

L. SANCHEZ DE LA PUENTE

TEMAS DE DIVULGACION

11



# LA ALIMENTACION MINERAL DE LAS PLANTAS

I.O.A.T.O.-EXCMA. DIPUTACION PROVINCIAL  
SALAMANCA

Ref. 12-988

180107

CB: 448335

L. SANCHEZ DE LA PUENTE



# LA ALIMENTACION MINERAL DE LAS PLANTAS

TEMAS DE DIVULGACION

I.O.A.T.O.-CENTRO DE EDAFOLOGIA Y BIOLOGIA APLICADA  
EXCMA. DIPUTACION PROVINCIAL

SALAMANCA

1984

## 1. INTRODUCCION HISTORICA

El primer investigador que se ocupa de la nutrición mineral de las plantas parece ser que fue VAN HELMONT, allá por el año 1600. Cultivó un sauce en una maceta a la que sólo añadió agua, observando un gran aumento de peso de la planta y una pequeñísima disminución del peso de la tierra, que utilizó como soporte del cultivo. Concluyó, erróneamente, que el agua era la causa del aumento de peso y no le dio importancia a la pérdida de peso del suelo. Tampoco, en aquella época, se dio cuenta del importante papel desempeñado por el aire.

GLAUBER, años más tarde, afirmaba que el «principio de vegetación» era el nitrógeno y WOODWARD, en la misma época, cultivando hierbabuena en agua de diferentes orígenes, concluía que los vegetales se forman de «cierta sustancia térrea particular».

Más tarde, en 1804, DE SAUSSURE emplea soluciones minerales o agua destilada, iniciando así la experimentación cuantitativa. Resultado de la misma fue la ya importante conclusión de que la alimentación de las plantas era de naturaleza mineral, resaltando el espectacular efecto de los nitratos y diferenciando claramente la fotosíntesis de la nutrición mineral.

Las primeras leyes sobre nutrición mineral las enuncia LIEBIG en 1840; la Ley de Restitución, que establece el principio de que es necesario devolver al suelo los nutrientes extraídos por los cultivos, y la Ley del Mínimo, que señala que el crecimiento de la planta está en función del nutriente que se encuentra en, relativamente, menor cantidad.

MITSCHERLICH, en 1909, dio forma matemática a la Ley del Mínimo. La ecuación correspondiente deriva de la idea de que el incremento del rendimiento, debido a cada unidad del factor, es directamente proporcional a lo que le falta para alcanzar el rendimiento máximo.

Otra forma de la Ley del Mínimo la enuncia BLACKMAN en 1905 y le da el nombre de Ley de los Factores Limitantes. El factor limitante impone un límite en el crecimiento, de forma que los demás factores no tienen efecto. El rendimiento o el crecimiento es función de ese factor por debajo de ese valor limitante. Superado el nivel, otro factor actuará como limitante y lo mismo ocurrirá si éste supera el nivel limitante.

Aceptada la diferencia entre la fotosíntesis, o incorporación del carbono a la planta, utilizando el anhídrido carbónico del aire, y la nutrición mineral, o incorporación de las sales minerales del suelo, la primera pregunta que surge es acerca de la naturaleza de los elementos químicos necesarios para la vida. Es la gran preocupación de los investigadores de la segunda mitad del siglo XIX y principios del XX. Antes es necesario determinar la composición química mineral de las plantas. Se desarrollan técnicas analíticas que, estimuladas por esta necesidad, llegan a adquirir una extraordinaria perfección.

La presencia de un elemento en la planta no es argumento de su esencialidad. Aparecen así, los criterios de esencialidad de ARNON (1939) y que son los siguientes:

1. La deficiencia del elemento hace imposible que la planta complete su ciclo vital.
2. La deficiencia es específica para el elemento en cuestión, es decir, no puede ser totalmente sustituido por otro.
3. El elemento está directamente involucrado en la nutrición de la planta, bien como un constituyente de un compuesto esencial, o necesario para la acción de un sistema enzimático.

Comienza, entonces, la tarea de determinar la esencialidad o no de los diferentes elementos químicos presentes en el material vegetal. Se necesitan nuevos métodos de cultivo, para controlar la composición química mineral del medio. Los cultivos con soportes sin suelo o artificiales proliferan. La arena lavada a los ácidos, los cultivos en medio líquido y en otros medios considerados inertes se usan en las numerosas investigaciones del primer tercio del siglo actual.

Resultado de estos estudios es la aceptación, prácticamente universal, de la esencialidad de dieciséis elementos químicos para las plantas superiores, y la de otros tres más para determinadas plantas.

A partir de los años veinte de este siglo, la inquietud de los investigadores se dirige hacia el control de la nutrición, investigaciones que son de completa actualidad. No se trata ya de conocer los elementos esenciales

y sus efectos en situaciones de deficiencia, aunque estos trabajos también continúan, ya que las especies vegetales son muy numerosas, sino de estudiar el aspecto cuantitativo de la presencia de los nutrientes en la planta. Aparecen así los estudios que, de una forma global, se encaminan hacia la interpretación de los valores que da el análisis químico mineral de los vegetales. Con ello se presentan nuevos problemas o nuevas diversificaciones en la búsqueda científica de leyes fisiológicas. Se plantea el problema, por ejemplo, de la parte de la planta a analizar y del momento de su ciclo vital, o, complicándolo aún más, la forma del nutriente que debe ser investigado. Fácilmente se comprende la gran amplitud que adquiere el campo de la Fisiología Vegetal.



FIG. 1. *Los ensayos en macetas, en condiciones controladas, forman parte del trabajo normal en estudios de nutrición.*

## 2. NUTRICION VEGETAL

La nutrición o la alimentación consiste en la incorporación de sustancias externas al propio organismo, mediante un proceso, más o menos complejo según los distintos seres, llamado asimilación.

En el hombre y en los animales, los alimentos son sustancias fabricadas por otros organismos, de los que dependen. Se dice que su alimentación es *heterótrofa*. El proceso de incorporación es muy complejo, requiriendo, en general, una fase previa de descomposición de los compuestos ingeridos, hasta moléculas de determinado tamaño, que hace posible el cumplimiento de dos funciones: una, la capacidad para moverse dentro del organismo, traspasando muchas clases de tejidos y, otra, disponer de la materia prima para construir los compuestos orgánicos característicos de cada individuo. La materia formada es regulada por el código genético que le es propio.

Los problemas de la alimentación heterótrofa se corresponden con la complejidad expuesta y tienen poco que ver con la nutrición de las plantas que, como se verá, presenta otra perspectiva totalmente diferente. Así, en la alimentación del hombre pueden presentarse problemas relacionados con la descomposición de los alimentos, lo que nunca ocurre en la planta, y otros de síntesis de sus propios compuestos. Las sustancias que se necesitan formar son proteínas, carbohidratos, grasas y hormonas, con una estructura química peculiar, a partir de estos mismos compuestos, pero de otra estructura química diferente y variable. También se incorporan sustancias que no precisan esta reordenación química, como muchas vitaminas, otras también las sintetiza y, por supuesto, las necesarias sales minerales.

Las plantas no necesitan de otros seres vivos para alimentarse. Son de nutrición *autótrofa*. Utilizan compuestos inorgánicos, sencillos que existen en la naturaleza, en el aire y en el suelo, construyendo con ellos su propia materia. Dependen además de la luz, temperatura y humedad, de las condiciones nutritivas del medio. La planta tiene que tener asegurado el suministro de anhídrido carbónico del aire y de nutrientes

minerales del suelo. Una buena combinación de todos estos factores, a los que se les puede llamar *factores de crecimiento*, tendrá como resultado un desarrollo normal de la planta.

La incorporación del anhídrido carbónico ( $\text{CO}_2$ ) se realiza mediante el proceso de la *fotosíntesis*, sin el cual no sería posible la vida en la tierra. Este proceso de nutrición se distingue claramente de la nutrición mineral. La entrada del anhídrido carbónico se realiza por las hojas y por los tejidos verdes, en general. El carbono es la materia prima con la que la planta construye los carbohidratos, estructuras básicas sobre las que se forman otros compuestos. Interviene como factor fundamental la luz. De ahí el nombre de *fotosíntesis*. También está involucrado un pigmento llamado clorofila, por lo que el proceso recibe asimismo el nombre de *función clorofílica*. A la fotosíntesis se debe la mayor parte del incremento de peso de la planta en su crecimiento y necesita de la nutrición mineral, con la que está estrechamente relacionada. Así, por ejemplo, el magnesio forma parte de la clorofila y su deficiencia provoca síntomas visuales de clorosis, o pérdida del color verde y su sustitución por el amarillo.

La incorporación de sustancias minerales al vegetal se verifica por las raíces desde el suelo. No se puede ahora hablar de un simple proceso, sino que están involucrados muchos y la problemática es realmente compleja. En primer lugar hay que pensar en el suelo, su composición y estructura. Se sabe la gran diversificación que existe en los suelos, que es función, no solamente de la naturaleza de la roca madre, sino de todo el proceso de su formación y que, naturalmente, tiene la variabilidad correspondiente a cualquier otro proceso de larga duración.

El suelo se caracteriza por sus propiedades físicas y químicas. Las primeras dependen de su composición granulométrica y del estado de agregación de las partículas, que dan al suelo su peculiar aireación, porosidad, permeabilidad, capacidad de retención de humedad, etc. Las segundas tienen que ver con el grado de acidez y la composición química de la solución del suelo, ofreciendo a la planta unos condicionamientos determinados de suministro de nutrientes que, a su vez, se hallan en interacción con las propiedades físicas antes mencionadas y con la especie vegetal que se cultiva.

La absorción de los nutrientes para su incorporación al vegetal está influenciada, asimismo, por la propia especie vegetal, que determina la *superficie radical efectiva* y la exploración mayor o menor del suelo. Qué duda cabe que el suelo es diferentemente explotado por un árbol de gran porte con sus largas y profundas raíces, que por una planta que, como la fresa, se caracteriza por su sistema radicular superficial. También las diferencias metabólicas entre las especies, por citar otro ejemplo, introducen fuertes variaciones en la absorción de las sales minerales, en lo que se conoce como absorción activa.

### 3. NUTRIENTES MINERALES

Los elementos esenciales, de acuerdo con los criterios de esencialidad de ARNON, mencionados en la Introducción, son los siguientes:

Carbono	C	Potasio	K	Cobre	Cu
Hidrógeno	H	Calcio	Ca	Zinc	Zn
Oxígeno	O	Magnesio	Mg	Molibdeno	Mo
Nitrógeno	N	Hierro	Fe	Cloro	Cl
Fósforo	P	Manganeso	Mn	(Sodio)	Na
Azufre	S	Boro	B	(Silicio)	Si
				(Cobalto)	Co

Los tres últimos citados, que aparecen entre paréntesis, no tienen establecida su esencialidad para todas las plantas superiores. El sodio se encuentra en, relativamente, grandes cantidades, en algunas especies adaptadas a condiciones salinas. En otros casos se le conoce un efecto beneficioso y en otros es esencial. El silicio se sabe es esencial para el arroz. El cloro es el elemento que se ha añadido a la lista más recientemente.

No puede decirse, por otra parte, que no haya más elementos esenciales para la alimentación mineral de las plantas, en concentraciones muy bajas. También se conoce que algún elemento, fuera de la lista, es esencial para alguna especie en particular, como por ejemplo el vanadio, V, que lo precisa algún microorganismo.

Se ha dividido, de forma convencional, esta lista en dos partes: los llamados *macronutrientes* y los *micronutrientes* u *oligoelementos*. El criterio es sencillamente la cantidad presente en la planta. Los *macro* se encuentran en grandes cantidades y los *micro* en pequeñas. Pertenecen a aquéllos: el carbono, calcio, oxígeno, hidrógeno, nitrógeno, fósforo, azufre, potasio y magnesio. Los *micro* serían: el hierro, manganeso, boro, cobre, zinc, molibdeno y cloro.





FIG. 2. Analizador de  $\text{CO}_2$  por rayos infrarrojos. Los nuevos equipos permiten avanzar más deprisa en la investigación científica sobre la nutrición de las plantas.



FIG. 3. Espectrofotómetro de absorción atómica. Su uso se hace imprescindible en las determinaciones de elementos minerales en la materia vegetal.

Ello no quiere decir que unos tengan mayor importancia que los otros, ni que su acción sea proporcional a estas diferentes presencias. Todos ellos son esenciales y su ausencia anula el crecimiento, por lo que, como dijimos antes, esta clasificación es convencional. Pueden tener alguna característica que los una de algún modo. Por ejemplo, por la propia escasa presencia de los *micronutrientes* ha sido más difícil y, por tanto, se ha tardado más, en determinar su esencialidad. Fue necesario el desarrollo previo de análisis y de separación de sustancias.

Pero hay otras clasificaciones de los nutrientes, más en consonancia con la fisiología vegetal y que, brevemente, vamos a comentar a continuación. Podrían dividirse en cuatro grupos.

*Un primer grupo* lo compondrían el carbono, hidrógeno, oxígeno, azufre y nitrógeno. La característica de mayor importancia que los agrupa sería la de ser los constituyentes más importantes de los compuestos orgánicos vegetales. *El segundo grupo* estaría formado por el fósforo, boro y silicio que pasan a la planta en forma de aniones inorgánicos, pudiendo permanecer como tales o ligados. El potasio, sodio, calcio, magnesio, manganeso y cloro entran en forma iónica en la planta, de la misma forma que se encuentran en el suelo en la que permanecen, constituyen el tercer grupo. *El último grupo, el cuarto*, lo componen el hierro, cobre, zinc y molibdeno y se caracterizan por estar dentro de la planta, muy frecuentemente, en forma de quelatos, estructura en la que generalmente están en el suelo y durante la absorción. Estos grupos no son estancos, sino que algunos elementos pueden clasificarse en más de uno, ya que sus funciones son múltiples.

Las funciones de los nutrientes, o el papel que desempeñan en la planta, son muy diversas y numerosas, no sólo por el número de elementos esenciales en sí, sino porque cada uno desempeña varias funciones.

Puede decirse que todos forman parte de las enzimas, que tienen la misión de acelerar y hacer posibles las relaciones químicas que tienen lugar en las plantas. Cuando un elemento pertenece a un compuesto enzimático, la acción de la enzima señala el papel desempeñado por el elemento. Puede en otros casos no formar parte propiamente de la enzima, pero ser necesaria su presencia, lo que ocurre con los micronutrientes.

El *carbono* es el elemento más abundante en la materia vegetal. Es la base de todos los compuestos orgánicos y no necesita, por tanto, especificar función alguna. Existe toda una *Química del Carbono*. Junto con el oxí-

geno e hidrógeno son los componentes de los carbohidratos (triosas, exosas, polisacáridos, almidón, celulosa, etc.) que se sintetizan en la fotosíntesis.

El *nitrógeno* forma parte de los aminoácidos, base de las proteínas, compuestos que tampoco necesitan comentario alguno, por ser de todos conocido su papel esencial en la vida. Existen también amplios tratados sobre las proteínas, su síntesis, su especificidad en los distintos organismos e individuos, su gran diversidad por las múltiples combinaciones secuenciales de los aminoácidos, etc.

El *azufre* es constituyente de dos aminoácidos, la cisteína y la cistina y, por tanto, de las proteínas en las que estos aminoácidos figuren. También el grupo sulfato tiene su acción propia.

El *fósforo* es asimismo constituyente de numerosos compuestos fundamentales en la vida de las plantas. El grupo fosfato se liga con muchos compuestos, para realizar síntesis y degradaciones, pudiéndose decir que está presente en todas aquellas que suponen un intercambio de energía. También interviene activamente en los procesos genéticos.

Los cationes, *potasio*, *calcio*, *magnesio*, son necesarios en forma iónica para regular numerosos procesos físico-químicos, como la ósmosis, difusión, permeabilidad, viscosidad y que tienen relación con la economía del agua, y los procesos afines, como la absorción y la transpiración.

Finalmente, debe indicarse que cualquier función de las señaladas viene después modificada por las interacciones de todos los compuestos, en sus distintas circunstancias y condicionamientos en que se presentan en la naturaleza.

#### 4. ABSORCION MINERAL

Descritos ya los nutrientes esenciales y, de una forma muy general, las funciones que ejercitan, pasamos, ahora a comentar, también de forma muy somera, los procesos envueltos en la incorporación a la planta.

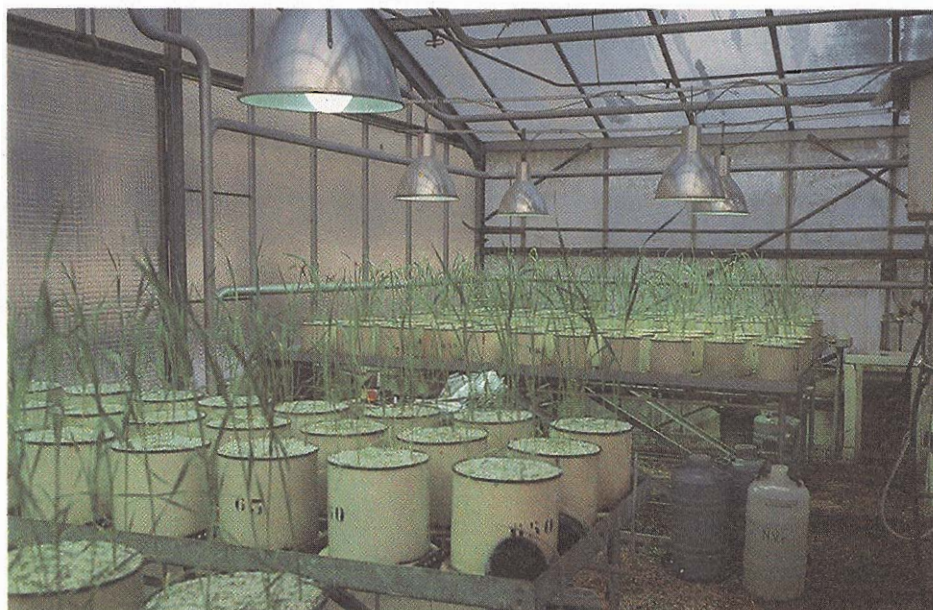


FIG. 4. A veces se emplea luz artificial para prolongar la duración del día, en épocas de días cortos

Ya se ha dicho que el *carbono* y el *oxígeno* entran a la planta a través de sus órganos aéreos y procedentes del aire, mediante el proceso de la fotosíntesis. El *hidrógeno* también puede utilizar la misma vía, y la misma procedencia sobre todo en condiciones de humedad.

Se ha estudiado mucho y se han realizado numerosísimos experimentos sobre la absorción mineral. Ha habido defensores para cada teoría y se sigue discutiendo muchos aspectos de este complicado proceso.

La primera hipótesis data del siglo pasado y se concreta en que las sales se incorporan a la planta pasivamente con el agua. La entrada de agua facilita la de las sales disueltas, distribuyéndose después por todo el organismo. No explica esta teoría la distinta composición del vegetal y del medio.

Se pensó en el fenómeno de *difusión*, o dispersión de un soluto en el disolvente, por los movimientos térmicos de ambos, hasta llegar a la homogeneización total y en la *ósmosis* que es la difusión a través de una membrana. La raíz en contacto con la solución nutritiva o del suelo formará un sistema, dentro del cual podrían difundirse, a través de membranas o no, los elementos nutritivos de las sales minerales. Tampoco la ósmosis puede explicar, por sí sola, la velocidad a la que realmente corresponde el movimiento de los minerales en el vegetal.

Se piensa, por tanto, en otros mecanismos físico-químicos. Aparte del cambio iónico y del equilibrio Dónnan, que son variantes de los fenómenos que acabamos de comentar, se presenta la teoría de la *corriente de transpiración*. La pérdida de agua, por transpiración, en las partes más externas de la planta, acarrearía la succión de la solución del suelo como si se tratase de una bomba, obligando a un movimiento de los líquidos en el vegetal, lo cual está más en consonancia con la velocidad observada en los ensayos.

Las leyes para el establecimiento del equilibrio en sistemas de cambio iónico y del equilibrio Dónnan están perfectamente estudiadas, suponiendo que la membrana de separación de iones es totalmente permeable a algunos de los iones. Esto en la realidad puede no ser así, debido a las distintas estructuras de las membranas naturales de los vegetales, que incluso pueden ser cambiantes con el tiempo y con los órganos. Es necesario, por tanto, estudiar profundamente estas estructuras. Se conoce, por ejemplo, que la permeabilidad celular cambia con el metabolismo vegetal.

Hay más procesos físico-químicos y químicos que pueden participar accidentalmente en la absorción de nutrientes. *La adsorción* es el fenómeno por el cual las sales tienden a acumularse en la interfase, si con ello se rebaja la tensión superficial. Tanto los aniones como los cationes de solución acuosa se adsorben en la superficie de muchos constituyentes celulares, como la celulosa, las proteínas y otros. Se conocen asimismo las leyes matemáticas que rigen las relaciones entre el soluto adsorbido y la concentración en la solución. Existen dos clases de adsorción, si bien ambas de-

penden de las fuerzas eléctricas que actúan en la superficie adsorbente. Una, *mecánica*, que utiliza residuos débiles y valencias secundarias, cuyas sustancias adsorbidas pueden separarse por lavado acuoso, y otra, llamada *polar*, que depende de la formación de sales.

No hay distinción clara entre la combinación química y la adsorción polar. Uno de los mecanismos mejor conocidos de la combinación química es la formación de quelatos entre ciertas moléculas orgánicas y los cationes bi y trivalentes. Existen otras muchas combinaciones químicas, que intervienen indirectamente en el proceso de absorción mineral, impidiendo que la concentración en las células se incremente excesivamente y dificulte el paso de sales.

Pero lo más destacado en la absorción es lo que se llama transporte activo. Interviene energía procedente del metabolismo celular. Es la combinación entre el metabolismo del vegetal con enlaces reversibles de iones, donde algunas moléculas actúan como verdaderos transportadores, lo que facilita la realización del proceso.

Es a partir de 1930 cuando se reconoce claramente que la absorción depende fuertemente del metabolismo aerobio. Esto lo anuncia HOAGLAND en Estados Unidos, LUNDEGARDH en Suecia y STEWARD en Inglaterra. Por lo mismo se reconoce también la relación que debe existir entre la absorción y la respiración y que es inadecuado pensar en sólo mecanismos físicos para explicar el fenómeno de la absorción.

Todo lo expuesto forma un cuadro bastante complejo de los distintos mecanismos que pueden actuar en circunstancias distintas. Es decir, es posible cualquiera de ellos, o varios simultáneamente, dependiendo de las múltiples condiciones en que puedan encontrarse las plantas. No se ha entrado, con intención, en problemas que, aunque ajenos a la absorción propiamente dicha, ofrecen enorme influencia en la marcha de la misma. Por ejemplo, todos los procesos físico-químicos que tienen lugar en el suelo, con la rica complejidad de sustancia y situaciones, o la abundante variabilidad, según las fases del desarrollo del vegetal y de las condiciones climatológicas, tan diversas y cambiantes. En todo caso *debe entenderse que la absorción mineral puede, por sí misma, condicionar gravemente el buen desarrollo de la planta*. Hay que evitar que este aspecto pueda ser un factor limitante del cultivo.

## 5. TRANSFORMACIONES BIOQUIMICAS

Los bioelementos, una vez dentro de la planta, son muy activos, participando en numerosísimas reacciones químicas, base de la vida, necesarias para el mantenimiento del vegetal, su crecimiento, intercambio energético, formación de nuevos órganos, continuidad de la especie, etc.

La bioquímica vegetal explica detalladamente las reacciones químicas que tienen lugar en las plantas. No es posible decir aquí lo que se expresa en gruesos volúmenes. Vamos a intentar exponer una brevísima visión.

### ENZIMAS

Son proteínas que tienen por misión hacer posibles las reacciones químicas a la velocidad requerida por la actividad vital. Sin su concurso no sería posible la vida en la forma que actualmente tiene. Son muy específicas. Su participación es generalmente activa, mediante combinación química reversible. Todos los bioelementos metálicos participan en reacciones catalíticas enzimáticas.

### CARBOHIDRATOS

El carbono, el hidrógeno y el oxígeno, que se incorporan en la fotosíntesis, se unen para formar los carbohidratos. Los más sencillos son los monosacáridos, como la glucosa y fructosa. Combinándose se forman los oligosacáridos, como la sacarosa, la rafinosa, etc., y los polisacáridos como la celulosa y el almidón. Sufren continuas transformaciones e incluso se degradan, produciendo energía, que acumulan en otros compuestos, para después utilizarla en otras reacciones de síntesis. La energía del sol, captada en la fotosíntesis, es después regulada por medio de reacciones químicas. La respiración está también envuelta en el intercambio energético.

## ACIDOS NUCLEICOS

El fósforo es también un componente esencial de los ácidos nucleicos, existentes en todas las células, pertenecientes al material genético, encargado de la transmisión de los caracteres de la especie. Los iones fosfato se unen a los nucleósidos, formando los nucleótidos, cuyos polímeros son los ácidos nucleicos.



FIG. 5. Las condiciones seminaturales, en jaula metálica, son también muy utilizadas en los estudios de nutrición vegetal.

## PROTEÍNAS

Son otro grupo de sustancias presentes en todos los seres vivos. Son la consecuencia de la unión de los aminoácidos que tienen nitrógeno en su molécula. Este elemento entra en la planta como nitrato,  $\text{NO}_3^-$  o amonio,  $\text{NH}_4^+$ . Ambos tienen que reducirse para formar los aminoácidos, mediante un complicado proceso, que requiere enzimas y elementos como el molibdeno y otros. El nitrógeno forma parte de otros muchos compuestos, que son necesarios para realizar otras funciones que tienen lugar en las plantas. El azufre es constituyente de dos aminoácidos, la cisteína y la cistina. Las proteínas que los contienen deben su existencia al elemento azufre. Las proteínas se caracterizan por la secuencia de los aminoácidos que la componen.



## LÍPIDOS

Existen otros muchos compuestos orgánicos, que con sus transformaciones químicas metabólicas posibilitan todas las actividades vitales de los vegetales. No puede por menos de citarse a los lípidos, también presentes en todos los organismos vivos. Son las grasas, aceites y ceras caracterizados por su solubilidad en solventes orgánicos. Estos compuestos tienen, asimismo, su peculiar dinamismo bioquímico dentro de la planta, degradándose, en muchos casos, con producción de anhídrido carbónico y energía.

## PIGMENTOS Y SUSTANCIAS DE CRECIMIENTO

La clorofila verde, que tiene en su molécula el elemento magnesio, es esencial para la captación de la luz en la fotosíntesis. Se forma en el vegetal mediante un proceso complejo, con intervención de numerosos compuestos. Los carotenos y la xantofila, rojos y amarillos, y las sustancias de crecimiento tienen actividades fisiológicas muy acusadas.

Se conocen también los procesos de formación, la intervención de los elementos esenciales y la degradación y destrucción.

Estas transformaciones químicas deben seguir unos caminos determinados u ortodoxos. Su desviación provoca anomalías, análogamente a otros seres vivos, como en el hombre. En muchas ocasiones no es fácil determinarlos. Se conocen no obstante muchas de las consecuencias metabólicas causadas por las distintas deficiencias minerales.

## 6. LEY DEL MINIMO Y DE LOS FACTORES LIMITANTES

Conocidos ya los elementos esenciales para la vida de la planta, su incorporación y sus transformaciones, pasamos ahora a describir las relaciones cuantitativas que tienen con el crecimiento vegetal.

LIEBIG enunció en el siglo pasado la «Ley del Mínimo» para indicar que la ausencia de un elemento indispensable para la vida bloquea todo desarrollo. La forma cuantitativa constituye la llamada «Ley de los Factores Limitantes» que dice que el crecimiento es función de la cantidad del elemento que se halla en proporción relativamente menor.

Las primeras expresiones gráficas de esta ley sugieren una línea recta con pendiente determinada cambiando después en una paralela al eje de las abscisas, que representa al elemento en estudio, frente al crecimiento en ordenadas. Es decir, el crecimiento sería directamente proporcional a la concentración del nutriente hasta un momento en que el crecimiento se mantiene constante. Se argumenta que a partir de ese punto aparece la limitación de otro elemento o factor de crecimiento. En la práctica estas dos rectas son naturalmente una curva.

Es necesario, por tanto, conocer en cada situación el factor limitante del cultivo y concentrar toda actividad en la eliminación de esa acción.

Se han propuesto diversas ecuaciones matemáticas para expresar la acción de los nutrientes sobre el cultivo. No puede decirse que ninguna de ellas sea la correcta, ya que, según las circunstancias y los cultivos, pueden aplicarse unas u otras. Quizá la que ha adquirido mayor difusión sea la de MITSCHERLICH, cuyo fundamento reposa en la idea de que el incremento del rendimiento debido a aplicaciones iguales de un factor, es proporcional a lo que le queda para conseguir el valor máximo, que se contempla como asintótico en la ecuación.

Es difícil conocer y cuantificar la acción aislada de un nutriente. No es posible aislarlo de los demás, con los que tendrá siempre una interacción, que puede ser positiva, si la acción conjunta de los elementos es superior a la suma de las acciones de cada uno por separado, o negativa, si es inferior.

## 7. ESTADO NUTRICIONAL DE LA PLANTA

Cuando una planta tiene vigor, gran crecimiento y rendimiento, sin ninguna deficiencia en el desarrollo, puede decirse que su alimentación es buena. Si, por el contrario, presenta mal aspecto, escaso vigor y pobre crecimiento y desarrollo, su nutrición puede ser deficiente.

El estado nutricional de un cultivo es la medida de su alimentación, que debe venir expresada por medio de una composición química mineral.

Es necesario el análisis químico mineral de la materia vegetal. Aparte de los métodos químicos en continuo progreso, hubo que pensar en la parte de la planta a analizar, periodicidad y momento de su ciclo vital.

El resultado del análisis mineral de la planta, en las circunstancias del cultivo, incluyendo el estado fisiológico y el órgano analizado, debe ser la expresión de la nutrición, análogamente al clínico como indicador del estado de salud del hombre. En este último caso se conocen los niveles normales de los aspectos analizados, lo que no siempre ocurre con el vegetal. En algunos casos de plantas perennes, en órganos y condiciones muy tipificados, puede establecerse un diagnóstico eficaz del estado de nutrición. Pero, en general, no puede hablarse de contenidos estáticos normales de los nutrientes, muchas veces por falta de normalización del método. Otras veces porque la planta no presenta en realidad niveles normales fijos, sino que cada año y en cada circunstancia son diferentes. Esto ocurre principalmente en plantas anuales y se debe a que las circunstancias climatológicas son, por un lado, variables y, por otro, con fuerte influencia, mucho más acusada que la de los nutrientes, en el desarrollo y crecimiento vegetales.

Puede comprenderse, por tanto, la gran dificultad en resolver el problema de la interpretación de los resultados analíticos, fase en la que se encuentran los estudios de nutrición mineral de las plantas. Los métodos de interpretación son numerosos, las teorías se multiplican y no se prevé un resultado inmediato. En nuestro Centro de Edafología se ha trabajado en el diagnóstico de la nutrición del trigo durante muchos años y se ha llegado a una serie de conclusiones, que exponemos a continuación.



FIG. 6. *Los campos de experimentación, en condiciones naturales, son la prueba final de los hallazgos a nivel de laboratorio o invernadero.*

En primer lugar se considera necesario que el diagnóstico pueda realizarse en cualquier momento de la vida de la planta. La experiencia va diciendo cuál es el momento más idóneo, desde el punto de vista de su eficacia y aplicabilidad. Se sabe que la composición química mineral del trigo en las primeras fases de su desarrollo indica más bien el nivel de fertilidad del medio que su estado nutricional. La composición de la muestra se adapta al estado de desarrollo: La parte aérea en los primeros estadios y las hojas más activas en fases posteriores, que suelen corresponderse con las total y recientemente extendidas. No debe olvidarse que no siempre las variaciones en la composición mineral se deben a causas nutricionales.

Se ha estudiado en numerosos experimentos diversos métodos de interpretación de los resultados del análisis mineral aplicados a los cereales. De una forma muy general se puede dividir a estos métodos en dos grandes bloques: aquellos que se fundamentan en la Ley del Mínimo y los que consideran que los nutrientes influyen en la planta, a través de los equilibrios nutritivos.

Ambas interpretaciones han sido aplicadas con éxito en nuestros ensayos, aunque no en forma simultánea. En unos, se ha podido aplicar una y en otros la otra. Parece lógico pensar que, dada la diversidad en las condiciones de los cultivos de cereales, caracterizados por la gran sensibilidad a los factores climáticos y del medio, puede muy bien ocurrir que en un momento dado pueda ser un solo elemento, por ejemplo el nitrógeno, el que regule en forma dominante el crecimiento y desarrollo de la planta. O lo que es lo mismo, que el nitrógeno sea el factor limitante del cultivo. Estaríamos encuadrados, ahora, en la interpretación basada en la Ley del Mínimo.

En otros casos, en cambio, han sido los equilibrios nutritivos los que han marcado la evolución en el crecimiento. Las proporciones de los elementos entre ellos regulan la actividad de la planta, consiguiendo más o menos producción, según se acerquen a valores óptimos. Suelen observarse estas relaciones, «rendimiento-equilibrios nutritivos», cuando las plantas se encuentran en un estado de nutrición más elevado que en el caso anterior.

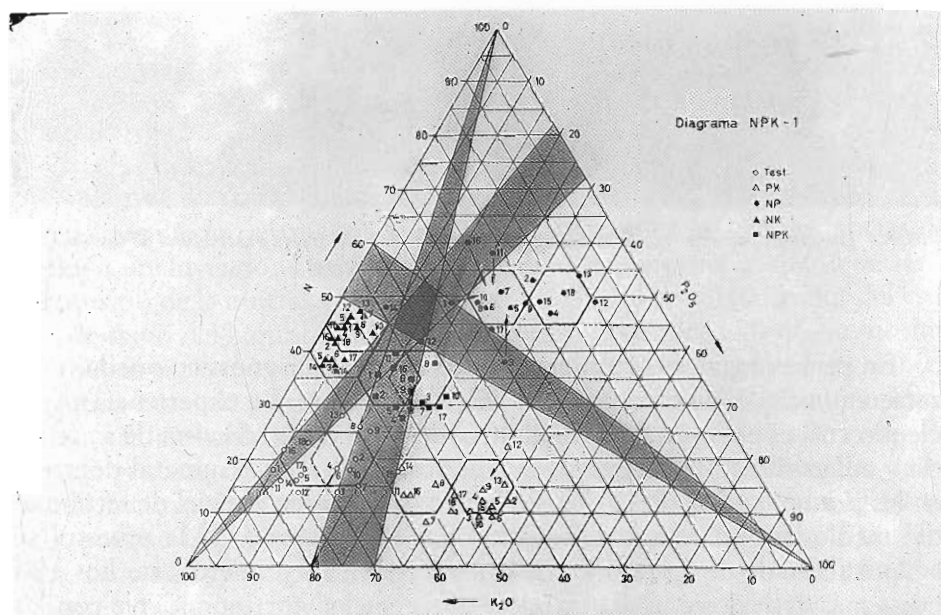


FIG. 7. El equilibrio nutritivo NPK es causa, a veces, de una nutrición deficitaria. Es preciso conocer el valor óptimo, lo que se hace en el diagrama triangular.

El problema reside en que ninguna de las dos situaciones puede ser prevista a priori. Es necesario su estudio meticulado para dilucidar en qué situación nos encontramos.

Además, independientemente del método de interpretación que pueda aplicarse, no existen niveles óptimos de forma absoluta sino sólo relativos: por año, por condiciones determinadas, por momentos fisiológicos, etc. Quiere ello decir que únicamente por medio de estudios de relaciones, en colectivos no demasiado pequeños, puede conseguirse averiguar las causas nutricionales que han impedido mayor crecimiento y desarrollo. Tiene, por otra parte, la gran ventaja de que al ser el aspecto relativo importante, no es imprescindible la normalización del muestreo, de un ensayo a otro, aunque sí en el propio. Dicho de otro modo: puede estar constituida la muestra por la parte aérea y en otro por la segunda y tercera hojas del tallo. De cualquier modo el diagnóstico se referirá al momento de la toma de muestra y no a otro.

La problemática expuesta no es incompatible con la idea de conseguir en el futuro, para lo que es necesario muchos ensayos y más experiencia acumulada, leyes fisiológicas en las que estén involucradas los nutrientes y que lleven a ir definiendo los óptimos absolutos, tan desdibujados en el momento actual.

## 8. NUTRICION Y PROCESOS FISIOLÓGICOS

Que los estudios de nutrición mineral están en sus comienzos, lo ratifica el estado del conocimiento sobre el papel desempeñado por los nutrientes en los procesos fisiológicos. Se conoce muy poco de esta función, no obstante la gran bibliografía existente. Los trabajos se limitan a describir las relaciones entre los contenidos de los nutrientes en la planta y la producción, sin entrar, en general, en su función en la fisiología vegetal.

Siempre ha preocupado este aspecto del problema, porque se piensa que sólo a través de él podrá desarrollarse esta parcela de la ciencia. Y así se ha observado que los problemas nutricionales son diferentes en las sucesivas fases del cultivo, caracterizadas por distintos procesos fisiológicos. La acción diferente de los nutrientes a lo largo del ciclo no está suficientemente estudiada. Cuando se disponga de este conocimiento se podrá comprender en su plenitud las relaciones entre el contenido de los nutrientes en la planta y la producción.

Se considera imprescindible para avanzar en los estudios de la nutrición mineral investigar todos los procesos fisiológicos en su relación con los nutrientes. Hay que conocer el proceso fisiológico y la influencia en el mismo de cada elemento nutritivo.

En el caso del trigo, por ejemplo, pensemos en los componentes del rendimiento: número de espigas/m.<sup>2</sup>, número de granos/espiga y peso del grano, cuyo producto da la producción.

El número de espigas/m.<sup>2</sup> es función del ahijamiento que depende, además de determinados condicionamientos ecológicos, del nitrógeno. Hay que estudiar el aspecto cuantitativo de esta relación y el mecanismo de acción del nutriente. Es posible que incida en la diferenciación de los tallos y seguro en el desarrollo de los mismos. La deficiencia de nitrógeno durante el ahijamiento influye negativamente sobre el número de espigas/m.<sup>2</sup>.



El número de granos/espiga parte del proceso de la formación de la flor, que se inicia muy temprano y queda definido más tarde, después de la fecundación. A lo largo de todo este tiempo, hay que conocer la dependencia de los niveles de los elementos nutritivos en el vegetal. El desconocimiento en este campo es grande, aunque ya se van publicando trabajos que responden a estas preguntas.

El peso del grano, el tercer componente, se define después de otro proceso, relacionado con el transporte de los fotosintatos, carbohidratos y proteínas, desde las hojas y el tallo a la espiga.

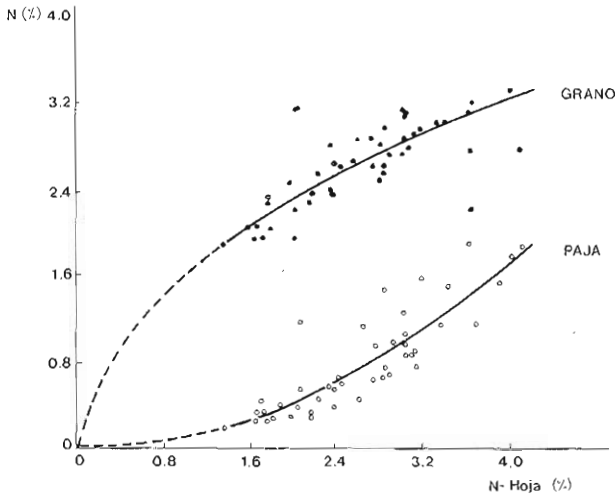


FIG. 8. La distinta evolución de los nutrientes del grano y la paja es otra expresión de la dinámica de los mismos en la planta.

En los distintos laboratorios de la especialidad se estudia sistemáticamente este problema, avanzándose poco a poco en la mecánica del mismo, igual que lo hacen otros laboratorios extranjeros. Será también necesario, desentrañar el papel desempeñado por los nutrientes en los procesos enzimáticos y no enzimáticos del transporte de estos compuestos al grano y su regulación.

Es claro que cada fase de crecimiento tiene unas exigencias nutricionales distintas. Se sabe, por ejemplo, que el nitrógeno se absorbe por los cereales a lo largo de todo el ciclo vital y que asegurar este suministro es básico para conseguir altos rendimientos. El fósforo es particularmente importante en la formación de los órganos reproductores y en los procesos genéticos y el potasio está estrechamente relacionado con la economía del agua.

Es más, plantas que presentan diferentes objetivos de producción, como la remolacha, que puede cultivarse para forraje o para conseguir la voluminosa raíz, o la fresa que puede destinarse a producir fruto o plantas-hijas, requieren alimentaciones específicas para cada cometido, por lo que el plan de fertilización debe ser diferente. Importa, por tanto, que el proceso se verifique, que no siempre es el mismo, según la parte de la planta destinada a ser aprovechada.

## 9. FERTILIZACION DE LOS CULTIVOS



El uso de los fertilizantes para incrementar el rendimiento de los cultivos es, quizá, el medio más eficaz de que se dispone para modificar el suministro de nutrientes y, por tanto, la alimentación del vegetal. Se entiende bien que cuanto mayor sea el conocimiento sobre la nutrición de la planta, tanto mayor será la eficacia del fertilizante añadido. En cultivos naturales, en suelo, es preciso asimismo la mayor información sobre el medio de cultivo, tanto desde el punto de vista edafológico, como del climatológico.

La fertilización persigue, pues, adaptarse a las exigencias nutritivas de la planta, incluyendo sus circunstancias particulares. Si se saben las necesidades minerales y el potencial del suelo, el éxito de la fertilización estaría asegurado. Hay que conocer la absorción de cada nutriente a lo largo de toda la vida de la planta o hasta el momento de su recolección. Existen trabajos donde se explica mediante gráficos la evolución de la incorporación de los nutrientes a la planta. La aplicación del fertilizante debe seguir esta evolución lo más posible.

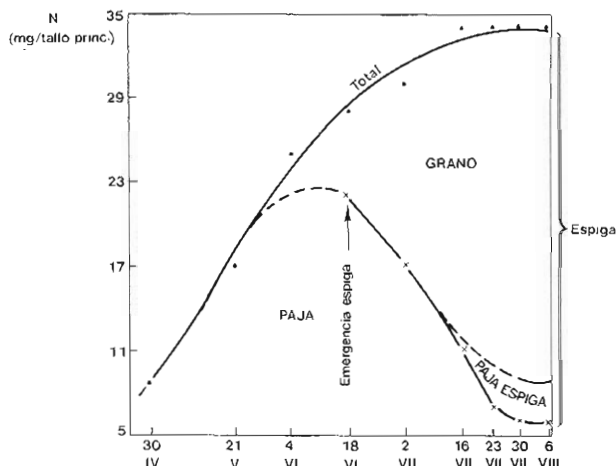


FIG. 9. Es muy importante conocer la evolución del nitrógeno en la planta, ya que indica cómo debe realizarse la fertilización.

Es necesario conocer el suelo. Pero hay que conocerlo en muchos aspectos. El suelo se empobrece por lixiviación de sustancias nutritivas y a través del tiempo. Cada suelo tiene pérdidas, en este sentido diferentes, dependiendo de su naturaleza y de las circunstancias ambientales. No todos los nutrientes se percolan a las capas profundas del suelo con la misma intensidad. Los compuestos nitrogenados son los que acumulan más estas pérdidas. Mucho nitrato formado en el otoño se pierde durante el invierno en los suelos no cultivados. *La intensidad y frecuencia de las lluvias y la composición granulométrica del suelo inciden poderosamente en el proceso.*

Otra fuente de pérdidas de nutrientes son las propias cosechas. La exportación de elementos nutritivos en las cosechas hay que compensarla para mantener el suelo con la misma capacidad. Precisamente el cálculo de las exportaciones es un índice valioso para conocer la cantidad de abono a añadir.

En el caso del trigo se sabe que por cada quintal de grano cosechado se exporta alrededor de 3 kg. de N, 1,4 kg. de  $P_2O_5$  y 3,5 de  $K_2O$ .

Si se prevé una cosecha de 30 quintales habrá que darle a la planta 90 kg. de N, 42 kg. de  $P_2O_5$  y 105 de  $K_2O$ . Si el suelo no se los suministra habrá que añadirlo como fertilizante. Claro que el problema no es tan simple, ya que hay que tener en cuenta otros muchos procesos, como la fijación de los elementos añadidos por el suelo, la provisión de nutrientes asimilables desde el suelo o el subsuelo, etc., pero ya supone un índice valioso a considerar.

El *nitrógeno* tiene una especial dinámica en el suelo. Los compuestos asimilables son muy solubles y fácilmente lixiviables. Su formación, a partir de la materia orgánica del suelo, es todo un proceso químico complicado, con la intervención de numerosos factores químicos, físico-químicos y ambientales. La planta de trigo lo absorbe a lo largo de toda su vida, por lo que es necesario que disponga de él continuamente. Existen, efectivamente, épocas de mayor demanda en las que su ausencia es más perjudicial, como la del encañado, al comienzo del gran crecimiento vegetativo. Después, en la antesis su presencia es muy importante de cara a obtener trigos de alto contenido en proteína. Los estudios de nutrición son básicos para el empleo correcto del abonado nitrogenado.

El *fósforo* y el *potasio* tienen otra problemática completamente diferente. En primer lugar, no suelen lixiviarse tan fácilmente como el nitrógeno, por lo que el efecto residual de los abonos fosfatados y potásicos puede ser importante de un año a otro. El suelo dispone de medios para retener estos elementos y ofrecerlos a las plantas para su absorción. Ello supone que la

aplicación de los mismos al suelo puede hacerse de una sola vez, cuando en el caso del nitrógeno habría que hacerlo de varias formas para adaptarse a las exigencias de la planta arriba comentadas. A veces la fijación de estos elementos es muy grande y es necesario añadir más para que quede algo a disposición de la planta. La experiencia debe ir aconsejando al productor de todos estos extremos, caracterizados por ser muy distintos de unos suelos a otros, con grandes variaciones también, según la planta cultivada, y el año de cultivo.

No debe dejar de mencionarse al resto de los *elementos nutritivos esenciales*, todos los cuales pueden en alguna circunstancia ser factores limitantes. En estos casos el análisis vegetal puede dar respuesta a las sospechas que se aprecien.

## 10. CONSIDERACIONES FINALES

La nutrición mineral de las plantas, como se ha visto, presenta un alto interés en orden a conseguir los máximos rendimientos económicos de los cultivos.

Las investigaciones actuales se dirigen de forma unánime hacia el control de la nutrición y a ello se dedican los «Coloquios Europeos y Mediterráneos de las Plantas Cultivadas», que tuvieron su origen en Montpellier (Francia), en el año 1964, celebrándose las reuniones cada cuatro años, en distintos lugares de Europa. El primero tuvo lugar en Montpellier; el segundo en Sevilla (1968); el tercero en Budapest (1972); el cuarto en Gante (1976); el quinto en Castelfranco-Veneto (1980) y el próximo se celebrará nuevamente en Montpellier el presente año 1984 en el mes de septiembre. Con excepción del primer año, el Centro ha estado siempre representado en estas Reuniones Científicas. Los propios organizadores de estos Coloquios han creado recientemente una Sociedad Internacional que intenta agrupar a todos los investigadores y estudiosos de la nutrición, dándole el nombre de «Asociación Internacional para la Optimización de la Nutrición de las Plantas».

Se ve en todo ello la gran preocupación que existe por la *alimentación de las plantas*, base de la fertilización y de otras prácticas de cultivo, necesarias para la máxima rentabilidad de las explotaciones agrícolas.

## INDICE

1. INTRODUCCION HISTORICA . . . . .	9
2. NUTRICION VEGETAL . . . . .	12
3. NUTRIENTES MINERALES . . . . .	14
4. ABSORCION MINERAL . . . . .	18
5. TRANSFORMACIONES BIOQUIMICAS . . . . .	21
6. LEY DEL MINIMO Y DE LOS FACTORES LIMITANTES . . . . .	24
7. ESTADO NUTRICIONAL DE LA PLANTA . . . . .	26
8. NUTRICION Y PROCESOS FISIOLOGICOS . . . . .	30
9. FERTILIZACION DE LOS CULTIVOS . . . . .	33
10. CONSIDERACIONES FINALES . . . . .	36