

# MODELO SIMPLIFICADO PARA ESTIMAR LOS REQUERIMIENTOS DE NITROGENO EN ARROZ.

## I. MODELO TEORICO<sup>1</sup>

### SIMPLE MODEL TO ESTIMATE THE N REQUIREMENTS OF FLOODED RICE. I. THEORETICAL MODEL

CARLOS ROJAS W. y JOSE RODRIGUEZ S.

*Departamento de Suelos, Facultad de Agronomía Pontificia Universidad Católica de Chile*

#### SUMMARY

*A simple model (RICEN) to estimate the N requirements of flooded rice was developed.*

*The main components of the model are:*

- 1. The estimations of maximum dry matter production.*
- 2. The nitrogen demand estimation based on the potential maximum dry matter production.*
- 3. The estimate of the amount of nitrogen supplied by the soil.*
- 4. The balance of demand and supply of nitrogen to predict the nitrogen stress and the required amount of nitrogen to overcome the stress.*

*The mayor simplifying assumptions of the present model are that water, pests and plant diseases and no other mineral nutrients by nitrogen, limit flooded rice yields. Other assumptions are a constant grain: biomass ratio, a constant nitrogen composition and a constant nitrogen uptake efficiency.*

#### INTRODUCCION

El estudio de los factores de producción, se ha centrado en una metodología experimental basada en el efecto sobre la producción de uno o más factores en niveles variables, manteniendo los demás constantes. Esta metodología, ha aportado información útil sólo para condiciones específicas de ambiente ecológico, pero no ha sido posible generalizar la información en el amplio espectro de otras condiciones de suelo, planta y clima.

Una alternativa es el uso del análisis multifactorial que considera, en forma conjunta, un gran número de factores relacionados con la producción de los cultivos. Sin embargo, el análisis de la información obtenida es complejo y se requiere establecer un gran número de ensayos de campo durante varias temporadas. Frecuentemente, los modelos estadísticos empleados (Voss y Pesek, 1967; Heady y Dillon, 1961) han sido aproximaciones de funciones matemáticas y las más ampliamente utilizadas han sido

<sup>1</sup>Publicación aprobada por el Comité Editor de la Facultad de Agronomía de la Universidad Católica de Chile, con el N° 20. Fecha de recepción 8/agosto/79.

los polinomios de segundo grado. En Chile se han establecido funciones de producción para el trigo que consideran distintos factores del manejo del cultivo, del suelo y del clima (Volke, H., 1975; FAO, 1973).

Por otra parte, el conocimiento de los procesos biológicos y la naturaleza de los factores físicos determinantes del crecimiento vegetal, ha permitido la simulación del comportamiento del sistema a través de modelos que describen estos procesos.

Como ejemplo de tales modelos de crecimiento, se pueden citar, entre otros, el SIMCOT (Mc Kinion *et al.*, 1974) que es un modelo de balance de carbohidratos y nitrógeno para algodón, el de Sinclair y de Wit, 1976, que simula la absorción de nitrógeno y el crecimiento de la soya, el modelo de crecimiento basado en parámetros agrofísicos desarrollados por Norero (1976).

Una alternativa intermedia entre los modelos analizados, la constituyen los "modelos simplificados", que utilizan algunas relaciones empíricas generales, expresadas en forma matemática. Estas relaciones se han establecido a partir de datos experimentales o análisis simplificados de algunos procesos relevantes. El objetivo de estos modelos es fundamentalmente utilitario; no pretenden describir procesos, sino dar respuestas agronómicas simples y generales, mediante la simplificación de los procesos y la manipulación de los factores más importantes de la producción. La ventaja de estos modelos es que, requieren un volumen pequeño de información experimental, ya que consideran sólo los factores más relevantes de la producción. De esta forma, resultan prácticos de aplicar en condiciones particulares de desarrollo de los cultivos.

Como ejemplo de estos modelos, se podría citar, entre otros, el desarrollado por Frere *et al.* (1970) para predecir la absorción de nitrógeno y el crecimiento en el sistema suelo-planta y el de Kafkafi

*et al.* (1977), destinado a estimar los requerimientos de fertilizantes nitrogenados. En Australia, el régimen hídrico tiende a ser dominante en el desarrollo de las plantas, por lo que se han desarrollado modelos simplificados (Fitzpatrick y Nix, 1970) que permitan efectuar rápidas evaluaciones del sistema productivo en cualquier localidad, empleando un mínimo de datos climáticos, del suelo y del cultivo.

En Chile, el arroz inundado se desarrolla en condiciones muy especiales de aislamiento geográfico, que le permite crecer libre de plagas y enfermedades y sin problemas nutricionales a excepción del nitrógeno (Araos y Rojas, 1976). Así, es posible prever que los rendimientos fluctuarán, principalmente, debido a las condiciones de manejo que afectan el suministro de este nutriente y de la variación de los parámetros climáticos.

En función de esta hipótesis, el objetivo de este trabajo, es desarrollar un modelo simplificado para estimar los requerimientos de nitrógeno del arroz.

## FUNDAMENTOS DEL MODELO

### 2.1 Demanda de nitrógeno

Se define como la cantidad de nitrógeno requerida por los tejidos del cultivo para alcanzar su producción máxima.

La demanda de nitrógeno del cultivo depende de su índice de área foliar, de la condición de radiación que determina el potencial de asimilación de CO<sub>2</sub> atmosférico y de su composición química (Sinclair y de Witt, 1976). El acopio de fotosintatos se manifiesta en el crecimiento de la planta, aumentando también la absorción de nitrógeno y la síntesis de compuestos nitrogenados estructurales y solubles (Tanaka *et al.*, 1964). Así, el nitrógeno absorbido por las plantas es el necesario para suplir los requerimientos de protidos de un determinado crecimiento.

Stanford (1973), en maíz, ha obser-

vado que los porcentajes de nitrógeno en la materia seca (grano más paja) para la producción máxima se mantienen constantes, sin afectarse por la variedad, localidad o las condiciones climáticas. Esta misma observación ha sido realizada en otros cultivos, tales como arroz (Sánchez *et al.*, 1973) y trigo (Prado y Rodríguez, 1978). Así, la constancia del porcentaje de nitrógeno en el cultivo cercano a la producción máxima, permite una estimación de los requerimientos internos del nutriente o demanda para una determinada producción máxima.

Expresando estos conceptos matemáticamente, tenemos que:

$$P_x [N] = N_{yx} \quad (1)$$

siendo

$P_x$  = producción máxima  
 $N$  = concentración de nitrógeno, y  
 $N_{yx}$  = demanda máxima de nitrógeno.

Así, el producto de la concentración de nitrógeno (expresada en porcentaje) para la respectiva producción máxima, se considera equivalente a la demanda máxima de nitrógeno. La validez de tal estimación depende, entonces, del grado de aproximación en la estimación de la producción máxima.

Un camino racional para llegar a estimar la producción máxima es por medio del conocimiento de la evapotranspiración de los cultivos, que generalmente se relaciona con la producción máxima a través de una función matemática lineal.

Si se asume que no hay otras limitaciones para un óptimo desarrollo del área fotosintética activa de la planta, la tasa de crecimiento estará condicionada por las fluctuaciones de los parámetros meteorológicos.

Al respecto, numerosos investigadores (Arckley, 1964; de Wit, 1958; Stanhill, 1968) han estimado la productividad de los cultivos a través de su relación con la evapotranspiración, mediante el empleo de una función matemática lineal como:

$$P_x = b T_x \quad (2)$$

siendo:

$P_x$  = producción máxima  
 $b$  = coeficiente de producción  
 $T_x$  = transpiración o evapotranspiración.

Por otra parte, la evapotranspiración de los cultivos puede ser estimada mediante parámetros indicadores de la demanda energética (Pruitt, 1966). Sin embargo, la mejor estimación de la evapotranspiración de los cultivos es a partir de la evaporación experimentada por una superficie libre de agua o evaporación de bandeja (Pruitt, 1966) mediante una función lineal como:

$$T_x = a E_o \quad (3)$$

donde:

$T_x$  = evapotranspiración  
 $E_o$  = evaporación de bandeja  
 $a$  = coeficiente de evapotranspiración.

En cultivos como el arroz, numerosos trabajos han informado de una estrecha asociación entre las condiciones de demanda evaporativa en las etapas críticas de reproducción y madurez con los rendimientos del cultivo. Al respecto, en el Instituto Internacional del Arroz (Moamaw *et al.*, 1967) se ha demostrado una alta correlación entre los rendimientos de grano y la radiación solar durante el período de madurez. De Datta y Zárate (1970), han encontrado la misma asociación durante el período comprendido entre 15 a 45 días antes de la floración hasta la cosecha. Por otra parte, Tanaka *et al.* (1966) demostró una estrecha asociación entre los rendimientos de grano y el incremento en peso después de la floración. Todos estos antecedentes parecen indicar que la madurez es la etapa más crítica que decide la producción de grano del cultivo, ya que la mayor proporción de carbohidratos en arroz proviene de la corriente fotosintética durante el período de madurez. La tasa de radiación solar en este período es determinante en la estimulación de la actividad fotosintética (Yoshida, 1972).

Esta simplificación de la compleja dependencia de los rendimientos con parámetros climáticos, cuyo efecto se integra en la evapotranspiración y la posibilidad de predicción, ha sido justificada por la dominancia de este factor sobre todos los demás (Shalhevet y Bielori, 1978).

Si analizamos la situación del cultivo del arroz en Chile, libre de plagas y enfermedades y en condiciones de inundación permanente, podemos asumir que si no existen otras limitaciones que afecten el área fotosintética activa de las plantas, la tasa de crecimiento está condicionada por las fluctuaciones de los parámetros meteorológicos y el suministro de nitrógeno. Al respecto, Alvarado y Rojas (1976), han empleado una función lineal empírica, originada de la relación entre valores de rendimientos máximos experimentales sin restricciones de suministro de nitrógeno con la evapotranspiración del periodo de inicio de panoja a madurez, la cual es estimada a partir de la sumatoria de evaporación de bandeja del mismo periodo. Dichos autores, han obtenido un buen ajuste ( $r=0,91$ ) entre estos parámetros, lo que les ha permitido obtener una estimación satisfactoria de la producción máxima.

La satisfacción de la demanda de nitrógeno debe realizarse a partir de las fuentes naturales del suelo y complementada con el aporte de fertilizantes.

## 2.2 Suministro de N

Se define como la suma de los aportes de nitrógeno, provenientes de las fuentes naturales del suelo y de los fertilizantes.

La fracción activa de nitrógeno suministrada por el suelo corresponde al nitrógeno mineral residual que permanece en el suelo después del último cultivo y/o que se mineraliza durante el periodo de cosecha a siembra y el nitrógeno mineralizado de la fracción orgánica del suelo durante el periodo de cultivo.

$$N_s = N_r + N_m \quad (1)$$

siendo:

$N_s$  = nitrógeno del suelo  
 $N_r$  = nitrógeno residual, y  
 $N_m$  = nitrógeno mineralizado.

Numerosos investigadores indican que el nitrógeno residual presente en el suelo al momento de la siembra, es un índice del suministro disponible para el cultivo (Fitts *et al.*, 1953; Stanford y Hanway, 1955).

Sin embargo, es necesario considerar, además del nitrógeno residual, aquel suministrado por la materia orgánica en el periodo de cultivo. De acuerdo a Stanford y Smith (1972), la tasa de mineralización de nitrógeno en el ciclo de cultivo, es proporcional al nitrógeno potencialmente mineralizable y a la intensidad de mineralización de acuerdo a la expresión:

$$-\frac{dN}{dt} = K \times N_o \quad (2)$$

donde:

$N_o$  = nitrógeno potencialmente mineralizable, y  
 $K$  = factor de intensidad de mineralización.

El nitrógeno potencialmente mineralizable puede ser estimado a partir de incubaciones a diferentes intervalos de tiempo, considerando la mineralización acumulativa (Stanford, 1972) en el tiempo en una expresión lineal que representa una cinética de 2º orden:

$$\frac{1}{N_t} = \frac{1}{N_o} + K \left( \frac{1}{t} \right) \quad (3)$$

donde  $N_t$  = nitrógeno mineralizado en el tiempo  $t$ .

El factor  $K$ , o constante de intensidad de mineralización, depende fundamentalmente de la temperatura (Mitsui, 1960). La influencia de la temperatura sobre la cinética de la amonificación en suelos inundados, ha sido ampliamente demostrada (Cho y Ponamperuma, 1971). Como en cualquier reacción enzimática

ca, se han obtenido valores  $Q_{10}$  alrededor de 2.

Así, aplicando la ley de Arrhenius, ha sido posible estimar la intensidad de mineralización a partir de la temperatura media del suelo (Stanford *et al.*, 1973) mediante la siguiente función:

$$\log K = 7,71 - 2,578 \left( \frac{1}{T + 273} \right) \quad (4)$$

Esta información provee una base para estimar las cantidades de N mineralizado durante cualquier intervalo de tiempo, conociendo el nitrógeno potencialmente mineralizable y el régimen de temperaturas medias en condiciones de suelo, clima y manejo particular.

En las condiciones de reducción de los suelos cultivados con arroz, el amonio ( $N-NH_4^+$ ) proveniente de la mineralización durante el cultivo y el nitrógeno residual, ocurren in situ en la estrata arable de los suelos y se acumulan en esta forma. Este supuesto puede ser respaldado por numerosos investigadores que han comprobado que la mayor parte de las raíces del arroz se encuentran en los primeros 20 centímetros (Sato, 1937; Kawata *et al.*, 1969) y, por lo tanto, la absorción de nitrógeno se realiza, fundamentalmente, en esta estrata.

Además de las fuentes naturales de nitrógeno ya descritas, conforman el pool total o suministro total, la fracción aportada por los fertilizantes de acuerdo a sus respectivas eficiencias. La eficiencia o porcentaje de recuperación de nitrógeno se refiere a la fracción determinada como la diferencia en absorción de nitrógeno entre las plantas que reciben fertilizantes y las que no reciben, dividido por la dosis aplicada.

Así, expresando matemáticamente estos conceptos, tenemos que:

$$N_s = (N_r + N_m) + bF \quad (5)$$

dónde:

$N_s$  = suministro de nitrógeno

$N_r$  = nitrógeno residual

$N_m$  = nitrógeno mineralizado

$b$  = factor de eficiencia

$F$  = dosis de fertilizante aplicado.

La eficiencia del nitrógeno aplicado como fertilizante en arroz inundado, es generalmente más baja que en otros cultivos (IAEA, 1966), debido a las pérdidas de N, principalmente por desnitrificación. Al respecto, se han informado valores de eficiencia promedio de fertilizantes amoniacales aplicados al cultivo del arroz inundado, del orden de 40 a 50% (Westfall, 1969; Yamane, 1957), de 20 a 30% en condiciones alternadas de oxidación y reducción (Sánchez y Calderón, 1971; Ramírez y Sánchez, 1971a) y 15-38% para numerosos experimentos en arroz (Van Keulen, 1971).

En Chile, los valores de eficiencia obtenidos son del orden de un 45% en inundación permanente (Rojas, 1976) y de un 25% cuando se ha producido, al menos, una "seca" (sequía) del cultivo, lo que ha sido explicado por las pérdidas de nitrógeno causado por la alternancia de las condiciones de oxidación y reducción (Patrick *et al.*, 1967).

Para completar el análisis, se establece la hipótesis de que la relación entre demanda y suministro de nitrógeno, debe afectar proporcionalmente el crecimiento, o sea que constituye un índice de stress de N.

### 2.3 Stress de nitrógeno

El stress de nitrógeno es una estimación cuantitativa de la intensidad de la deficiencia de un cultivo. Puede ser definido como la proporción en que el crecimiento se restringe en relación con la máxima tasa de crecimiento alcanzada por un cultivo sin restricciones de suministro de N. Greenwood *et al.* (1976), lo han definido como un índice porcentual de reducción de crecimiento.

El índice de stress de Greenwood guarda cierta similitud con el contenido relativo de agua, para el cual el peso de una hoja deficiente se compara con una cuyo peso se

considera estándar y sin limitaciones de humedad.

Si asumimos que debe existir un flujo permanente de nitrógeno al cultivo para cubrir las condiciones de demanda en forma análoga al flujo de agua de acuerdo a las necesidades evapotranspirativas de la planta, entonces el nivel óptimo de nitrógeno en los tejidos debe ser conocido, así como la cantidad de nutriente que puede ser suministrado.

La proporción relativa del suministro respecto a un requerimiento o demanda máxima, equivalente a la capacidad de acopio de los tejidos de la planta, generarán el factor de stress a partir de ambos parámetros, como:

$$\frac{\text{Suministro}}{\text{Demanda máxima}} = \frac{N_s}{N_{yx}} \quad (1)$$

Así, la proporción relativa de crecimiento será por definición, proporcional a este "factor de stress" e indicará la proporción en que el crecimiento (P) se restringe respecto al máximo sin limitaciones (P<sub>x</sub>).

$$\frac{P}{P_x} = f\left(\frac{N_s}{N_{yx}}\right) \quad (2)$$

Esta relación biológica entre la producción relativa y el factor de stress, se puede observar en la Figura 1.

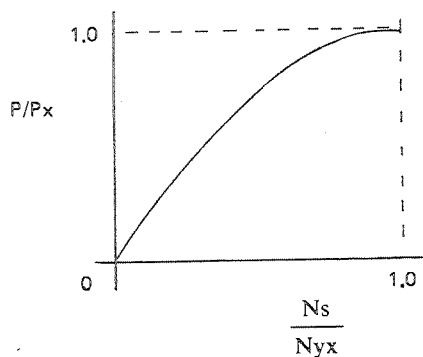


FIGURA 1  
RELACION ENTRE LA PRODUCCION  
RELATIVA Y EL FACTOR DE STRESS  
*Relationship between relative production and  
stress factor*

Podemos suponer, entonces, que biológicamente existe un incremento proporcional de los rendimientos al aproximarse al factor de stress de N a un valor igual a la unidad pero que, al llegar al máximo, esta relación comienza a disminuir también proporcionalmente, originando valores inferiores al máximo, de acuerdo a la ley de rendimientos decrecientes, moviéndose en una curva similar a una parábola. Este tipo de relación que aparece en la Figura 1, ha sido también descrita por otros investigadores (Heady y Dillon, 1961; Munson y Dolle, 1959).

La expresión matemática de esta relación corresponde a un polinomio de segundo grado, característico de la ley de rendimientos decrecientes de la forma:

$$\frac{P}{P_x} = b \left( \frac{N_s}{N_{yx}} \right) - c \left( \frac{N_s}{N_{yx}} \right)^2 \quad (3)$$

La derivación simultánea respecto a la producción máxima y demanda máxima, permite obtener el rendimiento máximo.

$$\frac{d\left(\frac{P}{P_x}\right)}{d\left(\frac{N_s}{N_{yx}}\right)} = b - 2c \left(\frac{N_s}{N_{yx}}\right) \quad (4)$$

Como se puede apreciar si el factor de stress es igual a la unidad, no hay restricción de crecimiento y éste corresponde a la producción máxima.

Pero, como en el punto máximo el factor de stress es igual a la unidad, esto nos permite establecer la relación existente entre las constantes y normalizar la función:

$$P = P_x \left[ 2 \left( \frac{N_s}{N_{yx}} \right) - \left( \frac{N_s}{N_{yx}} \right)^2 \right] \quad (5)$$

La ventaja de la normalización, es que permite deducir los valores de las constantes y aislar así la incógnita que corresponde a la producción con stress. Este tipo de funciones normalizadas ha sido utilizado por Norero (1976) para evaluar

la producción relativa respecto al déficit hídrico.

Así, entonces, la relación matemática entre el índice de stress y la desconocida producción relativa respecto a, una referida producción máxima, permite la predicción de esta producción con stress.

#### 2.4 Déficit de nitrógeno y necesidades de fertilizantes

El balance entre el nitrógeno requerido para satisfacer la totalidad de las necesidades fisiológicas de la planta (requerimientos internos de nitrógeno) y aquel suministrado por el suelo y el fertilizante, constituyen el déficit de nitrógeno ( $\Delta N$ ):

$$\Delta N = N_y - (N_r + N_m + bF) \quad (1)$$

Así, la diferencia entre la demanda de nitrógeno para cualquier producción del cultivo ( $N_y$ ) y el suministro de N ( $N_s$ ) permite estimar las necesidades de fertilizantes para corregir el déficit (Prado y Rodríguez, 1978).

$$N_f = N_y - N_s \quad (2)$$

### MODELO

Para predecir los requerimientos de nitrógeno del arroz, se desarrolló un modelo simplificado en lenguaje XFORTRAN en un computador Borrough 3500.

En la Figura 2, se pueden observar los principales componentes estructurales del modelo propuesto.

Como se puede apreciar, se inicia el modelo estimándose la producción máxima a partir del índice de evapotranspiración (ecuación N° 2). Luego, la producción máxima es fraccionada en paja, grano y raíces (de acuerdo a los coeficientes de reparto).

Conociendo los valores de concentración de nitrógeno para las producciones máximas de los tejidos respectivos, se calculan los requerimientos de nitrógeno, que en su conjunto conforman la demanda.

Por otra parte, el suministro de nitrógeno del suelo es integrado a partir del nitrógeno residual y de aquel proveniente de la mineralización del nitrógeno orgánico en el ciclo del cultivo.

El cociente entre la demanda de nitrógeno (sink) y el suministro (fuente), generan el factor del stress que regula proporcionalmente la producción de materia seca. La diferencia entre la demanda de nitrógeno y el suministro dan origen al déficit de nitrógeno en el suelo.

Conociendo los valores de déficit de nitrógeno y la eficiencia o grado de recuperación por el cultivo, es posible formular las dosis de fertilizantes necesarias para corregir las deficiencias. La sucesión de etapas a desarrollar en el modelo se presentan a continuación.

#### 3.1 Demanda de N

Para calcular la demanda máxima de nitrógeno, se inicia el modelo estimando la producción máxima (PX), conociendo aproximadamente el valor de evapotranspiración máxima (ET) entre el período de inicio de la aparición de la panoja a madurez (más o menos 60 días).

Al respecto, la producción máxima de arroz ha sido estimada en base a la medición de la evaporación de bandeja acumulada entre el período de aparición de la panoja a madurez, de acuerdo con la función lineal de Alvarado y Rojas (1976).

La evapotranspiración del cultivo (ET), se obtiene a través de la información de bandeja corregida por un factor de bandeja de evaporación (KB). Según Pruitt (1966), para las condiciones de latitud, humedad y temperatura atmosféricas que prevalecen en condiciones similares a la de la región Centro Sur de Chile, el valor es 0,8.

Por otra parte, la información de bandeja debe ser corregida por un factor KC del cultivo (Decker, 1967).

El coeficiente empleado en este modelo es 0,95 (Tosso, 1976) y corresponde al promedio de los períodos del ciclo de cul-

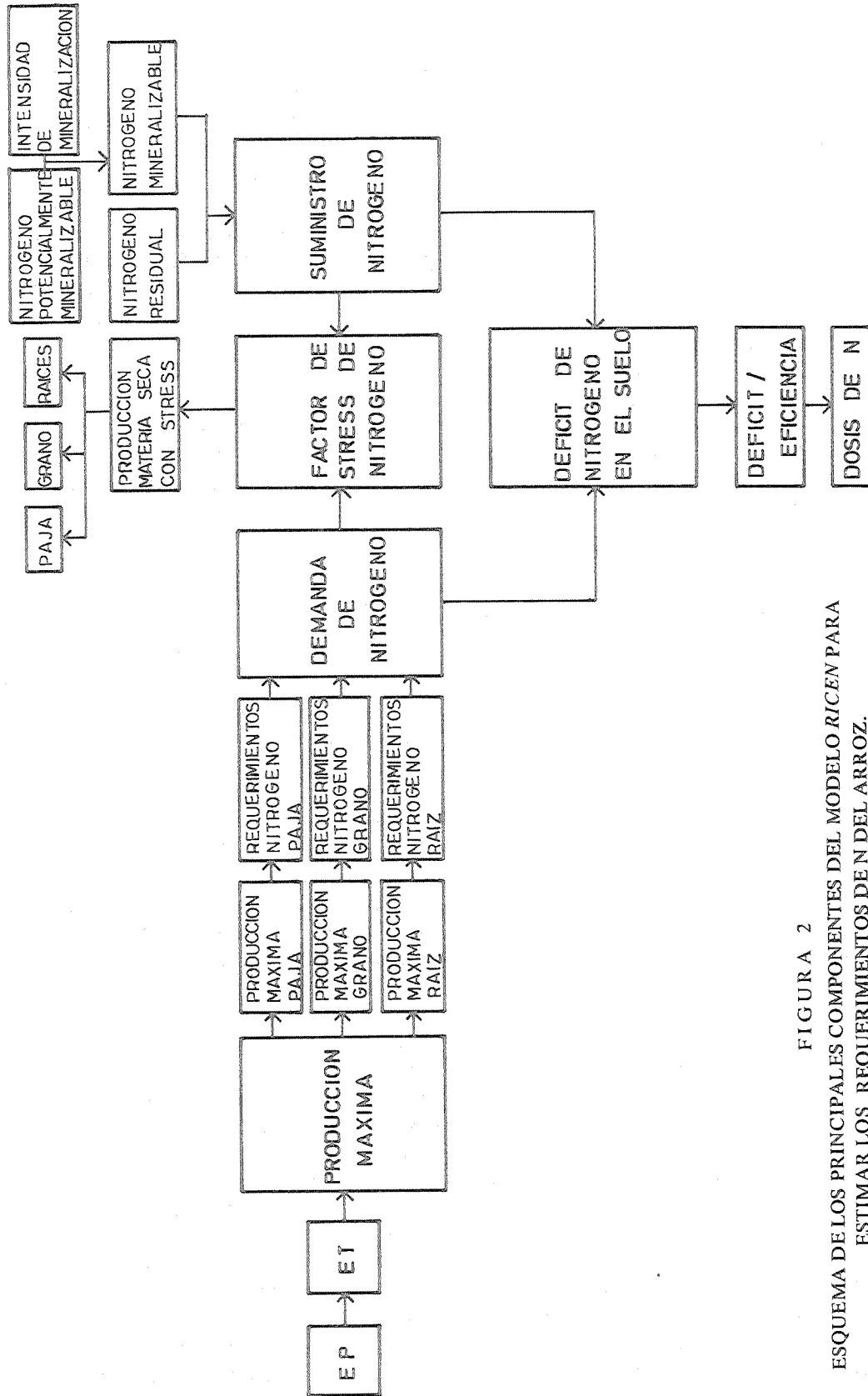


FIGURA 2

ESQUEMA DE LOS PRINCIPALES COMPONENTES DEL MODELO RICE PARA ESTIMAR LOS REQUERIMIENTOS DE N DEL ARROZ.

Schema of the principal components of the RICE model to estimate the N requirements of rice.



tivo considerados en este estudio. Este índice depende de las características de cobertura de acuerdo al desarrollo fenológico. Así, la producción máxima, referida a la materia seca de la parte aérea (PX), cuando no hay restricciones en el suministro de nitrógeno (Alvarado y Rojas, 1976), se estima aquí como:

$$ET = EB \times 0,8 \times 0,95 \quad (1)$$

entonces,

$$PX = 62,38 + 0,57 ET \quad (2)$$

En Filipinas (Tanaka *et al.*, 1966) y en Estados Unidos (Stanhill, 1960), han obtenido también altas correlaciones entre rendimientos del arroz y la evapotranspiración de los cultivos en períodos críticos de desarrollo. En general, si el índice de área foliar es amplio en presencia de alta radiación, la tasa fotosintética es superior a la respiración y los rendimientos son altos.

La producción máxima estimada, puede a su vez, ser subdividida, conociendo los coeficientes de reparto que permiten fraccionar la biomasa total.

La relación grano/paja a la cosecha, es considerada como un coeficiente de eficiencia, que expresa la cantidad de fotosíntesis empleada en la producción de grano (Yoshida, 1972). Dicho índice es muy estable en algunas nuevas variedades de arroz frente a las variaciones del medio. Aunque en general el incremento de la dosis de nitrógeno reduce la relación grano/paja (Tanaka, 1969), algunas variedades son capaces de mantener altas y satisfactorias relaciones frente a crecientes aplicaciones de nitrógeno (Sánchez *et al.* 1973). En Chile, la variedad Oro ha mantenido un índice de grano ( $INGRA = \frac{\text{grano}}{\text{grano} + \text{paja}}$ ) de 0,44, aun con altas dosis de nitrógeno aplicadas (Rojas y Alvarado, 1976).

Así, mediante este índice, la producción máxima de grano (P × G) puede ser estimada a partir de la biomasa total, como:

$$P \times G = INGRA \times PX \quad (3)$$

Conociendo la producción máxima de grano y la producción total de materia seca (parte aérea), es posible calcular la producción máxima de paja (PXP) por diferencia.

$$P \times P = PX - P \times G \quad (4)$$

Por otra parte, la producción máxima de raíces al momento de cosecha (PXR) puede ser obtenida a partir de la producción máxima conociendo el índice de raíces (INRA) como:

$$P \times R = INRA \times PX \quad (5)$$

Las demandas máximas de nitrógeno de la parte aérea (grano más paja) y de las raíces (NYRA) pueden calcularse a partir de las respectivas producciones máximas y de los requerimientos internos de nitrógeno (% de N) de ambas fracciones de planta (PORNGP y PORNR).

$$NYY = PX = PORNGP \quad (6)$$

$$NYRA = PXR = PORNR \quad (7)$$

Rojas y Alvarado (1976) indican un porcentaje de N de 0,70 en el rendimiento máximo de la parte aérea (paja más grano) de la variedad Oro.

Katsumi Inada (1967) señala un porcentaje de 0,44 para la raíz al momento de la cosecha en una gran gama de variedades de arroz.

Los requerimientos totales de N (NYT) o demanda máxima de la planta se obtienen de la integración de las demandas de las respectivas fracciones (NYX y NYRA).

$$NYT = NYX + NYRA \quad (8)$$

La demanda máxima será parcial o totalmente satisfecha, dependiendo del suministro de nitrógeno.

### 3.2 Suministro de N

El cálculo del suministro de nitrógeno

se inicia estimando la constante de intensidad de mineralización (K) del nitrógeno orgánico del suelo. Para el cálculo de esta constante se utiliza la ecuación propuesta por Stanford *et al.* (1973), basada en la ley de Arrhenius.

En forma exponencial, la función se expresa:

$$\text{EXP} = 7,71 - 2,758 \left( \frac{1}{\text{TEMP. (I)} + 273} \right) \quad (9)$$

La temperatura media del aire se obtiene de las Estaciones Meteorológicas más próximas.

Así, la constante de intensidad de mineralización (K(I)) para cada mes se estimó como:

$$K(I) = 10^{xx} \text{EXP} \quad (10)$$

y un factor K de intensidad de mineralización mensual promedio (KP) para todo el ciclo de cultivo.

La cantidad de nitrógeno mineralizado (NMI) en una estrata de 20 cm de suelo en el ciclo de cultivo (expresado en semanas) (TPO) a partir del nitrógeno potencialmente mineralizable ( $\frac{-dN}{dt} = K \times \text{NO}$ ) se calcula como:

$$\text{NMI} = \text{NO} \times \text{KP} \times \text{TPO} \times 2 \quad (11)$$

El suministro de nitrógeno de las fuentes naturales del suelo (NS) (I), conforman el pool de nitrógeno disponible para un cultivo (FANS) al que no se ha aplicado fertilizantes (Carter *et al.*, 1974; Stanford *et al.*, 1977).

$$\text{Luego: FANS} = \text{NMI} + \text{NR} \quad (12)$$

y la capacidad de suministro del suelo,

$$\text{NS}(1) = \text{FANS} \quad (13)$$

Si hay aplicación de fertilizantes, el pool de nitrógeno natural del suelo se incrementa de acuerdo a la cantidad de fertilizante agregado y a su eficiencia respectiva.

Cualquier suministro, equivalente a la absorción realizada por las plantas, provendrá de este pool general, que se expresa como:

$$\text{NS}(I) = \text{NS}(1) + \text{DOA}(I) \times \text{EFF} \quad (14)$$

Se consideró un factor de eficiencia de 0,45 para cultivos permanentemente inundados y 0,25 si se dan condiciones alternadas de inundación y sequía. Ambos índices corresponden al promedio del rango informado por diversos investigadores (Westfall, 1970; Sánchez y Calderón, 1971; Rojas, C., 1976).

La disminución de la eficiencia en condiciones de drenaje y reinundación, se ha explicado como resultado de la desnitrificación. Los nitratos formados donde el suelo se airea, probablemente se pierden por desnitrificación cuando el suelo es reinundado (Patrick *et al.*, 1967).

La relación entre el suministro, respecto a la demanda máxima de nitrógeno, se asocia con una producción referida a la producción máxima, lo que genera el stress.

### 3.3 Stress de N

Una vez determinada la demanda de nitrógeno y el suministro, es posible calcular cualquier producción de materia seca total (grano + paja) cuando hay restricciones en el suministro (PXS), utilizando una función normalizada que incluye el factor de stress y la producción máxima estimada.

$$\text{PXS}(I) = \text{PX} \times 2 \times \left( \frac{\text{NS}(I)}{\text{Nyx}} \right) - \left( \frac{\text{NS}(I)}{\text{Nyx}} \right)^{**2} \quad (15)$$

De igual manera, puede calcularse cualquier producción de grano en presencia de un suministro restringido (PXG), considerando la producción máxima de grano:

$$PXG(I) = (2 \times (\frac{NS(I)}{Nyx}) - (\frac{NS(I)}{Nyx})^{**2}) \times PXG \quad (16)$$

La producción de paja con stress (PXP), puede ser calculada por diferencia entre la producción total con stress y la respectiva producción de grano.

$$PXP(I) = PXS(I) - PXG(I) \quad (17)$$

Una vez conocida la magnitud del stress y la demanda, se puede conocer el déficit y evaluar las necesidades de fertilizantes nitrogenados.

### 3.4. Déficit de N y necesidades de fertilizantes

El déficit (DEF N(I)) se obtiene por diferencia entre la demanda o requerimientos totales de nitrógeno y un suministro de N, incluyendo la fracción absorbida por las raíces del cultivo estimada experimentalmente en 0,064 (Rojas y Alvarado, 1976).

$$DEF N(I) = (NYT - NS(I) + NS(I) \times 0,064) \quad (18)$$

Finalmente, la dosis de fertilizante a aplicar para corregir un determinado dé-

CUADRO 1  
PARAMETROS Y VARIABLES DEL MODELO  
*Parameters and variables of the model*

Parámetros y variables Parameters and variables	Significado Definition	Valores Values
<i>A) Suelo</i>		
NR	N residual N-(amonio + nitrato)	Análisis químico inicial
NO	N potencialmente mineralizable	Tabla general según caracterización de suelos
<i>B) Planta</i>		
INGRA	Coefficiente de reparto. Relaciona la producción de grano con la biomasa total	0,445 (Rojas y Alvarado, 1976)
INRA	Coefficiente de reparto. Relaciona la producción de raíces con la biomasa total	0,1 (Katsumi Inada, 1967)
PORNGP	Porcentaje de N de (grano + paja) a la cosecha	0,7 (Rojas y Alvarado, 1976)
TPO <sup>en días</sup>	La duración del ciclo de cultivo	150 días (Alvarado y Rojas, 1976)
EFF	Coefficiente de eficiencia del fertilizante	0,44 para inundación permanente y 0,25 para inundación y secado alterado (Rojas, 1976)
PNR	Constante del nitrógeno absorbido por las raíces	0,064 (Katsumi Inada, 1967)
<i>C) Clima</i>		
TEMP	Temperatura mensual promedio del aire	Est. Meteorológica, promedio de 10 años del ciclo
EB	Evaporación de bandeja acumulada (panoja-madurez)	Est. Meteorológica, promedio de 10 años del ciclo
Kb	Factor de bandeja evaporación	0,8 (Pruitt, 1966)
KC	Factor del cultivo	0,95 (Tosso, 1976)

ficit, se obtiene dividiendo éste por la eficiencia (EFF) respectiva.

$$\text{DNA (I)} = \frac{\text{DEFN (I)}}{\text{EFF}} \quad (19)$$

Si la demanda de nitrógeno (NYT) es

menor que el suministro, entonces el déficit es negativo, por lo que la dosis de fertilizante a aplicar es cero.

En el Cuadro 1 se presenta un resumen de los principales parámetros y variables del modelo.

## RESUMEN

Se desarrolló un modelo simplificado (RICEN), que tiene como principal objetivo, estimar los requerimientos de N en el cultivo de arroz inundado.

Los componentes principales del modelo son los siguientes:

1. La producción máxima determinada por los factores meteorológicos.
2. La demanda de nitrógeno generada por la producción máxima.

3. El suministro de nitrógeno del suelo, y
4. La relación entre demanda y suministro de nitrógeno.

El principal supuesto del presente modelo es que el agua, las plagas y enfermedades ni otros nutrientes fuera del nitrógeno limitan los rendimientos del arroz inundado. Además se consideran constantes la relación grano, el porcentaje de nitrógeno de la biomasa y la eficiencia de absorción de nitrógeno.

## LITERATURA CITADA

- ALVARADO, R. y ROJAS, C., 1976. *Relación entre algunos parámetros morfológicos y climáticos en arroz*. INIA, Estación Experimental Quilamapu. (Trabajo no publicado).
- ARAOS, J.F. y ROJAS, C., 1976. *Efecto de la fertilización con nitrógeno, fósforo, potasio y azufre sobre los rendimientos de arroz*. *Agricultura Técnica* 36 (2): 58-62.
- ARCKLEY, J., 1964. *The use of calculated actual and potential evapotranspiration for potential plant growth*. 32 (10): 443-462.
- CARTER, J.N.Y.; JENSEN, M.E. and BOSMA, S.M., 1974. *Determining nitrogen fertilizer needs for sugarbeets from residual soil nitrate and mineralizable nitrogen*. *Agron. J.* 66: 319-323.
- CHO, D.Y. y PONAMPERUMA, E.N., 1971. *Influence of soil temperature on the chemical kinetics of flooded soils and the growth of rice*. *Soil Sci.* 112: 184-194.
- DE DATTA, S.K. y ZÁRATE, P.M., 1970. *Environmental conditions affecting the growth characteristics, nitrogen response, and grain yield of tropical rice*. *Biometeorology* 4: 71-89.
- DECKER, L., 1967. *Potential evapotranspiration in humid and arid climates*. In: *Conference on Evapotranspiration and its role in water resources management*. Chicago, Illinois, December 5-6, 1966. *Proceeding St. Joseph, Michigan, Amer. Soc. of Agr. Engineers*, 1967, pp. 23-26.
- FAO, 1973. *Reconocimiento e investigación de los suelos de Chile*. Productividad y manejo de los suelos chilenos. Informe Técnico, Roma (mimeografiado).
- FITTS, J.W.; BARTHOLOMEW, W.V. y HEIDEL, H., 1953. *Correlation between nitrifiable nitrogen and yield response of corn to nitrogen fertilization on Iowa soils*. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 19: 69-73.

- FITZPATRICK, E.A. y NIX, H.A., 1970. *The climatic factor in Australian grassland ecology*. Pages 3-26 in R.M. Moore, ed. *Australian grasslands* A.N.U. Press, Canberra.
- FRERE, M.H.; JENSEN, M.E. y CARTER, J. N., 1970. *Modeling water and nitrogen behaviour in the soil-plant systems*. U.S. Soils Laboratory, SWC-ARS-USDA (mimeografiado).
- GREENWOOD, E.A.N., 1976. *Nitrogen stress in plants*. *Advances in Agronomy*, Vol. 28: 1-33.
- HEADY, E.D. y DILLON, J.L., 1961. *Agricultural production function*. Ames, Iowa. The Iowa State Univ. Press.
- IAEA, 1966. *International Atomic Energy Agency. Rice fertilization*. Tech. Report Series 55, Vienna, Austria.
- KAFKAFI, U.; BAR-YOSEF, B. y HADAS, A., 1978. *Fertilization decision model-A synthesis of soil and plant parameters in a computerized program*. *Soil Science* 125 (4): 261-268.
- KATSUMI, 1967. *Physiological characteristics of rice roots, specially with the viewpoint of plant growth stage and root*. *Age Bulletin of the national Institute of Agricultural Sciences*. Series D, N° 16: 19-156.
- KAWATA, S.Y.; OOHASHI, K.; YAMAZAKI, Y.; ISHIHARA, K., 1969. *Root system formation in the rice plant and soil environment*. *Proc. Crop Sci. Soc. Ipu* 38: 434-441.
- MC KINION, J.M.; JONES, J.W.; y HESKETH, J.D., 1974. *Analysis of Simcot: Photosynthesis and growth*. *Proc. Beltwide cott. Prod. Res. Conf., Dallas, U.S.A., National Cotton Council, Memphis, Tenn*, pp. 118-125.
- MITSUI, S., 1960. *Inorganic nutrition, fertilization and soil amelioration for lowland rice*. Yokendo, Tokyo.
- MOAMAW, J.C.; BALDAZO, P.G. y LUCAS, L., 1967. *Effects of ripening period environment on rice yields of tropical rice*. *Int. Rice Comm. Newl. (Spec. Issue)*: 18-25.
- MUNSON, R.D. y DOLLE, J.P., 1959. *The economics of fertilizer use in crop production*. *Advances in Agronomy* 11: 113-169.
- NORERO, A.S., 1976. *La evapotranspiración de los cultivos, aspectos agrofísicos*. Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Tierras y Aguas. Mérida, Venezuela (mimeografiado).
- PATRICK, W.H.; QUICK, W.A.; PETERSON, F.J. y PAULKNER, M.D., 1967. *Effect of continous submergence vs. alternate flooding and drying on growth, yield and nitrogen uptake by rice*. *Agron. J.* 59 (5): 418-419.
- PRADO, O. y RODRÍGUEZ, J., 1978. *Estimación de las necesidades de fertilización nitrogenada del trigo*. *Ciencia e Investigación Agraria* 5 (2): 29-40.
- PRUITT, W.O., 1966. *Empirical method of estimating evapotranspiration using primarily evaporation pans*. In: *Evapotranspiration and its role in water resources management*, ASAE, St. Joseph, Michigan, pp. 57-61.
- ROJAS, C., 1976. *Evaluación de fertilizantes nitrogenados en arroz*. *Agricultura Técnica (Chile)* 36: 145-150.
- ROJAS, C. y ALVARADO, R., 1976. *Caracterización morfológica y la respuesta a N de algunas variedades de arroz*. INIA, Estación Experimental Quilamapu, Chillán (mimeografiado, no publicado).
- SÁNCHEZ, P.A. y CALDERÓN, M.V., 1971. *Timing of nitrogen application of rice grown under intermittent flooding in the coast of Peru*. *Int. Symposium Soil Fert. Evaluation Proc.* 1: 595-602.
- SÁNCHEZ, P.A.; RAMÍREZ, G.E. y CALDERÓN, D.M.V., 1973. *Rice responses to nitrogen under high solar radiation and intermittent floding in Peru*. *Agron. J.* 65 (4): 523-529.
- SATO, K., 1937. *On the root development of rice plant*. *Ann. Agric. Exp. Stn. Gor. Gen. Chosen* 9: 357-373.
- SINCLAIR, T.R. y WITT DE, C.T., 1976. *Analysis of the carbon and nitrogen limitations to Soybean yield*. *Agron. J.* 68: 319-324.
- STANFORD, G., 1973. *Rationales for optimum nitrogen fertilization in corn production*. *J. of Environmental Quality* 2 (2): 1969-1975.

- STANFORD, G. y HANWAY, J., 1955. *Predicting nitrogen fertilized needs of Iowa soils: II a simplified technique for determining relative nitrate production in soil.* Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 19: 74-77.
- STANFORD, G. y SMITH, S.J., 1972. *Nitrogen mineralization potentials of soils.* Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 36: 465-472.
- STANFORD, G.; FRERE, M.H. y SCHWANINGER, D.H., 1973. *Temperature coefficients of soil nitrogen mineralization.* Soil Sci. 115 (4): 321-323.
- STANFORD, G. y SMITH, S.J., 1978. *Oxidative release of potentially mineralizable soil nitrogen by acid permanganate extraction.* Soil Sci. 126 (4): 210-218.
- STANFORD, G.; CARTER, J.N.; WETERMANN, D. T. y MEISINGER, J., 1977. *Residual nitrate and mineralizable soil nitrogen in relation to nitrogen uptake by irrigated sugarbeets.* Agron. J. 69 (2): 303-308.
- STANHILL, G., 1960. *The relationships between climate and the transpiration and growth of pastures.* Proc. Eight Int. Grassland Congress.
- TANAKA, A.; KAJANO, K. y YAMAGUSHI, J., 1966. *Photosynthesis, respiration, and plant type of the tropical rice plant.* Int. Rice Res. Inst. Tech. Bull. 7: 46.
- TANAKA, A., 1969. *Physiological basis for fertilizer response of rice varieties.* Japan, Min. Agr. Forestr. Trop.
- VOSS, R.D. y PESEK, J.T., 1967. *Field of corn grain as affected by fertilizer rates and environmental factors.* Agron. J. 59: 567-572.
- VOLKE, H., 1975. *Influencia de factores ambientales sobre el rendimiento y la respuesta de la fertilización del trigo en suelos trumaos.* Agric. Téc. 35 (1): 4-5.
- WESTFALL, D.G., 1969. *The efficiency of applied N in rice —producing soils.* Rice J. 72 (7): 66-67.
- WIT DE, C.T., 1958. *Transpiration and crop yields.* Nede. Inst. Biol. Sheik Onders Landb. Gewasan 59: 19.
- YOSHIDA, S., 1972b. *Physiological aspects of grain yields.* Ann. Rev. Plant Physiol. 23: 437-464.