemplo lo constituye la explotación de los suelos de la pampa argentina, donde los suelos vienen perdiendo significativas cantidades de materia orgánica (Días-Zorita *et al.*, 2002; García, 1999). De esta forma, los agricultores al ver sus tierras produciendo menos caminan para la deforestación en busca de suelos más fértiles, cada vez más escasos (Urquiaga *et al*, 2004).

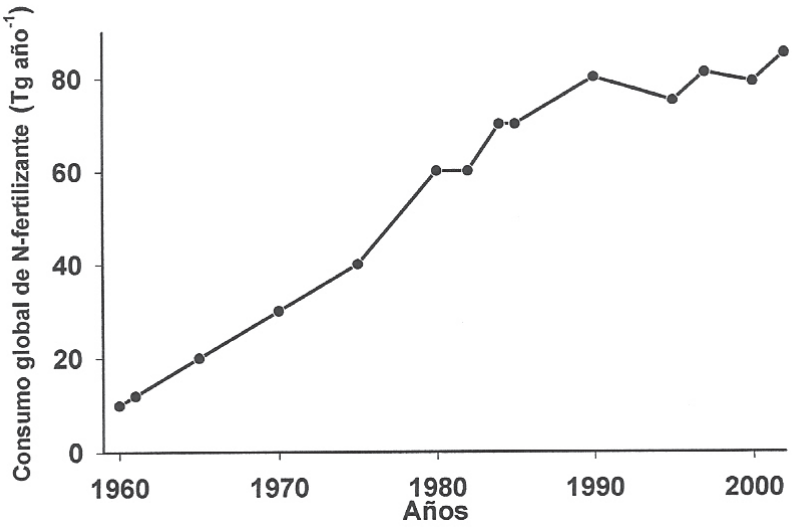

Figura 1. Consumo global anual de N-fertilizante de 1960 a 2002.

En los países en desarrollo, la intensificación de la agricultura se centró basada en la «Revolución verde» que empezó al inicio de los años 60 con la obtención y diseminación de variedades de cereales de altos rendimientos, que respondían fuertemente a la aplicación de fertilizantes (Matson *et al.*, 1997). Gracias a la Revolución verde fue posible eliminar el hambre en las numerosas poblaciones del Sur y Este de Asia, que rápidamente pasaron a ser autosuficientes en su alimentación básica (Borlaug & Dowswell, 1994).

Con la Revolución verde, el significativo incremento en la producción de alimentos desde 1960, fue acompañado por el consumo marcado de N-fertilizante, que pasó de 10 Tg en 1960 para más de 80 Tg en 1990 (Figura 1, Matson *et al.*, 1997). La preocupación ha ido en aumento especialmente acerca de la sustentabilidad y consecuen-

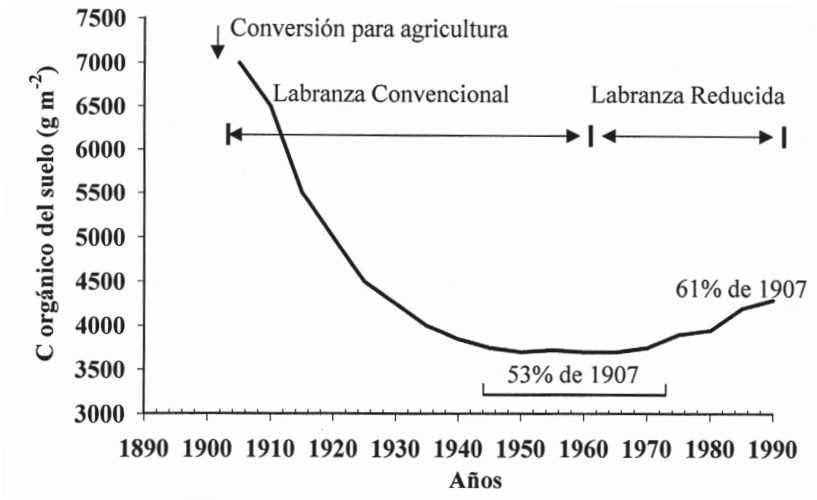

Figura 2. Variación simulada del contenido de C orgánico del suelo (0-20cm) en la región productora de maíz de EUA teniendo como referencia el año de 1907. In fluencia de la labranza convencional (LC) y labranza reducida). Adaptado de Matson et al. (1997)

cias ambientales debido a la intensificación de los sistemas agrícolas.

Existe un nexo entre cambios climáticos, seguridad alimentaria, fertilidad del suelo y otras prácticas agrícolas. Se debe destacar que está científicamente comprobado que los cambios climáticos están fuertemente asociados con el desarrollo de la humanidad. De esta forma es predecible que África será la región más vulnerable, siendo por ello esencial realizar estudios visando optimizar aspectos de adaptación y mitigación del CCG (Sanchez & Parry, 2001).

La pérdida de la materia orgánica del suelo (MOS), que conlleva al aumento de las emisiones de CO_2 y otros gases de efecto invernadero (GEI) para la atmósfera, debido a la conversión de ecosistemas naturales para la agricultura permanente, es uno de los principales temas intensamente estudiados hoy en día. En las zonas agrícolas templadas la perdida de la MOS de la capa arable fue rápida en los primeros 25 años, con pérdidas de 50% del C original (Figura 2). En los trópicos tales pérdidas pueden ocurrir en 5 años después de la conversión de la floresta nativa en cultivo anual de soja bajo labranza convencional (Silva *et al,* 1994).

Por otro lado, se debe destacar también que la agricultura de altos rendimientos es dependiente del uso de fertilizantes, especialmente N sintético producido a través de proceso industrial consumiendo energía fósil y emitiendo GEI, y secundariamente P el cual es obtenido de minas o depósitos de roca fosfórica. Una razonable estimativa es que el N-fertilizante recuperado por los cultivos varía de 40 a 60% (Paustian *et al*., 1992 y Urquiaga & 2000) y el restante permanece en el suelo o es perdido del sistema. Por eso el uso de fertilizantes tienen también importante impacto ambiental a nivel local, regional o global (Matson *et al*, 1997). Para evitar o reducir la degradación ambiental por el uso de N-fertilizante, especial atención se debe dar al aumento de la eficiencia de recuperación del nutriente por los cultivos, lo cual se consigue a través de la aplicación racional y sincronizada de los fertilizantes en función de la demanda por la planta, dentro del contexto de la agricultura de precisión.

Las relaciones del hombre con su medio ambiente son complejas. Un pastor de ganado que sobrecarga la capacidad de carga animal en la región del Sahel puede causar mucho más daño favoreciendo el avance del

desierto que centenas de habitantes por km2 viviendo en los arrozales de Java o en las Filipinas, en frágil equilibrio con la naturaleza. O sea no siempre una gran población contamina o degrada más el ambiente (Arthus-Bertrand, 2004). De cualquier manera, el IPCC considera que la agricultura responde por cerca de 25% del calentamiento global, lo cual debe ser minimizado.

Por otro lado es importante destacar también que los Centros del CGIAR han determinado que, a pesar de todo, los aumentos en la productividad de alimentos en los últimos 30 años causados por la tecnología agrícola, han contribuido ventajosamente para atenuar o retrazar el impacto del crecimiento de la agricultura en las emisiones de CO_2 atmosférico por 5 años, lo cual ya es algo para afrentar este problema (Sanchez & Parry, 2001).

El calentamiento global y su efecto en la agricultura: Impacto en la producción de alimentos.

No obstante que la disminución de la tasa de emisión de CO_2 por el suelo o sistemas agrícolas es ventajosa, el futuro todavía continua muy preocupante. Como consecuencia del calentamiento global ha aumentado la esterilidad de granos de cereales. El IRRI ha demostrado que por cada grado Celsius de aumento en la temperatura media máxima del aire, el rendimiento de arroz disminuye 16% debido a la esterilidad de los granos. Si estas informaciones se analizan teniendo en cuenta los datos del IPCC sobre proyecciones del calentamiento global, se espera que la producción de alimentos del mundo disminuya de 5 a 11% por el año 2020 y de 11 a 46% por el año 2050. En ese sentido, cuando la Comisión Europea para el Desarrollo indica que el calentamiento global puede neutralizar el avance obtenido en la seguridad alimentaria del planeta, parece correcta, se refuerza así mismo, que actualmente el mejor camino para contrarrestar el problema es obviamente la investigación agrícola (Sanchez & Parry, 2001)

Se espera que la temperatura para los próximos 100 años debe aumentar entre 1.4 y 5.5 grados Celsius, y el mundo al ser más caliente resultará también en ser más húmedo. Durante el calentamiento global, se espera que el interior de los mayores continentes se calienten más rápidamente que los océanos. Así, algunas de las áreas del interior de los continentes serán peores en cuanto a la pobreza, hambre e inseguridad alimentaria (Sanchez & Parry, 2001). Debido a todo esto, es esperado que por el calentamiento global se observen cambios en la distribución de las lluvias, como ya se está sintiendo en diversas áreas del planeta. Las áreas donde habrá menos lluvias son las regiones semi-áridas de África, Sur de Asia, Oriente medio, América Central, Sur de EUA y partes de América Latina. Así mismo, las áreas más húmedo serán, por ejemplo, la región de los monzones del Sur de Asia, donde los monzones se intensificarán, y las áreas semi-áridas tenderán a ser más secas debido a la combinación del incremento de la evapotranspiración y disminución de las lluvias. En América del Sur las áreas más secas y más húmedas estarán mezcladas (Sanchez & Parry, 2001). Sin duda que todo esto afectará la capacidad productiva de los suelos, siendo que todo indica que las áreas ya afectadas por la pobreza y donde los suelos son justamente más pobres serán las más seriamente afectadas.

Emisiones no estabilizadas de CO_2 por el año 2080 dejarán cerca de 60 Mhab. con riesgo de hambre, en cuanto que un esfuerzo para reducir aún 20 veces las emisiones de CO_2 del protocolo de Kyoto dejará 43 Mhab. con riesgo de hambre, sólo 26 Mhab. menos. Así, la mitigación no tiene un marcado impacto para disminuir el hambre en el mundo debido a dos razones muy importantes: Se ha demorado mucho para iniciar la mitigación, y durante mucho tiempo, más de 200 a 300 años se han emitido substanciales cantidades de CO_2, sin dejar de considerar que hay todavía mucho CO_2 almacenado en los océanos que continuará siendo emitido a la atmósfera. Además, se

debe destacar que aunque se apliquen prácticas eficientes de mitigación, la curva creciente de calentamiento deberá continuar hasta que sólo después de un buen tiempo consiga disminuir (Sanchez & Parry, 2001). Así, hoy en día, la aplicación de las técnicas de Adaptación de las especies o variedades de cultivos se espera que tenga un efecto más favorable, al menos a corto plazo, dentro del contexto de la agricultura sustentable para afrontar el problema. Dentro del tema de las adaptaciones un aspecto importante sería la obtención de variedades adaptadas a las sequías para las regiones más propensas a este problema en el futuro. Las áreas más vulnerables son el sur de Asia, África y pequeñas islas. Si estas adaptaciones no se realizan, los problemas con el uso de la escasa agua dulce disponible podrá ser afectada también, pues los grandes productores, con mayores recursos económicos, obtendrán agua de pozos cada vez más profundos donde el nivel de agua que disminuye a razón de cerca de 30 cm/año, pasará a la tasa de 36 cm/año, haciendo cada vez más difícil la vida de los agricultores más pobres. De esta forma la diferencia entre ricos y pobres será mucho mayor a no ser que una rápida adaptación de cultivos o variedades pueda ocurrir (Sanchez & Parry, 2001).

Algunos caminos para la conservación y mejoramiento del recurso suelo dentro del contexto de una agricultura sustentable.

Para atender la creciente demanda por alimentos es necesario pensar primero en preservar el recurso suelo disponible, especialmente en regiones donde las posibilidades de expansión son escasas. Se debe destacar también que la pérdida de la capacidad productiva de los suelos por diferentes mecanismos llamados también de «Factores de degradación», en tesis significa lo mismo que perder suelo o disminución del área agrícola, lo cual debe ser evitada. El problema de la degradación de los suelos se inició en la antigüedad o mejor dicho nació con la agricultura, con el uso abusivo de los suelos (Olsen 1981). El principal problema de la degradación está asociado con las pérdidas de suelo por erosión, conforme indican los datos de Oldeman et al.(1991), siendo que los mayores problemas (70%) están localizados en Asia y África (Cuadro 5), y sus efectos son duraderos conforme remarca Bunney (1990), indicando que la deforestación de los suelos de las áreas montañosas de México, por ejemplo, que data de más de 3,500 años, sus efectos todavía se mantienen hasta la actualidad. La erosión ocurre como resultado de la disminución de la cobertura vegetal y de la estructura del suelo lo cual contribuye a la reducción de la infiltración del agua, resultando en aumento de la escorrentía superficial, causante de la erosión hídrica.

Uno de los principales indicadores de la degradación de las tierras está relacionado con la disminución del contenido de materia orgánica del suelo, parámetro que refleja muy bien la calidad del suelo, considerando que es uno de los principales componentes relacionados con la fertilidad o capacidad productiva del suelo en su sentido más amplio.

Para hacer frente a la erosión, aparte de las conocidas prácticas de manejo como siembras en surcos a nivel o en fajas, etc., el sistema de siembra directa (SD), manteniendo los residuos de cosecha en la superficie del suelo como cobertura, es uno de los más promisorios. Este sistema agrícola está cada vez creciendo en extensión, especialmente en América Latina, destacándose Brasil, Argentina y Paraguay, cuya superficie alcanza 30 % del área bajo SD en el mundo. Este sistema agrícola está permitiendo no sólo controlar la erosión sino mejorar el contenido de MOS en la capa superficial del suelo. Gracias a este efecto, el estudio de Sá (1993) demuestra que el sistema de SD disminuye con el tiempo las necesidades de aplicación de fertilizante nitrogenado, aumentando su eficiencia. La SD también abre inclusive la perspectiva de contribuir al secuestro de C en el suelo. Con relación a este aspecto, algunos estudios como los de Sisti et al. (2004) confirman que sólo es posible aumentar el

Cuadro 5. Degradación antrópica de suelos en el mundo, relativo a los 4 principales procesos de degradación (de moderado a extremamente degradado, en Mha). Oldeman et al. 1991.

Región	Erosión hídrica	Erosión eólica	Degradación química	Degradación física	Total Mha
África	170	98	36	17	321
Asia	315	90	41	6	452
América del sur	77	16	44	1	138
América del Norte y Central	90	37	7	5	139
Europa	93	39	18	8	158
Australia	3	15	1	2	21
Total	748	295	147	39	1229[a]
% del total	61	24	12	3	

[a]Si se incluyen los suelos ligeramente degradados el total sube a 1965 Mha.

contenido de C o MOS cuando el sistema presenta un balance positivo de N, lo cual se consigue mediante la inclusión de leguminosas-abonos verdes en la rotación de cultivos. Es más, se confirma que por cada unidad de N que se consigue fijar en el suelo en forma orgánica estable (Humus), se abre la posibilidad de fijar o secuestrar en el suelo hasta 10 unidades de carbono, de donde se demuestra que en el proceso de secuestro de C en el suelo, más importante que el propio C que es abundante en el sistema, es el nitrógeno el que normalmente es limitante en la mayoría de los sistemas agrícolas (Urquiaga et al., 2002)

Dentro de los sistemas agrícolas más promisores que se tiene en la región subtropical de América Latina, para mantener y/o mejorar el contenido de MOS, está la rotación de periodos de 3 a 4 años de cultivos anuales con similar periodo de pasturas de gramíneas asociadas con leguminosas (Studdert et al., 1997).

Otros buenos ejemplos acerca de la importancia del uso de abonos verdes en la recuperación de la calidad de los suelos tropicales se ha observado claramente en África (Benin), como en América Central, donde la mucura viene contribuyendo significativamente para mejorar los suelos y el rendimiento de los cultivos. Cuando la mucura fue recién introducida en Benin, sólo 15 familias de agricultores adoptaron su cultivo en 1987, pero en poco tiempo se expandió sensiblemente y en 1996 cerca de 100 mil familias ya adoptaban su cultivo (Versteeg et al., 1998). En cuanto eso, en Honduras cerca de 70% de los agricultores, especialmente los pequeños dependen de la mucura para sustituir la fertilización nitrogenada, además de contribuir a mantener y/o aumentar el contenido de materia orgánica del suelo.

Un mecanismo de gran relevancia para mejorar la productividad de los suelos, pero que poca atención ha recibido es la difusión de los resultados de investigación, lo cual es especialmente crítico en las zonas más alejadas donde la comunicación es escasa. Resulta que en muchos lugares del planeta, en cuanto hay regiones donde la Revolución verde ni siquiera se ha iniciado, existen otras donde ya se está pensando en su reinvención, donde se incluyen las técnicas biotecnológicas y la agricultura de precisión.

Consideraciones finales

El suelo es el principal recurso natural directamente relacionado con la producción de alimentos para sustento de la creciente población mundial. Actualmente sólo son cultivados cerca de 10% del área terrestre del planeta, sin embargo, esto ya equivale al límite de su expansión, controlado además por las condiciones inherentes al suelo y por las condiciones ambientales (Calentamiento global). Por ello, actualmente, sólo se vislumbra el desarrollo de tecnologías que permitan aumentar el rendimiento de los cultivos a través de la conservación y/o aumento de la capacidad productiva de los suelos, dentro del contexto de la agricultura sustentable. En este sentido se podría decir que el Horizonte del suelo está limitado en su extensión, pero no en su potencial de capacidad productiva. Existen tecnologías disponibles que siendo adecuadamente aplicadas y/o adaptadas a diferentes suelos permitirían aumentar en varias veces los actuales rendimientos unitarios de los cultivos, especialmente en las áreas más alejadas de los países en desarrollo, mas para ello no sólo son necesarios los recursos económicos sino también la optimización de la difusión de las modernas tecnologías disponibles. Dentro de las técnicas modernas disponibles se destacan además de las relacionadas con el manejo de suelos (encalado, fertilización, etc.), el uso de semillas mejoradas, control de plagas y enfermedades, irrigación, y sistemas conservacionista de preparación del suelo (siembra directa) y apropiada rotación de cultivos, entre otros.

Agradecimientos

Los autores expresas su agradecimiento al CNPq por la bolsa de investigación concedida. También se agradece a la FAPERJ y al Organismo Internacional de Energía Atómica por la ayuda recibida para el desarrollo de varias de las investigaciones mencionadas en este trabajo.

Bibliografía

ARTHUS-BERTRAND, Y., 2004. A terra vista do céu. Copenhaga, ed. Aeditora O Mundo. 451p.

BORLAUG, N.E. & DOWSWELL, C.R., 1994. Feeding a human population that increasingly crowds a fragil planet, in World Congress of Soil Science, 15., 1994, Acapulco, México. Keynote lecture ... Acapulco: International society of Soil Science. p 1-15.

BUNNEY, S., 1990. Prehistoric farming caused devastating soil erosion. New Scientist, 125, 29-30.

DÍAZ-ZORITA, M., DUARTE G.A., GROVE, J.H., 2002. A review of no-till systems and soil management for sustainable crop production in the subhumid and semiarid Pampas of Argentina. Soil Till. Res. 65:1-18.

FOOD AND AGRICULTURAL ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO), 2004. The state of food insecurity in the world (www.fao.org/spfs).

FOOD AND AGRICULTURAL ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO), 2003. Special programme for food securityThe state of food insecurity in the world . FAO, Roma.

FOOD AND AGRICULTURAL ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO), 1993. Agriculture: Towards 2010. FAO, Roma.

GRIGG, O.B., 1993. The world food problem, in R.L. Naylor, W. Falcon y E. Savaleta. Popul. Dev. Rev. 23, p 41.

GARCÍA, F., 1999. Aspectos principales de siembra directa y los cultivos de soja y maíz en Argentina. In: Conferência Anual da Revista Plantio Direto, IV. 21-32.

MATSON, P.A., PARTON, W.J., POWER, A.G., SWIFT, M.J. 1997. Agricultural intensification and ecosystem properties. Science,277, 504-509 (www.sciencemag.org).

PAUSTIAN, K., PARTON, W.J., PERSSON, J., 1992. Modeling soil organic matter in organic-amended and nitrogen-fertilized long-term plots. Soil Sci. Soc. Am. J. 56, 476-488.

LAL, R., 1997. Residue management, conservation tillage and soil restoration for mitigating greenhouse effect by CO2-enrichment. Soil Till. Res. 43, 81-107.

OLDEMAN, L.R., HAKKELING, R.T.A., SOMBROEK, W.G., 1991. World map of human-induced soil degradation. An explanatory note, 2nd edition. United Nations Environment Programme, Nairobi.

OLSEN, G.W., 1981. Archaeology: Lessons on future soil use. Journal of Soil and Water Conservation, 36, 261-264.

ROBERTS, J.M., 1993. History of the world. Oxford, ed. Helicon, 598p.

SÁ, J.C.M., 1993. Manejo da fertilidade do solo no plantio direto. Fundação ABC, Castro, Paraná, Brasil. 96p.

SANCHEZ, P.A., PARRY, M.L., 2001. Turning up the heat: How will agriculture weather global climate change?, in International Food Policy Research Institute, Sustainable food Security for All by 2020: Proceedings of an International Conference, September 4-6, Bonn, Germany (Washington, DC: IFPRI, 2002), p 116-123.

SANCHEZ, P.A., SWAMINATHAN, M.S., 2005. Cutting world hunger in half. Science, 307, 357-359 (www.sciencemag.org).

SILVA, J.E.D., LEMAINSKI, J., RESCK, D.V.S., 1994. Perdas de materia orgánica e suas relações com a capacidade

SISTI, C.P.J., SANTOS, H.P., KOCHHANN, R., ALVES, B.J.R., URQUIAGA, S., BODDEY, R.M., 2004. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional and zero tillage in southern Brazil. Soil Till. Res. 76, p. 39-58.

STOCKING, M.A., 2003. Tropical soils and food security: The next 50 years.Science 302, 1356-1359 (www.sciencemag.org).

STUDDERT, G.A., ECHEVERRÍA, H.E., CASANOVAS, E.M., 1997. Crop pasture rotation for sustaining the quality and productivity of a Typic Argiudoll. Soil Sci. Soc. Am. J. 61,1466-1472.

URQUIAGA, S., ZAPATA, F., 2000. Manejo eficiente de la fertilización nitrogenada de cultivos anuales en América Latina y el Caribe. Porto Alegre, Ed. Gênesis. 110p.

URQUIAGA, S., JANTALIA, C.P.J., SANTOS, ALVES, B.J.R., BODDEY, R.M., 2004. Importancia de la FBN en el secuestro de carbono en el suelo y en la sustentabilidad agrícola, in M.A.M. de Azconegui, I.E. García de Salamote, S.S. Miyazaki, Biología del Suelo: Transformaciones de la materia orgánica, usos y biodiversidad de los organismos edáficos. Buenos Aires: editorial Facultad Agronomía, 2004. p. 1-11.

URQUIAGA, S., SISTI, C.P.J., SANTOS, H.P. DOS, KOCHHANN, R., ALVES, B.J.R., BODDEY, R.M., 2002. Influence of crop rotation and soil tillage system in the organic C balance in na Oxisol (Typic Haplorthox). In: WORLD CONGRESS OF SOIL SCIENCE, Proceedings of the 17th World Congress of Soil Science. Bangkok, Thailandia.

VERSTEEG, M.N., AMADJI, F., ETEKA, A., GOGAN, A., KOUDOKPON, V., 1998. Farmers' adoptability of mucuna fallowing and agroforestry technologies in the coastal savanna of Benin. Agricultural Systems, 56 (3), 269-287.