

UNIVERSIDAD DE GRANADA

FACULTAD DE CIENCIAS

ESTUDIO DE ALGUNOS ASPECTOS  
FISIOLÓGICOS Y NUTRICIONALES  
DEL CULTIVO DE MAÍZ (*ZEA MAYS L.*)  
EN LA VEGA DE GRANADA

TESIS DOCTORAL

CLEMENTINA POZO LLORENTE

GRANADA 1991



Biblioteca Universitaria de Granada



01534014

Pr. T-12-3+6

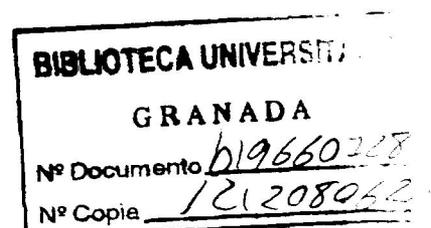
FACULTAD DE CIENCIAS  
DEPARTAMENTO DE FISILOGIA VEGETAL (BIOLOGIA VEGETAL)

ESTUDIO DE ALGUNOS ASPECTOS FISIOLÓGICOS Y  
NUTRICIONALES DEL CULTIVO DE MAIZ (Zea mays L.) EN LA VEGA DE  
GRANADA

TESIS DOCTORAL

UNIVERSIDAD DE GRANADA

1991



ESTUDIO DE ALGUNOS ASPECTOS FISIOLÓGICOS Y NUTRICIONALES DEL  
CULTIVO DE MAIZ (Zea mays L) EN LA VEGA DE GRANADA.

CLEMENTINA POZO LLORENTE

UNIVERSIDAD DE GRANADA  
Facultad de Ciencias  
Fecha 18 - SET - 1991  
ENTRADA NUM. 3165

Memoria presentada para aspirar al grado de DOCTOR EN CIENCIAS, Sección  
Biológicas.

Fdo: Clementina Pozo Llorente  
Lda Ciencias Biológicas

Directores:

Fdo: José M<sup>a</sup> Ramos Clavero  
Prof. Titular Biología Vegetal  
Facultad de Ciencias  
Universidad de Granada

Fdo: Luis F. García del Moral Garrido  
Prof. Titular Biología Vegetal  
Facultad de Ciencias  
Universidad de Granada

**La memoria presentada ha sido realizada en el CENTRO DE INVESTIGACION Y DESARROLLO AGRARIO DE GRANADA, dependiente de la Dirección General de Investigación y Extensión Agrarias.**

A la memoria de mi padre

A mi madre y hermanos

Quisiera dar las gracias en primer lugar a mis amigos y compañeros del Dpto de Suelos y Riegos. A Jorge Alvarez por su inestimable ayuda y constante apoyo en la realización de esta Memoria. A Carmen Cruces por su trabajo en la determinación de los análisis de tierras y aguas, así como por su gran confianza y ánimo en los momentos difíciles. A Barbara Camacho por su colaboración en las determinaciones experimentales. A Pepe Vilchez por su trabajo en el campo. A Santiago Bonachela por su apoyo.

Así mismo quiero expresar mi más sincero reconocimiento a la labor realizada por los Dres D. José M<sup>a</sup> Ramos Clavero y D. Luis F. García del Moral, labor no exenta de una gran paciencia y dedicación.

Deseo hacer constar mi agradecimiento al Director del C.I.D.A. de Granada, D. Armando Martinez Raya, y a la Dirección General de Investigación y Extensión Agrarias por su apoyo en la elaboración de esta Memoria, así como por su colaboración en la utilización de los medios necesarios. Este agradecimiento se hace extensivo a todo el personal de este Centro por su constante ayuda, y especialmente al personal del campo sin el que este trabajo no se hubiera realizado.

Gracias al Director del Laboratorio Agrario de Atarfe, D. José Manuel Pozuelo, y al personal de los Dptos de Foliar y Suelos por su gran colaboración en la determinación de los análisis de material vegetal y suelos.

Por último quiero dar las gracias a todos mis amigos que han soportado los días difíciles, dándome ánimos en todo momento.

A todos, muchas gracias.

**INDICE**

## INDICE

1. OBJETIVOS.....	1
2. INTRODUCCION.	
2.1. Importancia económica.....	2
2.1.1. Situación del cultivo en España.....	2
2.1.2. El maíz en la alimentación humana.....	3
2.1.3. El maíz en la alimentación del ganado.....	4
2.1.4. El maíz en la industria.....	4
2.2. Clasificación bótanica y Origen.....	4
2.2.1. Clasificación bótanica.....	4
2.2.2. Origen del maíz.....	6
2.3. Morfología y Desarrollo de la planta.....	12
2.3.1. Morfología.....	13
2.3.1.1. Sistema radicular.....	13
2.3.1.2. Los tallos.....	14
2.3.1.3. Las hojas.....	14
2.3.1.4. Las inflorescencias.....	16
2.3.1.5. El grano.....	17
2.3.2. Desarrollo de la planta.....	19
2.3.2.1. Fase Vegetativa.....	20
2.3.2.2. Fase reproductiva.....	23
2.4. Desarrollo del cultivo.....	25
2.4.1. Dosel Foliar.....	25
2.4.2. Producción y redistribución de asimilados.....	28
2.4.3. Nutrientes (N, P y K) en la planta.....	30
2.4.4. Componentes del rendimiento.....	33
2.5. El nitrógeno y el maíz	
2.5.1. Introducción general.....	35
2.5.2. Efecto del nitrógeno sobre la capacidad de "fuente" del maíz.....	39
2.5.3. Efecto del nitrógeno sobre la capacidad de "sumidero" del maíz.....	40
2.5.3.1. Efecto sobre el NGM.....	40
2.5.3.2. Efecto sobre el PMG.....	41

<b>3. MATERIAL Y METODOS.</b>	
3.1. Localización de las parcelas.....	42
3.2. Características climatológicas.....	42
3.3. Análisis y tipo de suelo.....	43
3.4. Características del cultivo.....	44
3.5. Diseño experimental y determinaciones experimentales ..	49
3.5.1. Diseño experimental.....	49
3.5.2. Determinaciones experimentales.....	49
3.5.2.1. Determinación de parámetros primarios y de producción.....	52
3.5.2.2. Determinación de nutrientes en material vegetal.	53
3.5.2.3. Determinación de nutrientes en suelo.....	55
3.6. Cálculo de los coeficientes de sendero.....	56
3.7. Cálculo de los índices de crecimiento.....	58
INDICE ALFABETICO DE SIGLAS Y ABREVIATURAS.....	63
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSION.....</b>	<b>65</b>
4.1. ESTUDIO DE LA RESPUESTA DEL CULTIVO A LA DOSIS Y FECHA DE APLICACION DEL FERTILIZANTE NITROGENADO. 1988-1989	
4.1.1. Producción de grano.....	66
4.1.1.1. Relaciones entre cosecha y componentes	
4.1.1.1.1. Análisis mediante correlación lineal.....	68
4.1.1.1.2. Análisis mediante coeficientes de sendero..	69
4.1.2. Crecimiento del cultivo.....	75
4.1.2.1. Evolución de los índices de crecimiento	
4.1.2.1.1. Indices del periodo vegetativo.....	75
4.1.2.1.2. Indices del periodo reproductivo.....	78
4.1.2.1.3. Relaciones entre índices y cosecha.....	79
4.1.2.2. Dosel foliar.....	80
4.1.2.2.1. Evolución de la superficie foliar por planta	
4.1.2.2.1.1. Nºde hojas por planta.....	80
4.1.2.2.1.2. Superficie foliar por planta.....	82
4.1.2.2.2. Distribución de la superficie foliar.....	84
4.1.2.3. Evolución y distribución de materia seca.....	85

4.1.2.3.1. Evolución de materia seca por planta.....	85
4.1.2.3.2. Distribución de materia seca en la planta..	88
4.1.2.3.3. Redistribución de materia seca.....	92
4.1.3. Nutrientes en planta.....	94
4.1.3.1. Evolución y distribución de nutrientes .....	94
4.1.3.2. Extracción de nutrientes por el cultivo.....	101
4.1.4. Nutrientes en suelo.....	103
4.1.4.1. Evolución y distribución de N-NO <sub>3</sub> .....	103
4.2. ESTUDIO DE LA RESPUESTA DEL CULTIVO A DOSIS VARIABLES DE FERTILIZANTE NITROGENADO, FOSFORICO Y POTASICO. 1990	
4.2.1. Producción de grano.....	108
4.2.1.1. Relaciones entre cosecha y componentes	
4.2.1.1.1. Análisis mediante correlación lineal.....	111
4.2.1.1.2. Análisis mediante coeficientes de sendero..	112
4.2.2. Crecimiento del cultivo.....	115
4.2.2.1. Evolución de los índices de crecimiento	
4.2.2.1.1. Índices del periodo vegetativo.....	115
4.2.2.1.2. Índices del periodo reproductivo.....	117
4.2.2.1.3. Relaciones entre índices y cosecha.....	119
4.2.2.2. Dosel foliar.....	120
4.2.2.2.1. Evolución de la superficie foliar por planta	
4.2.2.2.1.1. Nº de hojas por planta.....	120
4.2.2.2.1.2. Superficie foliar por planta.....	122
4.2.2.2.2. Distribución de la superficie foliar.....	125
4.2.2.3. Evolución y distribución de materia seca.....	127
4.2.2.3.1. Evolución de materia seca por planta.....	127
4.2.2.3.2. Distribución de la materia seca en planta..	130
4.2.2.3.3. Redistribución de materia seca.....	134
4.2.3. Nutrientes en planta.....	136
4.2.3.1. Evolución y distribución de nutrientes.....	136
4.2.3.2. Redistribución de N,P y K.....	143
4.2.3.3. Extracción de nutrientes por el cultivo.....	144
4.2.4. Nutrientes en suelo.....	147
4.2.4.1. Evolución y distribución de N-NO <sub>3</sub> .....	147
4.2.4.2. Evolución de fósforo y potasio.....	152
4.3. DISCUSION GENERAL.....	155

5. CONCLUSIONES.....	161
6. BIBLIOGRAFIA.....	163
APENDICE DE TABLAS.....	177

## **1. OBJETIVOS**

## 1. OBJETIVOS

A pesar de que el maíz está considerado como el principal cultivo de verano en la Vega de Granada, muy poco se conoce acerca de la evolución fisiológica del cultivo, no existiendo tampoco información sobre la dosis y épocas de aplicación más adecuadas de la fertilización nitrogenada para el cereal en la zona. Es por ello que los objetivos del presente trabajo, a desarrollar durante los años 1988, 1989 y 1990, fueron en un principio:

1. Averiguar las posibles causas de variación en el rendimiento del maíz, en base al estudio de los componentes de la producción, así como al análisis fisiológico del crecimiento y desarrollo a lo largo de todo el ciclo del cereal.

2. Evaluar las respuestas del cultivo a dosis y épocas de aplicación variables de fertilizante nitrogenado, tomando como base las normalmente utilizadas por el agricultor de la zona.

Como consecuencia de la falta de respuesta del cultivo a la fertilización nitrogenada durante la primera y segunda campañas, hubo que ir añadiendo otros objetivos complementarios:

3. Estudiar las respuestas del cultivo al suministro de dosis variables de N, P y K, valorando la evolución de estos nutrientes en la planta a lo largo de todo el desarrollo.

4. Analizar la dinámica de N, P y K en el perfil del suelo, así como evaluar, mediante balances agua-suelo-planta, la posible incidencia del fertilizante nitrogenado sobre el nivel de contaminación del medio.

## **2. INTRODUCCION**

## 2. INTRODUCCION.

### 2.1. IMPORTANCIA ECONOMICA.

El maíz es uno de los cultivos más importantes en gran parte de las regiones templadas, subtropicales y tropicales del mundo. La gran cantidad de variedades existentes en el mercado, tanto para forraje como para grano, adaptadas a las condiciones locales de clima y de suelo, hacen posible su cultivo en gran número de países de los cinco continentes.

#### 2.1.1. Situación del cultivo en España.

El maíz se cultiva en todas las provincias españolas. Los últimos datos oficiales (Manual de Estadística Agraria, 1990) indican que la superficie total sembrada oscila alrededor de las 542.000 Ha (25% en secano y 75% en regadío). Las provincias que más superficie dedican a este cultivo son Badajoz, Zaragoza y Albacete con aproximadamente 40.000 Ha en regadío y Pontevedra y La Coruña con superficies superiores a 40.000 Ha en secano.

Las producciones han crecido desde 650.000 Tm a principios de siglo hasta más de 3 millones de toneladas en los últimos años (concretamente para 1987 la producción nacional fué de 3.500.000 Tm, correspondiendo el 95% a maíz híbrido y el 5% restante a otros). Este aumento tan significativo en los últimos años se debe a la introducción de nuevas variedades (que han sustituido en gran parte a las variedades de polinización abierta ) y a las mejoras técnicas introducidas en el cultivo.

La cantidad de maíz grano importado durante los últimos cinco años (2.500.000 Tm), supone un gran desequilibrio en nuestra balanza de pagos puesto que las exportaciones son insignificantes frente a este volumen de compras. Dado que la sustitución de maíz por otros cereales grano se hace en pequeña proporción, la forma de equilibrar esta balanza de pagos está en aumentar las producciones y abaratar los costes de producción.

En la tabla 1i. se muestran las producciones y superficie cultivada de maíz grano en la provincia de Granada durante los años 1987, 1988 y 1989.

**Tabla 1i.** Producciones y superficie cultivada de maíz grano en la provincia de Granada. Años 1987, 88 y 89.

	Producción ( x000 Tm)	Superficie (Ha)
1987	61,9	7800
1988	60,0	8200
1989	40,7	6700

\* Manual de Estadística Agraria. M.A.P.A. (1990).

### 2.1.2. El maíz en la alimentación humana.

El grano de maíz contiene una elevada proporción de hidratos de carbono fácilmente digestibles, proteínas, grasas y muy pocas sustancias sin aprovechamiento alimenticio. Sin embargo, como alimento para el hombre, no presenta tanto valor nutritivo debido a la falta relativa de gluten, lo que hace que su harina sea poco panificable. Sin embargo, en amplias zonas de Africa, Centro y Suramérica, constituye la base de la alimentación (Jugenheiner, 1981):

- Con la harina y el producto de la molienda se fabrican las típicas "tortitas" de Sudamérica.
- Con el maíz fermentado se fabrica la "chicha" utilizada como bebida y componente de numerosos platos.
- Fabricación de isoglucosa, edulcorante de alto contenido en fructosa.
- Fabricación del "Xantham", goma utilizada como material aglutinante para líquidos.
- Obtención de almidón, utilizado en la fabricación de mermeladas y confituras.
- Obtención de aceites.
- Utilización del maíz dulce como verdura fresca.
- Utilización del " maíz reventón " en la fabricación de palomitas.

### 2.1.3. El maíz en la alimentación del ganado.

La lisina es un aminoácido esencial en la vida animal, del cual el grano dentado de maíz es deficitario. Los animales monogástricos (cerdos y aves), precisan en su dieta considerables cantidades de lisina, que no son aportadas por una dieta sólo a base de maíz. Sin embargo, los rumiantes presentan en su rumen una flora microbiana capaz de sintetizar lisina a partir de proteínas que no contengan este aminoácido.

### 2.1.4. El maíz en la industria.

- Utilización del aceite de maíz en la fabricación de municiones, pinturas, anticorrosivos y jabones.
- Utilización del almidón en la fabricación de lociones, pomadas, talcos, esmaltes, tintes de tejidos, baterías secas...
- Utilización de las dextrinas de maíz en la fabricación de engrudos, etiquetas engomadas, encuadernación de libros...
- En farmacia, la dextrosa se utiliza en la fabricación de ácido sacárido, tartárico y oxálico. Además, de la maceración del grano de maíz y posterior evaporación, se obtiene una sustancia gelatinosa que sirve de alimento a microorganismos productores de antibióticos; del agua de maceración se obtiene el inositol, compuesto importante del complejo vitamínico B.

## 2.2. CLASIFICACION BOTANICA Y ORIGEN.

### 2.2.1. Clasificación botánica.

El maíz (Zea mays) es una planta herbácea anual y monoica, cuyas células poseen  $2n = 20$  cromosomas. Pertenece a la familia Graminae, tribu Maydae. Esta tribu incluye ocho géneros, cinco de los cuales son de origen asiático: Coix, Schlerachne, Polytoce, Chinonachne, y Trilobachne y tres son

de origen americano: Zea, Tripsacum y Teosinte.

Tripsacum en estado natural presenta dos formas: diploide ( $2n=18$  cromosomas) y tetraploide ( $2n=36$  cromosomas). Se localiza en toda América Central y se extiende además a algunas regiones del Oeste y Este de E.E.U.U. y por el Sur hasta Brasil.

Teosinte también presenta dos formas: anual ( $2n=20$  cromosomas, T. mexicana) y perenne ( $2n=40$  cromosomas, T. perenne). Se localiza en México y Guatemala, estando la segunda forma (perenne) menos extendida y sólo localizada en determinadas zonas aisladas de México.

El género Zea solamente incluye una especie, Zea mays, con gran cantidad de variedades que presentaron y presentan dificultades para su clasificación. Existen numerosos sistemas para clasificarlas basados en las características y composición del grano y en el origen de la variedad. Según los primeros criterios (Koernicke, 1873; Von Sturtevant, 1899; Kuleshow, 1933; Grepenscikow, 1945) se determinarían las siguientes variedades de maíz:

Zea mays indentata Sturt. Maíz dentado.

Zea mays indurata Sturt. Maíz córneo.

Zea mays saccharata Sturt. Maíz dulce.

Zea mays amylacea Sturt. Maíz harinoso.

Zea mays everta Sturt. Maíz reventón.

Zea mays tunicata Sturt. Maíz tunicado. Es una variedad de maíz bastante peculiar ya que sus granos se encuentran envueltos por glumas.

Zea mays ceratina Kulesh. Maíz céreo. Se localiza esta variedad en el Este de Asia y los granos aparecen cubiertos por una capa de cera.

Las variedades atendiendo a su origen pueden clasificarse también de la siguiente forma:

- Variedades criollas
- Variedades mejoradas. (con símbolo V-número) ej: V-424.
- Variedades sintéticas. (con símbolo VS-número) ej:VS-201.
- Variedades híbridas. (con símbolo H-número) ej:H-507.

- Generaciones avanzadas de híbridos.
- Cruzamientos naturales y recíprocos entre maíces criollos con variedades mejoradas.
- Híbridos naturales de las diversas clases de semillas descritas con Teosinte.

La tendencia desde hace bastante tiempo, a pesar de la carestía de la semilla, es realizar siembras con variedades híbridas y, dentro de éstas, concretamente a sembrar híbridos simples o de tres líneas frente a los híbridos dobles procedentes del cruzamiento de dos híbridos simples. Los híbridos de maíz se clasifican en diez grupos atendiendo al nº de días desde nascencia a madurez fisiológica (FAO, 1952), tomando para cada grupo un maíz tipo y fijándose las variedades que deben incluirse en cada grupo, según los ciclos que tienen en la zona maicera ( Corn Belt ) de los E.E.U.U. En la tabla 2i se muestran los diversos ciclos, expresándose la denominación y los días desde nascencia a madurez.

Tabla 2i. Clasificación de variedades.

Ciclo FAO	Denominación	D.n.m.	Variedad tipo
100	Ultraprecoces	< 80	Wisconsin-1.600
200	Muy precoces	80-90	Wisconsin-240
300	Precoces	90-100	Wisconsin-355
400	Semiprecoces	100-105	Wisconsin-464
500	Semiprecoces	105-110	Ohio M-15
600	Ciclo medio	120-125	Iowa-4.316
700	Semitardíos	125-130	Indiana-416
800	Tardíos	130-140	US-13
900	Muy tardíos	140-150	US-523 W.
1000	Ultratardíos	>155	Florida W-1.

D.n.m. días de nascencia a madurez.

### 2.2.2. Origen del maíz.

El maíz tal y como lo conocemos es una planta totalmente domesticada. La más eficiente productora de grano entre todas las Gramíneas es incapaz de sobrevivir sin la ayuda humana, ya que no tiene forma de propagar sus

semillas. Los granos de maíz se agarran fuertemente a la mazorca y si se dejaran caer tal cual al suelo, brotarían tantos plantones que sería muy probable que ninguno de ellos llegase a la madurez. La mazorca con sus centenares de variedades ha sido creada por el ser humano para sus propios fines a lo largo de siglos de reproducción selectiva.

El maíz era ya el cultivo más importante en las comunidades indígenas anteriores al descubrimiento de América por los europeos (Birket-Smith, 1943). Por la época en la que Colón encontraba el maíz, los indios lo cultivaban desde Canadá hasta Chile. Era la base de todas las culturas precolombinas avanzadas, entre ellas las de los indios de Sudamérica, mayas y aztecas de América Central (en maya se llamaba "Ixi", en otomí "Detha", en quechua "Pirissincu", en guaraní "Abatí".....).

Más que otra planta, el maíz documenta su propia historia, ya que sus duras espigas están diseñadas para su conservación bajo condiciones muy diversas. Se han encontrado restos de maíz prehistórico que incluyen unas 25.000 mazorcas desde Arizona hasta Guatemala. Sin embargo, no se ha localizado ninguna anterior a 1492 en el Viejo Mundo.

La domesticación del maíz data de mucho antes del florecimiento de las civilizaciones precolombinas. Sobre el centro de origen y primera domesticación del maíz primitivo se han barajado varias hipótesis. Valivov (1938) opinaba que el maíz era de origen mexicano, mientras que Birket-Smith (1943) mantenía su hipótesis sobre el origen colombiano, especialmente por razones etnográficas. Según este autor, una segunda zona de domesticación estaría en Guatemala, donde se produjo una nítida hibridación con Tripsacum, siendo este hecho una fuente potencial de nuevas variedades que todavía continúa. Aunque los indígenas del Altiplano no eran criadores de maíz en el sentido actual, sí realizaban una cierta selección de las mejores mazorcas y granos. Es conocida la tradición de ofrecer a los dioses las mejores espigas de la cosecha anual antes de utilizarlas para la siembra posterior. Esta costumbre también puede observarse entre los indios desde México hasta Bolivia e incluso en las fiestas indígenas es costumbre ver las espigas de maíz vestidas como muñecas y ofrecidas en rituales.

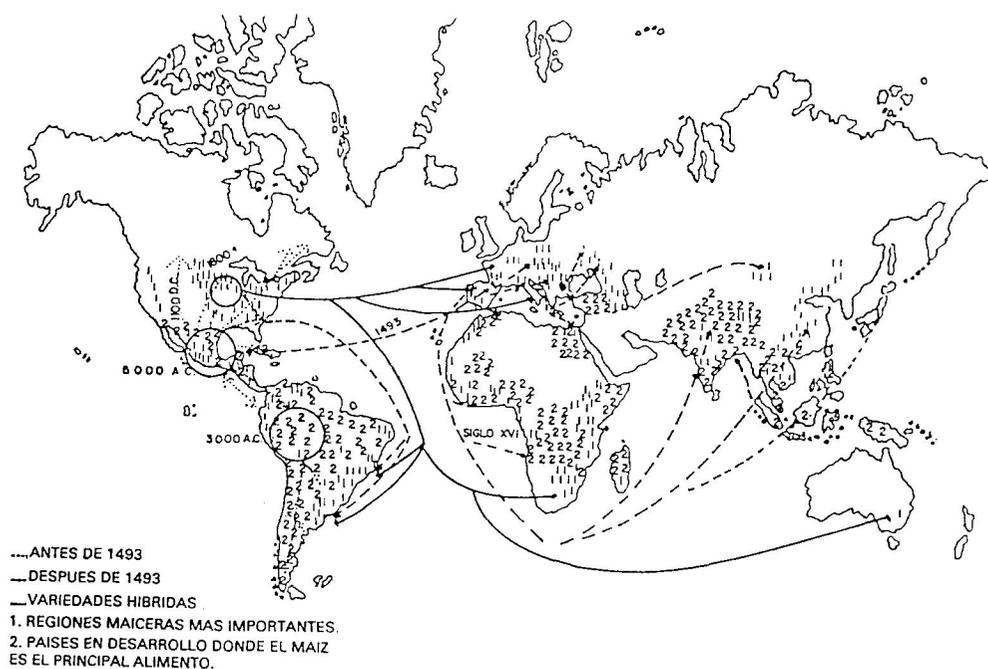
Los estudios arqueológicos llevados a cabo en los últimos años (MacNeish, 1967), han contribuido a aclarar el origen geográfico del maíz. Las muestras más antiguas se remontan a unos 5.000 a.C. (Mangelsdorf *et al.*, 1964), encontrándose mazorcas con sólo unos centímetros de longitud en las áridas cavernas del Valle de Tehucán, al sudeste de ciudad de México. Así, parece que el maíz fué domesticado en una pequeña región de México, al norte de Chiapas y sur de ciudad de México (MacNeish, 1967). De aquí se dispersó al Norte del continente y posteriormente hacia Europa y Asia.

La teoría sustentada por varios autores sobre el origen asiático del maíz produjo, como es natural, cierta confusión en las investigaciones etnológicas. Es un hecho indiscutible que los chinos ya en el siglo XVI cultivaban maíz y, dada la lentitud de las comunicaciones en aquella época, resulta difícil admitir que el Lejano Oriente haya podido entrar con tal rapidez en posesión de una planta de origen americano. Por su número cromosómico el maíz ocupa una posición muy cercana al género Coix, presentando ambos  $n=10$  cromosomas y de aquí la inicial teoría asiática sobre su origen. Anderson (1944) sostuvo esta opinión, afirmando que el maíz cultivado podría ser un híbrido entre un sorgo asiático y Coix. Pero los cruzamientos artificiales entre maíz y los géneros Coix o Polytoxa siempre fracasaron, por lo que parecen muy dudosos los datos ofrecidos por autores japoneses sobre resultados positivos en cruzamientos entre maíz y caña de azúcar. En cambio sí se observan cruzamientos de maíz con Teosinte y Tripsacum.

La semilla de maíz, que fue traída por Colón en su segundo viaje, no se sembró en Europa hasta el s.XVI; desde esa fecha y, al menos en Andalucía (en el valle del Guadalquivir y en tierras de Granada y Málaga), se sembró y tuvo cierta importancia. En las costas de Granada y Málaga los maizales se extendieron rápidamente y consta que se cuidaban bastante, llegando a costar en 1549 el Kg de pan de maíz un maravedí menos que el pan de trigo (Gil-Bermejo, 1970). Posteriormente, en zonas donde no llegó esta primera oleada, el maíz entró por el Mar Mediterráneo a través de la ruta Oriental de las Indias traído por los portugueses. Se implantó en zonas como Baleares y Cataluña, recibiendo la denominación de "grano turco". En la figura 1i se muestra el

origen y dispersión de las rutas del maíz antes de 1493 y después de 1493 ( fecha de la entrada del maíz en España).

Figura 1i. Origen y dispersión de las rutas del maíz.



Indiscutible ya el origen americano del maíz, durante más de un siglo dos han sido las principales teorías acerca de su filogenia. La más antigua sostiene que el maíz cultivado desciende de su pariente vivo más cercano: el teosinte anual, gramínea que vive en México y América Central (Ascheson, 1875). Este autor observó que en Guatemala se encontraban con cierta frecuencia plantas de maíz que se acercaban morfológicamente a una grama silvestre de crecimiento muy robusto. Las muestras de esta especie, así como las observaciones realizadas en estas regiones, indicaban que allí se producían hibridaciones espontáneas entre teosinte y maíz cultivado. Los cruzamientos y la variabilidad genética de las descendencias daban lugar a ciertos ejemplares que difícilmente podían distinguirse de un maíz primitivo. Las afirmaciones de Ascheson (1875) sobre la común filogénesis de maíz y teosinte cobraron fuerza

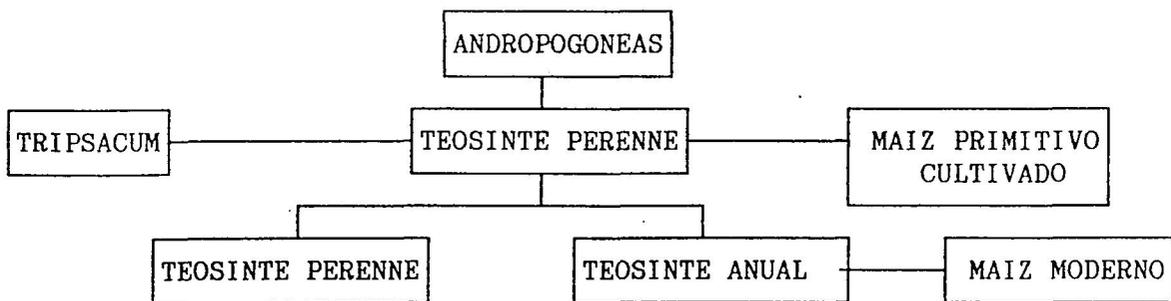
con los primeros estudios citológicos, que demostraron que los dos géneros presentaban el mismo número de cromosomas y los híbridos formaban bivalentes en la meiosis. Sin embargo posteriores estudios (Mangelsdorf y Reeves, 1939) demostraron que en realidad existía poco apareamiento entre los cromosomas de ambos géneros y que en Teosinte se presentaban fragmentos del género Tripsacum que habían aparecido por fenómenos de entrecruzamiento. En un principio esta segunda teoría sobre el origen del maíz fué bastante discutida, pero se apoyaba en minuciosos estudios de citogenética demostrando que determinados engrosamientos típicos de los cromosomas de Teosinte también se presentaban en Tripsacum. Por todo esto, Teosinte no podía ser considerado como género autónomo, quedando excluido como posible antepasado del maíz, considerándolo como progenie híbrida entre Zea mays y Tripsacum. Mangelsdorf y Reeves (1939) efectuaron cruzamientos entre maíz y Tripsacum obteniendo híbridos que en general se parecían a Tripsacum, ya que las plantas presentaban polen estéril y se comportaban como anuales. Sin embargo, después de revisar esta teoría de la ascendencia del maíz, se determinaron graves defectos en la misma.

En contraste con los miles de muestras de maíz halladas, sólo unos pocos fragmentos de Teosinte han aparecido en los yacimientos primitivos y, en los casos en los que se hallaron restos de Zea, Teosinte e híbridos, siempre los restos de maíz fueron más antiguos. Además, en 1979, se descubrió un nuevo teosinte, teosinte diploide y perenne: T. perennis, que adicionó nuevas muestras de la invalidez de la teoría del origen del maíz y teosinte existente hasta ese momento. Se planteó la hipótesis de que la hibridación del teosinte perenne diploide con una raza de maíz primitivo cultivado podría haber dado lugar a las diversas razas de teosinte anual. El maíz primitivo con el que hibridó T. perennis tuvo que ser un maíz tunicado, propiedad que presentaban los granos primitivos hallados en las cavernas de Tehuacán (Itlis, 1972), y apuntado ya en 1829 por el botánico francés Sant-Hilaire, quién creía que el carácter de la vaina tendió a desaparecer durante la domesticación. Este maíz tunicado primitivo, hoy en día extinguido, sería un maíz duro.

Así el maíz moderno y el teosinte anual descienden por hibridación del teosinte perenne con un maíz primitivo. Esta versión revisada de la teoría

cuenta con el apoyo decidido de los experimentos de cruzamiento, concluyéndose que el teosinte anual es progenie híbrida y no progenitor del maíz, siendo el otro parental el teosinte perenne en vez de Tripsacum. El maíz moderno, si bien ha heredado sus características bótanicas específicas de un pariente silvestre (mazorca característica con el raquis duro y los numerosos granos apareados en hileras), también ha heredado una contribución igualmente importante del teosinte perenne ( raíces robustas, tallos fuertes y resistencia a ciertas enfermedades). Parece seguro que la hibridación con teosinte perenne, hace aproximadamente 4.000 a.C., fué lo que inició la gran evolución del maíz como planta cultivada ( Mangelsdorf, 1986 ). En la figura 2i. se representa la genealogía del maíz.

Figura 2i. Genealogía del maíz.



El maíz primitivo, Tripsacum y T.perennis descienden de un antecesor remoto que probablemente perteneció a la tribu de las Andropogóneas, tribu que incluye a la caña de azúcar y al sorgo. En algún momento anterior al 4.000 a.C., se domesticó el maíz en México a partir de un antecesor silvestre que ya tenía las características bótanicas del maíz moderno. Hace aproximadamente

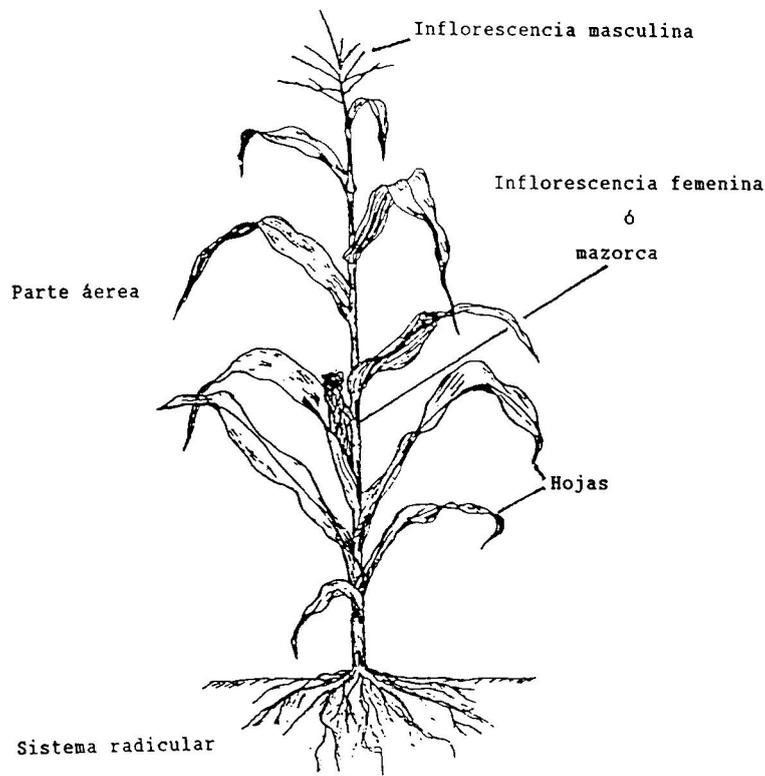
2.000 a.C., un primitivo maíz cultivado se hibridó con T.perennis. El resultado incluía teosinte anual (T.mexicana) y razas de maíz vigorosas y productivas. Posteriormente el maíz silvestre sustituido por el cultivado se extinguió.

### 2.3. MORFOLOGIA Y DESARROLLO DE LA PLANTA.

#### 2.3.1. Morfología.

El maíz es una planta anual, monoica, con un gran desarrollo vegetativo, que puede alcanzar hasta los 5 m de altura. Muy robusta, su tallo es nudoso y macizo y lleva entre 15 y 30 hojas alargadas y abrazadoras de borde áspero, finamente ciliado y algo ondulado. Desde el entrenudo inferior pueden nacer tallos secundarios que pueden dar lugar a mazorcas, pero por lo general éstas no suelen progresar (figura 3i.)

Figura 3i. Planta de maíz adulta.



### 2.3.1.1. Sistema radicular.

La planta posee un sistema radicular fasciculado bastante extenso formado por tres tipos de raíces:

-raíces primarias emitidas por la semilla que comprenden a la radícula y las raíces seminales.

-raíces principales o secundarias que comienzan a formarse a partir de la corona, por encima de las raíces primarias, constituyendo la mayoría del sistema radicular.

-raíces aéreas o adventicias que nacen en último lugar, en los nudos de la base del tallo por encima de la corona.

Al sembrarse el maíz en el campo, la radícula y las raíces seminales son rápidamente suplantadas por otras que forman el sistema radicular permanente. Sin embargo, esto no constituye una regla fija para todos los casos, ya que las raíces iniciales pueden permanecer funcionales durante todo el ciclo de vida, siendo capaces, en condiciones especiales, de suministrar todos los nutrientes necesarios para la planta (Ohlrogge, 1958). Los entrenudos existentes en los primeros nudos que se desarrollan por encima del mesocotilo sufren sólo un pequeño alargamiento, de manera que la parte basal de la planta se asemeja a un cono invertido al irse incrementando el diámetro de los nudos sucesivos. Cada uno de éstos da lugar a un anillo de raíces que forma el sistema radicular subterráneo. El diámetro de cada raíz está determinado por la circunferencia del nudo a partir del cual se origina y, como las raíces no tienen capa cambial, su diámetro definitivo queda fijado por los factores que inciden en las primeras etapas del desarrollo de la planta.

Las raíces aéreas emergen por lo general de los nudos más bajos ubicados por encima del suelo, hacia el final del crecimiento vegetativo. Si logran penetrar en el suelo, asumen la apariencia y función de las raíces normales. Existen considerables diferencias entre variedades con respecto a la cantidad de raíces aéreas y el número de nudos que dan lugar a las mismas. En la figura 4i. se muestra el sistema radical del maíz.

### 2.3.1.2. Los tallos.

EL tallo de maíz difiere del de muchas otras gramíneas en que está constituido por tejido parenquimático, llamado médula. Los haces vasculares formados por elementos de xilema y floema y rodeados por esclerénquima se localizan en esta médula, con tendencia a concentrarse en la periferia (figura 5i.).

El tallo está formado por entrenudos separados por nudos más o menos distantes. El grosor de éste disminuye de abajo hacia arriba, de manera que su sección es circular, pero desde la base hasta la inserción de la mazorca presenta una depresión que va haciéndose más profunda conforme se aleja del suelo. Desde el punto que nace el pedúnculo que sostiene a la mazorca, la sección del tallo es circular hasta la inflorescencia masculina o penacho que corona la planta.

El tallo además de sostener a las hojas y al grano, funciona como órgano de reserva de sólidos solubles, especialmente sacarosa, que puede contribuir al rendimiento en grano (Daynard et al., 1969). La cantidad de sólidos solubles que puede almacenar el tallo es función del volumen que ocupan los líquidos.

### 2.3.1.3. Las hojas.

Cada hoja de maíz está constituida por una lámina fina y plana, con una notoria nervadura central y una vaina más gruesa y rígida, con una nervadura central más pequeña (figura 6i.). Están dispuestas alrededor del tallo de tal manera que el ángulo entre éste y las hojas queda perfectamente establecido. Los distintos genotipos presentan considerable variación en la inclinación de las hojas, desde una posición casi horizontal a una vertical. El ángulo entre la vaina y la lámina también varía según la posición de la hoja; las inferiores presentan un ángulo mayor con respecto al tallo.

La lámina consiste en una epidermis superior y otra inferior, entre las cuales se localiza un mesófilo con estructura panicoide, típica de las gramíneas C4 como es el maíz. La epidermis superior está compuesta por

células alargadas paralelas a las nervaduras y a intervalos presenta bandas de células esferoidales que por cambio de turgencia, hacen que se enrollen y desenrollen. Algunas de las células epidérmicas adyacentes a las señaladas presentan pelos, cosa que no ocurre con la epidermis inferior. Los estomas son algo más numerosos en la epidermis inferior, pero su densidad es variable (Kiesselbach, 1949).

Figura 4i. Sistema radical del maíz.

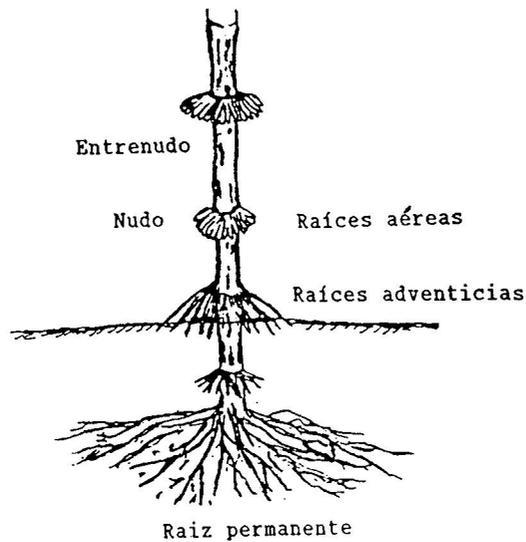


Figura 5i. Sección de un haz vascular.

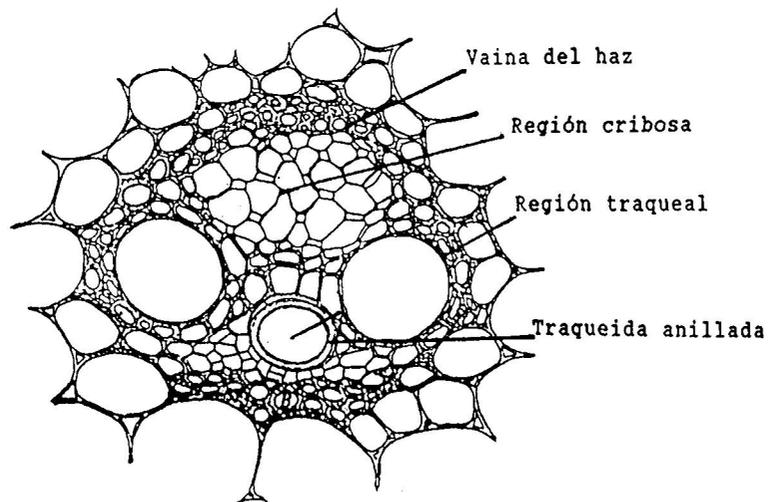
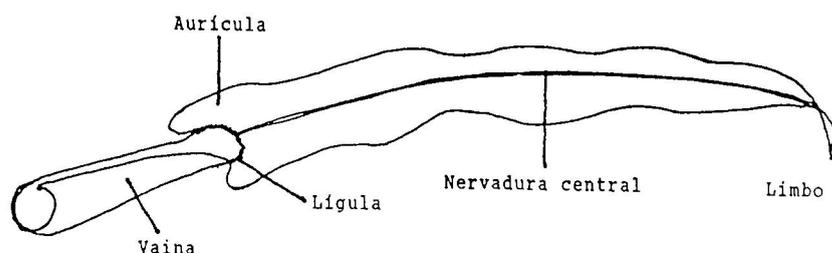


Figura 6i. Hoja de maíz.



#### 2.3.1.4. Las inflorescencias.

##### 2.3.4.1.1. Inflorescencias masculinas.

Las flores masculinas tienen de 6-8 mm, que salen por parejas a lo largo de muchas ramas finas de aspecto plumoso, situadas en el extremo superior del tallo (penacho). Cada flor masculina tiene tres estambres, largamente filamentosos (Bonnet, 1953) (figura 7i.). El desarrollo de las inflorescencias masculinas tiene lugar mientras que los entrenudos del tallo se alargan (Stevens et al., 1986), y la liberación del polen ocurre cerca del extremo distal de ésta para proseguir hacia abajo de este punto y hacia el extremo de las ramificaciones.

##### 2.3.4.1.2. Inflorescencias femeninas.

La mazorca o inflorescencia femenina es una estructura cilíndrica compuesta por hileras de protuberancias bilobuladas, cada una de las cuales da lugar a una espiguilla con dos flores de las que solamente persiste una. Como cada espiguilla da lugar a un grano, éstos también aparecen en hileras dobles, y como resultado final, la mazorca siempre presenta un número par de hileras de granos. El pistilo de la flor femenina se desarrolla a partir del punto de crecimiento de la flor. El estilo, conocido como barba o seda, se alarga a través de las brácteas de la mazorca impulsado por el crecimiento de un meristemo intercalar (figura 8i). El desarrollo del estilo comienza en las espiguillas basales, pero los situados más arriba en la mazorca pueden emerger

primero ya que la distancia que deben recorrer es mucho más corta. Cada estilo continúa su crecimiento hasta que es polinizado y ocurre la fertilización.

Figura 7i. Flor masculina

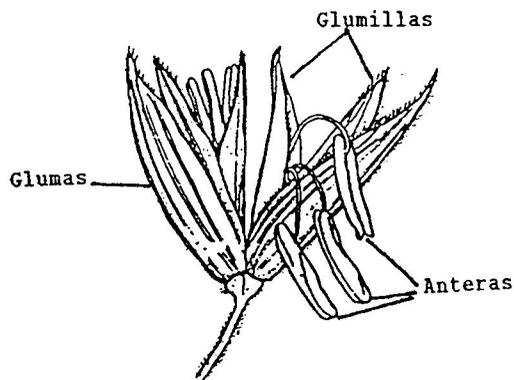
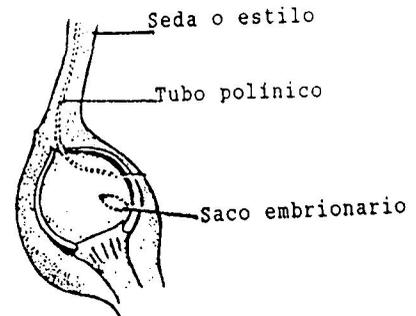


Figura 8i. Flor femenina.



#### 2.3.1.5. El grano.

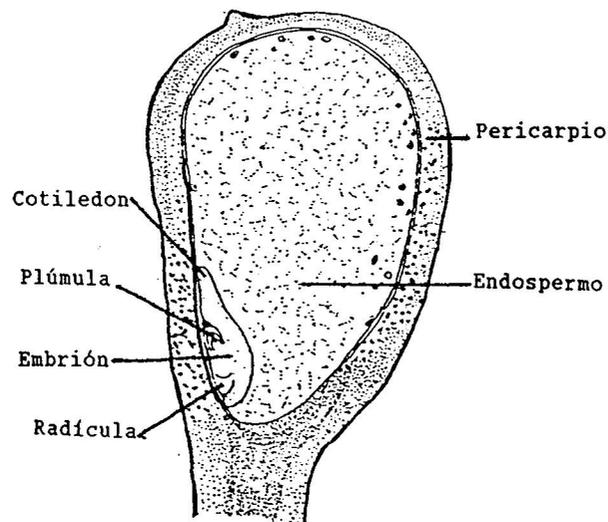
El grano de maíz es un fruto seco e indehiscente a cuya única semilla está adherido el pericarpio o envuelta exterior. Completa la estructura el endospermo o material de reserva que constituye el 80% del total (figura 9i). Cada una de estas partes tiene una función específica y un origen diferente:

- pericarpio: procede de la planta madre productora de la semilla y protege al embrión.
- endospermo: resulta de la multiplicación celular que sigue a la unión del núcleo secundario ( $2n$ ) del saco embrionario con uno de los dos gametos masculinos ( $n$ ). Es la reserva de la que se alimenta la nueva planta hasta que

pueda empezar a sintetizar por sí misma. En el grano de maíz se localizan dos tipos de endospermo; uno opaco y duro en apariencia que contiene la mayor parte de las proteínas de éste, y otra porción translúcida y rica en almidón. La proporción y disposición de estas dos porciones en el grano difiere con la variedad.

- embrión: se origina por multiplicación del cigoto resultante de la unión de la oosfera del saco embrionario con el otro núcleo espermático del gameto masculino. El embrión lo forman un eje embrionario constituido a su vez por la plúmula y la radícula (esbozos embrionarios de tallo, hojas y raíz) y el escutelo o cotiledón, cuya función es reserva de la semilla y plántula en las primeras fases del desarrollo.

Figura 9i. Estructura del grano de maíz.



### 2.3.2. Desarrollo de la planta.

El ciclo del maíz comienza en la primavera, con la siembra, y termina en otoño con la recolección. Entre estos dos puntos, la planta nace, crece, se reproduce y muere. A lo largo del tiempo, se han considerado multitud de sistemas para la descripción de los estadios presentes en el ciclo del cereal (Hanway, 1963; Ritchie y Hanway, 1982; Stevens et al., 1986; Ritchie et al., 1989). En todos ellos, la antesis se considera el estadio principal que marca el cambio del comportamiento de la planta.

Desde la germinación de la semilla hasta la antesis, la planta desarrolla y expande sus hojas secuencialmente y alarga los entrenudos del tallo hasta la aparición de la inflorescencia masculina, estadio en el que el número máximo de hojas y entrenudos queda establecido. A partir de la antesis y posterior fecundación, el óvulo sufre modificaciones estructurales y transformaciones en su composición química, hasta alcanzar el estadio de madurez fisiológica.

El estudio del desarrollo de la planta de maíz en el campo, requiere la utilización de tablas de identificación de los estadios en las fases vegetativa y reproductiva. La última escala, propuesta por Ritchie et al. en 1989, resume perfectamente los estadios del maíz, constituyendo una útil guía:

Fase vegetativa	Fase reproductiva
V(E) nascencia	R1 antesis
V1 1 <sup>o</sup> hoja visible	R2 grano acuoso
V2 2 <sup>o</sup> hoja "	R3 grano lechoso
V3 3 <sup>o</sup> hoja "	R4 grano pastoso
.	R5 grano dentado
.	R6 madurez fisiolog.
Vn n <sup>o</sup> hoja "	
V(T) emergencia inflorescencia masculina	

Ritchie et al., (1989).

### 2.3.2.1. Fase vegetativa.

La fase vegetativa de la planta de maíz, se inicia con la germinación y nascencia de la semilla (VE).

#### 2.3.2.1.1. Germinación y nascencia

La semilla de maíz contiene menos del 13% de agua y los mecanismos biológicos están prácticamente inhibidos. Cuando las semillas se colocan en un medio húmedo y caliente (como lo es el suelo en primavera), la actividad fisiológica comienza. La germinación exige una temperatura del suelo superior a los 10°C, preferiblemente entre los 12 y 15°C. Por debajo de este umbral, los procesos bioquímicos se producen de una forma lenta y, generalmente, el grano suele morir por la acción de los parásitos (Shaw y Thom, 1951). Wolfe (1927) determinó que la germinación incrementa cuando el contenido de agua del suelo es alrededor del 80%. Por encima de este valor, la germinación se inhibe a consecuencia de la falta de oxígeno. Exteriormente, la germinación se manifiesta por un ablandamiento e hinchamiento del grano y termina cuando la radícula rompe la envoltura de la semilla.

La nascencia (estadio VE) se establece cuando el coleoptilo de la planta se hace visible a través de la superficie del suelo, como consecuencia de la rápida elongación del mesocotilo. En el campo, este estadio se establece cuando el 50% de las plantas presentan los coleoptilos visibles. El meristemo apical permanece aproximadamente a unos 3 cm de profundidad, profundidad a la cual el sistema radical comienza a desarrollarse. La localización del meristemo apical suele ser bastante constante, independientemente de la profundidad de siembra, debido a la elongación del mesocotilo (Aldrich y Leng, 1966).

El periodo desde la siembra hasta la nascencia depende de la temperatura del suelo, humedad, aireación y vigor de la semilla. Con un adecuado régimen hídrico, la nascencia suele ocurrir en 5-6 días, si la temperatura media oscila en torno a los 20°C. (Blacklow, 1972). En este primer estadio la planta se

muestra especialmente sensible a la falta de fósforo. (Marschner, 1987)

#### 2.3.2.1.2. Formación del tallo, hojas y raíces.

Al mismo tiempo que el coleoptilo, las 4 ó 5 hojas que existían en el embrión, se alargan enrolladas entre sí y el meristemo apical se sitúa en el centro de este cilindro. En cuanto brota la primera hoja, caracterizada por su extremo redondeado, deja aparecer a la segunda y luego a una tercera para dar lugar a una planta con 3-4 hojas. En la fase vegetativa, los estadios vienen definidos por el número de hojas expandidas y con el collar y las aurículas visibles que presente la planta: V1, V2, V3.....Vn (Stevens et al., 1987; Ritchie et al., 1989).

El sistema radical seminal alimenta a la planta hasta el estadio V5; posteriormente, deja de ser funcional y las raíces de la corona toman el relevo. Este paso progresivo de régimen heterótrofo a autótrofo, corresponde a un periodo crítico para el cultivo, ya que una mala implantación del sistema radical definitivo, así como desfavorables condiciones del medio ( frío, asfixia) condicionan una mala nutrición de la planta ( Hanway, 1971; Shaw y Thom, 1951). La  $T_{\bar{a}}$  óptima para el crecimiento durante esta fase oscila entre 24 y 30°C, por encima de esta  $T_{\bar{a}}$ , las raíces absorben el agua con dificultad, sin alcanzar la cantidad suficiente para que las células se mantengan turgentes y trabajando con la máxima eficiencia ( Blondon et al., 1983).

El conjunto del aparato vegetativo aéreo (tallo y hojas), está constituido por una unidad estructural que se repite: una lámina foliar, una vaina, un nudo y un entrenudo. La repetición de este conjunto, con variaciones en las dimensiones de cada elemento, compone la totalidad de la estructura vegetativa. El desarrollo de cada unidad estructural, comienza con el alargamiento de la lámina foliar y continúa hacia abajo con el desarrollo de la vaina, para terminar con el desarrollo del entrenudo. El meristemo apical permanece en la superficie del suelo o por debajo de ésta hasta el estadio V10, debido a la ausencia de alargamiento de los entrenudos basales del tallo. El desarrollo del meristemo apical se completa antes de la existencia de cualquier alargamiento

apreciable de los entrenudos ( Burmood, 1968).

Durante las primeras fases del desarrollo vegetativo, la planta necesita pequeñas cantidades de agua para llevar a cabo su limitado desarrollo. Sin embargo, en estadíos posteriores la falta de estas cantidades pueden determinar alteraciones tanto en el desarrollo como en la diferenciación de los primordios vegetativos y reproductivos (Slatyer, 1962). Desde la nascencia, la planta está sujeta a dos ambientes diferentes: suelo y atmósfera, siendo la dependencia de la temperatura del suelo, durante esta fase, menor que en el periodo anterior.

#### 2.3.2.1.3. Formación de las inflorescencias.

Durante la fase vegetativa, el meristemo apical forma (además de los entrenudos, nudos y hojas) todos los meristemos axilares, los cuales según su posición en la planta, tendrán diferente evolución: los asociados a las hojas de la zona media del tallo, evolucionan para dar lugar a la futura mazorca, mientras que los situados en las porciones inferiores del tallo, degeneran (Bonnet, 1953; Reeves, 1950).

Desde su formación, que es anterior a las inflorescencias masculinas, los meristemos axilares evolucionan e inician un tallo ( pedúnculo) y hojas (espatas); alrededor de un mes antes de la floración, el meristemo se alarga y aparecen los primeros esbozos, que se dividen en dos, para dar lugar a las espiguillas. Esta división dicotómica es la razón de la existencia de filas de granos en número par.

La inflorescencia masculina se inicia en el extremo del tallo, por alargamiento y ramificación del meristemo apical. Sobre estas ramificaciones y sobre su eje central aparecen rápidamente unos " botones" que se dividen en dos para formar las espiguillas, siempre reunidas por pares. Cada primordio se divide rápidamente para dar lugar a las glumas, glumillas y flores. La inflorescencia masculina está completamente formada cuando emerge del verticilo de hojas (estadío VT). En los últimos estadíos de la fase vegetativa, las relaciones entre cosecha y condiciones climáticas son muy importantes; las

plantas crecen rápidamente y el uso del agua es muy importante. El déficit hídrico, durante esta fase, puede causar reducciones en la cosecha (Aldrich y Leng, 1966; Shaw y Loomis, 1950). El desarrollo de una cobertura foliar por debajo de la normal causa pérdidas por evaporación, al reducirse la proporción de suelo sombreado.

#### 2.3.2.2. Fase reproductiva .

##### 2.3.2.2.1. Floración

A nivel de la inflorescencia masculina, la floración corresponde al momento en que las primeras flores liberan el polen. Las situadas en la base del tercio superior del eje principal de la inflorescencia son las primeras en florecer. La floración masculina suele durar entre 8 y 10 días, dependiendo de las condiciones del medio.

La floración femenina ocurre cuando las sedas (estilos) son visibles entre las espatas, las cuales aparecen secuencialmente; el primer día, sólo un tercio son visibles; al cabo de 4 días todas son visibles y pueden ser fecundadas. Cuando esto último ocurre, las sedas degeneran, se oscurecen y dejan de ser funcionales. En el campo, se considera que se ha alcanzado el estadio R1 (antesis) cuando el 50% de las plantas presentan las sedas visibles. Normalmente, los estigmas suelen ser receptivos por un lapso de tiempo largo (10-15 días), por lo que, y considerando que la liberación de polen se prolonga durante una semana, no existe dificultad en la fecundación.

La antesis es un periodo crítico en el desarrollo de la planta; el número de óvulos potenciales se ha establecido recientemente, y los déficits hídricos y nutricionales durante esta fase, tienen serios efectos sobre la cosecha. Barnes y Wooley (1969), encontraron reducciones en la cosecha de 6-8% cuando el déficit hídrico se mantuvo durante varios días antes de la aparición de la inflorescencia masculina. Claasen y Shaw (1970) indicaron reducciones de hasta el 13% con déficit hídrico durante la antesis, al disminuir el número de granos por mazorca. Bercebel y Eftimescu (1973) y Aldrich y Leng (1966), determinaron que temperaturas superiores a 32°C producen alteraciones en la diferenciación de los órganos reproductivos con aumentos en las tasas de

aborto floral. Estos mismos autores indicaron que los déficits durante la polinización y aparición de las sedas podrían alterar el sincronismo entre ambos procesos, así como la pérdida de polen, siendo la tasa de fecundación muy reducida.

#### 2.3.2.2.2. Llenado del grano y maduración.

Los 5 estadíos que siguen a la antesis, corresponden al desarrollo del grano. Los estadíos R3, R4 y R5 generalmente se aplican a todos los granos de la mazorca, pero dichos estadíos se alcanzan cuando la porción media de la mazorca presenta granos con las características propias de cada estadío.

- Estadío R2 (grano acuoso). Los granos son translúcidos y presentan un alto contenido de endospermo acuoso, el cual irá disminuyendo por depósitos sucesivos de almidón.

- Estadío R3 ( grano lechoso). Los granos presentan un color amarillento en la parte externa, mientras que el líquido interno pierde su consistencia acuosa y se transforma en lechosa. Aunque no tan severamente como en la antesis, el calor y la sequía extrema en este estadío, pueden afectar profundamente al rendimiento ( Ritchie et al., 1989).

- Estadío R4 ( grano pastoso). La continua acumulación de almidón en el endospermo determina una reducción en los fluídos, con el consiguiente cambio de consistencia. Los zuros (eje de la mazorca) empiezan a adquirir una coloración rojiza.

- Estadío R5 ( grano dentado). La continúa pérdida de agua en el grano, por depósitos continuados de almidón, determinan una especial disposición de los materiales en éste; una suave línea de material duro se dispone transversalmente, línea que en el estadío posterior avanzará hasta la base del grano, en la zona de unión con el zuro.

- Estadío R6 ( madurez fisiológica). Los granos han alcanzado la máxima

acumulación de materia seca. La aparición de una zona oscura en la base del grano, indica que éste es independiente del zuro y ha alcanzado su madurez.

Durante la fase de llenado y maduración de los granos, las altas temperaturas pueden provocar aceleración de la senescencia, así como de la madurez del cultivo (Peters et al., 1981). La maduración y secado del grano, se favorece por las temperaturas templadas y el tiempo seco (Duncan et al., 1973).

## 2.4. DESARROLLO DEL CULTIVO.

### 2.4.1. Dosel foliar.

El desarrollo y la duración de la superficie foliar así como su distribución en la planta, determinan el porcentaje de radiación solar interceptada por el cultivo y de aquí su importancia en el crecimiento y en la cosecha (Watson, 1956; Sinclair, 1984).

El índice de área foliar (LAI) es una medida del aparato fotosintético y representa la superficie foliar por unidad de superficie de terreno. En maíces de ciclo semitardío (FAO 600-700), el máximo LAI se alcanza, generalmente, en la antesis ( Dale et al., 1980; Dwyner y Stewart, 1986; Hanway, 1963), para disminuir progresivamente hasta la cosecha. La evolución de LAI a lo largo del tiempo presenta 3 periodos característicos ( Dale et al., 1980): en el primer periodo ( desde emergencia a antesis), LAI incrementa exponencialmente como consecuencia del desarrollo de nuevas hojas y crecimiento de las existentes; en el segundo periodo, LAI disminuye suavemente coincidiendo con el inicio de proceso normal de senescencia de maíces bajo regadío (Crafts-Brandner et al., 1984); el tercer periodo se caracteriza por la disminución rápida de LAI como expresión del establecimiento de la senescencia.

A lo largo del tiempo, se han realizado estudios para determinar el concepto de LAI " óptimo" (Williams et al., 1965b,1968). Este valor, en el maíz,

esta asociado con la floración, fecha en la que la eficiencia del aparato asimilador es máxima. Valores de LAI superiores al considerado como óptimo para una determinada densidad de siembra, no presenta ningún beneficio para la planta (Gardner et al., 1985). Los aumentos de LAI, llevan asociados aumentos en la absorción de la radiación y CO<sub>2</sub>, pero también implican aumentos en la competencia entre las plantas por la radiación, agua y nutrientes. La fotosíntesis y los factores de crecimiento por unidad de superficie foliar se reducen determinando la eliminación de las hojas inferiores por sombreado, disminuyendo la tasa de asimilación del cultivo lo que implica la reducción de la materia seca, especialmente la que tiene como destino el grano (Eik y Hanway, 1966; Daynard y Duncan, 1969).

Los valores óptimos y los patrones de evolución del índice de área foliar, dependen de gran número de factores que influyen en el desarrollo y crecimiento de las hojas: densidad de siembra, fecha de siembra, diferencias entre híbridos, fertilidad del suelo y condiciones climáticas. Considerando que para un determinado cultivo la densidad de siembra, fecha de siembra y variabilidad entre híbridos es constante, las diferencias en el dosel foliar y características del mismo, vienen determinadas por las condiciones nutricionales, temperatura y humedad, principalmente. Está también determinado que una deficiencia en N, P y K reducen el área foliar (Flesch y Dale, 1988; Walburg et al., 1982; Wallace, 1951; Wolfe et al., 1988). Aunque la naturaleza de las relaciones entre el potencial de turgor y la expansión celular sigue sin conocerse en detalle, parece ser que la baja disponibilidad de N puede afectar el área foliar al limitar la capacidad de acumulación de solutos (Wolfe et al., 1988). Además del efecto sobre el desarrollo de la superficie foliar, el N juega un importantísimo papel en la senescencia, ya que una disminución de los niveles de N lleva asociado un aumento en los niveles de ABA (Golbach et al., 1975).

Cada hoja tiene una tasa de crecimiento que es función de la temperatura y un área máxima que es función de la posición que ocupa ésta en la planta (Hofstra et al., 1977). Bajo condiciones de riego, el área foliar es función de la temperatura (Dale et al., 1980). Los déficits hídricos presentan una acción directa sobre la reducción del área foliar, de manera que estos

provocan, no sólo disminuciones en el área foliar " per se", sino que también reducen el periodo en el que la superficie foliar está fotosintéticamente activa.

El tiempo en que una planta mantiene fotosintéticamente activo su dosel foliar, juega un importante papel, no sólo en la captación de energía sino también en la capacidad de producción de materia seca. La duración de la superficie foliar durante el periodo de llenado del grano es fundamental, ya que la mayor parte de la materia seca presente en el grano procede de la fotosíntesis durante la fase de llenado del mismo (Allison y Watson, 1966), Existen trabajos que indican la existencia de correlaciones positivas entre LAD (desde antesis a madurez) y la cosecha grano, resaltando la importancia de la senescencia en la determinación de la cosecha ( Daynard et al., 1971; Wolfe et al., 1988).

La senescencia es un importante proceso en el desarrollo de un cultivo y presenta una gran importancia económica ya que alteraciones en el patrón normal, afectan a la producción al reducir el área foliar fotosintéticamente activa. Es un proceso normal que incluye cambios degenerativos asociados con la disminución en la actividad fisiológica de las hojas y/o de la planta entera, y está íntimamente ligado al control genético (Nooden, 1980; Thomas y Stoddart, 1980). El control genético, sin embargo, está afectado por los reguladores de crecimiento, así como por los factores medioambientales ( luz, temperatura y competencia entre plantas por el agua y los nutrientes).

El patrón general de senescencia en el maíz, se inicia con el cambio de color y pérdida de las hojas más basales de la planta. Posteriormente, las hojas superiores empiezan a senescer, existiendo un simultáneo avance de la senescencia desde las hojas más apicales hacia abajo y de las más basales hacia arriba, siendo las hojas cercanas a la mazorca las últimas en morir (Narro-Farias, 1976; Bataglia, 1980). La mayor longevidad de las hojas cercanas a la mazorca sugiere, que bien la demanda del sumidero, o un control hormonal a consecuencia de la proximidad del órgano reproductivo, son las razones de este patrón. Los factores ambientales, así como los mecánicos, pueden alterar los patrones de senescencia ( Duncan, 1975).

La fisiología de la senescencia en el maíz no está bien definida, a pesar de que este es un aspecto muy importante para el conocimiento de la fisiología del cultivo. La senescencia ocurre relativamente pronto en el ciclo del cereal, inmediatamente después de la antesis, de aquí la importancia del periodo vegetativo en la fisiología del cultivo; después de la antesis, el equilibrio "fuente-sumidero", la resistencia a la sequía y una máxima duración de la superficie foliar (LAD), son los factores que determinan el retraso en la senescencia.

Aparentemente existen dos tipos de senescencia en el maíz. Uno como consecuencia de un déficit de asimilados, causado por una baja relación fuente-sumidero, y otra causada por una alta relación, lo que determinaría una excesiva acumulación de asimilados (Tollenaar y Daynard, 1982). Los desequilibrios nutricionales, como consecuencia de alteraciones en estas relaciones fuente-sumidero, inducen a una disminución en los niveles de azúcares y ATP, los cuales son los responsables directos de la senescencia (Moss, 1962). Todo esto indica que existe una delicada relación entre el sumidero (mazorca) y la fuente (dosel foliar) durante la fase de llenado del grano y, que alteraciones en el patrón normal, pueden causar sustanciales reducciones en la cosecha, además de una aceleración en la senescencia de las hojas y del proceso de maduración (Tollenaar y Daynard, 1982).

#### 2.4.2. Producción y redistribución de asimilados.

El maíz es una planta  $C_4$  y como tal tiene las características del grupo de plantas con este tipo de fotosíntesis: alta productividad, alta tasa de crecimiento y alta tasa de producción neta. Esta tasa es igual a la tasa total de asimilación menos las pérdidas (como  $CO_2$ ) durante la respiración. En el maíz no existen, o son muy reducidas, las pérdidas por fotorrespiración ya que el sistema de carboxilación y transporte de asimilados es altamente efectivo. En comparación con las especies  $C_3$ , el maíz tiene una alta densidad de saturación de la radiación, pudiendo llevar a cabo la fotosíntesis a muy baja concentración de  $CO_2$ .

La producción de materia seca en el maíz, sigue una típica curva sigmoideal; al principio del ciclo el crecimiento es lento, seguido por un rápido incremento, como consecuencia de la elongación y engrosamiento de los entrenudos y crecimiento de las hojas hasta la fecha de antesis, fase en la que el número definitivo de hojas queda establecido (Hanway, 1963; Karlen et al., 1987); posteriormente la tasa de crecimiento se hace nula debido a la senescencia de las hojas. La producción de materia seca está directamente relacionada con LAI hasta la fecha de antesis, a partir de la cual la relación se pierde. Después de la antesis, una parte de la materia seca acumulada en las partes vegetativas es transportada al grano en formación. Hanway y Russell (1979) indicaron que 18 días después de la antesis, aproximadamente el 20% de la materia seca ya se ha utilizado en llenar el grano o en la respiración.

En condiciones normales, las hojas del tercio superior de la planta son las encargadas de proveer fotoasimilados al grano (Allison y Watson, 1966); los tallos, zuros y chalas (farfolla), sirven de sumideros iniciales de los fotoasimilados que se han formado durante la primera fase de llenado del grano. Posteriormente estos asimilados serán transportados al grano en formación, secuencialmente. Aproximadamente el 10% de la materia seca presente en el grano, es redistribuida desde las partes vegetativas; aunque la proporción es pequeña, estos fotoasimilados son necesarios para mantener el crecimiento del grano a una tasa constante, independientemente de las fluctuaciones de la fotosíntesis (Duncan, 1975). En condiciones adversas (rápida senescencia de las hojas), los tallos son la principal fuente de asimilados para el llenado del grano (Daynard et al., 1969; Hume y Campbell, 1972). El 90% de los fotoasimilados presentes en el grano proceden de la fotosíntesis durante la fase de llenado del grano (Allison y Watson, 1966; Thorne, 1965). En la primera parte de esta fase de llenado, el peso seco de las hojas y de los tallos, sufren un pequeño aumento, aumento que es mayor en el zuro y en la chala (farfolla). Posteriormente, el peso seco de hojas, tallos, zuros y chalas disminuye y esta disminución se acompaña de un gran incremento del peso seco del grano, reflejando la redistribución de materia seca hacia éste. Los tallos pierden mucha más materia seca que las hojas, ya que las pérdidas por respiración no son suplementadas por las hojas, al existir

un sumidero establecido que ejerce mucha más fuerza sobre la dirección de los fotoasimilados (Allison y Watson, 1966).

Los factores que aumentan la fotosíntesis después de la antesis, también pueden incrementar la tasa de llenado del grano, pero esto requiere un LAI óptimo para proveer una distribución económica de los asimilados. Cualquier prolongación del periodo de llenado del grano, generalmente a expensas del crecimiento durante la fase vegetativa, podría incrementar la cosecha, sin embargo, muchos resultados han sugerido que altos rendimientos podrían ser el resultado de altas tasas de llenado del grano en periodos bastante cortos de tiempo. El periodo de llenado del grano consta de 3 fases, en las que las tasas de acumulación de materia seca son diferentes; durante la primera fase (después de la fecundación) y la última (inmediatamente antes de la capa negra), la tasa de acumulación es bastante lenta, mientras que en la fase intermedia, conocida como fase lineal de crecimiento del grano, la acumulación es bastante rápida (Daynard and Kannenberg, 1976).

#### 2.4.3. Nutrientes (N, P y K) en la planta.

La acumulación de nutrientes durante el ciclo del cereal sigue, generalmente, un patrón paralelo a la acumulación de materia seca (Chandler, 1960; Hanway, 1962a; Karlen *et al.*, 1988; Sayre, 1948). Las altas concentraciones de nutrientes que se dan en las plantas de maíz al inicio de su desarrollo, se deben a las altas tasas de absorción de los mismos. En los últimos estadios, el crecimiento es relativamente mayor y la dilución y/o translocación de los nutrientes es la característica general. En la madurez, tanto el crecimiento como la acumulación disminuyen, aunque el crecimiento se hace mucho más lento (Terman y Noggle, 1973). Así, la materia seca presenta un retraso frente a la acumulación de nutrientes (N, P y K); este retraso también existe entre los nutrientes, de manera que el K es el que más rápidamente se acumula. Las cantidades de nutrientes acumulados al principio del ciclo, son bastante pequeñas y a medida que la planta crece, la tasa de absorción aumenta continuándose hasta la madurez ( en el caso del N y P).

La acumulación de N, P y K en las distintas partes de la planta ha sido

ampliamente descrita en la bibliografía (Hanway, 1962b; Jordan et al., 1951; Karlen et al., 1987,1988; Nelson, 1956; Sayre, 1948). La acumulación de N en las hojas se inicia desde las primeras fases de crecimiento, alcanzándose el máximo de acumulación en la antesis ( Hanway, 1962b) o anteriormente (Karlen et al., 1988), para después disminuir hasta la cosecha. Este mismo patrón ha sido descrito para la evolución del N en los tallos. Karlen et al., (1988) recogen en sus trabajos, una pérdida neta de N entre los estadíos VT y R1. Una posible causa de esta pérdida está en la volatilización del N, al no existir en esta fecha, un sumidero bien establecido. En la cosecha, aproximadamente 2/3 del nitrógeno total existente en la planta, se presenta en el grano, correspondiendo el 50% de éste N al redistribuido por las partes vegetativas ( Hanway, 1962b). La removilización de N (como pérdida neta desde hojas y tallos), es una importante fuente de N para el grano ( Bellow et al., 1981; Chandler, 1960; Hanway, 1962b). Los patrones de removilización de N no han sido unánimes a lo largo del tiempo; así Hanway (1962b) y Johnson et al.,(1966), indicaron que la removilización desde los tallos ocurría inmediatamente después de la antesis, mientras que la de las hojas se retrasaba un cierto tiempo. Chandler (1960), sin embargo, indicó que el N en las hojas, empezó a declinar inmediatamente después de la antesis, mientras que el N en los tallos siguió aumentando durante dos semanas más, para después disminuir hasta la cosecha. Beauchamp et al., (1976), encontraron que tanto las hojas como los tallos redistribuyeron más N al final del periodo de llenado del grano que después de la antesis. Christensen et al., (1981), indicaron que los tallos pueden actuar como sumideros alternativos cuando el sumidero real (mazorca) se reduce. Las variaciones en la removilización de N observadas entre los distintos trabajos son debidas a variaciones genotípicas y climáticas.

La acumulación de P es más o menos constante hasta la madurez, con suaves disminuciones de este elemento desde las hojas y los tallos. La máxima tasa de acumulación del fósforo ocurre en la misma fecha que la del N, pero la cantidad de P en la planta sigue aumentando a medida que la planta crece, reflejandose la absorción de este elemento durante todo el ciclo ( Sayre, 1948). Sin embargo, Hanway ( 1962b), reflejó en sus estudios que aproximadamente el 50% del P presente en el grano, procedía de la removilización desde las partes vegetativas; en la cosecha, 2/3 partes del P total en la planta se presentaba

en el grano.

El grano de maíz no acumula mucho K y la mayor parte de éste elemento se localiza en las partes vegetativas (Hanway, 1962b). Este mismo autor, indicó en sus trabajos, que una excesiva pérdida de K desde las hojas durante la fase de llenado del grano, podría determinar una acumulación de éste elemento en los tallos.

El análisis de tejidos ha sido extensamente utilizado como diagnóstico para evaluar el nivel de N, P y K en el maíz. La base del análisis de tejidos está en las relaciones que existen entre un elemento y su suficiencia para el crecimiento (Macy, 1936; Ulrich, 1952). Macy (1936) indicó que un elemento es suficiente cuando la aplicación de más cantidad de éste no incrementa el crecimiento. Sugirió la existencia de un "porcentaje crítico" de cada nutriente, por encima del cual existe consumo de lujo y por debajo de éste un ajuste deficitario. El consumo de lujo se refleja cuando la aportación de un nutriente determina un incremento de este elemento en el tejido, sin ningún incremento en la cosecha. El ajuste deficitario se refleja por los aumentos en la concentración y en el rendimiento ante aportaciones crecientes del nutriente. Por debajo del nivel mínimo, la aplicación de un nutriente no se refleja en el tejido pero sí en la cosecha.

El nivel de N, P y K en el maíz, generalmente se evalúa, analizando la hoja opuesta e inferior a la hoja de la mazorca en la antesis y en el grano en la cosecha ( Bennet et al., 1953; Cerrato y Blackmer, 1990; Dumenil, 1961; Pierre et al., 1977; Tyner, 1947; Voss et al., 1970). El nivel crítico de estos nutrientes se considera como la concentración a la cual el rendimiento es máximo o del 95%. A lo largo del tiempo se han realizado numerosos trabajos para determinar el porcentaje crítico de N, P y K; así, Asghari y Hanson (1984), Bennet et al., (1953), Dumenil (1961), Tynner (1949), Rhem et al., (1983), Steel et al., (1982) y Viets et al., 1954, determinaron %N entre 2.14 y 3.21, %P entre 0.22 y 0.29% y %K entre 1.65-2.15%.

El análisis del grano, también ha sido utilizado para determinar el estado nutricional del maíz ( Cerrato y Blackmer, 1990; Pierre et al., 1977). Los

porcentajes críticos de N en el grano oscilan entre 1.09 y 1.52% ( Asghari y Hanson, 1984; Pierre *et al.*, 1977; Steel *et al.*, 1982).

#### 2.4.4. Componentes del rendimiento.

El grano en el maíz es solamente una parte de la biomasa total producida. Un cultivo productivo de maíz se caracteriza por un adecuado desarrollo tanto del aparato fotosintético como del sistema radicular durante la fase vegetativa, una alta tasa producción de materia seca (que es dependiente de la presencia de un LAI óptimo), una prolongada actividad foliar y una alta tasa de fotosíntesis. El proceso de producción debe de armonizarse con la formación de los componentes de la cosecha y en esto recae la importancia de la capacidad de la planta para transferir fotoasimilados a los granos en formación. Las relaciones entre el proceso de producción (fotosintético básicamente) y la cosecha económica, son muy complejas en el maíz ya que las condiciones óptimas para la formación de una gran cosecha biológica (Y<sub>b</sub>) son diferentes a las condiciones para la formación de una gran cosecha económica (Y ec.) o cosecha de grano.

La cosecha grano en el maíz, es el resultado de la expresión de 6 componentes:

- Número de plantas por unidad de superficie.
- Número de mazorcas por planta.
- Número de líneas de granos por mazorca ( NLM).
- Número de granos por línea (NGL).
- Peso medio del grano (PMG).
- Tasa de fecundación.

Los componentes de la cosecha se forman durante el curso de la ontogénesis. Inicialmente un cierto número de plantas se establece; durante la fase vegetativa, el meristemo apical evoluciona para dar lugar a la inflorescencia masculina, mientras que los meristemos apicales dejan de producir hojas para dar lugar a la futura mazorca ( Bonnet, 1953; Reeves, 1950).

En la figura 4m. se muestra el establecimiento de cada componente del rendimiento en el ciclo del cereal (desde la siembra hasta la madurez fisiológica). Se indican los estadios más importantes del cultivo, además de la siembra (S), y la germinación (G).

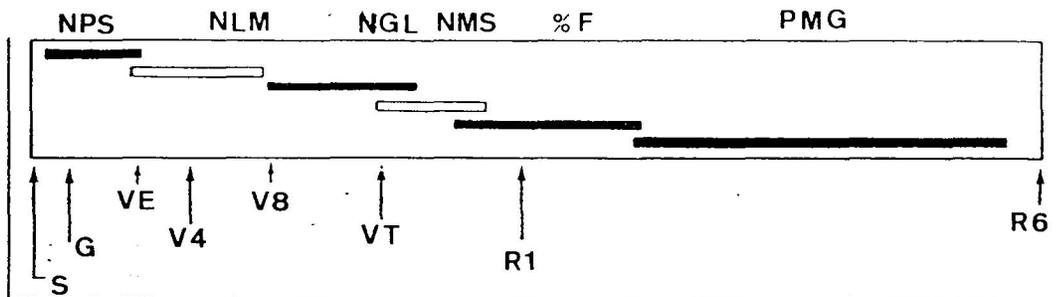


Figura 4m.

## 2.5. EL NITROGENO Y EL MAIZ.

### 2.5.1. La fertilización nitrogenada.

El incremento del uso de fertilizantes nitrogenados, junto con los avances en el estudio del control de plagas y la utilización de nuevas variedades, ha hecho incrementar la producción de los cultivos en los países desarrollados. Los fertilizantes nitrogenados han permitido a los productores gran flexibilidad en el manejo de sus sistemas de producción; sin embargo el sucesivo e irracional uso de estos fertilizantes ha contribuido a una situación en la que los riesgos de contaminación por formas de N es un hecho indiscutible. En los últimos años, este tema ha sido objeto de estudio por numerosos autores ( Kitur *et al.*, 1984; McLean, 1977; Simonis, 1988; Thompson, 1985). Ningún país tiene una completa información sobre los efectos de la fertilización nitrogenada sobre las cosechas para todas y cada una de las regiones del mismo. Estas circunstancias surgieron del uso inicial de los fertilizantes y del estudio posterior de las técnicas y manejo de la fertilización nitrógenada.

El fertilizante nitrogenado es el nutriente necesario para la planta más extensamente utilizado, puesto que los suelos no tienen el suficiente para soportar los altos niveles de producción que países y productores imponen. Se produce normalmente como  $NH_3$  y se usa tanto en esta forma como en una larga lista de derivados líquidos y sólidos. El consumo de fertilizantes nitrogenados aumentó desde 32 mT en 1970 a 60 mT en 1982, siendo el aumento anual del 7% (Newbould, 1989). En España, el consumo aumentó desde 806.000 T a 1.125.000 T en un periodo de 9 años (1981-1989) (Manual de Estadística Agraria, 1990). Las predicciones futuras del consumo de N dependen de muchos factores, siendo las cifras esperadas para el año 2000 entre 111-134 mT ( Stangel, 1984).

Las curvas de respuesta de los cultivos ante el N aplicado pueden construirse para todos los cultivos en un gran rango de tipos de suelos y condiciones climáticas. Un óptimo y biológico nivel de fertilizante nitrogenado puede ser aquel por encima del cual la aplicación de más fertilizante puede

disminuir las cosechas desde el óptimo, así como la calidad del producto por la acumulación de excesivas cantidades de nitrato u otros componentes nitrogenados. En la práctica el uso de los fertilizante nitrogenados esta basado más en razones económicas que biológicas.

La cantidad y distribución del nitrógeno inorgánico, básicamente  $N-NO_3^-$  presente en suelo al final de la estación, generalmente está afectado por la fertilización nitrógenada y por el régimen de humedad (Russell, 1988). Las aplicaciones de N en cantidades superiores a las requeridas por el cultivo, causan grandes acumulaciones de  $N-NO_3^-$  en el perfil y, en algunos casos, pérdidas a capas profundas lejos de la zona de las raíces, contribuyendo de esta manera a la polución de las aguas subterráneas ( Blackmer, 1987; Hahne et al., 1977; Foster et al., 1986; Keeny, 1986).

Las aplicaciones del fertilizante nitrogenado en las fases en las que la demanda de este nutriente fuera la máxima ( 2 ó 3 semanas antes de la antesis) mejoran la eficiencia de éste y reducen las pérdidas, al existir un adecuado sistema radical (Jordan et al., 1951; Hanway, 1962b). El incremento de la efectividad del nitrógeno aplicado tardíamente se expresa en una mayor proporción de materia seca y del N en el grano ( Olson et al., 1964; Rehm y Wiese, 1975). El nitrógeno residual presente en la cosecha, es susceptible a las pérdidas por lavado y/o denitrificación (Jokela y Randall, 1989; Olson et al., 1979). Cruces et al., (1991) trabajando en la Vega de Granada, determinaron altos contenidos de  $N-NO_3^-$  en las aguas subterráneas (60 mg/l). Castillo (1984) puso de manifiesto el hecho de que el 60% del N aplicado en las labores de abonado ( 4500 Tm), era aportado en el abonado de primavera, existiendo marcados aumentos del  $N-NO_3^-$  desde aguas superficiales (8mg/l) a aguas subterráneas (40 mg/l). El origen de este enriquecimiento hay que buscarlo, principalmente, en los aportes nitrogenados. Desde el año 1986, se ha observado un aumento considerable (44mg/l a 66 mg/l) en los contenidos de  $N-NO_3^-$  en las aguas subterráneas del acuífero de la Vega de Granada (Cruces et al., 1991).

El maíz, es una planta básicamente nítrica en su nutrición, aunque tiende absorber más  $NH_4^+$  que  $NO_3^-$  en las primeras fases de desarrollo. Sin embargo,

la absorción de N se mejora en condiciones en las que ambos nutrientes están presentes ( Schrader et al., 1972). Mills y McElhannon ( 1982), determinaron en sus estudios con maíz dulce, que la forma  $\text{NH}_4^+$  era la forma de absorción predominante durante la fase de llenado del grano, mientras que durante la fase vegetativa, tanto la forma  $\text{NH}_4^+$  como  $\text{NO}_3^-$  podrían absorberse. Reddy et al., (1991) indicaron en sus trabajos que los efectos de las formas de N disponible para la planta durante la maduración no eran concordantes con la observación general de que el  $\text{NH}_4^+$  disminuye la absorción de cationes, mientras que el  $\text{NO}_3^-$  lo favorece. Ya que la absorción de  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{NO}_3^-$  cambia a lo largo del ciclo de la planta, no sólo la cantidad de N disponible, sino la forma predominante en la que se encuentre ésta, pueden influir tanto en el crecimiento vegetativo como en la maduración del grano (Rehm y Wiese,1975). Existe también cierto efecto del pH sobre la relativa absorción de  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{NO}_3^-$  ya que hay evidencia de que los aniones son más rápidamente absorbidos que los cationes en un medio ácido, mientras que en un medio básico ocurre lo contrario. Estos cambios de pH pueden afectar la disponibilidad de otros nutrientes.

Generalmente el ión amonio reduce la absorción de cationes y mejora la de los aniones, mientras que el  $\text{NO}_3^-$  presenta el efecto contrario ( Barker and Mills, 1980; Hansen, 1972; Minotti et al., 1968). Considerando que aproximadamente el 50% de nitrógeno se absorbe antes de la antesis, la forma mayoritaria en la que se encuentre el N durante esta fase, tendrá una gran importancia no sólo en el desarrollo del cultivo y composición, sino también en las interacciones con el resto de los nutrientes (Barker and Mills, 1980).

La urea (46% de riqueza en N) es el más concentrado de los fertilizantes sólidos nitrógenados y uno de los de mayor uso en la agricultura ( Russell, 1988). Es hidrolizada por la ureasa en un tiempo variable, dependiendo de la temperatura existente, a carbamato amónico, y la mayoría de los problemas del uso de la urea proceden de la disociación de este compuesto al liberarse amonio al medio.

Bajo determinadas condiciones, el aumento del pH debido a la hidrólisis de la urea, es suficiente para inhibir la oxidación del nitrito y quedar éste como

residuo tóxico en el suelo. Bajo condiciones en las que el amonio quede retenido en un suelo (en las arcillas), el pH sería alcalino en la medida en la que coexistan el Ca y el  $\text{NH}_4^+$  (Russell,1988).

Los factores que estimulan la absorción del P por la presencia de N, son la disminución del pH en la zona de las raíces (que incrementa la solubilidad de los fosfatos), aumento del crecimiento radical y un aumento en la capacidad de las raíces para absorber el P (Cole *et al.*, 1963; Kamprath,1987; Miller, 1974) . Cole *et al.*, (1963) indicaron que la absorción de P por las raíces del maíz, estaba altamente correlacionada con la cantidad de N total presente en las mismas, existiendo un incremento de P en las hojas en la antesis al aumentar las dosis de N aplicado ( Kamprath, 1987); el aporte de N fué el principal factor que afectó al contenido de P en el maíz. En determinados trabajos (Kamprath, 1987; Riley y Barber, 1971) se recoge el efecto positivo del  $\text{NH}_4^+$  sobre la solubilidad de los fosfatos, mediante el efecto de la disminución del pH al excretarse  $\text{H}^+$  al medio. En los casos en los que el N se absorbe en forma de  $\text{NO}_3^-$ , la absorción de aniones excede a la de los cationes induciendo a un aumento del pH, disminuyéndose la solubilidad del P.

La absorción de K se incrementa por la presencia de  $\text{NO}_3^-$  como forma disponible de N, de manera que al incrementar la absorción de  $\text{NO}_3^-$  se aumenta la absorción de K para mantener el equilibrio catión-anión en la planta (Maizlish *et al.*, 1980; Mengel y Kirkby, 1982). Estos mismos autores indicaron otras posibles causas de esta interacción positiva entre el N y el K: incremento del crecimiento radical y aumento, por lo tanto, del suelo explorado por las raíces. La dinámica del K en suelo, depende del estado de éste, de manera que una disminución en los niveles de K extraíble y en solución, por consumo de la planta y/o lixiviado, podría determinar el paso de formas no extraíbles a extraíbles (Sparks,1980).

El efecto de la aplicación de distintas dosis del fertilizante nitrogenado ha sido estudiado en numerosos trabajos. Es conocido el hecho de que la aplicación del N en aquel estadio del cultivo en el que el crecimiento y actividad radical es la máxima, aumenta la eficiencia, reduciéndose las pérdidas (Jordan *et al.*, 1950; Hanway, 1962b). Pearson y Jacobs (1987), indicaron en

sus trabajos que la aportación del N durante la fase de diferenciación de las espiguillas ( desde la iniciación floral hasta la antesis) afectaba al NGM, a través de la tasa de diferenciación de las mismas, así como al tamaño de las plantas ( Hanway 1962b), mientras que la aportación después de la antesis afectaba a la calidad del grano, aumentando el %N en el mismo. Tollenaar y Daynard (1978) indicaron que la aplicación del N antes de la antesis también podría afectar a la tasa de fertilización, la cual se determinaba después de la antesis.

Algunos híbridos muestran variaciones en el contenido en proteína y/o cosecha grano al aumentar las dosis de fertilizante nitrogenado (Kamprath et al., 1982; Nelson, 1956); otros no muestran ninguna respuesta (Balko y Russell, 1980) e incluso muestran una respuesta lineal. El efecto del nitrógeno, en algunos genotipos, se manifiesta por un aumento en el número de mazorcas y número de granos por mazorca (Krantz y Chandler, 1954).

#### 2.5.2. Efecto del nitrógeno sobre la capacidad de "fuente" del maíz.

El efecto del N sobre el desarrollo de la superficie foliar en el maíz es un hecho ampliamente estudiado. Las deficiencias de N tienden a reducir el área foliar (Spiertz y Ellen, 1978; Walburg et al., 1982; Wallace, 1951; Wolfe et al., 1988). Esta reducción se manifiesta, básicamente, por una disminución en el tamaño de las hojas, al reducirse tanto el número como el tamaño de las células. Las plantas con déficit de N, normalmente muestran déficits hídricos en las hojas como consecuencia de disminuciones en la conductancia estomática; los niveles de ABA aumentan, cerrándose los estomas para mantener el nivel hídrico de la planta ( Radin y Boyer, 1982). La deficiencia en N induce a una disminución en la tasa de fotosíntesis, no sólo por alteraciones en la composición del aparato fotosintético, sino también por la baja demanda de fotoasimilados hacia los sumideros. Además de afectar al desarrollo de la superficie foliar, el N juega un papel fundamental en la senescencia (Christensen et al., 1981; Crafts-Brandner et al., 1984). La translocación de N desde las hojas hacia el grano durante la fase de llenado de éste, es un importante factor que afecta a la senescencia. Así, el aporte adecuado de N, favorece la duración de la superficie foliar durante la fase de llenado del

grano.

La cantidad de N redistribuido al grano, dependerá no solamente de la cantidad almacenada en los distintos órganos (hojas y tallos) durante la fase vegetativa, sino también del tamaño del sumidero. Existen numerosos trabajos que indican la respuesta del cultivo, en la producción de materia seca, ante dosis crecientes de N. Berger (1962), Bishop et al., (1972); Jones, (1973) y Stapleton et al., (1983), indicaron respuestas positivas ante dosis crecientes de N; ninguna respuesta (Douglas et al., 1972) e incluso depresiones a dosis superiores a 700 Kg/Ha. Las diferencias ante las dosis de N, se reflejarían en las variaciones en la tasa de acumulación de materia seca, que en definitiva corresponderían al peso seco de los distintos órganos de la planta. Thom y Watkin (1978), trabajando con dosis variables de N ( desde 0 a 672 Kg/Ha) en contraron respuesta positiva, solamente en el peso seco de las hojas y hasta dosis de 160 Kg/Ha; por encima de este valor no existió respuesta. Si bién la respuesta del N en el peso seco de la planta, se refleja en los aumentos en determinadas fracciones de la misma, los patrones de distribución y contribución de cada órgano al peso seco total son independientes de la dosis de N aplicado (Thom y Watkin, 1978; Hanway, 1962b).

La acumulación de N en los distintos órganos de la planta se vé afectado por la aplicación de dosis variables de N ( Anderson et al., 1984; Bennet et al., 1953; Moll et al., 1982; Tyner, 1947; Viets et al., 1954). Las variaciones que en el contenido de N que reflejan los tallos son menores que las reflejadas por las hojas.

### 2.5.3. Efecto del nitrógeno sobre la capacidad de "sumidero" del maíz.

#### 2.5.3.1. Efecto sobre el NGM .

El NGM es el componente más importante en la determinación de las variaciones en la cosecha del maíz ( Vig, 1989). Tales variaciones vienen dadas por diferencias en el NLM, componente que se establece muy pronto en el ciclo del cereal y está influenciado por la fertilización nitrogenada (Bertrand et al., 1989). Ya que se determina pronto en el ciclo, las variaciones

en la aportación de N antes de la antesis, así como la cantidad inicial en la siembra podría afectar a este componente (Vig, 1989). Pearson y Jacobs (1987), indicaron que, efectivamente, la aportación de N antes de la antesis afectaba al NGM, así como a la tasa de fecundación; de esta manera el N afectaría en primer lugar al número de óvulos potenciales y en segundo lugar al número de granos potenciales establecidos después de la fecundación. Lemcoff y Loomis (1986) indicaron aumentos en el NGM cuando se incrementó la cantidad de N aportado.

#### 2.5.3.2. Efecto sobre el PMG

El efecto del N sobre el PMG es de tipo indirecto a través de los numerosos factores que afectan a este componente. Así, las cantidades absolutas de este nutriente en los órganos próximos a la mazorca durante las fases críticas del cereal (caída de polen e inicio del periodo de llenado del grano), juegan un papel fundamental, al igual que la translocación de N desde los órganos vegetativos (Chandler, 1960; Hanway, 1962b). La removilización de N desde los tallos y las hojas es una importante fuente de N para el grano (Anderson *et al.*, 1984; Below *et al.*, 1981; Chandler, 1960; Hanway, 1962b). La proporción de N en el grano, en la cosecha, corresponde aproximadamente al 60% del total, existiendo respuesta en la concentración del N en grano ante dosis crecientes de fertilizante nitrogenado. Thom y Watkin, (1978) y Hunter y Yunger (1955), indicaron la falta de respuesta en el %N en grano, a dosis superiores de 300 Kg/Ha.

La mayoría de los fotoasimilados presentes en el grano, vienen de la fotosíntesis en curso, y solamente una pequeña parte proceden de la redistribución desde los órganos vegetativos. Por lo tanto, para que el proceso de llenado de grano sea efectivo, es necesario que exista un adecuado dosel foliar durante esta fase, así como un apropiado nivel de fotoasimilados en los tallos y chalas (farfolla). El N favorece la duración de la superficie foliar, así como el desarrollo de un adecuado dosel foliar durante la fase vegetativa, por lo que el efecto del N, es indirecto a través de los factores que maximizan estos procesos.

### **3. MATERIAL Y METODOS**

### 3. MATERIAL Y METODOS.

#### 3.1. Localización de las parcelas.

La comarca de la Vega, situada en el interior de la Depresión de Granada formando parte del surco Intrabético (uno de los tres ámbitos geográficos que han ido localizando a la población de Andalucía entre espacios montañosos deshabitados), presenta todos los rasgos de una cubeta sedimentaria enmarcada por una línea de sierras prácticamente continua. El eje de la Vega lo constituye la llanura Central recorrida longitudinalmente por el río Genil.

Los ensayos se llevaron a cabo en los terrenos del Centro de Investigación y Desarrollo Agrario localizados al suroeste de la ciudad de Granada y representativos de las características generales de la Vega. Estos terrenos tienen riego procedente de la Acequia Gorda del río Genil y del pozo propio de la finca.

#### 3.2. Características climatológicas.

Los rasgos climáticos de la Depresión de Granada vienen definidos por su situación y configuración morfológica.

El matiz continental de las cuencas interiores, toma interés en la individualización de su clima frente al del Guadalquivir o al de la costa Mediterránea. Aunque esta continentalidad no es grave, se puede apreciar tanto por las temperaturas medias de invierno y verano (inferiores a 10°C y superiores a 25°C, respectivamente) como por la falta de estaciones intermedias. Su situación se coloca en un dominio de clima mediterráneo.

La baja pluviosidad (media de 480 mm) y, más aún, la extrema sequía durante el verano, es un rasgo esencial de la influencia mediterránea. Sin embargo, la depresión no está aislada del Valle de Guadalquivir, a través del cual llegan los vientos del Oeste. El régimen de precipitaciones pone de manifiesto esta influencia atlántica, correspondiendo las máximas

precipitaciones al intervalo desde Octubre a Marzo.

En la tabla 1 m. se recogen los valores climáticos mensuales (T<sup>m</sup> máxima, mínima, precipitación y radiación (cal/cm<sup>2</sup>) en los tres años de estudio. Estos datos fueron suministrados por el servicio meteorológico del Aeropuerto de Granada.

Tabla 1 m. Valores climáticos mensuales. Años 1988, 89 y 90.

	1988				1989				1990			
	T.max	T.min	Prec.	Rad.	T.max	T.min	Prec.	Rad.	T.max	T.min	Prec.	Rad.
E	12.4	2.7	48.0	174	13.1	-1.2	26.9	259	12.6	0.1	38.7	190
F	14.5	1.6	19.0	301	15.6	1.7	36.6	287	20.6	1.4	0.0	298
M	19.9	1.6	11.7	449	20.1	3.7	36.1	389	20.2	4.8	37.1	357
A	20.8	6.3	48.7	460	18.4	4.8	36.7	431	19.2	5.0	85.8	445
Ma	24.2	9.2	32.4	570	25.5	8.7	27.5	543	25.9	9.7	15.9	569
J	26.9	11.0	9.8	630	31.1	12.7	25.9	644	31.8	12.6	0.4	632
Jl	35.0	14.7	0.5	672	36.6	16.7	0.0	672	35.2	16.0	1.8	612
Ag	35.9	15.0	0.0	608	35.3	16.1	0.5	556	34.9	15.3	3.0	559
S	31.3	11.9	0.0	504	28.6	13.0	61.5	434	30.9	15.2	22.2	394
O	23.7	9.0	65.8	316	24.7	9.5	33.5	335	21.1	9.3	92.1	320
N	17.7	6.2	41.4	201	17.5	6.9	87.1	176	16.7	6.7	39.1	190
D				225	15.0	5.8	98.5	131	11.5	1.1	58.9	200

En las figuras 1, 2 y 3 m. se muestran los valores diarios de T máxima, mínima, radiación y demanda evaporativa del medio ( ETo, mm) ( media de 5 días), desde siembra a madurez fisiológica, en cada año.

### 3.3. Análisis y tipo de suelo.

El suelo no presenta limitaciones físico-químicas para la producción vegetal hasta los 2m estudiados. El perfil es homogéneo en todas sus características. Es un suelo básico de textura franca, llano y sin piedras correspondiendo a un Typic Xerofluvent. La densidad aparente del suelo tuvo un valor medio de 1.4 Kg/m<sup>3</sup>. En la tabla 3m. se muestran las características físico-químicas del perfil del suelo, en cada año de estudio. Los datos fueron facilitados por el Laboratorio Agrario Regional de Atarfe (Granada). En 1988 sólo dispusimos de datos, para la determinación de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, procedentes de las dos primeras profundidades estudiadas.

Tabla 2m. Características fisico-químicas del perfil de suelo en cada año de estudio.

Profundidad	(% )					ppm								
	Arena	Limo	Arcilla	M.O.	pH	N	P	K	N	P	K	N	P	K
						1988			1989			1990		
0- 30	47.9	42.2	9.9	1.55	7.9	20	37	95	24	34	105	19	49	77
30- 60	51.5	41.6	6.9	1.30	8.0	36	26	57	25	30	94	23	23	74
60- 90	46.1	43.6	9.8	0.90	8.0		32	40	18	20	73	31	23	50
90-120	44.2	46.0	9.8	0.70	7.9		15	35	21	12	45	43	24	45
120-150	42.1	46.8	9.8	0.70	7.8		14	40	40	10	42	66	25	54
150-180	42.1	46.8	11.1	0.70	7.8		14	40	47	8	37	26	28	50

### 3.4. Características del cultivo.

Durante los tres años de ensayo realizados se sembró la variedad G-4507, híbrido simple de porte vigoroso con mazorcas largas y zuro delgado. Es un híbrido de ciclo 700 (FAO, 1952) con buen vigor de nascencia y excelente comportamiento ante Fusarium , Sesamia y Ostrinia. El grano es de tipo dentado de color amarillo medio. Esta variedad procede de Estados Unidos obtenida por FUNK SEED IND. e importada por MAHISSA. Quedó inscrita el 1 de Agosto de 1977 en la lista de Variedades Comerciales de Maíz, así como en el Catálogo Común de Variedades de Maíz de la CEE.

Las operaciones del cultivo fueron las normales de la zona, realizándose la siembra en todos los años a principios de Mayo. Antes de ésta se incorporó el abono de sementera (complejo triple 8-15-15) en los años 1988 y 1989, mientras que en 1990 el abono se incorporó a mano y por surco utilizando urea al 46% como fuente de N, superfosfato de cal al 18% como fuente de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y sulfato de potasio al 50% como fuente de K<sub>2</sub>O. La siembra se realizó con máquina de precisión neumática a dosis de 90.000 pl/Ha y 0.7 m entre surcos. Junto con la semilla se incorporó un insecticida granulado para suelo cuyo componente activo, Disulfoton al 5%, sirvió para el control de áfidos, elatéridos y noctuidos. Posteriormente se efectuó un "aclareo" del cultivo siendo la

distancia aproximada entre plantas de 18 cm, estableciéndose una densidad final de aproximadamente 70.000 pl/Ha. Durante 1988 y 1989 se aplicó el fertilizante nitrogenado en cobertera en una, dos o tres veces, siendo las dosis finales de fertilizante nitrogenado de 200, 300 y 400 U.F.N./Ha. En 1990 y en aquellos tratamientos con fertilizante nitrogenado, éste se aplicó además de en sementera, en una sólo aportación en cobertera, no existiendo por lo tanto tratamientos por fechas de aplicación de fertilizante nitrogenado como en años anteriores.

Los riegos se efectuaron quincenalmente, siendo el número total de éstos durante el ciclo del cereal de 11 en 1988, 11 en 1989 y 10 en 1990. Durante estos dos últimos años, se determinó el contenido de nitrógeno de nitratos en este agua de riego. Los valores ( ppm) se muestran en la tabla 2 m. Estos datos fueron suministrados por la Dra D. Carmen Cruces Blanco, realizados en el Dpto Suelos y Riegos del C.I.D.A. de Granada.

Tabla 2 m. Contenidos (ppm) de nitrógeno de nitratos en el agua para cada fecha de riego. Ensayos 1989 y 1990.

1989										
16/6	30/6	7/7	13/7	21/7	28/7	4/8	11/8	18/8	25/8	1/9
4.2	19.4	14.1	8.5	9.4	9.4	8.9	9.3	8.3	10.2	7.2
1990										
6/7	13/7	20/7	27/7	3/8	10/8	17/8	24/8	31/8	7/9	
2.4	2.4	22.5	3.3	2.7	0.7	0.6	0.82	0.93	2.32	

En la siembra, floración y cosecha en los ensayos 1989 y 1990 se tomaron muestras de tierra cada 30 cm de profundidad mediante barrena para la determinación de N-NO<sub>3</sub> durante 1989 y N-NO<sub>3</sub>, fósforo y potasio durante 1990. Las muestras se mantuvieron en cámara fría (4°C) y perfectamente embolsadas y etiquetadas hasta su análisis.

La cosecha se realizó a mano tomando los 4 surcos centrales de cada parcela recogiendo las mazorcas existentes y desechando 2 m por cada lado, eliminando así los posibles efectos "borde".

Figura 1m. Valores diarios  $T_{\text{máxima}}$  y  $T_{\text{mínima}}$ . Años 1988-89-90 (se indica la fecha de antesis).

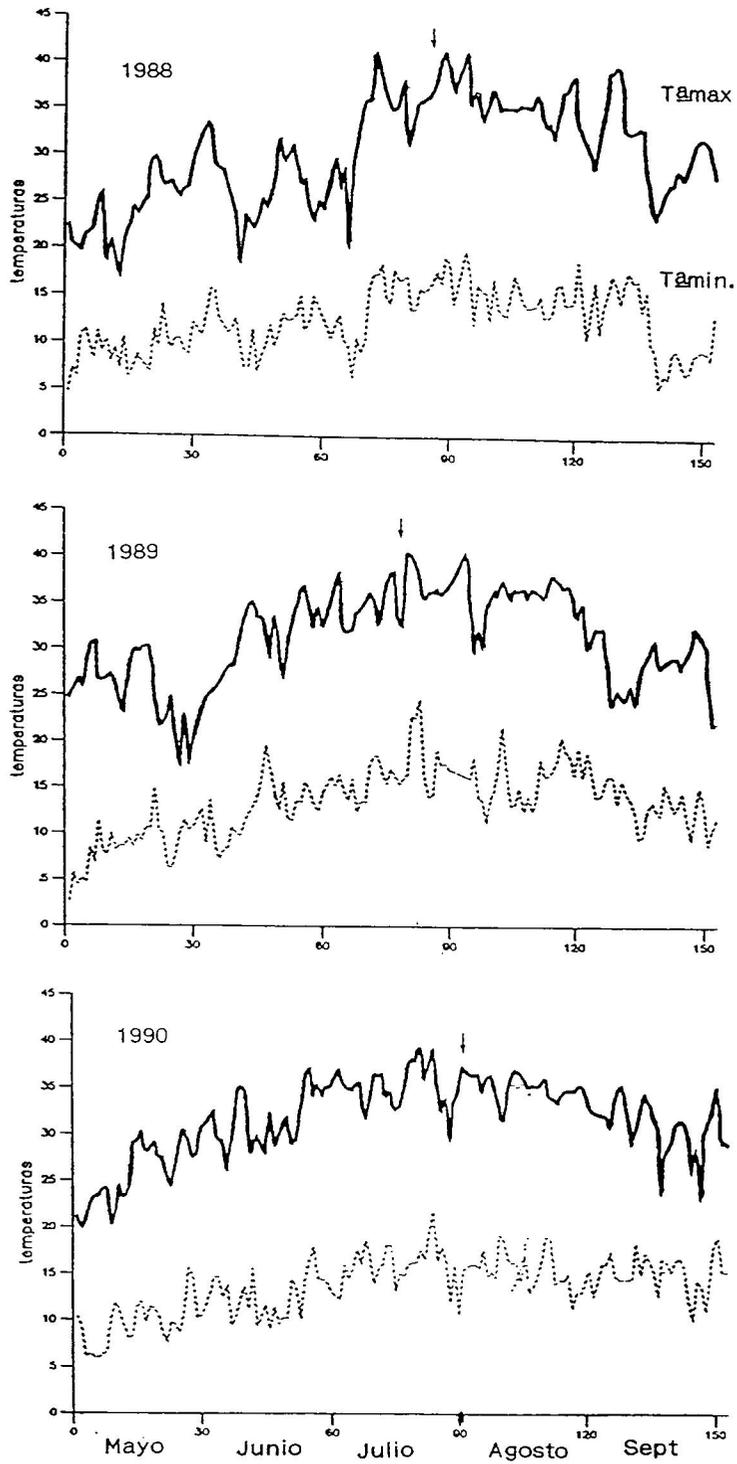


Figura 2m. Valores diarios de radiación (Cal/cm<sup>2</sup>). Años 88-89-90. (Se indica la fecha de antesis).

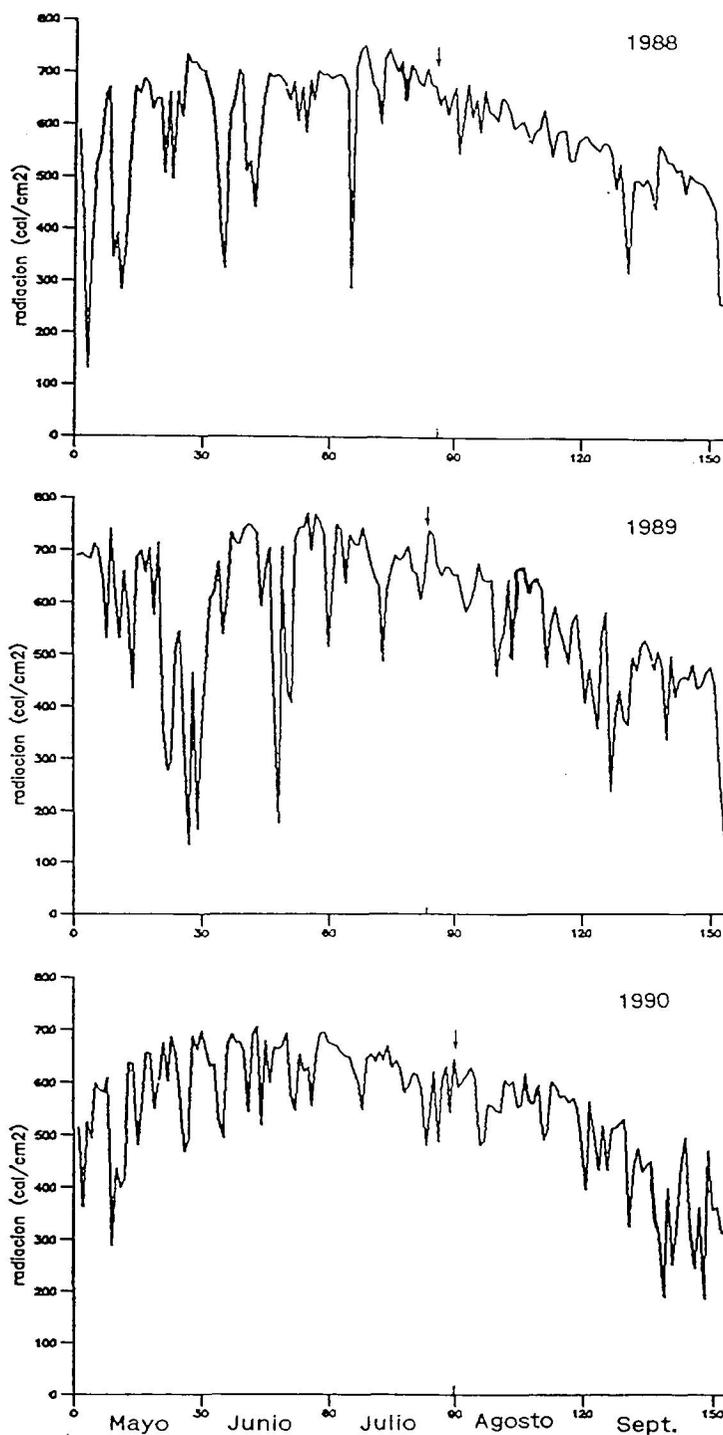
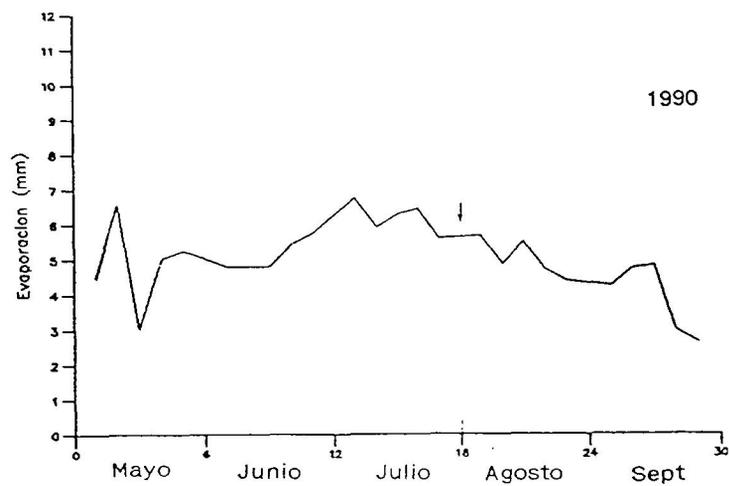
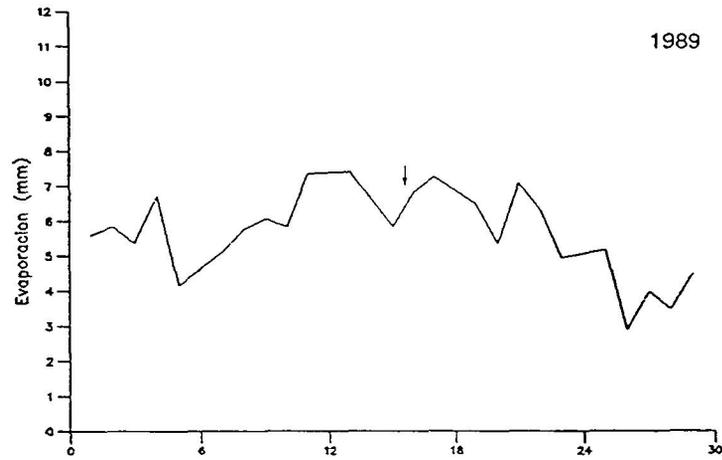
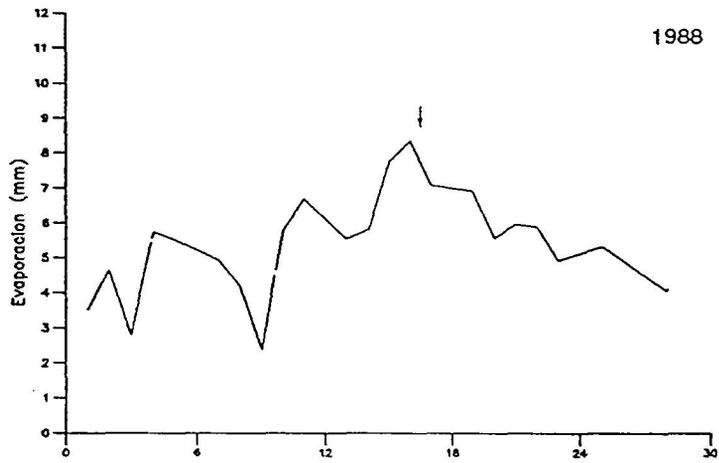


Figura 3m. Valores de ETo (mm) media de 5 días. Años 88-89-90. (Se indica la fecha de antesis)



### 3.5. Diseño experimental y determinaciones experimentales.

#### 3.5.1. Diseño experimental .

##### 3.5.1.1. Ensayo 1988.

Durante este año de estudio se realizó un ensayo siguiendo un diseño factorial 3X3 con cuatro repeticiones. Las parcelas elementales fueron de 67 m<sup>2</sup> (8 surcos con separación de 0.7 m entre ellos y 12 m de longitud). Se ensayaron 3 dosis de fertilizante nitrogenado: la que aporta normalmente el agricultor de la zona (300 U.F.N./Ha), junto con otras dos, una inferior (200 U.F.N./Ha) y otra superior (400 U.F.N./Ha) con aplicaciones en sembradura y cobertura. El abonado de sembradura consistió en un fondo de fertilizante de 720 Kg/Ha (complejo 8-15-15) lo que supuso 62 U.F.N./Ha, 115 U.F.P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>./Ha y 115 U.F.K<sub>2</sub>O./Ha. Como fertilizante de cobertura se utilizó urea al 46%, aplicándose en una, dos o tres veces (Tabla 4m.).

##### 3.5.1.2. Ensayo 1989.

Al igual que en el año anterior se ensayaron dosis y fechas de aplicación de fertilizante nitrogenado siendo la máxima dosis utilizada en este año, la mínima estudiada en el año anterior.

El diseño experimental correspondió a un factorial 3 X 3 con una parcela testigo de N y con 4 repeticiones. La parcela elemental fue de 66 m<sup>2</sup> (9 surcos por 12 m de longitud). El abono de fondo consistió en 800 Kg/ha del complejo 8-15-15 representando 64 U.F.N./Ha , 115 U.F.P./Ha y 115 U.F.K./Ha. El abono nitrogenado en cobertura fue urea al 46%. El tratamiento testigo de N se abonó a mano y por surco con superfosfato de cal al 18% y sulfato de potasio al 50% como fuentes de P y K respectivamente (Tabla 4m.).

Tabla 4m. Tratamientos, dosis y fechas de aplicación de fertilizante. Ensayo 1988.

Fertilizante nitrogenado (U.F./Ha)											
Trat 1988	Fondo	1 <sup>o</sup> Cob	2 <sup>o</sup> Cob	3 <sup>o</sup> Cob	Total	Trat 1989	Fondo	1 <sup>a</sup> Cob	2 <sup>a</sup> Cob	3 <sup>o</sup> Cob	Total
		23/6	15/7	8/8				14/6	29/6	13/7	
N-1-1	62	138			200	N-0	0	0	0	0	0
N-1-2	62	69	69		200	N-1-1	64	36			100
N-1-3	62	46	46	46	200	N-1-2	64	18	18		100
N-2-1	62	238			300	N-1-3	64	12	12	12	100
N-2-2	62	119	119		300	N-2-1	64	86			150
N-2-3	62	79.3	79.3	79.3	300	N-2-2	64	43	43		150
N-3-1	62	338			400	N-2-3	64	29	29	29	150
N-3-2	62	169	169		400	N-3-1	64	136			200
N-3-3	62	112	112	112	400	N-3-2	64	68	68		200
						N-3-3	64	45	45	45	200

1<sup>a</sup>Cob. aplicación de fertilizante en cobertera.

### 3.5.1.3. Ensayo 1990.

Considerando que en años anteriores no existió variabilidad estadística ni entre dosis de fertilizante nitrogenado ni entre fechas de aplicación de éste en cobertera, para esta campaña, el fertilizante nitrogenado de cobertera se aplicó en una única aportación coincidiendo con el estadio vegetativo del cereal.

Se estudiaron 3 dosis de fertilizante nitrogenado (0, 150 y 300 U.F./Ha), 3 dosis de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (0, 115 y 230 U.F./Ha) y 3 dosis de K<sub>2</sub>O (0, 115 y 230 U.F./Ha). El ensayo se realizó siguiendo un diseño factorial 2 X 3 X 3 con una parcela testigo con 4 repeticiones.

Las parcelas elementales fueron de 67 m<sup>2</sup>; el abonado de fondo y cobertera (en los tratamientos nitrogenados) se realizó a mano y por surco, utilizando como en años anteriores urea al 46%, superfosfato de cal al 18% y

sulfato de potasio como fuentes de N, P y K respectivamente. En la tabla 5 m. se muestran los tratamientos, dosis aplicadas de fertilizante y fechas de aplicacion de los mismos.

Tabla 5 m. Tratamientos, dosis y fechas de aplicacion de fertilizante. Ensayo 1990.

Trat	Fertilizante (U.F./Ha)				Fertilizante (U.F./Ha)				
	Fondo(25/5/90)			Cob(4/7/90)	Fondo(25/5/90)			Cob(4/7/90)	
	N	P	K		N	P	K		N
0 - 0 - 0	0	0	0	0	150 - 0 - 0	64	0	0	86
0 - 0 -115	0	0	115	0	150 - 0 -115	64	0	115	86
0 - 0 -230	0	0	230	0	150 - 0 -230	64	0	230	86
0 -115- 0	0	115	0	0	150 -115- 0	64	115	0	86
0 -115-115	0	115	115	0	150 -115-115	64	115	115	86
0 -230- 0	0	230	0	0	150 -230- 0	64	230	0	86
0 -230-115	0	230	115	0	150 -230-115	64	230	115	86
0 -230-230	0	230	230	0	150 -230-230	64	230	230	86
					300 -115-115	64	115	115	236

### 3.5.2. Determinaciones experimentales.

Para el estudio del desarrollo del cereal, así como para la determinación de los índices de crecimiento y el nivel nutricional del mismo, se realizaron recogidas de material vegetal aproximadamente cada 15 días en cada año. De cada parcela, en cada ensayo y muestreo, se tomaron 3 plantas representativas de los 2 surcos destinados a muestreo, despreciando las plantas de los surcos externos y las localizadas en los 2 metros de los extremos de cada surco para evitar los " efectos borde". Los 4 surcos centrales se dedicaron a cosecha, para determinar producción y componentes.

### 3.5.2.1. Determinación de parámetros primarios y de producción.

Las plantas previamente identificadas fueron transportadas al laboratorio y mantenidas en cámara fría (4°C) hasta su análisis. De cada planta, en fresco, se determinaron los parámetros siguientes:

- N° de hojas verdaderas
- N° de hojas muertas
- Diámetro de los tallos en la base y en el ápice
- Superficie foliar de los limbos, despreciando las vainas, medida mediante planímetro Delta-T.
- Longitud de la mazorca y diámetro de la misma en la base, ápice y porción media.
- N° de hojas totales
- Longitud de los tallos

Posteriormente cada fracción se embolsó y se secó en estufa de aire forzado a 70°C para la determinación del peso seco. En aquellos muestreos en los que se determinó el nivel nutricional de los tejidos, éstos se lavaron en fresco y secados en estufa independientemente.

La cosecha se realizó a mano tomando los 4 surcos centrales de cada parcela contando el n° de mazorcas por surco. Estas mazorcas se desgranaron y se pesaron en fresco para después tomar una submuestra por surco para secarla en estufa de aire forzado, determinando el % de humedad del grano al igual que de los zuros. De cada parcela se tomaron 5 plantas representativas y enteras para su análisis en el laboratorio; de cada planta se pesaron las hojas, tallos, farfolla e inflorescencias masculinas. Con las mazorcas desnudas se pasó a determinar el número de granos/mazorca (como producto del número de líneas/mazorca X número de granos/línea), longitud total de la mazorca, longitud de la mazorca con grano y diámetro de la misma. Posteriormente se desgranó a mano, pesando en fresco y seco tanto grano como zuro, para determinar la relación grano/zuro existente. Del grano obtenido de los 4 surcos de cosecha, se tomó una muestra para determinar el peso medio del grano previo conteo de 250 granos y peso de éstos por parcela.

Las recogidas en cada ensayo, fechas y estadíos fenológicos se muestran en la tabla 6 m.. Para la identificación de los estadíos fenológicos se utilizó la

metodología propuesta por Ritchie and Hanway (1989). Los estadíos fenológicos se diferencian en base al número de hojas visibles con el collar y aurículas definidas, en los estadíos de pre-antesis (periodo vegetativo), y en las características del grano en desarrollo, hasta madurez fisiológica en los estadíos de post-antesis (periodo reproductivo).

**Tabla 6 m.** Muestreos, fechas y estadíos fenológicos para los ensayos 88,89 y 90.

1988			1989			1990		
Fecha	d.d.s.	Estadío	Fecha	d.d.s.	Estadío	Fecha	d.d.s.	Estadío
7/6	28	Y4	25/5	20	Y2	11/6	20	V3
20/6	41	Y6	7/6	33	Y4	4/7	43	Y7
12/7	61	Y8	22/6	48	Y6	1/8	70	R1
28/7	78	R1	5/7	62	Y7	21/8	90	R3
13/8	94	R2	24/7	81	R1	5/9	105	R4
31/8	112	R4	9/8	97	R3	25/9	125	R6
20/9	123	R6	29/8	117	R4			
			20/9	137	R5			
			4/10	152	R6			

### 3.5.2.2. Determinación de nutrientes en material vegetal.

Antes de la determinación de nutrientes en el material vegetal, fué necesario la preperación de la muestra. Después de lavada con solución al 1 por 100 con un detergente no iónico, se lavó dos veces con agua corriente y una última vez con agua desionizada. Después del secado en estufa a 60°C se procedió a la molienda con molinillo reduciendo la muestra a polvo tomando 0.5-1.0 g en cápsula de porcelana.

### 3.5.2.2.1. Mineralización y solución de la muestra.

La cápsula con la muestra se colocó en el horno mufla en frío y se elevó la temperatura hasta 450°C en dos horas, manteniendo esta temperatura durante dos horas. Una vez conseguidas las cenizas, se humedecieron con 2 a 3 ml de agua y 1 ml de ClH concentrado, añadido lentamente. Posteriormente se calentó sobre placa caliente hasta la aparición de los primeros vapores, añadiendo algunos ml de agua. Se filtró posteriormente recogiendo el filtrado sobre un matraz aforado de 100 ml, lavando a continuación 3 ó 4 veces con agua.

### 3.5.2.2.2. Determinación de nitrógeno.

El principio de la determinación está en la transformación del nitrógeno presente en la muestra en sulfato amónico, mediante el ataque con ácido sulfúrico concentrado a ebullición en presencia de un catalizador. Posteriormente se destila en presencia de un exceso de hidróxido sódico y se valora el amoníaco destilado con ácido sulfúrico N/14.

El % de nitrógeno se calcula mediante la expresión

$$\% N = \frac{n}{10 \times P}$$

n= volumen en ml. de solución gastados en la valoración

p= peso en g. de la muestra

1 ml. de solución N/14 corresponde a 1mg de N.

### 3.5.2.2.3. Determinación de fósforo.

En solución ácida, en presencia de iones  $Mo^{5+}$  y  $Mo^{6+}$ , el ácido fosfórico da un complejo amarillo de fosfomolibdovanadato, cuya absorbancia se mide espectrofotométricamente a 430 nm.

El contenido de fósforo expresado en tanto por ciento de materia seca vendrá dado por la formula:

$$\text{Fósforo (\%)} = \frac{25 \times n}{V \times P \times 100}$$

P= peso en g de la muestra.

V= volumen en ml tomados de la disolución de las cenizas.

n= concentración de fósforo en ug/ml correspondiente a la lectura espectrofotométrica.

#### 3.5.2.2.4. Determinación de potasio.

La emisión espectral del potasio se mide a 760 nm en fotómetro de llama y se comparan las lecturas obtenidas con las de la curva patrón.

El contenido en potasio se expresa en % sobre materia seca, teniendo en cuenta las diluciones efectuadas.

#### 3.5.2.3. Determinación de nutrientes en suelo.

##### 3.5.2.3.1. Determinación de nitratos. ( Bremner, 1965)

Se extraen los nitratos con una solución de sulfato de plata y sulfato de cobre, que sirven para eliminar los iones Cl<sup>-</sup> y evitar las transformaciones biológicas del NO<sup>3-</sup> durante la extracción, respectivamente. Posteriormente, se precipita el cobre y la plata por la adicción de Ca(OH)<sub>2</sub> y CO<sub>3</sub> Mg, los cuales sirven, además, para clarificar la suspensión antes de su filtración. Por último se determina el NO<sup>3-</sup> colorimetricamente con ácido fenoldisulfónico a 420 nm.

##### 3.5.2.3.2. Determinación de fósforo. (Olsen y Dean, 1965).

Se basa en la extracción del P asimilable del suelo con solución de bicarbonato sódico 0.5M y su determinación colorimétrica utilizando la reacción del P en solución diluída con el molibdato amónico en medio ácido.

### 3.5.2.3.3. Determinación de potasio. (Pratt, 1954).

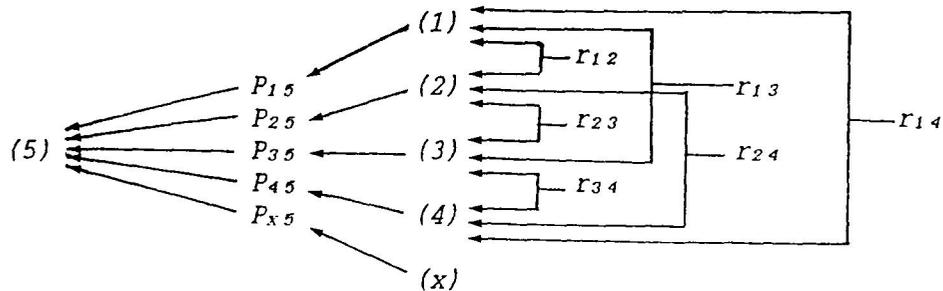
Se basa en la extracción de este elemento con una solución de acetato amónico y su determinación por fotometría de llama.

### 3.6. Cálculo de los coeficientes de sendero.

El estudio de las relaciones de las variables de un sistema puede ser contemplado desde dos puntos de vista bastante diferentes: como una mera descripción estadística de sus interrelaciones, sin tomar en consideración la importancia relativa de cada variable, en el análisis de regresión múltiple o por el contrario, como una interpretación basada en relaciones de causa-efecto para cada variable, especificando su dirección y valorando su importancia jerárquica dentro del sistema, en el análisis mediante coeficientes de sendero desarrollado por Wrigth en 1923.

Obviamente, la segunda aproximación resulta más real cuando se trata de analizar un sistema de variables como el constituido por la cosecha de un cultivo y sus componentes, donde éstas se desarrollan secuencialmente y la magnitud alcanzada por cada uno de ellos determina en gran medida la de los siguientes. Así el análisis mediante coeficientes de sendero, contempla la cosecha como resultado de los efectos ejercidos por los componentes del rendimiento, tanto en forma directa (es decir la influencia que cada componente ejerce por sí mismo) como indirecta ( a través de la modificación que cada uno de ellos induce en los demás).

Un coeficiente de sendero es simplemente un coeficiente de regresión estandarizado y, como tal, mide la influencia directa de una variable sobre otra, permitiendo la separación de un coeficiente de correlación en sus componentes de efectos directos e indirectos. El uso de éste método requiere fijar una dirección al sistema causa-efecto, establecida por la previa evidencia experimental. Para cinco variables el esquema de análisis puede expresarse gráficamente, como se muestra en el siguiente esquema:



En el esquema, las líneas con doble flecha muestran la existencia de relación simétrica entre variables, lo que indica influencia mutua medida mediante un coeficiente de correlación. Aquellas con una sólo flecha representan influencias directas además del sentido de éstas, siendo medidas por los adecuados coeficientes de sendero. Estos se obtienen mediante la resolución simultánea de las siguientes ecuaciones, en las cuales se expresan las relaciones entre coeficientes de sendero y de correlación.

$$\begin{aligned}
 r_{15} &= P_{15} + r_{12} \times P_{25} + r_{13} \times P_{35} + r_{14} \times P_{45} \\
 r_{25} &= P_{25} + r_{12} \times P_{15} + r_{23} \times P_{35} + r_{24} \times P_{45} \\
 r_{35} &= P_{35} + r_{13} \times P_{15} + r_{23} \times P_{25} + r_{34} \times P_{45} \\
 r_{45} &= P_{45} + r_{14} \times P_{15} + r_{24} \times P_{25} + r_{34} \times P_{45}
 \end{aligned}$$

La variable X consta de todos aquellos factores residuales que influyen de forma independiente sobre la variable principal y su valor se calcula mediante la siguiente expresión:

$$1 = P^2_{x5} + P^2_{15} + P^2_{25} + P^2_{35} + P^2_{45} + 2P_{15}.r_{12}.P_{25} + 2P_{15}.r_{13}.P_{35} + 2P_{15}.r_{14}.P_{45} + 2P_{25}.r_{23}.P_{35} + 2P_{25}.r_{24}.P_{45} + 2P_{35}.r_{34}.P_{45}.$$

El cálculo de los coeficientes de sendero se realizó según el modelo y programa de Basic propuesto por García del Moral *et al.*, (1991).

### 3.7. Cálculo de los índices de crecimiento.

La metodología utilizada considera el crecimiento como el resultado de la capacidad de la planta o cultivo para la interceptar la radiación luminosa (es decir, del tamaño que alcance su aparato asimilador), de su eficiencia en la producción de materia seca y del tiempo en que se mantenga fotosintéticamente activa. Todas estas características pueden ser cuantificadas mediante una serie de índices.

De cara a nuestros objetivos el crecimiento se ha estudiado " antes y después" de la antesis ya que en esta fase se produce un cambio fisiológico muy importante en el desarrollo de los cereales en general y del maíz en particular. Así, pasan de una fase de crecimiento general de todos sus órganos a otra en la que predomina el transporte de fotosintetizados hacia los granos.

#### a) Índices para caracterizar el crecimiento hasta la antesis.

##### -Índice de área foliar (LAI)

Este índice representa una medida del aparato asimilador en relación al área de terreno (Watson, 1947). Ha sido calculado en cada toma de muestras mediante la expresión:

$$LAI = N \times A \text{ [área foliar/ área de terreno]}$$

N = nº de plantas/unidad de superficie de terreno.

A = superficie foliar por planta.

Este índice aumenta con el desarrollo del cultivo hasta un máximo decreciendo posteriormente debido a la senescencia de las hojas. En cereales, LAI incrementa con las disponibilidades de N (especialmente en aplicación temprana) a través del aumento en el número y tamaño de las hojas, así como en el número de tallos hijos (García del Moral *et al.*, 1984); con el suministro de P y K, que estimulan el tamaño de las hojas y retrasan la senescencia, y

con la irrigación. Por el contrario, el área foliar y LAI decrecen con el incremento en iluminación o el retraso en la fecha de siembra y con la sequía, incluso a niveles moderados (Freyman, 1980; Legg et al., 1979).

-Inversa de la proporción del área foliar (1/LAR)

Derivado del propuesto por Briggs, Kidd y West (1920), este índice describe la relación entre el peso seco de la planta y su área foliar:

$$1/LAR = 1 / A/W = \frac{W}{A} \quad [\text{peso/área foliar}]$$

W= peso seco por planta.

De esta manera, 1/LAR puede ser utilizado como una medida de la eficiencia en la asimilación de la materia seca, es decir, de la cantidad de peso producido en un momento dado por unidad de superficie foliar. Como tal, sus variaciones normalmente reflejan la influencia de los factores ambientales sobre la velocidad de los dos procesos básicos (fotosíntesis y respiración) que regulan la intensidad del crecimiento ( Evans, 1972) dependiendo más de la radiación incidente que de ningún otro factor ambiental, al ser una medida de la maquinaria fotosintética. Así mismo, y a causa del incremento en el sombreado mutuo de las hojas, este índice se encuentra correlacionado negativamente con el área foliar y, consecuentemente, con todos los factores que promuevan su desarrollo ( aporte de N, deficiencia de luz, alto suministro hídrico...) (Kvet et al., 1971).

-Biomasa o peso seco del cultivo. (CDW)

Representa en términos absolutos, la producción de materia seca del cultivo por unidad de superficie de terreno (Warren-Wilson, 1981):

$$CDW = N \times W \quad [\text{peso/área de terreno}]$$

Este índice constituye el factor de proporcionalidad que relaciona el crecimiento de las plantas individuales con el crecimiento del cultivo. Su valor depende de la magnitud de los dos índices anteriores ya que:

$$CDW = LAI \times 1/LAR$$

ó

$$N \times W = N \times A \times W/A$$

Esta relación permite que cualquier efecto sobre el crecimiento del cultivo pueda ser interpretado en términos de su influencia sobre el tamaño del aparato asimilador (LAI), sobre su eficiencia neta (1/LAR) o, lo que es más frecuente, sobre ambos.

En países con ambiente mediterráneo se ha demostrado la existencia de una estrecha relación entre CDW durante la fase de antesis y la producción final de grano en cereales (Ramos *et al.*, 1985), lo que dá una idea de la gran importancia que en estos ambientes tiene la biomasa que el cultivo alcance en la antesis.

b) Índices para caracterizar el crecimiento durante el periodo de maduración.

- Duración del área foliar. (LAD)

El índice de área foliar es una medida del tamaño del aparato asimilador en un instante determinado, pero no tiene en cuenta el tiempo durante el cual es activo en la producción de materia seca. Por esta razón, Watson (1947) sugirió que la integral del área bajo la curva de LAI frente al tiempo, a la que denominó duración del área foliar, podía suministrar una buena medida de la capacidad del cultivo para producir y mantener su área foliar, y por tanto, de su "oportunidad total para la asimilación". Si se desea calcular exactamente el valor de este índice debe conocerse la ecuación de la curva del área foliar o de LAI durante todo el desarrollo del cultivo. Sin embargo, cuando sólo se dispone de un número limitado de observaciones puede realizarse una

aproximación gráfica considerando el valor de LAD como el área del trapecio que, bajo la curva de LAI frente al tiempo, delimitan las fechas consideradas para el período de maduración; las de antesis (LAIa) y madurez (LAI<sub>m</sub>) (Kvet et al., 1971).

$$LAD = \frac{LAIa + LAIm}{2} \times (tm - ta) \text{ [tiempo]}$$

La ecuación anterior expresa en términos cuantitativos como mantiene una planta o cultivo su superficie asimiladora activa durante la maduración, encontrándose buenas correlaciones con la producción de grano en numerosos cereales de zonas húmedas o bajo condiciones de irrigación (Thorne, 1974), aunque en ambiente mediterráneo estas relaciones decaen considerablemente (Ramos et al., 1982).

- Eficiencia asimiladora durante la maduración (G).

Propuesto por Watson, Thorne y French (1963), este índice posee gran interés en los estudios sobre producción de cultivos de cereales. Se calcula dividiendo la producción final de grano (Y) por la duración del área foliar en el período comprendido entre la antesis y la madurez:

$$G = \frac{Y}{LAD} \text{ [peso/área de terreno X tiempo]}$$

Este índice, por tanto, proporciona una medida de la eficiencia fotosintética de la superficie verde en la producción de carbohidratos para el grano; es decir, similar a 1/LAR para el período de maduración. Según estos autores, G constituye un parámetro más sensible de la eficacia asimiladora durante el crecimiento del grano que cualquier otra característica basada en el peso seco total, puesto que la intensa translocación de asimilados hacia el

