

Aspectos económicos de la aplicación de fertilizantes en pastos de secano naturales y artificiales

J. KATZNELSON

Newe Ya'ar Regional Experiment Station.
Post Haifa. Israel

RESUMEN

Se ha resumido el uso de fertilizantes en fincas del área mediterránea y pastos de secano. Se han descrito tres métodos de fertilización: a) El método de balance, normalmente usado en prados no pastoreados, en el que el nutriente se aplica de acuerdo con su consumo por la cosecha. b) El método de ayuda, en el que se usa fertilizante nitrogenado para reducir el "desequilibrio" de la falta de alimentos animales en las fincas durante el otoño y principios de invierno, y aborrarse una alimentación extra muy cara, siempre que el fertilizante añadido cueste menos que el alimento aborradado. c) Un método de aumento de la fertilidad, donde la fertilización se propone el aumento de la productividad de los prados, que dará como resultado un aumento paralelo en los rebaños y en la venta de animales. En muchas áreas la fertilización es un requisito previo a la siembra de pastos.

Las curvas de respuesta a la fertilización describían una función de Mitscherlich o una desviación de ella que resultó ser una curva sigmoidea. Se discutieron los conceptos de beneficio de la fertilización y se ajustaron a varias curvas de respuesta, igualando sus primeras derivadas con la razón entre el coste de fertilizante, P_x , y el precio del producto final, P_y . Se analizaron casos donde la fertilización no es económica.

A. INTRODUCCIÓN

Para hacer frente al gran aumento de la población mundial y producir los alimentos necesarios, se deben usar los recursos naturales más intensivamente. Los países mediterráneos, normalmente importadores de productos animales, deben ser conscientes de que en el futuro éstos serán menos disponibles y más

caros. Es momento de comenzar a utilizar adecuadamente las tierras marginales, no arables, en estos países.

Los suelos de dichas áreas son corrientemente muy pobres. Aunque hoy día son casi improductivos, pueden convertirse en la principal fuente de nuestro suministro de carne. La fertilización sería una herramienta muy importante para la mejora de los pastos, junto con el vallado, control de malas hierbas, resiembra, etc... La fertilización ha llegado a ser la mejora más usual en la Europa templada (T'HART, 1960), pero no en los países mediterráneos.

En Israel hemos realizado experiencias sobre fertilización en pastizales extensivos durante unos veinticinco años y se han convertido en una práctica agrícola común. En esta ponencia resumiré nuestra experiencia en este campo y expondré algo de mi filosofía personal al respecto.

Como procedimiento agrícola, la fertilización puede clasificarse como un sistema conceptualmente multidimensional. Primero incluye el ecosistema biológico (suelo, clima, vegetación, animales, microorganismos) y los científicos pueden estudiarlo sin considerar la economía. De hecho, a menudo lo hacen.

La adición de una o más dimensiones económicas al sistema biológico da lugar al sistema agrícola.

B. ENSAYOS PARA DECIDIR LA FERTILIZACIÓN

La fertilización es arriesgada, al igual que muchas otras prácticas agrícolas. Los ganaderos, los agentes de Extensión Agraria y los científicos tratan de prever la respuesta de la producción al fertilizante, y existen recomendaciones basadas en el análisis de hojas en horticultura y en el análisis del suelo en cultivos arables e industriales. Estas no son disponibles, o a menudo resultan dudosas en las tierras no cultivadas, cuando se considera la vegetación natural. Las condiciones edáficas de las tierras no arables son mucho más complejas que las de las cultivadas. Esto puede llevar a discrepancias entre los datos de análisis del suelo, de las plantas y del crecimiento de la planta indicadora frente a la respuesta al fertilizante. El siguiente ejemplo muestra esto con bastante claridad.

Se tomó suelo de dos lugares, Sasa y Baram, a una distancia aproximada de 7 kilómetros, en la Alta Galilea, se llevó a la estación experimental Newe Ya'ar y se colocó en recipientes de 200 kilogramos; se sembraron seis diferentes tréboles anuales en ambos suelos. De acuerdo con el análisis, los suelos eran muy similares en sus propiedades físicas y químicas, pero el crecimiento de las plantas indicadoras difirió grandemente (ver tabla I, condensada de KATZNELSON, 1970, 1972). El análisis químico de las plantas indicadoras también demostró que los dos suelos difieren grandemente. De acuerdo con esto, se puede prever que el suelo de Baram, rico en N, no responderá al fertilizante nitrogenado, pero lo hará fuertemente al K, cuyo contenido en las hojas de la planta indicadora era extremadamente bajo. Para establecer esto llevamos a cabo pruebas de fertilización en los dos sitios, con la vegetación natural. En la tabla II se exponen algunos datos de rendimiento y análisis químico. La respuesta al N en Baram fue espectacular, mientras que no hubo efecto del K o P. Por otra parte, el P tuvo un

TABLA I

ALGUNOS PARAMETROS DE DOS SUELOS DE LA ALTA GALILEA, ISRAEL. PESO SECO DE LA PLANTA (MEDIA DE 30 PLANTAS DE CADA UNA DE LAS SEIS ESPECIES DE TREBOL) Y PROPORCION MEDIA (%) DE POTASIO Y FOSFORO EN HOJAS DE ESTAS ESPECIES (SEGUN KATZNELSON, 1970-1972)

ORIGEN	S U E L O									PLANTA		
	ANÁLISIS MECÁNICO (%)				ANÁLISIS QUÍMICO					Peso seco, media de todas las especies (mg.)	Contenido medio de las hojas (%)	
	0,002 (mm.)	0,002-0,05 (mm.)	0,05-0,2 (mm.)	0,2-2,0 (mm.)	ppm		Ca+Mg meq./l.	AK	CaCo ₃ (%)		K	P
					N	P						
Baram	55,7	13,8	23,7	6,8	120,3	20,3	4,2	— 4.375	8,0	421	0,090	0,287
Sasa	69,5	18,8	14,5	5,1	16,7	12,3	4,0	— 4.350	9,4	38		

TABLA II

EFEECTO DEL FERTILIZANTE EN EL RENDIMIENTO Y ANALISIS EN BARAM Y SASA *

LUGAR	MEDIDA	TRATAMIENTOS **							
		O	N	P	K	NP	NK	PK	NPK
Baram	M. S. (Kg./Ha.)								
	Rendimiento estacional	390	1.510	420	560	1.940	1.700	450	2.470
	Rendimiento total	1.750	4.010	2.290	2.270	4.650	3.770	2.230	5.690
	Análisis de la hoja (%)								
	N	2,37	2,45	2,28	1,91	2,45	2,31	2,17	2,28
Sasa	P	0,34	0,27	0,41	0,39	0,33	0,28	0,40	0,36
	K	3,44	3,22	3,29	3,06	3,35	3,74	3,57	3,81
	Rendimiento total	250	330	1.650	210	1.740	690	920	1.830
	Análisis de la hoja (%)								
	N	1,65	3,00	2,69	1,96	4,36	2,91	2,11	3,83
Sasa	P	0,12	0,14	0,24	0,18	0,39	0,15	0,26	0,36
	K	2,02	1,74	2,51	2,17	3,47	2,10	2,14	3,43

* Según Katznelson y Putievsky, 1972

** N, P, K representan 400 Kg./Ha. de sulfato amónico, superfosfato y cloruro potásico, respectivamente.

gran efecto en el rendimiento, composición química y botánica de las plantas en Sasa; este último efecto se pudo observar incluso dos años después de la aplicación.

Esto nos lleva a una conclusión inevitable: aunque las pruebas de laboratorio y los análisis de suelo y plantas pueden ayudar, sólo deben utilizarse los experimentos *in situ* para tomar decisiones. La fertilización a escala agrícola sólo debería decidirse después de varios experimentos en años diferentes. El problema crucial es que la hierba segada en los experimentos no es realmente lo que ingieren los animales.

C. ENFOQUES BÁSICOS DE LA FERTILIZACIÓN

Existen diferentes formas de enfocar la fertilización de los pastos. La primera, relevante por su modernidad, se refiere a los prados intensivos donde se siembran especies de gramíneas altamente productivas, especialmente en un sistema de no pastoreo (*zero grazing*), se puede llamar *sistema de balance*. Este se ilustra por un ejemplo de una explotación que produce unas 500-900 toneladas de s.s. como heno o ensilado en 100 Ha. de prados de secano sembrados de *Oryzopsis holciformis* cv. Ron. Cuando se cosecha en abril, la proporción de proteína en la materia seca del forraje es 15-16 %. El año pasado, por ejemplo, la cantidad de N que se obtuvo del área llegó a 8.500 s.s./Ha.) $\times 2,4$ (% N en el forraje) = 204 kilogramos. Esta cantidad es equivalente a una tonelada de sulfato amónico, cantidad que se aplicó en dos veces. El balance de nitrógeno puede así mantenerse, siempre que la lixiviación del sistema sea más o menos igual que la cantidad añadida por alguna leguminosa ocasional, bacterias no simbióticas o por la lluvia.

Este ejemplo se desarrolló en un año favorable. Cualquier posible demora en la decisión de la cantidad de fertilizante a aplicar es importante, ya que la producción puede ser considerablemente menor en un año climáticamente malo. La primera aplicación de 500 Kg/Ha. se da invariablemente después de las primeras lluvias, en noviembre. La segunda aplicación se da a finales de enero, después de estimar el rendimiento potencial en base al tiempo predominante. Como merma, no se debe dar la dosis máxima. Debe considerarse el rendimiento total y no el aumento neto del rendimiento.

Esta práctica de fertilización se relaciona con el pasto aprovechado mediante siega. El modelo se hace mucho más complejo cuando se pastorea el área y la mayor parte de los nutrientes se devuelven al sistema.

Los animales en un sistema cerrado (excepto para cebo o producción de leche) devuelven alrededor del 92 % del fósforo contenido en el forraje, pero la mayor parte del P excretado en las heces está en forma de inositol-fosfatos, no aprovechables inmediatamente por las plantas. Los 5.000 kilogramos de s.s. por Ha. extraídos por los animales, equivalen a 1,5 cabezas de vacuno e incluyen alrededor de 100 Kg. N, de los que sólo un 15-25 % se consumen. El resto vuelve al sistema principalmente por la orina.

Un segundo enfoque lo constituye el que se puede denominar *método de fertilización de ayuda*.

En cualquier sistema de explotación animal que depende del uso de pastos naturales o artificiales, hay altibajos en la calidad y/o cantidad del forraje. El principal desequilibrio en la alimentación animal en Israel y

otros países mediterráneos comienza normalmente después de las primeras lluvias de otoño en noviembre, y puede durar de 6 a 15 semanas, en dependencia de la composición de la vegetación, temperatura y factores del suelo. La intensificación de la producción animal en Israel incluye la provisión de alimento suplementario para los animales durante este período. La intensificación de la explotación también significa el cambio de la época de paridera de marzo a octubre-noviembre, lo que supone un aporte extra de alimentos durante el período final de la gestación y en la lactación. Este aumento del suministro de alimentos la convierte en una práctica muy costosa.

Cualquier medio económico de acortar el período de "desequilibrio" traerá consigo una disminución de los costes. La potenciación de los pastos naturales o artificiales por medio de la fertilización nitrogenada es una solución alternativa, y resultó ser una práctica muy económica. La aplicación de fertilizante concuerda en este caso con el slogan "alimente sus prados, no su ganado". La economía de este slogan depende mucho del coste de las dos alternativas. Un aumento de la intensificación de la explotación animal normalmente aumenta el gasto que el ganadero debe hacer para pagar el alimento adicional. Desde el punto de vista económico la fertilización puede ser menos favorable cuando las vacas u ovejas se explotan en régimen extensivo, ya que su carácter económico (bajos niveles de intereses en las inversiones, precios del ganado bajos) determina un manejo más económico que el intensivo. En este caso, la economía de la alimentación adicional puede ser dudosa, especialmente si el precio del alimento es alto. Así, se deben considerar tres factores para establecer la fertilización de ayuda: el precio por unidad de fertilizante (P_N) aplicado, el precio del alimento que debe reemplazarlo (P_A) y la curva de respuesta.

La razón P_A/P_N es un factor importante. Es específica para un sistema económico dado y depende en gran parte, pero no solamente, de factores externos, tales como el suministro y demanda mundial de productos como cebada o sorgo para grano. Si el precio de la cebada representa el del alimento y el del sulfato amónico el del N fertilizante, esta relación ha cambiado sólo ligeramente en los últimos años entre 1,4 y 1,8. Se puede calcular fácilmente la relación en el caso de otros alimentos en base a la energía y calidad de los mismos. Esto es fácil, ya que 1 kilogramo de cebada equivale a una Unidad Alimenticia Escandinava (U.F.) (1).

Por otra parte, la producción extra de forraje temprano debida a la fertilización con N (la curva de respuesta) es un componente del sistema biológico. Depende de condiciones locales e intrínsecas (clima, suelo, vegetación y explotación de los animales). Algunos de estos factores, como el suelo y la vegetación y su respuesta a la fertilización son, o pueden ser, conocidos por el ganadero. El sistema de explotación de los animales puede modificarlo. El factor que es completamente aleatorio es el clima de un año específico. Aquí es donde la intuición del ganadero, basada en experiencias anteriores, en sus preferencias personales y en su enfrentamiento con el azar es más importante. De hecho, éste construye una escala subjetiva de ingresos y beneficios con arreglo a la cual toma personalmente sus decisiones. Se pueden usar métodos económicos modernos para la cuantificación y solución de estos problemas (DILLON, 1971), pero deben basarse en estimaciones ortodoxas de las respuestas de rendimiento; de otra

TABLA III

ALGUNOS RESULTADOS DE EXPERIMENTOS DE FERTILIZACION
REALIZADOS EN ISRAEL

Año	Localización	Kg. de N/Ha.	Cosecha	RENDIMIENTO EN MATERIA SECA				(Kg./ Kg. N)	Referencia
				TRATAMIENTO (KG./HA.)					
				O	N	P	NP		
1953	Bet-Qeshet	40	T*	900	1.900	900	3.400	25,0	4
1957	Bet-Qeshet	40	E*	165	430	200	490	6,6	4
			T	725	2.100	930	2.950	34,4	4
1961	Ha-Solelim	40	E	1.750	2.930	2.800	3.400	29,5	4
			T	5.959	7.650	6.520	8.850	42,5	4
1961	Sasa II	40	E	70	630	450	970	14,5	10
			T	1.730	2.530	4.690	3.560	20,0	10
1961	Bet-Qeshet	40	E	340	700	360	1.260	9,0	10
			T	2.040	3.510	2.320	4.090	36,9	10
1969	En-Zivan	80	E	780	1.880	570	1.650	13,8	8
			T	2.040	4.780	2.840	5.040	34,3	8
1970	En-Zivan	80	% Grass	33	77	31	86		
			E	760	2.340	880	2.380	19,9	9
1970	Ramat Magshimim	80	T	2.630	4.590	2.160	4.330	24,5	9
			E	1.020	2.050	1.270	2.880	12,9	9
1970	Bet-haMehes	80	T	2.690	4.660	3.710	4.320	24,6	9
			E	590	1.120	650	1.390	6,6	9
			T	2.850	4.950	3.600	6.430	26,3	9

* T = Rendimiento total; E = Rendimiento estacional.

manera, el razonamiento que conduce a una decisión puede ser bueno sobre el papel pero malo para la cuenta corriente.

En la tabla III se exponen datos sobre la producción total y estacional temprana, obtenida como respuesta a la fertilización, en algunos de los experimentos llevados a cabo en Israel. En la mayoría de los casos la fertilización con N costó menos que el alimento suplementario que se ahorró. En muchos casos, la producción temprana extra fue menor que una unidad alimenticia (1,3-1,5 Kg. de s.s.) por Kg. de fertilizante. Sin embargo, hubo casos donde no se obtuvo esta respuesta debido normalmente tanto a unas condiciones climáticas adversas como a una aplicación demasiado tardía. Pienso que el mayor beneficio con la fertilización de ayuda puede obtenerse en Israel si se siguen las reglas que se dan a continuación:

1. Elegir áreas con gramíneas abundantes y de buena calidad, con una productividad general bastante buena.

2. Fertilizar en noviembre o primeros de diciembre, inmediatamente después de que caigan, aproximadamente, 30-50 mm. de lluvia. La respuesta de crecimiento temprano es más tardía cuando la temperatura es baja. Todavía puede ser positivo y significativo, pero se hará notar en marzo o abril, cuando todos los granjeros tienen alimentos suficientes.

3. Usar cantidades moderadas de fertilizante, ya que sólo se necesitan y utilizan cantidades pequeñas, para degradar los rastrojos —que son bajos

en proteínas—, y no quedará N para el crecimiento de las plantas. Esto da como resultado generalmente una curva de respuesta sigmoidea.

A menudo observamos que la producción temprana adicional causada por 160 Kg. N/Ha. era el doble de la obtenida con 80 Kg./Ha.. Sin embargo, en la producción total, los tratamientos con PN a menudo excedían en sus rendimientos a las parcelas de N₂, con una interacción positiva importante. La interacción del N y P era incluso más pronunciada cuando se usaban mayores cantidades de N. Esta interacción se puede formular por:

$$N_2P_1 + N_0P_0 - N_2P_0 - N_0P_1$$

(KATZNELSON, 1967). Así, cuando se aplica un fertilizante nitrogenado, y especialmente cuando la aplicación es frecuente en la misma área, puede ser necesario añadir P y otros elementos, para hacer económico el uso de N.

El fin principal de la fertilización de ayuda no es el aumento del número de animales que pueden mantenerse con el pasto, sino más bien acortar el período de "desequilibrio" y ahorrar gastos en alimentos extras. A pesar de todo, hay varios efectos posteriores a la fertilización con N que deben mencionarse aquí:

1. Mientras que el cálculo económico está basado en el ahorro de alimentos caros, el efecto de la fertilización con N no está limitado a la estación temprana. El aumento del rendimiento anual es mayor que el temprano.

2. Hay cierta contribución a un aumento general de la fertilidad del suelo (reserva). En varios experimentos donde las parcelas se segaron en vez de pastorearse, hemos observado que las reservas en el segundo año dieron un aumento extra del 15 al 25 % del rendimiento.

3. Si esta mejora se produce sin pastoreo, la respuesta a la fertilización el primer año debe ser mucho mayor cuando se devuelve la orina y el estiércol al suelo, incluso en su superficie. Este aumento lento de la fertilidad, si se utiliza apropiadamente, plantea una pregunta crucial si el granjero decide fertilizar con N el 20 % de la superficie: debe fertilizar la misma área todos los años o debe hacer rotación sobre áreas mayores y volver a la misma parcela después de unos tres o cuatro años. Teóricamente, la rotación de la fertilización parece mucho más factible, pero hasta ahora, los resultados obtenidos a escala comercial no confirman esto.

4. Cambio en la vegetación (*predominio de las gramíneas* como resultado de la fertilización con N). Esto es a menudo un efecto negativo, a no ser que el pastoreo sea lo suficientemente intenso para contrarrestar la dominancia de las gramíneas. He visto muchas parcelas donde la hierba era excelente, pero los animales no tenían buen aspecto, debido a la pobre calidad de los rastrojos herbáceos.

5. Cambio en la vegetación (*predominio de las gramíneas anuales*). Las gramíneas anuales, como *Avena sterilis* L. y *Hordeum ithaburense* Koch, responden a la fertilización más que las perennes, como *Hordeum bulbosum* L. Esto se puede ver en la fig. 1 (de KATZNELSON, 1967). Naturalmente, dominaba el *Hordeum bulbosum*, pero la *Avena* se hizo dominante con la fertilización (véase también PATTERSON & YOUNGMAN, 1960). Esto es, una vez más, un efecto negativo, ya que las hierbas perennes buenas son las

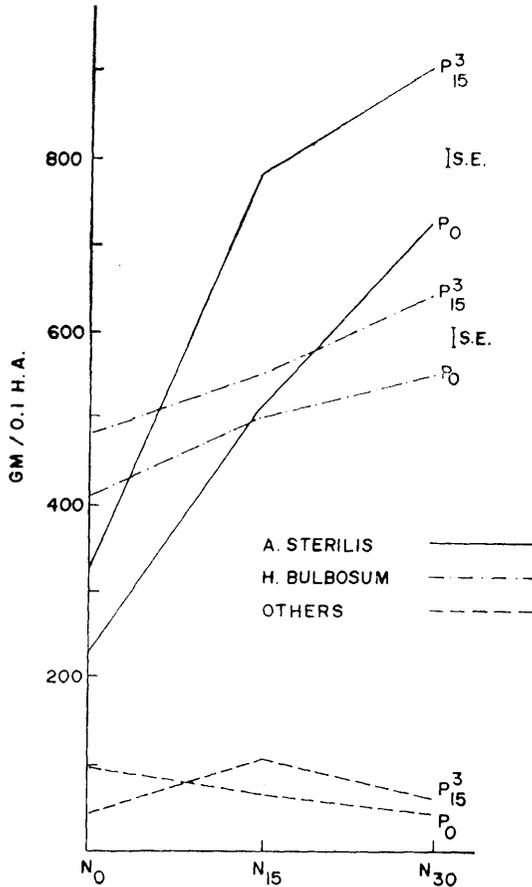


FIG. 1.—Rendimiento en materia verde (por 0,1 Ha.) de *Avena sterilis* (—), *Hordeum bulbosum* (— · —) y otras plantas (- - -), en ensayos de fertilización realizados en Bet Qeshet en 1954. Los subíndices de N y P³ indican Kg. 10,1 Ha. de sulfato amónico y superfosfato triple, respectivamente (según Katznelson, 1967)

más tempranas en iniciar el crecimiento después de las lluvias de otoño, y aunque el rendimiento total de las anuales es a menudo mayor, el valor de la "producción temprana" es casi despreciable.

Hasta ahora nos hemos ocupado de dos sistemas de fertilización que no consideran la optimización tanto de la producción como del beneficio neto. La cantidad de 200 kilogramos de N, aplicados al prado de *Oryzopsis* en el ejemplo dado en el método de *balance* puede no ser el mejor suministro de N. Es rentable, ya que el precio de N en el fertilizante es siempre menor que el valor del alimento con igual cantidad de N. Cuando se expuso el método de ayuda también vimos, en la tabla III, que en la mayoría de los casos el valor pleno del fertilizante se hacía notar alrededor de dos meses después de la aplicación. Esto no significa que 40 u 80 kilogramos de N/Ha. sea la cantidad óptima, sino sólo que aún será rentable la aplicación de cantidades mayores, incluso si la respuesta disminuye. Nos ocuparemos sólo de la optimi-

zación por el tercer método, aunque es aplicable y debe estudiarse en los otros dos.

Mientras que el método de balance considera la cantidad de nutrientes con el forraje y el método de ayuda considera el fertilizante como una posibilidad más barata que su alternativa, el alimento suplementario, el tercer método (*de aumento permanente de la fertilidad*) considera el sistema en conjunto. Está basado en un aumento gradual de la fertilidad, con el consiguiente aumento del número de animales y la reciclación de nutrientes a través de ellos. La economía se basa en este caso en comparar el aumento por la venta de productos animales, más un posible aumento en su producción futura, con el precio del fertilizante empleado. Otros componentes, tales como el interés en las inversiones en fertilizantes, animales y otros factores, así como el aumento del riesgo, también deben tenerse en cuenta. Un factor importante que hay que mencionar aquí es que bajo este sistema debe planearse un ajuste del número de animales al introducir la fertilización. En Portugal y España se desperdicia a menudo el forraje caro, ya que la producción de pastos fertilizados ha aumentado diez veces, pero no existen animales que los utilicen. En conexión con esto debe insistirse en que cuando la respuesta a la fertilización es extremadamente alta, como en España y Portugal, la inversión en animales extra es mucho mayor que en cualquier otro sistema de mejora de los pastos, incluso que la fertilización.

Mientras que el sistema de ayuda se ocupa del N, el aumento de la fertilidad de los pastos está basado normalmente en el fósforo, normalmente con leguminosas + rhizobium como fuente de N, o con fertilizante nitrogenado. La agricultura de Nueva Zelanda, Australia y gran parte de California está basada y depende de este sistema, y esta es la clave del desarrollo de vastas áreas improductivas y a menudo erosionadas en el Mediterráneo, especialmente en la península Ibérica.

Una diferencia importante entre el sistema de ayuda y el de aumento de la fertilidad estriba en la posible pérdida total de la inversión en fertilización con N a causa de condiciones climáticas adversas, incluso en suelos que se sabe que responden muy bien. Esto no ocurre con la fertilización con P. Aquí, *si* en el suelo falta el P, se usará alguna vez y no se perderá en el sistema. El SI es muy importante, ya que hay suelos cuya respuesta al fósforo sólo es nula (véanse tablas II y III). La fertilización a escala comercial debe aplicarse sólo después de conocer la respuesta del ecosistema biológico al fertilizante.

ECOSISTEMA BIOLÓGICO

La respuesta del ecosistema biológico a la fertilización está descrita a menudo por una curva de Mitscherlich, basada en la suposición de que cuando sólo uno de los nutrientes limita el crecimiento, el nivel de aumento del rendimiento por unidad de fertilizante usado en cualquier punto a lo largo de la curva de rendimiento para el nutriente en cuestión es proporcional a la cantidad que se halla por debajo de un límite superior, esto es, la asíntota donde este nutriente no limita el crecimiento:

$$\frac{dy}{dx} = C(A - y)$$

donde y es el rendimiento actual, x es el nivel de nutrientes disponible, A es el rendimiento máximo y C es una constante. Al integrar se obtiene la función de Mitscherlich:

$$y = A(1 - e^{-Cx})$$

donde $y = 0$ (fig. 2). Actualmente, la última suposición se obtiene raramente en los suelos, ya que siempre hay rendimiento aunque no se use fertilizante. Si la respuesta remanente se define por AB , el rendimiento sin fertilizante es $A(1 - B)$. Esto transforma la curva de Mitscherlich en:

$$y = A(1 - Be^{-Cx_f})$$

(x_f = cantidad de nutriente aplicada con el fertilizante).

Los tres parámetros, A , B y C , dependen de varios factores. A depende del clima, fertilidad del suelo y disponibilidad de todos los demás elementos, capacidad de retención de la humedad y aireación del suelo, incidencia de enfermedades y plagas, y de la productividad óptima de la vegetación (o del cultivo específico) bajo condiciones edáficas y climáticas determinadas.

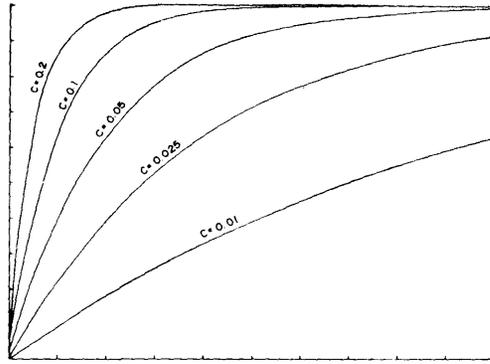


FIG. 2.—Curva de Mitscherlich, $Y = a - e^{-Cx}$ para varios valores de C . $A = 1$, $x = 10$, ..., 100

B depende del nivel intrínseco del nutriente específico ($x - x_f$) cuando se construye la curva, del previo uso del fertilizante, de la necesidad que la vegetación específica tiene del elemento y de su respuesta al mismo; diferentes especies e incluso diferentes cultivares de la misma especie muestran enormes diferencias en estos parámetros. C también depende del tipo de suelo (algunos suelos tienen una gran capacidad de fijación), clase de fertilizante aplicado (el superfosfato se disuelve en agua más fácilmente que el fosfato natural), método de aplicación (incorporación al suelo o a su superficie) y tiempo de aplicación (la disponibilidad del fósforo aplicado se reduce con el tiempo, la fijación del P a las partículas del suelo es de un efecto prolongado). C también cambiará con la especie vegetal.

La fórmula de Mitscherlich se usa comúnmente para la descripción de la

curva de respuesta, pero a menudo no se ajusta, y se han usado otras curvas; CATON (1960) y PESEK (1973) usaron un polinomio:

$$y = a + bx - cx^2$$

para describir la curva de respuesta, mientras que CAMPBELL y KEAY (1970) muestran una técnica flexible para la descripción de la curva de respuesta. Esta es muy a menudo sigmoidea, esto es, hay una inflexión en la curva de respuesta. Las causas de este fenómeno son las siguientes:

1) Algunos suelos son muy pobres en un cierto nutriente, y tienen una capacidad muy grande para su absorción, motivo de que no quede elemento disponible para la planta. Al aumentar la aplicación del fertilizante la capacidad de fijación se reduce y resulta más disponible para la planta. La curva en este caso será sigmoidea si la ordenada representa las unidades de nutriente *aplicado*, y del tipo de Mitscherlich si está en unidades de nutriente *disponible*. Un nutriente típico de esta categoría es el fósforo.

2) La misma inflexión que determina una curva de respuesta sigmoide ocurre cuando en el suelo faltan *dos* elementos, por ejemplo P y S, y ambos se aplican en el mismo fertilizante. En este caso, la curva de respuesta se representa por la función

$$y = A(1 - e^{-C_1x_1})(1 - e^{-C_2x_2}).$$

C_1 y C_2 son las constantes y x_1 y x_2 las cantidades disponibles del primero y segundo mineral, respectivamente. A bajos niveles, tanto de x_1 como de x_2 , la curva es sigmoide (RICHARDS, 1969).

3) La absorción de nutrientes del suelo durante el crecimiento no es necesariamente igual en cantidad. A bajos niveles de P, el elemento absorbido se fijará primeramente en las hojas y el crecimiento vendrá después.

CONSIDERACIONES ECONÓMICAS

Muchos de los conceptos mencionados aquí se explicaron y usaron para *decidir* un modelo para la optimización del uso del fertilizante que se desarrolló recientemente en Australia occidental. Aquí el concepto básico es que el beneficio (π), la *ganancia* neta extra del pasto debida a la fertilización menos sus costes, deben ser máximos. También se debe tener presente que el aumento de la fertilidad, o nivel de P en el suelo, aunque no sea inmediatamente disponible en términos económicos, es un aumento del valor real de la propiedad, que se añade al beneficio a modo de inventario. Si los productos animales extras que se obtienen debido a la fertilización, y las cantidades de fertilizante (en kg.) se llaman Y y X, respectivamente, y sus precios por unidad de peso son P_y y P_x , entonces el beneficio será:

$$\pi = YP_y - XP_x$$

y el beneficio será positivo siempre que

$$\frac{P_x}{P_y} < \frac{Y}{X}$$

Nótese que la primera razón es puramente económica, mientras que la segunda es biológica y tomada como marginal representa la derivada de la curva de respuesta. En el caso de una curva simple (Mitscherlich, polinomio de segundo grado) se puede obtener la maximización del beneficio mediante la obtención del valor de X cuando la primera derivada de la curva de respuesta iguala la relación entre los precios de coste $P_x/P_y (= P)$.

La derivada de la curva de Mitscherlich da ACe^{-Cx} , en su punto óptimo es igual a P . Esto implica entonces que

$$X_{opt} = \frac{\ln(AC/P)}{C} = \frac{\ln A + \ln C - \ln P}{C}$$

Este es el principio básico, pero deben hacerse varias consideraciones para que sea más realista.

1) *Interés en el préstamo o inversión alternativa de capital.* El término de corrección para este factor afecta al factor P , esto es, hace que el precio de inversión (P_x) sea mayor por el posible nivel de interés (R), y el actual P se convierta simplemente en $(1 + R)P$. Para un interés anual del 9% se debe sustituir P por $1,09P$ en los cálculos (fig. 3).

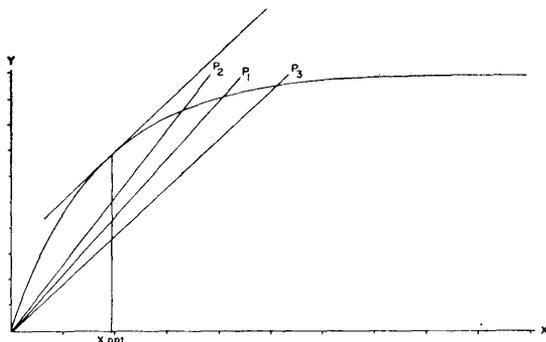


FIG. 3.—Optimización de la aplicación de fertilizante. Curva de Mitscherlich

2) El *riesgo* aumenta normalmente con la inversión. Existen métodos económicos modernos para cuantificar el riesgo, y DILLON (1971) da un ejemplo de esa técnica, pero hasta ahora nuestro conocimiento de la región mediterránea ha sido demasiado escaso para la construcción de "curvas de utilidad" de confianza. La simplificación del factor del riesgo puede llevarse a cabo aumentando P en otra fracción, como en el caso del interés.

3) Algo del fertilizante aplicado se fija en el suelo y no será disponible durante el año en curso, sino más tarde en el futuro, y por eso el valor del pasto aumenta. El conocimiento de la dinámica de la asimilación del P nos permite tratarlo como una inversión que tendrá como efecto la disminución de la razón P . Esto variará en suelos de acuerdo con su capacidad de fijación y los niveles originales de nutriente en ellos. Todo esto puede verse en la figura 3, donde se expone la curva de Mitscherlich

$$y = A(1 - e^{-0.06x})$$

las relaciones P actual y corregida y la aplicación óptima de fertilizante (máximo beneficio). Es obvio que cualquier reducción en P lleva a un aumento en la aplicación óptima de fertilizante.

El mismo principio de optimización del beneficio vale para las curvas sigmoideas. En el caso de una capacidad de fijación muy alta y bajos niveles de nutrientes se absorberá una gran cantidad de fertilizante. He visto casos en Portugal donde 250-400 kilogramos de superfosfato por hectárea saturaban el suelo con P casi no disponible para las plantas, aumentaba el nivel de P en las hojas, pero apenas afectaba el rendimiento. El aumento de éste era grande cuando el nivel de fertilizante excedía los 500 kg./Ha. Un caso como este se muestra en la figura 4, en la función 1. Aquí el beneficio (rayado verticalmente) no comienza a bajos niveles de x, pero puede maximizarse. Sin embargo, en el caso de la función 2, cualquier aplicación de fertilizante será una pérdida total, al menos normalmente. Grandes áreas de la península Ibérica están en este caso.

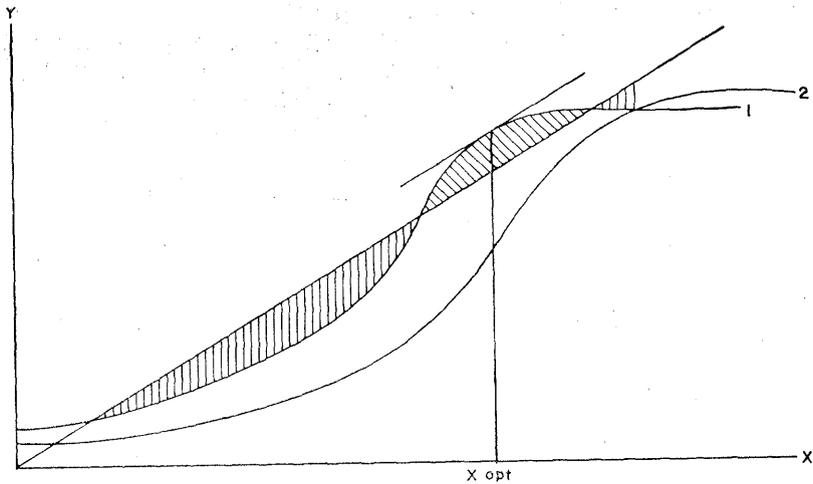


FIG. 4.—Optimización de la aplicación de fertilizante. Curva sigmoide

Sin embargo, se puede considerar la fertilización primaria fuerte como una inversión básica, siempre que después de ésto la curva de respuesta sea más pendiente (aumento de C_1) y más rápida (maximización de C_2X_2). Además la relación P puede disminuir en el futuro. Planteo la sugerencia de que el fósforo puede considerarse más barato para colmar la capacidad de fijación del suelo, aunque no sea disponible por las plantas. El fósforo en fosfato natural finamente molido cuesta menos de la mitad del precio del superfosfato. La línea de la relación P de la figura 4 será mucho más baja y la posterior fertilización con superfosfato será más rentable. Esto es aplicable en los suelos ácidos y muchos de los Ibéricos centrales son ácidos y muy pobres en fósforo.

Además, debería tenerse más cuidado con A. La productividad potencial depende no sólo del nutriente específico, sino de casi todos los factores que se pueden pensar.

La construcción de curvas de respuesta en fincas y tierras de pastos requiere un estudio intensivo del suelo, vegetación, clima y años. Aunque comencé esta ponencia diciendo que en las tierras sin cultivar no se puede depender del análisis químico del suelo, como en las tierras arables y con cultivos conocidos, cualquier información adicional nos llevará eventualmente a un uso de la tierra correcto y óptimo, así como de los animales y fertilizantes, y contribuirá a la economía de la región y al bienestar humano en general.

BIBLIOGRAFIA

- (1) CAMPBELL, N.A., and KEAY, J., 1970: Flexible techniques in describing mathematically a range of response curves of pasture species. *Proc. 1 Int. Grassland Congress*. Surfers Paradise, pp. 332-334 Univ. Queensland press St. Lucia.
- (2) CATON, D.D., 1960: A method for selecting profitable levels of fertilization of range grass. *Proc. 8th Int. Grassland Congr.* Reading, pp. 673-675.
- (3) DILLON, J.L., 1961: Interpreting systems simulation output for managerial decision-making. In: *Systems Analysis in Agricultural Management*. (J.B. Dent and J.R. Andersen, Eds.) John Wiley and Sons, Australasian Pty. Ltd., Sydney.
- (4) KATZNELSON, J., 1967: Fertilization Trials on Perennial Grasses. *Pamph. Nat. Univ. Inst. Agric., Rehovot*, 119.
- (5) KATZNELSON, J., 1970: The edaphic adaptation of some closely related clovers. *Oecologia Pl.*, 4, 211-224.
- (6) KATZNELSON, J., 1971: Chemical composition of indicator plants grown in soil from the Golan Plateau. In: *The characteristics, distribution, fertility and land use of soils of the Golan Plateau*. (A. Feigin and J. Katznelson, Eds.) *Spec. Publ. Volcani Inst. Agric. Res. Bet Dagan*. 12 (Hebrew, with English summary).
- (7) KATZNELSON, J., 1972: Chemical contents of clover leaves grown on different soils. *Oecologia Pl.* 7: 262-376.
- (8) KATZNELSON, J., and ILAN, S., 1970: Fertilization trials in the Golan. *Hassadeb* 50: 1379-1380 (in Hebrew).
- (9) KATZNELSON, J., and PUTIEVSKY, E., 1972: Fertilization of natural range in the Upper Galilee and the Golan Plateau. *Hassadeb* 52: 1040-1043, 1139-1140. (in Hebrew).
- (10) OFER, Y., and SELIGMAN, N.G., 1960: Fertilization of annual range in northern Israel. *J. Range Mgmt.*, 22: 337-341.
- (11) PATTERSON, J.K., and YOUNGMAN, Y.E., 1960: Can fertilizers effectively increase our range land productions. *J. Range Mgmt.*, 13: 255-257.
- (12) PESEK, J.T., 1973: Crop yield response equations and economic levels of fertilizer use. *Sem. de etude pont. Acad. Sci. Script. varia*. No. 38, 2: 881-955.
- (13) RICHARDS, F.J., 1960: The quantitative analysis of growth. In: *Plant Physiology* (F.C. Steward, Ed.), Vol. V, Academic Press, N. Y.
- (14) T'HART, M.L., 1960: Possibilities for increasing grassland productivity with nitrogen fertilizer in European agriculture. *Proc. X int. Grassland Congress Helsinki*, 36: 44.

ECONOMIC ASPECTS OF FERTILIZER APPLICATION IN NATURAL AND SOWN DRYLAND PASTURES

SUMMARY

The use of fertilizers in Mediterranean rangelands and dryland pastures has been reviewed. Three approaches to fertilization have been described: *a*. The balance approach, usually used on non-grazed pastures, in which the nutrient is applied according to its exhaustion from

the ecosystem by the crop. *b.* The boosting approach, in which N fertilizer is used to reduce the "bottleneck" of lack of animal feed in rangeland in autumn and early winter, and save expensive supplementary feeding, such that the added fertilizer costs less than the extra feed saved. *c.* A fertility increase approach, whereby fertilization aims at increasing the productivity of pastures, which will result in parallel increases in the herd and in the sale of animals. In many areas fertilization is a prerequisite for successful pasture seeding.

Response curves to fertilization were dealt with, describing a Mitscherlich curve and some deviations from it which result in a sigmoid curve. Concepts of profit from fertilization were discussed and fitted to various response curves, equating their first derivatives to the ratio between cost of fertilizer, Px' , and price of final product, Py' . Cases where fertilization is uneconomical were analyzed.