



Universidad Politécnica de Valencia

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y del
Medio Rural

Productividad y Manejo en Sistemas Agrícolas

Tema 2. Productividad

Valencia 2016

Jorge Cerezo Martínez



Índice

1. Introducción	3
2. Comunidad	4
3. Desarrollo y crecimiento	5
4. Acumulación de biomasa	5
5. Índices de Crecimiento y Desarrollo.....	8
6. Producción y distribución de materia seca.....	13
7. Productividad potencial.....	15

Jorge Cerezo Martínez

1. Introducción

Las **comunidades** de cultivos pueden quedar definidas por:

- El **contenido genético** (especie y cultivar)
- La **estructura del cultivo** (densidad, disposición espacial de las plantas, su tamaño y estado de desarrollo)

Como **tipos** de comunidad se pueden distinguir los siguientes:

- Monocultivo (espacio - tiempo)
- Policultivo y cultivo asociado

Urbano y Moro (1991): Define los **sistemas agrarios** como **ecosistemas formados por seres vivos** (plantas de cultivo y animales domésticos), que se desarrollan en un **medio determinado** (clima, suelo y medio biológico), que se encuentran implicados en un proceso de **interacciones recíprocas** entre sí y la vegetación adventicia, y que se ven, además, afectados por la **intervención del hombre** con sus técnicas de cultivos.

Un **ecosistema agrícola** se encuentra caracterizado por los siguientes puntos, (Odum, 1984):

- Número de **especies**, es menor que en un ecosistema natural
- La **autonomía energética** es relativamente baja como consecuencia de los aportes realizados por el hombre, en relación con los insumos, energía e información.
- Las especies de cultivo y animales se **seleccionan de forma artificial** y no natural
- Los **controles del sistema** se realizan de forma externa por medio del hombre
- La producción es determinante en un **sistema agrario**, de modo que **pequeñas variaciones en el rendimiento de un cultivo pueden considerarse importantes**.

Resulta, pues, necesario conocer una serie de **propiedades agronómicas** que influyen en su comportamiento y que, por tanto, definen a una comunidad de cultivos:

- Tasa de producción
- La competencia
- Los factores limitantes
- El contenido genético

En un **sistema natural** la **diversidad de las especies** es una de las principales características que definen el sistema. Por tanto, el conocimiento de la **composición** de especies del sistema puede ser tan interesante, como su **adaptación y evolución**.



En los ecosistemas naturales se entiende por **sucesión** al **progreso de cambio continuo en el que diferentes especies invaden un lugar y desplazan del mismo a otras especies más antiguas. La secuencia seguida se denomina sere.**

2. Comunidad

El concepto de **climax** hace referencia al **equilibrio que alcanza la comunidad con el ambiente**, a partir del cual los cambios se producen a un menor ritmo.

Las **especies anuales** son los primeros individuos que invaden los espacios desprovistos de plantas. Una vez establecidas las primeras plantas, se **incrementan los restos orgánicos en el suelo**, los **recursos hídricos son cambiantes** en el tiempo y la **competencia por los recursos naturales** aumenta como consecuencia de la mayor densidad.

A partir de este momento, la **especies arbóreas** se asienta y la **competencia por la radiación se acentúa**. Las plantas pueden entrar en un nuevo proceso de adaptación a una condiciones de mayor sombreo.

Dado este proceso, que termina favoreciendo a la especie dominante, aparece el concepto de **dominancia**, que **se refiere a la importancia relativa de la especie en relación con el número, tamaño o actividad en los procesos del ecosistema**.

En consecuencia, **las comunidades estarán constituidas por aquellas especies, que sean capaces de sobrevivir en el ecosistema**, bajo unos condicionantes determinados, fundamentalmente, por las especies competidoras.

La **competencia** por los **recursos hídricos** del suelo puede hacer que una especie presente un mejor **balance osmótico (sistema radicular)** y deseque el suelo. En estas circunstancias, las especies restantes, que compiten por el espacio con esta especie, deberán adaptarse para alcanzar una condición similar.

Competencia

Ejemplo: La mostaza (*Sinapsis arvensis*) puede considerarse como una mala hierba para los cereales.

Se caracteriza por poseer un **sistema radicular** muy extenso, siendo sus períodos de máximas necesidades hídricas coincidentes con los del cereal. Además, su **tasa de transpiración es superior a la de los cereales**.

Esta mala hierba podría **producir una rápida desecación del suelo** cuando el cereal presenta sus máximas necesidades en agua.



3. Desarrollo y crecimiento

Por **desarrollo** se entiende que *es el **crecimiento** ordenado de la planta, que se ajusta a un esquema previo determinado por el genotipo, y en la que distintas partes del organismo se van **diferenciando**, para originar los múltiples tejidos y órganos.*

Se puede considerar que el desarrollo es resultado de **2 procesos**, distintos pero estrechamente relacionados: **crecimiento de naturaleza cuantitativa y cualitativa** (ejemplo: fase vegetativa, fase reproductiva, ej: patata).

El **crecimiento** es el **aumento irreversible del tamaño de la planta**, acompañado generalmente, por un incremento irreversible y permanente de su masa (**peso seco**).

La **diferenciación** es el **conjunto de cambios estructurales y fisiológicos** que ocurren en una célula (o grupo de células), transformándola de embrionaria (**indiferenciada**) en adulta (**diferenciada**) (Ej: injerto).

Los acontecimientos que se producen durante el crecimiento y el desarrollo son los siguientes:

- Aumento del **número de células** como consecuencia de las divisiones celulares
- Aumento del **volumen** de cada célula como resultado de la expansión celular
- Modificación de la **forma y la organización de las células** como consecuencia de la diferenciación celular

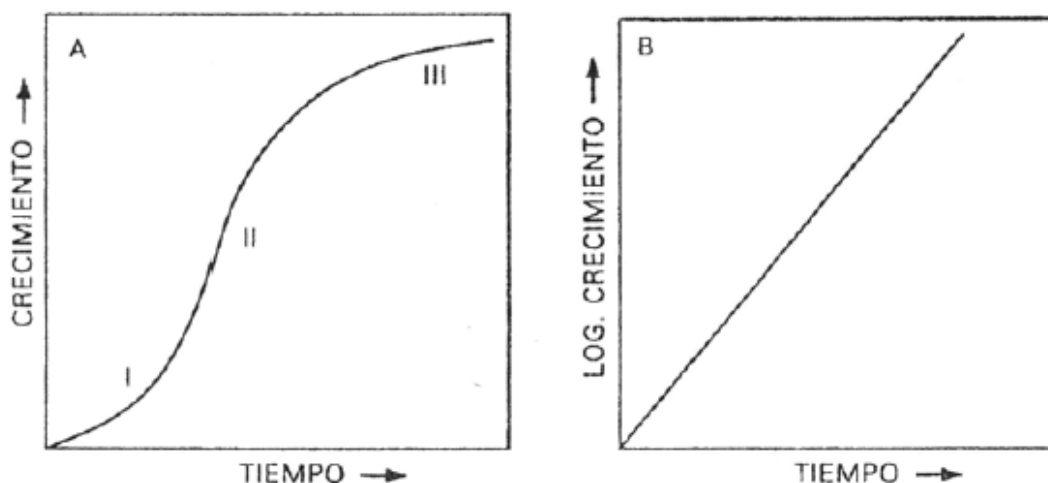
Se produce, únicamente, en regiones muy localizadas: meristemos:

- **Meristemos primarios:** Ápices de raíces y tallos, y yemas axilares: crecimiento en **longitud**
- **Meristemos intercales:** Bases de hojas y entrenudos: Crecimiento en **longitud**
- **Meristemos secundarios:** Cambium y felógeno o cambium suberógeno: Crecimiento en **grosor**.

4. Acumulación de biomasa

El conocimiento de la **cinética del crecimiento** posibilitará la **cuantificación del crecimiento**, utilizando, para ello, **múltiples parámetros o variables**.

El crecimiento de la planta viene caracterizado por la **curva de crecimiento**, que representa la variación del peso seco por unidad de tiempo. La principal característica de esta curva es su carácter **sigmoideal**; por tanto, se trata de una curva con un **punto de inflexión** y una **asíntota**.



Curva sigmoideal de crecimiento (A), y relación entre el logaritmo del crecimiento y el tiempo durante la fase exponencial, o fase 1 (B). Fuente: F. Pérez y J.B. Martínez-Laborde (1994). Introducción a la Fisiología Vegetal. Ed. Mundi-Prensa. Madrid.

Modelos matemáticos: Función de Richards (Logístico, Gompertz)

Modelo logístico:

$$C = \frac{A}{1 + e^{\beta - k \cdot t}}$$

Donde:

- C: Crecimiento acumulado
- A: Crecimiento final
- t: Período de crecimiento
- β : Parámetro referente a la posición de la curva
- k: Parámetro de velocidad
- β/k : Período para 50% crecimiento final (días)
- $k/2$: Velocidad media relativa de crecimiento acumulado (d^{-1})

Por tanto, puede considerarse que *la acumulación de materia seca varía con el tiempo y describe una curva de tipo sigmoideal*. El patrón de acumulación de los **cultivos anuales** es más sencillo.

La pendiente es el **índice de crecimiento (IC)** o **tasa de crecimiento del cultivo (TCC)**, que se define como *la variación de la biomasa (B) en el tiempo, $\Delta B/\Delta T$* , con unidades de $kg/ha \cdot d$ ó $g/m^2 \cdot d$.

La curva se obtiene muestreando periódicamente el cultivo a lo largo de la estación. Normalmente, se muestrea la parte aérea o de tubérculos o bulbos de los cultivos anuales, puesto que el muestreo de raíces es más complejo por su dificultad.

Cuando las condiciones de agua y nutrientes no limitan el crecimiento, las **raíces constituyen una parte pequeña**, aproximadamente un 10% del peso total, y el error es pequeño.

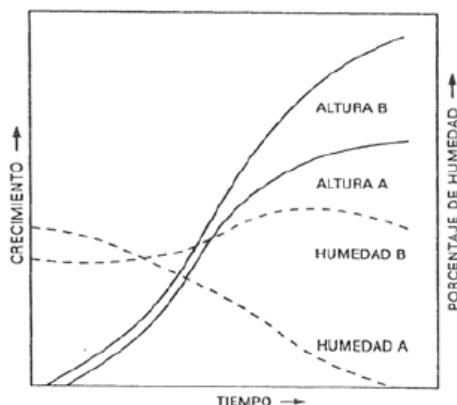
La curva de crecimiento comprende **tres fases**:

- **Fase inicial:** Es una fase de **crecimiento lento**, caracterizada por un crecimiento exponencial (Fase logarítmica). Comprende la fase de plantación y los primeros momentos del desarrollo. La superficie sombreada por el cultivo es reducida.
- **Fase central:** Es una fase de **crecimiento rápido** (fase lineal). Comprende una parte importante del período vegetativo.
- **Fase final:** Es una fase de envejecimiento o senescencia. Comprende las últimas etapas del desarrollo (floración y maduración del fruto). En esta fase la superficie queda, prácticamente, toda sombreada por el cultivo.

En cada una de estas fases de crecimiento la superficie sombreada por las hojas, denominada **cobertura**, es variable. La curva de crecimiento está relacionada con k_c .

La curva sigmoideal de crecimiento es una **curva teórica**. En la práctica la **curva real** es distinta de la curva teórica y depende de una serie de **factores** entre los que destacan los siguientes:

- Especie vegetal cultivada
- Medio en que se desarrolla la planta (agua del suelo, nutrientes, minerales, etc...)



Desviación de la curva de crecimiento de maíz (*Zea mays*) por efecto de *falta de humedad en el suelo*. Fuente: F. Pérez y J.B. Martínez-Laborde (1994). Introducción a la Fisiología Vegetal. Ed. Mundi-Prensa, Madrid.

La **eficacia de la producción** (productividad) de una población vegetal (cultivo) está determinado por:

- La cantidad de **materia seca** (t) formada por la población vegetal (cultivo) en una **superficie** determinada (superficie del suelo cubierta por la vegetación, ha)



en la unidad de **tiempo**(1 día, periodo vegetativo, 1 año...).

A su vez, la **producción de materia seca** depende de los siguientes factores:

- Extensión de las **superficies asimiladoras**
- **Duración o persistencia** del funcionamiento del aparato fotosintético (manejo de cultivo)
- **Velocidad de asimilación** de las distintas especies vegetales que componen la población (cultivo)

Para el control del crecimiento de plantas se deben, pues realizar una serie de **determinaciones** fundamentales como:

- La **superficie fotosintética** o asimiladores
- El **peso de la materia seca: Total** (de la planta entera) o **parcial** (de los distintos órganos o partes anatómicas de la planta como raíces, tallos, hojas, flores, frutos, etc...)

Estas determinaciones fundamentales, deben realizarse a **intervalos** variables (desde cada unos pocos días hasta 1-2 semanas), durante todo el **ciclo de cultivo**, hasta la recolección.

A partir de los valores obtenidos en las determinaciones de **área foliar** (superficie fotosintética) y de **materia seca**, se pueden calcular los **índices del crecimiento y el desarrollo**.

5. Índices de Crecimiento y Desarrollo

Los **índices de crecimiento** suministran **información** valiosa sobre:

- **Mecanismos** mediante los cuales se logra un determinado resultado productivo
- Posibles **factores limitantes**
- Posibilidad de **intervención en el cultivo** a nivel genético y agronómico, mediante técnicas o prácticas culturales

Los principales **índices de crecimiento** son:

- Índice de Crecimiento Relativo
- Índice de área foliar
- Duración del área foliar
- Velocidad de asimilación neta
- Velocidad de crecimiento del cultivo

Índice de crecimiento relativo (Relative Growth Rate)

El índice de crecimiento (IC) o tasa de crecimiento de un cultivo (TCC) puede calcularse mediante la siguiente expresión:

$$IC = \frac{\Delta B}{\Delta T}$$

Donde:

- B: Biomasa considerada como materia seca
- T: tiempo

Se puede obtener mayor precisión considerando el valor de IC cuando ΔT tiende a cero, es decir considerando la primera derivada:

$$\frac{dB}{dt}$$

Durante la fase exponencial, el **índice absoluto de crecimiento, es proporcional a B**:

$$\frac{dB}{dt} = \alpha B$$

Donde α es el **índice específico de crecimiento** (o índice de crecimiento relativo, **ICR**), y, por tanto, su valor es:

$$\alpha = \frac{1}{B} \cdot \frac{dB}{dt} \rightarrow ICR = \frac{1}{B} \cdot \frac{\Delta B}{\Delta T}$$

Esta tasa específica de crecimiento o **Índice de Crecimiento Relativo (ICR)** indica, pues, la **tasa de crecimiento por unidad de peso**, y, por tanto, sus unidades son, $g/g \cdot d$.

El valor medio durante un período de tiempo, este **índice de crecimiento relativo** se puede calcular como:

$$\overline{ICR}(\overline{RGR}) = \frac{\ln B_2 - \ln B_1}{T_2 - T_1}$$

Donde:

- B_1 y B_2 son los valores del peso seco en el momento T_1 y T_2 , respectivamente.

El valor de ICR varía a lo largo del ciclo de cultivo

Los valores de **ICR son elevados** durante la **fase de plántula**, pero a medida que las plantas aumentan su tamaño su valor disminuye.

Durante la **segunda fase**, la interacción de radiación y la fotosíntesis son máximas. En este momento, ICR varía fundamentalmente con los cambios en la **radiación solar**.

La **fase de senescencia** es una fase decreciente del cultivo, si bien ICR puede disminuir, también, como consecuencia de:

- Descenso de la **radiación y la temperatura** a finales del verano
- La **respiración** de mantenimiento consume gran parte de los **fotoasimilados** durante la fase de máxima cobertura

Índice de Área Foliar (**Leaf Area Index, LAI**)

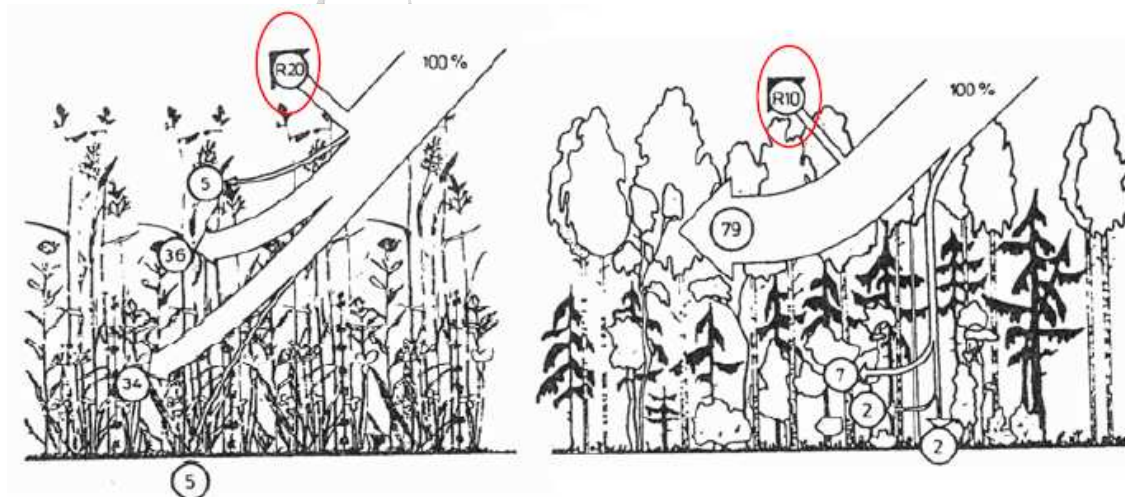
Indica la **eficacia de la captación de la radiación solar incidente por las superficies asimiladoras**. Integra los efectos de la **densidad** y de la **posición** de las superficies asimiladoras en la cubierta vegetal.

El LAI es el área de superficie foliar total existente sobre la unidad de superficie del suelo.

$$LAI = \frac{\text{Superficie foliar activa}}{\text{Superficie del suelo}}$$

Este índice es **adimensional**. El **valor óptimo** de este índice se alcanza cuando la radiación fotosintéticamente activa queda totalmente absorbida a su paso a través de la cubierta vegetal.

En ese momento en plantas de cultivo el LAI toma valores entre **4 y 5**, interceptándose más del **80% de la radiación** incidente fotosintéticamente activa.



Debilitación de las radiaciones en un bosque mixto boreal (derecha) y en un campo cultivado (de siega) (izquierda). En la superficie de la población del bosque se refleja (R) un 10% de la radiación incidente fotosintéticamente activa, y en el campo de cultivo un 20%. La radiación que consigue penetrar va siendo absorbida con distinta intensidad. Fuente: W. Larcher (1977). Ecofisiología Vegetal. Ed. Omega. Barcelona.

Duración del Área Foliar

La duración del área foliar (**Leaf Area Duration, LAD**) indica la **duración o persistencia** del funcionamiento del aparato asimilador (fotosintético) de la planta.

El LAD es el área de la superficie con capacidad de fotosíntesis por días de funcionamiento. Se calcula mediante la siguiente expresión:

$$LAD = \int_{t_1}^{t_2} LAI dt$$

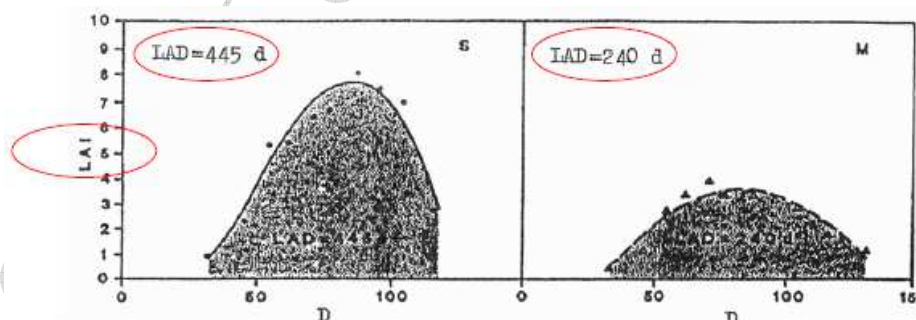
La integral equivale al **área limitada por la curva** que da la variación de LAI con el tiempo.

Se determina en un **intervalo de tiempo** en días, entre dos determinaciones realizadas en dos momentos sucesivos (t_1 y t_2)

$$LAD = \frac{\text{Superficie foliar activa}}{\text{Superficie del suelo}} \cdot d$$

Este índice es importante para especies de "**crecimiento determinado**" (formación de hojas vs diferenciación de la inflorescencia).

Además, este índice tiene en consideración el **efecto positivo** de la prolongación de la actividad fotosintética sobre el aumento de la productividad.



Ejemplos de LAI y de LAD en dos cultivos herbáceos extensivos de importancia: soja (S, izquierda) y maíz (M, derecha), D = días desde la nascencia. Fuente. L. Giardini (1992). Agronomia Generale. 4ª Ed. Pàtron Editore, Bologna.

Velocidad de Asimilación Neta (**Net Assimilation Rate, NAR**)

Indica la capacidad de asimilación (acumulación de C orgánico) del aparato fotosintético. El NAR determina el aumento del **peso** total de la materia seca (peso seco de la planta entera) por unidad de **área foliar** y por unidad de **tiempo**.

Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$NAR = \frac{W_2 - W_1}{L_2 - L_1} \cdot \frac{\ln L_2 - \ln L_1}{t_2 - t_1}$$

Donde:

- NAR: Velocidad de asimilación neta en gramos de materia seca por unidad de superficie foliar y día ($g/dm^2 \cdot d$)
- W_1 : Peso seco total de la planta en el momento t_1
- W_2 : Peso seco total de la planta en el momento t_2
- L_1 : Superficie foliar en el momento t_1
- L_2 : Superficie foliar en el momento t_2

Los niveles de NAR ($g/dm^2 \cdot d$) son los siguientes:

- **Plantas herbáceas** en climas templados: 0.05 - 0.1
- **Plantas leñosas**: 0.01- 0.02

Velocidad de Crecimiento del Cultivo (**Crop Growth Rate, CGR**)

Estima la eficacia productiva de una comunidad de plantas (Cultivo). Balance:

Los **productos obtenidos en la fotosíntesis** (hidratos de carbono) son utilizados en los procesos de **respiración** para generar energía para los procesos de síntesis y mantenimiento, y en la **producción primaria** (acumulación de biomasa).

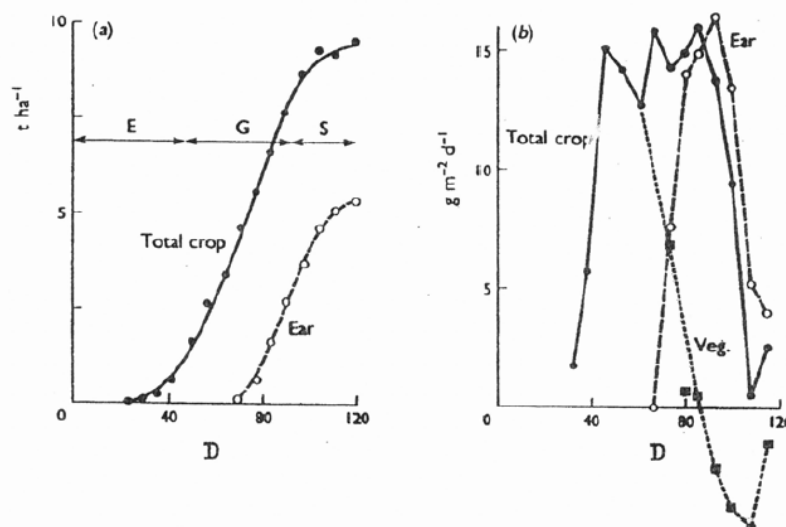
La **asimilación neta** estará determinada por la diferencia entre los productos consumidos por la respiración y los productos formados en la **fotosíntesis**.

El índice **CGR** estima la variación del peso de materia seca producida por unidad de superficie del suelo, en la unidad de tiempo.

$$CGR = \frac{W_2 - W_1}{(t_2 - t_1) \cdot S}$$

Donde:

- CGR: $g/m^2 \cdot d$
- W_1 y W_2 : Pesos de la materia seca (g) de dos muestras sucesivas tomadas en los momentos t_1 y t_2 (d), respectivamente. Normalmente, solo se controla el peso de la materia seca de la **parte aérea**.
- S: Superficie del suelo (m^2) a la que se refiere el peso



(a, izquierda). Acumulación con el tiempo de biomasa total (Total crop) y de mazorcas (Ear), en t/ha, en un cultivo de maíz.

(b, derecha). Velocidades de crecimiento del cultivo (Total crop), de las mazorcas (Ear) y de las partes vegetativas (Veg.), en $g/m^2 \cdot d$, en un cultivo de maíz.

Donde D = días desde la nascencia, y E,G y S indican las fases 1, 2 y 3, respectivamente, de la curva de crecimiento. Fuente. R.S. Loomis y D.J. Connor (1992). Crop Ecology, Cambridge, University Press, Cambridge.

6. Producción y distribución de materia seca

En la **valoración económica** de un cultivo puede definirse un **coeficiente de producción económica** o de **rendimiento económico**, considerado como la relación entre la cosecha o producción económica y la biomasa total.

Sin embargo, la dificultad o imposibilidad de determinar la materia seca acumulada en las raíces de las plantas de cultivo hace que se tenga que considerar el **índice de cosecha**.

Un índice, que permite realizar una valoración de la producción es el **índice de cosecha (IC) (Harvest Index, HI)**.

Este índice determina la **producción de materia seca** (ms) en forma de productos útiles directa o indirectamente con valor económico (**producción económica**).

Esta consideración es más importante que la producción total de materia seca (producción primaria o biomasa). Ejemplos de producción económica:

- Granos en trigo, maíz...
- Raíz en remolacha

- Frutos en frutales

La producción de fotoasimilados se reparte entre la respiración y la producción de materia seca, que se acumula durante el ciclo del cultivo y se reparte entre los distintos órganos de la planta.

El **índice de cosecha (IC)** es la relación entre **cosecha** o **producción económica** y la **biomasa** de la parte aérea. Es decir, la relación entre la materia seca presente en el producto económicamente útil y la materia seca producida por la parte aérea del cultivo. Este coeficiente es **adimensional**.

En **cultivos forrajeros** el IC alcanza valores elevados (0.9), dado que el aprovechamiento de la materia seca es máximo. Otros cultivos con valores elevados de IC son el **tabaco** (0.9), la **patata** (0.8) y la **remolacha azucarera** (0.7).

En la mayoría de los cultivos y en particular en los **cereales** de grano puede observarse una evolución en el tiempo de los valores de IC, lo que ha permitido un incremento notable en los rendimientos. En cultivos como el **trigo** se ha pasado de valores de IC comprendidos entre 0.25 y 0.30 a obtener valores de 0.5 en las variedades modernas. En muchos cultivos el IC se encuentra comprendido entre 0.3 y 0.4.

Cultivo	IC	IC _{max}
Ajo	50-55	55
Alfalfa	90	90
Algodón	25-35	40
Arroz	40-45	50
Avena	40-45	50
Cacahuete	35-40	40
Colza	30-35	35
Cebada	40-45	50
Garbanzo	20-30	30
Guisante	25-35	40
Habas	35-45	45
Judía grano	25-35	40
Maiz	40-50	45
Patata	60-70	80
Remolacha azucarera	50-60	70
Soja	45-50	50
Sorgo grano	40-50	50
Tabaco	90	90
Tomate industria	45-55	60
Trigo	40-45	50

La **producción económica** es el resultado de la **interacción** de diferentes componentes individuales. Por ejemplo, en trigo la **producción de grano** por m² superficie es *igual al número de espigas por m² por el número de espiguillas por espiga por el número de granos de cada espiguilla por el peso medio de cada grano*, en la recolección.

El IC depende de **factores** como:

- La **cinemática** de crecimiento y el desarrollo del cultivo
- La distribución de asimilados entre los órganos de la planta
- La capacidad de traslocación de asimilados hacia los órganos aprovechables

En este sentido, pues, el **aumento de la producción económica** se produce con un manejo adecuado de los factores de Producción Vegetal con el **medio**, a través de las técnicas de cultivo, y la **planta**, gracias a la **mejora genética**.



7. Productividad potencial

La **productividad potencial** se considera que *es aquella que puede ser obtenida de una especie de cultivo particular, cuando no se encuentra limitada o restringida por los medios técnicos disponibles*. Es decir, cuando los mejores **cultivares**, los **fertilizantes**, la **maquinaria**, el **trabajo**, etc. incluyendo los **conocimientos científicos y técnicos**, están todos disponibles y se aplican de la mejor manera posible.

El **rendimiento de un cultivo** en situaciones no limitantes puede considerarse **una función dependiente de variables como la cantidad de radiación interceptada, la eficiencia en el uso de la radiación y del índice de cosecha** (Villalobos et al., 2002).

A su vez, estas variables se encuentran influenciadas por factores como:

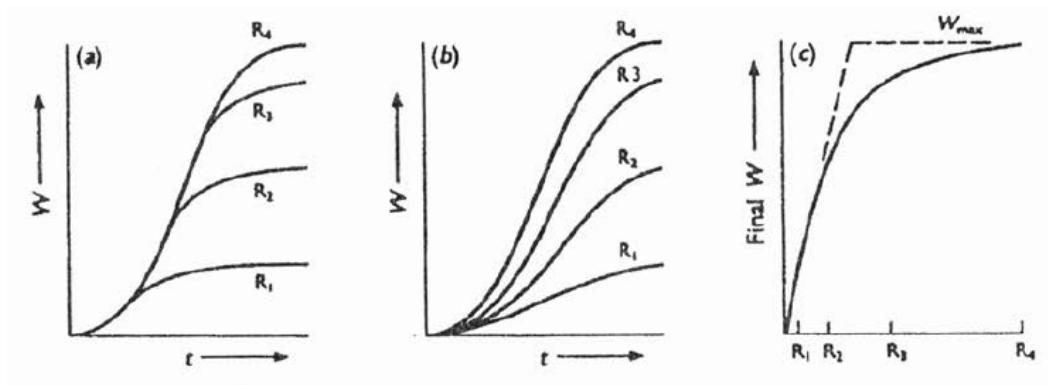
- Disponibilidad de **agua**
- Disponibilidad de **nutrientes**
- **Temperatura**
- **Salinidad**
- **Propiedades del suelo**: Físicas, químicas y biológicas

La determinación o estimación de la **productividad potencial** se puede realizar mediante **modelos teóricos**. Estos modelos matemáticos son complejos que incluyen variables relacionadas con el clima y las características fisiológicas y morfológicas de la especie. En la práctica estos modelos teóricos **deben ser validados**.

Se puede realizar una **estimación teórica** de la productividad potencial. Una cubierta vegetal intercepta prácticamente toda la radiación luminosa, puede producir teóricamente (día soleado, latitud media) $68 \text{ g m. s/m}^2 \text{ d}$ (Loomis y Connor, 1992).

En la práctica resulta imposible alcanzar estos valores teóricos, por los **factores o procesos limitantes**, relacionados con la planta (**factores genéticos**) y con el medio (**Factores climáticos, edáficos, nutricionales, biológicos, culturales, etc...**).

El agricultor o técnico debe tener como **objetivo** importante: eliminar o reducir todos los factores o procesos limitantes, que se opongan o restrinjan la productividad potencial.



- Variación con el tiempo (t) de la acumulación de biomasa (W) en cultivos con diferente disponibilidad/suministro inicial de un factor limitante ($R_1 \rightarrow R_4$).
- Variación con el tiempo de acumulación de biomasa con niveles de limitación variables de un factor, cuya disponibilidad nunca es adecuada.
- Biomasa total producida finalmente por los cultivos de (a) ó (b) en función del nivel del factor. W_{max} = Productividad máxima.

Fuente: R.S. Loomis y D.J. Connor (1992). Crop Ecology. Cambridge, University Press, Cambridge.

Jorge Cerezo Martínez