

Centro Interamericano de
Documentación e Información
Agrícola

15 ENE 1988

CIDIA
Turrialba, Costa Rica

Conceptos metodológicos sobre investigación y desarrollo de tecnología para sistemas de producción de cultivos



VOLUMEN II

CONTENIDO

	<u>Página</u>
PRESENTACION.	i
I Conceptos básicos sobre análisis del crecimiento de las plantas.	
<i>José Fargas</i>	1
II Ciclos Biogeoquímicos importantes.	
<i>Carlos Burgos</i>	8
III Diseño de opciones tecnológicas suelos: Ciclo hidrológico.	
<i>Marciano Rodríguez</i>	21
IV Caracterización de suelos (Fertilidad).	
<i>Marciano Rodríguez</i>	54
V Cómo llenar los requerimientos nutricionales en sistemas de cultivos intensivos.	
<i>Carlos Burgos</i>	61
VI Técnicas de laboratorio e invernadero para evaluar la fertilidad del suelo mediante el método del elemento faltante y/o aditivo.	
<i>Roberto Díaz-Romeu</i> <i>Humberto Rodríguez Fuentes</i> <i>Gerardo Cedeño Vega</i>	65
VII El uso de la Microparcela como método de apoyo para evaluar la fertilidad del suelo.	
<i>Humberto Rodríguez Fuentes</i> <i>Roberto Díaz-Romeu</i>	92
VIII Análisis de experimentos factoriales 3^2 para usarse en ensayos de fertilización. Teoría y ejemplos.	
<i>Humberto Rodríguez Fuentes</i> <i>Roberto Díaz-Romeu</i>	102

PRESENTACION

El presente documento, constituye uno de los tres volúmenes que fueron elaborados como material de apoyo educativo para el curso "Investigación y desarrollo de tecnología para sistemas de producción de cultivos". Su preparación se basa en las contribuciones técnicas realizadas por los especialistas del Departamento de Producción Vegetal del CATIE y profesores invitados.

El curso es realizado por el Departamento de Producción Vegetal, con base en la planificación y programación de los proyectos de "Capacitación Agropecuaria en el Istmo Centroamericano" y "Sistemas de Producción para fincas pequeñas", financiados por la Fundación W.K. Kellogg y el Fondo Internacional de Desarrollo Agropecuario (FIDA) respectivamente.

En este volumen se presenta el aporte técnico de cada conferencista sobre el componente del cual es especialista; de tal forma, que la totalidad de ellos explique el funcionamiento de un determinado sistema.

Las presentaciones de cada técnico han sido sometidos a una revisión editorial parcial, y durante el desarrollo del tercer curso (8 de Agosto al 30 de Octubre de 1985) se realizará las correcciones y ampliaciones del caso con la ayuda de los participantes. Posteriormente será editado para su publicación final, con el objeto de tener un material educativo para el estudio y desarrollo de la tecnología agrícola en el trópico.

Proyecto "Capacitación Agropecuaria"
CATIE/W. K. KELLOGG.

CONCEPTOS BASICOS SOBRE ANALISIS DEL
CRECIMIENTO DE LAS PLANTAS

J. Fargas

Las plantas superiores mediante la fotosíntesis son capaces de fabricar su propio cuerpo. Los órganos más importantes para este proceso son las hojas y su capacidad de producir carbohidratos no solamente depende de su superficie sino también de su eficiencia.

Cada especie o cultivar, tiene su forma característica (distribución de biomasa), lo cual prueba la existencia de controles internos genéticos sobre la distribución de los productos de la fotosíntesis. Por otra parte, los factores ambientales influyen, hasta cierto punto, la expresión genética de la forma modificando los patrones de crecimiento característico de cada cultivo.

La forma y proporciones que adquiere una planta a través de las diferentes etapas del desarrollo son pues una expresión de la interacción entre factores genéticos (internos) y ambientales (externos).

Cuando un cultivar crece durante su ciclo de vida en condiciones climáticas favorables, su patrón de crecimiento y rendimiento refleja con mayor aproximación el potencial genético de dicho cultivar en distribuir biomasa. Cuando los factores ambientales no actúan a niveles óptimos, los patrones del crecimiento se modificarán en relación al patrón óptimo, en una magnitud que dependerá del grado de tolerancia que el cultivar tenga al o a los factores que han llegado a niveles críticos, limitando su crecimiento. Mediante el análisis de crecimiento es posible cuantificar y evaluar el efecto del ambiente en el crecimiento de los cultivos.

Análisis del Crecimiento

Es la descripción matemática del crecimiento de las plantas o sus órganos durante el ciclo de vida. En este análisis se emplean una serie de ecuaciones que al ser aplicadas correctamente dan valores que representados por curvas permiten visualizar el efecto de factores ambientales (o genéticos) sobre el crecimiento y rendimiento de los cultivos. Este efecto puede ser detectado tanto en aspectos morfológicos como fisiológicos del crecimiento de las plantas.

Para estos estudios se considera el crecimiento como aumento irreversible de materia seca o peso seco. Al peso seco de una planta o de sus partes se lo llama producción biológica o biomasa la cual incluye también la parte comercial del cultivo (granos, raíces, hojas, fibras, etc.) aunque a veces a esta porción de la biomasa se la llama producción agronómica o económica.

Los datos básicos para análisis del crecimiento de plantas individuales, que posteriormente se aplicarán en las ecuaciones, son pesos de la planta entera o de sus órganos y área foliares, tomados a intervalos regulares, durante el ciclo de vida o al finalizar éste.

Para el caso de cultivos (poblaciones) los pesos secos deberán expresarse por unidad de superficie (generalmente por m²) y las áreas foliares como Índice de Área Foliar (IAF) que consiste en la relación entre la superficie total del follaje de una planta de la comunidad (variable a través del tiempo) y la superficie de terreno que le corresponde a esa planta (estable, y en relación con la densidad de siembra).

Los índices o parámetros empleados en el análisis de crecimiento, además de ser clasificados de acuerdo a si se aplican a individuos o poblaciones (cultivos) también pueden clasificarse de acuerdo a si sirven para describir un proceso fisiológico (componente fisiológico del crecimiento) o simplemente describen un estado de distribución de la biomasa en el organismo de la planta en un momento dado (componente morfológico del crecimiento).

Los índices utilizados en análisis del crecimiento son numerosos según puede verse en la literatura (Evans, Sestak, Steward, etc.). Nosotros comentaremos solamente los de uso más generalizado.

Modelo de Crecimiento Vegetal

Para células vegetales libres, en ambientes favorables, el crecimiento es potencialmente ilimitado y principia con un modelo de crecimiento exponencial (logarítmico). Sin embargo, cuando estas células están agrupadas constituyendo un organismo, la interacción entre individuos impone limitaciones al crecimiento por lo que su curva, habiendo sido durante un tiempo de tipo exponencial, al finalizar su ciclo de vida cambia de dirección tomando en una forma sigmoidal.

Durante la fase exponencial del crecimiento de las plantas superiores su progresivo incremento en materia seca es análogo a la acumulación de capital a interés compuesto continuo. El embrión representa el capital inicial mientras que la eficiencia fotosintética determina el interés.

Si el peso inicial de la planta es PS_0 y la tasa de interés compuesto es r el peso total después de un tiempo t será:

$$PS_t = PS_0 e^{rt} \quad (PS = \text{Peso Seco})$$

Esta ecuación fundamental describe muchos fenómenos naturales en que la tasa de aumento de una determinada cantidad de peso varía de acuerdo a la magnitud dicha cantidad misma.

Esta relación entre crecimiento y tiempo es más conveniente usarla en la forma

$$\ln PS_t = \ln PS_0 + rt \ln e$$

Esta forma logarítmica es simplemente la ecuación de una línea recta graficada en un papel semilogarítmico. La pendiente está determinada por r , que es la tasa de interés y que representa la capacidad de la planta de agregar peso a su propio peso lo cual es llamado actualmente Intensidad de Crecimiento Relativo (ICR ó RGR en Inglés)*. En la ecuación anterior e es la constante

* Llamado Índice de Eficiencia por Blackman (1919). La línea sobre ICR indica que se trata de valores promedios.

(2,7182) derivada del teorema binomial) y que recuerda al matemático Euler, y como $\ln e = 1$ podemos también escribir:

$$\ln PS_t = \ln PS_0 + rt$$

La ICR que es r puede ahora ser determinada a partir de datos del crecimiento de las plantas muestreando en dos ocasiones (t_1 y t_2) y sustituyendo en la ecuación estos valores tenemos:

$$\overline{ICR} = \frac{\ln PS_2 - \ln PS_1}{t_2 - t_1} \quad (\text{g/g/ut})^* \quad (1)$$

que representa el aumento en peso por unidad de peso original durante un intervalo $t_2 - t_1$. Esta fórmula puede aplicarse también para estudiar el crecimiento de raíces, frutos y otros órganos de las plantas.

Posteriormente Gregory (1917, 1926) reconoció la importancia del incremento en área foliar en un intervalo para determinar el crecimiento en términos de superficie foliar y dió origen al parámetro que llamó Intensidad de Asimilación Neta (IAN ó NAR en inglés).

$$\overline{IAN} = \frac{PS_2 - PS_1}{t_2 - t_1} \times \frac{\ln AF_2 - \ln AF_1}{AF_2 - AF_1} \quad ** \quad (\text{g/dm}^2/\text{ut}) \quad (2)$$

que representa el aumento en materia seca en toda la planta por unidad de área foliar en el intervalo considerado. Este término por lo tanto representa eficiencia fotosintética.

Otro parámetro muy usado es la Intensidad de Crecimiento Relativo del Area Foliar (ICRF ó RLGR en inglés).

$$\overline{ICRF} = \frac{\ln AF_2 - \ln AF_1}{t_2 - t_1} \quad (\text{dm}^2/\text{dm}^2/\text{ut}) \quad (3)$$

que representa el incremento en área foliar por cada unidad de área foliar ya existente.

Los tres parámetros ya mencionados \overline{ICR} , \overline{IAN} y \overline{ICRF} estiman componentes fisiológicos del crecimiento.

Los parámetros para medir componentes morfológicos del crecimiento, llamados también parámetros morfogenéticos son principalmente razones o relaciones entre la materia seca de alguna parte de la planta (o área foliar) y

* ut = unidad de tiempo, generalmente por semana.

** AF = Area Foliar

la materia seca total de esta misma planta (o de algún órgano específico), tomándose ambos datos en un mismo tiempo o edad del cultivo que frecuentemente es al finalizar su ciclo.

El objetivo principal de estos parámetros es revelar cómo la planta distribuye su biomasa a través del tiempo o en relación con el área foliar.

Los parámetros morfogenéticos más comunes son:

Razón de peso foliar (RPF) (LWR)

$$RPF = \frac{PS \text{ del follaje}}{PS \text{ total planta}} \quad (g^h/g^t)^* \quad (4)$$

indica qué proporción de la biomasa está invertida en follaje (hojas)

Razón de área foliar (RAF) (LAR)

$$RAF = \frac{\text{Area foliar total}}{PS \text{ total planta}} \quad (dm^2/g) \quad (5)$$

indica cuánta área foliar corresponde a cada grano de materia seca de la planta.

Area foliar específica (AFE) (SLA)

$$AFE = \frac{\text{Area foliar total}}{PS \text{ del follaje}} \quad (dm^2/g) \quad (6)$$

indica el grosor de la hoja

Indice de Area Foliar (IAF) (LAI)

$$IAF = \frac{\text{Area Foliar total de una planta } (dm^2)}{\text{Sup, del suelo ocupada por una planta } (dm^2)} \quad (7)$$

indica la proporción entre la superficie del follaje y la del suelo ocupado por la planta.

Razón de Peso Radical (RPR) (RWR)

$$RPR = \frac{PS \text{ de raíces}}{PS \text{ total planta}} \quad (g^r/g^t)^* \quad (8)$$

indica qué proporción de biomasa está invertida en raíz

Razón de Peso Comercial o Índice de cosecha K

$$K = \frac{P.S. \text{ parte comercial}}{P.S. \text{ total planta}} \quad (g^e/g^t)^* \quad (9)$$

* g^h = gramos de hoja; g^r = gramos de raíz; g^t = gramos de peso seco total
 g^e = gramos de órganos económicos

indica la proporción de biomasa que la planta ha invertido en el órgano comercial

REFERENCIAS

1. EVANS, G.C. The quantitative analysis of plant growth. Berkely, University of California Press, 1952. 734 p. (581.134. E 92)
2. HUGHES, A.P. y FREEMAN, P.P. Growth analysis using frequent small harvests. *Journal of Applied Ecology* 4, 553-560. 1967.
3. RADFORD, P.J. Growth analysis formulae. Their use and abuse. *Crop Science* 7(3): 171-175. 1967.
4. SESTAK, Z., CATSKY, J. y JARVIS, P.G. eds. Plant photosynthetic production. Manual of methods. Junk, N.V. The Hague, 1971. (581.133. S 494) Cap. 10.
5. STEWARD, F.C. ed. Plant physiology, A treatise. New York, Academic Press. 1969. vol. 5A.

LITERATURA CITADA

1. ASHLEY, D.A., B.D. & BENNETI, O.L. Relation of cotton leaf area index to plant growth and fruting, Agron. J. 57: 61-14. 1965.
2. AWATRAMANI, N.A. & GOPALAKRISHNA, H.K. Measurement of leaf area. I - *Coffea arabica*. *Indian Cofeea.* 29: 25-30. 1965.
3. BARROS, R.S., MAESTRI, M., VIEIRA, M. & BRAGA FILHO, L.J. Determinacao de área de folhas do café (*Coffea arabica*), L. Cv" Bourbon Amarelo". Rev. Ceres. 20: 44-52, 1973.
4. BENINCASA, M.M.P., BENINCASA, M., LATANSE, R.J. & JUNQUETTI, M.T.G. Método nao destrutivo para estimativa da área foliar de *Phaseolus vulgaris*, (Feijoeiro). Científica. 4: 43-8, 1976.
5. BOYNTON, D. & HARRIS, R.W. Relationships between leaf dimension, leaf area and shoot lenght in McIntosh Apple, Elberta Peach and Italian Prune. Proc., Amer. Soc. Hort. Sci. 55: 16-20. 1950.
6. CHAUDHURI, B.B. & PATRA, A.P. Note on a rapid method od determining leaf area in tossa jute (*Corchorus oliatorius*, L.) Ind. J. Agrac. Sci. 42: 1142-3, 1972.
7. FREEMAN, G.H. & BOLAS, B.D. A method of rapid determination of leaf area in the fiel. In: MILTHORPHE, F.L. (ed). The growth of leaves. London, Butterworths Scientific Publication; 1956. p. 199.
8. GOMES, J., BENINCASA, M.M.P. & SANTOS, J.M. Método nao destrutivo para a estimativa da área foliar do sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). In: Reuniao Anual da SBPC, 26: Sao Paulo, 1974. p. 556 (Resumos)

9. HUERTA, S.A. Comparación de métodos de laboratorio y de campo para medir el área foliar del cafeto. Conicafé. 13: 13-42. 1962.
10. KARIKARI, S.K. Estimation of leaf area in papaya (*Carica papaya*) from leaf measurements. Trop. Agric. England. 50: 346, 1973.
11. KEMP, C.D. Methods of estimating the leaf area of grasses from linear measurements. Ann. Bot. N.S., 24: 491-99. 1960.
12. KVET, J. & MARSHALL, J.K. Assessment of leaf area and other assimilation plant surfaces. In: SESTAK, Z., CATSKY, J. & JARVIS, P.G. (ed). Plant photosynthetic production-Manual of methods. The Hague, JUNK. N.V. Publishers, 1971. p. 517-55.
13. LAL, K.N. & SUBBARAO, M.S. A new formula of estimation of leaf area in barley. Sci. Cult. 15: 355-6, 1950.
14. MARQUES, E.S. & RODRIGUEZ, E.M. A estimativa de área foliar do cacauieiro (*Theobroma cacao*, L.) baseada nas dimensoes da folha. Boletín Técnico do Instituto de Pesquisa e Experimentação Agropecuária do Leste. Cruz das Almas, Bahia. 9: 5-20. 1966.
15. OLIVIRA, J.P. de. Método não destrutivo para determinação da área foliar do feijoeiro caupi, *Vigna sinensis* (L.) Savi. cultivado em casa de vegetação, Cien. Agron., Fortaleza. 7:53-7. 1977.
16. SPENCER, R.A. rapid method for estimating the leaf area of cassava (*Manihot utilissima*, Phol.) using linear measurements, Trop. Agric. 39: 147-52. 1962.
17. WINTER, E.J., SALTAR, P.J., STANHILL, G. & BLEASDALE, J.K. A measurement of leaf area, some methods of measuring leaf area. In: MILTHORPHE, F.L. (ed). The growth of leaves, London, Butterworths Scientific Publications, 1956. p. 195-7.

Cuadro 1. Valores de los índices usados para el estudio del crecimiento y eficiencia fotosintético del frijol
 "Turrialba-4" a diferentes períodos de su crecimiento (promedio de cinco plantas).

Períodos (Días)	PST	PS Fr	AF	ICR	ICRF	Parámetro alfa	IAN	IAF	RPF	RAF	AFE	PSH
0 - 13	0,60		1,31									0,34
13 - 20	1,98		5,14	1,20	1,30	0,92	0,50	0,25	0,64	2,59	4,01	1,28
10 - 27	6,18		14,88	1,13	1,06	1,06	0,43	0,74	0,63	2,40	3,78	3,93
27 - 34	14,46		40,89	0,81	1,01	0,80	0,33	2,04	0,58	2,30	4,80	8,51
34 - 41	49,29	9,00	105,30	1,25	0,95	1,31	0,52	5,26	0,47	2,13	4,50	23,36
41 - 48	79,85	11,36	142,50	0,48	0,30	1,60	0,24	7,12	0,41	1,78	4,35	32,78
48 - 55	96,08	30,29	141,00	0,19	-0,01	-19,00	0,07	7,05	0,31	1,40	4,62	30,50
55 - 62	154,74	69,60	140,44	0,47	-0,01	-47,00	0,73	7,02	0,25	0,90	3,57	39,24
62 - 69	163,07	88,25	138,15	0,05	0,01	- 5,00	0,05	6,90	0,17	0,84	4,73	29,20
Promedio semanal				0,69	0,58		0,35		0,43	1,79	4,29	

Promedio diario				0,10	0,08		0,05		0,06	0,25	- ,61	
--------------------	--	--	--	------	------	--	------	--	------	------	-------	--

- PST = Peso seco total planta entera (g)
- PSH = Peso seco de hojas (g)
- PS Fr = Peso seco de frutos (g)
- AF = Area foliar (dm²)
- ICP = Índice de crecimiento relativo (g/g/semana)
- ICRF = Índice de crecimiento relativo del área foliar (dm²/dm²/semie)
- Parámetro alfa = Parámetro alfa (ICR/ICRF)
- IAN = Índice de asimilación neta (g/dm²/sem)
- IAF = Índice de área dm² hojas/dm² suelo)
- RPF = Razón de peso foliar (g hojas/g totales)
- RAF = Razón de área foliar (dm² hojas g/totales)
- AFE = Area foliar específica (dm² hoja/g hoja)

CICLOS BIOGEOQUÍMICOS IMPORTANTES

C. Burgos

Los ciclos que se presentarán ilustran los seis ciclos biogeoquímicos más importantes. Los elementos involucrados son la materia prima de la vida.

Estos están disponibles en cantidades limitadas y por lo tanto deben ser recirculados constantemente por las fuerzas físicas y biológicas que existen en el ecosistema.

Ciclo hidrológico

En muchas partes de la biosfera el agua es también un elemento vital muy escaso, convirtiéndose así en un factor limitante. La abundancia o falta de agua, determina el patrón de vida. Es por esto que los agrónomos entendamos como circula el agua a través de la biosfera.

El diagrama proyectado muestra dos conceptos básicos:

1. El patrón cíclico del agua a través de la biosfera y las fuerzas que lo causan.
2. Dónde y cómo es utilizada y almacenada el agua.

El patrón cíclico

El ciclo hidrológico no es uno solo, sino que está compuesto de muchos sub-ciclos, en el diagrama se indican dos.

El vapor de agua se origina de la transpiración y evaporación de las plantas. Se eleva en el aire en corrientes convencionales, se forma en nubes y condensa hasta que la fuerza de gravedad le causa caer al suelo en forma de lluvia, nieve o granizo, dependiendo de la temperatura. Algo de esta precipitación entra al suelo, es tomada por las plantas y está lista para comenzar el ciclo otra vez. Una parte de la precipitación no entra en el suelo saturado ya y en la forma de escorrentía encuentra su camino en riachuelos, ríos, lagos y océanos. La escorrentía forma parte de otro ciclo. Se evapora de la superficie de los cuerpos de agua, es levantado y finalmente se precipita hacia la tierra. Una parte de esta agua forma escorrentía y retorna para reiniciar el ciclo, el agua puede caer sobre el océano del cual se evapora.

Los ciclos descritos son cortos, muchos son más largos. Cuando la precipitación se congela en las capas polares puede ser retenida por miles de años.

Otro caso es el del agua que penetra en el suelo y que no es tomada por las plantas, pero que se filtra hasta que llega a una capa impermeable sobre la cual se mueve más o menos lateralmente hasta que encuentra salida. El agua puede permanecer en esta capa porosa o acuífero por mucho tiempo antes de que llegue a la superficie por las fuentes, lagos y océanos para evaporarse e iniciar un nuevo ciclo.

<u>Dónde está el agua</u>	<u>% del agua del mundo</u>
Agua salada del océano.	97 %
Hielo permanente y nivel.	2,1 %
Cuerpos de agua dulce, organismos vivos, acuíferos y la atmósfera.	menos que 1,0 %

El hecho que menos del 1% del agua en el ciclo hidrológico está en forma de agua fresca descongelada, el tipo de agua que bebemos, usamos en procesos industriales y utilizamos para producir nuestros alimentos es mostrado por la presentación. Es por esto que el agua tiene mucho valor y contaminar es peligroso.

Ciclo del oxígeno

El conocimiento de la producción, uso y circulación del oxígeno es importante para entender y confrontarse a problemas ambientales.

Producción

El término oxígeno en la proyección representa el oxígeno gaseoso libre en la atmósfera y que constituye alrededor del 21% del volumen total.

Se puede notar que hay solo una fuente de oxígeno y cuatro procesos de consumo. La única fuente significativa proviene de las plantas verdes durante el proceso de la fotosíntesis.

Hay otra fuente natural del oxígeno y es la descomposición del vapor de agua por la radiación ultravioleta, pero esto contribuye con el 0.001 del total y es por lo tanto sin importancia excepto que fue la única fuente antes que las plantas evolucionaran.

El fitoplankton produce alrededor del 70% del oxígeno libre.

Consumo

Hay cuatro procesos de consumo de oxígeno: respiración, combustión, oxidación mineral y respiración animal.

El oxígeno reacciona con todos los otros elementos es un proceso llamado oxidación. Esto explica el porqué la mayoría de los minerales de la tierra existen en la forma de óxidos. Por esto, el oxígeno constituye el 50% de la corteza terrestre.

Combustión

Quando la oxidación ocurre rápido y produce calor, se le llama combustión. El hombre oxida los combustibles para calefacción, producir energía eléctrica y propulsar los medios de transporte. En este proceso se consumen grandes cantidades de oxígeno.

Respiración de las plantas

Ocurre durante la noche o cuando no hay luz solar suficiente para la fotosíntesis.

Respiración animal

Oxidación de azúcares en las células.

Circulación de oxígeno

El fitoplankton, árboles y minerales y fuego producen entre otras cosas, CO_2 y H_2O . El CO_2 es requerido por las plantas pero el agua es la continuación más directa del oxígeno. El agua se condensa, cae al suelo, es tomada por las raíces y la energía lumínica la divide en hidrógeno y oxígeno durante la fotosíntesis.

El oxígeno en exceso y no requerido por las plantas es liberado a la atmósfera de donde puede continuar con el ciclo. En la noche cuando no hay luz, el oxígeno libre es absorbido por las plantas para respirar.

Estos ciclos están muy interrelacionados. Carbón y oxígeno están bien entrelazados.

Ciclo del carbono

Productores y consumidores. El bióxido de carbono es el vehículo primario para recircular carbono a través de la biosfera. Este compuesto es un gas a temperaturas normales y compone el 0.03% de la atmósfera. El bióxido de carbono es absorbido directamente del aire por las plantas verdes terrestres mediante las hojas. También es absorbida por el agua donde puede crear iones de bicarbonato que puede difundir en plantas acuáticas. Todas las plantas verdes usan bióxido de carbono en combinación con agua y luz solar para formar compuestos de carbón (carbohidratos) que son construídos en proteínas y protoplasma. El proceso es conocido como fotosíntesis.

Mientras que los animales comen las plantas algo del carbón ingerido es usado para formar tejido animal y algo es oxidado para producir energía. Este proceso de respiración produce bióxido de carbono que es liberado a la atmósfera o medio acuático, donde es disponible para las plantas y completar el circuito. Las plantas también oxidan compuestos que contienen carbono y liberan bióxido de carbono.

Como descomponentes

Cuando la planta o el animal mueren, los microorganismos (descomponedores) en el suelo quiebran los compuestos de carbono en los tejidos muertos y liberan bióxido de carbono para ser recirculado.

Rutas geológicas

Las otras dos rutas que el carbón puede tomar pueden seguirse en la transparencia. Ambas pueden tomar el elemento fuera de circulación por un período muy largo.

Cuando muchos animales acuáticos mueren, sus conchas y esqueletos son depositados en el fondo del océano en tales cantidades que ellos forman eventualmente una capa muy gruesa de roca de carbonato. Otro tipo de roca (caliza) se forma del sedimento el cual es una mezcla de arcilla y CO_3Ca producida durante la fotosíntesis por ciertas plantas acuáticas que crecen en aguas alcalinas. Estas rocas sedimentarias cuando son expuestas a la atmósfera millones de años después, debido a procesos geológicos liberan CO_2 por la acción química que estaban reteniendo y el ciclo se completa una vez más.

En cierta época, especialmente durante el período geológico Pennsylvania (hace 250 millones de años) había vastos pantanos. Muchas generaciones de plantas y animales al morir se hundieron al fondo y fueron enterrados por sedimentos subsiguientes. La acción de bacteria, calor y presión gradualmente convirtieron estos sedimentos en lo que ahora llamamos hulla. El petróleo fue formado de manera similar. Estos combustibles fósiles como se les llama ahora, descansan allí manteniendo su fuente de carbón hasta que el hombre descubrió que no solo eran combustibles solamente y que proporcionaban energía sino que eran más abundantes que los combustibles que utiliza el hombre hasta esa fecha. Cuando los fósiles son quemados, estos producen CO_2 que fue absorbido por las plantas hace millones de años.

El hombre quema tanto combustible ahora, que ha aumentado mediblemente el CO_2 de la atmósfera, debido a que el ciclo del carbono ha sido siempre muy bien balanceado (producción igual al consumo), muchas autoridades están preocupadas por los efectos que pueda tener el desbalance de ese equilibrio.

Ciclo de nitrógeno

En la transparencia el término nitrógeno gas se refiere al nitrógeno libre en la atmósfera, el cual constituye alrededor del 78% del volumen total de la atmósfera. En su estado gaseoso, el nitrógeno no se combina fácilmente con otras sustancias. No puede ser absorbido directamente por las plantas pero sirve como medio de transporte y un reservario grande para el ciclo.

Procesos orgánicos

Las formas de nitrógeno que pueden ser usadas por las plantas son nitritos y nitratos. Estos son compuestos que contienen nitrógeno, oxígeno y otro elemento tal como amoniam y potasio. Los compuestos del nitrógeno son producidos de varias formas tal como se indica en la lámina transparente.

En el suelo existen ciertos organismos que fijan nitrógeno (bacterias), que son capaces de convertir amoniaco a nitritos y nitratos. Una vez el nitrógeno está en forma de nitratos puede tomar uno de tres caminos;

1. Otro tipo de bacteria es capaz de denitrificación que es la acción sobre nitratos para liberar nitrógeno libre hacia la atmósfera. En este caso el ciclo se cierra pero no ha involucrado una planta o animal superior.
2. Los nitratos pueden ser lavados hacia abajo en el subsuelo por condiciones muy húmedas. Estos están fuera del alcance de las plantas y

eventualmente serán disueltas en el agua del suelo y acarreadas al océano. Depositados como sedimentos, ellos permanecerán sin uso por un período muy largo.

3. El camino de más significado para nosotros es en el cual los nitratos son tomados por el suelo a través del sistema radical de las plantas verdes. En esta manera el nitrógeno se pone para que pueda combinarse con otras sustancias para formar aminoácidos. A través de la síntesis de proteína, una serie de reacciones complejas, los aminoácidos son ordenados en varias clases de proteína una estructura importante y funcional de todas las cosas vivas. Solamente las plantas pueden hacer proteína, por lo tanto los animales deben obtener su abastecimiento comiendo plantas u otros animales.

En este tercer camino encontramos al nitrógeno atrapado en la proteína de los organismos vivos. Completa el ciclo cuando los excrementos del animal o los tejidos muertos de la planta o animal son descompuestos por bacterias las cuales descomponen la proteína en amoníaco para que otras lo cambien a nitritos y nitratos.

Procesos inorgánicos

Hay varias otras maneras que el nitrógeno puede ser convertido en una forma utilizable por las plantas verdes. Son métodos industriales para combinar hidrógeno con nitrógeno para producir amoníaco; el cual puede ser aplicado directamente al suelo como fertilizante. Otros procesos industriales pueden producir nitratos directamente y estos pueden añadirse al suelo cuando se requiere nitrógeno adicional.

Ciclo del fósforo

Ciclo simple

El ciclo básico del fósforo es relativamente simple. El fósforo disuelto en el suelo es absorbido por las raíces de las plantas. Varios pasos suceden y el fósforo en la forma de ácido fosfórico se combina con un azúcar y una base para formar nucleótidos. Estos son sustancias muy importantes. Una de ellas la Adenina trifosfato (ATP), funciona como una batería acumuladora para energía requerida por organismos vivientes para todas sus funciones.

El ácido nucleico (RNA, DNA) realiza la función vital de transmitir información genética o hereditaria y controlar la síntesis de proteína.

El fósforo está presente en la membrana celular donde ayuda en la función de osmosis, el proceso de difusión a través de una membrana.

Para continuar el ciclo, los animales consumen las plantas y de esta manera obtienen su suplemento de fósforo. Además de estos usos, el fósforo es importante para los animales como constituyente de huesos y dientes, la excreta de los animales devuelve algo del fósforo al suelo y cuando las plantas y animales mueren, sus restos proporcionan otra fuente. Las bacterias en el suelo descomponen los compuestos orgánicos que contienen fósforo en formas que las plantas pueden absorber completando así el ciclo.

Erosión y sedimentación

No hay reservorio atmosférico de este elemento. Debido a que no hay reservorio atmosférico, cualquier pérdida del fósforo del suelo por erosión es una materia relativamente seria.

La relación de fósforo a otros elementos en los organismos es mayor que la relación de fósforo inorgánico disponible a otros elementos inorgánicos.

La mayoría del suelo que contiene fósforo que es erosionado termina como sedimentos profundos en el océano donde se combina con otros elementos para formar rocas fosfóricas y el fósforo es para todos fines prácticos fuera del ciclo.

Algunos sedimentos fosfatados, sin embargo, son llevados a la superficie por corrientes hacia arriba. Estos son absorbidos por el fitoplankton (plantas microscópicas) que alimentan al pez que a su vez es consumido por las aves. Las excreciones o guano de los pájaros, que contiene fósforo es depositado en lugares de los nidos en las rocas, donde puede ser obtenido por el hombre y aplicado al suelo como fertilizante.

La roca fosfática del fondo de océanos muy antiguos ha sido levantada en algunos lugares y es disponible para ser minada.

Esto proporciona otra fuente de fósforo, pero requiere la acción del hombre en la forma de procesamiento y aplicación para completar el ciclo. Una fuente menor de fósforo es la que proviene de la caída de roca apatita.

Problemas

Los factores de erosión y sedimentación añaden complicación al de otra manera de ciclo simple. Más importante debería ser comprender que ello indica una situación potencialmente peligrosa. Si la actividad del hombre continúa para aumentar la tasa de erosión del suelo, puede llegarse a un punto donde la mayoría del fósforo está fuera del alcance en el fondo del océano y que exista falta de fósforo muy seria.

Otro problema también se relaciona a la erosión de fosfatos del suelo: Hemos visto que el fitoplankton vive de fosfatos. Cuando demasiado fosfato es lavado de campos fuertemente fertilizados de fósforo en lagos poco profundos y ríos, el fitoplankton vive muy vigorosamente y puede por sobrepoblación, iniciar un ciclo que puede destruir los cuerpos de agua. Los fosfatos son usados en algunos detergentes y entran en los cuerpos de agua y agua servida, contribuyendo al problema.

Ciclo del azufre

El azufre y el fósforo interactúan como sedimentos y presentan un buen ejemplo de interrelaciones en el ciclo biogeoquímico.

El azufre en la forma de ión sulfato en el suelo es absorbido por las plantas en muchas reacciones metabólicas vitales. Metabolismo es el intercambio de materiales entre cosas vivas y su ambiente por el cual el organismo se contruye y la energía se asegura.

Los animales comen plantas y obtienen así entre otras cosas, su requerimiento de azufre el cual necesitan por las mismas razones que lo hacen las plantas.

Cuando la planta o el animal muere, las bacterias en el suelo convierten a los compuestos orgánicos que contienen azufre en sulfatos. Estos completa el ciclo simple del azufre.

Sedimentación

El azufre representa uno de los elementos con ciclo sedimentario. Esto quiere decir que tiene estados de estancamiento cuando puede acumularse en lugares inaccesibles a las cosas vivas. Otra característica del S y P es que no tienen reservorio atmosférico. O sea que no están ampliamente dispersos como formas gaseosas de azufre o fósforo.

Los organismos acuáticos obtienen el azufre de la misma manera como lo hacen las cosas vivientes terrestres, pero la mayoría del azufre en ecosistema acuáticos está en la forma de sedimentos en el fondo de lagos profundos y los océanos. Las bacterias anaeróbicas descomponen los organismos muertos que contienen S y que se encuentran en el fondo de lagos y océano, convirtiéndolo en sulfuro de hidrógeno, un gas mal oliente. Hay maneras en las cuales algo del azufre en estas vastas reservas puede retonar a los niveles de más arriba del agua y suelo, pero el proceso es más lento que para aquellos elementos que tienen reservorios atmosféricos.

Las mismas reacciones bioquímicas complejas que atrapan al azufre de tal manera que no pueda ser usado por las cosas vivas superiores es exactamente el mismo proceso requerido para hacer sedimentos insolubles de fósforo soluble y de esa manera accesibles. Este punto es importante porque es un buen ejemplo de la interacción compleja entre varios ciclos. Ningún proceso biogeoquímico es aislado.

Combustibles fósiles y bióxidos de azufre

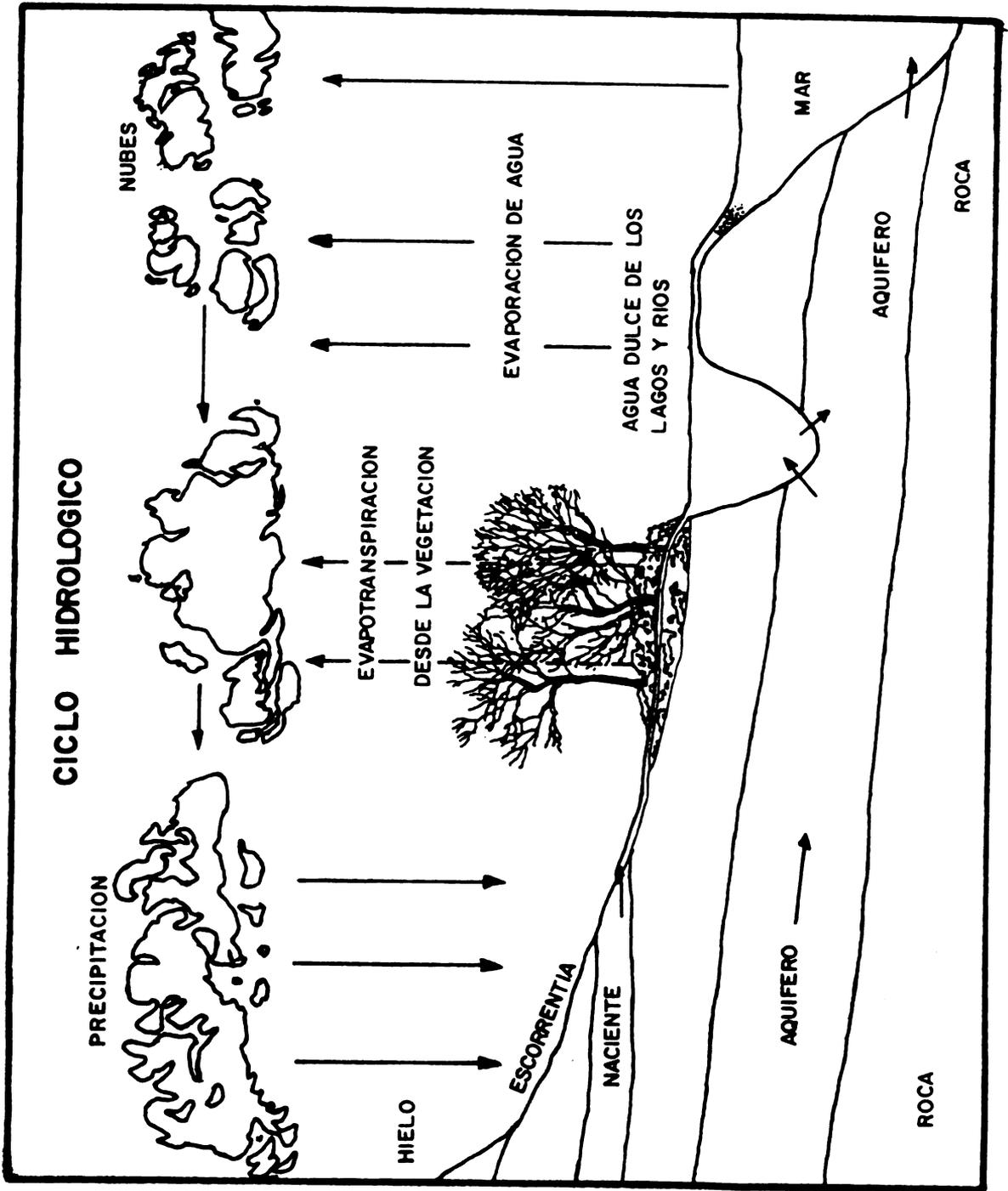
Un camino particularmente largo que el azufre puede tomar, involucra combustibles fósiles.

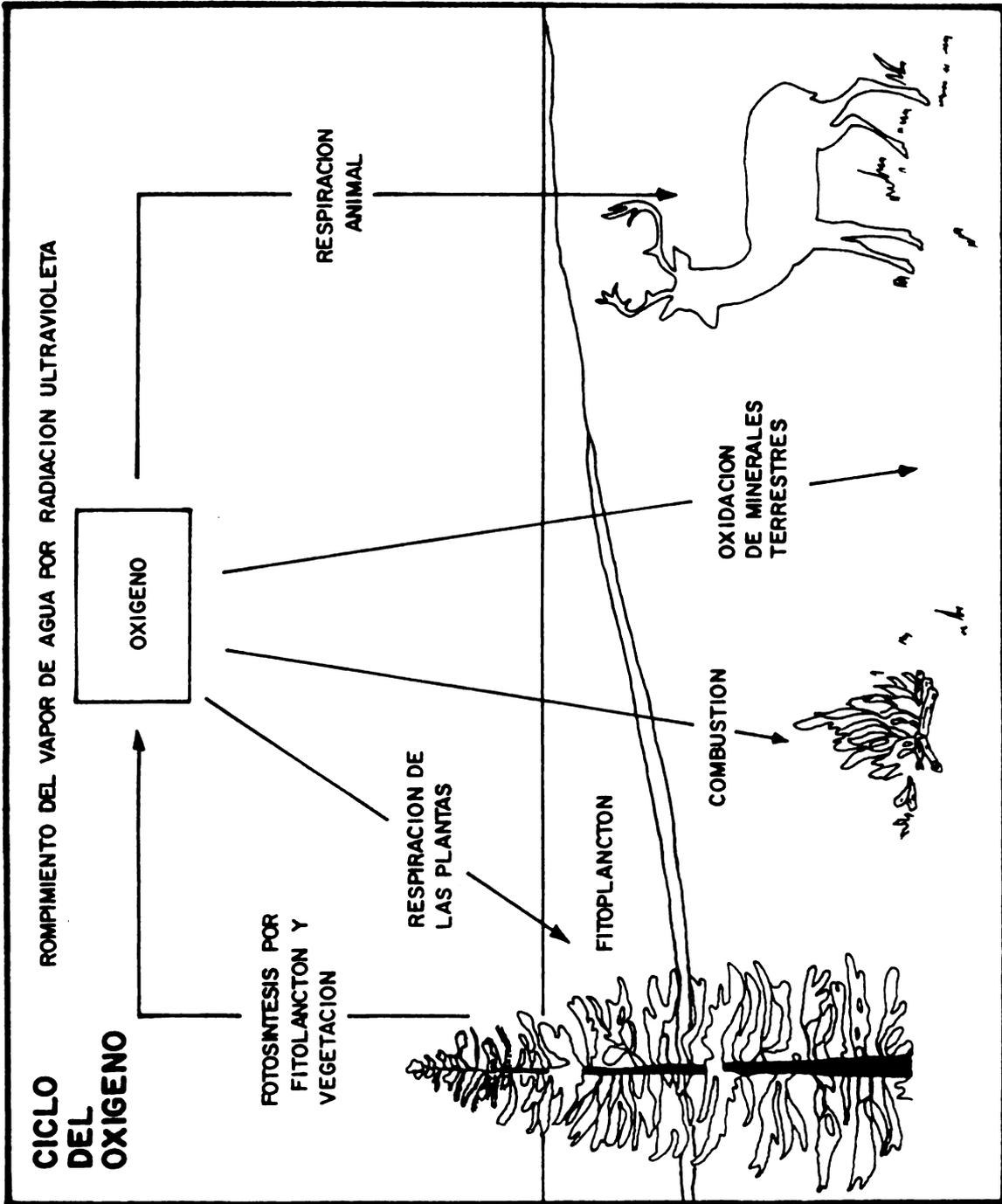
Los sedimentos en vastas zonas pantanosas u océanos, fueron cambiados por la presión, calor y tiempo a hulla o aceite. Cuando los combustibles son quemados, los elementos son liberados a la atmósfera. Entre estos está el SO_2 , un gas irritante, sofocante y sin color.

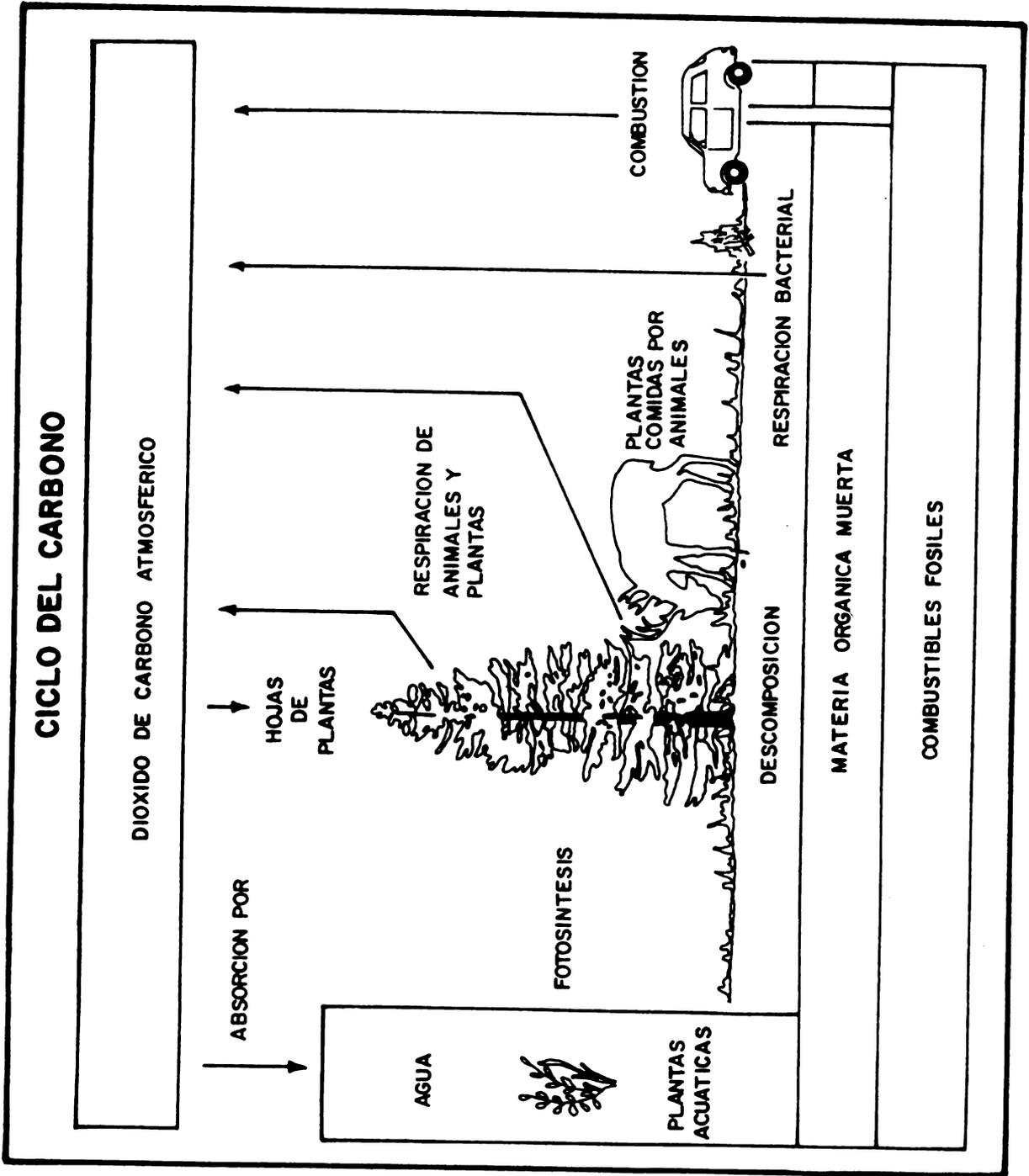
Este es removido de la atmósfera por precipitación. Al caer al suelo o al agua se torna disponible para toda cosa viva. El SO_2 no es parte normal de la atmósfera como lo es el CO_2 y por lo tanto no constituye un reservorio para el ciclo.

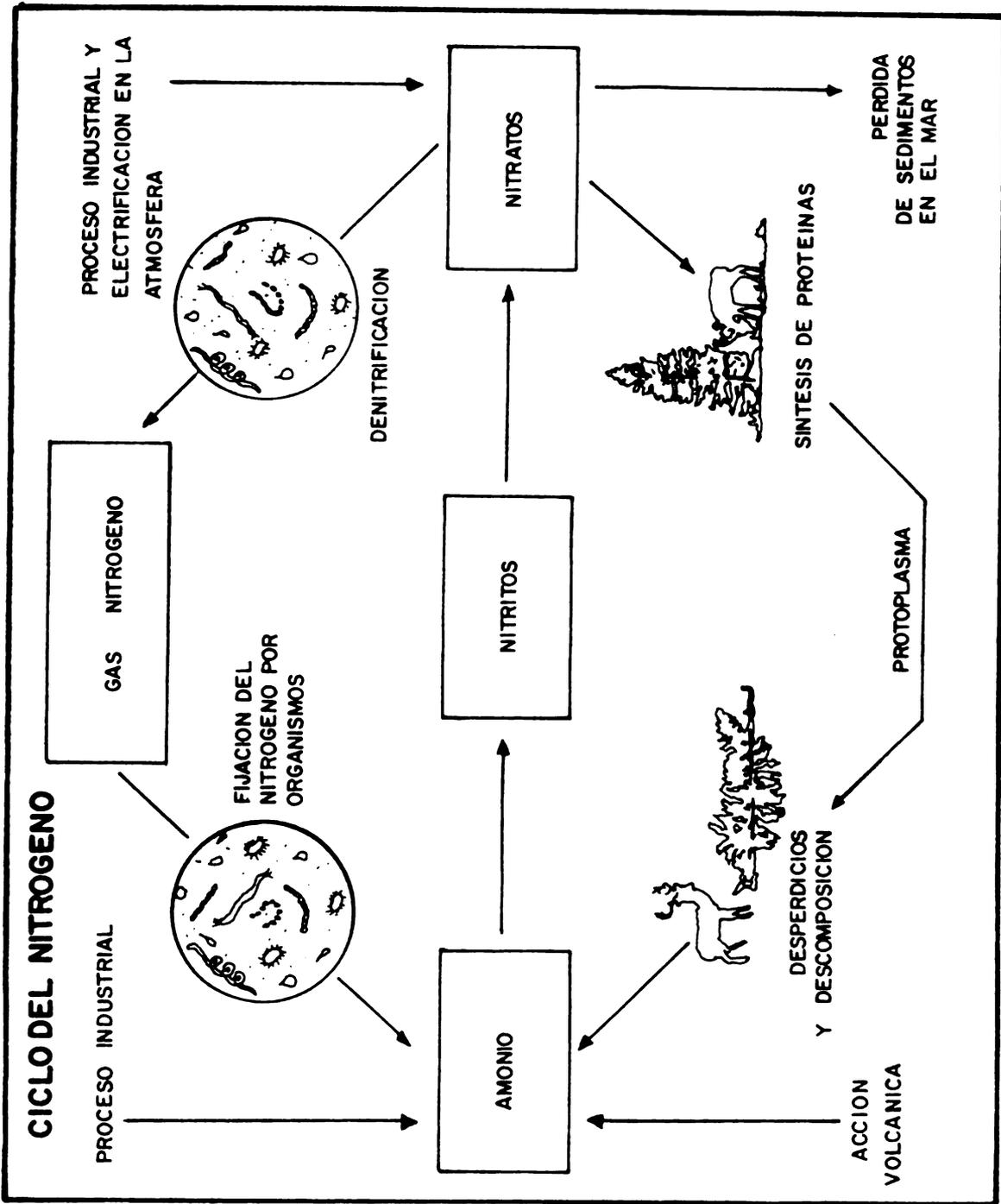
En verdad, cuando el SO_2 está presente en la atmósfera en cantidades concentradas, como ocurre alrededor de muchas ciudades, se vuelve un serio contaminante causando daño a los animales, plantas y estructuras hechas por el hombre.

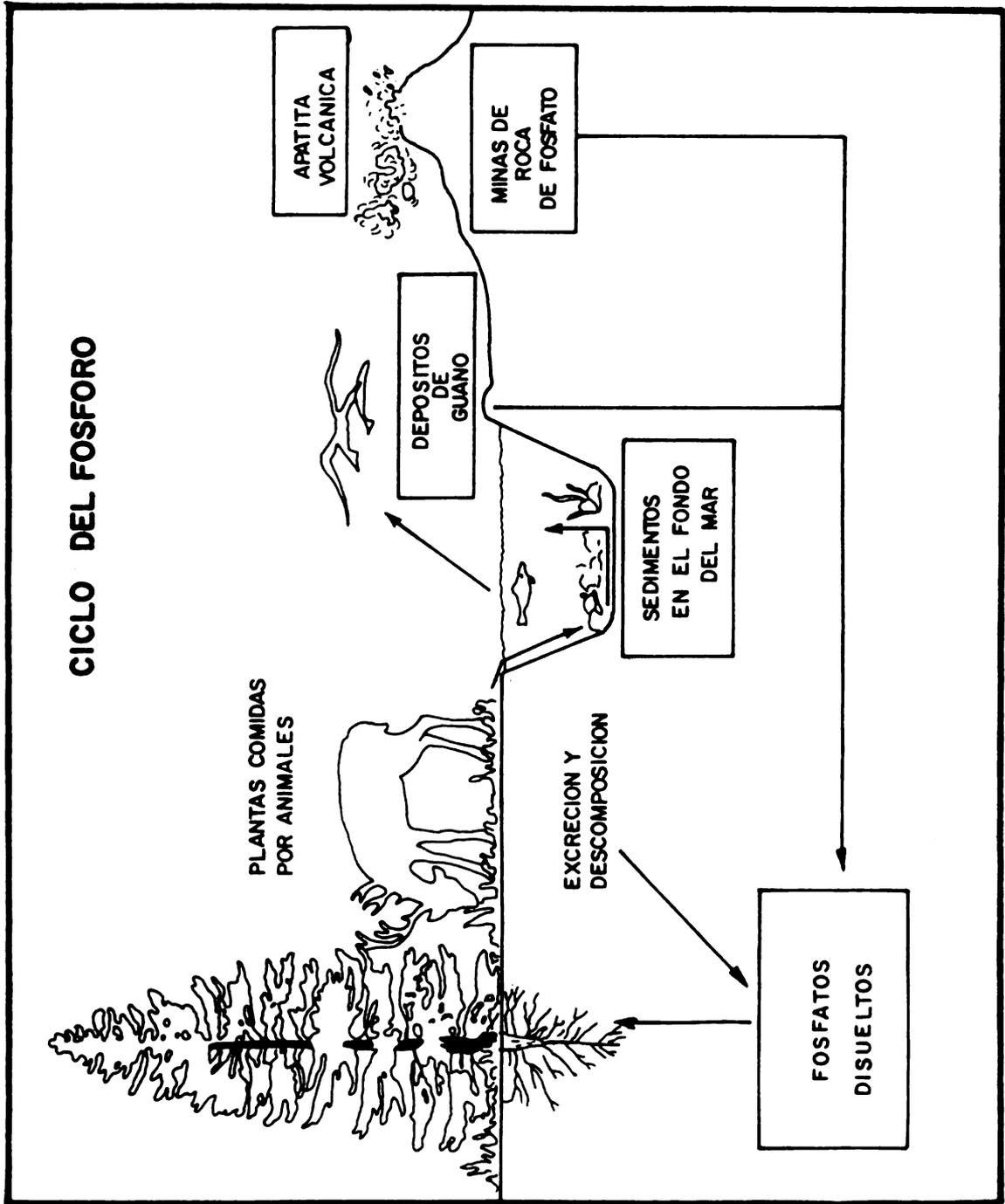
pmr/

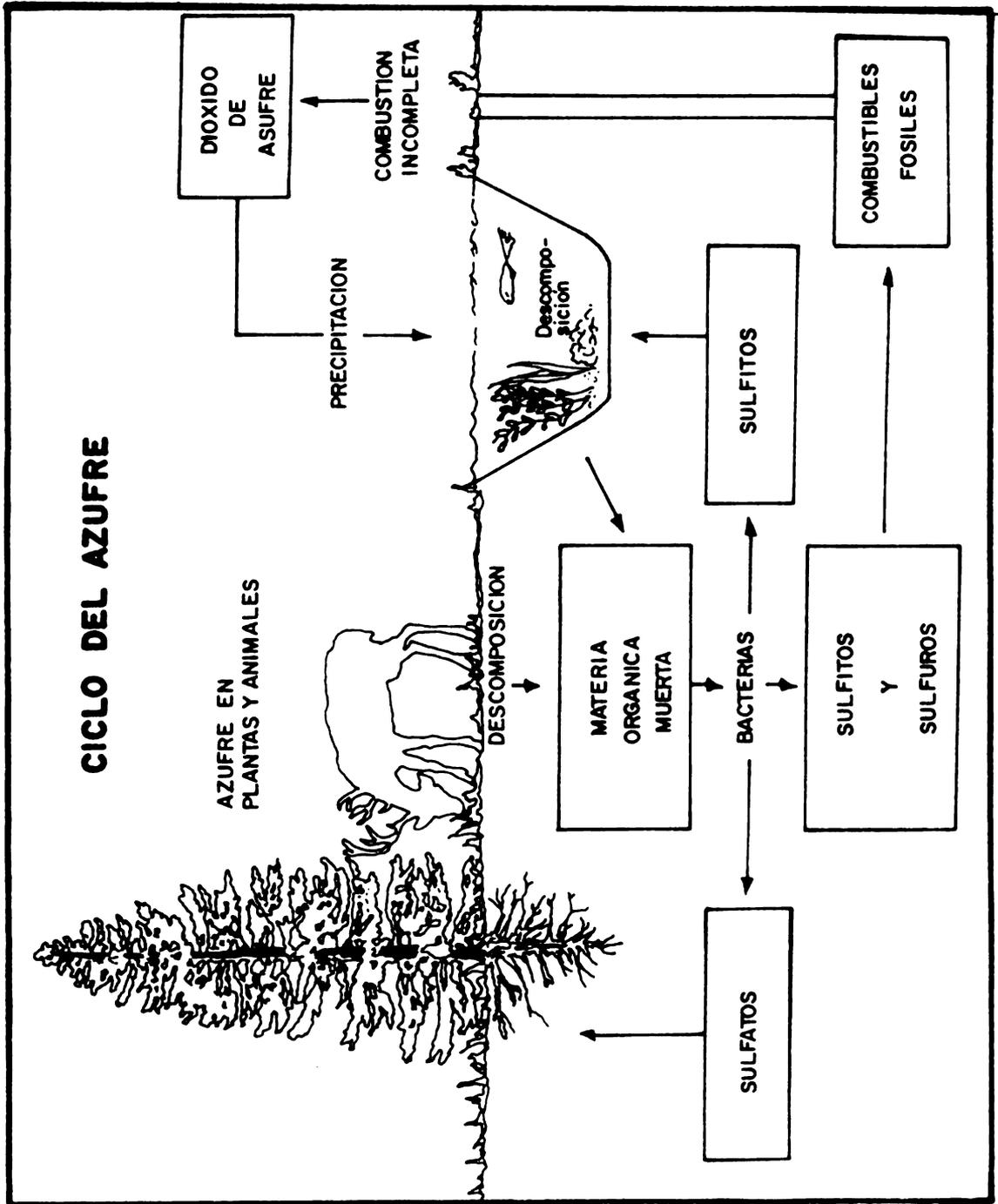












DISEÑO DE OPCIONES TECNOLOGICAS

SUELOS: CICLO HIDROLOGICO

Marciano Rodríguez G.

EL AGUA

El agua es indispensable para la vida de los organismos superiores. Es probablemente el compuesto más importante de todos los conocidos. Es el solvente universal y disuelve más compuestos que cualquier otro líquido comúnmente encontrado. Las reacciones o procesos químicos más importantes se llevan a cabo en un medio acuoso:

- a) Solubilización y absorción de nutrimentos
- b) Reacciones fisiológicas y bioquímicas de los organismos

El agua también es importante en la formación y transporte de los suelos.

Mecanismos de Absorción de Agua

- 1) Mecanismo activo - La fuerza que causa la absorción de agua en este caso es la concentración osmótica en los vasos leñosos.
- 2) Mecanismo pasivo - La fuerza de absorción es el resultado de la fuerza de succión de las células de la hoja. Este último mecanismo es considerado más importante.

El Agua en el Suelo

- 1) Agua Gravitacional - Agua totalmente libre que se mueve por la acción de la gravedad.
- 2) Agua Capilar - Agua retenida por la fuerza de capilaridad e incluye capacidad de campo
- 3) Agua Higroscópica - Agua retenida después de secar el suelo al aire.

Se encuentra absorbida por los coloides del suelo.

- 4) Agua combinada - Agua no removida en un horno a 105°C.

Constantes de Humedad

- 1) Punto de humedad crítica es el coeficiente o punto de marchitez - Porcentaje de agua cuando las plantas se marchitan (tensión de 15-16 atm).
- 2) Coeficiente higroscópico - Máxima humedad absorbida por un suelo seco al horno y puesto en una atmósfera saturada con vapor de agua.

- 3) Humedad equivalente - Porcentaje de humedad retenida por el suelo después que ha sido saturado y sometido a una fuerza de 1/2 atmósfera.
- 4) Capacidad de campo - Humedad máxima que el suelo retiene bajo condiciones de libre drenaje, después que el exceso de agua se ha escurrido al final de la lluvia o irrigación.
- 5) Agua disponible - Los límites máximos y mínimos generalmente se representan por la capacidad de campo y el coeficiente de marchitez.

La Figura 1 muestra un diagrama de la relación entre las varias formas de agua en el suelo, constantes de humedad y disponibilidad de agua para las plantas superiores.

REGIMENES DE PRECIPITACION TROPICAL

Existe una amplia gama de clasificaciones climáticas globales para escoger al definir qué se entiende por los términos "tropical", "semi-árido", "sub-húmedo" y "húmedo", lo cual no debe preocuparnos. Esencialmente aquí estamos interesados en áreas de la tierra donde la temperatura promedio del mes más frío en localidades cercanas al mar excede 17°C, y donde el promedio anual de precipitación varía de más de 3,000 mm hasta cerca de 400 a 500 mm, aunque existen regiones tropicales donde se producen cultivos con precipitaciones promedios menores de 350 mm.

La precipitación pluvial es el parámetro climático más importante para la agricultura tropical, en términos tanto de exceso como de déficit. Dada la uniformidad de la temperatura, la distribución de las lluvias constituye el criterio principal para clasificar climas tropicales y es más importante que la cantidad total. Arbitrariamente se considera como mes seco aquel con menos de 100 mm de lluvia. La disponibilidad de agua en el suelo durante este período dependerá de las características físicas del suelo, la vegetación y/o el manejo.

El Cuadro 1 muestra la distribución de la tierra de los trópicos potencialmente cultivable, sin limitaciones de temperatura, de acuerdo a la limitación del crecimiento por deficiencia en la humedad del suelo.

Con base en la duración de la estación seca, en los trópicos se reconocen 5 patrones principales de precipitación pluvial, que son realmente una clasificación climática:

Climas lluviosos - Ocupan aproximadamente una cuarta parte de los trópicos en su mayor parte en las vecindades del Ecuador. Las áreas mayores son la cuenca superior del Amazonas, la cuenca del Congo, la mayor parte de Indonesia, Malasia y parte de Filipinas. Las áreas más pequeñas comprenden la costa Atlántica de América Central, la costa del Pacífico de Colombia, África Occidental costanera y muchas islas del Pacífico. Los cultivos alimenticios predominantes son arroz, yuca y ñames. Para exportación se produce cacao, bananos, hule, cocos, etc.

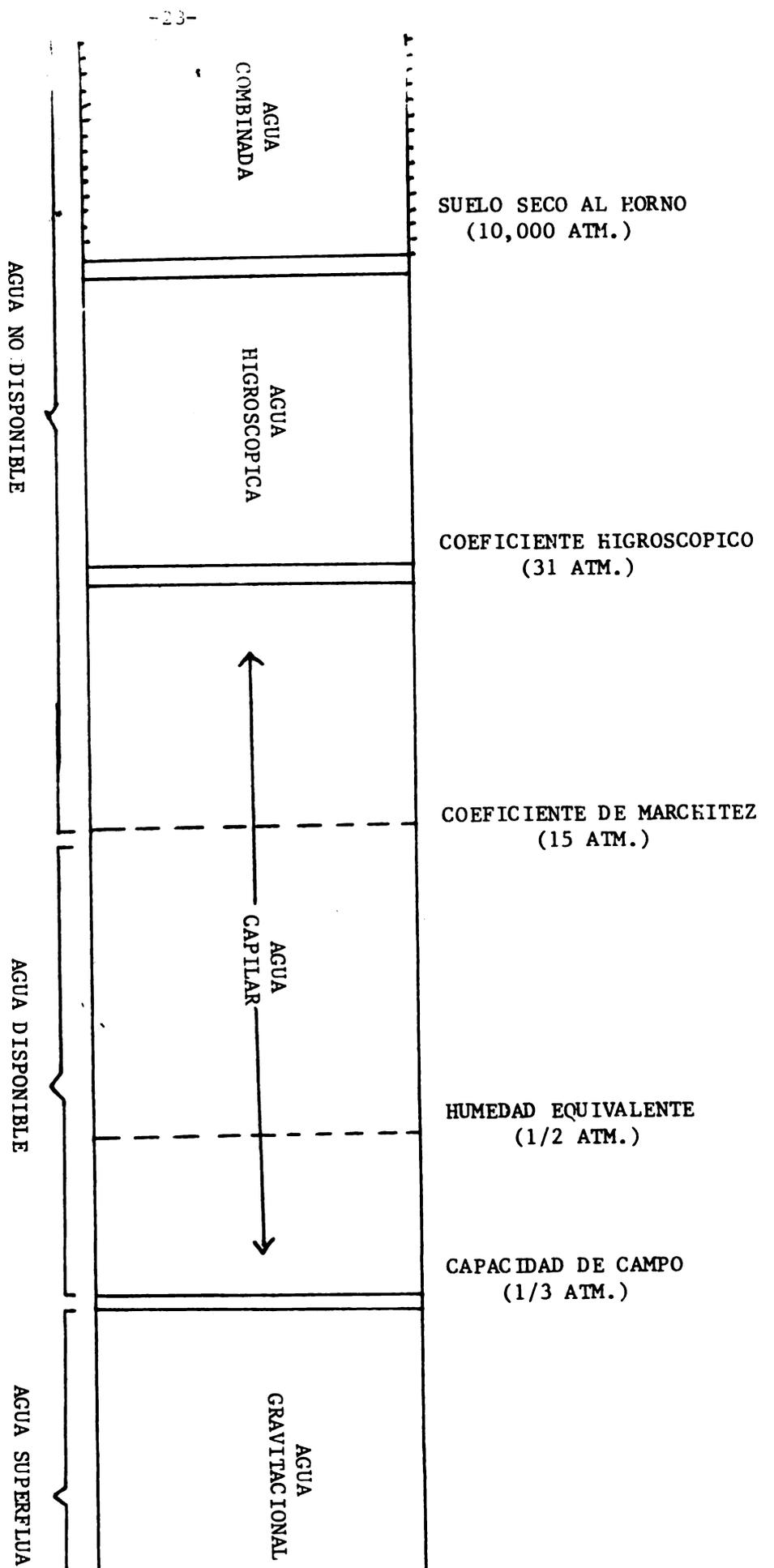


Figura 1. El agua del suelo

CUADRO 1. DISTRIBUCION DE LA TIERRA POTENCIALMENTE CULTIVABLE EN LOS TROPICOS SIN
 LIMITACIONES DE TEMPERATURA, DE ACUERDO CON LA MAGNITUD DE LA
 LIMITACION POR HUMEDAD DEL SUELO (MILLONES DE HECTÁREAS)

LIMITACION DEL CRECIMIENTO POR LA HUMEDAD (MESES)	AMERICA TROPICAL	AFRICA TROPICAL	ASIA TROPICAL Y PACIFICO	TOTAL	PORCENTAJE
0	315	109	81	505	28
4	82	0	56	138	8
6	260	223	130	613	34
8	32	206	89	327	18
10	16	114	72	202	11
12	1	16	12	29	1
TOTAL	706	668	440	1814	100

Climas Estacionales - Cubren cerca de la mitad de los trópicos, incluyendo extensas áreas de cerrado en Brasil, los Llanos de Colombia y Venezuela, la costa del Pacífico de América Central y México y Cuba; la mayor parte de Africa entre los desiertos de Sahara y Kalahari, excepto parte de la cuenca del Congo; en Asia está la mayor parte de India, Indonesia continental y una faja del norte de Australia (incluye los climas monzónicos).

Climas Secos - Ocupan alrededor del 16% de los trópicos. Las áreas más grandes son el Sahel en Africa Ecuatorial, el desierto de Kalahari en el sur de Africa, gran parte de Australia, partes de India Central; noreste de Brasil, norte de Venezuela y norte de México. Se puede cultivar sin riesgo una cosecha de maíz, sorgo, mijo o arroz.

Desiertos Tropicales - Se definen como áreas con dos meses o menos de lluvia. Cubren cerca del 11% de los trópicos. Los desiertos del Sahara, el de Arabia, el de Somalia y el de Australia comprenden la mayor parte de esta área. También hay franjas costaneras angostas en Perú y Chile y el sureste de Africa.

Ejemplos de estos climas se observan en la Figura 2.

Montañas Tropicales - Son áreas con una elevación mayor de los 900 m y cubren aproximadamente 23% de los trópicos. Son importantes en México, Costa Rica, Colombia, Guatemala, Ecuador, Perú, Bolivia, Kenia y Etiopía, por encontrarse allí una gran cantidad de la población y de la agricultura de estos países tropicales (Sánchez, 1981).

Conforme nos alejamos de las zonas ecuatoriales húmedas tropicales hacia latitudes mayores, la tendencia hacia una menor precipitación anual generalmente está acompañada por un incremento en el período de clima seco en invierno conforme la zona de convergencia intertropical, con un pequeño retraso en tiempo, sigue el movimiento del sol, dando lugar a los regímenes de lluvia de verano descrito como monzón y climas de sabana. El segundo punto importante es que con la disminución en el promedio de precipitación anual; la variabilidad en la precipitación total y en el comienzo y terminación del período lluvioso aumenta, y la probabilidad de que ocurran períodos secos dentro del período lluvioso también aumenta.

Conforme a este patrón general de lluvias, las principales variantes en tipo de clima que son importantes con relación al carácter de los sistemas de producción tropicales son:

- a) Regímenes de picos gemelos de precipitación que se encuentran en regiones de transición entre los trópicos húmedos verdaderos y los trópicos de precipitación en el verano (p.e.m. Colombo, Sri Lanka)
- b) Regiones con precipitación de verano que tienen un componente considerable de precipitación en el invierno asociado con sistemas de presión diferentes del monzón de verano (p.e. N. India)
- c) Localidades de mayores altitudes, donde las menores temperaturas reducen apreciablemente el componente de evapotranspiración del balance hídrico (p.e. Los Andes tropicales) (Norman, 1979).

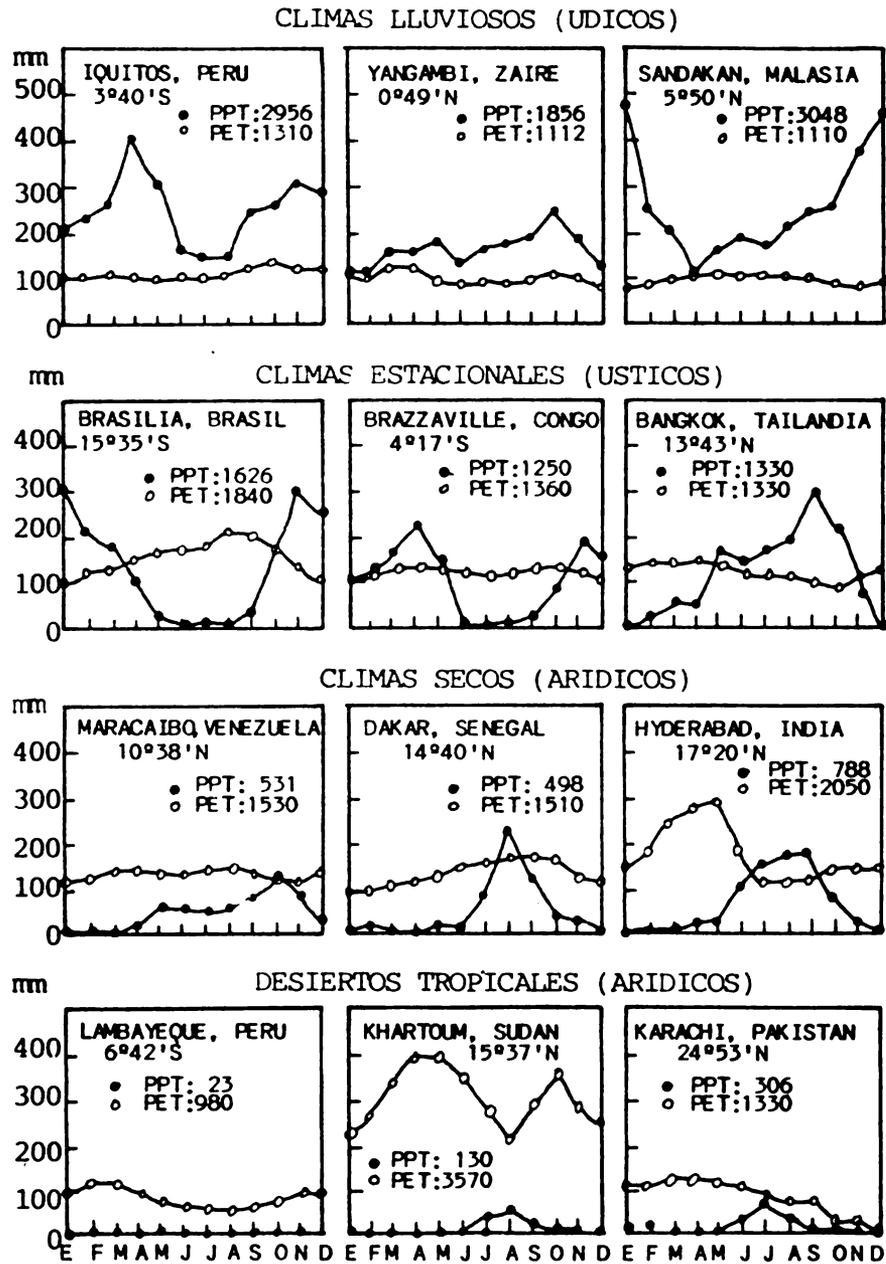


Fig. 2. Balances mensuales de pluviosidad evapotranspiración en algunas localidades tropicales seleccionadas. PPT = precipitación. PET = evapotranspiración potencial. Los totales anuales en números.

Relaciones Pluviosidad-Humedad del Suelo

En general, en los trópicos se encuentran cuatro regímenes de humedad del suelo:

- 1) Udico: Cuando la sección de control del suelo está seca por menos de 90 días acumulativos durante el año.
- 2) Ustico: Cuando la sección de control del suelo está seca por más de 90 días acumulativos, pero menos de 180 días acumulativos ó 90 días consecutivos durante el año.
- 3) Arídico: Cuando la sección de control del suelo está seca por más de 180 días acumulativos o húmeda por menos de 90 días consecutivos por año.
- 4) Aquílico: Cuando el suelo está saturado con agua por el tiempo necesario para causar condiciones de reducción del suelo.

La sección de control es la parte del suelo comprendida entre las dos profundidades siguientes: bajo la profundidad alcanzada por 1.5 cm de agua en 24 horas y sobre la alcanzada por 7.5 cm de agua en 48 horas. Esto corresponde aproximadamente de 10 a 30 cm en suelos arcillosos, 20 a 60 cm en suelos francos, y 30 a 90 en suelos arenosos.

El término "seco" se refiere a una tensión de humedad de 15 bares o mayor; es decir, igual o menor al punto de marchitez de las plantas (Sánchez, 1981).

BALANCE DE AGUA PROMEDIO ANUAL

Como base para apreciar el patrón hidrológico estacional en sistemas de producción de los trópicos, debemos primeramente recordar los conceptos de balance de agua, el cual sobre un período específico puede ser expresado como:

$$M = P - (O + U + Ea)$$

M = Cambio neto en el agua del suelo en la zona radical durante el período

P = Precipitación, que en el trópico es casi totalmente lluvia

O = Escurrimiento (runoff) o desagüe

U = Drenaje bajo la zona radicular (percolación)

Ea = Evapotranspiración actual del cultivo

Cuando P excede Ea y la zona radicular se encuentra completamente saturada (cargada) resultando en escurrimiento superficial, el agrónomo o fisiólogo raramente se interesa de la magnitud de estos componentes. Sin embargo, en el estudio de sistemas de producción, éstos son tan importantes como los otros términos. La magnitud del valor del agua de percolación tiene una

influencia marcada en la lixiviación de nutrimentos solubles. La incidencia del escurrimiento, en relación con la pendiente y condición de la superficie del suelo, gobierna el establecimiento topográfico de campos de cultivos y su propensión a la erosión del suelo.

En Hyderabad (India) tenemos un ejemplo del trópico semi-árido (precipitación promedio anual 772 mm), donde la lluvia excede evaporación potencial en promedio por solo un período breve hacia el final de la estación lluviosa del verano. En promedio, en esta época no hay exceso de agua para escurrirse o perderse por drenaje. Otros ejemplos similares serían: Estelí, Nicaragua; Tejutla, El Salvador y otras áreas de América Central. Los sistemas de producción en estas áreas están basados en cultivos de monzón de período corto tales como mijo y sorgo; aunque las características favorables de retención de humedad de algunos tipos de suelo en estas áreas permiten producción de algunos cultivos en la estación seca.

En Satchira (India), el recargo (relleno) de la humedad del perfil del suelo ocurre alrededor de 1/3 a través del período lluvioso. En este caso, existe cantidad sustancial de exceso de agua que no está utilizada para crecimiento de cultivos, al menos que se almacene para irrigación. Tales regímenes hidrológicos permiten sistemas de cultivos basados en cultivos de estación más larga o en doble relevo.

Colombo (Sri Lanka) es un ejemplo típico de un régimen con picos gemelos de precipitación, donde el patrón de deficiencia de humedad del suelo y utilización, durante la fase seca y recargo de humedad, y exceso durante la fase húmeda ocurre, en promedio, dos veces al año. En esta situación los períodos deficitarios son relativamente breves, y con temperaturas favorables continuas, la producción es posible durante todo el año. Los períodos prolongados de exceso de humedad acumulada en áreas bajas fuerza sistemas basados en cultivos tolerantes a inundación, p.e., arroz inundado (Fig. 2a).

Singapore representa el patrón de precipitación y evaporación de los verdaderos trópicos húmedos, donde P en general excede Et durante todo el año (Fig. 2b). Singapore es representativo de las regiones ecuatoriales donde se producen cultivos perennes que prefieren la humedad alta, tales como hule y palma aceitera. En sistemas de cultivos anuales, plantas tuberosas de largo ciclo de crecimiento y arroz con componentes en base no estacional.

PROMEDIO DE DURACION DE LA ESTACION DE CRECIMIENTO

El período durante el cual P excede a Et puede usarse como una medida de la estación de crecimiento de cultivos, pero es inadecuado para caracterizar el patrón promedio de disponibilidad de agua para las operaciones agrícolas de la finca. En este sentido Cocheme y Franquin (1967) (Africa Occidental) usaron un enfoque más detallado, el cual toma en consideración la fase de preparación de la tierra para la siembra y el agua residual del suelo disponible para la maduración del cultivo después de la terminación de las lluvias. En un área con estaciones húmedas y secas bien definidas, la estación de crecimiento puede dividirse en 5 períodos por P y Et:

- a) Período de preparación: desde cuando $P = Et/10$ a cuando $P = Et/2$. Durante esta fase se puede preparar la tierra.

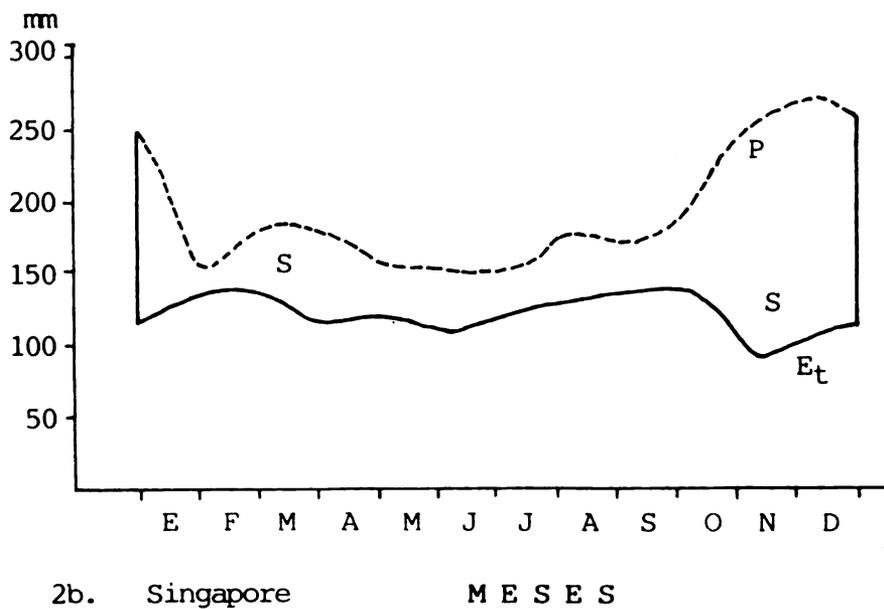
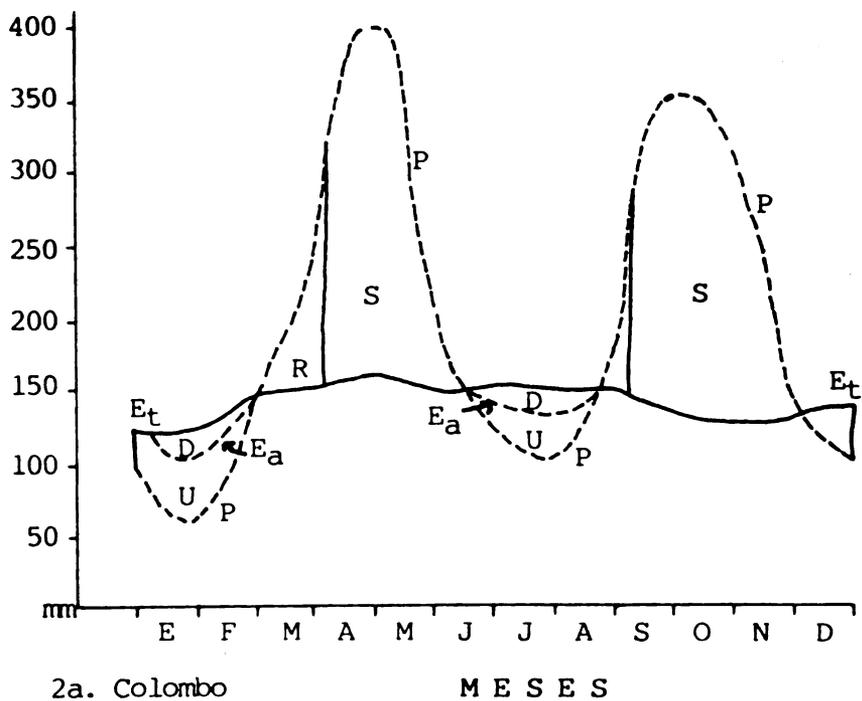


Fig. 2 Promedio de balance de agua estacional.

2a. Colombo: D = Déficit de humedad
 P = Precipitación
 Et = Evapotranspiración potencial
 Ea = Evapotranspiración actual

2b. singapore

- b) Primer período intermedio: desde cuando $P = Et/2$ a cuando $P = Et$. Durante este período se puede sembrar el cultivo.
- c) Período húmedo: cuando P excede Et . El período apropiado para el crecimiento y desarrollo del cultivo.
- d) Segundo período intermedio: cuando conforme las lluvias declina, P disminuye a entre Et y $Et/2$. Tales condiciones, junto con un perfil de suelo relleno (cargado) de agua, son propicias para el continuo crecimiento del cultivo.
- e) Período de reserva: desde cuando $P = Et/2$ a cuando $P = Et/10$. En esta fase la efectividad de la lluvia es baja y el continuo crecimiento y maduración del cultivo dependen principalmente de la reserva de humedad del suelo.

La Figura 3 muestra un patrón típico. La estación efectiva de crecimiento se define como el período cuando P excede a $Et/2$ hasta que la reserva del suelo se termina. Una de las fuentes de imprecisión al estimar la longitud de la estación (ciclo) de crecimiento, basándose solamente en datos climáticos es que se asume la disponibilidad de la reserva de agua del suelo. En la ausencia de información de características físicas del suelo generalmente se asume 100 mm. Sin embargo, las diferencias en características de retención de humedad entre suelos en una localidad dada, pueden tener un marcado efecto en la duración de la estación efectiva de crecimiento del cultivo, y por tanto, en el carácter de los sistemas de producción.

PRINCIPALES CULTIVOS DE ZONAS DE SISTEMAS DE CULTIVOS
DE TEMPORAL (LLUVIA) (AFRICA OCCIDENTAL)

REGION	PPA	PAE	DEC	CULTIVOS	
				PRINCIPAL	SECUNDARIOS
A	350	250	60	Caupí, millo EC	Caupí
B	550	475	100	Millo EM, sorgo EM y EC y maní, EC, EM	Millo EC, sorgo EC, caupí
C	800	600	120	Millo EM, EL; sorgo EM, EL, algodón	Millo EC, sorgo EC, maíz EC, caupí
D	1000	750	145	Sorgo EL, maíz EL, millo EL, maíz EL, algodón	Millo EC, sorgo EC, maíz EC, caupí

PPA = Promedio precipitación anual (mm)
 PAE = Precipitación anual efectiva (mm)
 DEC = Duración de la estación de crecimiento (días)
 EC = Estación corta
 EM = Estación media
 EL = Estación larga

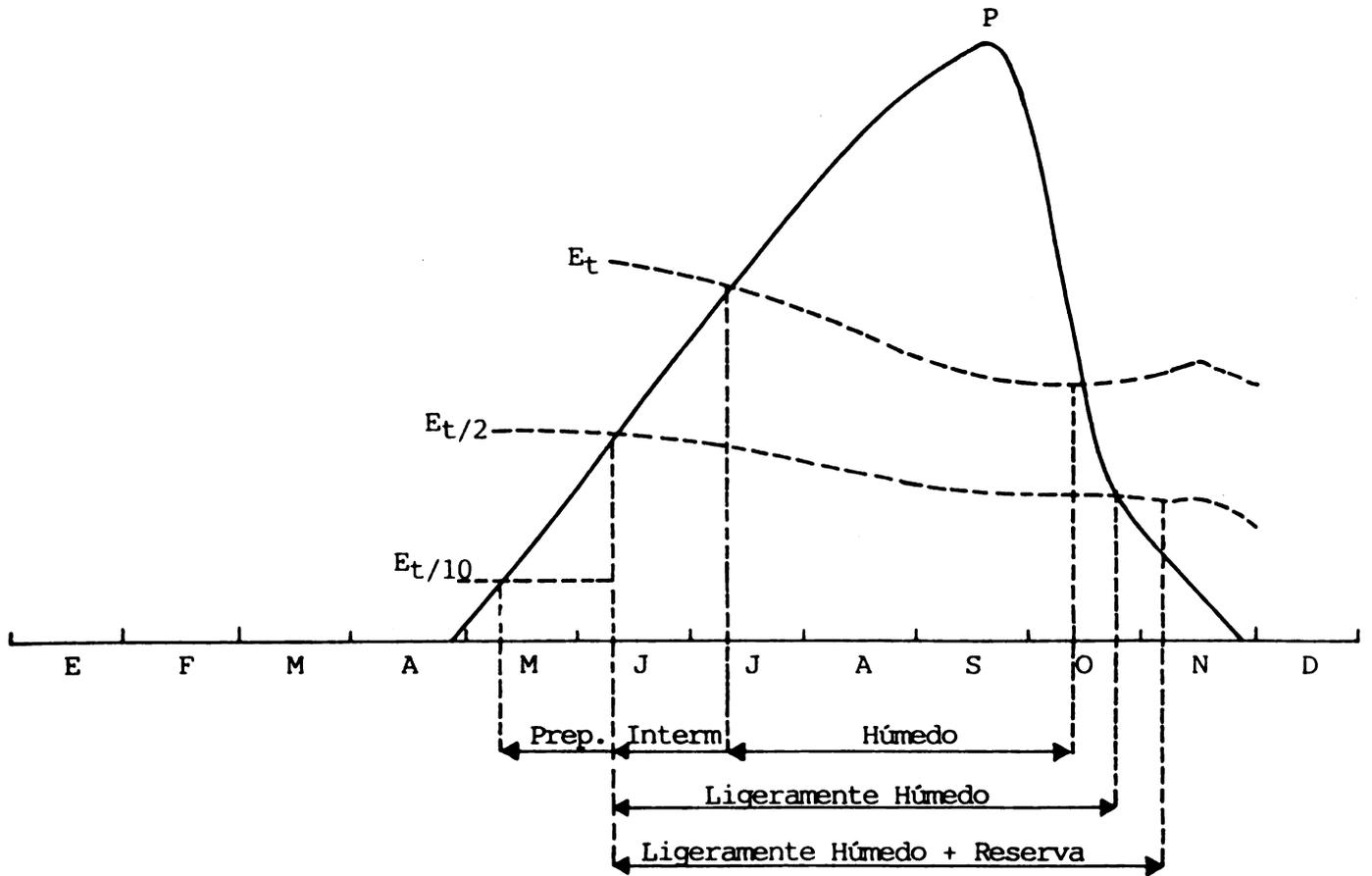


Figura 3. Fases significativas del balance de agua en climas con lluvias de verano.

EL ELEMENTO DE PROBABILIDAD EN EL PATRON HIDROLOGICO

La variabilidad entre años en estos parámetros (P, Et) existe; así mismo, esta variabilidad tiende a aumentar con disminución en el promedio anual de precipitación. Los conceptos ilustrados en los incisos anteriores aunque útiles en la evaluación de recursos en una escala amplia, son de valor limitado en relación a las operaciones del cultivo. Esencialmente el patrón estacional de producción en cualquier localidad, el grado que es gobernado por la disponibilidad de agua, representa una adaptación a la probabilidad de ocurrencia de eventos y situaciones en diferentes épocas del año.

Teniendo una serie de datos de un período largo apropiado, o estimaciones de estos datos, se puede calcular:

- a) La probabilidad de que ocurra un período seco de cualquier intensidad y duración en cualquier período definido de la época lluviosa.
- b) La probabilidad de que ocurran cantidades definidas de agua de escurrimiento en cualquier período definido durante la estación lluviosa.
- c) La probabilidad de que haya humedad adecuada para la preparación de la tierra o para sembrar en cualquier fecha definida al comienzo de la época lluviosa.
- d) La probabilidad que se agote la reserva de humedad del suelo en cualquier fecha definida al final de la época lluviosa.
- e) La probabilidad de que ocurra una estación o período de crecimiento definido.

MODELOS DE BALANCE DE AGUA PARA CULTIVOS

Además de la información de precipitación y evaporación, con alguna medida o estimación de la capacidad de retención de humedad del suelo; se necesitan conocer los requisitos de agua de los cultivos o tipos de cultivos que se producen o pueden sembrar en el lugar.

Para estimar cambios en agua disponible para el crecimiento del cultivo en una situación simulada de un cultivo en crecimiento, se emplean modelos de balance hídrico de cultivos. Estos modelos son designados esencialmente para estimar para un ambiente dado, por conteo del balance de agua diario o semanal, los cambios en agua disponible del suelo durante el período potencial de crecimiento, de donde se pueden hacer predicciones concernientes a la adaptación de especies o cultivares de temporal, los requisitos de riego de los cultivos y lo apropiado de prácticas agronómicas tales como modificación de la fecha de siembra.

Los modelos que utilizan información climática limitada son de particular importancia en los trópicos, ya que los datos meteorológicos y de propiedades físicas del suelo en estas zonas frecuentemente son mínimas.

INTERACCIONES DEL REGIMEN DE LLUVIA Y TEMPERATURA

Dentro de los trópicos húmedos bajos cerca del Ecuador, los cambios en temperatura tienen poca influencia en los patrones de cultivos, ya que es uniformemente alta durante todo el año. A mayores latitudes, en climas de lluvias predominantes en el verano, existen regímenes de temperatura diferenciados de invierno y verano. En localidades bajas a estas latitudes, se puede generalizar que para cultivos de temporal, la temperatura es todavía de poca importancia, ya que la temperatura es alta al inicio de las lluvias y todavía permanece alta al final de las lluvias. El período de crecimiento no es limitado por la temperatura. Sin embargo, en localidades bajas con climas de lluvia de verano, donde la producción de cultivos es posible en la estación fría de invierno porque el suelo almacena suficiente humedad (áreas en Guatemala), existe un componente de lluvia de invierno, o irrigación; el régimen de temperatura de invierno tiene una gran influencia en el tipo de cultivo producido.

Así, en áreas bajas con lluvia de verano con solo una pequeña variación en temperatura entre invierno y verano (p.e., Tailandia del Centro y Norte), con irrigación es posible sembrar en invierno lo que se conoce como cultivos de verano: arroz, soya, maní, etc.; los mismos cultivares que con buen drenaje se cultivan en el verano.

Por otro lado, en regiones bajas más continentales con lluvia de verano, con inviernos más fríos (Valles del Norte de India y Pakistán), solamente se pueden producir cultivos en temperaturas moderadas, p.e., arroz en verano y trigo en invierno.

En los trópicos, los límites altitudinales de cultivos, operando por medio de la temperatura, son sustancialmente mayores que en zonas templadas: en Africa Oriental, Papua - Nueva Guinea y los Andes Tropicales es arriba de 2500 m.

En localidades de tierras altas el régimen pluvial puede interactuar con efecto de temperatura altitudinal en una forma compleja. Un buen ejemplo es en las montañas de Tailandia del Norte donde grupos étnicos no Tailandeses practican agricultura migratoria, produciendo opio como cultivo comercial (cash crop), maíz para cerdos y aves, y arroz de secano para su sustento.

ESCURRIMIENTO Y EROSION DEL SUELO

La magnitud e incidencia estacional del componente de escurrimiento del balance hídrico, tiene una marcada influencia en las características del sistema de producción (finca). Esta influencia puede ser directa cuando la acumulación de agua superficial y su retención subsiguiente o distribución (desecho) gobiernan el tipo de cultivo producido, el arreglo topográfico de los campos de cultivo, y su geometría superficial (surface). O puede ser indirecta, a través del efecto erosivo del escurrimiento sobre el suelo de la superficie, lo cual incide en las adaptaciones del sistema de producción para control de erosión, o afecta la estabilidad del sistema a largo plazo si no se controla la erosión.

La cantidad de agua de escurrimiento y la erosión del suelo puede ser significativa aún en climas semi-áridos, como se ilustra en el cuadro siguiente para Hyderabad, India:

Area de Desague (ha)	Promedio de pendiente (%)	Precipitación (mm)	No. de lluvias con escurrimiento	Escurrimiento % de la lluvia	Erosión del suelo (T ha ⁻¹)
3.5	0.6	731	21	6.2	3.0
4.1	1-1.5	735	15	1.5	2.2
4.4	1.1	739	?	9.6	9.6
2.1	0.8	754	16	6.4	2.9
9.1	1-2.0	739	22	8.0	3.9
6.5	1.7	757	?	11.9	11.3
8.1	1.8	755	26	16.1	13.3

El coeficiente de escurrimiento, el escurrimiento total anual como porcentaje de la precipitación total anual, varió de 1.5 a 16.1% y la erosión resultante varió de 2 a 13 t ha⁻¹. En un régimen de alta precipitación la Ea se reduce debido a la baja demanda evaporativa de la atmósfera. Por tanto, conforme la precipitación anual aumenta, el coeficiente de escurrimiento aumenta.

En los trópicos, la precipitación pluvial es de mayor intensidad general que en climas templados como se ilustra en la Figura 4. Por consiguiente, las lluvias tropicales tienen una mayor capacidad erosiva del suelo. Como regla general, la lluvia se vuelve erosiva cuando su intensidad excede 25 mm hr⁻¹ (5% de las lluvias en climas templados y cerca del 40% en el trópico). Además, el promedio de intensidad erosiva de la lluvia es mayor en el trópico: en el orden de 60 mm hr⁻¹ comparada con 35 mm hr⁻¹ para lluvias erosivas templadas. El aumento en intensidad y tamaño de las gotas está asociado con un aumento en la energía cinética de la lluvia; de la cual la erosividad es una función. El Cuadro 2 muestra la comparación en erosividad entre lluvias del trópico y de regiones templadas.

La cantidad actual de erosión que ocurrirá durante una tormenta de una erosividad dada, está influenciada por la erosivilidad del suelo, el ángulo y largo de la pendiente, el manejo del cultivo y la superficie del suelo (población de cultivo, cobertura, etc.) y las prácticas de conservación implementadas (cultivos en franjas, curvas a nivel, etc.). El Cuadro 3 muestra el efecto de la pendiente en las pérdidas de suelo por erosión.

Algunos comentarios generalizados sobre erosión hídrica y control de erosión en relación a las amplias categorías de sistemas de producción se presentan a continuación:

- a) Agricultura migratoria, es raro que se tomen medidas de control de erosión. Además, estos sistemas se encuentran localizados en tierras marginales con pendientes propensas a la erosión. Por otro lado, el

Proporción de la lluvia que cae en diferentes clases de grupos de intensidad.

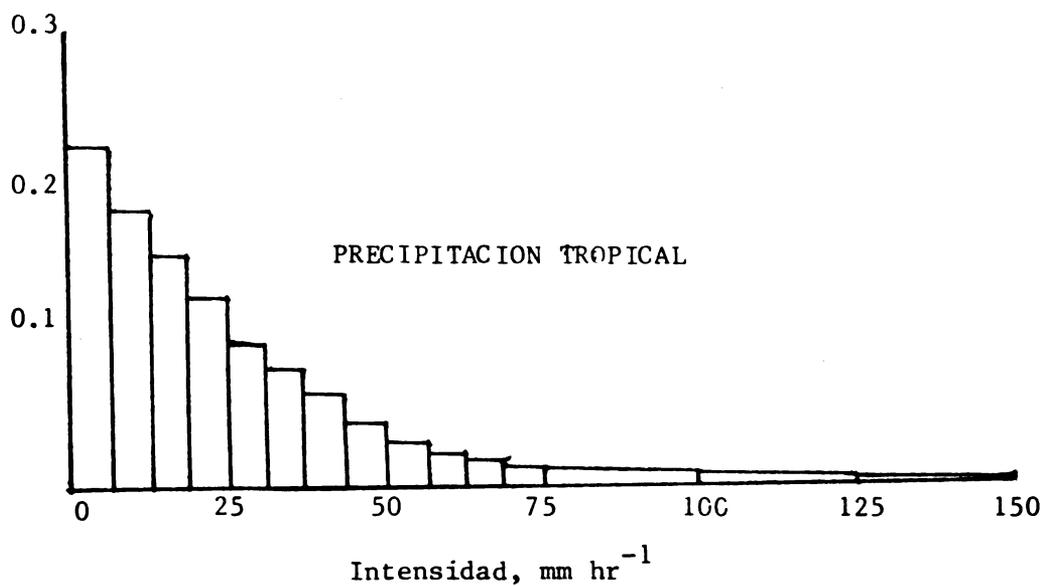
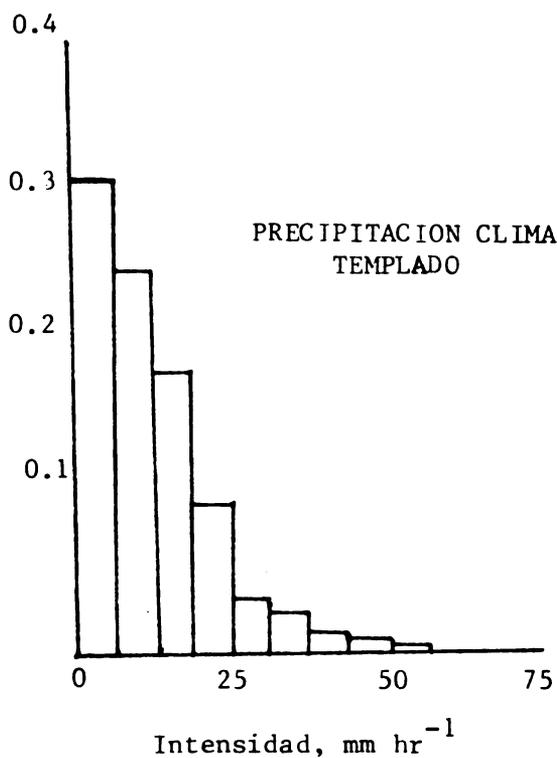


Fig. 4 Distribución de frecuencia de intensidad de precipitación en regiones templadas y tropicales.

CUADRO 2. COMPARACION DE LA EROSIVIDAD ENTRE LLUVIAS DEL TROPICO Y REGIONES TEMPLADAS

	REGION TEMPLADA	REGION TROPICAL
CANTIDAD DE LLUVIA EROSIVA EN UNA PRECIPITACION DE 1000 MM (MM)	50	400
ENERGÍA CINÉTICA DE LA LLUVIA EROSIVA (J M ⁻² MM ⁻¹)	24	28
EROSIVIDAD (A X B) (J M ⁻²)	1200	112,000

CUADRO 3. EFECTO DE LA PENDIENTE Y NIVEL DE FERTILIDAD DEL SUELO EN
LOS RENDIMIENTOS Y PERDIDAS POR EROSION

NIVEL DE FERTILIDAD	PENDIENTE %	RENDIMIENTO DE MAÍZ, T HA ⁻¹	PERDIDA DE SUELO T HA ⁻¹
ALTO	3.0	8.43	2.24
	4.5	8.38	2.56
	6.5	8.24	2.68
MEDIO	3.0	4.08	3.56
	4.5	4.61	4.90
	6.5	5.00	7.60

potencial de erosión se mitiga por el limitado período de tiempo por el cual cualquier campo se encuentra en una condición arable. Durante el descanso, las posibilidades de erosión disminuyen por la cobertura vegetal en desarrollo.

- b) El peligro de erosión es mayor en sistemas intensivos y semi-intensivos de cultivos anuales de temporal. Las pendientes son altamente variables, pero la superficie de la tierra se encuentra en una condición arable abierta permanentemente o durante una proporción alta de tiempo. Desafortunadamente las medidas de control de erosión en el trópico no son comunes, excepto en áreas donde las prácticas agrícolas de conservación de recursos han evolucionado por muchos años en respuesta a fuerte presión sobre la tierra, o donde la extensión de tecnología moderna de conservación han sido efectivas.
- c) Sistemas de cultivos anuales irrigados son en la mayoría de las ocasiones inherentemente conservadores de suelos. Aunque no se apliquen medidas de control, la geometría de la superficie necesaria para el control de agua (supply) y drenaje demandan pendientes ligeras. Esto es verdadero en sistemas de arroz de humedad con los campos casi pajeros y terrazas bien construidas. Sin embargo, existen ejemplos de sistemas de irrigación pobremente diseñados para cultivos de secano en el trópico que están expuestos a la erosión.
- d) El suelo bajo cultivos perennes está menos expuesto a erosión debido a la cobertura protectora del follaje permanente. Además, el recurso de capital de empresas grandes de cultivos perennes, es tal que medidas de control permanente, p.e. terrazas de contorno, son la regla y no la excepción.

EL COMPONENTE DE ALMACENAJE

En el ciclo hidrológico de la finca de cultivos tropicales existe, por supuesto, un componente de almacenaje natural en el agua retenida en la zona radical del cultivo. Este almacén es disminuido continuamente por evapotranspiración y percolación, y es intermitentemente aumentado (relleno) por lluvia o irrigación. La magnitud del agua disponible almacenada en la zona radicular influenciará el comportamiento y el crecimiento de cultivos de temporal durante los períodos secos, la frecuencia de aplicación de agua en cultivos de regadío y; bajo condiciones de temporal puede, tener un marcado efecto en el comportamiento del cultivo después que las lluvias han terminado.

Se puede tomar algunas medidas para extender el almacenaje en la zona radicular por medio de prácticas o estructuras de retención de humedad. De estas una de las más simples es la reducción de la evaporación y escorrentía a través de la aplicación de cobertura vegetal muerta. Esta práctica es más efectiva en regiones de altas y frecuentes lluvias. Un ejemplo de una estructura simple para retención de agua son los amplios montículos de contorno comúnmente usados en India. Se usan comúnmente para control de erosión, aunque también para retener humedad.

La respuesta tradicional en el desarrollo de estructuras de retención de humedad en el trópico ha sido la creación de terrazas en serie, con o sin

un montículo angosto. Lo máximo en estructuras para control del agua bajo condiciones de alto escurrimiento y topografía empinada se aprecian en las terrazas meticulosamente construídas en las laderas (colinas) de Java y Filipinas, donde en cada arrozal casi plano la cantidad de agua requerida es almacenada y el exceso drenado a través de una pequeña salida hacia el campo inmediatamente inferior.

Sin embargo, los campos son terrazas casi planas (uniformes) con sus montículos de retención no son tan apropiados para cultivos de secano como para arroz debido a problemas de drenaje en el campo, y un problema central de la siembra de temporal de cultivos tropicales de altura (secano), es el diseño de estructuras prácticas de bajo costo para deshacerse en forma controlada del agua de escurrimiento y, si es posible, su retención en la finca para el uso de cultivos subsiguientes.

SISTEMAS DE CULTIVOS MIGRATORIOS - ASPECTOS HIDROLOGICOS

El ciclo hidrológico dentro de un campo de cultivo en un sistema de agricultura migratoria, en principio, no difiere de un sistema de cultivo temporal semi-intensivo o intensivo.

Efectos en Pequeña Escala - Una característica común de la agricultura migratoria, particularmente donde las mejores tierras son usadas por cultivos más intensivos, es que se llevan a cabo en pendientes pronunciadas. En pendientes muy pronunciadas, en áreas de alta precipitación el escurrimiento y la erosión pueden ser catastróficos cuando toda la colina se desprende siguiendo un período de lluvia intensivo. Ocasionalmente, troncos sin quemarse son colocados contra la pendiente para prevenir movimiento de suelo; y en las montañas de Nueva Guinea, sistemas bastante elaborados de drenaje han evolucionado para cultivos de camote (batata), pero son la excepción y no la regla. Entre mayor es la complejidad de cultivos en el tiempo y espacio, mayor será el grado de protección de la superficie del suelo de la erosión y más eficiente uso de agua por los cultivos. En climas de lluvia de verano, existe un período vulnerable entre el comienzo de la estación lluviosa y el tiempo cuando el follaje del cultivo cubre la superficie del suelo, durante el cual la superficie del suelo se encuentra expuesta a la lluvia.

Efectos de Gran Escala - La magnitud de efectos de gran escala y largo plazo de un sistema de agricultura migratoria operando en tiempo dentro de un área de drenaje específica dependerá de la estabilidad del complejo vegetación-suelo. Este, a su vez, estará influenciada por las características hidrológicas básicas del área drenada, la frecuencia de cultivo del sistema, y la capacidad de la vegetación para recuperarse durante la fase de descanso.

Bosques primarios son estables hidrológicamente en que la fluctuación en la amplitud de la escorrentía y drenaje, y la cantidad de erosión se encuentran al mínimo para las condiciones particulares del suelo, pendiente y precipitación. Sin embargo, aún si el sistema de cultivo impuesto fuera de una frecuencia de cultivo suficientemente baja para asegurar un regreso virtualmente completo a la condición hidrológica original -lo cual es cada vez menos frecuente- la capacidad del barbecho (tierra en descanso) para absorber agua durante el

período temprano de recuperación pueda estar bastante por debajo del bosque primario.

Si la frecuencia de cultivo aumenta hasta el punto donde mayores cambios de sucesión se llevan a cabo -degradación a bosques secundarios, a rastrojo (Guamil) y a sabanas de gramíneas- las propiedades hidrológicas del almacenaje (retención) son propensas a declinar más. Cuando el pasto se quema frecuentemente en la estación seca o es fuertemente pastoreado, la superficie del suelo queda expuesta, particularmente al principio de la época lluviosa. Además, la capa del suelo cada vez menos profunda explorada por las raíces de comunidades degradadas está expuesta a amplificar las fluctuaciones de drenaje.

Estos cambios no influyen solamente la productividad a largo plazo del sistema de cultivo -pero más importante, debido al mayor número de personas afectadas, puede afectar adversamente las características de precipitación/escorrimento del almacenaje total e influenciar colonial (caseríos) y agricultura más abajo. El pico de flujo de la estación lluviosa (húmeda) aumenta, el cual puede conducir a inundaciones y la cantidad y duración de flujo de agua durante la estación seca disminuye, lo cual puede afectar esquemas de irrigación y provisión de agua para uso doméstico. El potencial de daño es mayor en el Sureste Asiático, donde el patrón hidrológico básico es de cultivo intensivo de arroz húmedo en el fondo de los valles y deltas alimentados por arroyos drenando almacenajes en bosques de fuerte relieve en zonas de alta precipitación.

SISTEMAS DE CULTIVOS DE TEMPORAL SEMI-INTENSIVO E INTENSIVO

ASPECTOS HIDROLOGICOS

Erosión del Suelo

Aumentando la frecuencia de cultivo, aumenta la amenaza potencial de erosión del suelo inducida por la escorrentía. El principal factor limitante es el aumento en la proporción de años cuando la superficie del suelo se encuentra en una condición expuesta, en vez de una condición de descanso con una cobertura vegetal completa. Además, al aumentar la intensidad de cultivo puede, en algunos casos, ocasionar una reducción en la capacidad de infiltración de la superficie del suelo. Los siguientes datos de Kenya ilustran esta situación:

Después de un año de cultivo	94% de infiltración
Después de dos años de cultivo	89% de infiltración
Después de tres años de cultivo	91% de infiltración
Después de cuatro años de cultivo	75% de infiltración

En un clima de sabana, la cobertura vegetal en un campo de cultivos es ligera o negligible durante el comienzo de la estación húmeda, y no se aproximará a la cobertura natural de una vegetación perenne hasta mediados de la estación húmeda. Aún entonces, debido a la baja densidad de plantas, puede que se logre completa intercepción de la lluvia. La falta de cobertura al

comienzo de la estación lluviosa es particularmente importante debido a que en muchos climas de sabana la erosividad de las primeras lluvias de tormentas violentas, es mayor que el de las precipitaciones de los períodos principales de lluvia, las cuales se derivan de bajas depresiones y embudos de baja presión. En climas más ecuatoriales donde una estación de cultivo más amplia es posible, la proporción del año durante la cual el campo de cultivo tiene una cobertura vegetal inadecuada es menor que en climas de sabana; por otro lado, la precipitación es mayor y el período de lluvia más largo.

Los suelos con superficies arenosas tienen una tasa de infiltración alta, pero también son a menudo altamente móviles bajo el impacto de la lluvia. En suelos arcillosos no expandibles, la tasa de infiltración al comienzo de las lluvias, antes de arar, es a menudo baja porque la superficie ha sido acinada y endurecida durante la estación seca. Arcillas (suelos) expandibles aceptan agua rápidamente al comienzo de la estación en las grietas, pero una vez que se recarga el perfil y las ranuras (grietas) se sellan, la infiltración disminuye marcadamente y el escurrimiento y erosión pueden ser altos.

La infiltración en los suelos de las tierras altas de Chiriquí en Panamá pueden variar de 85 a 280 mm en 10 y 60 minutos respectivamente. Estos suelos tienen alto contenido de materia orgánica y son de textura franco arenosa. Las pérdidas de suelo con diferentes precipitaciones y manejo del suelo se muestran a continuación.

Lluvia, mm		Papa en contorno	Papa favor pendiente	Tierra desnuda
83	Escorrentía	1.5 mm	2.5 mm	12 mm
	Erosión	0.1 t/ha ⁻¹	4.2 t/ha ⁻¹	7.5 t/ha ⁻¹
66	Escorrentía	0.5 mm	1.3 mm	3.6 mm
	Erosión	0.2 t/ha ⁻¹	2.6 t/ha ⁻¹	5.4 t/ha ⁻¹

Una de las situaciones más serias potencialmente para la erosión del suelo se crea cuando se producen cultivos intensivos de temporada en tierras de ladera en áreas de alta precipitación, donde los valles están densamente poblados y se practica una agricultura intensiva. Conforme la capacidad de retención de humedad disminuye, se reduce el período de crecimiento (falta de agua), se acrecientan las inundaciones periódicas e instalaciones (redes) de riego y drenaje de los valles se sedimentan con limo.

MANEJO DE AGUA Y PRACTICAS DE CONSERVACION DE SUELO

Se debe tener en mente que la retención de agua o escorrentía, y retención o pérdida de suelo son dos procesos separados. En climas tropicales semi-áridos la retención de humedad y conservación de suelo son metas igualmente deseables que se intentan a menudo con las mismas técnicas o estructuras. En los trópicos de alta precipitación, el fin (intento) hidrológico es

frecuentemente el deshacerse del agua de escorrentía, con la mínima pérdida del suelo.

Prácticas de Manejo de Agua y Conservación de suelo

Cobertura vegetal superficial - Se ha encontrado altamente efectiva en regiones de alta precipitación y períodos cortos intermitentes de sequía, pero parece menos útil en ambientes más áridos. Además, en ambientes más áridos las gramíneas y residuos de cultivos requeridos para producir una cobertura adecuada están seguramente en demanda para forraje por los rumiantes.

El cuadro siguiente muestra el efecto de la pendiente y cobertura vegetal en la escorrentía y erosión del suelo (Nigeria).

Cobertura vegetal t ha ⁻¹	Pendiente %				PROMEDIO \bar{x}
	1	5	10	15	
----- Escorrentía, mm -----					
0	46.0	59.8	37.7	59.8	50.8
2	1.3	16.6	15.2	14.0	11.8
4	0.4	1.5	3.6	3.3	2.2
6	0.0	0.7	1.9	1.8	1.1
----- Pérdida de suelo, t/ha ⁻¹ -----					
0	1.41	19.40	28.14	12.89	15.46
2	0.01	0.83	0.91	0.83	0.65
4	0.00	0.16	0.11	0.31	0.19
6	0.00	0.05	0.03	0.08	0.04

La adición de una cobertura vegetal incorporada en el suelo (cobertura vertical), es efectiva para algunos cultivos como algodón con camellones bien endurecidos, pero no para cultivos de maduración rápida como sorgo y maní.

Montículos de Contorno - Montículos amplios de contorno son usados en India, particularmente en suelos negros pesados, para retener agua y reducir escorrentía y erosión del suelo, y aumentar la disponibilidad del agua para las plantas (cultivo). Si se diseñan y manejan adecuadamente, son muy efectivos como medida de conservación de suelo, su utilidad como técnica de control de humedad bajo las condiciones de precipitación altamente erráticas que prevalece en mucho de los trópicos semi-áridos no ha sido probada completamente.

Posibles desventajas de los montículos:

a) Pueden reducir los rendimientos por:

- Menos área cultivada
- Más baja fertilidad del suelo al remover la capa superior
- Inundación durante períodos de mayor precipitación

b) Posibilidades de catástrofes si se rompen

Surcos en Gradientes, Canales y Estanques - Son usados frecuentemente en India, aún para consumo doméstico y para irrigación por gravedad.

En ICRISAT, Hyderabad, están progresando con pequeños depósitos de sistemas de eras o bordes separados por surcos, con gradientes de cerca de 0.5 a 0.8 por ciento y conducido hacia canales con pasto con gradientes, y de ahí hacia pequeños estanques.

Terrazas de Banco - El agricultor en los trópicos a través de la historia, ha -bajo aumenta en la presión poblacional en áreas de colinas o topografía abrupta- desarrollado varios sistemas de terrazas, con o sin bancos de retención, para aumentar la infiltración y retención de agua y reducir el escurrimiento y la erosión. En regiones de alta precipitación en el Sureste Asiático, las terrazas de banco le han permitido a los agricultores cultivar arroz de inundación en pendientes bien pronunciadas. Estas terrazas permiten la forma más estable de la geometría de la tierra, tienen sus desventajas para cultivos de temporal no inundado, porque si estos se cultivan en la época lluviosa, generalmente se necesita establecer sistemas de drenaje interno superficial en el campo, formando eras o camellones.

PATRONES DE CULTIVOS DE TEMPORAL EN RELACION
AL AGUA DEL SUELO

Barbecho para Conservación de Agua - En climas con temperaturas cálidas, con lluvias predominantes en el invierno, o en invierno y verano, se acostumbra mantener la tierra en una condición de barbecho por un año y año y medio para acumular agua en el suelo para los cultivos subsiguientes. En climas mediterráneos semi-áridos una rotación típica de dos años es: barbechocereal; en estos climas pero con mejor distribución de la precipitación, la tierra se puede dejar en barbecho durante el invierno para un cultivo de verano o viceversa.

Estas tácticas no son necesarias en climas tropicales con alta precipitación. Por otro lado, en Vertisoles pesados de India, con rangos en precipitación de 600 a 1500 mm, el barbecho es una práctica común durante la estación lluviosa y se siembra temprano en la estación seca, p.e., sorgo o trigo. El cultivo se produce con agua almacenada. Un caso similar puede observarse en áreas de Guatemala.

Tácticas de Cultivo en Climas de Sabana con Estación o Período de Crecimiento Corto - En climas de sabana con un período de crecimiento limitado debido a la combinación de la corta estación lluviosa y pobre almacenaje de agua en el suelo, las tácticas de cultivo son simples porque no hay mucha oportunidad de maniobrar. Monocultivos, cultivos asociados o mezclados se pueden practicar, pero la duración del período con agua disponible es tal que todo el crecimiento y desarrollo del cultivo puede necesitar completarse en alrededor de 100 días. Relevo de cultivos es escasamente posible y dos cultivos al año estarían fuera de consideración. Generalmente se cultivan cereales y leguminosas de grano, ya que la mayoría de tubérculos requieren períodos de crecimiento mayores. Tácticas adaptativas simplemente incluyen el acoplamiento de

la duración del cultivo a la duración del agua disponible en el suelo. Esto ha resultado en la evolución de cultivares fotosensibles, los cuales en sus latitudes donde se desarrollaron (fueron desarrollados), maduran durante el período de utilización de la reserva de humedad del suelo.

Tácticas de Cultivo en Climas de Sabana con Estación de Crecimiento más larga

Una extensión del período de disponibilidad de agua del suelo, debido a una estación lluviosa más pronunciada, o por mejores características de retención de humedad del suelo, permite tácticas de cultivo más complejas durante la estación. Existen tres sistemas básicos de cultivos en estas condiciones:

- a) Un solo cultivo de largo período de crecimiento o mezclas de cultivos.
- b) Asociación entre un cultivo de crecimiento corto y otro de período de crecimiento largo.

Como ejemplos tenemos: Tipo a, algodón (India, Africa) y yuca (S.E. Asia); Tipo b, asociación de sorgo con gandul; Tipo c, cereal o leguminosa en relevo con un cultivo similar (maíz-soya en Indonesia).

Tácticas de Cultivo en Regiones con Precipitación de Larga Duración - En estas regiones se distinguen tres tipos de patrones climáticos:

- a) Climas de sabana con un solo pico de precipitación de larga duración
- b) Climas de precipitación subecuatorial con picos gemelos
- c) Climas monzónicos de alta latitud con un componente de precipitación en el invierno.

En cualquiera de las tres condiciones la duración del período de disponibilidad de agua del suelo es tal que dos cultivos sucesivos se pueden producir. Las opciones de patrones de cultivo son innumerables. Cultivos tuberosos de larga duración son prominentes, también cultivos perennes o semiperennes, tales como banano, caña de azúcar, los cuales pueden sobrevivir los (el) relativamente cortos períodos o período de sequía. En el subtipo climático c, se pueden producir cultivos de verano de adaptación tropical: maíz, sorgo, mijo, maní, etc.; cultivos de invierno de adaptación a climas templados: trigo, garbanzo, cebada y cartamo (azafrán), etc.

Tácticas de Cultivo en Climas Tropicales Húmedos - Una vez las limitaciones de períodos secos sustanciales y recurrentes son eliminados, el potencial para cultivos complejos llega a ser, desde el punto de vista hidrológico caso infinito, siempre y cuando el drenaje sea adecuado. Sin embargo, en áreas bajas de drenaje pobre, la escogencia del cultivo puede ser limitada a especies tolerantes a inundaciones tales como arroz y cáñamo (yute).

Tácticas de Cultivo en Mayores Altitudes - Para cualquier régimen de lluvia, un aumento en altitud es probable que extienda la estación de crecimiento debido a más bajas temperaturas y reducción en evaporación. La humedad depositada por las nubes también puede ser significativa. En situaciones ecuatoriales de altura, donde las condiciones de crecimiento son favorables todo el año, pero el rango general de temperatura es bajo, especies de cultivo de origen tropical han evolucionado en tipos de maduración muy tardía. Por ejemplo, en los valles altos de Colombia, los cultivares de maíz maduran en 10 o más

meses, aunque la amplia humedad es utilizada por frijoles de crecimiento indeterminado en relevo después de cinco meses de la siembra del maíz, al que se le cortan las hojas más bajas para permitir la penetración de luz.

TACTICAS AGRONOMICAS EN RELACION AL AGUA DEL SUELO

Relaciones de Competencia en Cultivos Mixtos, Asociados y de Relevo - Los monocultivos en sistemas de finca mecanizados están influenciados primeramente por la capacidad limitada de la maquinaria agrícola para adaptarse, especialmente al tiempo de la cosecha, con más de un cultivo en un área dada. Esto no sucede en fincas no mecanizadas del trópico.

Existe considerable evidencia que sugiere que con una población adecuada, geometría de siembra (arreglo espacial), hábito de la planta; tipo de maduración y arreglos cronológicos (fechas de siembra) adecuados, se pueden encontrar combinaciones de cultivos que producen más que la suma de los dos cultivos sembrados separadamente en monocultivo en la misma área total.

El factor dominante que gobierna la productividad de cultivos mixtos es el grado de coincidencia entre el patrón estacional de la demanda de agua de los cultivos y la disponibilidad de ésta en el suelo. La competencia por luz es también sumamente importante. Por otro lado, la competencia por nutrimentos se controla con la aplicación de éstos.

La teoría de competencia interespecífica en mezclas de especies forrajeras, ha sido bastante explorada, pero no se ha estudiado mucho esta competencia entre cultivos anuales asociados o en relevo.

Técnicas de Cultivo para Conservar Agua del Suelo - Una de las causas principales de uso ineficiente de agua en cultivos anuales tropicales, es la pérdida de ésta por escurrimiento, ocasionado por la superficie impermeable del suelo. Las coberturas vegetales ayudan a aumentar la aceptación de la lluvia, reducen la evaporación y temperatura del suelo. Otra técnica disponible al agricultor es el laboreo (aporque) oportuno, pero si el suelo está demasiado húmedo se puede producir compactación y reducción de la infiltración.

Uno de los períodos críticos durante el cual el agua útil se pierde por escurrimiento es al comienzo de la estación lluviosa, antes de preparar (arar) la tierra. Por esto es preferible arar poco antes del comienzo de las lluvias fuertes o al final de la cosecha anterior.

Reño - La eficiencia del uso del agua de cultivos anuales en condiciones tropicales semi-áridas puede aumentarse dejando reño los cultivos, ya que no hay necesidad de preparar el suelo. Además de aumentar las posibilidades de dos cultivos en una estación limitada, p.e., sorgo o mijo, el reño (recrecimiento) puede usarse como una técnica de emergencia para la sobrevivencia del cultivo durante un período seco de una estación lluviosa. Si un cultivo que no ha alcanzado su madurez y está sufriendo de severo stress (deficiencia) de agua se corta, se puede recuperar y producir una cosecha de grano cuando se termine el período seco.

Genotipos de Cultivos Determinados e Indeterminados - En la evolución de genotipos locales de cultivos, la presión de selección de una densidad de población variable, y la búsqueda de estabilidad de producción de una estación a otra, han llevado al desarrollo de cultivares indeterminados de tamaño de planta flexible. En un genotipo indeterminado, las fases críticas de floración y desarrollo del fruto se esparcen por un período largo y la probabilidad de que un solo período de sequía tenga un efecto catastrófico se reduce. Existen algunas desventajas cuando la maduración no es uniforme, pero son de menor importancia cuando se cosecha a mano. Además, en el evento de una siembra poco densa, las plantas tienden a retoñar (producir hijos) o ramificarse libremente para utilizar el exceso de agua del suelo. Por tanto, indeterminancia y tamaño flexible de las plantas son esencialmente adaptaciones hidrológicas.

SISTEMAS DE CULTIVOS ANUALES DE REGADIO - ASPECTOS HIDROLOGICOS
USO DE AGUA POR LOS CULTIVOS

Arroz y Cultivos de Tierras Altas (Secano) - El requisito de agua o evapotransportación actual de cultivos individuales es parcialmente un atributo inherente de la misma especie, y está parcialmente gobernado por las condiciones evaporativas del ambiente en el cual se cultiva. El uso actual del agua en el sistema de cultivo en el campo, también está influenciado por las características físicas del suelo, particularmente su drenaje y escurrimiento y por el patrón de la intensidad de la lluvia y la cantidad y el tiempo de aplicación del agua de irrigación.

A continuación se presenta información sobre el promedio de uso de agua en estaciones por diferentes cultivos:

CULTIVO (Cultivar)	ESTACION	USO DE AGUA, MM
Arroz (IR-8)	Húmeda	1,550
Arroz (TN-1)	Final estación seca	1,250
Algodón	Comienzo estación seca	564
Trigo (Mejicano)	Comienzo estación seca	465
Mijo (HB-4)	Final estación seca	447
Sorgo (CSH-1)	Húmeda	374

Una alta demanda evaporativa está asociada con alta temperatura, la cual favorece maduración rápida, por tanto, evapotranspiración diaria puede ser mayor pero por un período total más corto. Una de las razones para las altas necesidades de agua del arroz es la alta tasa de evapotranspiración de un campo de arroz inundado.

Uso de Agua en Sistemas de Arroz de Riego en Parcelas - El patrón de uso de agua por arroz inundado en dos estaciones contrastantes se ilustra en el cuadro siguiente de Luzón (Filipinas):

PATRON DE USO DE AGUA DE ARROZ INUNDADO

	ESTACION HUMEDA	ESTACION SECA
	- mm -	
Irrigación Neta	1090	1475
Lluvia	850	210
Escurrimiento por drenaje	1210	537
Uso neto de agua	730	1148
Uso neto de agua por día	6.5	10.2
Evaporación diaria	3.4	5.6
Eficiencia (uso neto ÷ irrigación neta + lluvia)	38%	68%

El uso neto de agua incluye la evapotranspiración, la filtración lateral e infiltración (percolación vertical). Eficiencia de uso de agua fue menor para la estación lluviosa (húmeda), principalmente por el exceso de agua drenada en períodos de alta precipitación.

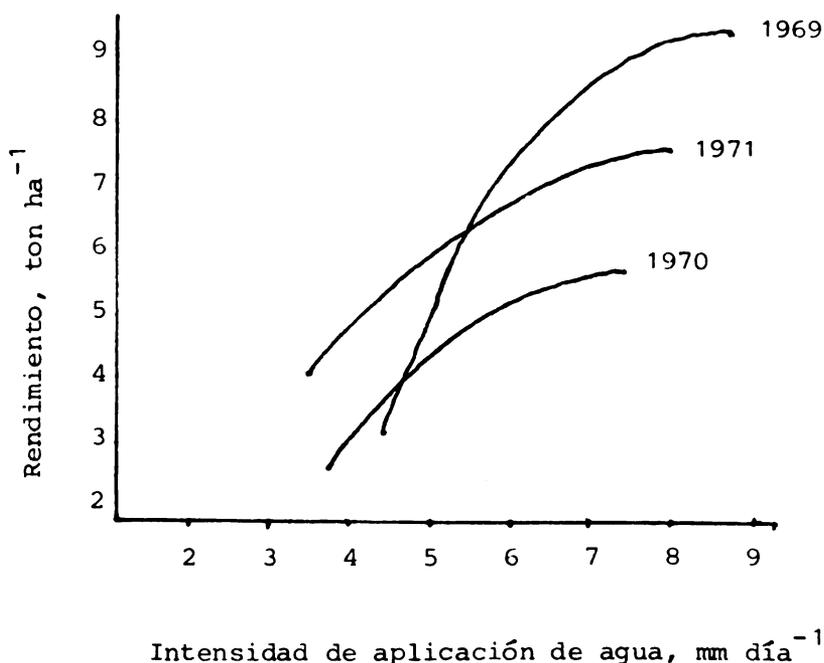
Uso de Agua de un Distrito de Riego - En un área grande de irrigación, la eficiencia en el uso de agua en el área total también dependerá de las pérdidas en la red (sistema) de riego antes de que llegue al campo regado, y en la factibilidad del reuso del agua de drenaje para irrigación en otra parte. Estas pérdidas en el sistema o red dependen del largo de los canales y sus características de percolación o filtración.

Uso de Agua en la Preparación del Suelo para Arroz Inundado - Una proporción significativa del agua usado en el cultivo de arroz inundado se pierde en la fase de preparación del suelo; el cual para arroz transplantado incluye la arada inicial batimiento y suavisamiento (esto toma hasta 8 semanas). En algunos ensayos se ha encontrado necesario aplicar 500 y 171 mm de agua para humedecer la tierra en suelo inicialmente seco (barbecho) y húmedo (después de la cosecha), respectivamente durante la preparación del suelo. Esto representa 44 y 24% del agua total usada (mm agua para humedecer ÷ mm irrigación + mm lluvia).

Demoras en Transplantar Arroz Inundado - En sistemas de cultivo de arroz inundado de temporal en climas de sabana, y también en áreas de irrigación con clima similar donde el almacenaje es inadecuado para suplir la demanda al comienzo de la estación lluviosa, se retrasa el transplante de arroz hasta que haya suficiente humedad por las lluvias continuas. Dependiendo del patrón de lluvia de la región, este retraso puede restringir el sistema de cultivo a un cultivo por año.

Por el contrario, si la siembra es directa, se puede sembrar mucho más temprano. Si la estación lluviosa no es muy corta, puede haber suficiente tiempo para otra siembra de un cultivo transplantado. Las desventajas de este arreglo son el control inicial de malezas y la primera cosecha durante la estación lluviosa.

Arroz Inundado y Deficiencia de Agua (estress) durante el Crecimiento - El arroz inundado es muy sensible a déficits de agua durante su período de crecimiento. Esto se demuestra en la figura siguiente para tres estaciones secas:



Se está intentando seleccionar y producir cultivares de arroz tolerantes a deficiencias de agua (estress) durante el período de crecimiento. Esto se puede lograr también con cultivares de rápida maduración.

SISTEMAS DE RIEGO EN ARROZ DE SECANO

Sistemas de "Riego" en Bancos de Ríos - En algunas situaciones en bancos de ríos, la tierra sumergida durante la parte principal de la estación lluviosa se siembra al bajar el nivel del agua, con cultivos que crecen con el agua almacenada (bancos del Nilo en Sudán).

Irrigación en Áreas de Depresiones (Basin) - Consiste en inundar y drenar áreas de depresión cerca (adyacentes) a los ríos. Se construyen canales de conducción del agua desde el río a la depresión, con uno o más canales de drenaje hacia el río. El canal de conducción se abre cuando el río crece y se inunda la depresión hasta el nivel requerido (70 a 100 cm). Se retiene el agua

por cerca de 30 días y después se drena y se siembra con sorgo y algunas leguminosas (garbanzos).

Riego de Sistemas de Cultivos de Secano en Climas Monzónicos - Existen varios tipos de sistemas de cultivos que se les aplica riego - algodón, mijo, maní, trigo, etc.

CULTIVOS DE SECANO REGADOS EN SISTEMAS DE ARROZ INUNDADO

Los tipos de sistemas de cultivos múltiples con cultivos de secano regados en la época seca alternos con arroz inundado se producen en varias regiones del mundo.

En las situaciones cuando el agua de irrigación está disponible solamente por un corto período y en pequeñas cantidades al final de la estación lluviosa, se puede sembrar un segundo cultivo de secano de estación (período crecimiento) corto tales como maní, soya, frijol, etc., sembrados directamente sin preparar la tierra. Las limitaciones para el rendimiento del segundo cultivo en estas situaciones son aereación del suelo y disponibilidad de agua. De los cultivos mencionados, la soya es el más tolerante a aereación deficiente.

PATRON ESPACIAL DEL CULTIVO DE ARROZ INUNDADO

Al discutir el arreglo espacial del cultivo de arroz inundado, los aspectos hidrológicos de las áreas fuera de la finca o campo de cultivo frecuentemente son importantes, porque ellos gobiernan la incidencia y cantidad de agua que llega al campo y la factibilidad de irrigaciones. A continuación se mencionan algunos tipos de patrones espaciales del cultivo de arroz inundado en diferentes condiciones:

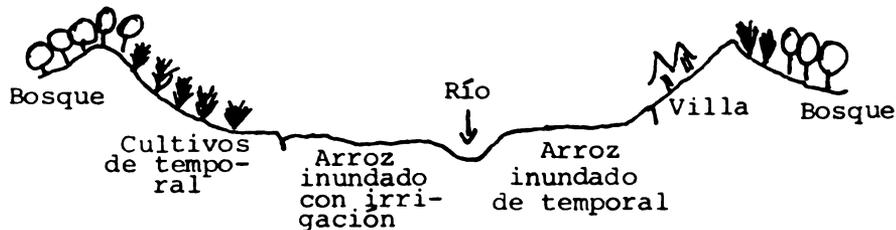
Topografía Plana, Precipitación Moderada, Densidad de Población Baja (Asia) - Las tierras de cultivos de secano a veces tienen suelos arenosos pobres, a menudo cultivadas de maní y otros cultivos de temporal. También se encuentran pequeñas depresiones superficiales (poco profundas) de suelos más pesados usados para sembrar arroz inundado de temporal.



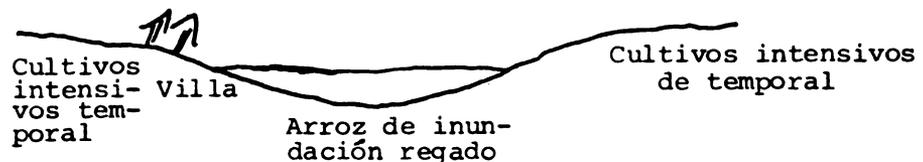
Asociación de Arroz de Inundación y Cultivos de Secano (W. Africa) - Este sistema representa una distribución simple de cultivos adaptados a una ligera catena de pendiente y drenaje dentro de una unidad de finca, con el arroz de inundación en las áreas más bajas y los cultivos de secano en tierras ligeramente más altas.



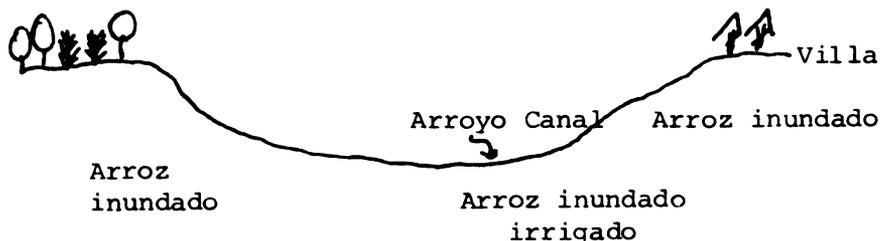
Topografía Abrupta, Precipitación Moderadamente Alta y Población Densa en los Valles - Es una situación típica de valles en regiones geológicamente jóvenes del Sureste Asiático. El área limitada apropiada para arroz de inundación sin hacer gran cantidad de terrazas puede conducir a una presión fuerte sobre las tierras de cultivo, y muchos agricultores pueden ser forzados a cultivos suplementarios en las colinas montañosas con una agricultura migratoria, con peligro de erosión e inundaciones.



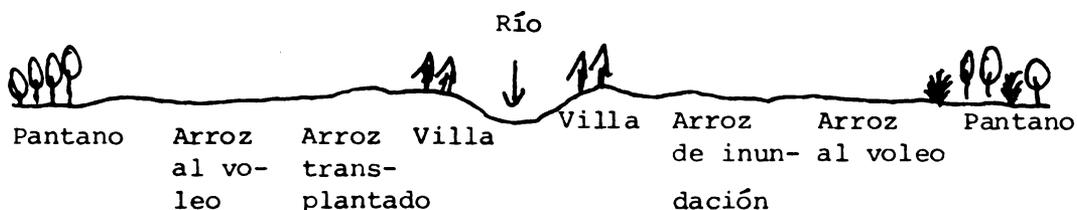
Topografía Plana, Precipitación Baja y Densidad de Población Alta - Las áreas más altas son usadas para cultivos de secano, el agua de escurrimiento se almacena en tanques y es usada para el cultivo de arroz de inundación en los valles superficiales.



Topografía Ondulada a Abrupta, Precipitación Alta, Población Densa - Son áreas de suelo fértil, con alta densidad de población. En estas condiciones se necesita utilizar toda la tierra, valles y colinas, para arroz y otros cultivos. La tierra se mantiene estable por medio de terrazas y prestando atención al problema de erosión.



Areas de Deltas Propensas a Inundaciones - Los patrones más complejos de ambientes para arroz de inundación se encuentran en los deltas de los ríos principales del Sur y Sureste Asiático.



Intensidad de Cultivo y Nivel de Agua - Conforme uno se mueve de una elevación mayor hacia una más baja, con control de agua limitado, entonces hasta cierto punto el aumento en la cantidad de agua puede permitir intensificación del sistema de producción de un solo cultivo de arroz inundado a arroz inundado más un cultivo de secano hasta un sistema de tres cultivos.

Patrones de Temporal del Cultivo de Arroz Inundado

Se refiere al rango de patrones de tiempo en el cultivo de arroz inundado con relación a precipitación, disponibilidad de agua para riego y temperatura de invierno. En estos casos el arroz se cultiva en la época lluviosa.

Sistemas de Producción de Arroz en Agua profunda

Se puede sembrar arroz en áreas donde la profundidad máxima del agua es hasta 6 m. Tales áreas son características de los deltas de grandes ríos. Se estima que entre 25 y 40 por ciento del área de arroz en el mundo se inunda a una profundidad de 1 m o mayor.

Las características del arroz cultivado bajo estas condiciones incluyen la capacidad de rápido alargamiento (crecimiento) conforme sube el nivel del agua, y para cultivares adaptados a aguas muy profundas (más de 2 m), la capacidad adicional de las hojas para flotar. Se cree que del 40 por ciento del

área de arroz cultivado en aguas profundas, el 10 por ciento está ocupado por arroz sembrado con cultivares que flotan a una profundidad entre 2 y 6 m; y 25 a 30 por ciento con cultivares de profundidad mediana (1 a 2 m), los cuales no tienen hojas flotantes pero se alargan rápidamente. Tasas de alargamiento de 44 a 51 mm en cinco días para plántulas de 40 días de edad han sido observadas. Todos estos cultivares son de bajos rendimientos pero están siendo usados en programas de fitomejoramiento con variedades altamente productivas. En sistemas de cultivos de arroz, la semilla se distribuye al voleo, al comienzo del período de inundación sobre suelo preparado. Los cultivos son de maduración tardía y presenta una adaptación fotoperiódica local lo cual permite cosecharlos cuando el nivel de las aguas baja.

MANEJO DE SUELO EN SISTEMAS DE CULTIVO DE ARROZ

El arroz es el único cultivo básico capaz de producirse en suelos inundados, debido a su poder de oxidar su rizosfera.

Cuando un suelo seco se inunda repentina y completamente, los agregados estructurales se saturan con agua. El aire en los microporos se comprime al avanzar el agua hasta que pequeñas explosiones ocurren dando lugar a la ruptura de los agregados más grandes. Los minerales montomoriloníticos se hinchan (expanden). Si existe amonio fijado entre los látices de silicato laminares, este proceso da lugar a la liberación de amonio hacia la solución del suelo.

Consecuencias Químicas de la Inundación

Al inundarse un suelo, el suministro de oxígeno baja a cero en menos de un día.

El pH se equilibra a 6.5 - 7.2 dentro de un mes después de la inundación. El pH de suelos ácidos aumenta debido a la liberación de iones de OH^- cuando el $\text{Fe}(\text{OH})_3$ y compuestos similares se reducen a $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ó $\text{Fe}(\text{OH})_8$.

El pH de suelos alcalinos se reduce debido al aumento de presión parcial del CO_2 que da por resultado una liberación neta de iones H^+ .

Los NO_3^- (nitratos) presentes en el suelo se denitrifican y se pierden en la atmósfera; pero el ión amonio es estable bajo condiciones anaeróbicas y se acumula.

La descomposición de la materia orgánica avanza más lentamente en suelos inundados.

La solubilidad de Mn aumenta marcadamente con la inundación por reducción de compuestos de Mn^{4+} a la forma más soluble Mn^{2+} . Similarmente, la solubilidad del Fe aumenta.

La concentración de P aumenta en la solución del suelo con la inundación por: 1) reducción de fosfatos férricos a formas más solubles de fosfatos de Fe; 2) disponibilidad de compuestos de P solubles en reductores motivada por la disolución previa de las capas oxidadas que rodean las partículas de fosfato; 3) hidrólisis de algunos fosfatos de Fe y Al en suelos ácidos; 4) aumento de mineralización de P orgánico en suelos ácidos a causa del aumento del pH; 5) aumento de la solubilidad del apatita en suelos calcáreos cuando el pH disminuye a 6 ó 7; y 6) la mayor difusión de iones de $H_2PO_4^-$ en un volumen mayor de solución del suelo.

A niveles intensos de reducción del suelo, los iones de sulfato se reducen a SO_3^{2-} y S^{2-} por medio de bacterias del Genero Desulfovibrio; disminuyendo la disponibilidad del S.

Como K^+ , Ca^{2+} y Na^+ ya están reducidos no se afectan directamente con la reducción del suelo.

NOTA

Parte de este trabajo es traducción parcial de capítulos del libro: "Annual Cropping Systems in the Tropics" de M.J.T. Norman. A continuación se anotan éste y otros documentos consultados:

1. CARLISLE, V.W. y R.E. CALDWELL. A Laboratory manual por Introducing Soil Science. University of Florida, Gainesville, 1970. pp. 48 - 51.
2. LEON, L.A. y O. ARREGOCES. Química de suelos inundados. Guía de estudio. Centro Internacional de Agricultura Tropical, CIAT, Cali, Colombia, 1981. 35 p.
3. MORENO, R. Algunos sistemas de producción de cultivos anuales de pequeños agricultores en el Istmo Centroamericano. Turrialba, Costa Rica, 1979. 37 p.
4. NORMAN, M.J.T. Annual cropping systems in the tropics. University Presses of Florida, Gainesville, 1979. 275 p.
5. SANCHEZ, P.A. Suelos del Trópico - Características y Manejo. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. San José, Costa Rica, 1981. 634 p.

CARACTERIZACION DE SUELOS - FERTILIDAD

M. Rodríguez G.

INTRODUCCION

En este documento se discuten las características químicas del suelo que más influyen en su fertilidad; también se mencionan algunas características físicas sumamente importantes. Se discute además, cómo determinar la cantidad de cal que se debe aplicar en un suelo ácido, y la fijación de fósforo en el suelo, otro aspecto que es sumamente importante. Finalmente se discuten las técnicas comúnmente utilizadas para determinar los requisitos nutricionales de las plantas o necesidades de abonamiento.

Los factores más importantes que afectan el crecimiento de los organismos, son los factores genéticos y factores ambientales; los factores genéticos no se consideran aquí, porque están fuera del alcance de esta discusión. Aún dentro de los factores ambientales, solamente incluiremos el factor edáfico o el referente al suelo desde el punto de vista del crecimiento de las plantas.

El estudio del suelo se divide en dos grandes ramas. Una es la pedología, que es el estudio del suelo desde el punto de vista de su formación, origen y clasificación o una ciencia pura; mientras que la edafología es la ciencia que estudia el suelo desde el punto de vista de su relación con el crecimiento de las plantas.

Entre los factores ambientales, no solamente está el suelo, sino que está la luz, humedad, el manejo que el agricultor le da a su cultivo, etc. Es decir, que toda esta serie de factores hay que considerarlos también cuando se estudian los sistemas de producción.

COMPOSICION DEL SUELO

La composición ideal de un suelo es 45 por ciento de materia mineral, 5 por ciento de materia orgánica, 25 por ciento de agua y 25 por ciento de aire. Esta es una situación ideal, pero normalmente no siempre se encuentran estas condiciones en el campo.

Generalmente, la mayor parte de los suelos tropicales tienen menos de 5 por ciento de materia orgánica; comúnmente la mayoría de estos suelos tienen alrededor de 1.5 a 3 por ciento; sin embargo, siempre se encuentran las excepciones; especialmente en suelos de origen volcánico reciente, donde el porcentaje de materia orgánica puede subir hasta un 10 o un 15 por ciento.

Para el estudio de suelos, es común hacer calicatas y tomar la muestra de allí; esto ayuda mucho, no solamente a los edafólogos, sino también a los taxónomos de suelo, porque así se puede examinar bien todo el perfil del suelo. El perfil lo forman las diferentes capas u horizontes del suelo. Así se estudia el perfil, horizonte por horizonte, para determinar algunas de las características físicas que pueden determinarse a simple vista y, también, para tomar

muestras para análisis químicos y minearológicos en el laboratorio, que son los que van a determinar finalmente en qué agrupación o categoría se van a colocar los diferentes suelos.

Al ver un subsuelo compacto, se puede notar por su apariencia que no tiene buenas características físicas y que puede tener una productividad baja.

Es importante diferenciar entre fertilidad y productividad; fertilidad del suelo se refiere a la concentración, balance y disponibilidad de los nutrimentos en el suelo; mientras que productividad se refiere a la capacidad de un suelo para producir bajo un determinado manejo. La productividad se mide como rendimiento, mientras que la fertilidad se mide como concentración y balance de los nutrimentos disponibles.

COLOIDES DEL SUELO

La parte más activa e importante del suelo, desde el punto de vista agrícola, está formada por la materia coloidal, ya sea mineral u orgánica. Los coloides más importantes del suelo son las arcillas, el humus y el alofano en suelos de origen volcánico. Las arcillas silicatadas son cristalinas y las hidratadas pueden ser cristalinas o amorfas.

El humus y alofano le proporcionan una alta capacidad de intercambio de cationes a los suelos. El alofano forma complejos con la materia orgánica que la estabiliza. Por esta razón, los suelos volcánicos normalmente tienen un contenido alto de materia orgánica, porque se reduce la oxidación de la materia orgánica al formarse estos complejos con el alofano, lo cual mejora la capacidad de retención de agua del suelo.

La diferencia principal entre una arcilla tipo 2:1 (montmorillonita) y la caolinita (tipo 1:1) es que la primera tiene tres capas, dos de silicio y una de aluminio (montmorillonita), mientras que la otra tiene solamente una de aluminio y otra de silicio (caolinita).

CARACTERISTICAS QUIMICAS DEL SUELO

Al estudiar los suelos, consideramos que las propiedades químicas más importantes son la reacción o pH, la capacidad de intercambio catiónico, el contenido de materia orgánica y la concentración y balance de nutrientes disponibles.

La reacción del suelo se refiere al grado de acidez o alcalinidad de ese suelo y la unidad de medida de la reacción del suelo es el pH.

El pH es el logaritmo negativo de la actividad o concentración de los iones de hidrógeno; esto es lo mismo que decir, el logaritmo inverso de la concentración de iones de hidrógeno.

El intercambio catiónico es el proceso reversible por medio del cual la fase sólida del suelo, o sea, las partículas de suelo, en este caso las arcillas, el humus y el alofano (cuando existe), intercambian cationes como el calcio, sodio, magnesio, potasio, aluminio y amonio, con la solución del suelo. El hierro, manganeso, etc., también son cationes, pero se consideran más importantes desde el

punto de vista de intercambio, el calcio, magnesio, potasio, sodio y el aluminio en suelos ácidos. El intercambio también puede ocurrir a través de dos fases sólidas, o sea, entre partículas del suelo.

La capacidad de intercambio catiónico es la capacidad del suelo para intercambiar estos cationes. En general, entre mayor es la capacidad de intercambio catiónico de un suelo, mayor es su productividad.

El contenido de la materia orgánica también es sumamente importante porque la materia orgánica proporciona al suelo una serie de características químicas y físicas que son muy favorables. En el caso de las características químicas, proporciona especialmente nitrógeno, fósforo, azufre y elementos menores u oligoelementos, como se llama también a los micronutrientes como el zinc, hierro, cobre, boro, manganeso y molibdeno. Entre las características físicas está el mejorar la estructura del suelo y también hace más favorable el crecimiento de las raíces. Al mejorar la estructura del suelo, retiene también mayor cantidad de humedad en el suelo; lo cual es muy importante, especialmente en suelos arenosos.

Para los análisis de rutina se determina el nitrógeno y/o materia orgánica, el fósforo y el potasio, que son los nutrimentos que normalmente se aplican con mayor frecuencia. Aunque la materia orgánica no es un nutrimento en sí, existe una cierta correlación entre su concentración y la de nitrógeno en el suelo. No existe un análisis que sea un buen indicador de la disponibilidad del nitrógeno en el suelo. La materia orgánica se relaciona con el nitrógeno total en el suelo, pero aún así no es un buen índice de disponibilidad. En la mayor parte de los suelos se necesita aplicar nitrógeno; la cantidad que se aplique normalmente se determina experimentalmente por medio de pruebas o ensayo de campo. Las pruebas de invernadero también proporcionan ideas de cómo manejar el suelo desde el punto de vista de fertilidad.

El pH es muy importante sobre todo porque la disponibilidad de los nutrimentos y la toxicidad de algunos elementos están muy asociados al pH de los suelos. En forma general, se puede decir que los elementos mayores como el nitrógeno, fósforo, potasio, azufre, calcio, magnesio, son más disponibles en el rango de pH de 6 hasta 7.5 u 8.0 en algunos casos, mientras que los elementos menores (microelementos) son más disponibles a pH ácidos, excepto el molibdeno que se podría colocar en el grupo de elementos mayores.

Un pH de 7 se considera neutro, de 6.5 a 7 muy ligeramente ácido, de 6 a 6.5 ligeramente ácido, de 5.5 a 6 medianamente ácido y menos de 5.5 fuertemente ácido. El pH de 7.0 - 7.5 es muy ligeramente alcalino, 7.5 - 8.0 ligeramente alcalino, de 8.0 - 8.5 medianamente alcalino y mayor de 8.5 fuertemente alcalino. Normalmente la mayor parte de las plantas crecen y producen bien a un pH de 5.5 a 6.5 ó 7; esto no quiere decir que las plantas no crezcan también a otros rangos de pH.

En muchos suelos con un pH inferior a 5.4 se encuentran problemas de acidez por el exceso de aluminio intercambiable, mientras que a pH mayores de 7, por ejemplo 7.5 ya pueden haber problemas con el fósforo por fijación con el calcio y deficiencia de algunos elementos menores. Sin embargo, se producen algunos cultivos a pH de 8 hasta 8.5. Existen algunas plantas que son bien tolerantes a la alcalinidad; lo mismo sucede en el extremo ácido. El problema es que sobre

un pH de 6.5 la disponibilidad de muchos micronutrientes disminuye y puede llegar a ser un factor limitante.

EL FOSFORO EN EL SUELO

La química del fósforo es una de las más difíciles para estudiar en el suelo y no solamente es una de las más difíciles, sino que es el nutriente, además del nitrógeno, que normalmente se presenta con mayor porcentaje de deficiencia en los suelos tropicales. Podría decirse que alrededor de un 75 por ciento de los suelos tropicales tienen deficiencia de fósforo, mientras que el potasio se encuentra en concentraciones adecuadas en muchos de estos suelos.

El principal problema que tiene el fósforo en su manejo, es que en suelos ácidos se fija en forma de fosfatos de hierro y de aluminio, que con el tiempo hacen el fósforo aplicado menos disponible para las plantas. Lo mismo sucede a pH's mayores de 7, donde a veces se forman fosfatos de calcio que también hacen al fósforo poco disponible para las plantas.

¿Qué se puede hacer para reducir este problema? Se pueden utilizar fuentes solubles de fósforo como el superfosfato triple y aplicarlo en forma de bandas para que no haya mucho contacto entre el fósforo y las partículas del suelo que van a fijarlo, o sea, que si lo aplicamos en forma de bandas y si son formas solubles de fósforo, saturamos la capacidad de fijación de determinado volumen de suelo. Sin embargo, si no son fuentes bien solubles de fósforo, aplicarlas en banda conlleva el peligro, de que el fósforo permanezca allí en el suelo y no se disuelva ni se haga disponible para las plantas.

EL CALCIO, MAGNESIO Y POTASIO EN EL SUELO

El estudio del comportamiento del calcio, magnesio y potasio en el suelo es muy necesario porque en estos nutrimentos, no solamente es importante su concentración absoluta, sino también su balance o la relación que existe entre uno y otro.

Muchos investigadores han proporcionado los valores que consideran como óptimos; por ejemplo, se considera que el porcentaje de saturación óptima para calcio en el suelo, debe variar entre 65 y 85 por ciento; el de magnesio entre 6 y 12 por ciento y el potasio 2 y 5 por ciento. La relación calcio: magnesio debe variar de 6:1 a 12:1; la de calcio: potasio de 15:1 a 35:1. La relación magnesio:potasio puede variar de 2:1 a 10:1 y la relación calcio + magnesio: potasio debe variar de 25:1 a 40:1.

ENCALAMIENTO DE LOS SUELOS

La neutralización de la acidez del suelo se lleva a cabo normalmente con aplicaciones de cal (carbonato de calcio o dolomita). Las reacciones que generalmente se llevan a cabo en el suelo son: disolución del CaCO_3 , por el H_2CO_3 , desplazamiento de H y Al por el Ca, hidrólisis de iones del Al y neutralización del H^+ por el OH^- . El carbonato de calcio (cal) es muy poco soluble en agua, pero si es soluble en ácido carbónico del suelo; entonces al combinarse el agua con dióxido de carbono, forma ácido carbónico y ayuda a la solubilidad de la cal. Por esta razón cuando se aplica carbonato de calcio, hay que hacerlo

en una forma uniforme sobre el suelo, porque tiene que reaccionar con todas las partículas del suelo para que sea bien efectivo, si queda amontonado no reacciona, sobre todo por su poca solubilidad en agua.

Antiguamente se acostumbraba encalar los suelos, por lo menos los suelos de áreas templadas, hasta llevarlos a pH 7; pero varios investigadores encontraron que en los suelos tropicales, si se sigue esa práctica, se deteriora la estructura del suelo y en la mayoría de los casos, el rendimiento de las cosechas disminuye. Por tanto, lo que se hace actualmente para determinar la necesidad de cal en suelos tropicales es multiplicar la acidez intercambiable (aluminio) por 1.5; esto produce los miliequivalentes (meq) de carbonato de calcio necesarios para neutralizar el 85 al 90 por ciento de aluminio intercambiable en ese suelo (también se puede multiplicar por 2). Sin embargo, no solamente nos interesa la concentración de aluminio, sino también, el cultivo que vamos a sembrar, porque hay cultivos que son más susceptibles que otros: por ejemplo, el café, la piña, la yuca, y algunas gramíneas son muy tolerantes al aluminio; muchas de estas plantas toleran altos niveles de saturación de aluminio en el suelo; mientras que otras plantas como la alfalfa tolera muy poco aluminio en el suelo.

Si un suelo tiene un (1) miliequivalente (meq) de aluminio, entonces eso lo multiplicamos por 1.5 y nos proporciona 1.5 meq carbonato de calcio. Si queremos saber cuánta cal hay que aplicar al suelo por hectárea, procedemos en la forma siguiente: sabemos que un miliequivalente de carbonato de calcio es igual a 50 miligramos, porque el peso atómico del carbonato de calcio es 100, pero como tiene una valencia de 2, el miliequivalente es 50 miligramos. El peso atómico del calcio es 40, pero el peso equivalente es 20, ya que tiene una valencia de 2. Por eso si tenemos 1.5 miliequivalentes (1.5 meq) necesitamos 75 miligramos de CaCO_3 . Es decir, 75 miligramos de carbonato de calcio por 100 gramos de suelo, ya que todo esto se expresa en 100 gramos o mililitros de suelo. Observen que tenemos 75 miligramos de carbonato de calcio por 100 gramos de suelo, que es lo mismo que decir que tenemos 75 kilogramos de calcio en 100.000 100.000 kilogramos de suelo.

Si consideramos que la capa arable de una hectárea de suelo pesa aproximadamente 2.200.000 kilogramos, ¿qué cantidad de carbonato necesitamos aplicar a este suelo? Multiplicamos 75 por 2.200.000 y dividimos entre 100.000 y obtenemos 1.650 kilogramos por hectárea.

Otro factor que hay que considerar no es solamente la concentración de aluminio, sino también el cultivo que se va a sembrar. Normalmente en los suelos tropicales ácidos se está encalando para que el pH no suba más de alrededor de 6.

Muchos suelos tropicales tienen alrededor del 16 meq/100 gramos de suelo de capacidad de intercambio catiónico. Estos suelos podrían tener aproximadamente una concentración de 10 meq de Ca, 3 meq de magnesio, 1.3 meq de potasio y 1 meq de aluminio por 100 gramos de suelo. La saturación (%) de Ca en este suelo sería el porcentaje de saturación de aluminio en ese suelo (7%), que es realmente bajo.

Normalmente, muchos cultivos crecen bien con saturación de aluminio hasta de 20 a 25 por ciento, pero otros no. Por ejemplo, el algodón, sorgo y alfalfa son susceptibles a saturación de aluminio de 10 a 20 por ciento; es decir, que apenas pueden crecer en este suelo. Mientras que el maíz es susceptible a concentraciones de 40 a 60 por ciento de saturación de aluminio en el suelo. El

pasto elefante es susceptible a concentraciones de aluminio mayor del 60 por ciento, el café, la yuca y la piña a saturaciones mayores del 80 por ciento.

El pH en sí, no se considera tóxico, sino el aluminio intercambiable que existe en el suelo; solamente en raras ocasiones cuando el suelo es muy ácido; por ejemplo, menos de 4, el hidrógeno es el principal problema; pero en nuestros suelos, el hidrógeno no es un problema, sino el aluminio intercambiable. Algunos suelos ácidos talvez no tengan mucho aluminio pero tienen concentraciones altas de manganeso, el cual puede ser tóxico para muchas plantas.

Entre más arenoso es el suelo, menor es la capacidad de intercambio catiónico, por lo que normalmente, la capacidad de amortiguación es menor; de tal forma que con menor cantidad de cal, se incrementa el pH, por lo que hay que tener mucho cuidado al encalarlos.

En suelos alcalinos se aplica normalmente azufre para bajar el pH, pero normalmente esto no es un problema en la mayor parte de los casos, excepto en suelos costeros. Pero al aplicar azufre, también hay que hacer un manejo de agua, de tal forma que se puedan lavar todas las sales que se han formado.

PROPIEDADES FISICAS DEL SUELO

En esta discusión mencionaremos solamente las propiedades físicas del suelo que tienen mayor influencia en su fertilidad y productividad. Por ello, consideraremos solamente la textura y la estructura.

La textura se refiere a la distribución proporcional de limo, arcilla y arena en el suelo. La textura proporciona una serie de características a los suelos que son sumamente importantes desde el punto de vista del crecimiento de las plantas. Se puede determinar qué cultivos, en términos generales, se pueden sembrar en un área, basados solamente en la textura. Por ejemplo, un suelo arenoso, normalmente no es un suelo bueno para sembrar arroz, porque este cultivo requiere de humedad constante y alta en el suelo; pero sí es bueno para cultivos que requieren un buen drenaje, aunque normalmente requieren una humedad adecuada.

La estructura se refiere a la agregación o arreglos de las partículas primarias del suelo. A veces tendemos a confundir estos dos términos, pero realmente son muy diferentes porque uno se refiere al porcentaje de cada una de las partículas; mientras que el otro se refiere a cómo están arregladas estas partículas en el suelo.

El triangulo textural normalmente se utiliza en el laboratorio para determinar la clase textural del suelo, después de haber determinado el porcentaje de arena, arcilla y limo. La arcilla se divide en arcilla pesada y liviana. La textura de los suelos que tienen entre 40 y 50 por ciento de arcilla se llama arcilla liviana; mientras que si es mayor de 50%, se considera arcilla pesada. Estos son suelos sumamente difíciles de trabajar y posiblemente sean buenos para sembrar arroz, o un cultivo similar, especialmente si no tienen buena estructura.

TECNICAS PARA DETERMINAR LOS REQUISITOS NUTRICIONALES DE LAS PLANTAS

En general, existen cuatro técnicas o cuatro formas de determinar las necesidades de abonamiento o los requisitos nutricionales de las plantas: análisis de suelo, análisis foliar, pruebas biológicas y síntomas de deficiencias.

El análisis de suelo es el primer paso al iniciar cualquier empresa agrícola, porque inicialmente no existe otra información que podamos usar que el suelo, y lo que se hace es analizarlo para tener una buena idea de sus características físicas y químicas.

El análisis foliar es una técnica que puede utilizarse solamente después que ya están los cultivos establecidos, y su eficacia en cultivos perennes está bien documentada. Existen muchos cultivos como cítricos, banano, café, etc., donde se ha usado con muy buen éxito la técnica de análisis foliar; no solamente para determinar los niveles bajos o adecuados de diferentes nutrimentos, sino para formular los programas de abonamiento. En el caso de estos y otros cultivos, el potasio se puede manejar muy bien por medio del análisis foliar, a tal grado que se pueden determinar los niveles que se deben aplicar de este elemento basándose solamente en el análisis foliar. En el caso del nitrógeno, es un poco más difícil, porque el nitrógeno es un elemento más dinámico, es decir, que las concentraciones en la planta varían mucho más que en el caso del potasio. Entonces es mucho más difícil, pero sin embargo, también es posible determinar si las plantas están deficientes o suficientes en nitrógeno. El análisis foliar también se puede usar para determinar concentraciones de fósforo, calcio, magnesio, azufre y los elementos menores.

Las pruebas biológicas no son más que los ensayos de campo o ensayos de invernadero que se llevan a cabo ordinariamente y son también muy efectivas.

Las tres técnicas que mencionamos pueden complementarse entre sí. Por medio del análisis del suelo, el análisis foliar y las pruebas biológicas, se pueden formular con bastante efectividad los programas de abonamiento. En el caso de deficiencias nutricionales, también se han usado en algunas ocasiones, pero esta técnica no es recomendada porque cuando se presentan los síntomas de deficiencias, generalmente el estado de desnutrición de la planta es tal, que ya no se puede recuperar completamente; es decir, que cuando se presentan los síntomas de deficiencia, ya se ha perdido gran parte del potencial de producción de la planta. Además, en muchos casos, es difícil determinar solamente por observación, cuál es el elemento que está causando los síntomas. A veces puede ser un efecto tóxico de algún compuesto químico que causa los síntomas. Por otro lado, algunos elementos producen síntomas de deficiencia bastante similares.

COMO LLENAR LOS REQUERIMIENTOS NUTRICIONALES EN SISTEMAS DE CULTIVOS INTENSIVOS

Carlos Burgos

Este t3pico est3 muy bien tratado en el cap3tulo octavo de un libro sin publicar del Dr. R. R. Harwood*. A continuaci3n se transcribe la versi3n en espa1ol del cap3tulo citado.

ASPECTOS AMBIENTALES

Problemas con Fertilidad de Suelos y Competencia por Nutrimientos

Los requerimientos nutricionales de sistemas de cultivos intensivos.

El logro y mantenimiento de niveles altos de producci3n de cosechas en forma sostenida, eventualmente gira alrededor del mantenimiento de la fertilidad de suelos como variable determinante.

El agricultor tradicional trata este problema de cuatro maneras. Tres de ellas involucran m3todos de ciclaje de nutrimentos en el campo de fuentes externas.

En fincas de orientaci3n comercial la metodolog3a es clara. Cuando hay acceso a insumo de fertilizantes, mercado para productos de la cosecha y con sistemas de cultivos productivos, el uso de fertilizantes comprados es un componente normal y rentable de los sistemas altamente productivos. La compra de fertilizantes qu3micos o desechos urbanos que han sido reciclados es el m3todo m3s familiar para nosotros. Este m3todo es el que demanda menos en t3rminos de mano de obra y tiene el potencial f3sico para eliminar deficiencia nutricionales, como un determinante en la producci3n intensiva de cosechas.

Un segundo m3todo de ciclaje representa el uso de nutrimentos acumulados fuera de la finca. Pastar animales en tierras comunales, recoger el esti3rcol de los animales de las praderas y llevarlo al lugar de vivienda para hacer el compost. El esti3rcol recogido durante la noche y mezclado con hojas y materiales vegetales obtenidos de bosques cercanos es utilizado como fuente de abono org3nico para fertilizar los campos cosechados intensivamente. Esta pr3ctica es empleada en lugares monta1osos donde los fertilizantes comerciales no est3n disponibles. Las dificultades de este sistema son que requiere uso intensivo

* HARWOOD, R. R. Toward the well-being of the small tropical farmers. New York, International Agriculture Development Service (unpublished).

de mano de obra y un balance adecuado entre tierra de cultivo, bosque y pradera para pastoreo.

La tercera práctica es el reciclaje más limitado de nutrimentos entre componentes del mismo sistema. Material vegetal es mezclado para descomposición con cualquier material de desecho de la casa, cenizas del fuego de la cocina principalmente. Heno de las cercas, desechos de cosechas y de otra fuente es dado al ganado recogiendo el estiércol para la elaboración de abono orgánico. El abono entonces es aplicado a las cosechas que más se beneficien con esta práctica (hortalizas). El ciclaje de nutrimentos entre componentes de la finca, al igual que el de nutrimentos de fuera de la finca, es de uso de mano de obra intensivo. El sistema es algo ineficiente en términos de pérdidas del nutrimento, dependiendo del manejo que se le dé al abono. Mejoras en eficiencia pueden lograrse cuando los animales son amarrados y alimentados en los campos de cultivo después de cosechar. La prevalencia de ciclaje de nutrimentos parece estar relacionada inversamente al grado de participación en una economía de mercado. Parecería estar más asociada con la relación entre el costo de fertilizante y el costo de la oportunidad de mano de obra. Donde la mano de obra tiene un valor en efectivo bajo en relación al costo de fertilizante, existe el potencial para el trabajo intensivo de ciclaje de nutrimentos.

El cuarto aspecto involucra eficiencias de uso dentro de una misma empresa agrícola.

En un ecosistema forestal los nutrimentos son gradualmente extraídos del suelo durante un largo período de tiempo. Los árboles del bosque gradualmente desarrollan un sistema radical profundo el cual es altamente eficiente en extraer nutrimentos de los horizontes profundos. La considerable acumulación de nutrimentos contenida en la biomasa animal y vegetal es parcialmente reciclada por la caída de las hojas y por el consumo de materiales por insectos y animales. Este ciclaje se mantiene en parte con cultivos solos pero la ventaja de mantener grandes cantidades de biomasa vegetal es pérdida y la eficiencia de absorción de cosechas de corta duración es mucho menos eficiente.

El ciclaje rápido ocurre por la quema de materiales en agricultura nómada. A medida que el bosque es quemado, los nutrimentos almacenados en la biomasa vegetal son liberados en forma soluble y se hacen disponibles para crecimientos de cosechas posteriormente.

El ciclaje de nutrimentos en la finca puede ser beneficioso a tasas de retorno, tal es el caso cuando el agricultor tiene períodos de poca actividad a través del año, durante los cuales, el abono orgánico es llevado al campo y el agricultor pone poco valor a su trabajo.

Proceso de Ciclaje de Nutrimentos

Los nutrimentos se originan de la intemperización del material madre. Los nutrimentos solubles pasan a formar parte de los nutrimentos (solutos) en la solución del suelo (D). La concentración de nutrimentos en la solución del suelo permanece en equilibrio con los nutrimentos adheridos a las partículas del suelo y los que están fijados en el suelo (E) y no disponibles para el

crecimiento vegetal. Las plantas absorben nutrimentos de aquellos disponibles en la solución del suelo y los acumulan en la biomasa vegetal (A), mientras las plantas crecen. Cuando la planta o parte de ella muere, el material es depositado en la superficie del suelo donde la acumulación de nutrimentos ocurre (B). Los desechos vegetales son descompuestos, por una serie de procesos biológicos, la mayoría de los cuales involucra microorganismos, en ácidos orgánicos y nutrimentos solubles, los cuales entonces forman parte de la solución del suelo de los primeros centímetros del suelo.

Los nutrimentos ciclados en el sistema, ya sea mediante la adición de fertilizantes ciclados por el hombre, depositados por inundaciones y otras fuentes son añadidos a (B) o (C), acumulación de desechos de animales y vegetales o la zona de concentración de nutrimentos, de (C) se agregan a (D), son absorbidos por plantas en crecimiento, son lixiviados por el agua en movimiento y eventualmente alcanzan equilibrio con los nutrimentos en el suelo (E) o son perdidos por lixiviación. El nitrógeno puede perderse por desnitrificación y escapar como amoníaco (gas) o por medio de quemas y pérdida directa a la atmósfera.

Las cantidades relativas de nutrimentos en A, B, C, D, y E determinan la productividad del sistema y son clave para el manejo de nutrimentos bajo diferentes condiciones de recursos. Para el crecimiento rápido y rendimiento alto de una variedad mejorada de un cultivo anual, se requiere una concentración alta de nutrimentos en la solución del suelo (C y D) en el espacio inmediato adyacente a las raíces. El mantenimiento de tal concentración es el propósito de todos los intentos de ciclaje de nutrimentos.

En suelos de alta fertilidad las propiedades químicas del suelo son tales que la concentración de nutrimentos en la solución del suelo (D) es alta, naturalmente. En estas condiciones los cultivos pueden mostrar poca respuesta a la adición de fertilizantes.

En suelos de bajo contenido de uno o más de los nutrimentos más importantes necesarios para el crecimiento de las plantas, normalmente inaceptable agregar suficiente nutrimento para saturar la capacidad de fijación del suelo. Entonces, el objetivo es aplicar los nutrimentos tan cerca a las raíces como sea posible y al momento que los cultivos más los necesiten. Bajo estas circunstancias el cultivo usa menos del 40% de los nutrimentos añadidos. Parece que las prácticas del agricultor tradicional mencionadas representan tres tipos de uso de nutrimentos bajo condiciones de baja fertilidad.

Con una agricultura intensiva estabilizada, el mantenimiento de cultivos perennes de raíces profundas que reciclan nutrimentos de capas profundas de perfil a través de la biomasa sustancial que producen para concentrarlos en la capa superficial del suelo mediante la caída de hojas o corte "mulching", es de uso difundido.

En Indonesia la leguminosa de raíces profundas y ramas erectas *Glyricidia máxima* es sembrada en surcos y sobre los bordes de los arrozales de inundación. Este sistema es muy eficiente donde el material vegetal no tiene que ser transportado de fuera de la finca y donde los árboles son especies económicas.

Recientemente existe interés en utilizar esta metodología con *Leucaena glauca*. Las hojas de *Leucaena* son excepcionalmente altas en su contenido de nitrógeno, pero sus hojas se extienden compitiendo así con las cosechas por luz solar. Se considera que el método actual de siembra en franjas y cortarlas cuando son pequeñas requeriría mucha mano de obra y ocasionaría problemas de malezas en las fajas de *Leucaena*. La poda de árboles de *Glyricidia* acompañada de las quemas de las ramas grandes parece ser, en muchas formas, la mejor alternativa.

Un segundo aspecto de eficiencia es el cuidadoso mantenimiento de desperdicios vegetales (barbecho) sobre la superficie del suelo, como mulch, en lugar de quemarlo o incorporarlo. Esto permite una descomposición y concentración gradual en las capas superiores del suelo.

Un tercer aspecto de eficiencia asociado al mantenimiento de mulch es aquel de cultivos intercalados muy mezclados. La disponibilidad de nutrimentos en las capas superficiales del suelo, especialmente donde las plantas se han dejado en la superficie del suelo a través de la estación seca, aumenta marcadamente durante el período de las primeras lluvias, luego disminuyen gradualmente a lo largo de la estación lluviosa alcanzando su valor mínimo en la estación seca. La mezcla de cultivos de variados períodos de maduración (2 a 10 meses) cada una a densidades relativamente bajas, tiene una demanda alta temprano en la estación debido a la presencia de cultivos de crecimiento rápido tales como el maíz, luego una demanda reducida gradualmente a lo largo de la estación a medida que las poblaciones bajas de cosechas anuales de larga duración, alcanzan madurez. La demanda de nutrimentos por las plantas es ajustada de esta manera a la disponibilidad de nutrimentos del suelo en el tiempo.

De ninguna manera se desea afirmar que estas prácticas sustituirán la aplicación de nutrimentos en términos de altos rendimientos. Tales prácticas, simplemente son relativamente eficientes en la utilización de abastecimientos escasos de nutrimentos para producir cosechas modestas. Harwood enfatiza que no hay razón para que el fertilizante caro no pueda ser utilizado más eficientemente en combinación con aspectos con metodologías tradicionales de reciclaje de nutrimentos. Las tecnologías de uso eficiente de fertilizante tales como colocación precisa y a tiempo, formas de solubilidad lentas y otros muchos aspectos serán de importancia, pero los aspectos generales del uso eficiente deben también ser considerados.

TECNICAS DE LABORATORIO E INVERNADERO PARA EVALUAR LA FERTILIDAD
DEL SUELO MEDIANTE EL METODO DEL ELEMENTO FALTANTE Y/O ADITIVO

Roberto Díaz-Romeu
Humberto Rodríguez Fuentes
Gerardo Cedeño Vega

INTRODUCCION

Un requerimiento fundamental en el establecimiento y mantenimiento de un programa efectivo de evaluación y mejoramiento de la fertilidad de suelos, es el de poder diagnosticar con exactitud el estado de fertilidad de los elementos nutritivos, que en el suelo afectan el crecimiento de las plantas. El estado de fertilidad de un elemento, depende de su disponibilidad en términos de un suministro adecuado o excesivo en relación a la necesidad de una especie o variedad de planta para que esta pueda mostrar todo su potencial genético de crecimiento y producción.

La disponibilidad de dicho elemento, está relacionado con las características físico-químicas del suelo, características de la planta y otros factores que también afectan el crecimiento como: temperatura, humedad, luz, control de plagas, etc.

Hace más de un siglo, Justus Von Liebig estableció la "Ley del mínimo". Esta ley no sólo se aplica a los factores que afectan a la fertilidad, sino a todos los factores que intervienen en el crecimiento. En resumen, dice lo siguiente: "Una planta, crecerá o producirá sólo hasta que el factor primario más limitante lo permita". Si dicho factor primario es corregido hasta un nivel adecuado, entonces el siguiente factor limitante pasará a ser el primero, etc. Si se hace una detección y corrección de cada factor limitante, se establece una condición tal, que en último caso sólo el potencial genético de la misma planta puede ser limitante.

Con respecto a la producción de cultivos, la corrección de los factores limitantes dependerá no sólo de los recursos y medios económicos disponibles, sino también de la habilidad para hacerlo.

Desde luego, el regimen de fertilidad del suelo es sólo uno de los factores de crecimiento. Afortunadamente, los recursos y tecnología para la corrección de los problemas de la fertilidad del suelo están ahora disponibles o podemos hacerlos disponibles cuando la situación lo requiera. Cuando la corrección se hace dentro de los límites adecuados, es beneficiosa y esto no es solamente posible, sino atractivo en la mayoría de las situaciones.

Siendo este el caso, el primer problema en la fertilidad del suelo es el diagnóstico correcto del estado inicial de los elementos del suelo en un lugar específico y la determinación de las cantidades de materiales requeridas para llevar el nivel de fertilidad hasta un nivel adecuado y balanceado para el crecimiento y rendimiento del cultivo. Cuando se haya hecho esto, y no antes, se estudiará entonces, la factibilidad económica de llevar a cabo dicha corrección.

Debido al gran número de variables encontradas, las técnicas de diagnóstico para determinar el estado de fertilidad son y pueden ser en extremo variables. La mejor prueba de la efectividad de cualquier técnica usada en el diagnóstico y corrección de los problemas de fertilidad de suelos, es aquella que demuestra que su uso es capaz de eliminar la infertilidad del suelo como factor limitante en la obtención de abundantes cosechas.

Sin duda alguna, continuará el progreso en las técnicas de diagnóstico a medida que avanzan las investigaciones y las informaciones se tornan más disponibles. De todas maneras, la técnica aquí presentada es rápida, eficiente y efectiva en la evaluación de los problemas de fertilidad del suelo.

La técnica involucra el uso de ciertos procedimientos analíticos e interpretaciones para determinar el estado de los distintos nutrimentos, a fin de corregir dicho estado y además para demostrar mediante procedimientos usados en el invernadero, la efectividad de la interpretación de los resultados analíticos y de las medidas correctivas.

En el uso de esta técnica, se debe reconocer que el crecimiento (producción de materia seca) bajo condiciones de invernadero no es comparable con el crecimiento bajo condiciones de campo, pero puede ser correlacionado con el crecimiento en el campo, cuando otro factor que no sea el estado de fertilidad del suelo sea más limitante que la misma fertilidad. Debe reconocerse, también, que esta técnica concierne a los requerimientos biológicos implicados en el buen desarrollo de las plantas y que no toma en consideración los factores económicos.

Esto quiere decir que los resultados obtenidos en el invernadero deben ser usados como una guía para una mejor planificación de experimentos de campo y estos últimos deben ser utilizados en el reajuste del "nivel crítico" para interpretaciones económicas.

El uso del análisis de suelos como un medio para determinar el estado de fertilidad, en términos de disponibilidad adecuada o excesiva de los varios nutrimentos presentes en el suelo para las plantas, está basado en la teoría de que existen ciertos "niveles críticos" en relación al método analítico utilizado. Cuando el nivel de un nutrimento medido en el suelo está por debajo de este "nivel crítico", el crecimiento de la planta estará restringido por el grado en el que ese nutrimento se encuentra por debajo de dicho nivel.

El suelo es un sistema físico, químico y biológico, dinámico y complejo y por esta razón los resultados de análisis, medida e interpretación de los mismos no deben ser aplicados igual a todas las situaciones específicas. Por lo tanto, si los resultados analíticos proveen la suficiente información para poder conocer la manera de corregir los problemas de fertilidad, entonces deben considerarse como útiles.

Debido a las características dinámicas del suelo, cuando se agrega algún material o nutrimento, éste estará sujeto a cambios físicos, químicos y biológicos debido a las reacciones que ocurren en el suelo. Por esta razón, es de esperar que la disponibilidad para la planta varíe a causa no sólo del nutrimento agregado sino también a los nutrimentos que ya se encontraban presentes.

Este cambio o reactividad de los nutrientes será llamado en esta metodología "Sorci3n".

Ya que la "sorci3n" afecta la disponibilidad de los nutrientes para las plantas, es necesario disponer de medios para determinar la capacidad de "sorci3n" de los suelos, para los principales elementos nutritivos.

La determinaci3n del nivel cr3tico de macro-nutrientes presenta menores dificultades que los micro-nutrientes debido a que se dificulta mas obtener respuesta a la fertilizaci3n con micro-nutrientes, debido al rango estrecho entre deficiencia y toxicidad. Los niveles cr3ticos se denotaran como D (deficiencia) o T(toxicidad). El nivel cr3tico D, en la mayor3a de los casos, est3 mejor definido que el nivel cr3tico T.

Waugh, Cate y Nelson 1973, (12), definen el nivel cr3tico D y presentan un m3todo para su determinaci3n. Aqu3 se presentar3 un nivel cr3tico D.

Esta t3cnica de diagn3sis de fertilidad, utiliza los siguientes pasos los cuales se discuten m3s adelante con mayores detalles.

1. An3lisis de la muestra de suelo original.
2. Estudios de "sorci3n".
3. Demostraci3n, mediante la t3cnica de invernadero, de las posibles diferencias del crecimiento vegetativo causadas por los nutrientes.

ESTUDIOS DE LABORATORIO

Muestra de Suelo

La manera de c3mo la muestra del suelo debe ser tomada depende del tipo de informaci3n deseada y como 3sta ser3 usada. En general, se deber3 tomar la muestra de tal manera que sea representativa de la profundidad o 3rea de la cual sea necesaria la informaci3n. Por ejemplo, si la informaci3n va a ser utilizada en el establecimiento de experimentos de campo o demostraciones, en los cuales se usar3an pr3cticas normales de manejo, ser3 suficiente una muestra compuesta representativa, del sitio donde se llevar3 a cabo la demostraci3n.

Se requiere un volumen de dieciseis litros de suelo pasado a trav3s de una malla de 2 mm (10 mesh), para la t3cnica b3sica de diagn3sis. Una submuestra representativa de toda la muestra se enviar3 al laboratorio para su an3lisis y estudios de "sorci3n".

An3lisis preliminar de la muestra de suelo original

La submuestra es analizada para P, K, Cu, Fe, Mn y Zn, usando el procedimiento de extracci3n modificada de bicarbonato de sodio, mas EDTA y Superfloc, (2), o el m3todo utilizado por el laboratorio nacional. Se analiza, tambi3n acidez extra3ble, Ca y Mg usando el procedimiento de extracci3n con cloruro de potasio (KCl) 1N y para azufre y boro, usando el procedimiento de extracci3n con fosfato de Calcio ($\text{CaH}_4(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) (2).

Además, se determina materia orgánica y pH. Si el pH está por encima de 8.2 o si se sospecha la presencia de sales solubles, se procederá a determinar el sodio extraíble en KCL 1 N y la conductividad eléctrica.

Estudios de "Sorci6n"

Estos estudios se llevan a cabo a~adiendo al suelo, en una soluci6n, distintas cantidades y niveles de nutrimentos. La cantidad de soluci6n agregada es suficiente para saturar completamente la muestra de suelo y dejar un ligero exceso cubriéndola. El recipiente que contiene la muestra se deja destapado hasta que ésta se seque, lo que usualmente toma alrededor de cuatro días, en el caso de las muestras para las curvas de sorci6n de P, K, Cu, Mn y Zn, y para las de S y B, tarda de 6 a 7 días. Este sistema permite que los elementos reaccionen con el suelo bajo una condici6n de humedad hasta la sequedad, lo que reduce en un corto período de tiempo las reacciones que se llevan a cabo cuando esto sucede a nivel de campo.

Procedimiento de Estudios de "Sorci6n" para P, K, Cu, Mn y Zn

Preparaci6n de las Soluciones de "Sorci6n"

Soluci6n A

1. Disolver 7.20 g de Cloruro de manganeso ($MnCl_2 \cdot 4H_2O$) en aproximadamente 200 ml de agua destilada.
2. Disolver 2.14 g de Cloruro de cobre ($CuCl_2 \cdot 2H_2O$) en aproximadamente 200 ml de agua destilada.
3. Disolver 3.34 g de Cloruro de zinc ($ZnCl_2$) en aproximadamente 200 ml de agua destilada.

Nota: Pueden utilizarse las cantidades adecuadas de nitratos o sulfatos, en lugar de cloruros.

4. Mezclar las 3 soluciones anteriores y completar el volumen a 1 litro. Esto dar4 una soluci6n conteniendo las siguientes concentraciones:

$$Cu = 800 \text{ ug ml}^{-1}$$

$$Mn = 2000 \text{ ug ml}^{-1}$$

$$Zn = 1600 \text{ ug ml}^{-1}$$

Nota: Si la soluci6n final est4 turbia, agregar unas cuantas gotas de 4cido clorhídrico (HCl) concentrado s6lo hasta solubilizar el precipitado.

Soluci6n B

1. Disolver 6.15 g de fosfato de potasio (KH_2PO_4) en aproximadamente 1500 ml de agua destilada en un bal6n aforado de 2 litros.

2. Agregar 100 ml de la solución A al balón aforado con la solución de KH_2PO_4 y completar el volumen hasta 2 litros con agua destilada.

La solución B contendrá las siguientes concentraciones:

$$\begin{aligned} \text{P} &= 700 \text{ ug ml}^{-1} \\ \text{Cu} &= 40 \text{ ug ml}^{-1} \\ \text{Mn} &= 100 \text{ ug ml}^{-1} \\ \text{Zn} &= 80 \text{ ug ml}^{-1} \\ \text{K} &= 2.27 \text{ Meq } 100 \text{ ml}^{-1} \end{aligned}$$

Soluciones para los tratamientos de "Sorción"

Preparar una serie de cinco tratamientos de suelo como se indica en el Cuadro 1 por dilución de las cantidades indicadas de la solución B a 100 ml.

Cuadro 1. Cantidades de solución B y concentración de nutrimentos para la preparación de tratamientos de "Sorción"

Tratamiento de "Sorción N°	ml de solución B Diluidos a 100 ml	Concentración de Elementos en las Soluciones de Tratamientos de "Sorción"				
		P	Cu	Mn	Zn	K
		ug ml ⁻¹ de solución				meq 100 ⁻¹ ml solución
1	5	35	2	5	4	0.11
2	10	70	4	10	8	0.22
3	20	140	8	20	16	0.45
4	40	280	16	40	32	0.90
5	80	560	32	80	64	1.80

Establecimiento del Estudio de "Sorción" para P, K, Cu, Mn y Zn

El estudio puede llevarse a cabo en los recipientes usados para análisis de rutina. Se usarán 11 recipientes, el cual es un número suficiente para hacer cinco tratamientos con dos repeticiones y un testigo.

Agregar 2.5 ml de suelo a cada uno de los once frascos. Usar el frasco N° 1 como testigo y agregar sólo 2.5 ml de agua destilada.

Agregar 2.5 ml de la solución de "sorción" 1 a los frascos N° 2 y 3.

Agregar 2.5 ml de la solución de "sorción" 2 a los frascos N° 4 y 5.

Agregar 2.5 ml de la solución de "sorción" 3 a los frascos N° 6 y 7.

Agregar 2.5 ml de la solución de "sorci3n" 4 a los frascos N^o 8 y 9.

Agregar 2.5 ml de la soluci3n de "sorci3n" 5 a los frascos N^o 10 y 11.

Despu3s de que todas las soluciones han sido agregadas al suelo, se agita suavemente los frascos para que toda la soluci3n se mezcle con el suelo. Luego se dejan los frascos destapados en un lugar libre de polvo hasta que su contenido est3 seco.

An3lisis y Estudio de "Sorci3n" para P, K, Cu, Mn y Zn

Despu3s de que las muestras se han secado al aire, agregar 25 ml. de la soluci3n extractora modificada de NaHCO₃; agitar durante diez minutos y filtrar. Analizar los nutrimentos en el filtrado utilizando el procedimiento rutinario para cada uno de ellos.

Nota: Se espera que algunos de los tratamientos excederan el rango de contracciones establecidos para an3lisis de rutina; sin embargo, no hay necesidad de medir concentraciones m3s all3 de ese rango.

Procedimiento para Estudios de "Sorci3n" de B y S

Preparaci3n de las soluciones de "Sorci3n"

Soluci3n C

Colocar 500 ml de agua destilada en un volum3trico de 1 litro. Agregar 5.44 g de sulfato de potasio (K₂SO₄) y 0.88 g de tetraborato de sodio (Na₂B₄O₇ · 10 H₂O)

Disolver bien y completar el volumen. Esta soluci3n contendr3 1000 ug. S/ml⁻¹ y 100 ug B/ml⁻¹.

Soluciones para los tratamientos de "Sorci3n"

Preparar una serie de soluciones como se indica en el Cuadro 2 a base de la soluci3n C, para obtener 5 soluciones de tratamientos.

Cuadro 2. Cantidades de soluci3n C y concentraci3n de nutrimentos para la preparaci3n de tratamientos de "sorci3n"

<u>Tratamiento de "Sorci3n N^o</u>	<u>ml de Sol. C Diluido a 100 ml</u>	<u>Concentraci3n de Elementos en las Soluciones de Tratamiento de "Sorci3n"</u>	
		<u>S</u>	<u>B</u>
		<u>ug ml⁻¹ de soluci3n</u>	
1	1	10	1
2	2	20	2
3	5	50	5
4	10	100	10
5	20	200	20

Establecimiento del Estudio de "Sorci3n" para B y S.

El estudio de sorci3n para B y S se lleva a cabo de igual manera que para los otros elementos, con la excepci3n de que el volumen de suelo y de la soluci3n es de 10 ml cada uno.

Análisis y Estudio de "Sorci3n" para B y S

Despu3s de que las muestras se han secado al aire, se realiza la extracci3n y análisis de rutina para B y S.

Cálculo de los resultados de los estudios de "Sorci3n"

Se construyen gráfic3s para cada elemento colocando en el eje de la ordenada la cantidad de elemento extraído y en el eje de la abcisa la cantidad de elemento agregado. La cantidad de elemento agregado es igual a la concentraci3n de las soluciones utilizadas en el trabajo de sorci3n (Cuadros 1 y 2). Curvas de sorci3n de P para diferentes suelos se ilustran en la Figura 1. Estas curvas de sorci3n se utilizan para determinar la cantidad de elementos a agregar en los estudios de invernadero.

Para calcular el porcentaje de fijaci3n de P, S y B. Ver ap3ndice.

ESTUDIOS DE INVERNADERO

Determinaci3n de las Cantidades de Nutrimentos a agregar en el Tratamiento Optimo

Excepto para N y Mo, el tratamiento 3ptimo deberá estar basado en los datos obtenidos del laboratorio. Al graficar las curvas de sorci3n para P, K, Cu, Mn, Zn, S y B, y si la cantidad de nutrimento extraído del suelo original está por debajo de tres veces el nivel crítico -D, entonces deberá agregársele la cantidad necesaria de ese nutrimento para obtener tres veces el nivel crítico, usando para ello las curvas de sorci3n graficadas.

A continuaci3n se da una lista de niveles críticos -D tentativos para los siguientes nutrimentos:

- P = 12 ug P/ml de suelo
- K = 0,20 meq K/100 ml de suelo
- Cu = 1 ug Cu/ml de suelo
- Mn = 5 ug Mn/ml de suelo
- Zn = 3 ug Zn/ml de suelo
- S = 12 ug S/ml de suelo
- B = 0.2 ug B/ml de suelo

- 1. Vertisol. Typic Pelustert. Santa Ana.
- 3. Inceptisol. Typic Dystrocept Lote 8 La Montaña. CATIE. TURRIALBA.
- 5. Ultisol. Juntas de Pacuar, Pérez Zeledón
- 6. Inceptisol. Typic Dystracept Guayabo, Turrialba.

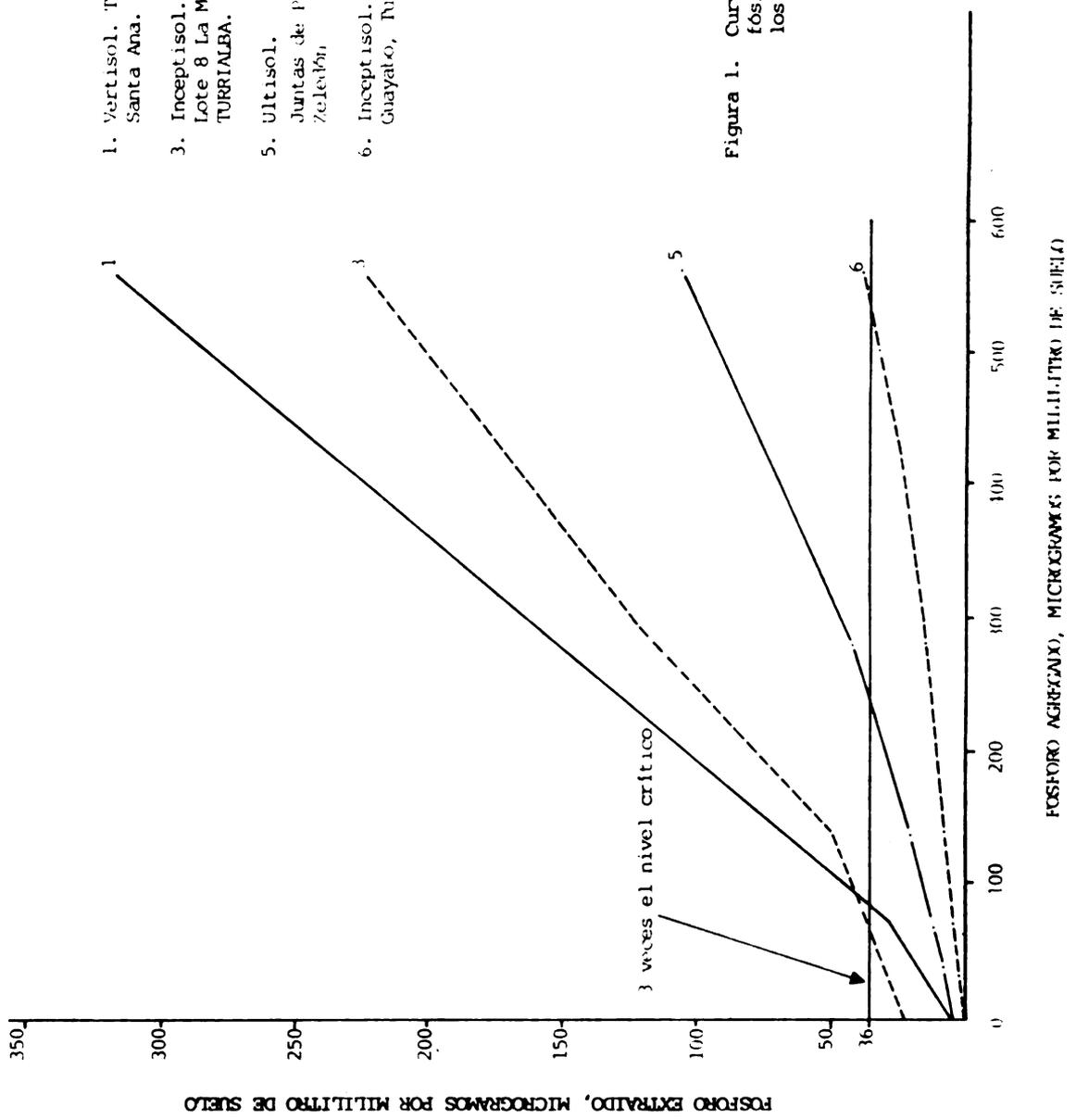


Figura 1. Curvas de sorción de fósforo de varios suelos de Costa Rica.

Requerimiento de Cal

El requerimiento de cal puede basarse en el siguiente criterio. Si la acidez extraíble es mayor de 0.2 meq acidez 100 ml⁻¹ de suelo, entonces se agregará Carbonato de Calcio en polvo (Ca CO₃) en polvo en una relación calculada con la siguiente fórmula:

$$\text{meq acidez } 100 \text{ ml}^{-1} \text{ suelo} \times 0.10 = \text{g CaCO}_3 \text{ } 100 \text{ ml}^{-1} \text{ suelo}$$

No se debe usar dolomita en estos estudios ya que es necesario separar los efectos del calcio y el magnesio.

En adición al criterio expresado anteriormente, deberá agregarse Ca, Mg y K para cumplir con los siguientes requerimientos. En suelos de textura liviana, si la cantidad del calcio extraída de la muestra original más la cantidad agregada según el requerimiento de cal es menor de 2.5 meq Ca 100 ml⁻¹ de suelo, entonces se agregará la cantidad necesaria de CaCO₃ hasta alcanzar 2.5 meq Ca 100 ml⁻¹ de suelo. En suelos de textura pesada se agregará suficiente CaCO₃ para alcanzar 4 meq Ca 100 ml⁻¹ de suelo.

En suelos de textura liviana, si la cantidad extraída de Mg de la muestra original es menor de 1 meq Mg 100 ml⁻¹ de suelo, entonces se deberá agregar suficiente oxido de magnesio (MgO) para obtener 1 meq Mg 100 ml⁻¹ de suelo. En suelos de textura pesada se deberá agregar suficiente MgO para obtener un total de 1.5 meq Mg 100 ml⁻¹ de suelo.

Después que se ha cumplido con los anteriores requisitos, si la relación Ca/Mg está por debajo de 1.2 o por encima de 6.2 se deberá agregar más Ca o Mg hasta estar dentro de estos límites. Si la relación Mg/K está por debajo de 1.6 o por encima de 14.0 se agregará suficiente cantidad de K o Mg hasta estar dentro de estos límites.

Para efectos de calculo es necesario considerar las siguientes equivalencias:

$$0.05 \text{ g CaCO}_3 \text{ agregados a } 100 \text{ ml de suelo} = 1 \text{ meq Ca } 100 \text{ ml}^{-1} \text{ de suelo.}$$

$$0.02 \text{ g MgO agregados a } 100 \text{ ml de suelo} = 1 \text{ meq ug } 100 \text{ ml}^{-1} \text{ de suelo.}$$

Si la cantidad de Fe extraído de la muestra original es menor de 10 ug ml⁻¹ se deberá agregar 20 ug Fe ml⁻¹. El criterio de la curva de sorción no es utilizada con este nutrimento.

Es importante considerar que los criterios mencionados anteriormente están basados en los métodos analíticos de Olsen Modificado, de Cloruro de potasio 1 N y Fosfato de Calcio, utilizados en el laboratorio de suelos del CATIE (2).

Debido a que la mayoría de los suelos son bajos en nitrógeno aprovechable, el criterio a seguir en esta metodología será el de agregar al suelo 50 ug ml⁻¹ de este nutrimento. En adición a lo anterior se agregará 1.5 g de NH₄NO₃ 5 litros⁻¹ de agua destilada, la cual se utilizará como solución de irrigación.

Como no existe un método rápido y eficaz para la determinación de molibdeno, el criterio a seguir será el de agregar al óptimo y a los otros tratamientos la cantidad indicada en el cuadro 3; otro tratamiento consistirá en omitir la adición de Molibdeno.

En adición a lo descrito para el tratamiento óptimo (tratamiento N° 1) se establecerán catorce tratamientos más, incluyendo un testigo (suelo original sin ninguna adición). Los tratamientos dos al 13 recibirán o no igual adición de nutrimentos que el óptimo, lo cual estará basado en si el nutrimento a probar se encuentra o no en cantidades adecuadas en la muestra del suelo original, según los niveles críticos y los demás criterios mencionados anteriormente.

Cuadro 3. Cantidad de nutrimento agregado al tratamiento cuando no se agrega al óptimo.

Tratamiento N°	Descripción	Cantidad de nutrimento agregado por 100 ml de suelo si no fuera agregado al óptimo
1	Optimo	
2	Opt. + Ca	0.05 g CaCO ₃ = 1 meq Ca 100 ml ⁻¹ suelo
3	Opt. + Mg	0.02 g MgO = 1 meq Mg 100 ml ⁻¹ suelo
4	Opt. + N	No se agregará N al agua de irrigación
5	Opt. + P	100 ug ml ⁻¹
6	Opt. + K	0.2 meq K 100 ml ⁻¹
7	Opt. + B	2 ug B ml ⁻¹
8	Opt. + Cu	2 ug Cu ml ⁻¹
9	Opt. + Fe	20 ug Fe ml ⁻¹
10	Opt. + Mn	30 ug Mn ml ⁻¹
11	Opt. + Mo	2 ug Mo ml ⁻¹
12	Opt. + S	30 ug S ml ⁻¹
13	Opt. + Zn	10 ug Zn ml ⁻¹
14	Testigo	No se agrega ningún nutrimento
15	Testigo + N	50 ug N ml ⁻¹ al suelo más agua de irrigación con N

Establecimiento de los tratamientos del suelo

Para obtener una validez estadística consistente se sugiere usar un mínimo de tres repeticiones.

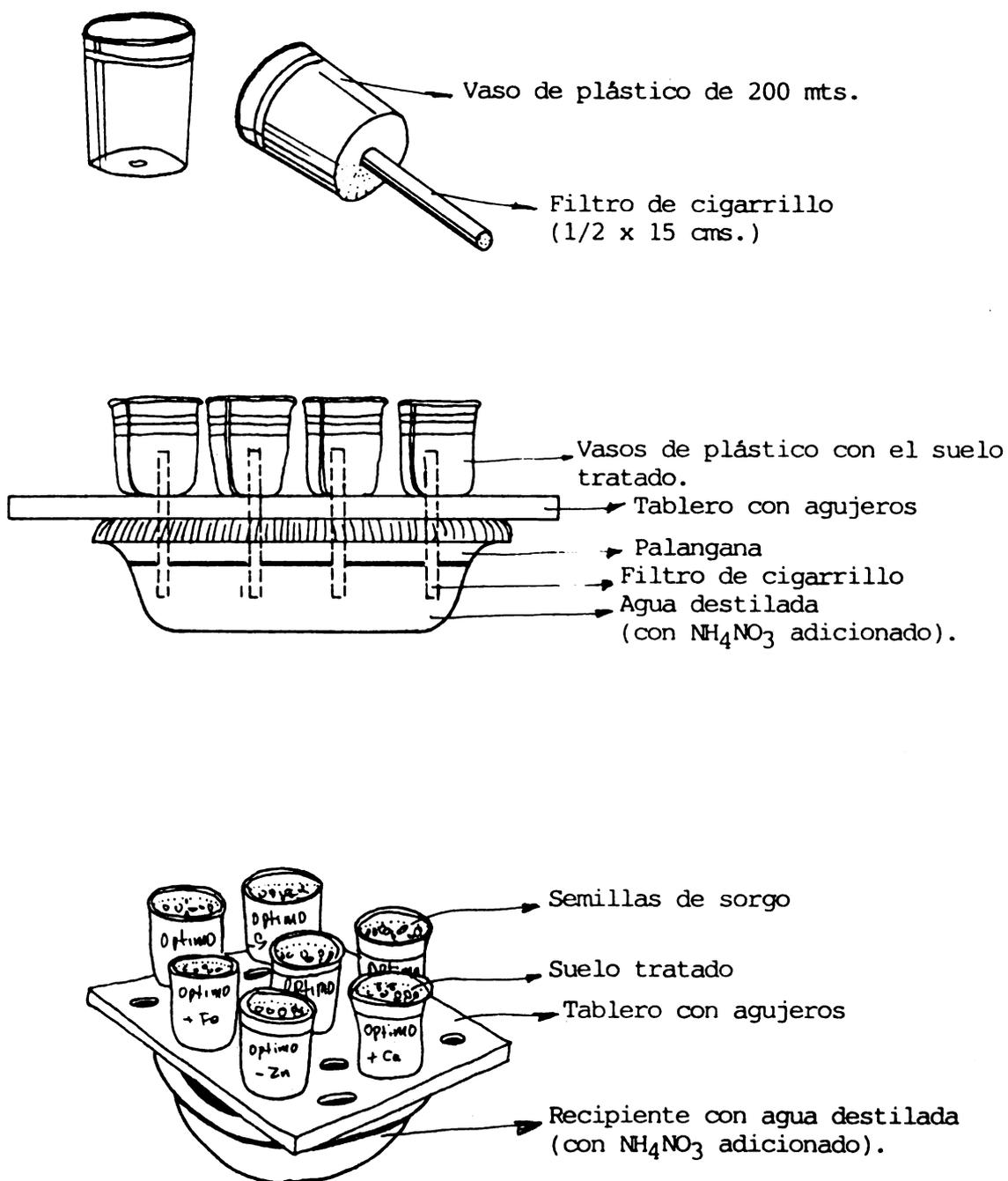


FIGURA 2. TIPO DE VASOS Y RECIPIENTES UTILIZADOS EN ENSAYOS DE INVERNADERO.

El volumen de suelo requerido por maceta en este estudio ha sido estudiado en rangos que varían de 50 ml a 2000 ml. Cuando se usa el mismo número de plantas en un volumen de suelo dado y la humedad es mantenida en un rango óptimo, los resultados serán comparables entre cualquier volumen de suelo. Así, 2 plantas por 50 ml de suelo serán comparables a 6 plantas por 150 ml de suelo. Por facilidad de manejo en esta metodología se utiliza un volumen de 150 ml de suelo por vaso.

Para tres repeticiones se colocan 450 ml de suelo secado al aire y tamizado en malla de 2 mm. en bolsas plásticas de tamaño adecuado. La cantidad de CaCO_3 y MgO (determinados según los criterios antes mencionados) para cada tratamiento es agregado al suelo en las bolsas plásticas y luego mezclados homogéneamente. Es indispensable agregar posteriormente los demás nutrientes en solución.

El cuadro 4 indica la cantidad de elementos y compuestos requeridos para la preparación de las soluciones madres que serán usadas en los diferentes tratamientos. El formulario adjunto puede ser usado para anotar las cantidades de mililitros de solución madre requeridas en cada tratamiento.

Una manera rápida y efectiva para aplicar las soluciones al suelo, consiste en transferirlas a vasos de precipitado individuales y luego agregarlas a cada muestra de suelo contenida en las bolsas plásticas. Después de que se agrega cada una de las soluciones a los distintos tratamientos, se deja secar al aire sin mover o agitar el suelo. La bolsa plástica debe estar abierta. Cuando el suelo está seco, se rompen los agregados formados por la humedad hasta su tamaño de tamizado y se mezcla de nuevo el suelo, de manera que queden homogéneamente distribuidos los nutrientes agregados.

El suelo en los Vasos:

Un sistema de riego por capilaridad satisfactorio cuando se utilizan volúmenes pequeños de suelo (por ejemplo 150 ml), es usar un filtro de cigarrillo de 1/2 x 15 cm hecho de fibra de celulosa o una mecha de material apropiado, los cuales actúan muy bien como tubo capilar y proporcionan un eficaz movimiento de agua desde el recipiente de irrigación hasta el suelo. Vasos plásticos de 200 mililitros de capacidad hechos de espuma plástica (styrofoam) u otro material plástico adecuado sirven bien para este propósito, y además no permiten el paso de la luz. Estos materiales son baratos y fáciles de obtener.

Se hace un agujero en el fondo del vaso con un taladro, algo menor que el diámetro del filtro del cigarrillo, insertándose el filtro unos 3.2 cm dentro del vaso. La distancia de inserción debe ser igual en todos los vasos.

Los recipientes para el agua o la solución de NH_4NO_3 deben ser de plástico, de unos 15 cm de profundidad, con suficiente área para colocar encima los vasos con los trece tratamientos y suficiente espacio entre ellos, (Ver figura 2). Antes de colocar los vasos que contienen el suelo deberá perforarse agujeros espaciados igualmente en una plancha de madera de manera que tape el recipiente y pueda introducirse por esos agujeros el extremo del filtro que estará en contacto con el agua o la solución de NH_4NO_3 . Se sugiere pintar las planchas

de color blanco para mayor duración de estas y evitar el aumento de temperatura en su superficie. Cada tratamiento de suelo es dividido en volúmenes iguales, dependiendo del número de repeticiones, y colocado en vasos individuales que han sido marcados con el número de suelo y número de tratamiento. Cada repetición de los trece tratamientos de suelo que reciben nitrógeno serán colocados encima de un recipiente. Estos recipientes serán llenados con la solución de NH_4NO_3 , hasta 2.5 cm del borde. Los dos tratamientos que no llevan N (El testigo y el tratamiento -N) serán colocados en otro recipiente solo con agua destilada).

Siembra:

Plantas de sorgo, arroz, trigo, girasol, maíz, rábano, nabo o tomate, han sido usadas como plantas indicadoras en esta técnica. Quizás no haya una planta que sea la mejor indicadora para todos los elementos; pero el sorgo parece ser una de las mejores, siendo sensitiva a la mayoría de las deficiencias, crece rápido, tiene semillas pequeñas y crece bien en un amplio rango de condiciones climáticas.

La población de plantas debe ser lo suficientemente alta para crear una condición de estres en relación a la disponibilidad de los diferentes nutrientes de tal manera que la condición de estres se refleje en la producción de materia seca. El número de plantas de sorgo (de preferencia forrajero) adecuado para 150 ml de suelo es de 5 o 6. Es deseable tener este número para minimizar la variación genética entre cada planta del vaso, y deberán eliminarse aquellas plantas que resulten atípicas. En el caso de usar tomate se sugiere cultivar una planta en el volumen de suelo antes indicado; también se puede utilizar girasol, en cuyo caso se sugiere utilizar una planta por cada 500 ml de suelo. Si se usa semillas de sorgo, nabo, rábano, etc., se puede sembrar directamente en los vasos o trasplantarlas después de germinadas; en caso de usar semilla de tomate, tabaco, girasol, etc., deberán pregerminarse y posteriormente trasplantarse a los vasos.

El procedimiento para colocar las semillas o las plántulas en los vasos es el siguiente: Se debe humedecer previamente el suelo con agua destilada, cuidando de no saturarlo, posteriormente se distribuyen uniformemente los agujeros, los cuales se abrirán con un instrumento adecuado (lápiz, palillo, etc.), colocando las semillas o las plantulas a más o menos un centímetro de profundidad y luego tapar con suelo. Si se usa sorgo, colocar inicialmente 10 semillas o plántulas.

Irrigación:

Se deberán cubrir los vasos con un plástico u otro material para evitar la evaporación, hasta que las semillas hayan germinado. Agregar más agua destilada si es necesario.

Después de que las plantas han emergido por lo menos 2.5 cm. llenar los recipientes con la solución de NH_4NO_3 o agua destilada (según el caso), hasta 2.5 cm del borde. Colocar los vasos con las plantas encima del recipiente sobre el soporte de madera y asegurarse de que los filtros o mechas quedan sumergidos en la solución; de esta manera se provee irrigación por capilaridad.

Cuadro 4. Cantidad de elementos y compuestos utilizados en la solución madre a ser usada en los tratamientos de suelo.

Elemento	Compuesto químico	Peso Molecular	Compuestos por litro de solución madre g	Elementos por litro por solución madre g	Cantidad del elemento agregado al suelo cuando un mililitro de la solución madre es agregado a 100 ml de suelo*
N	NH_4NO_3	80.05	14.92	5.00	50 $\mu\text{g ml}^{-1}$ suelo
P	Conc. 85% H_3PO_4	98.00	37.22	10.00	100 $\mu\text{g ml}^{-1}$ suelo
K	KCl	74.56	14.90	7.82	0.2 meq 100^{-1} ml suelo
Mn	$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	197.91	10.81	3.00	30 $\mu\text{g ml}^{-1}$ suelo
Cu	$\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	170.48	0.54	0.20	2 $\mu\text{g ml}^{-1}$ suelo
Zn	ZnCl_2	136.28	2.08	1.00	10 $\mu\text{g ml}^{-1}$ suelo
S	Conc. 96.5% H_2SO_4	98.08	9.50	3.00	30 $\mu\text{g ml}^{-1}$ suelo
B	H_3BO_3	61.83	1.15	0.20	2 $\mu\text{g ml}^{-1}$ suelo
Mo	$(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	1235.86	0.37	0.20	2 $\mu\text{g ml}^{-1}$ suelo
Fe	$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	270.30	9.68	2.00	20 $\mu\text{g ml}^{-1}$ suelo

* Para fines de cálculo, ver apéndice.

Las soluciones en los recipientes deben ser cambiadas cada dos semanas. Si es necesario, se deberá agregar más solución para mantener por lo menos 2.5 cm o más de los filtros o mechas dentro de la solución.

Raleo:

Siete días después de la siembra o trasplante se deberá raleo a 5 ó 6 plantas de sorgo en cada vaso. Es imprescindible dejar un número uniforme de plantas por vaso.

Observaciones y cosecha:

Durante el período de crecimiento, se debe proteger las plantas contra insectos, enfermedades, etc. y anotar cualquier anomalía que se observe.

El sorgo generalmente adquiere el máximo crecimiento, bajo estas condiciones, a las cuatro o cinco semanas, fecha en la que se debe realizar la cosecha.

Previo a esta o en el momento se podrán evaluar, además del peso seco de la biomasa aérea, las siguientes variables: Altura de planta, diámetro del tallo, peso seco de raíces y área foliar las cuales se recomienda efectuar hasta el momento de la cosecha. El procedimiento para realizar ésta será el siguiente: se cortarán las plantas un centímetro arriba de la superficie del suelo; posteriormente se obtendrá el peso fresco y entonces se colocará las plantas de cada tratamiento y de cada repetición en bolsas de papel individuales debidamente identificadas y se pondrán en un horno con aire forzado a 65-70°C por 72 horas. Para la interpretación de los resultados cada tratamiento deberá compararse con respecto al tratamiento óptimo efectivo. La materia seca de las plantas debe ser molida en un molino de acero inoxidable si se considera efectuar los análisis químicos de los diferentes nutrimentos. El suelo que queda después de la cosecha podrá analizarse nuevamente, para lo cual se requiere eliminar la solución o agua destilada de las bandejas para favorecer el secado del suelo.

Diseño Experimental:

Este se deberá adecuar a las condiciones propias del invernadero, es decir, si por ejemplo se sabe de antemano que hay efecto de luz ya sea por la posición del invernadero o la de las bandejas con las plantas se deberá bloquear por luz y utilizar el diseño experimental de bloques al azar. En caso de que las condiciones del invernadero sean homogéneas entonces se usará el diseño completamente al azar.

Análisis a Realizar:

El análisis de varianza para materia seca es una de las más importantes y además de este se pueden efectuar para peso fresco, diámetro de tallo, altura y área foliar. Así mismo se deberán efectuar las comparaciones de medias de tratamientos (si es del caso) por el método más pertinente y en base al criterio del investigador.

GUIA PARA LA INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN PRUEBAS BIOLOGICAS POR EL METODO DEL ELEMENTO FALTANTE Y/O ADITIVO BAJO CONDICIONES DE INVERNADERO.

Las inferencias respectivas deberán apoyarse en los análisis de varianza y las comparaciones de medias de los tratamientos, así como de los criterios que se presentan en el cuadro 5.

Es imprescindible recalcar que estas inferencias también deberán ser apoyadas por las observaciones que se efectuaron durante la prueba desde la siembra hasta el momento de la cosecha.

Cuadro 5. Criterios para la interpretación del grado de deficiencia de nutrientes en base al porcentaje de Rendimiento Relativo.

Porcentaje de Rendimiento relativo Y	Grado de deficiencia	Respuesta probable a la adición del nutrimento.
20	Muy severa	Muy alta
20 - 40	Severa	Alta
40 - 60	Media	Media
60 - 80	Ligera	Ligera
80	Ninguna	Baja o sin respuesta

CRITERIOS A CONSIDERAR PARA LA DETERMINACION DE NIVELES CRITICOS DE NUTRIMENTOS OBTENIDOS EN PRUEBAS BIOLOGICAS BAJO CONDICIONES DE INVERNADERO.

1. En plantas de sorgo, la producción de materia seca del tratamiento óptimo teórico (tratamiento que se obtiene para cada suelo en base de los resultados de su análisis y de sus curvas de sorción), y/o efectivo tiene que ser por lo menos superior a dos gramos. La obtención de este rendimiento mínimo, depende del grado de experiencia que se tenga en la realización de pruebas de invernadero y de los siguientes aspectos: (a) localización y orientación del invernadero; (b) volumen de suelo usado; (c) especie y variedad de planta indicadora usada, (d) número de plantas por vaso o maceta; (e) sistema de riego; (f) duración del período de crecimiento; (g) control de los factores climáticos, etc.
2. El tratamiento óptimo efectivo será aquel que produzca la mayor cantidad de materia seca. El criterio para esto estará apoyado en los resultados obtenidos en el análisis de varianza y de la comparación de medias de los tratamientos. En caso de que dos o más medias de tratamientos sean estadísticamente iguales y mayores a los demás tratamientos, entonces la gráfica del rendimiento relativo se hará en base al óptimo teórico (al cual ahora se le designa como tratamiento óptimo efectivo). Si este no fuese el mayor la gráfica del rendimiento relativo se realizará con el tratamiento que produjo mayor materia seca (llamado así tratamiento óptimo efectivo).

CRITERIOS A CONSIDERAR PARA LA DETERMINACION DE NIVELES CRITICOS DE NUTRIMENTOS OBTENIDOS EN PRUEBAS BIOLOGICAS BAJO CONDICIONES DE INVERNADERO

1. En plantas de sorgo, la producción de materia seca del tratamiento óptimo teórico (tratamiento que se obtiene para cada suelo en base de los resultados de su análisis y de sus curvas de sorción), y/o efectivo tiene que ser por lo menos superior a dos gramos. La obtención de este rendimiento mínimo, depende del grado de experiencia que se tenga en la realización de pruebas de invernadero y de los siguientes aspectos: (a) localización y orientación del invernadero; (b) volumen de suelo usado; (c) especie y variedad de planta indicadora usada, (d) número de plantas por vaso o maceta; (e) sistema de riego; (f) duración del período de crecimiento; (g) control de los factores climáticos, etc.
2. El tratamiento óptimo efectivo será aquel que produzca la mayor cantidad de materia seca. El criterio para esto estará apoyado en los resultados obtenidos en el análisis de varianza y de la comparación de medias de los tratamientos. En caso de que dos o más medias de tratamientos sean estadísticamente iguales y mayores a los demás tratamientos, entonces la gráfica del rendimiento relativo se hará en base al óptimo teórico (al cual ahora se le designa como tratamiento óptimo efectivo). Si este no fuese el mayor la gráfica del rendimiento relativo se realizará con el tratamiento que produjo mayor materia seca (llamado aquí tratamiento óptimo efectivo).
3. Es deseable obtener coeficientes de variación menores del 15% para este tipo de ensayo.
4. El porcentaje de rendimiento relativo (%Y) se calcula utilizando la siguiente fórmula:
$$\%Y = \frac{\text{Tratamiento } \pm \text{ el nutriente con los demás nutrientes al nivel } \underline{\text{óptimo}}}{\text{Tratamiento } \underline{\text{óptimo efectivo}}} \times 100$$
5. Para determinar el nivel crítico de deficiencia (D), hay que construir una gráfica de Cate y Nelson, (1) graficando en el eje de las ordenadas los rendimientos relativos (%Y) de todos los rendimientos con respuesta (abajo del 80% y sin respuesta entre 80% y 100% de Y) y en el eje de las abcisas los resultados del análisis químico de la muestra de suelo original.
6. Una condición que hay que cumplir para poder determinar el nivel crítico de deficiencia (D), es que se debe trabajar con una gama de suelos de bajo a alto contenido natural de cada uno de los elementos nutritivos que se desee estudiar.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. CATIE Jr., R. B. y NELSON, L. A. A rapid method for correlation of soil test analysis with plant response data. Technical Bulletin No. 1. International Soil Testing. N. C. S. U. Raleigh, N. C. 1965. 24 p.
2. DIAZ-ROMEU, R. y HUNTER, A. Metodología de muestreo de suelos, análisis químico de suelos y tejido vegetal, e investigación en invernadero. Turrialba, Costa Rica, CATIE, 1978. 68 p.
3. GUZMAN, E. Relación fósforo-zinc en tres suelos ácidos de Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, UCR/CATIE, 1982. 143 p.
4. INSTITUT MUNDIAL DU PHOSPHATE. Deficiencia de fósforo en los suelos tropicales y métodos de evaluación. París. 1978. 33 p.
5. MARTINI, J. A. Caracterización del estado nutricional de los principales "Latosoles" de Costa Rica, mediante la técnica del elemento faltante en el invernadero. 19(3): 394-408. 1969.
6. RICHARDS, L. S., ed. Suelos salinos y sódicos. 6a. ed. Trad. del inglés por Nicolás Sánchez Durón, Enrique Ortega Torres, Rodolfo Vera y Zapata y Rodolfo Chena González. México, D. F., Limusa, 1973. 172 p.
7. SCHENKEL, G. Evaluación de la fertilidad de un suelo mediante la producción de materia seca en ensayos de macetas 1. Representaciones gráficas usadas. Turrialba, 20(3): 253-262. 1971.
8. _____. Evaluación de la fertilidad de un suelo, mediante la producción de materia seca en ensayos de macetas II. Diagrama de fertilidad. Turrialba. 21(3): 263-271. 1971.
9. _____. Evaluación de la fertilidad de un suelo, mediante la producción de materia seca en ensayos de macetas. III. Fórmula de fertilización del abonamiento de corrección. Turrialba. 21(3): 272-278. 1971.
10. _____. y FLODDY, T. Evaluación de la fertilidad de un suelo mediante la producción de materia seca en ensayos de macetas. IV. Determinación de la fórmula de fertilización mediante *Trifolium subterraneum* y *Lolium perenne* x *Lolium multiflorum*. Turrialba. 21(4): 406-418. 1971.
11. WALSH, L. M. y BEATON, J. D., ed. Soil testing and plant analysis. Rev. ed. Wisconsin, SSSA, 1973. 491 p.
12. WAUGH, W. D., CATE, R. B. y NELSON, L. A. Modelos discontinuos para una rápida correlación, interpretación y utilización de los datos de análisis de suelos y las respuestas a los fertilizantes. North Carolina, State University at Raleigh. ISFEI Technical Bulletin No. 7. 1973. 106 p.

A P E N D I C E

Cálculo de la cantidad de nutrimento agregado al suelo en base a la concentración de la solución madre.

Ejemplo 1.

Nitrógeno.

Si 5g de N = 5000 mg de N = 5000000 ug de N

Entonces.

$$\begin{array}{r} 5000000 \text{ ug de N} \text{ — } 1000 \text{ ml de agua} \\ x \text{ — } 1 \text{ ml de agua} \end{array}$$

x = 5000 ug de N los cuales si se agregan a 100 ml de suelo esto da una concentración de 50 ug de N ml⁻¹ de suelo.

Ejemplo 2.

Potasio.

Si 1 equivalente de K = 39.1 g

Entonces.

1 miliequivalente de K = 0.0391 g

Así:

$$\begin{array}{r} 1 \text{ meq de K} \text{ — } 0.0391 \text{ g} \\ x \text{ — } 7.82 \text{ g} \end{array}$$

x = 200 meq de K que se encuentran disueltos en 1000 ml de agua (solución madre).

y si:

$$\begin{array}{r} 200 \text{ meq de K} \text{ — } 1000 \text{ ml de agua} \\ x \text{ — } 1 \text{ ml de agua} \end{array}$$

x = 0.2 meq de K que si se agregan a 100 ml de suelo, se obtienen 0.2 meq de K 100 ml⁻¹ de suelo.

Ejemplo 3.

Boro.

0.2 g de B = 200 mg de B = 200000 ug de B

Si

$$\begin{array}{r} 200000 \text{ ug de B} \text{ — } 1000 \text{ ml de agua} \\ x \text{ — } 1 \text{ ml de agua} \end{array}$$

x = 200 ug de B que si se agregan a 100 ml de suelo resulta una concentración de 2 ug de B ml⁻¹ de suelo.

Ejemplo de cómo calcular el porcentaje de fijación de P, S y B.

Supongase que la cantidad de fósforo agregado (X) y fósforo extraído (Y) en una curva de asociación fue:

Fósforo agregado ug ml de suelo ⁻¹ (X)	Fósforo extraído ug ml de suelo ⁻¹ (Y)
0	3.7
35	6.7
70	10.5
140	20.8
280	72.2
560	152.3

El paso siguiente es calcular la ecuación de una regresión lineal simple ($y_i = b_0 + b_1 X$)

Así:

$$y_i = -5.6314 + 0.27649 X$$

$$r = 0.9923$$

Para calcular el % de fijación se utiliza la fórmula:

$$\% \text{ de fijación} = (1 - b_1) \times 100$$

en donde:

$$b_1 = \text{Pendiente de la recta}$$

$$100 = \text{Porcentaje}$$

Al efectuar la sustitución respectiva se obtiene:

$$\% \text{ de fijación} = (1 - 0.27649) \times 100$$

$$\% \text{ de P fijado} = 72.35$$

Nota: Similar procedimiento se sigue para calcular el porcentaje de fijación de S y B.

DESCRIPCION DE LOS PERFILES CORRESPONDIENTES AL SUELO CLASIFICADO COMO ANDEPTIC TROPOHMULT, FAMILIA MEDIAL, MIXTA E ISOHIPERTERMICA, SITUADO EN LA CUENCA DEL RIO TUIS. TURRIALBA, COSTA RICA.

PERFIL 27 = Esta unidad de suelos se define cartográficamente como Consociación Silencio, formada por el Conjunto Silencio* y sus inclusiones.

Descripción del perfil N° 27.

1. Características generales

Estos suelos se encuentran situados en el escarpe de falla escalonado del Río Tuis. Son de relieve complejo con pendientes simples y complejas combinadas que son quebradas, escarpadas y muy escarpadas. Son profundos, con mínima presencia de piedras en la superficie y en el perfil. Presentan acelerados procesos de erosión en forma de surcos, cárcavas y terracetos. La textura es predominantemente arcillosa, con buen desarrollo estructural y buen drenaje interno.

Tienen pH fuertemente ácido (5, 0-5,4), con alta saturación de aluminio intercambiable asociado con baja saturación de bases.

Son los suelos más intensamente cultivados en la región (caña de azúcar, café). Su manejo agrícola requiere técnicas adecuadas en conservación de suelos así como aplicación de cal y fertilización equilibrada, especialmente cuidadosa en mantener los equilibrios entre cationes calcio, magnesio y potasio.

Sus principales limitantes son: pendientes escarpadas, erosión y baja condición de fertilidad natural.

2. Localización: Finca del señor Harry Carranza, de la confluencia de la Quebrada Marimba y el Río Tuis, 1100 metros al Sur, en posición de relieve convexo (cimas de escarpes).

Altitud: 902 metros sobre el nivel del mar.

Clasificación taxonómica: Andeptic tropohumult, familia medial, mixta e isohipertérmica.

Posición fisiográfica: Escarpe de falla (escalonado) del Río Tuis.

* Conjunto: Técnica de agrupar suelos dentro del subgrupo taxonómico como mecanismo que permite separar unidades de suelos por posición fisiográfica. (paisajes), aunque correspondan taxonómicamente al mismo subgrupo.

Descripción del perfil 27

HORIZONTE	PROFUNDIDAD (cm)	DESCRIPCION
Ah	0-4	Pardo oscuro (7,5 YR 3/2, húmedo); franco; granular y en bloques sub-angulares finos y medianos, fuerte, firme a muy firme en húmedo y ligeramente adhesivo en mojado; poros finos, muy finos y gruesos abundantes; raíces finas y muy finas muchas; límite claro plano; pH 5,3.
Bt	4-97	Pardo rojizo oscuro (5 YR 3/4 húmedo); arcilloso; bloques sub-angulares medianos y gruesos de moderado a fuerte desarrollo; cutanes moderadamente espesos, zonales a discontinuos; friable en húmedo y adhesivo y plástico en mojado; poros discontinuos, muy finos y finos frecuentes y medianas muy pocas; límite gradual y plano; pH 5,0.
Bs	97-190	Rojo amarillento (5 YR 3/6, húmedo; franco; bloques sub-angulares finos y medianos, débil en desarrollo; muy friable en húmedo y ligeramente adhesivo en mojado, poros discontinuos, finos, muy finos y medianos frecuentes. Presenta un 7-10% de fragmentos angulares de saprolita (toba en proceso de meteorización, de 2 cm diámetro); pH 5,0.

Fuente: Núñez Solís, J. Estudio semi detallado de suelos en el área Sur de la cuenca del Río Tuis. Tesis Mg. Sc. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Depto. de Recursos Naturales, Turrialba, Costa Rica, 1984 (sin publicar).

Perfil 35 = Esta unidad se define cartográficamente como Consociación Zamora, formada por el Conjunto Zamora y sus inclusiones.

Descripción del perfil N° 35

Características generales: Son suelos de relieve quebrado, pendientes complejas con ámbitos de 20-30% y mayores. Son muy profundos a profundos.

En general no presentan mucha pedregosidad en la superficie ni en el perfil. Son de textura arcillosa en todo el perfil, de pH fuertemente ácido (4,6-4,9) y contenidos moderados de materia orgánica, aunque relativamente altos para un ultisol. Su saturación de bases intercambiables es muy baja, menos del 10%. El drenaje interno es moderado. La erosión laminar es severa y se presentan moderados procesos erosivos en forma de surcos y cárcavas.

Sus principales limitantes son: alta susceptibilidad a erosión cuando son utilizados agrícolamente, baja saturación de bases, alta saturación de aluminio y también los desbalances que existen entre los cationes calcio, magnesio y potasio.

La aptitud agrícola de estos suelos es de baja a moderada. Requieren adecuadas técnicas en conservación de suelos y programas de encalado y fertilización bien diseñados para mantenerlos bajo producción agrícola.

Taxonómicamente fueron clasificados como Andeptic tropohumult, familia medial, mixta e isohipertérmica.

2. Localización: Se localizan 450 metros al Sureste de la plaza de fútbol de la Suiza, a mano derecha sobre la carretera que conduce de La Suiza a Finca Nubes.

Posición fisiográfica: Esta unidad de suelos se distribuye en las terrazas residuales del Plioceno-Pleistoceno, que tienen una disección moderada a fuerte.

Altitud: 682 metros sobre el nivel del mar.

Descripción del perfil N° 35.

HORIZONTE	PROFUNDIDAD (cm)	DESCRIPCION
Ah	0-11	Pardo oscuro (7,5 YR 3/4, húmedo); arcilloso; granular y bloques sub-angulares medianos y gruesos, fuerte en desarrollo; friable en húmedo y adhesivo y plástico en mojado; poros finos y muy finos abundantes, gruesos frecuentes; raíces finas y muy finas frecuentes, medianas pocas; límite difuso y plano; pH 4,8.

HORIZONTE	PROFUNDIDAD (cm)	DESCRIPCION
Bt ₁	11-124	Rojo amarillento (5 YR 3/6, húmedo); arcilloso; bloques sub-angulares medianos, finos y gruesos, fuerte; friable en húmedo y adhesivo y plástico en mojado; cutanes espesos y discontinuos, poros finos y muy finos abundantes, medianos frecuentes; raíces finas, muy finas y medianas pocas; límite gradual y plano; pH 4,9.
Bt ₂	124-210	Rojo amarillento (5 YR 4/7, húmedo); arcilloso; bloques sub-angulares finos, medianos y gruesos, de moderado desarrollo; friable en húmedo y adhesivo y plástico en mojado; cutanes moderadamente espesos y discontinuos; poros finos y muy finos abundantes, medianos frecuentes; pH 4,7.

Fuente: Núñez Solís J. Estudio Semidetallado de Suelos en el Área Sur de la cuenca del Río Tuis. Tesis Mg. Sc. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Depto. de Recursos Naturales, Turrialba, Costa Rica, 1984. (sin publicar).

ESTUDIO DE RECONOCIMIENTO DE NUTRIMENTOS DEL SUELO - Soil nutrient survey study PROGRAMA DE FERTILIDAD DE SUELOS - CATIE - TURRIALBA, COSTA RICA

Muestra de suelo No. 2 Ubicación Perfil 35, La Suiza, Turrialba, Cartago, Costa Rica, 0-11 cms Textura Arcillosa
Soil sample No. Location

Analisis de la muestra de suelo original - Analysis of original soil sample

Método	Acid	pH	M.O.	Ca	Mg	K	Ca/Mg	Mg/K	N	P	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
1	5.80	4.30	4.4	0.89	0.36	0.19	2.47	1.89		10.82	24.1		27.0	-	14.0	2.8
2										8.3	29.5				15	1.3
3																

Analisis del estudio de sorción - Sorption study analysis

Cantidad																	
1						0.32				17.6	33.5				17	2.9	
2						0.34				24.2	34.9				24	4.9	
3						0.47				42.8	46.6				33	9.0	
4						0.82				172.1	58.0				50	16.5	
5						1.38				259.3	81.9				78	14.0	

Cantidad del elemento que se necesita de acuerdo al estudio de sorción u otro criterio usado - Amount of element needed according to sorption study or other criteria used

						0.58	0.043	0.62		110	23.0		0	0	0	16	
--	--	--	--	--	--	------	-------	------	--	-----	------	--	---	---	---	----	--

Peso de compuestos o ml de soluciones madre a agregar a 150 ml de suelo para el estudio de invernadero - Weight of compounds or ml of stock solutions to be added to 150 ml soil for greenhouse study

Descripción del tratamiento	Dnt	Ca	Mg	N	P	K	B	Cu	Fe	Mn	Mo	S	Zn	Tes- ligo	+3P	+6P	+9P
Gramos CaCO ₃	0.87	0	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0	0.87	0.87	0.87
Gramos MgO	0.064	0	0.064	0.064	0.064	0.064	0.064	0.064	0.064	0.064	0.064	0.064	0.064	0	0.064	0.064	0.064
N	1.5	1.5	1.5	0	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	0	1.5	1.5	1.5
P	1.7	1.7	1.7	1.7	0	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	0	5.1	10.2	15.3
K	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	0	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	0	4.7	4.7	4.7
B	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	0	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	0	1.5	1.5	1.5
Cu	0	0	0	0	0	0	0	1.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fe	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	0	1.5	1.5	1.5	1.5	0	1.5	1.5	1.5
Mn	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.5	0	0	0	0	0	0	0
Mo	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	0	1.5	1.5	0	1.5	1.5	1.5
S	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	0	1.1	0	1.1	1.1	1.1
Zn	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	0	2.4	2.4	2.4
Gramos NH ₄ NO ₃ 5 litros de solución de irrigación	1.5	1.5	1.5	0	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	0	1.5	1.5	1.5

CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA

CATIE

El uso de la Microparcela como método de
Apoyo para evaluar la Fertilidad del Suelo

Humberto Rodríguez Fuentes

Roberto Díaz-Romeu

Documento presentado en el "Curso sobre Investigación y
Desarrollo de Tecnología para Sistemas de Producción de
Cultivos" del 6 de agosto al 26 de octubre de 1984

Turrialba, Costa Rica

Agosto 1984

I. INTRODUCCION

La fertilidad del suelo es uno de los factores que influyen en la productividad del mismo, razón por lo cual es importante conocer los diferentes métodos que existen para evaluarla, la opinión general es que el método de campo es el menor indicaro y esta aseveración se ve fortalecida con el uso del método biológico en el invernadero y campo y análisis rutinario de suelos y tejido vegetal; cada uno de estos no se deben practicar aisladamente sino que son un continuo, así los análisis de suelos son una primer etapa hacia la evaluación de la fertilidad del mismo, un segundo paso es la prueba biológica en el invernadero, posteriormente (o a la vez) se puede usar la microparcela y finalmente en conjunto ó aisladamente el análisis de tejido vegetal y el método de campo.

Es importante tener claro que las tres primeras etapas no indicarán la cantidad de fertilizante a aplicar a un cultivo, sino que orientan sobre la condición de los nutrimentos y esto apoyará la decisión de con cuales nutrimentos y en que rangos se investigará en el campo.

Por otra parte es necesario definir fertilidad del suelo y Productividad del suelo ya que son conceptos diferentes que pueden confundir.

Fertilidad del suelo:

Es el estado de un suelo con respecto a la cantidad y disponibilidad de nutrimentos necesarios para el crecimiento de las plantas.

Productividad del suelo:

Es la capacidad de un suelo, en un ambiente natural para producir una planta específica o una secuencia de plantas bajo un sistema específico de manejo. Las limitaciones específicas son necesarias puesto que el suelo no puede producir todos los cultivos con igual éxito ni puede un sistema sencillo de manejo producir el mismo efecto sobre todos los suelos. La productividad enfatiza la capacidad del suelo a producir cultivos y deberá de ser expresado en términos de rendimiento (8).

II. Antecedentes del uso de la microparcela de maíz.

Inicialmente fue descrito en 1944 por Holme (5), en 1963, Hardy (4) trabajó con el método y en 1969, Martini (6) hace una modificación a este último, a continuación se hará una breve descripción del método utilizado por Hary y el modificado por Martini.

i) Consideraciones del método usado por F. Hardy.

El valor de la experimentación con microparcels residen en los datos comparativos que se obtienen y que permiten que deficiencias en nutrimentos y fertilidad con respecto a los elementos N, P y K, sean determinados en forma aproximada en una finca comercial en un corto período de tiempo. Los resultados pueden ser utilizados para comprobar aquellos obtenidos por análisis químicos del suelo y por ensayos con macetas en invernadero. La prueba de microparcela da una

información preliminar con la cual pueden también establecerse experimentos de campo en forma apropiada en determinada clase de suelo o bajo condiciones de campo especiales.

Hardy consideró que la respuesta en términos de peso de materia fresca es grande cuando el suelo es deficiente en cualquier elemento o elementos en estudios, por lo cual la interpretación de los resultados se efectúa en base a materia verde.

Se utiliza maíz por su crecimiento y desarrollo rápido. Y se asume que la semilla no contiene grandes cantidades de reserva nutritiva con respecto a minerales. La prueba consiste en un diseño de tratamientos factorial 3^3 .

En total se tienen 27 parcelas (tratamiento) de 60 x 60 cm, cada una de tres surcos con 10 parcelas por surco y los tratamientos no tienen repeticiones.

ii) Consideraciones del método usado por J. A. Martini.

El diseño consiste en un factorial 2^3 de N, P y K con tres repeticiones que da un total de 24 parcelas distribuidas por repetición al azar. La superficie total necesaria es de 135 m² (45 m²) por repetición, este diseño de tratamientos permite evaluar el estado nutricional del suelo en lo que concierne a N, P y K y sus posibles combinaciones. Además permite, con un mínimo de tratamientos, un máximo de información ya que se logra evaluar la respuesta al N solo y en presencia de N, de P, y de ambos nutrimentos. Claro está que con este método no se logra mucha información sobre niveles como es posible con el factorial 3^3 . Sin embargo, si el propósito de la microparcela es el de hacer una evaluación preliminar de la fertilidad del suelo, el diseño 2^3 es más que suficiente.

En vista que el crecimiento vegetativo del maíz no siempre correlaciona bien con su producción de grano ya que no todo lo que resulta en mayor crecimiento produce también más grano, el autor considera que la microparcela no debe usarse en estudios muy detallados sino más bien para evaluaciones preliminares de la fertilidad del suelo. La microparcela de campo, al igual que los métodos químicos análisisitos, tiene gran utilidad si se reconocen sus limitaciones y si se usa información complementaria para evaluar el estado nutricional del suelo. Esta información complementaria, a manera de ejemplo, puede incluir datos sobre clima, drenaje, pendiente, propiedades del perfil del suelo, uso, abonamiento, manejo previo del terreno, etc.

La recomendación general es la de usar el factorial 2^3 de N, P y K; no obstante, el investigador puede reducir el número de tratamientos. Por ejemplo si ya se conoce que el suelo es rico en K ó que el cultivo por ser una leguminosa no responde al N, se puede eliminar el tratamiento de N solo ó de K solo, dejando aquellos en que dicho elemento se aplica con otros para evaluar su contribución bajo condiciones más propicias de balance nutricional. Por otro lado, el investigador puede agregar tratamientos adicionales.

El tamaño de la parcela es de 100 X 100 cm con 5 surcos, siendo el número de plantas por surco igual a 10; se usa el peso seco y la cosecha se realiza a los 30 días después de la emergencia, la plante indicadora es maíz pero se recomienda usar la misma para la cual se evalúa el estado nutricional del suelo.

Si se desea obtener información complementaria de los métodos descritos se sugiere consultar la bibliografía que se presenta al final del presente.

Si se desea obtener información complementaria de los métodos descritos se sugiere consultar la bibliografía que se presenta al final del presente.

A continuación se describirán los objetivos y la metodología a seguir en los ensayos a realizar en el presente curso; cabe señalar, que la metodología que se seguirá, será una modificación en algunos aspectos a las hechas por Hardy y Martini, esto debido a que es importante considerar que las condiciones que se presenten en cada lugar en el que se desee realizar la prueba, serán diferentes, por lo cual la metodología deberá adecuarse a éstas y al criterio del investigador.

III. Objetivos

i) Familiarizar a los participantes con el uso de la microparcela como método de apoyo para evaluar la fertilidad del suelo.

ii) Fortalecer los criterios necesarios para interpretar los resultados provenientes del método.

iii) Ampliar y difundir el uso de este método combinado con el método del elemento faltante y/o aditivo como recursos necesarios que auxilien la interpretación de los análisis de suelos y los ensayos de campo con fertilizantes.

IV. Metodología

1. Se deberá escoger un terreno que sea representativo del área de interés; deberá limpiarse y nivelarse manualmente; para el caso del ensayo, la preparación se hará con rotovator, aunque se puede hacer con azadón.

2. La microparcela tendrá dimensiones de 1 X 1 m y estarán separadas, por estacas; se harán bloques de 1 X 18 m, (3 por especie) ya que se dejará una parcela de por medio como borde para evitar contaminaciones nutrimentales laterales, el diseño de tratamientos será un factorial 3^2 en un diseño de bloques al azar.

3. Se harán 5 surcos (20 cm entre surcos) por parcela a una profundidad aproximada de 10 cm, los surcos deberán orientarse de manera perpendicular al largo del bloque para facilitar la toma de fotografías y/o diapositivas.

4. Para la distribución de los tratamientos deberán respetarse las normas que establece el diseño de bloque al azar.

5. Por razones didácticas y de manejo se recomienda colocar letreros pegados a una estaca esquinera, indicando el tratamiento correspondiente.

6. El abono será medido volumétricamente por parcela, su distribución se hará colocando primero el N y luego el P cuidando de que ésta sea homogénea; todo el fertilizante será depositado en ese momento. Posteriormente se cubrirá con 2-3 cm de suelo para evitar contacto con la semilla, la cual deberá de colocarse arriba y a un lado del abono y cubrirla con el resto del suelo hasta dejar una superficie pareja sobre la parcela. La semilla deberá de distribuirse a todo lo largo del metro que mide el surco. Cada surco debe tener 10 plantas; (para el caso del maíz) por lo cual se sembrarán inicialmente 15 semillas por curso, siete días después de la siembra se releará a 10 plantas.

La semilla se pondrá en agua 24 horas antes de la siembra (para reducir el tiempo de germinación); para evitar daño por insectos puede ser tratada con algún insecticida en polvo.

7. En tiempo seco regar las parcelas uniformemente; si es necesario el riego debe repetirse a intervalos frecuentes.

8. Durante el desarrollo del cultivo se debe cuidar adecuadamente para asegurar el éxito del ensayo. En caso de ser necesario se deberá (n) hacer aplicación (es) de insecticida.

9. A los 40 días después de la siembra se tomarán datos sobre síntomas de deficiencias (por tratamiento y en las tres repeticiones), vigor de la planta, altura promedio de 5 plantas (por tratamiento y en las tres repeticiones), la cual se hará siguiendo el criterio de medirla de la base al extremo de la hoja más larga, ataque de enfermedades e insectos, máximo diámetro (9) a la mitad del segundo entrenudo del tallo arriba del suelo, número total de plantas por parcela o tratamiento y área foliar (3, 7) utilizando la fórmula empírica de largo (cm) por ancho (cm) por el factor de 0.75 y así se obtendrá el área foliar en cm^2 por hoja, esto se realizará en todas las hojas de las planta de 5 plantas tomadas al azar (para todos los tratamientos en las tres repeticiones): inicialmente se calculará el área foliar total por planta por tratamiento y posteriormente se obtendrá un promedio por parcela, para efectuar los análisis estadísticos pertinentes. En este momento se pueden tomar fotografías y/o diapositivas para fines ilustrativos.

10. La cosecha se realizará cortando la parte aérea de las plantas (tallos y hojas) aproximadamente a un centímetro arriba del nivel del suelo, colocando en bolsas grandes de paepl para secar al horno (65-70°C) por 72 horas. Luego se obtiene el peso seco. Se deberá tener cuidado de marcar adecuadamente cada bolsa, en cada bolsa deberá ir un solo tratamiento.

11. Los resultados deberán expresarse por un número constante de plantas que en el caso del maíz será de 50. Si la parcela no tiene 50 plantas es preciso hacer la corrección (análisis de covarianza), a menos que se considere que la reducción de plantas sea un efecto del mismo tratamiento. En lugar del peso, los resultados pueden expresarse como porciento del testigo, dándosele a este el valor de 100 por ciento.

V. Análisis estadístico a realizar

1. Se hará un análisis de varianza para un diseño de bloques al azar corrient-, para materia seca, altura final, área foliar a la cosecha y diámetro final del tallo; si es del caso se hará la corrección por covarianza para número de plantas; para el caso del cultivo de Caupí (Vigna unguiculata Walp.) no se considera diámetro, altura y área foliar; solo materia seca.

2. Si se encuentra efecto a los tratamientos se realizará un análisis de varianza para buscar los efectos puros y de interacción de los factores, posteriormente se probará cual es la tendencia que tiene cada efecto, ya sea lineal o cuadrática.

3. Se harán gráficos en los cuales se tabule el % de rendimiento promedio alcanzado en los tratamientos, en relación a la producción del testigo y se harán las interpretaciones pertinentes.

VI. Observaciones generales

El grupo se dividirá en 3 subgrupos, dos trabajarán con maíz (uno trabajará con microparcela de 1 X 1 m y 5 surcos a una distancia de 20 cm y el otro lo hará con microparcels de 0.6 X 0.6 m con 3 surcos a una distancia de 20 cm) y el otro con caupí.

Subgrupo	Dimensiones de la microparcela	Especie
1	1.0 X 1.0 m	Maíz
2	0.6 X 0.6 m	Maíz
3	1.0 X 1.0 m	Caupí

Cantidades de semilla a usar por especie por surco:

a la siembra

al raleo habrá (7DDS)*

Maíz (1X1m)	Maíz (0.6 X 0.6m)	Caupí (1 X 1 m)	Maíz (1 X 1 m)	Maíz (0.6 X 0.6m)	Caupí (1 X 1 m)
15	15	25	10	10	16

*DDS = Días después de la siembra

Area a usar por especie en microparcela de

1 X 1 m = 1 X 18 m = 18 m²

por 3 repeticiones = 18 X 3 = 54 m²

Area a usar por especie en microparcela de

0.6 X 0.6 m = 0.6 X 18 m = 10.8 m²

por 3 repeticiones = 32.4 m²

i) Materiales y equipo necesario:

1. 3 marcos de madera (uno por subgrupo) hecho de reglas de 2X1 pulgadas con 3 divisiones (véase el diseño).
2. Estacas de madera o bambú, delgadas de 45 cm de largo.
3. Semilla de maíz y caupí.
4. En caso de necesitarse riego, una regadera de mano.
5. Es aconsejable medir volumétricamente el fertilizante y no pesarlo ya que con esto se facilita el trabajo.
6. Fertilizante
 - a) Sulfato de amonio (21% N).
 - b) Superfosfato triple (46% P₂O₅)

VII. Factores y niveles a usar por especie

Niveles	Maíz (1 X 1 m)		Maíz (0.6 X 0.6m)		Caupí (1 X 1 m)	
	N(Kg/ha)	P ₂ O ₅ (Kg/ha)	N(Kg/ha)	P ₂ O ₅ (Kg/ha)	N(Kg/ha)	P ₂ O ₅ (Kg/ha)
0	0	0	0	0	0	0
1	100	100	100	150	100	150
2	200	200	200	300	200	300

Tratamientos y notaciones para maíz

Nº tratamiento	Notación para Experimentos factoriales	N		P ₂ O ₅		K ₂ O	
		-	-	-	-	-	-
1	00	0	-	0	-	0	-
2	01	0	-	150	-	0	-
3	02	0	-	300	-	0	-
4	10	100	-	0	-	0	-
5	11	100	-	150	-	0	-
6	12	100	-	300	-	0	-
7	20	200	-	0	-	0	-
8	21	200	-	150	-	0	-
9	22	200	-	300	-	0	-

Tratamientos y notación para caupí

N ^o tratamiento	Notación para Esperimentos factoriales	Kg/ ha				
		N	-	P ₂ O ₅	-	K ₂ O
1	00	0	-	0	-	0
2	01	0	-	150	-	0
3	02	0	-	300	-	0
4	10	100	-	0	-	0
5	11	100	-	150	-	0
6	12	100	-	300	-	0
7	20	200	-	0	-	0
8	21	200	-	150	-	0
9	22	200	-	300	-	0

Cantidad de fertilizante a aplicar en las microparcels de 1 X1 m (1m²) de maíz y caupí

N ^o tratamiento	Tratamientos				g sulfato de amonio por m ²	g de Superfosfato triple por m ²
	N	-	P ₂ O ₅	- K		
1	0	-	0	- 0	0.00	0.00
2	0	-	150	- 0	0.00	32.61
3	0	-	300	- 0	0.00	65.22
4	100	-	0	- 0	47.62	0.00
5	100	-	150	- 0	47.62	32.61
6	100	-	300	- 0	47.62	65.22
7	200	-	0	- 0	95.24	0.00
8	200	-	150	- 0	95.24	32.61
9	200	-	300	- 0	95.24	65.22

Cantidad de fertilizante a aplicar en las microparcels de 0.6 X 0.6M (0.36 m²) de maíz

N ^o tratamiento	Tratamientos				g de sulfato de amonio por 0.36 m ²	g de superfosfato triple por 0.36 m ²
	N	-	P ₂ O ₅	- K		
1	0	-	0	- 0	0.00	0.00
2	0	-	150	- 0	0.00	11.74
3	0	-	300	- 0	0.00	23.48
4	100	-	0	- 0	17.14	0.00
5	100	-	150	- 0	17.14	11.74
6	100	-	300	- 0	17.14	23.48
7	200	-	0	- 0	34.28	0.00
8	200	-	150	- 0	34.28	11.74
9	200	-	300	- 0	34.38	23.48

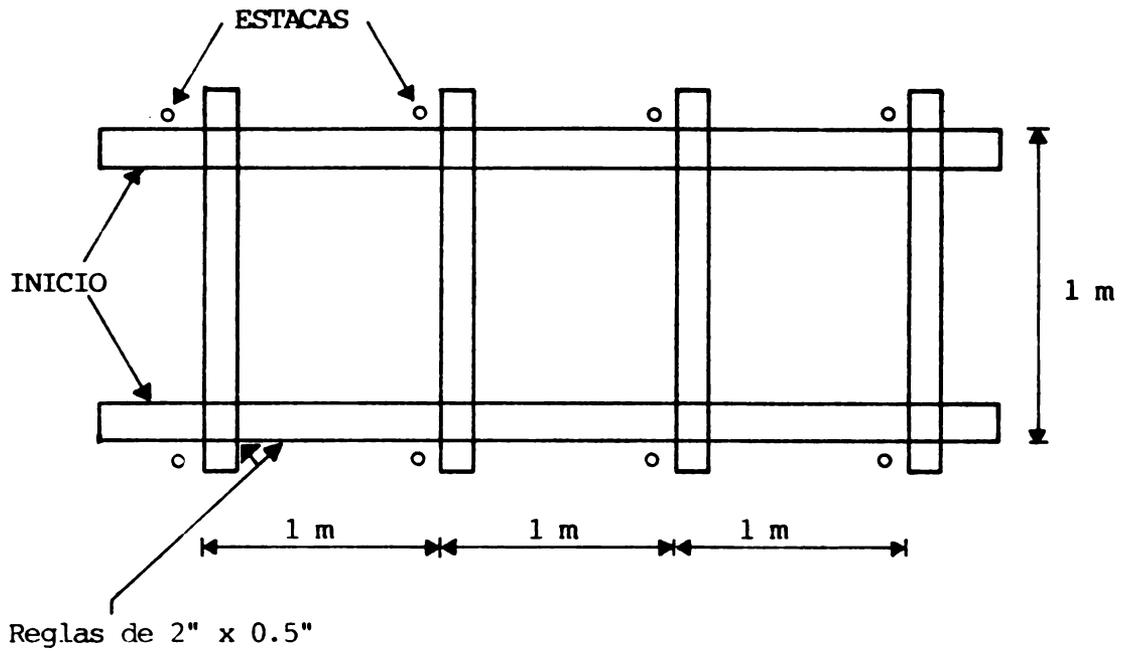


Fig. Construcción y dimensiones de los marcos para la delimitación de las microparcels.

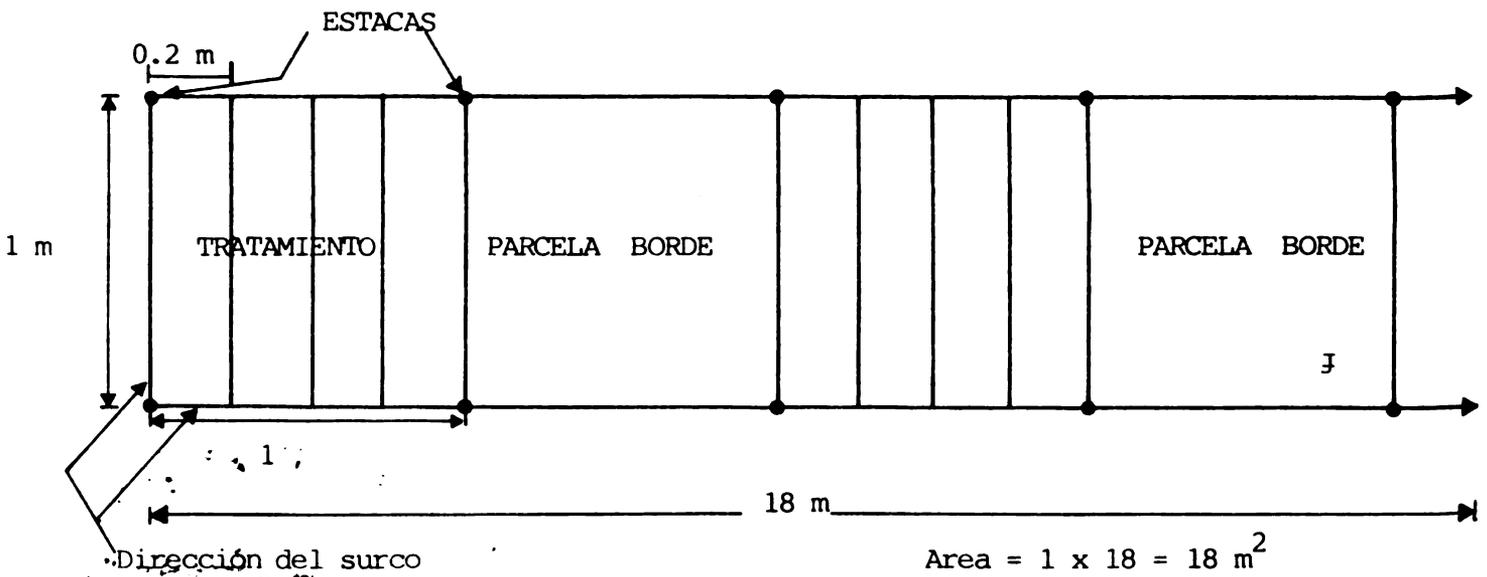


Fig. Disposición de las microparcels en una repetición.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. CORDERO VASQUEZ, A. Evaluación de la fertilidad de tres suelos aluviales de Costa Rica mediante el método de las microparcelas de maíz. Boletín Técnico N° 58. MAG. 1971. 30 p.
2. _____. Determinación del estado nutritivo de un suelo de la Estación Experimental "Enrique Jiménez Núñez" (Costa Rica) por medio de la prueba de microparcelas de maíz. In. Reunión Anual del Programa Cooperativo Centroamericano para el Mejoramiento de Cultivos Alimenticios, XV, San Salvador, El Salvador, 24-28 febrero, 1969. Tomo II (Paginación irregular).
3. LAL, K. N. y USBRA RAU, M.S. A rapid method for estimation of leaf area in growing maize plants. Curr. Sci. 19: 179-180. 1950.
4. HARY, F. y BAZAN, R. The maize microplot method of soil testing. Turrialba 16(3): 267-270. 1966.
5. HOLME, R. V. The importance of soil tests as Shown by the use of corn microplot experiments. In. Proceedings of the 1944 meeting of British, Barbados, B.W.I. Sugar Association (Inc), 1944. pp. 46-58.
6. MARTINI, J.A. La microparcela de campo como un método biológico rápido para evaluar la fertilidad del suelo. Turrialba (Costa Rica) 19: (2): 216-266. 1969.
7. MCKEE, G. M. A coeficient for computing leaf area in hybrid corn. Agronomy Journal 56 (2): 240-241. 1964.
8. SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA. Glossary of soil science terms. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 29(3): 330-350. 1971.
9. STRUIK, P. L. y DELNUM, B. Effect of light intensity after flowering on the productivity and quality of silage maize. Neth. J. Agric. Sci. 30: 297-316. 1982.



CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA

CATIE

Departamento de Producción Vegetal

ANÁLISIS DE EXPERIMENTOS FACTORIALES 3^2 PARA USARSE
EN ENSAYOS DE FERTILIZACIÓN. TEORÍA Y EJEMPLOS

Humberto Rodríguez Fuentes

Roberto Díaz Romeu

Documento presentado en el "Curso sobre Investigación y Desarrollo de Tecnología para Sistemas de Producción de Cultivos" del 6 de Agosto al 26 de octubre de 1984.

Turrialba, Costa Rica, 1984.

INTRODUCCION

El presente escrito es una guía complementaria de utilidad en el análisis e interpretación de los datos generados en el ensayo de la microparcela. Consta de ejemplos de experimentos con niveles de fertilización y densidades de siembra en los cuales se explica cómo calcular e interpretar los efectos puros y de interacción de los factores, así como el tipo de tendencia (lineal o cuadrática) de cada factor y las combinaciones de las tendencias de la interacción de los factores en estudio.

Experimentos Factoriales 3^n .

Para iniciar el estudio de los factoriales 3^n consideramos un ejemplo de factorial 3^2 .

Supongamos que se quiere comparar tres densidades de maíz en tres niveles de nitrógeno.

Los niveles son:

$d_0 = 40000$ plantas/ha

$d_1 = 50000$ plantas/ha

$d_2 = 60000$ plantas/ha

$n_0 = 0$ kg de N/ha

$n_1 = 100$ kg de N/ha

$n_2 = 200$ kg de N/ha

Los tratamientos son:

1.- $d_0 n_0 = 00$

2.- $d_0 n_1 = 01$

3.- $d_0 n_2 = 02$

4.- $d_1 n_0 = 10$

5.- $d_1 n_1 = 11$

6.- $d_1 n_2 = 12$

7.- $d_2 n_0 = 20$

Estos nueve tratamientos se pueden probar bajo cualquier diseño experimental. Si el diseño es bloques al azar el croquis del experimento es:

I	t_3	t_5	t_9	t_6	t_1	t_4	t_7	t_2	t_8
II	t_9	t_1	t_4	t_5	t_6	t_2	t_8	t_3	t_7
III	t_2	t_6	t_8	t_3	t_4	t_5	t_1	t_9	t_7
IV	t_8	t_7	t_3	t_1	t_2	t_6	t_4	t_5	t_9

Supongamos que los rendimientos obtenidos expresados en Kg/parcela son:

Bloques	d _o n _o	d _o n ₁	d _o n ₂	d ₁ n _o	d ₁ n ₁	d ₁ n ₂	d ₂ n _o	d ₂ n ₁	d ₂ n ₂	Σ
I	10	14	12	14	20	20	9	12	13	124
II	11	15	13	15	22	19	10	13	13	131
III	11	16	13	14	23	20	11	13	14	135
IV	12	18	13	16	23	22	11	14	16	145
Σ	44	63	51	59	88	81	41	52	56	535

Como primer paso en el análisis del experimento, se construye una tabla de análisis de varianza. Los granos de libertad y las sumas de cuadrados se obtienen mediante las reglas a partir del modelo.

El modelo para este experimento es:

$$y_{ijk} = \mu + \beta_i + D_j + N_k + (DN)_{jk} + E_{ijk}$$

i = 1,2,3,4
j = 1,2,3
k = 1,2,3

La tabla de representación simbólica de datos en base a este modelo es:

Bloques	d _o n _o	d _o n ₁	d _o n ₂	d ₁ n _o	d ₁ n ₁	d ₁ n ₂	d ₂ n _o	d ₂ n ₁	d ₂ n ₂	Total
I	y ₁₁₁	y ₁₁₂	y ₁₁₃	y ₁₂₁	y ₁₂₂	y ₁₂₃	y ₁₃₁	y ₁₃₂	y ₁₃₃	Σ _j Σ _k y _{1jk}
II	y ₂₁₁	y ₂₁₂	y ₂₁₃	y ₂₂₁	y ₂₂₂	y ₂₂₃	y ₂₃₁	y ₂₃₂	y ₂₃₃	Σ _j Σ _k y _{2jk}
III	y ₃₁₁	y ₃₁₂	y ₃₁₃	y ₃₂₁	y ₃₂₂	y ₃₂₃	y ₃₃₁	y ₃₃₂	y ₃₃₃	Σ _j Σ _k y _{3jk}
IV	y ₄₁₁	y ₄₁₂	y ₄₁₃	y ₄₂₁	y ₄₂₂	y ₄₂₃	y ₄₃₁	y ₄₃₂	y ₄₃₃	Σ _j Σ _k y _{4jk}
TOTAL	y..1	y..2	y..3	y.21	y.22	y.23	y.31	y.32	y.33	y...

Los totales de tratamientos se pueden resumir en una tabla de la siguiente forma:

	do	d1	d2		Media
no	44	59	41	144	12
n1	63	88	52	203	17.41666
n2	51	81	56	188	13.66666
	158	228	149	535	
Media	13.16666	19	12.41666		

	do	d1	d2		Media
no	y..1	y..2	y..3	y..1	\bar{y}_{no}
n1	y.12	y.22	y.32	y..2	\bar{y}_{n1}
n2	y.13	y.23	y.33	y..3	\bar{y}_{n2}
	y.1.	y.2.	y.3.	y...	
Media	\bar{y}_{do}	\bar{y}_{d1}	\bar{y}_{d2}		

Las fuentes de variación, los productos simbólicos y los grados de libertad son:

FV	PS	GL
Media	1	1
Bloques	i-1	3
D	j-1	2
N	k-1	2
DN	(j-1) (k-1)	4
Error	Por diferencia	24
Total	ijk	36

Las sumas de cuadrados son:

$$SC(\text{media}) = \frac{\sum_{i=1}^1 \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^3 Y_{ijk}^2}{(4)(2)(3)} = \frac{(535)^2}{36} = 7950.694444$$

$$SC(\text{Bloques}) = \sum_{i=1}^4 \left[\frac{\sum_{k=1}^3 Y_{ijk}^2}{(3)(3)} \right] - \frac{Y^2_{...}}{36}$$

$$= \frac{Y^2_{1..} + Y^2_{2..} + Y^2_{3..} + Y^2_{4..}}{9} - \frac{Y^2_{..}}{36} =$$

$$= \frac{(124)^2 + (131)^2 + (135)^2 + (145)^2}{9} - \frac{(535)^2}{36} = 25.63888889$$

$$SC (D) = \sum_{j=1}^3 \frac{\sum_{i=1}^4 \sum_{k=1}^3 y_{ijk}^2}{12} - \frac{Y^2_{...}}{36} =$$

$$= \frac{Y^2_{..1} + Y^2_{..2} + Y^2_{..3}}{12} - \frac{Y^2_{...}}{36} =$$

$$= \frac{(158)^2 + (228)^2 + (149)^2}{12} - \frac{(535)^2}{36} = 31.722222$$

$$SC (N) = \sum_{k=1}^3 \frac{\sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^3 y_{ijk}^2}{12} - \frac{Y^2_{...}}{36} =$$

$$SC (N) = \frac{Y^2_{..1} + Y^2_{..2} + Y^2_{..3}}{12} - \frac{Y^2_{...}}{36} =$$

$$= \frac{(144)^2 + (203)^2 + (188)^2}{12} - \frac{(535)^2}{36} = 156.7222222$$

$$SC (DN) = \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^3 \frac{\sum_{i=1}^4 y_{ijk}^2}{4} - \sum_{j=1}^3 \frac{\sum_{i=1}^4 \sum_{k=1}^3 y_{ijk}^2}{12} - \sum_{k=1}^3 \frac{\sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^3 y_{ijk}^2}{12} =$$

$$+ \frac{Y^2_{...}}{36}$$

$$= \frac{(y_{.jk})^2}{4} - SC (D) - SC (N) - SC (Media) =$$

$$= \frac{Y^2_{.11} + Y^2_{.12} + \dots + Y^2_{.33}}{4} - SC(D) - SC (N) - SC (Media)$$

$$+ \frac{(44)^2 + (63)^2 + \dots + (56)^2}{4} - 311.722222 - 156.722222 - 7950.694444 =$$

$$= 34.111112$$

$$SC (Total) = \sum_J \sum_L \sum_K y_{ijk}^2 = Y^2_{111} + Y^2_{211} + \dots + Y^2_{433}$$

$$= (10)^2 + (11)^2 + \dots + (16)^2 = 8489$$

$$SC (Error) = SC (Total) - SC (Media) - SC (Bloques) - SC (D) - SC (N) -$$

$$SC (ND) =$$

$$= 8489 - 7950.694444 - 25.63888889 - 311.722222$$

$$- 156.7222222 - 34.111112 = 10.11111091$$

Con estos resultados, la tabla de análisis de varianza es:

FV	GL	SC	CM	Fc	F Tabulada	
					0.05	0.01
Media	1	7950.694444				
Bloques	3	25.63888889	8.546296297	20.285**	3.01	4.72
D	2	311.722222	155.861111	369.956**	3.40	5.61
N	2	156.722222	78.361111	186.000**	3.40	5.61
DN	4	34.111112	8.527778	20.242**	2.78	4.22
Error	24	10.11111091	0.4212962879			
Total	36	8489 00000				

** Diferencia altamente significativa.

En este análisis de varianza encontramos que hay una diferencia altamente significativa entre los niveles de densidad y los niveles de nitrógeno. Además hay una interacción altamente significativa. Sin embargo, este análisis de varianza no da mucha información; por una parte hay interacción significativa y por otra parte no se sabe el tipo de respuesta (lineal o cuadrático) a las densidades y a los niveles de nitrógeno.

Cuando no se tiene interacción significativa y los factores no son cuantitativos, después del análisis de varianza solo se comparan las medias de cada uno de los factores por medio de pruebas de rangos múltiples. En el factorial 3^2 se hacen dos pruebas de rangos múltiples, en cada caso se comparan tres medias.

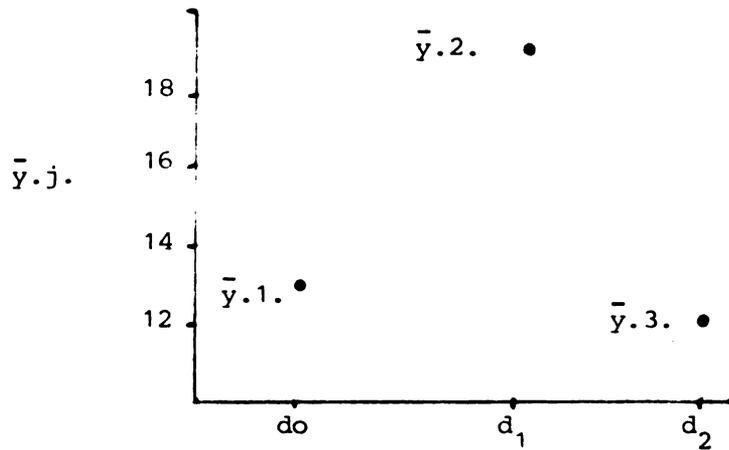
Cuando no se tiene interacción significativa y los factores son cuantitativos, es necesario descomponer las sumas de cuadrados para los efectos principales para estudiar el tipo de respuesta. En el factorial 3^2 , la suma de cuadrados para un factor se descompone en dos, una lineal y una cuadrática. La división de la suma de cuadrados se hace por medio de contrastes ortogonales, como se verá posteriormente.

Cuando se tiene interacción significativa y los factores no son cuantitativos, se estudian los efectos simples por medio de gráficos y comparaciones múltiples de medias de tratamientos.

Cuando se tiene interacción significativa y los factores son cuantitativos, se descomponen las sumas de cuadrados para los efectos principales y para la interacción por medio de contrastes ortogonales. Además se estudian los efectos simples por medio de gráficos y comparaciones múltiples de medias.

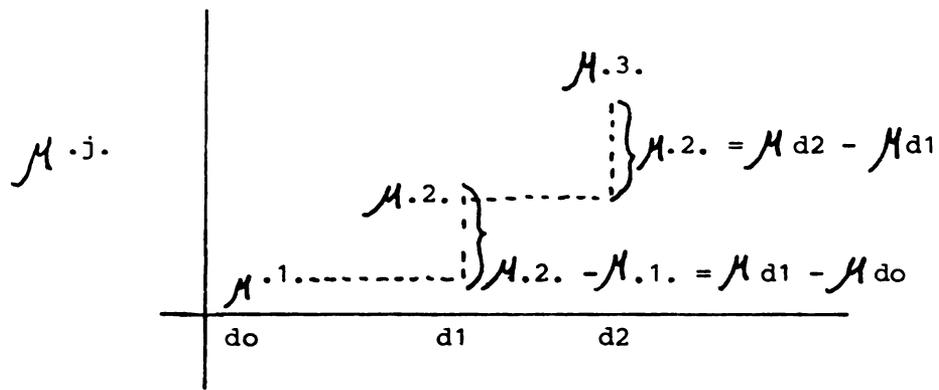
A continuación se estudia como se descompone el efecto de un factor en lineal y cuadrático. Posteriormente se verá como se prueban los efectos lineales y cuadráticos para los factores y la interacción, por medio de contrastes ortogonales.

Como se vió al calcular las sumas de cuadrados, el efecto de densidades está reflejado en la variabilidad de tres totales ($y_{.1}$, $y_{.2}$, $y_{.3}$), así el efecto principal de un factor con tres niveles se le asocian dos grados de libertad. La suma de cuadrados para los efectos principales en los factoriales 3^2 se puede descomponer en dos partes, con un grado de libertad para cada parte. La descomposición del efecto principal en densidades se puede ver de la siguiente forma:



En la gráfica se puede apreciar que la respuesta del cultivo a las densidades es fundamentalmente cuadrática.

Una respuesta lineal genera una gráfica de la siguiente forma:



En la gráfica se puede ver que $\mu_{d1} - \mu_{do}$ es el efecto al cambiar de do a $d1$ y $\mu_{d2} - \mu_{d1}$ es el efecto al cambiar de $d1$ a $d2$. El efecto lineal del factor D se define como el promedio de estos dos efectos. Es decir, $DL = \frac{1}{2} [(\mu_{d1} - \mu_{do}) + (\mu_{d2} - \mu_{d1})] = \frac{1}{2} [\mu_{d2} - \mu_{do}]$

DL = Efecto lineal de D.

El efecto cuadrático o desviaciones de la linealidad es la diferencia de incrementos. Si la linealidad es perfecta esa diferencia será cero y si hay discrepancias se deben a la curvatura.

$$Dc = \frac{1}{2} [(\mu_{d2} - \mu_{d1}) - (\mu_{d1} - \mu_{do})] = \frac{1}{2} [\mu_{d2} - 2\mu_{d1} + \mu_{do}]$$

Dc = Efecto cuadrático de la densidad.

En el ejemplo se tienen los siguientes estimadores de los efectos:

$$DL = \frac{1}{2} [\bar{y}_{d2} - \bar{y}_{do}] = \frac{1}{2} [12.41666 - 13.16666] = -0.375$$

$$Dc = \frac{1}{2} [\bar{y}_{d2} - 2\bar{y}_{d1} + \bar{y}_{do}] =$$

$$= \frac{1}{2} [12.41666 - 2(19) + 13.16666] = -12.4166$$

$$NL = \frac{1}{2} [\bar{y}_{n2} - \bar{y}_{no}] = \frac{1}{2} [15.66666 - 12] = 1.83333$$

$$Nc = \frac{1}{2} [1\bar{y}_{n2} - 2\bar{y}_{n1} + 1\bar{y}_{no}] =$$

Coeficientes de tablas

$$= \frac{1}{2} [15.55516 - 2(17.41666) + 12] = -3.58332$$

Para ver si estos efectos son significativos se obtiene la suma de cuadrados para cada uno de ellos por medio de contrastes ortogonales, posteriormente se hacen las pruebas correspondientes en una tabla de análisis de varianza. Además con los contrastes es posible el estudio de la interacción en términos de los efectos cuadráticos y lineales. La tabla de los coeficientes para contrastes es:

Efecto	dono	don1	don2	dlno	d1n1	d1n2	d2no	d2n1	d2n2
C ₁ = DL	-1	-1	-1	0	0	0	1	1	1
C ₂ = DC	1	1	1	-2	-2	-2	1	1	1
C ₃ = NL	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1
C ₄ = NC	1	-2	1	1	-2	1	1	-2	1
C ₅ = DLNL	1	0	-1	0	0	0	-1	0	1
C ₆ = DLNC	-1	2	-1	0	0	0	1	-2	1
C ₇ = DCNL	-1	0	1	2	0	-2	-1	0	1
C ₈ = DCNC	1	-2	1	-2	4	-2	1	-2	1

L = Efecto lineal

C = Efecto cuadrático

Los coeficientes para los contrastes KL, DC, NL y NC se obtienen de los efectos lineales y cuadráticos definidos anteriormente. Los coeficientes para los contrastes de la interacción se obtienen mediante el producto de los coeficientes correspondientes a efectos principales.

Para el ejemplo que estamos estudiando las sumas de cuadrados son:

$$SC(DL) = SC(C_1) = \frac{C_1^2}{r \sum_{j=1}^r C_{1j}^2} \quad \text{Totales de tratamiento}$$

$$= \frac{[-T_{00} - T_{01} - T_{02} + T_{20} + T_{21} + T_{22}]^2}{r [(-1)^2 + (-1)^2 + (-1)^2 + (1)^2 + (1)^2 + (1)^2]} =$$

T_{ij} denota el total del tratamiento con nivel i de D, y j de N.

$$SC(DL) = \frac{[-44 - 63 - 51 + 41 + 52 + 56]^2}{(4)(6)} = 3.375$$

$$SC(DC) = SC(C_2) = \frac{C_2^2}{r \sum_{j=1}^r C_{2j}^2} =$$

$$= \frac{T_{00} + T_{01} + T_{02} - 2T_{10} - 2T_{11} - 2T_{12} + T_{20} + T_{21} + T_{22}}{4 \cdot (1)^2 + (1)^2 + (1)^2 + (-2)^2 + (-2)^2 + (-2)^2 + (1)^2 + (1)^2 + (1)^2} =$$

$$= \frac{44 + 63 + 51 - 2(59) - 2(88) - 2(81) + 41 + 52 + 56}{(4) \quad (18)} =$$

$$= 308.3472222$$

Observe que: SC (DL) + SC (DC) = SC (D)

$$3.375 + 308.3472222 = 311.722222$$

$$SC (NL) = SC (C_3) = \frac{C_3^2}{t} = \frac{r \sum_{j=1}^3 C_{3j}^2}{t}$$

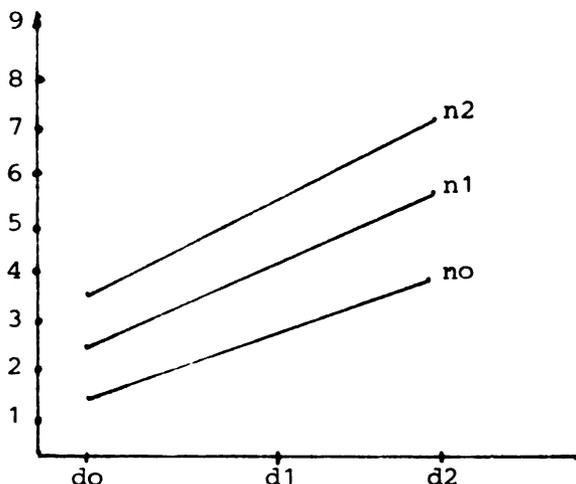
$$= \frac{(T_{00} - 2 T_{01} + T_{02} + T_{10} - 2 T_{11} + T_{12} + T_{20} - 2T_{21} + T_{22})^2}{(4) \quad (18)} =$$

$$= \frac{(44 - 2(63) + 51 + 59 - 2(88) + 81 + 41 - 2(52) + 56)^2}{(4) \quad (18)}$$

La interacción DL NL se puede interpretar de la siguiente forma: Para entender mejor las características de esta interacción consideramos un experimento en el cual se tienen los siguientes resultados.

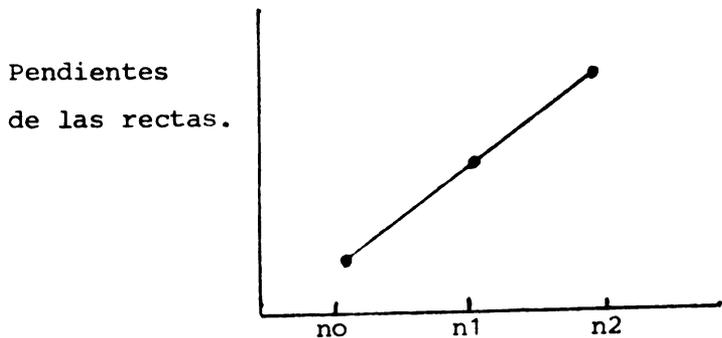
Trata.	don0	don1	don2	d1no	d1n1	d1n2	d2no	d2n1	d2n2
medias	1	2	3	2	4	6	3	6	9

La gráfica para estos datos es:



Si se obtienen las sumas de cuadrados para las interacciones observamos que la única diferente de cero es la DL NL.

Observe que la respuesta lineal de densidades cambia linealmente al cambiar los niveles de nitrógeno, es decir los efectos simples de nitrógeno son proporcionales en las tres densidades. Otra forma de ver esto es que las pendientes de las tres rectas siguen una tendencia lineal, es decir, se pueden graficar en la forma siguiente:

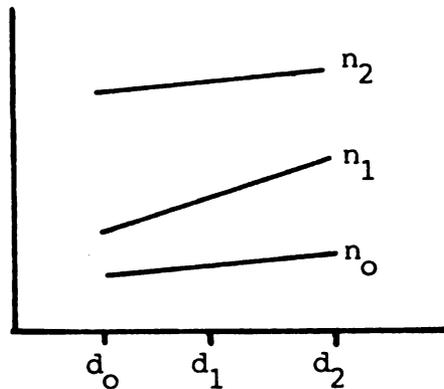


Esta interpretación de la interacción DL NL es válida cuando las otras interacciones no son significativas. Sin embargo, podemos observar que la interacción DL NL está definida por la diferencia entre los efectos simples: $(d_{n_2} - d_{n_0})$ y $(d_{2n_2} - d_{2n_0})$, por lo tanto hay interacción DL NL independientemente de la respuesta de las densidades en n_1 y de los efectos del nitrógeno en d_1 .

En el ejemplo del factorial 3^2 que estamos estudiando, las medias de tratamientos son:

Trata:	$d_0 n_0$	$d_0 n_1$	$d_0 n_2$	$d_1 n_0$	$d_1 n_1$	$d_1 n_2$	$d_2 n_0$	$d_2 n_1$	$d_2 n_2$
Media:	11.00	15.75	12.75	14.75	22.00	20.25	20.25	13.00	14.00

La gráfica para estos datos es:

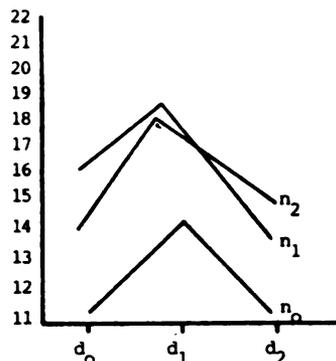


En la gráfica se puede observar que la interacción DL NL es significativa debido a que la discrepancia entre los efectos simples: $(d_1 n_2 - d_0 n_2)$ y $(d_2 n_2 - d_2 n_0)$ es significativa, independientemente del comportamiento de los otros efectos simples.

Para interpretar una interacción DL NC consideremos un experimento en el cual se tienen los siguientes resultados:

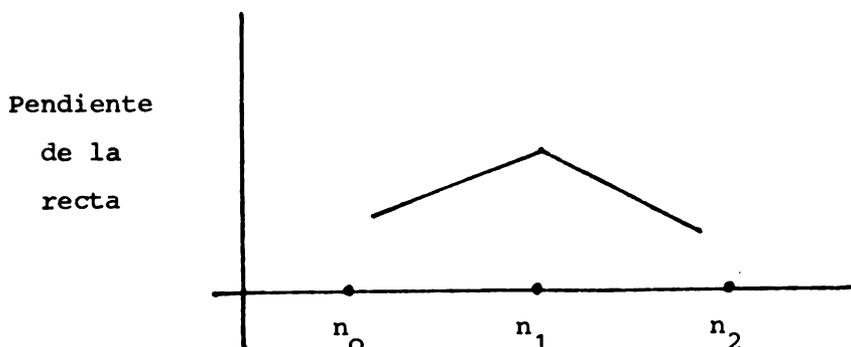
Trata:	$d_0 n_0$	$f_0 n_1$	$d_0 n_2$	$d_1 n_0$	$d_1 n_1$	$d_1 n_2$	$d_2 n_0$	$d_2 n_1$	$d_2 n_2$
	1	2	4	1.5	3	4.5	2	4	5

La gráfica para estos es:



Si se obtienen las sumas de cuadrados para las interacciones encontramos que la única diferente de cero es DL NC.

Observe que la interacción DL NC está definida por el efecto cuadrático de N en d_0 . Y el efecto cuadrático de N en d_2 . Si los efectos cuadráticos son iguales no hay interacción, si difieren significativamente, si hay. Otra forma de ver esta interacción es que las pendientes de las tres rectas siguen una tendencia cuadrática, la gráfica de las pendientes en los niveles de nitrógeno es de la siguiente forma:

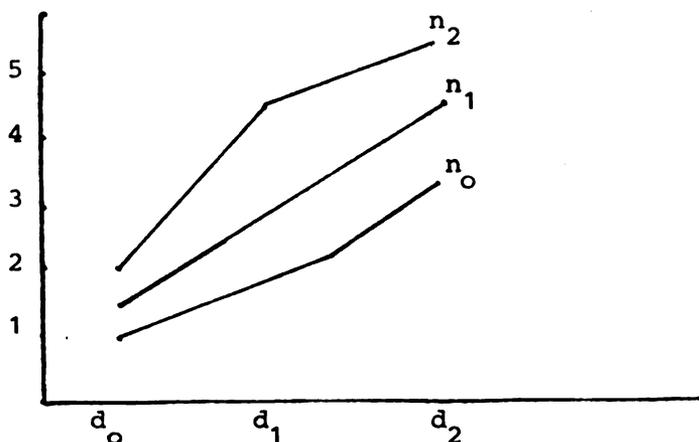


En la gráfica del ejemplo que estamos estudiando se ve claro que el efecto cuadrático de N en d_0 es diferente al efecto cuadrático de N en d_2 .

Para considerar la interpretación de una interacción DC NL supongamos un experimento en donde se tienen los siguientes resultados:

Tratamiento	$d_0 n_0$	$d_0 n_1$	$d_0 n_2$	$d_1 n_0$	$d_1 n_1$	$d_1 n_2$	$d_2 n_0$	$d_2 n_1$	$d_2 n_2$
	1	1.5	2	2	3	4	4	4.5	5

La gráfica para estos datos es:



Si se obtienen las sumas de cuadrados para interacciones encontramos que la única diferente de cero es DC NL.

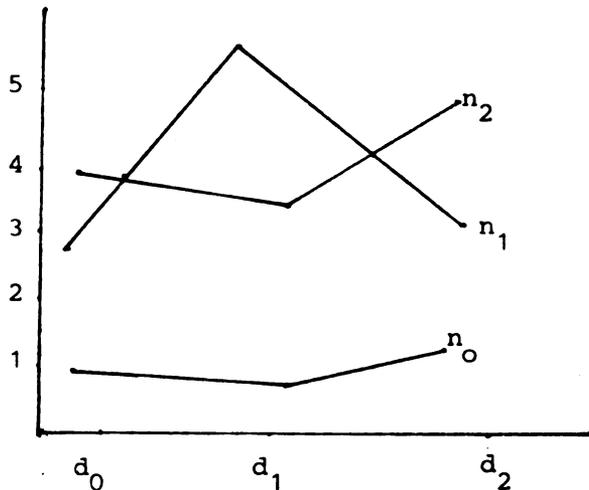
Observe que la interacción DC NL está definida por el efecto cuadrático de la densidad en n_0 y en n_2 .

Si los efectos cuadráticos son iguales no hay interacción, si difieren significativamente, si hay.

Para el caso de la interacción DC NC consideramos un experimento donde se tienen los siguientes datos:

Trata:	$d_0 n_0$	$d_0 n_1$	$d_0 n_2$	$d_1 n_0$	$d_1 n_1$	$d_1 n_2$	$d_2 n_0$	$d_2 n_1$	$d_2 n_2$
media:	1	2	4	1	5	4	2	3	5

La gráfica para estos datos es:



Si se obtienen las sumas de cuadrados para las interacciones encontramos que la única diferente de cero es DC NC.

Observa que la interacción DC NC está definida porque el efecto cuadrático de N en d_1 es diferente a los efectos de N en d_0 y d_2 .

Método formal para definir efectos e interacciones

En los factoriales 2^n se definieron los efectos mediante la comparación de dos totales. Por ejemplo para la interacción de dos factoriales los totales son: $(AB)_0$ y $(AB)_1$, donde $(AB)_0$ es el total de todos los tratamientos aibj para los cuales $i + j = 0$ módulo 2.

Extendiendo estas ideas a los factoriales 3^n , se puede ver que el efecto principal de un factor A está reflejada en la variabilidad de tres totales: $(A)_0$, $(A)_1$ y $(A)_2$, donde $(A)_0$ es el total de las observaciones que tienen el nivel 0 del factor A. Así, para obtener la suma de cuadrados debido al factor A, se procede de la siguiente forma:

$$SC(A) = \frac{(A)_0 + (A)_1 + (A)_2}{3^{n-1} r} - \frac{T^2}{3^n r}$$

donde T es el total de todas las observaciones y r es el número de repeticiones.

Dado que son tres totales los que intervienen en la suma de cuadrados, esta se estima con dos grados de libertad.

Para la suma de cuadrados de la interacción de un factorial 3^2 se tienen cuatro grados de libertad, como se vió anteriormente. Además esta suma de cuadrados se puede descomponer mediante cuatro contrastes: lineal x lineal, lineal x cuadrático, cuadrático x lineal, cuadrático x cuadrático. Sin embargo si los factores son cualitativos o uno de ellos lo es, esta interpretación no tiene sentido.

Una descomposición más general de la interacción se puede realizar mediante la notación que estamos usando de los totales de tratamientos. En un factorial 3^2 la suma de cuadrados de la interacción se puede descomponer en dos partes, cada una con dos grados de libertad. El cálculo de estas sumas de cuadrados es de la siguiente forma:

Para obtener la primera parte de la suma de cuadrados de la interacción se forman tres totales: $(A^1 B^1)_0$, $(A^1 B^1)_1$ y $(A^1 B^1)_2$, donde $(A^1 B^1)_0$ es el total de los tratamientos aibj para los cuales $i + j = 0$ modulo 3.

La suma de cuadrados es:

$$SC(A^1 B^1) = \frac{(A^1 B^1)_0^2 + (A^1 B^1)_1^2 + (A^1 B^1)_2^2}{3r} - \frac{T^2}{3^2 r}$$

Para obtener la segunda parte de la suma de cuadrados de la interacción se forman tres totales $(A^1 B^2)_0$, $(A^1 B^2)_1$, $(A^1 B^2)_2$, donde $(A^1 B^2)_0$ es el total de los tratamientos aibj para los cuales $i2j = 0$ modulo 3.

La suma de cuadrados es:

$$SC(A^1 B^2) = \frac{(A^1 B^2)_0^2 + (A^1 B^2)_1^2 + (A^1 B^2)_2^2}{3r} - \frac{T^2}{3^2 r}$$

Para ilustrar estas ideas consideremos el ejemplo del factorial 3^2 que se estudió anteriormente.

La suma de cuadrados para el efecto principal de densidad se obtiene de la siguiente manera:

Los totales son:

$$(D)_o = T_{dono} + T_{don1} + T_{don2} = 44 + 63 + 51 = 158$$

$$(D)_1 = T_{d1no} + T_{d1n1} + T_{d1n2} = 59 + 88 + 81 = 228$$

$$(D)_2 = T_{d2no} + T_{d2n1} + T_{d2n2} = 41 + 52 + 56 = 149$$

La suma de cuadrados es:

$$SC(D) = \frac{(D)_o^2 + (D)_1^2 + (D)_2^2}{3r} - \frac{T^2}{3^2 r}$$

$$= \frac{(158)^2 + (228)^2 + (149)^2}{(3) \quad (4)} - \frac{(535)^2}{36} = 311.72222$$

Para la suma de cuadrados de nitrógeno: los totales son:

$$(N)_o = T_{dono} + T_{d1no} + T_{d2no} = 44 + 59 + 41 = 144$$

$$(N)_1 = T_{don1} + T_{d1n1} + T_{d2n1} = 63 + 88 + 52 = 203$$

$$(N)_2 = T_{don2} + T_{d1n2} + T_{d2n2} = 51 + 81 + 56 = 188$$

La suma de cuadrados es:

$$SC(N) = \frac{(N)_o^2 + (N)_1^2 + (N)_2^2}{3r} - \frac{T^2}{3^2 r} =$$

$$= \frac{(144)^2 + (203)^2 + (188)^2}{(3) \quad (4)} - \frac{(535)^2}{36} = 156.72222$$

La suma de cuadrados para la primera parte de la interacción es:

Los totales son:

$$(D^1 N^1)_o = T_{dono} + T_{d1n2} + T_{d2n1} = 44 + 81 + 52 = 177$$

$$(D^1 N^1)_1 = T_{d1no} + T_{don1} + T_{d2n2} = 59 + 63 + 56 = 178$$

$$(D N)_2 = T_{don2} + T_{d2no} + T_{d1n1} = 51 + 41 + 88 = 180$$

Observe que el total $(D^1 N^1)_o$ está formado por la suma de los totales de tratamientos d_{inj} tales que $it_j = o$.

La suma de cuadrados es:

$$SC (D^1 N^1) = \frac{(D^1 N^1)_0^2 + (D^1 N^1)_1^2 + (D^1 N^1)_2^2}{3r} - \frac{T^2}{3^2 r} =$$

$$= \frac{(177)^2 + (178)^2 + (180)^2}{(3) \quad (4) \quad 36} - \frac{(535)^2}{36} = 0.3888888$$

La suma de cuadrados para la segunda parte de la interacción es:

Los totales son:

$$(D^1 N^2)_0 = T_{dono} + T_{d1n1} + T_{d2n2} = 44 + 88 + 56 = 188$$

$$(D^1 N^2)_1 = T_{don2} + T_{d1no} + T_{d2n1} = 51 + 59 + 52 = 162$$

$$(D^1 N^2)_2 = T_{don1} + T_{d1n2} + T_{d2no} = 63 + 81 + 41 = 185$$

La suma de cuadrados es:

$$SC (D^1 N^2) = \frac{(D^1 N^2)_0^2 + (D^1 N^2)_1^2 + (D^1 N^2)_2^2}{3r} - \frac{T^2}{3^2 r} =$$

$$= \frac{(188)^2 + (162)^2 + (185)^2}{(3) \quad (4) \quad 36} - \frac{(535)^2}{36} = 33.7222222$$

Observe que el total $(D^1 N^2)_0$, está formado por la suma de los totales de tratamiento d_{inj} , tales que $\sum_j t_{2j} = 0$.

Debido a que la descomposición de la suma de cuadrados de la interacción se hace en dos partes ortogonales, cada una con dos grados de libertad, entonces debe de cumplirse la siguiente igualdad:

$$SC (DN) = SC (D^1 N^1) + SC (D^1 N^2)$$

$$34.111111 = 0.388888 + 33.722222$$

Observe que las sumas de cuadrados obtenidas mediante este método son iguales a los obtenidos mediante las reglas para sumas de cuadrados y grados de libertad.

El objetivo de descomponer la suma de cuadrados de la interacción en dos partes es para poder utilizar la técnica de confusión en los factoriales 3^n . Sin embargo, las pruebas sobre las interacciones con dos grados de libertad no tienen sentido práctico.

$$SC (DL NL) + SC (DL NC) + SC (DC NL) + SC (DC NC) =$$

$$= 4 + 12 + 10.0833383 + 8.0277777 = 34.111111 = SC (DN)$$

Con estos resultados, la tabla de análisis de varianza es:

FV	GL	SC	CM	FC	F tabulada	
					0.05	0.01
Bloques	3	25.63888889	8.546296297	20.285 **	3.01	4.72
DL	1	3.3750000	3.3750000	8.011 **	4.26	7.82
DC	1	308.3472222	308.3472222	731.901 **	4.26	7.82
NL	1	80.6666666	80.6666666	191.472 **	4.26	7.82
NC	1	76.0555555	76.0555555	180.527 **	4.26	7.82
DLNL	1	4.0000000	4.0000000	9.494 **	4.26	7.82
DLNC	1	12.0000000	12.0000000	28.483 **	4.26	7.82
DCNL	1	10.0833333	10.0833333	23.483 **	4.26	7.82
DCNC	1	8.0277777	8.0277777	19.055 **	4.26	7.82
Error	24	10.11111091	0.4212962879			

** Diferencia altamente significativa.

La interpretación de los términos de interacción es sobre la forma de cambio de los niveles de un factor al cambiar los niveles del otro.

$$SC (NC) = 76.0555555$$

$$SC (NL) + (SC (NC) = 80.6666666 + 76.0555555 = 156.722222 = SC (N)$$

$$SC (DLNL) = SC (C_5) = \frac{C_5^2}{r \sum_{j=1}^3 C_{5j}^2}$$

$$= \left[\frac{T_{00} - T_{02} - T_{20} + T_{22}}{(4) (4)} \right]^2 =$$

$$= \left[\frac{44 - 51 - 41 + 56}{16} \right]^2 = 4$$

$$SC (DL NC) = SC (C_6) = \frac{C_6^2}{r \sum_{j=1}^t C_6^2}$$

$$= \frac{[-T_{00} + 2 T_{01} - T_{02} + T_{20} - 2 T_{21} + T_{22}]^2}{(4) \quad (12)} =$$

$$= \frac{[-44 + 2(63) - 51 + 41 - 2(52) + 56]^2}{48} = 12$$

$$SC (DC NL) = SC (C^7) = \frac{C_7^2}{r \sum_{j=1}^t C_{7j}^2} =$$

$$= \frac{[-T_{00} + T_{02} + 2T_{10} - 2 T_{12} - T_{20} + T_{22}]^2}{(4) \quad (12)} =$$

$$= \frac{[-44 + 51 + 2(54) - 2(81) - 41 + 56]^2}{48} = 10.08333333$$

$$SC (DC NC) = SC (C_8) = \frac{C_8^2}{r \sum_{j=1}^t C_{8j}^2} =$$

$$= \frac{[T_{00} - 2T_{01} + T_{02} - 2T_{10} + 4T_{11} - 2T_{12} + T_{20} - 2T_{21} + T_{22}]^2}{(4) \quad (36)} =$$

$$= \frac{[44 - 2(63) + 51 - 2(59) + 4(88) - 2(81) + 41 - 2(52) + 56]^2}{(4) \quad (36)} =$$

$$= 8.027777778$$

Estas notas son parte del curso de Diseños Experimentales que imparte el M.C. Marco V. Gómez en el Colegio de Graduados de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León. México.