

RECICLAJE DE NUTRIENTES EN ECOSISTEMAS: APLICACIONES AGRONOMICAS

Juan F. Gallardo Lancho¹

¹ C.S.I.C., Apartado 257, Salamanca 37071, España. E-mail: jgallard@usal.es, jgallard@fresno.csic.es

Introducción

Uno de los temas más actuales es del **reciclaje de bioelementos**, por cuanto puede servir de indicador o evaluador de posibles perturbaciones de los ecosistemas y por sus aplicaciones prácticas. En efecto, mediante el conocimiento del ciclo de bioelementos en un determinado sistema se podría conocer la capacidad de cesión de nutrientes del suelo a las plantas.

Los ciclos biogeoquímicos

En la **Figura 1** se observa el ciclo biogeoquímico de la materia orgánica y bioelementos asociados a ésta en un ecosistema, donde pueden distinguirse los siguientes compartimentos: Biomasa forestal perenne, biomasa herbácea plurianual, hojarasca acumulada, biomasa subterránea y reserva húmica del suelo (*Humus*), como más importantes; por el contrario, se identifican los siguientes flujos: Aportes por la lluvia (pluviolavados), aportes por el desfronde o muerte de la biomasa aérea y subterránea y por la descomposición orgánica (mineralización), acumulación orgánica en el suelo (humificación), escorrentía superficial, lixiviación o percolación, absorción radicular y exportaciones debido a la explotación antropozoógena, como principales.

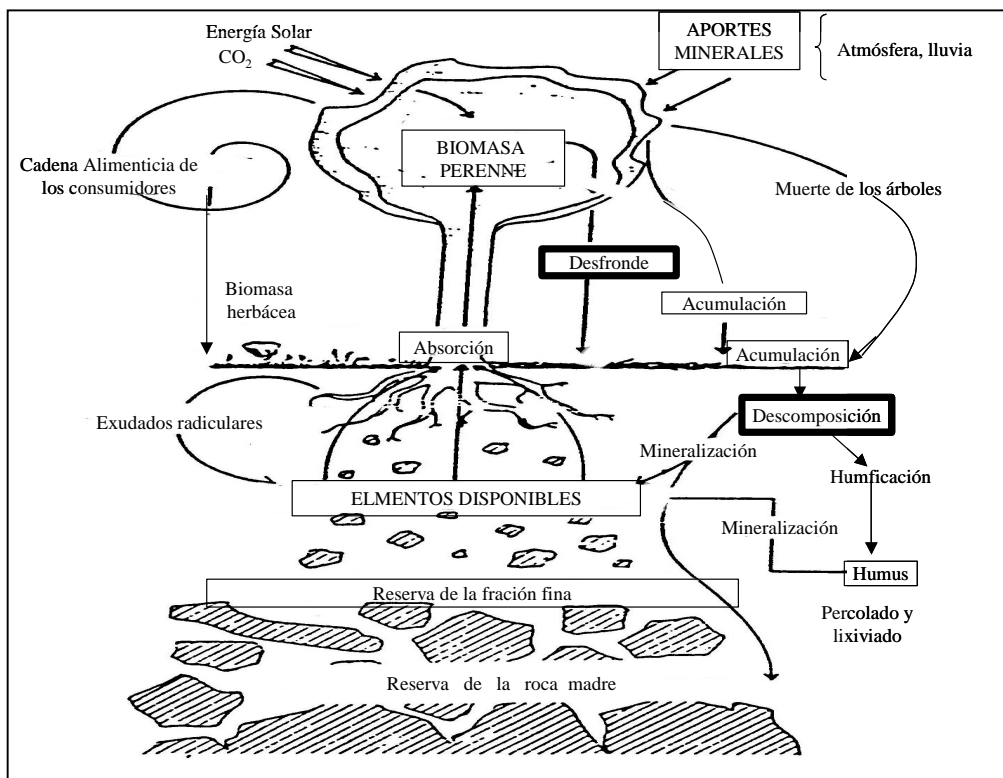


Figura 1. Ciclo bioquímico de la materia orgánica y bioelementos asociados.

En el establecimiento de los estudios de los ciclos biogeoquímicos es preciso conocer:

- Las importaciones y exportaciones (demandas y gastos) de bioelementos en el sistema.
- Las existencias de nutrientes en cada compartimentos, tanto de los totales como de sus diferentes formas (asimilables, lábiles, recalcitrantes, etc.).

Hay que saber bien distinguir los compartimentos (estáticos, medidos en kg m^{-2}) de los flujos (dinámicos, medidos en $\text{kg m}^{-2} \text{ ha}^{-1}$) y, dentro de los flujos, los externos (interacción del sistema con el exterior) y los internos (entre los compartimentos del mismo sistema).

Los flujos externos comprenden:

- Las entradas atmosféricas y antropozoógenas.
- Las salidas percolativas y antropozoógenas.

Por lo que a partir de esos datos se puede realizar un balance total para cada bioelemento, a saber:

$$(\pm) \text{ Balance total: Pérdidas - ganancias (por cada bioelemento)}$$

Indicando el signo si el ecosistema o agrosistema pierde o gana nutrientes anualmente.

Los flujos internos comprenden:

- Las transferencias intercompartimentales de bioelementos.
- Los flujos motivados por los procesos de humificación y mineralización.

Para conocer estos últimos flujos es necesario conocer las constantes de descomposición, humificación y/o mineralización orgánica.

Todo estos datos nos permitirían también deducir los flujos limitantes en cada eco- o agro-sistema .

A modo de ejemplo ilustrativo en la **Figura 2** se expone el ciclo de los bioelementos en un ecosistema forestal caducifolio (roble/avellanar) de Bélgica, estudiado por DUVIGNEAUD y col. (1971).

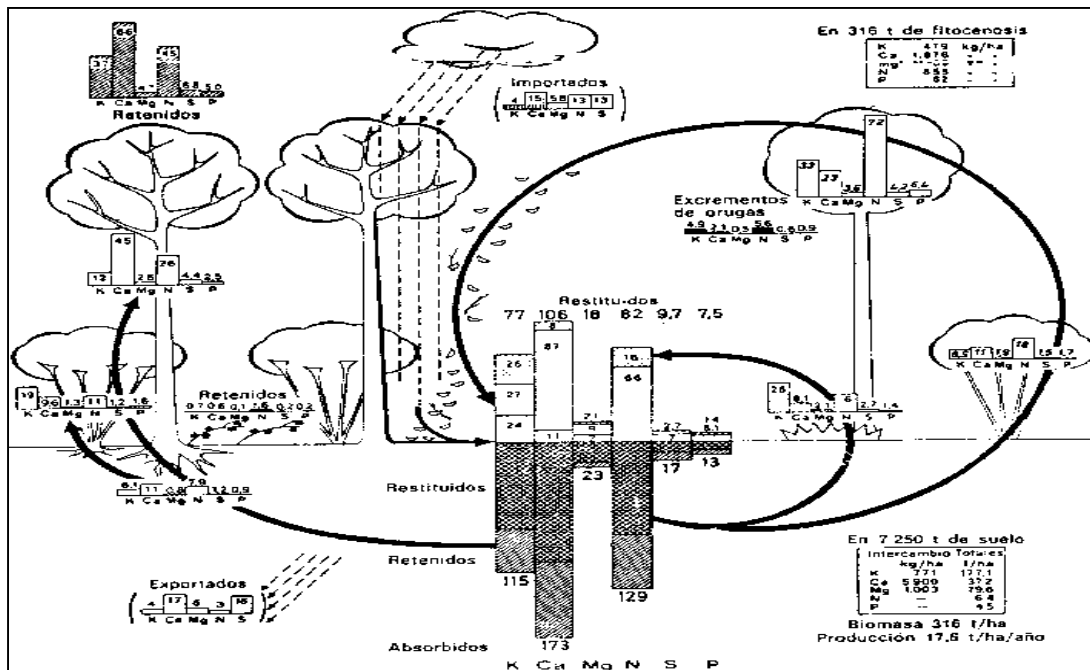


Figura 2. Ecosistema forestal caducifolio en Bélgica.

Retorno potencial de bioelementos al suelo

Como es sabido, la materia orgánica del suelo (MOS) engloba una serie de bioelementos que, en su mayor proporción potencialmente (a largo plazo), podrían cederse a las plantas; sólo una pequeña fracción de aquéllos suelen ser asimilables a corto y medio plazo.

Normalmente, el flujo de hojarasca en los ecosistemas (o la producción anual de residuos vegetales en los

agrosistemas) indican los retornos potenciales de bioelementos mediante un simple cálculo resultante de multiplicar la cantidad de esa hojarasca (o residuos) por su composición química. Así, si se considera un ecosistema determinado pueden calcularse, en principio, las entradas potenciales de bioelementos al suelo (denominándose **retorno potencial**) simplemente multiplicando la composición de la producción por la cantidad de ésta; la dificultad del cálculo estriba en la variedad de órganos que englobe la producción y la variabilidad temporal de la composición de dichos órganos. Pero también debe calcularse otras entradas que puedan llegar al ecosistema por aguas de lluvia o polvos atmosféricos (sobre todo en áreas con estación seca) o, bien, las entradas debidas a fertilizantes o por abonados orgánicos en los agrosistemas.

Retorno real de bioelementos al suelo

El cálculo se torna mucho más difícil cuando se quiere conocer la cantidad real de bioelementos que efectivamente se ceden de esos residuos orgánicos al compartimento suelo en formas asimilables (**retorno real**).

Se parte de la hipótesis de que es frecuente que la materia orgánica del suelo (MOS) esté en equilibrio dinámico en un ecosistema, sea natural o agrícola. Dicho equilibrio se rige por dos procesos contemporáneos que se denominan **humificación** (formación de sustancias húmicas, SSHH) y **mineralización** (formación de CO₂, H₂O, e iones simples de bioelementos, generalmente asimilables). En el subsistema o compartimento edáfico se considera que la producción (si no es retirada por las acciones antropozoógenas) son **entradas**, mientras que la lixiviación inmediata a la mineralización serían **salidas** (en suelos semiáridos, sin régimen percolativo, no habría salidas, salvo la del CO₂ emitido y por posible volatilización del amoníaco y/o desnitrificación).

Para el conveniente conocimiento del ritmo de mineralización es necesario realizar modelizaciones; de éstas puede deducirse la **constante de descomposición** (o **humificación**) **orgánica** que, dependiendo de su cálculo, puede ser adimensional o venir expresada en tiempo⁻¹; en este último caso su inversa suele indicar el tiempo medio de residencia (TMR) o tiempo que tardan en descomponerse los residuos. Una de las maneras utilizadas para conocer la constante (k_d) del ritmo de descomposición es dividir la producción anual por la reserva orgánica del compartimento, sea hojarasca (dando la constante de descomposición primaria relativa a ésta), o sea suelo (resultando el ritmo de mineralización secundaria de la MOS).

En todo caso:

$$k_d \text{ (tiempo}^{-1}\text{)} = \text{Producción total/Reserva acumulada.}$$

En la **Tabla 1** se exponen los resultados obtenidos para varios ecosistemas forestales españoles.

Acumulación biológica y movilización química

Pero lo que importa desde el punto de vista agronómico es el citado retorno real, es decir, la cantidad de nutrientes liberados a corto plazo por la materia orgánica (natural o añadida) en forma asimilable. Ello exige investigaciones suplementarias para conocer el ritmo de cesión (mineralización) de cada elemento por los residuos orgánicos aportados; en realidad se trata entonces conocer, tanto la constante de descomposición primaria (o humificación) de los residuos, como la constante de mineralización (liberación) de cada nutriente considerado que, igualmente, puede venir expresada también en tiempo⁻¹. En la práctica suelen observarse tres comportamientos en la mineralización de los bioelementos (**Figura 3**):

a) Bioelementos que se liberan aproximadamente al ritmo que se desprende el CO₂ (ritmo de descomposición orgánica).

b) Bioelementos que se retienen en los residuos orgánicos que sufren la humificación, lo cual denotaría que están en deficiencia (acumulación o **inmovilización biológica**). Un nutriente típico de este comportamiento es el N, por su alta demanda microbiana.

c) Bioelementos que se liberan a un ritmo más rápido que la descomposición orgánica (**movilización química**) y, generalmente, no son limitantes. El nutriente típico aquí suele ser el K, por su alta solubilidad.

Tabla 1. Producción aérea, descomposición y acumulación de diversos sistemas forestales españoles.

Especie	Altitud	Pluviom.	Produc.	Acumul.	C.org.	C/N	K desc.	T resid.	(k hojas)
Unidades	(m s.n.m.)	(L m ⁻² año ⁻¹)	(Mg ha ⁻¹ año ⁻¹)	(Mg ha ⁻¹)	(mg g ⁻¹)		(año ⁻¹)	(años)	(año ⁻¹)
<i>P. silvestris</i>	1550	1500	8.8	60	98	16.8	0.13	7	0.23
<i>Q. pyrenaica</i>	1350	1600	8.6	38	73	16.1	0.19	4	0.23
<i>Q. pyrenaica</i>	960	1500	2.6	5.3	94	20.4	0.33	2	0.38
<i>Q. pyrenaica</i>	940	1250	3.5	4.3	73	16.4	0.45	1.2	0.32
<i>Q. pyrenaica</i>	900	850	2.8	5.7	66	15.3	0.33	2	0.32
<i>Q. pyrenaica</i>	870	750	4.1	4.6	48	12.7	0.47	1.1	0.32
<i>Q. sativa</i>	1150	1600	5.9	21	35	15.5	0.22	4	0.36
<i>Q. sativa</i>	940	1150	5.3	7.2	32	19.0	0.42	1.4	0.21
<i>Q. pinaster</i>	770	400	1.7	5.3	18	17.3	0.25	3	0.37
<i>Q. pinea</i>	760	400	2.4	6.1	12	16.7	0.27	3	0.42
<i>Q. ilex</i>	730	400	2.4	1.9	24	15.7	0.55	0.8	0.46

Dado que las entradas por lluvias (y/o polvos atmosféricos) suelen resultar en forma soluble, a los nutrientes liberados por la mineralización de la MOS deben sumarse íntegramente los aportados por las aguas pluviales. Estas lluvias pueden de origen oceánico (denotado por su contenido en Na) o continentales (denotado por su contenido en Ca); también pueden ser lluvias ácidas (con bajo pH y altos contenidos en S y/o N), o polucionadas (v.g.: con P, Pb, etc.).

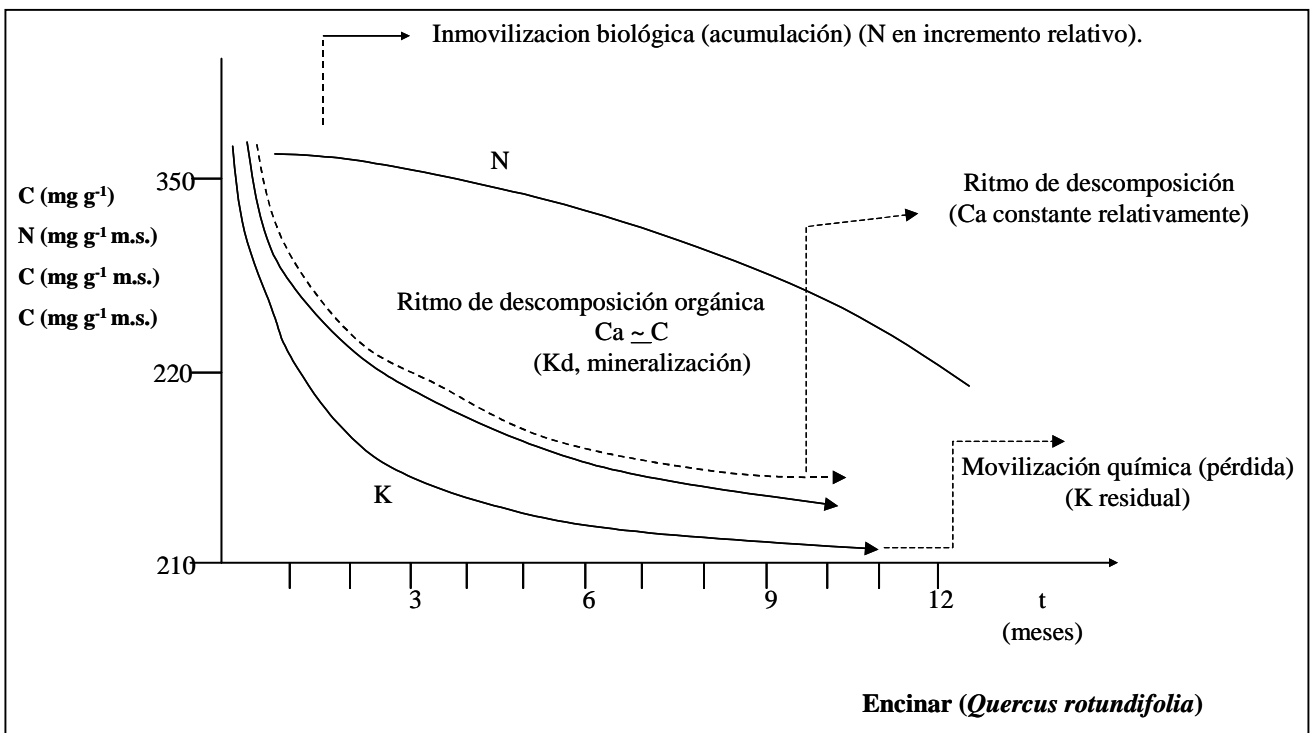


Figura 3. Ritmo de cesión de bioelementos en la descomposición orgánica.

Aportes mínimos de bioelementos al suelo.

Como resultado de la citada suma se obtendría el retorno o **aporte mínimo real**, pues hay que considerar que el suelo es un subsistema complejo y que se pueden dar otras mineralizaciones no contempladas experimentalmente o en la aplicación del modelo utilizado (simplificación); o sea, sería una estimación no completamente exacta, pero indicadora (si se conoce la demanda de nutrientes por las plantas del ecosistema) de la magnitud de necesidades nutricionales que pueden ser satisfechas, por lo que el diferencial nutritivo debe ser obtenido de la capacidad de cesión por el suelo (complejo de cambio edáfico), o por aportes exógenos (fertilizantes, abonos orgánicos, *composts*, etc.).

A modo de ejemplo, se expone en la **Tabla 2** información sobre un ecosistema forestal bien estudiado, situado en el Centro-oeste de España (fronterizo a Portugal) y localizado en Navasfrías (provincia de Salamanca). Si se supone que toda la producción de hojarasca se incorpora al suelo es fácil calcular la cantidad de bioelementos que potencialmente pueden retornarse al suelo (retorno potencial); a ello habría que sumar las entradas proporcionadas por las aguas de lluvia que atraviesan la cubierta forestal (pluviolavados). Sin embargo, ello no es real y habría que calcular, en función del ritmo de liberación de bioelementos, la cantidad de nutrientes que efectivamente son liberados (retorno mínimo), a los que, obviamente, también habría que sumarle los bioelementos disueltos en las aguas de pluviolavados. Se observa que las cantidades registradas son muchos menores para los elementos mayores. Finalmente, la diferencia ($A_b - A_t$) entre la demanda total del árbol (A_b) menos la aportación real por la hojarasca más los pluviolavados (A_t) indicaría qué cantidad debe ser aportada por ese suelo.

Quedaría saber cuanto satisfecería, del total de la demanda de nutrientes, esos aportes mínimos. Ello se puede realizar mediante la resta de la demanda total del árbol menos el aporte mínimo más las entradas por pluviolavados (**Tabla 2**): Como se puede observar, la diferencia suele ser alta para los elementos mayores y, generalmente, ínfima o nula para los micronutrientes, pero mayormente debido a las aguas de lluvia.

Tabla 2. Aporte mínimo anual de nutrientes (kg.ha⁻¹.año⁻¹) al suelo en diferentes parcelas de rebollares (Oeste español).

Parcela	Parámetro	N	Ca	Mg	P	K	Na	Mn	Fe	Cu	Zn
Navasfrías	Hojas*	5.5	7.3	2.1	0.7	2.6	0.00	0.68	0.01	0.00	0.00
	Pluviolavado	3.0	12.8	4.7	0.7	8.4	4.94	0.44	0.27	0.25	1.70
	Aporte total	8.5	20.1	6.8	1.4	11.0	4.94	1.12	0.28	0.26	1.70
El Payo	Hojas*	7.8	6.8	1.5	1.2	3.5	-0.85	0.59	-0.22	0.02	0.00
	Pluviolavado	3.5	12.3	5.9	1.5	15.3	5.47	0.73	0.25	0.25	1.34
	Aporte total	11.3	19.0	7.4	2.7	18.7	4.62	1.32	0.03	0.26	1.33
Villasrubias	Hojas*	1.0	5.9	2.4	0.6	2.6	-0.19	0.31	-0.27	0.00	-0.01
	Pluviolavado	3.1	11.8	6.3	1.2	13.6	5.03	0.97	0.27	0.16	1.49
	Aporte total	4.1	17.7	8.7	1.8	16.1	4.84	1.28	-0.01	0.16	1.49

*Retorno mínimo real de bioelementos a través de las hojas sometidas a descomposición en bolsitas de tul durante tres años (un signo negativo significa que no existe ninguna cesión en tres años).

En la **Figura 4** se puede ver otro ejemplo ilustrativo de la demanda de un bioelemento, concretamente P, de un castaño del Oeste español. Se deduce que siempre que las rotaciones de corta de madera no sean muy continuas, el suministro de P por el suelo está asegurado, a pesar que el retorno real más el de pluviolavado no lleguen a cubrir la demanda total del castaño (11.5 kg P ha⁻¹ a⁻¹).

Supongamos que nuestra cosecha necesita 50 kg de N para su máxima producción, esto es, para no sufrir carencias. Debe indicarse que no se tiene en cuenta el fenómeno de **sintonía**, es decir, que coincida (o no) el máximo de demanda de la planta con el de cesión del bioelemento (y *viceversa*), lo cual es relativamente solucionable en la **agricultura tradicional** si hay suficiente información sobre el ritmo de crecimiento de la planta cultivada.

Con la **agricultura tradicional** simplemente se añadía 50 kg de N en forma de fertilizante inorgánico de manera fraccionada, para solucionar el problema de sintonía y no se tuvieran pérdidas de nitratos. Con ello, se procuraba mantener la reserva de N edáfica.

Con la **agricultura primitiva** el suministro de N se confiaba en la cesión de N por el suelo. Supongamos que tenemos un suelo fértil (4.0 % de C con una razón C/N de 13, lo que equivale a disponer de una reserva de N edáfico de aproximadamente 10 Mg N ha⁻¹). Aunque se supone que la mineralización orgánica en los trópicos es alta, dada la bioestabilidad de las sustancias húmicas edáficas suponer una constante de mineralización secundaria (k_{mN}) del N de 0.001 es quizás algo exagerado, pero valdría para los efectos.

Con estos supuestos se puede estimar que se liberarían en el suelo del orden de 10 kg ha⁻¹ de N inorgánico (asimilable), lo cual se queda lejos de satisfacer toda la demanda vegetal (50 kg N ha⁻¹); se necesitarían adiccionar 40 kg N ha⁻¹ de fertilizantes para una buena producción. Podríamos forzar el manejo del suelo (v. g.: mediante fuertes roturaciones) para aumentar esa constante, por ejemplo, hasta 0.01; el problema es que ahora obtendríamos del suelo 100 kg N ha⁻¹ por lo que, aún solucionando la demanda vegetal de 50 kg ha⁻¹, tendríamos una contaminación de los acuíferos de otros 50 kg ha⁻¹. Además, a ese fuerte ritmo la reserva nitrogenada edáfica se va empobreciendo a una velocidad tal que, a medio plazo, se notarían negativamente las consecuencias.

Supongamos que se pretende compensar al suelo con aportes **orgánicos (agricultura orgánica o ecológica)**. Suponiendo que este suelo sin forzarlo proporciona esos 10 kg N ha⁻¹, supongamos que se añade (referido a materia seca) 1 Mg ha⁻¹ de un buen abono orgánico (razón C/N 30), el cual incluye un total 20 kg de N. Ahora supongamos una constante de descomposición primaria (k_{dN}) más alta, del orden de 0.10 (que para el N quizás es bastante exagerada incluso suponiendo que la aplicamos para **zonas tropicales**). Siendo así, el resultado es que sólo se liberan 2 kg N ha⁻¹ que, sumados a los 10 kg N ha⁻¹ liberados por el suelo, está muy lejos de satisfacer las necesidades vegetales.

Incluso si se aportaran 5 Mg ha⁻¹ de ese mismo buen abono (con los cual se conseguirían un total, sumando los aportados por el suelo fértil, de 20 kg N ha⁻¹) no se alcanzaría ni la mitad del requerimiento de N. Se necesitaría complementar con 30 kg N ha⁻¹ con un fertilizante inorgánico para obtener una plena (máxima) producción.

Habría que emplear nada menos que 20 Mg ha⁻¹ del mismo abono orgánico para lograr esos 40 kg N ha⁻¹ necesarios que, junto con los 10 kg N ha⁻¹ aportados por el suelo, se alcanzarían por fin los 50 kg N ha⁻¹ requeridos. Pero la pregunta es, entonces, en este momento: ¿De dónde se sacarían cada año los 20 Mg ha⁻¹ de buen abono orgánico (referido a materia seca por lo que, si está húmedo, sería aún mayor cantidad) para efectuar una agricultura orgánica o ecológica equilibrada nutricionalmente? Ese es el dilema y más en países semiáridos, con escasez de recursos orgánicos.

A modo de conclusiones

A partir de las consideraciones anteriores se concluye y demuestra que es difícil de satisfacer, sólo con aportes orgánicos (**agricultura orgánica o ecológica**), las necesidades de las plantas, aún sin tener en cuenta el fenómeno de **sintonía**; este tipo de agricultura sólo es posible recomendar con cultivos poco demandadores de nutrientes (v. g.: algunos frutales) o mediante fuertes aportaciones de abonos orgánicos con altos contenidos en bioelementos (si se disponen en cantidad de forma viable) y en países no fríos y con lluvia regularmente repartida.

De ahí que se considere la materia orgánica como mucho más efectiva desde el punto de vista físico o fisicoquímico que nutricional, y que los efectos de aquélla se evidencien más rotundamente en suelos con problemas de fertilidad (v.g.: por defecto o exceso de un bioelemento) que en suelos de por sí ya fértiles. En

la **Figura 6** se ilustra como el empleo materia orgánica en la Agronomía es poco efectivo en suelos fértiles, mientras que tiene considerables impactos positivos en suelos con marcados déficit (defecto) o superávit (exceso) de un bioelemento (generalmente micronutriente) o referente a propiedades físicas.

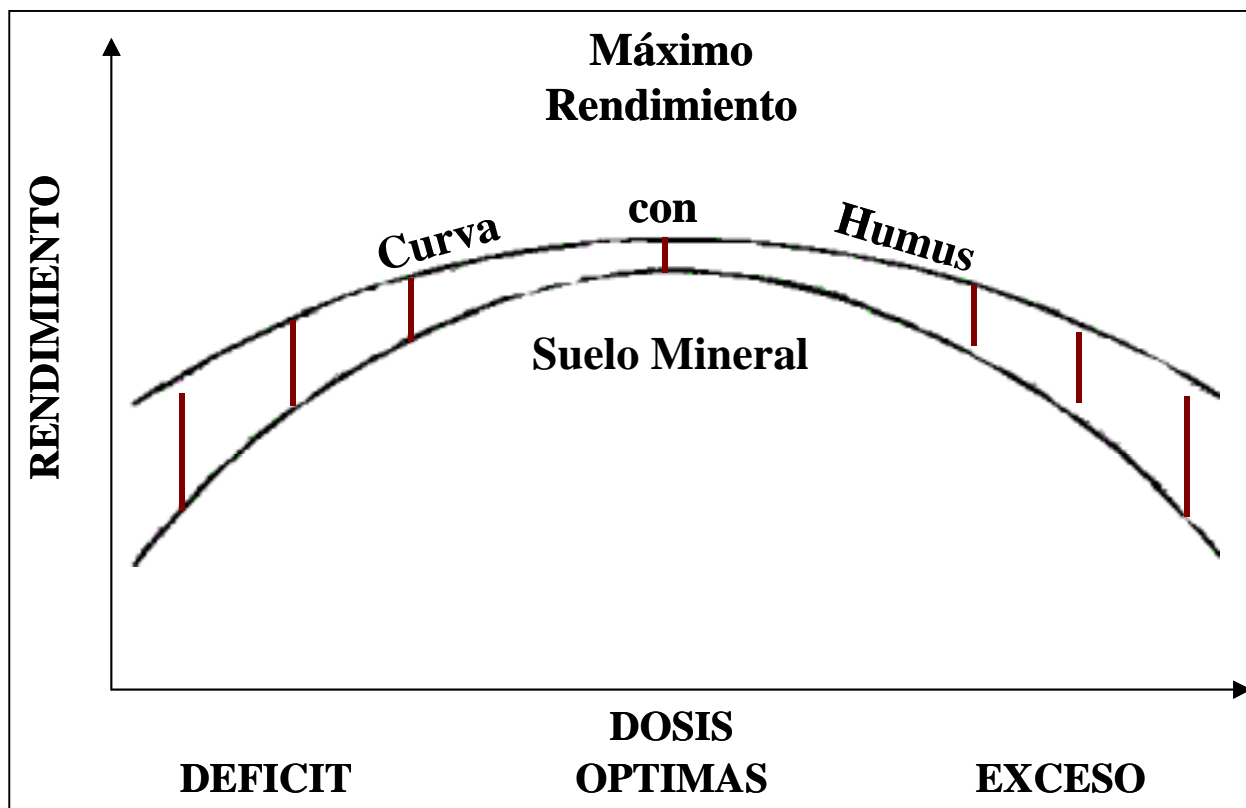


Figura 6. Poder mejorante de la M.O.S.

Lecturas complementarias

Burbano, H. (1989). *El suelo: Compuestos biorgánicos*. Universidad de Nariño, Pasto.

Duvigeaud P. (1978). *La síntesis ecológica*. Alhambra, Madrid.

Gallardo J.F. (1980). El humus. *Investigación y Ciencia*, Julio, 8-16.

Gallardo J.F. (1982). El efecto hojarasca: Una revisión. *Anales de Edafología y Agrobiología*, 41:1129-1157.

Gallardo J.F. (2000). Lluvia y bosque mediterráneo. *Investigación y Ciencia*, Julio, 70-76.

Gallardo J.F. (2000). Biogeochemistry of Mediterranean forest ecosystems: A case study. *Soil biochemistry*, 10:423-460. Marcel Dekker, Nueva York.

Kononova M.M. (1981). *Materia orgánica del suelo*. Oikos-Tau, Barcelona.

Nannipieri P. (1992). *Ciclo della sostanza organica nel suolo*. Patron, Bolonia.

Sumner M.E. (2000). *Handbook of Soil Science*. C. R. C., Boca Ratón, Florida.

Wild A. (1992): *Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas*. Mundi Prensa, Madrid.