

CAPÍTULO 5

Índices fisiotécnicos, fases de crecimiento y etapas de desarrollo de la planta de arroz

*Alfredo de J. Jarma
Victor Degiovanni
Rafael A. Montoya*

Contenido

	Página
Resumen	60
Abstract	61
Introducción	61
Índices fisiotécnicos para el crecimiento y el desarrollo	63
Curvas de crecimiento	63
Parámetros cuantificables del análisis	64
Tasas de crecimiento	66
Procesos y factores en la producción de materia seca	68
Fotosíntesis	68
Carbohidratos sintetizados y rendimiento de grano	69
Relación fotosíntesis/fotosintatos	70
Crecimiento y desarrollo	70
Fases del crecimiento	71
Etapas del desarrollo	73
Referencias bibliográficas	78

Resumen

Se describen los índices o indicadores más usados por los investigadores para el análisis de crecimiento de las plantas, información utilizada por investigadores, auxiliares técnicos y agricultores para optimizar la producción de los cultivos. Estos índices son parámetros que permiten cuantificar el crecimiento de un órgano de la planta o de una población de plantas. Mediante componentes relativamente sencillos, permiten analizar la habilidad de una especie vegetal para desarrollarse en un ambiente dado, comparar esa habilidad con la de otras especies, y explicar el comportamiento de una especie vegetal en función del tiempo. Pueden agruparse en: (1) índices fisiotécnicos para el crecimiento y el desarrollo, que incluyen curvas de crecimiento (p. ej., la curva sigmoide); parámetros cuantificables del análisis, que incluyen tasas de crecimiento absoluto, relativo, simples, compuestos, al igual que el índice de duración y la producción total de materia seca; y tasas de crecimiento. Se describen las tasas de crecimiento que se emplean con más frecuencia en los estudios de la

planta y el cultivo de arroz: tasa de crecimiento absoluto (TCA), tasa de crecimiento relativo (TCR), relación de área foliar (RAF), índice de área foliar (IAF), tasa de asimilación neta (TAN) y tasa de crecimiento del cultivo (TCC). Igualmente se indican los diferentes procesos y factores que intervienen en la producción de materia seca, como la fotosíntesis, los carbohidratos producidos por la fotosíntesis (los cuales contribuyen al rendimiento de grano) y la relación fotosíntesis/fotosintatos. Se describen en detalle las fases del crecimiento (vegetativa, reproductiva y de madurez fisiológica), y las etapas del desarrollo de la planta de arroz según la escala BBCH.

Abstract

Physical-technical indicators, growth phases, and development stages of the rice plant

The indexes or indicators most commonly used by researchers to analyze plant growth—an information used by researchers, technicians, and farmers to optimize crop production—are described. These indicators are parameters that help quantify the growth of a plant organ or population, analyze the ability of a plant species to grow in a given environment, compare this ability with that of other species, and explain the performance of a given plant species over time. They can be grouped into physical-technical indicators of growth and development, which include growth curves (for example, sigmoid curves); quantifiable parameters for analysis, which include growth rates (absolute, relative, simple, compound) as well as duration index and total dry matter production; and growth rates. The growth rates most frequently used to study the rice plant and crop are described in detail: absolute growth rate (AGR), relative growth rate (RGR), leaf area ratio (LAR), leaf area index (LAI), net assimilation rate (NAR), and crop growth rate (CGR). The different processes and factors that intervene in dry matter production are also indicated, such as photosynthesis, the carbohydrates produced during photosynthesis (which contribute to grain yield), and the photosynthesis/photosynthate ratio. The growth phases (vegetative, reproductive, and physiological maturity) of the rice plant are described in detail as well as its different development stages, according to the BBCH scale.

Introducción

En algún momento de su vida, todo organismo vivo es capaz de crecer si se dan las condiciones adecuadas. Este crecimiento implica cambios en tamaño, en forma o en número de individuos (o en varios aspectos a la vez). El proceso de cambio en estos tres aspectos, que es uno de los fenómenos más importantes de los sistemas vivos, ayuda a distinguir al organismo vivo del que no lo está. Ahora bien, no es fácil dar una definición de 'crecimiento' ni aun para los organismos que se auto-repican. Sin embargo, una definición aceptable de crecimiento vegetal sería la siguiente:

es un cambio irreversible en el tiempo, que se da principalmente en tamaño, habitualmente en forma y ocasionalmente en número.

La cinética del crecimiento de la planta de arroz obedece a tres factores principales:

1. El *tamaño* de la planta o de la población. Cuanto mayor sea el número de células en división (o de individuos en reproducción) y en alargamiento, mayor será el crecimiento en una etapa inicial.
2. La *relación* entre el tamaño actual de la planta y el que pueda alcanzar ésta al final del proceso de cambio.

Igualmente, entre el tamaño actual y final de una población, dadas ciertas condiciones. Esta relación expresa, en parte, la edad fisiológica de las células: cuanto más jóvenes o meristemáticas sean éstas, más rápida será su multiplicación. Aunque la planta adulta tenga muchas células, su crecimiento será lento porque pocas de ellas se dividen.

3. Una *constante*, específica del arroz y diferente en cada especie.

Toda acción fisiológica es influida por el medio externo y depende estrechamente, además, de la energía liberada en el proceso de respiración. Puesto que la respiración consiste en una serie de reacciones termoquímicas, el crecimiento de un organismo vegetal dependerá principalmente de la *temperatura* como factor del medio. Por tal razón, la curva de crecimiento tendrá un mínimo hacia los 5 ó 10 °C, un óptimo hacia los 35 °C y un máximo hacia los 45 °C. Entre los 10 y los 30 °C, aproximadamente, el crecimiento sigue la ley de Van't Hoff, es decir, su Q_{10} se aproxima a 2 (Q_{10} se define como la velocidad de reacción enzimática por cada incremento de temperatura de 10 °C). El valor óptimo de la temperatura para el crecimiento no coincide con ese óptimo en otras funciones importantes, principalmente en la fotosíntesis; por ello, las plantas expuestas de modo constante a temperaturas de 30 °C o mayores se muestran débiles y cloróticas y exhiben el fenómeno del 'crecimiento forzado'.

La *luz* es el segundo factor del medio que tiene una importancia grande en el crecimiento vegetal. Las plantas que crecen con poca luz tienen un contenido bajo de clorofila, se alargan en su eje longitudinal, y se retardan en su desarrollo foliar. Este fenómeno se denomina ahilamiento o etiolación.

El crecimiento tiene sus propias leyes, obedece a reguladores hormonales y es, en suma, una expresión de la fisiología general de la planta. Por consiguiente, la curva de crecimiento sólo será normal en un *medio ecológico* cercano al óptimo; las variaciones o deficiencias de los factores del medio se reflejarán entonces en desviaciones de la curva esperada de crecimiento normal.

La *curva de crecimiento* vegetal se construye con mediciones relativamente fáciles de hacer en el campo, al menos en plantas (y en cultivos), cuyo aumento en tamaño queda bien representado por la medición de la altura de la planta a través del tiempo, como ocurre en los cereales. Muchos investigadores han graficado también el aumento de peso de un organismo en función del tiempo para obtener una curva de crecimiento; esta curva puede ajustarse, mediante una función matemática sencilla, si se desea obtener una recta o una curva en forma de S (Jarma, 2005).

Las prácticas agronómicas, como el manejo de las malezas, de los insectos plaga y de las enfermedades, la nutrición del cultivo y la aplicación de riego y labores de cosecha, están relacionadas con una o más etapas y fases del crecimiento de la planta. El crecimiento puede evaluarse tomando datos de área foliar o de peso seco en el tiempo; si se toman dos mediciones consecutivas, por ejemplo, con intervalos de 3 días, se puede conocer el aumento de biomasa. Un aumento en tamaño es, a menudo, la expansión de órgano en una dirección solamente, como la altura del tallo o el diámetro de una rama, o en dos direcciones, como ocurre con el área de una hoja.

En conclusión, cuando el crecimiento de la planta se considera desde la fisiología del cultivo, sólo podrá comprenderse correlacionando las múltiples variables

que actúan sobre ese cultivo. Esta información integradora representa una herramienta cotidiana para los investigadores, los auxiliares técnicos y los agricultores que interactúan en la tarea de optimizar la producción del segundo cereal más importante del mundo.

Índices fisiotécnicos para el crecimiento y el desarrollo

Curvas de crecimiento

Curva sigmoide

La curva que describe, en general, los cambios de tamaño en el crecimiento de un organismo, un órgano, un tejido, una población de células o de una célula individual tiene forma sigmoide (o sea, imita una letra 'ese') (Moore, 1979). En este tipo de curvas se distinguen tres fases principales (Figura 1):

- Una inicial de corta duración, en la que el crecimiento es lento y corresponde (en los vegetales) al estado de plántula; se llama **fase logarítmica**.

- Una central de rápido crecimiento, que corresponde al período vegetativo de la planta; se llama **fase lineal**.
- Una final, en la que el crecimiento se desacelera progresivamente hasta hacerse nulo, y corresponde, en las plantas, a la floración y a la maduración del fruto; se llama **fase de senescencia**.

Este tipo de curvas representa el crecimiento de las plantas de arroz y de muchas especies, aunque hay especies y órganos vegetales que tienen curvas de crecimiento diferentes.

Fase logarítmica. El tamaño (p. ej., la altura) del organismo aumenta en forma exponencial con el tiempo. Es decir, el crecimiento no es muy rápido al principio, pero al poco tiempo aumenta en forma continua. Esta rapidez es proporcional al tamaño del organismo considerado: cuanto mayor sea éste, más rápido crece. Una célula individual presenta también la fase logarítmica de crecimiento.

Fase lineal. El organismo continúa aumentando en tamaño a una velocidad

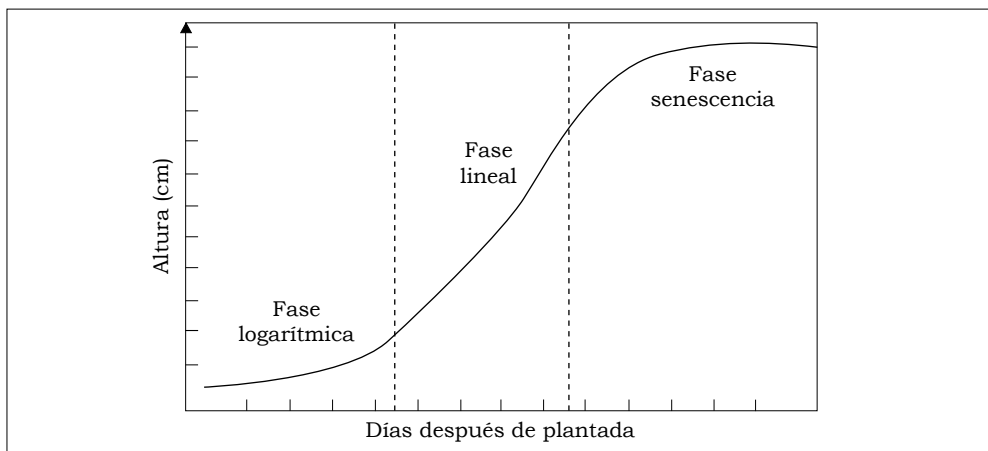


Figura 1. La altura que adquiere la planta de arroz en función del tiempo genera una curva sigmoide de crecimiento.

constante, que tiende normalmente a los valores máximos durante algún tiempo. No siempre es clara la razón de que la velocidad del crecimiento sea constante y no proporcional al tamaño creciente del organismo; si se mide, por ejemplo, el crecimiento de un tallo sin ramas, la fase lineal expresaría simplemente la actividad constante de su meristemo apical.

Fase de senescencia. En esta fase, la velocidad del crecimiento tiende a disminuir, puesto que la planta alcanza su madurez (etapa final del crecimiento) y comienza a envejecer.

Otras curvas

En un análisis del crecimiento es muy útil hacer, además de la curva de tamaño en función del tiempo antes descrita, la gráfica del log del tamaño en función del tiempo, así como la velocidad del crecimiento (o tasa de crecimiento) respecto al tiempo, tal como se indica en las Figuras 2,A y 2,B, respectivamente (Jarma, 2005).

Parámetros cuantificables del análisis

La curva que describe la cinética del crecimiento de la planta de arroz durante

su vida es, generalmente, de tipo sigmoide simple; para construirla se miden diversos factores. Conviene recordar que el crecimiento se evalúa, principalmente, haciendo medidas secuenciales del tamaño de la planta, de su forma o de cierto número de datos primarios. Una vez obtenidos los datos directos en el campo, tales como la altura de la planta, el número de macollas por planta, la materia seca y otros, el siguiente paso es analizarlos. Para hacer este análisis, se construyen las formas correspondientes a cinco tipos principales de cantidades derivadas, que son los siguientes:

Tasas de crecimiento absoluto

Son tasas simples del cambio de una sola variable a través del tiempo, que miden el comportamiento de ésta; por ejemplo, el incremento de la masa seca con el tiempo, el número de macollas de la planta a lo largo del tiempo, el número de hojas por planta respecto al tiempo.

Tasas de crecimiento relativo

Son tasas de cambio un poco más complejas que miden el incremento de un parámetro en un intervalo de tiempo en relación con el valor inicial de dicho parámetro. Un ejemplo sería el incremento de la masa seca de la planta por unidad de masa seca.

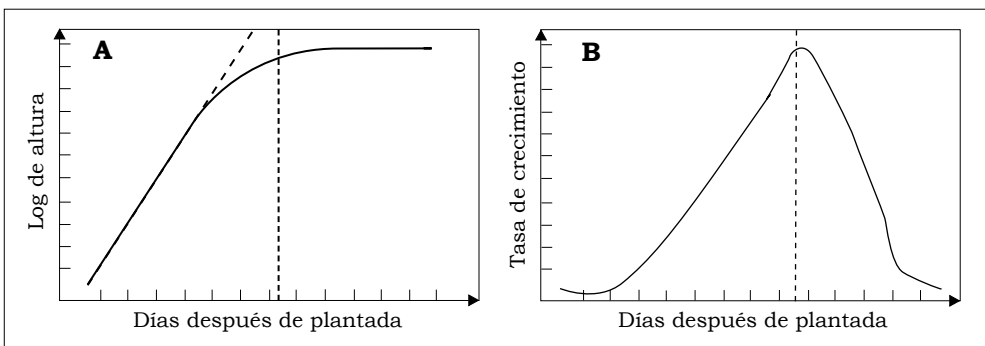


Figura 2. (A) Curva de crecimiento logarítmica para la altura de la planta de arroz respecto al tiempo transcurrido después de su plantación; (B) Curva de la tasa de crecimiento (cm/día) respecto al tiempo.

Tasas de crecimiento simples

Son tasas que relacionan dos variables similares, como el incremento de la masa seca total de la hoja y el de la planta, o no similares, como la masa seca de la hoja y su unidad de área foliar. Son útiles, por ejemplo, para determinar la distribución de la materia seca dentro la planta, y para explicar el crecimiento de un órgano en relación con otro.

Tasas de crecimiento compuestas

Son las que involucran más de una variación de la planta, como la tasa de incremento de la masa seca total de la planta por unidad de área foliar. En ocasiones, una de las variables no es, necesariamente, de la planta; por ejemplo, la producción de biomasa por unidad de suelo.

Índice de duración

Es el cálculo del área bajo la curva generada por una variable primaria o derivada respecto al tiempo; por ejemplo, bajo la curva de crecimiento del área foliar respecto al tiempo hay un área que representa la duración del área foliar considerada (Jarma, 2005).

Producción total de materia seca

El rendimiento de grano del arroz depende ampliamente de la *producción* total de materia seca y de la *distribución* de ésta hacia los granos. La producción total de materia seca se logra en dos fases diferentes de la vida de la planta: la prefloración y la posfloración. La cantidad de materia seca acumulada proporcionalmente en estas dos fases varía con la duración tanto del ciclo de vida de cada variedad como de las condiciones ambientales en que la variedad se desarrolla (Fernández, 1978; Jarma, 2005). La distribución de la biomasa, por su parte, sigue una tendencia general que podría resumirse así:

Antes de la floración. Las sustancias producidas en las hojas que sean fotosintéticamente activas (los carbohidratos) se *almacenan* en éstas o se *traslocan* a otros órganos (por ejemplo, las raíces o los tallos) según la función que desempeñen las hojas en ciertas etapas del ciclo de vida, es decir, la de un órgano importador o exportador, respectivamente, de carbohidratos. En las etapas anteriores a la floración, es fundamental que la planta de arroz reciba una adecuada *radiación solar* para que su tasa de fotosíntesis sea óptima y concuerde con el desarrollo del dosel de follaje. Dejando aparte otros factores, el factor radiación desempeña un papel decisivo en el desarrollo de una población de arroz en el campo.

Después de la floración. De la materia seca total acumulada en los granos, 90% se produce después de la floración; el 10% restante proviene de los tallos y de las hojas, donde se acumuló antes de la floración. Los fotoasimilados (azúcares y almidones) que se formaron en los tejidos verdes de la planta se distribuyen así:

- Una quinta parte se acumula (en tejidos foliares y caulinares) antes de la iniciación de la panícula (etapas 1, 2 y 3 del ciclo de vida de la planta).
- En la floración, cuando los azúcares van a las espiguillas (etapas 1 a 6), se acumula la mitad de los fotoasimilados producidos en esa fase; la otra mitad lo hace después de la fertilización del ovario, durante la formación del grano (etapas 7, 8 y 9).
- En la madurez, alrededor del 95% de los azúcares de la parte aérea de la planta está en los granos y sólo un 5% permanece en los tallos y en las hojas (Degiovanni, 2003).

La producción de materia seca en la planta de arroz está estrechamente relacionada con su *área foliar*. Los máximos valores de esa producción se registran exactamente

en el momento en que se inicia el macollamiento. Los índices de área foliar máximos que se alcanzan en ese tiempo corresponden al desarrollo total del dosel de follaje de la planta.

Tasas de crecimiento

A continuación se describen las tasas de crecimiento que se emplean con más frecuencia en los estudios de la planta y el cultivo de arroz. En todas las expresiones siguientes, W es la masa seca, A_f es el área foliar, A_s es la superficie de terreno, y T es el tiempo, que generalmente se expresa en días (Collins, 1977).

Tasa de crecimiento absoluto (TCA)

Es el índice de crecimiento de la planta más sencillo que se maneja. La TCA mide la ganancia de biomasa a través del tiempo, aunque es posible emplear otro parámetro (diferente de biomasa); por ejemplo, el incremento en el número de órganos discretos tales como hojas o raíces (Jarma et al., 1999).

La TCA, cuyas unidades son g/día (también $g \cdot día^{-1}$), se calcula así:

$$TCA = \frac{W_2 - W_1}{T_2 - T_1}$$

Tasa de crecimiento relativo (TCR)

Expresa el incremento en masa seca, respecto a la masa seca inicial, durante un intervalo de tiempo. Representa la *eficiencia de la planta* como productora de nuevo material y ha sido propuesta como medida que integra el comportamiento fisiológico de las plantas. Es análoga a la tasa de interés compuesto del mundo financiero. Se aplica generalmente a la masa seca, pero se pueden usar otras medidas; por ejemplo, la TCR del área foliar o la tasa relativa de incorporación de un nutriente. La TCR se calcula así:

$$TCR = \frac{\log W_2 - \log W_1}{T_2 - T_1}$$

Se expresa en g/g por día. Si se emplean otras variables, sus unidades de medida cambiarán; por ejemplo, la TCR del área foliar podría expresarse en cm^2/cm por día, y la TCR de la incorporación de un nutriente sería mg/mg por día (Jarma, 2005).

Los resultados de varios trabajos sostienen la hipótesis de que los valores mínimos de la TCR se observan después de la ocurrencia de los valores máximos del IAF. En tal caso, los valores altos que presente la TCR, bajo condiciones normales, empezaría a disminuir con la edad de la planta; buena parte de esta disminución se debería, en el arroz, al aumento gradual de tejidos no asimilatorios, como los de la panícula que hace por entonces su aparición. Los estudios realizados por Collins (1977) en Kennebec confirman que el aumento de la TCR coincide con la disminución del valor del IAF, en condiciones de campo.

Relación (razón) de área foliar (RAF)

Es una medida del equilibrio que se da entre los potenciales de capacidad fotosintética y de costo respiratorio. Se calcula como la razón entre el área foliar total por planta y la masa seca total por planta en dos momentos (1 y 2, en la fórmula) del tiempo de crecimiento del vegetal, y éstos se promedian:

$$RAF = \frac{(A_{f1} / W_1) + (A_{f2} / W_2)}{2}$$

Este índice expresa, en todo momento de la vida de la planta, la relación proporcional entre el área foliar, cuya fotosíntesis mantiene a toda la planta, y la masa seca generada por la fotosíntesis. Por lo regular, las plantas cuya RAF es alta producen mucha materia orgánica. La RAF se expresa, generalmente, en cm^2/g .

Índice de área foliar (IAF)

Es un cálculo aproximado de la *capacidad productiva* de la comunidad vegetal (el cultivo). El índice mide la relación entre la superficie asimilatoria (el follaje extendido) y la superficie de suelo ocupada por ese follaje. El IAF expresa la magnitud del área que el cultivo expone a la radiación solar incidente para que realice la fotosíntesis. Es una relación absoluta (entre dos áreas) y por ello no tiene unidades. El IAF puede estimarse en varias etapas del cultivo (Jarman, 2005) y se calcula así:

$$\text{IAF} = \frac{A_f}{A_s}$$

Tasa de asimilación neta (TAN)

Se denomina también tasa foliar unitaria o índice de eficiencia fotosintética. Es un índice de la *eficiencia de las plantas*, considerada ésta no en relación con la masa seca, sino con el área foliar total. Puesto que el área foliar es la región productiva de la planta, es lógico expresar el crecimiento —o la eficiencia con que éste se logra— en función de esa área; esta expresión sería así una medida directa de la eficiencia productiva de la planta (Jarman, 2005).

La TAN se define también como el incremento de material vegetal por unidad de tejido asimilatorio, por unidad de tiempo. Sus unidades son g/cm por día y se expresa así:

$$\text{TAN} = \frac{W_2 - W_1}{T_2 - T_1} * \frac{\log A_{f_2} - \log A_{f_1}}{A_{f_2} - A_{f_1}}$$

La valoración de la *eficiencia fotosintética* por unidad de área foliar en el arroz presenta grandes variaciones entre los diferentes grupos de variedades y dentro de ellos (Nagamine, 1990):

- Las variedades *tradicionales* de porte alto y de larga duración tienen,

muchas veces, una eficiencia fotosintética (o una tasa foliar unitaria) más alta y una duración de la materia seca total mayor que las variedades *modernas semienanas*; éstas son de corta duración pero su rendimiento es alto (Murty, 1978). No obstante, el rendimiento de grano de las tradicionales es bajo porque la eficiencia de la fotosíntesis (tasa fotosintética) de su dosel de follaje, durante las etapas posteriores a la floración, es baja por varias razones:

- su dosel de follaje ensombrece bastante sus propias hojas inferiores ('autosombreado');
 - sus índices de cosecha (o sea, la relación proporcional entre la biomasa del órgano de interés comercial y la del resto de la planta) son bajos porque tienen deficiencias en la traslocación de sus nutrientes; y
 - estas deficiencias se deben a un volcamiento prematuro de las plantas (Murty, 1978).
- Las diferencias en fotosíntesis foliar entre una variedad y otra pueden atribuirse a la resistencia a la *carboxilación*, que está regulada por la actividad de la enzima responsable de la incorporación del CO₂ ambiental, conocida comúnmente como Rubisco (Ishii, 1993). Las variedades de arroz cuyo índice de eficiencia fotosintética es alto presentan, generalmente, una foto-respiración más intensa porque la enzima RuBp (ribulosa bifosfato) hace, en un mismo sitio activo, la carboxilación y la oxigenación.
 - Puesto que, en muchas áreas de Colombia en que se cultiva tradicionalmente el arroz, la intensidad de la luz es baja durante la época lluviosa, es necesario desarrollar variedades de arroz que

tengan, en condiciones de baja luminosidad, las siguientes características:

- altas tasas de eficiencia fotosintética y pocas pérdidas por respiración;
- alto contenido de clorofila; y
- mayor producción de materia seca, para que se acumulen buenas reservas para la floración y se obtenga un índice de cosecha alto (Murty, 1989).

Tasa de crecimiento del cultivo (TCC)

Es un índice de la eficiencia con que un cultivo produce *biomasa vegetal* en el campo. Es, por tanto, un índice de *productividad agronómica* que se aplica sólo a plantas que crecen juntas, ya sea en parcelas de investigación o en comunidades derivadas de una siembra programada. La TCC relaciona la ganancia en masa seca de una comunidad de plantas con el área de suelo que ésta ocupa y con el tiempo, o sea, es una masa seca producida por unidad de área y por unidad de tiempo.

Las unidades son, generalmente, g/cm por día o también t/ha por año. Esta tasa se expresa así:

$$TCC = \frac{1}{As} * \frac{W_2 - W_1}{T_2 - T_1}$$

Aunque se incremente el IAF, la eficiencia fotosintética disminuye porque aumenta la sombra que cae sobre el follaje inferior (sombreamiento) y porque, al mismo tiempo, la respiración se incrementa. El IAF que corresponda a la máxima TCC se considera óptimo y debe tenerse en cuenta para establecer poblaciones óptimas de arroz, sin olvidar, obviamente, otras variables involucradas, como el porcentaje de emergencia de plántulas y el desarrollo morfofisiológico de la variedad.

Si se admite que la fotosíntesis total se incrementa asintóticamente y que la respiración (respecto al ciclo *total* de cultivo) lo hace más o menos linealmente, se ha reportado un IAF óptimo para el arroz entre 4 y 7 (Yoshida, 1983). Ahora bien, la máxima intercepción de luz ocurre a un IAF de 6 a 8 y el incremento de área foliar se asocia, hasta esos valores, con un incremento lineal en el rendimiento (Matsushima, 1976). Un cultivo de arroz que tenga una población alta y haya sido fertilizado con un alto nivel de nitrógeno puede lograr un IAF alto (10 o más); no obstante, este IAF tendría un efecto negativo en el rendimiento porque la respiración no es función lineal sino hiperbólica del IAF; por tanto, la fotosíntesis neta o la producción de materia seca permanecerían constantes aunque el IAF llegue a 10 (Yoshida, 1983).

Además de los ya mencionados, hay otros índices que sirven para medir la eficiencia en el crecimiento de las plantas, tales como el índice de cosecha (IC, ver antes), la duración del área foliar, es decir, el tiempo de permanencia del área foliar efectiva para fungir como órgano exportador de asimilados, y otros. El investigador puede escoger la tasa (o las tasas) que mejor expresen el comportamiento que desea medir en la planta o en el cultivo.

Procesos y factores en la producción de materia seca

Fotosíntesis

La fotosíntesis es la fuente primaria de materia seca, es decir, produce (dada cierta combinación de condiciones climáticas) la biomasa total que incluye el rendimiento de grano. La fotosíntesis de un cultivo depende de *muchos factores*, entre ellos los siguientes (Murty, 1977):

- la relación entre el área foliar y el área de suelo cubierta por ese follaje (IAF);
- el grado de fotosíntesis potencial por unidad de área foliar;
- el porcentaje (o relación proporcional) de luz transmitida a las hojas más bajas de las plantas respecto al total de luz recibida sobre el pabellón foliar (índice de transmisión lumínica); y
- la duración del área foliar.

El crecimiento de una planta depende, en gran medida, de la relación (o balance) entre su fotosíntesis y su respiración; si esta relación es buena, se genera la energía necesaria para la producción de materia seca. La reducción de la respiración en los órganos de la planta no está directamente relacionada con el crecimiento.

Si los tallos o la panícula crecen bien y si aumenta el índice de masa foliar (masa de las hojas respecto a la masa total de la planta) durante la floración, se obtendrá un *balance muy favorable* entre *fotosíntesis y respiración* y, en consecuencia, la producción de materia seca será mayor que cuando no se cumplen esas condiciones (Sharma y Singh, 1999).

La producción total de materia seca es más baja en las condiciones ambientales de los trópicos que en las de las zonas templadas; la razón es que el balance entre fotosíntesis y respiración es menos favorable para la planta cuando la *temperatura* es alta (Yoshida, 1983). En la zona templada de China, Japón, Australia y Estados Unidos, donde las temperaturas bajas permiten que todos los estados de crecimiento, particularmente el llenado del grano, tengan mayor duración, se han obtenido rendimientos de arroz más altos que en las regiones tropicales de Asia, donde las temperaturas altas aumentan las

pérdidas por respiración y disminuyen el período de llenado del grano (Sharma y Singh, 1999). Sin embargo, dado que en las regiones tropicales la duración del ciclo de cultivo del arroz es menor y es posible lograr de tres a cuatro cosechas por año, el *rendimiento anual* de arroz es más alto que en las zonas templadas donde sólo se obtiene una sola cosecha al año (Yoshida y Parao, 1976).

Carbohidratos sintetizados y rendimiento de grano

Los carbohidratos producidos por la fotosíntesis, tanto en la fase de prefloración como en la de posfloración, contribuyen al rendimiento de grano. Esa contribución depende del ciclo de vida de la variedad, del nivel de fertilización, del método de cultivo y de las condiciones ambientales (Yoshida, 1983).

- Las variedades de larga duración utilizan las *reservas fotosintéticas* de la *prefloración* más eficientemente que las variedades de corta duración. En los trópicos se acumulan en las macollas del 10% al 15% de los carbohidratos durante la época seca del año (Sharma y Singh, 1999). En las zonas templadas, en cambio, el total de carbohidratos acumulados en las macollas suele estar entre el 30% y el 40%, a causa, probablemente, de la mayor radiación solar y de las temperaturas nocturnas más bajas (15 °C vs. 25 °C) con respecto a los trópicos. Las reservas fotosintéticas de la prefloración sostienen la formación de los granos y estabilizan el rendimiento, especialmente en condiciones de estrés, tales como una luminosidad baja, la escasez de agua, o la incidencia de insectos dañinos y de enfermedades.
- Los fotosintatos producidos en la *posfloración* hacen una gran

contribución al rendimiento de variedades cuya biomasa es baja en la prefloración y en la floración (Sharma y Singh, 1999).

Relación fotosíntesis/ fotosintatos

La producción de materia seca controla el rendimiento de grano; esa producción, a su vez, es determinada por la *habilidad de la planta* para recolectar los elementos de la fotosíntesis (CO_2 , agua, radiación solar) y por la capacidad de las panículas (y espiguillas) para aceptar los fotoasimilados. La fuente de éstos es el *suplemento de asimilados*, el cual comprende los producidos antes de la floración, los almacenados en ciertas partes de la planta, y los producidos durante los estados posteriores a la floración (Sharma y Singh, 1999).

Crecimiento y desarrollo

El crecimiento se define, generalmente, como un aumento irreversible de tamaño. Cuando la planta de arroz empieza a crecer desde el cigoto, no sólo aumenta en longitud y grosor sino también en peso, en el número de sus células, en la cantidad de su protoplasma, y en la complejidad de su organismo. El crecimiento de los tejidos conduce a la diferenciación de órganos especializados, como ocurre en la floración de la planta.

En el arroz, la producción comercial y los ensayos de investigación (genéticos, de rendimiento, de fertilización, sobre ataques de insectos dañinos, sobre etiología de enfermedades, de resistencia a la sequía, de adaptación a la inundación y al agua profunda, y sobre prácticas agronómicas) tienen relación con una o más etapas del crecimiento y del desarrollo de la planta y del cultivo. El conocimiento de la forma en que crece

y se desarrolla el cultivo es esencial para el investigador y el productor de arroz, porque les facilita la aplicación de las técnicas agronómicas. El manejo que haga una zona arrocería de estos conocimientos, sobre todo enfocados al medio ambiente, le permitirá obtener una mejor producción de arroz tanto en cantidad como en calidad.

El crecimiento de la planta de arroz es un proceso fisiológico continuo que se extiende, completando un ciclo, desde la germinación de la semilla hasta la maduración del grano. La planta comienza como una célula única, el cigoto, que crece y se desarrolla hasta llegar a ser un organismo multicelular. Hay una síntesis continua de moléculas más pequeñas, que son la materia prima del crecimiento. Hay división celular, que produce células nuevas, muchas de las cuales llegan a ser más grandes y más complejas que las originales. Pues bien, este proceso de especialización celular se conoce como crecimiento, ya que la diferenciación de las células permite formar tejidos, órganos y organismos. Este proceso de crecimiento presenta un patrón en el tiempo que, aunque es común a la especie, puede variar ligeramente según ciertas características genéticas de la planta o según el influjo del ambiente.

En la planta de arroz, la producción de masa seca es el resultado neto del balance entre dos procesos metabólicos básicos: fotosíntesis y respiración. La materia seca se produce en el proceso fotosintético, los productos de la fotosíntesis se acumulan y luego se distribuyen a los diferentes órganos de la planta (CIAT, 1988). La tasa de crecimiento absoluto (TCA) se eleva cuando se incrementa el peso de las hojas, y lo hace con la rapidez con que aumenta el área foliar; en efecto, al aumentar el área de intercepción de luz

y, por consiguiente, la fotosíntesis (Clavijo, 1989), los fotoasimilados se acumulan primero y luego se traslocan desde la parte aérea a toda la planta, incluyendo la raíz.

Los resultados aquí presentados provienen de los trabajos de investigación hechos en tres municipios arroceros del departamento de Córdoba (Colombia). Se hicieron en las condiciones agroclimáticas del Valle del Sinú y sembrando las parcelas mediante el sistema de trasplante. El objetivo central de la investigación fue determinar las fases del crecimiento y las etapas del desarrollo de tres materiales de arroz. Se aplicó la escala BBCH propuesta por Meier.

La escala extendida BBCH es el resultado de un grupo de trabajo conformado por las siguientes organizaciones alemanas: el Centro Federal de Investigaciones Biológicas para Agricultura y Silvicultura (BBA), el Instituto Federal de Variedades (BSA), la Asociación Alemana de Agroquímicos (IVA) y el Instituto para la Horticultura y la Floricultura (IGZ), en Grossbeeren/Erfurt. La escala representa un sistema de codificación uniforme para la identificación fenológica de los estadios de crecimiento de todas las especies de plantas monocotiledóneas y dicotiledóneas.

Fases del crecimiento

Fase vegetativa

Extensión: Empieza con la germinación de la semilla y termina en la iniciación de la panícula.

Raíces. Cuando las semillas germinan en un terreno bien aireado, la raíz seminal emerge primero del embrión; esta raíz es de corta duración. Las raíces funcionales de la planta de arroz son las raíces adventicias que se originan en los

entrenudos basales de los tallos; estas raíces deben absorber el agua y los nutrientes necesarios para mantener viva la planta. En cada planta, la abundancia de raíces depende del número de nudos disponibles en el tallo, y por eso se habla del número de raíces por planta. La profundidad que alcanzan las raíces en el suelo depende de las condiciones del suelo durante el crecimiento de la planta.

La disponibilidad de nutrientes en el suelo también modifica la morfología de las raíces. Según Ángela Hodge (2004), las raíces de arroz que se desarrollan en parches de suelo ricos en nutrientes son más ramificadas, aunque más cortas, que las que se desarrollan en un suelo cuyo contenido de nutrientes es bajo.

Macollas. La producción de macollas de una planta está controlada por factores genéticos (Li et al., 2003) y por varios factores ambientales, entre los que se destacan la distancia respecto a otras plantas, la radiación solar y la disponibilidad de los elementos nutritivos del suelo.

Aparentemente, la principal función del macollamiento en los cultivos comerciales es llenar los espacios dejados por las pérdidas de población durante el establecimiento del cultivo, con el objetivo de que se forme el número máximo de panículas (supervivencia del individuo y de la población) que permitan las condiciones de crecimiento. Es posible que esta razón de tipo ecológico no haya permitido definir claramente la relación entre el macollamiento y la productividad de un cultivo de arroz de siembra directa. Algunos investigadores, sin embargo, hallaron una relación positiva entre el macollamiento y el rendimiento (Wu et al., 1998). Los estudios hechos en el IRRI tampoco mostraron una tendencia definida entre el macollamiento y el rendimiento en los

genotipos comerciales desarrollados en ese instituto entre 1966 y 1995 (Peng et al., 1999).

En los últimos años, los fitomejoradores de arroz que han acogido la selección según el tipo de planta, consideran el vigor de las raíces, la baja capacidad de macollamiento y un número bajo de macollas inefectivas entre las características útiles que permiten seleccionar materiales de alto rendimiento (Peng et al., 1999).

Hojas. Las técnicas de análisis del crecimiento relacionan la producción de material vegetal con la utilización de la luz solar; para hacerlo, miden directamente el aparato fotosintético por medio del índice de área foliar (IAF), es decir, relacionando el área de tejido fotosintético con el área de terreno ocupada por ese tejido (la relación es adimensional). Este parámetro ha sido empleado por los fitomejoradores de arroz para comparar genotipos y es de uso frecuente en los modelos de simulación. Kiniry et al. (2001) hallaron una relación lineal entre la producción de materia seca y la radiación solar fotosintéticamente activa que es interceptada por un manto foliar cuyo IAF va de 9.8 a 12.7.

La nutrición mineral es uno de los factores que afecta el desarrollo y el funcionamiento de las hojas. El suministro adecuado de nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K) y agua a la planta es esencial para que ésta logre el tamaño, la duración y el funcionamiento óptimos de las hojas. El N incrementa más que otros nutrientes el área foliar, pero hay que aplicarlo con cuidado para no exceder los valores críticos del IAF (Anten et al., 1995; Yin et al., 2003). Hay que tener en cuenta, además, que el N aplicado en época en que no es oportuno hacerlo puede aumentar la producción

de biomasa sin aumentar el rendimiento de grano. Se ha observado también que la duración del área foliar es mayor cuando hay mucho N disponible para la planta al iniciarse la formación de la panícula.

Fase reproductiva

Extensión: Empieza en la iniciación de la panícula y termina en el inicio de la floración.

Panícula. La energía que requiere el desarrollo de la panícula es alta, razón por la cual los fotoasimilados disponibles deben ser abundantes en esta fase. Una tasa alta de acumulación de materia seca durante la fase reproductiva favorece la producción de espiguillas. De otro lado, una tasa alta de crecimiento del cultivo (TCC) en la segunda mitad de la fase reproductiva es crítica para el rendimiento de grano, porque evitará la degeneración de las espiguillas ya formadas (Horie, 2001).

Boonjung y Fukai (1996) encontraron que las deficiencias de humedad durante el desarrollo de la panícula retardan la antesis (o sea, la apertura floral y la duración de las flores) y reducen notablemente el número de espiguillas por panícula. Investigadores japoneses informaron a finales de los 80 que el estado de meiosis durante el desarrollo de las anteras es muy sensible al estrés causado por la sequía, lo que llevaría a la infertilidad del polen.

Fase de madurez fisiológica

Extensión: Empieza en el inicio de la floración y termina en la madurez fisiológica del grano.

Granos. Se reportó también en Japón que el embrión está completamente desarrollado de 10 a 12 días después de la fecundación. Contando desde el momento de la fecundación, el grano

alcanza su longitud máxima a los 6 días, su anchura máxima a los 15 días, y su grosor máximo a los 20 días; el punto más alto (pico) en la curva de peso fresco vs. tiempo lo alcanza el grano también a los 20 días. Entre los 10 y los 20 días después de la fecundación aumenta el peso del grano, y cuando llega a la madurez completa ocurre solamente un pequeño incremento en peso seco. El aumento de peso del grano se debe casi completamente al almidón sintetizado en el endospermo a partir de los carbohidratos solubles producidos en las hojas durante esta fase, los cuales fluyen hacia el ovario por los tejidos conductores.

Energía. La actividad fotosintética depende de caracteres de los genotipos y de condiciones del ambiente. Si la radiación solar es baja en la fase de madurez, se limita el rendimiento de las plantas porque, siendo escasa la energía, se reducen las tasas de producción de materia seca. Los genotipos que tienen alta capacidad de producción de materia seca son los más afectados por la falta de radiación solar. Peng et al. (1999) señalan que los genotipos modernos tienen tasas de crecimiento del cultivo (TCC) más altas en la fase de maduración que los cultivares antiguos, por lo cual su producción de biomasa y su rendimiento son más altos. Zhang y Kokubun (2004) compararon en Japón genotipos de arroz liberados antes y después de 1960 y encontraron que el aumento del rendimiento en los cultivares modernos iba acompañado de tasas de fotosíntesis neta más altas durante la maduración que en fases anteriores.

Índice de cosecha. La característica que más ha contribuido a aumentar el potencial de rendimiento de los cultivos de arroz es la capacidad de sus plantas de destinar al rendimiento agronómico una fracción de la producción de materia

seca proporcionalmente mayor que otros cultivos; de este modo, la planta reduce la cantidad de fotoasimilados que debe invertir en estructuras vegetativas (Evans, 1994). La relación entre la biomasa de los órganos cosechables (rendimiento agronómico) y la biomasa total (rendimiento biológico) se denomina índice de cosecha (IC). Laza et al. (2003) compararon el rendimiento y los caracteres relacionados con él en cuatro grupos de genotipos de arroz, y encontraron una asociación estrecha entre el rendimiento de grano y el IC. Kiniry et al. (2001) obtuvieron también información que señala al IC como el carácter que más se asocia con la diferencia de rendimiento entre los cultivares; consideran, por tanto, que el IC es un carácter crítico en la selección de genotipos de alto rendimiento.

Cuando la temperatura es mayor que la óptima para el crecimiento del arroz, puede reducirse el rendimiento porque se acorta el período de llenado y se reduce el IC (Polley, 2002). Kobata y Uemuki (2004) indican que los bajos rendimientos resultantes de exponer las plantas a temperaturas altas durante el llenado del grano se deben a que el aumento de la tasa de acumulación no compensa el déficit causado por la menor duración del llenado. El acortamiento del período de llenado por las altas temperaturas está asociado con la aceleración del envejecimiento de las hojas.

Etapas del desarrollo

Las etapas del desarrollo de la planta de arroz se identifican muy fácilmente y en ellas ocurren cambios fisiológicos de gran importancia para el ciclo de vida de la planta. Estas etapas se describen a continuación mediante la escala BBCH. El desarrollo de todas las variedades tempranas, como IR 36 y Colombia 21, se caracteriza porque tienen el mismo

número máximo de hijos, y porque en ellas las etapas de iniciación de la panícula y de elongación del tallo coinciden sustancialmente. En las variedades tardías, generalmente, estas etapas se traslapan.

De la germinación a la emergencia (Etapa 00)

Esta etapa va de la siembra a la aparición de la primera hoja a través del coleóptilo.

Después de sembrar la semilla seca y de taparla, se hace un ‘moje’ de germinación e incubación por períodos de 24 horas. Durante los mojes de germinación, las semillas absorben agua, se hinchan e inician el metabolismo de sus reservas de almidón y de proteína, dando así comienzo al crecimiento del embrión. El proceso de germinación se dilata más o menos según la humedad del medio y la profundidad a que se ha sembrado la semilla. La tasa de respiración suele ser alta durante esta etapa.

Cuando se siembra semilla pregerminada y si la temperatura media es de 26 °C, la emergencia ocurre de 2 a 3 días después de la siembra. La primera hoja, que siempre carece de lámina, rompe el coleóptilo y se hace visible sobre la superficie del suelo.

Código 00. Semilla seca (la cariósida).

Código 01. Primera hidratación de la semilla.

Código 02. La semilla comienza a absorber agua.

Código 03. Absorción completa de agua por la semilla.

Código 04. La semilla se incuba.

Código 05. Emergencia de la radícula, que se observa a los 3 días de la germinación.

Código 06. Elongación de la radícula y formación de los pelos de la raíz.

Código 07. El coleóptilo emerge de la cariósida. En medio anaeróbico, esto ocurre en el código 05.

Código 08. Empieza a hacerse notoria la primera hoja imperfecta.

Código 09. Emergencia de la primera hoja imperfecta (no se observa su lámina).

Todo este proceso demoró 4 días en los tres materiales ensayados. Cuando se siembra semilla seca en suelo seco, la germinación puede tardar hasta 10 días, lo que depende de la temperatura del suelo, de la humedad del medio, y de la profundidad a que esté la semilla.

Estado de plántula y desarrollo de las hojas (Etapa 10)

Esta etapa va desde la emergencia hasta justo antes de que la plántula empiece a macollar.

Desde su comienzo, la plántula de arroz depende totalmente de la energía, de las proteínas y de los minerales de la semilla. Se ha demostrado también que entre el séptimo y el octavo día de su vida, la plántula empieza a fotosintetizar los compuestos energéticos que necesita y a absorber nutrientes. A partir de ese momento se considera independiente de la semilla y su materia seca se incrementa a un ritmo muy rápido.

Código 10. La punta de la primera hoja se hace visible a los 5 días después de la emergencia (DDE).

Código 11. La primera hoja se desarrollada totalmente.

Código 12. La segunda hoja se hace visible.

Código 13. La segunda hoja se desarrolla a los 8 DDE.

Código 14. La tercera hoja empieza a nacer, aproximadamente, a los 12 DDE. A los 14 días

de emergida la plántula, muere la primera hoja.

Código 17. La cuarta hoja se hace notoria, aproximadamente, a los 16 DDE.

Código 18. La cuarta hoja se desarrolla completamente.

Código 19. La quinta hoja se hace visible a los 20 DDE.

Se recomienda trasplantar las plántulas de arroz cuando tengan de tres a cinco hojas totalmente desarrolladas, situación que se presenta entre 15 y 25 DDE. Si la variedad es tardía y de desarrollo lento, se recomienda trasplantar entre 25 y 45 DDE. Es muy importante que el trasplante se haga en esta etapa inicial de la planta y antes del inicio del macollamiento, para que éste empiece cuando la planta esté ya en su sitio definitivo.

Macollamiento (Etapa 20)

Esta etapa comienza con la aparición del primer hijo o macolla y termina cuando la planta desarrolla un número máximo de hijos.

Código 20. Después del trasplante, la planta sufre estrés durante 7 días, aproximadamente.

Código 21. Al comenzar esta etapa no se observa aún el inicio de la macolla.

Código 22. Aparece una macolla (primer hijo), y se cuentan ya cerca de 25 DDE.

Código 23. Se observa el segundo hijo primario a los 30 DDE.

Código 25. Se observa el tercer hijo primario a los 35 DDE

Código 26. Se observa el tercer hijo primario y un hijo secundario a los 40 DDE.

Código 27. A los 45 DDE se observan el segundo y el tercer hijo secundarios.

Código 28. Se observa el cuarto hijo primario a los 45 DDE.

Código 29. En los materiales tempranos, a los 50 DDE, se observa el cuarto hijo primario y el cuarto hijo secundario. En Miramono y en las variedades medianamente tempranas se observan seis hijos primarios, seis hijos secundarios y tres hijos terciarios a los 60 DDE.

Cuando las variedades ensayadas llegaron al máximo macollamiento, se habían desarrollado 11 hojas en dos materiales precoces, de las cuales murieron seis. En las plantas de Miramono nacieron 12 hojas de las cuales murieron 6. En los materiales precoces, el máximo macollamiento se alcanza después de la diferenciación del primordio.

Elongación del tallo (Etapa 30)

Esta etapa empieza cuando el cuarto entrenudo del tallo principal, situado debajo de la panícula, comienza a hacerse notorio por su longitud, y termina cuando ese entrenudo está totalmente elongado (o cuando empieza la siguiente etapa).

Código 31. Es notorio el crecimiento del cuarto entrenudo del tallo principal que se encuentra debajo de la panícula.

Código 32. El cuarto entrenudo del tallo principal continúa su elongación (o alargamiento).

Código 33. Se inicia el primordio floral.

Código 34. Continúa elongándose el cuarto entrenudo. La panícula mide 2 mm de largo.

Código 35. La hoja número 11 emerge totalmente. En este punto se observan ocho hojas en el tallo principal.

Código 36. El primordio de la panícula continúa creciendo.

- Código 37.** El 70% del cuarto entrenudo se ha elongado.
- Código 38.** El 80% del cuarto entrenudo se ha alargado en esta etapa.
- Código 39.** El cuarto entrenudo está totalmente desarrollado o elongado. Esta elongación coincide con el desarrollo de la panícula.

En las variedades semienanas de arroz, que son fotoin sensibles y tempranas, el cuarto entrenudo del tallo (debajo de la panícula) se alarga (elongación) de 1 a 3 cm antes de que la panícula sea visible. Inmediatamente después de percibida visualmente la iniciación de la panícula, se observa también que el entrenudo continúa su elongación en forma rápida, hasta que la panícula (la inflorescencia) haya emergido completamente sobre la hoja bandera.

Embuchamiento (Etapa 40)

Esta etapa empieza cuando la panícula ya diferenciada es visible, y termina cuando el extremo de las florecillas está justamente debajo del cuello de la hoja bandera.

Fernández et al. (1985) encontraron que, en las variedades tempranas, la panícula se desarrolla mientras ocurre la elongación del tallo. Cuando la panícula tiene 5 cm de longitud, comienza a diferenciarse en su morfología final.

- Código 41.** Se observa una ligera hinchazón en la parte superior del tallo.
- Código 42.** La panícula, que crece dentro de la vaina de la hoja bandera, continúa su crecimiento.
- Código 43.** La vaina de la hoja bandera empieza a abultarse.
- Código 44.** El abultamiento (o engrosamiento) de la vaina

de la hoja bandera es notorio.

- Código 45.** Continúa el abultamiento bajo la vaina de la hoja bandera.
- Código 46.** El ‘embuchamiento’ es ya notorio.
- Código 47.** Se pueden observar algunos granos dentro de la vaina de la hoja bandera. En este punto, el arroz se encuentra en ‘estado de preñez’.
- Código 48.** Se observan plenamente los granos dentro de la vaina de la hoja bandera.
- Código 49.** La panícula está a punto de salir de la vaina de la hoja bandera. Se alcanza a observar la hoja número 12. Cinco hojas han muerto al final de esta etapa.

Floración (Etapa 50)

Esta etapa comienza cuando la panícula sale de la vaina de la hoja bandera.

- Código 51.** Empieza a emerger la panícula de la vaina de la hoja bandera. Las anteras son de color blanco.
- Código 52.** El 15% de la panícula ha emergido. Se abren las flores del tercio superior de la panícula.
- Código 53.** El 30% de la panícula ha emergido. Hay antesis, es decir, apertura floral y polinización en el tercio superior de la panícula.
- Código 54.** El 40% de la panícula ha emergido. Se abren las flores del tercio medio de la panícula.
- Código 55.** El 50% de la panícula ha emergido.
- Código 56.** En este punto, el 60% de la panícula ha emergido.
- Código 57.** Hay antesis en el tercio medio de la panícula.

- Código 58.** El 80% de la panícula ha emergido.
- Código 59.** Se completa la antesis en toda la panícula, proceso que tarda de 4 a 7 días. En esta etapa sólo hay cinco hojas en la variedad Miramono y cuatro hojas en otras variedades.

El arroz trasplantado emplea hasta 10 días para completar la floración y la fecundación de todas las florecillas, porque las plantas desarrollan un número de macollas mayor que las del arroz de siembra directa. En este último caso, hay menos macollas pero la floración es más pareja. Al final de esta etapa, la planta deja de aumentar en altura.

Polinización y antesis (Etapa 60)

En esta etapa, las anteras empiezan a derramar el polen y éste inicia la fecundación de las espiguillas, una vez depositado en los estigmas.

- Código 61.** Las anteras del ápice de la panícula son visibles.
- Código 62.** El 20% de las anteras empieza a derramar polen.
- Código 63.** El 30%, aproximadamente, de las anteras se encuentran en antesis.
- Código 64.** El 40% de las anteras encuentran en antesis.
- Código 65.** El 50% de las anteras está en antesis.
- Código 66.** El 60% de las anteras está en antesis.
- Código 66.** El 60%, aproximadamente, de las espiguillas está derramando polen.
- Código 67.** El 70% de las espiguillas está polinizado.
- Código 68.** El 80% de las espiguillas está polinizado.
- Código 69.** Las espiguillas están todas polinizadas al finalizar esta etapa.

Grano lechoso (Etapa 70)

Esta etapa va del inicio de la antesis y la fecundación del ovario hasta que el contenido de los granos sea un líquido lechoso blanco.

- Código 71.** Los granos del ápice de la panícula empiezan a mostrar un contenido líquido.
- Código 72.** El líquido de esos granos es de apariencia lechosa.
- Código 73.** De 4 a 5 días después de la fertilización, las espiguillas del tercio superior de la panícula se llenan del líquido lechoso.
- Código 74.** El tercio medio de la panícula se llena del líquido lechoso.
- Código 75.** El 50% de los granos está lleno del líquido lechoso.
- Código 76.** El 60% de los granos está lleno del líquido lechoso.
- Código 77.** La panícula está totalmente llena del líquido lechoso.
- Código 78.** La panícula empieza a doblarse por el peso de los granos.
- Código 79.** Los granos toman un color verde, y el tercio superior de la panícula empieza a doblarse por el peso de los granos hasta describir un arco de 90° (respecto a su posición inicial). En este punto hay solamente tres hojas en el tallo principal de la planta.

Grano pastoso (Etapa 80)

En esta etapa, el contenido del grano empieza como un líquido lechoso blanco, y su consistencia se hace gradualmente pastosa suave, hasta que el grano se endurece. El color de la pasta se torna amarillo verdoso.

- Código 81.** La consistencia del grano cambia a pastosa suave en el ápice de la panícula.

- Código 82.** El grano continúa de color verde.
- Código 83.** El grano empieza a endurecerse (consistencia dura).
- Código 84.** Los granos de la parte intermedia de la panícula siguen adquiriendo consistencia pastosa.
- Código 85.** El color del grano empieza a cambiar al verde amarillento (verdoso).
- Código 86.** Los granos empiezan a mostrar un contenido sólido.
- Código 87.** La panícula dobla su punta en un arco de 180° y las ramificaciones de la mitad superior del raquis se doblan en un arco de 90° en su punta, a causa del incremento de peso de los granos.
- Código 88.** En este punto, todos los granos tienen consistencia pastosa.
- Código 89.** En las variedades tempranas, la hoja número 12 se marchita y sólo dos hojas permanecen en cada macolla. En esta etapa, la planta alcanza su máximo peso de materia seca.

Madurez fisiológica (Etapa 90)

Cuando el arroz se ha plantado en el trópico cálido, la planta llega a esta madurez aproximadamente 30 días después de la floración.

- Código 91.** El 10% de los granos toma un color amarillo pajizo, empezando por los del ápice de la panícula.
- Código 92.** El 40 % de los granos toma un color amarillo pajizo.
- Código 93.** El 30% de los granos toma un color amarillo pajizo.
- Código 94.** El 40% de los granos de cada panícula madura.

- Código 95.** El 50% de los granos de cada panícula madura.
- Código 96.** El 60% de los granos de cada panícula madura.
- Código 97.** El 70% de los granos llega a su estado de madurez.
- Código 98.** El 80% de los granos de cada panícula está totalmente maduro.
- Código 99.** El total (100%) de los granos está fisiológicamente maduro.

Esta condición ocurre a los 30 días después de la floración, cuando la panícula, por el peso de los granos, se encuentra a 180°, colgando del tallo. La hoja anterior y la hoja bandera permanecen verdes en algunas variedades o toman un color verde pálido en otras. Los granos que no han llenado conservan su color verde.

Referencias bibliográficas

- Alvarez, M.; Casanova, M. 2001. Análisis de crecimiento y desarrollo de cuatro genotipos de arroz sembrados en diferentes periodos en la región del Caribe húmedo. Trabajo de grado (Ing. Agrón.). Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad de Córdoba, Montería, Colombia. p. 34-46.
- Anten, N.P.R.; Schieving, F.; Medina, E.; Werger, M.J.A.; Schuffelen, P. 1995. Optimal leaf area indices in C3 and C4 mono- and dicotyledonous species at low and high nitrogen availability. *Physiologia Plantarum* 95(4):541-550.
- Ascencio, J.; Fargas, J. 1973. Análisis del crecimiento del frijol (*Phaseolus vulgaris* L., var. Turrialba 4) cultivado en solución nutritiva. *Turrialba* 23(4):420-428.

- Boonjung, H.; Fukai, S. 1996. Effects of soil water deficit at different growth stages on rice growth and yield under upland conditions. 2. Phenology, biomass production and yield. *Field Crops Research* 48(1):47-55.
- Buelvas, M.; Romero, L. 2000. Respuesta de la variedad de arroz Fedearroz 50 a cinco niveles de fertilización nitrogenada bajo riego, en la zona de Montería. Trabajo de grado (Ing. Agrón.). Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad de Córdoba, Montería, Colombia. 77 p.
- Charry, R. 2001. Comportamiento de la variedad de arroz Fedearroz 50 con diferentes métodos de siembra bajo riego, en la zona de Montería. Trabajo de grado (Ing. Agrón.) Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad de Córdoba, Montería, Colombia. p. 22.
- CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical). 1988. Conceptos básicos de fisiología del frijol. Manual audiotutorial. Contenido científico: Jeffrey White; producción: Clemencia Gómez y Carlos Valencia. Serie 04SB-07.01. Cali, Colombia. 54 p.
- Clavijo, J. 1989. Análisis del crecimiento en malezas. *Revista Comalfi* 16: 12-16.
- Collins, W.B. 1977. Analysis of growth in Kennebec. *American Potato Journal* 54:33-40.
- Coombs, J. 1988. Técnicas de fotosíntesis y bioproductividad. Colegio de Posgraduados, Chapingo, México y Editorial Futura, México DF. p. 258-266.
- Degiovanni, V. 1999. Investigaciones sobre el cultivo del arroz en el Caribe húmedo. Primer Seminario Técnico. Fedearroz y Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad de Córdoba, Montería, Colombia. 55 p.
- Degiovanni, V. 2003. Análisis del crecimiento, del desarrollo y de los componentes del rendimiento de tres genotipos de arroz en el Valle del Sinú. Trabajo para optar el grado de Magister en Ciencias Agrarias con énfasis en Fisiología de Cultivos. Convenio Universidad Nacional y Universidad de Córdoba. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá DC. 22 p.
- Egli, D.; Legett, J. 1976. Rate of dry matter accumulation in soybean seeds with varying source-sink ratios. *Agronomy Journal* 68:371-374.
- Evans, L.T. 1994. Crop physiology: Prospects for the retrospective science. In: Boote, K.J.; Bennett, J.M.; Sinclair, T.R.; Paulsen, G.M. (eds.). *Physiology and determination of crop yield*. p. 19-35.
- Fernández, F. 1978. Etapas de desarrollo de la planta de arroz para propósitos de evaluación y adiestramiento en el IRRI. Seminario interno, serie SE-16-78. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. 10 p.

- Fernández, F.; Vergara, B.S.; Yapit, N.; García, O. 1985. Crecimiento y etapas de desarrollo de la planta de arroz. In: Tascón, E.; García, E. (eds.). Arroz: Investigación y producción. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), Cali, Colombia. p. 83-101.
- Galindo, L.; Pineda, L. 2001. Análisis de los efectos climáticos sobre la estabilidad fenotípica de cuatro variedades comerciales de arroz en el Caribe húmedo. Trabajo de grado (Ing. Agrón.). Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad de Córdoba, Montería, Colombia. 65 p.
- Guerra, H.; Olave, J. 2002. Ganancia genética por rendimiento de grano en el arroz del Caribe húmedo. Trabajo de grado (Ing. Agrón.). Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad de Córdoba, Montería, Colombia. p. 24-28.
- Hodge, A. 2004. The plastic plant: Root responses to heterogeneous supplies of nutrients. *New Phytologist* 162(1):9-24.
- Horie, T. 2001. Increasing yield potential in irrigated rice: Breaking the yield barrier. In: Peng S.; Hardy, B. (eds.). Rice research for food security and poverty alleviation. International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños, Filipinas. 692 p.
- Hoyos, B.; de la Espriella, J. 2000. Efecto de la radiación solar y de la temperatura en el rendimiento de cuatro genotipos de arroz bajo riego y con diferentes épocas de siembra, en la región del Magdalena Medio. Trabajo de grado (Ing. Agrón.). Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad de Córdoba, Montería, Colombia. p. 35-55.
- Ishii, R. 1993. Leaf photosynthesis in rice in relation to grain yield. In: Abrol, Y.P. (ed.). Photosynthesis: Photoreactions to plant productivity. Kluwer, Dordrecht, Holanda. p. 561-569.
- Jarma, O.A. 2005. Cinética del crecimiento. Escuela de Posgrado, Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá DC. 12 p. (Mimeografiado)
- Jarma, O.A.; Buitrago, C.; Gutiérrez, S. 1999. Respuesta del crecimiento de la habichuela (*Phaseolus vulgaris* L. var. Blue Lake) a tres niveles de radiación incidente. *Revista Comalfe* 26:62-73.
- Kebede, H.; Johnson, R.C.; Carver, B.F.; Ferris, D.M. 1992. Physiological and anatomical features of two *Triticum dicoccoides* wheat accessions differing in photosynthetic rate. *Crop Science* 32:138-143.
- Kiniry, J.R.; McCauley, G.; Xie, Y.; Arnold, J.G. 2001. Rice parameters describing crop performance of four U.S. cultivars. *Agronomy Journal* 93:1354-1361.
- Kobata, T.; Uemuki, N. 2004. High temperatures during the grain filling period do not reduce the potential grain dry matter increase of rice. *Agronomy Journal* 96:406-414.

- Laza, M.R.C.; Peng, S.; Akita, S.; Saka, H. 2003. Contribution of biomass partitioning and translocation to grain yield under sub-optimum growing conditions in irrigated rice. *Plant Production Science* 6:28-35.
- Leopold, A.; Kriedman, P. 1975. *Plant growth and development*. 1a. ed. McGraw Hill, Nueva York. 365 p.
- Li, X.; Quian, Q.; Fu, Z.; Wang, Y.; Xion, G.; Zeng, D.; Wang, X.; Liu, X.; Teng, S.; Hiroshi, F.; Yuans, M.; Luo, D.; Hant, B.; Li, J. 2003. Control of tillering in rice. *Nature* 422:618- 621.
- Matsushima, S. 1976. High yielding rice cultivation. University of Tokyo Press, Tokyo. p. 125-130.
- Moore, T.C. 1979. *Biochemistry and physiology of plant hormones*. Springer Verlag, Nueva York. 274 p.
- Murty, K.S. 1977. Physiological aspects of production in rice. In: Padhi, B. (ed.). *Frontiers of plant sciences*. Utkal University, Bhubaneswar, India. p. 79-86.
- Murty, K.S. 1989. Physiological research on rice and future perspectives. In: Saxena, H.K.; Srivastava, R.D.L. (eds.). *Plant physiology research: Imperatives for the nineties*. Memorias de un simposio nacional. C. S. Azad University Agriculture and Technology, Kanpur, India. p. 1-9.
- Murty, K.S.; Venkateswarlu, B. 1978. Physiological constraints on growth and development in rice during khari season. In: *Increasing rice yield in Kharif*. Memorias de un simposio internacional. Central Rice Research Institute, Cuttack, India. p. 45-65.
- Nagamine, I. 1990. Genetic diversity and inheritance of photosynthetic activity of rice (*Oryza sativa* L.) detected by oxygen evolution in leaves. *Japan Agricultural Research Quarterly* 23:249-254.
- Peng, S.; Huang, J.; Sheehy, J.E.; Laza, Rebecca C.; Visperas, R.M.; Zhong, X.; Centeno, Grace S.; Khush, G.S.; Cassman, K.G. 1999. Rice yields decline with higher night temperature from global warming. *PNAS* 101(27):9971-9975.
- Polley, H.W. 2002. Implications of atmospheric and climatic change for crop yield and water use efficiency. *Crop Science* 42:131-140.
- Ramos, R.; Santos, M. 1995. Estudio de la relación fuente–demanda fisiológica en el maíz, de participación de la raíz y el tallo en el rendimiento, de desarrollo de la planta y de producción de grano. Trabajo de grado (Ing. Agrón.). Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad de Córdoba, Montería, Colombia. 107 p.
- Sharma, A.; Singh, R. 1999. Rice: Crop yield, physiology and processes. Central Rice Research Institute, División de Agronomía y División de Ciencia del Suelo y Microbiología (Cuttack, India). In: Smith, D.L.; Hamel, C. (eds.). Springer Verlag, Heidelberg, Alemania. p. 109-139.
- Uwe, M. 2001. Estadios de las plantas monocotiledóneas y dicotiledóneas BBCH. Monografía. Centro Federal de Investigaciones Biológicas para Agricultura y Silvicultura 2. p. 150.

- Vargas, J.P. 1985. El arroz y su medio ambiente. In: Tascón, E.; García, E. (eds.). Arroz: Investigación y producción. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), Cali, Colombia. p. 19-35.
- Wu, G.; Wilson, L.T.; McClung, A.M. 1998. Contribution of rice tillers to dry matter accumulation and yield. *Agronomy Journal* 90(3):317-323.
- Yin, X.; Lantinga, E.A.; Schapendonk, A.C.M.; Zhong, X. 2003. Some quantitative relationships between leaf area index and canopy nitrogen content and distribution. *Annals of Botany* 91:893-903.
- Yoshida, S. 1983. Rice. In: Potential productivity of field crops under different environments. *Memorias de un simposio. International Rice Research Institute (IRRI), Manila, Filipinas.* p. 103-127.
- Yoshida, S.; Parao, F.T. 1976. Climatic influence on yield and yield components of lowland rice in the tropics. In: *International Rice Research Institute (IRRI). Climate and rice. Memorias de un simposio. Manila, Filipinas.* p. 471-491.
- Zhang, W.; Kokubun, M. 2004. Historical changes in grain yield and photosynthetic rate of rice cultivars released in the 20th century in Tohoku region. *Plant Production Science* 7:36-44.