



AVENTURAS DEL PENSAMIENTO

Fisiología del ESTRÉS AMBIENTAL EN PLANTAS

M. BASURTO SOTELO, A. NÚÑEZ BARRIOS, R. PÉREZ LEAL R. y O. A. HERNÁNDEZ RODRÍGUEZ
Facultad de Ciencias Agrotecnológicas/Universidad Autónoma de Chihuahua



Nopalera III.

El estrés ambiental representa una fuerte restricción para el aumento de la productividad de los cultivos y el aprovechamiento de los recursos naturales. Se estima que únicamente un 10% de la superficie de la tierra arable se encuentra libre de algún tipo de estrés (Benavides, 2002).

El deterioro ambiental por las actividades humanas no es un fenómeno reciente; prácticamente, desde su aparición el hombre ha transformado su medio natural en un intento por apropiarse de los recursos que la naturaleza le brinda. En la actualidad, estos cambios han mostrado un grado de transformación tal, que ponen en peligro la capacidad de equilibrio para sostenimiento de la vida humana (Ehrlich y Ehrlich, 1991).

Cerca del 20% de la tierra presenta algún tipo de deficiencia o toxicidad mineral. El 26% es afectada por estrés de sequía y 15% por temperatura (Blum, 1988); incluso bajo condiciones de producción protegida, como el uso de invernaderos y túneles, donde también se presentan eventos de estrés biótico o abiótico que disminuye la productividad.

La República Mexicana cuenta con una superficie de 1 millón 958 mil 201 km², de los cuales el 52% corresponde a regiones áridas y semiáridas, con predominio de climas secos. No obstante estas limitaciones, en estas zonas se desarrollan importantes regiones agrícolas, donde se efectúa una parte considerable de la agricultura de riego y también se localizan extensas superficies de maíz y frijol de temporal como es el caso del altiplano mexicano (Conaza, 1994).

Concepto de estrés

El estrés se identifica como una desviación significativa de las condiciones óptimas para la vida. Dichas condiciones ocasionan cambios en todo los niveles funcionales de los organismos. Desde un punto de vista biológico, el estrés tiene una connotación más amplia, refiriéndose a los cambios ambientales que alteran al estado fisiológico de las plantas (Larcher, 1995).

El estrés es el conjunto de respuestas bioquímicas o fisiológicas que definen un estado particular del organismo diferente al observado bajo un rango de condiciones óptimas.

Se define la resistencia al estrés como la capacidad de un organismo para resistir, evitar y escapar a los estímulos ambientales negativos o poder permanecer bajo un estado particular de estrés sin que su fenotipo se vea modificado de manera significativa; su estado "ideal" se identifica al ser observado bajo condiciones óptimas y se denomina "norma" (Benavides, 2002).

Son manifestaciones fenotípicas de estrés las deformaciones como el amarillamiento, manchas, necrosis, etcétera. Otras menos obvias requieren técnicas especiales para su detección, como la baja asimilación enzimática, inducción a transmisión de genes, cambios en la composición química, etcétera. Múltiples factores ambientales inducen estados de estrés en las plantas. El estrés hídrico es la principal barrera para incrementar la producción y la calidad; en conjunto con las plagas y enfermedades y la dinámica nutrimental forman parte del objetivo de los sistemas de producción tecnificado (Cornejo, 2002).

Tipos de estrés

Estrés ambiental:

- Estrés hídrico.
- Estrés por alta y baja temperatura.
- Estrés por alta y baja irradiación.
- Estrés por alta y baja radiación ultravioleta (UV).
- Estrés por salinidad.

- Estrés nutrimental.
- Estrés por toxicidad de metales pesados.

Estrés fisiológico:

- Estrés hormonal (ABA, fitocromo, etileno, AG, etcétera).
- Cambios en las estructuras celulares (estomas, cloroplastos, mitocondrias, etcétera).
- Respuestas estomáticas.
- Tasas de asimilación de CO₂.
- Tasas de fotorrespiración.

Estrés bioquímico:

- Estrés por factores abióticos.
- Acumulación de metabolitos nitrogenados.
- Síntesis de polioles.
- Absorción y compartimentalización de iones.
- Cambios en la permeabilidad del agua.
- Estrés por factores bióticos.
- Genes de resistencia.
- Resistencia sistemática adquirida (SAR).
- Resistencia sistemática inducida (RSI).
- Choque oxidativo.
- Plantas transgénicas con mayor resistencia al estrés oxidativo.
- Bases transgénicas resistentes a oxidación.
- Aumento del fenotipo resistente al estrés oxidativo.

Estrés hídrico

Las plantas, a lo largo de su vida, se ven sometidas a un gran número de condiciones ambientales adversas, como el déficit de agua en su entorno; y esto no resulta una limitante para su distribución en las diferentes condiciones climáticas de la superficie terrestre. Esta amplia distribución se da gracias a que las plantas cuentan con mecanismos muy eficientes para hacer frente a los factores ambientales adversos (Pérez-Molphe y Ochoa, 1990).

Las plantas cultivadas se ven sometidas a diferentes grados de estrés en alguna etapa de su crecimiento, los cambios generados son una respuesta a la sobrevivencia de la planta misma; el efecto del estrés por sequía generalmente es reflejado en una disminución de la producción y del crecimiento total; esto con respecto al grado de reducción de factores, como la etapa de crecimiento y el agotamiento de agua, así como el tiempo de duración de las condiciones de sequía (Kramer, 1983).

Es probable que el estrés esté asociado con un déficit hídrico y sea este uno de los problemas más comunes entre las plantas cultivadas y las comunidades

naturales (Benavides, 2002). La pérdida de agua por el dosel vegetal es algo inevitable, ya que esto forma parte del proceso natural de transpiración de las plantas como un mecanismo de enfriamiento. Por otra parte, la asimilación de CO₂, a través de los estomas, origina una pérdida natural de agua para mantener un ritmo de crecimiento. Por ejemplo, las plantas C-3 pierden un kilo de agua por cada 1-3 gr de CO₂ fijado y las plantas C-4 ganan 2-5 gr de CO₂ por kilo de agua transpirada y las plantas CAM fijan de 10-40 gr de CO₂ por kilo de agua transpirada (Benavides, 2002).

A causa de su papel esencial en el metabolismo de las plantas, el déficit de agua afecta rápidamente los procesos que van desde la fotosíntesis hasta la respiración. El agua es un agente químico que imparte orden y estructura en las biomoléculas y ayuda a la interacción entre estas, además de ser una fuente de protón-electrón.

Dentro de los procesos biofísicos más afectados por la carencia de agua, se encuentra la expansión celular y el crecimiento; desórdenes que afectan a otros procesos biofísicos (Pugnaire y otros, 1994).

Las plantas han desarrollado estrategias para tolerar el déficit hídrico:

1. Respuesta fisiológica o de modulación, que se caracteriza por manifestarse como modificación rápida reversible y con acción de corto plazo; por ejemplo, el cierre estomático.
2. Respuesta de aclimatación que involucra cambios rápidos reversibles o incluso irreversibles y con acción a mediano plazo; por ejemplo, el ajuste osmótico, derivado de la acumulación de solutos, cambios en la elasticidad de la pared celular y algunos morfológicos.
3. Adaptaciones. Estrategias a largo plazo que incluyen patrones fijos (genéticamente dependientes) de reparto de biomasa (raíz/follaje); modificaciones anatómicas que se heredan entre generaciones, mecanismos fisiológicos complejos como el metabolismo CAM, crecimientos reducidos para optimizar el uso del agua y la captura de energía (Pugnaire y otros, 1994).

Las plantas presentan principalmente dos mecanismos de respuesta frente al déficit hídrico, como la evitación o escape y la tolerancia (Kramer, 1983). La evitación se entiende como el uso de ciclos de crecimiento muy rápidos o de madurez temprana, permitiendo el aprovechamiento rápido de la disponibilidad de agua y evitando así la pérdida o sequía. Las plantas

pueden desarrollar mecanismos, tanto morfológicos como fisiológicos, al ser sometidas a un estrés por sequía (Turner, 1986; Padilla-Ramírez, 1994).

Entre las plantas tolerantes se encuentran aquellas que evitan la deshidratación utilizando mecanismos morfofisiológicos complejos como hojas pequeñas y cerosas; estructuras que facilitan la captación del rocío o bien, raíces muy profundas (plantas freatófilas), reducción del número y tamaño de los estomas, modificación de la estructura del dosel, cambios anatómicos en la epidermis, ubicación de los estomas en cavidades, cutículas gruesas y cerosas en combinación con tejidos suculentos, metabolismos CAM etcétera (Frensch, 1997).

Un efecto del estrés hídrico se manifiesta con una notable disminución del contenido de giberelinas, las cuales están directamente ligadas a una serie de procesos fisiológicos en la planta (Looney, 1997). La aparición de una sequía corta o prolongada durante el ciclo de vida en un cultivar agrícola cualquiera origina casi en forma inmediata un cierre de los estomas, como un mecanismo de protección y/o resistencia de esa adversidad. Este fenómeno ha sido ligado a incrementos en los niveles endógenos de ácido abscísico (ABA), en la gran mayoría de especies investigadas (Rojas Garcidueñas y Ramírez, 1996).

Por qué es importante el estrés hídrico

La superficie agrícola de México es de 31 millones 691 mil 868 hectáreas, de las cuales, el 18% es de riego y el 82% de temporal. Las superficies totales incluyen áreas agrícolas en descanso y abandonadas, pero abiertas al cultivo. La superficie promedio que se siembra anualmente es de 19.5 millones de hectáreas.

En las zonas áridas y semiáridas, la agricultura se lleva a cabo en 8 millones de hectáreas, lo cual representa solo el 7.8% de la superficie total de estas regiones; no obstante, constituyen el 41% de la superficie sembrada del país. En las regiones áridas se localizan 2.3 millones de hectáreas irrigadas. La agricultura de temporal en esta zona alcanza el índice más alto de siniestrabilidad en el país; y así, los principales factores de pérdidas de cosechas resultan las heladas y las sequías (Conaza, 1994).

De 1930 A 1997 disminuyó la frecuencia de las sequías, pero aumentó en intensidad, como la más recientemente presentada en el norte del país. De las sequías registradas en dicho periodo, fueron clasificadas como severas un total de 20 y de ellas 6 como

extremadamente severas. Toda resultaron de fuerte impacto negativo en la producción, como la presentada en el año de 1949 con pérdidas de 1.1 millones de hectáreas, que representan el 77% de la superficie cultivada. En 1969, otra sequía extremadamente severa afectó 3.3 millones de hectáreas que representan el 73% de pérdidas agrícolas de ese año.

La precipitación pluvial de la República Mexicana es de 789 mm, lo que equivale a un volumen aproximado de 1.53 billones de m³ al año. El escurrimiento de los ríos se estima en 410 mil millones de m³, mientras que el almacenamiento en cuerpos naturales –como lagos y lagunas– es de 14 mil millones de m³, además del volumen ponderado de las presas de almacenamiento, cifra que llega a 146 mil millones de m³. Por otra parte, tenemos la pérdida por evaporación de agua de la superficie del suelo, la cual representa 1.1 billones de m³. En la región norte del país, el escurrimiento es de solamente el 3% del total y esta área representa el 30% de la superficie total del país (Sedesol, 1993).

Estrés por salinidad

Un hábitat salino se define por la presencia de un contenido normalmente muy alto de sales solubles, si consideramos que los lagos y estanques salinos, así como los océanos, son ambientes acuáticos salinos. Algo semejante se presenta en los suelos salinos y especialmente en la regiones áridas y húmedas. En estas últimas, los suelos se tornan salinos mediante las exposiciones a brisas marinas (cargadas de sal) depositadas sobre estos (pueden llegar a más de 100 km) o al ser inundados por el mar o al estar en contacto directo o indirecto de depósitos salinos.

Solamente en los océanos, las concentraciones de sales son constantes y se ubican en rangos de 480 mM de Na⁺ y de 560 mM de Cl⁻, en cambio, en la zona de intermareas, la salinidad se ubica entre 290 y 810 mM de Na⁺, en comparación con los pantanos salinos, la concentración de Na⁺ es de 600 a 1000 mM (Flowers, 1985).

Durante la temporada de crecimiento, las sales se acumulan en el dosel de las plantas, después de que las hojas mueren y caen al suelo para descomponerse. Las sales que contenían son en ocasiones lavadas por el agua de lluvia o por la de riego, pero en ambos casos, finalmente, las sales se acumulan en el suelo, las cuales se ven incrementadas muy fuertemente en las áreas desérticas, donde la tasa anual de evaporación del suelo supera la cantidad de agua proveniente de las precipitaciones (Benavides, 2002).

Una problemática de los suelos en regiones áridas muy común es la acumulación de sales básicas –cloruros, sulfatos y bicarbonatos de sodio, magnesio y calcio, con pH altos– y yeso. Esto proporciona una característica típica a los suelos: cuando se humedecen se tornan pegajosos y una vez secos se endurecen y forman costras.

Desde un punto de vista agronómico, la salinidad se expresa en términos de conductividad eléctrica; normalmente es determinado en extracto de pasta saturada suelo:agua (ECe), realizado en suelo tomado de la región de la raíz, promediado sobre profundidad y tiempo, extraído mediante vacío y posterior filtrado.

El efecto de las sales en la planta se presenta cuando es sometida a altas concentraciones de una sal, lo que afecta la retención osmótica del agua, y de los efectos iónicos que esto ocasiona, muy específicamente sobre el citoplasma y las membranas de las células.

Los sistemas enzimáticos de la glicólisis, ciclo de Krebs y la fotofosforilación son especialmente sensibles a las soluciones salinas, y dan como resultado una menor disponibilidad de energía, adquisición de nutrientes y una disminución del crecimiento de la planta y germinación de la semilla (Larcher, 1995).

Tolerancia a salinidad

La tolerancia o resistencia a la salinidad es generalmente expresada en términos de la habilidad inherente de las plantas para resistir los efectos de las altas cantidades de sales en la zona radical o en los tejidos foliares sin que presenten efectos adversos. Otros autores demostraron que la salinidad causaba una mayor reducción en el crecimiento de las raíces de la acelga que en las hojas, mientras que en la cebolla la reducción en el crecimiento de los bulbos fue menor que el observado en las hojas. Adicionalmente, consideran que la resistencia o tolerancia a la salinidad es un carácter cuantitativo muy complejo controlado por muchos genes (Benavides, 2002).

Estrés nutrimental

Un elemento se considera esencial cuando la planta no logra completar su ciclo vital en ausencia de aquel, así como cuando se encuentra directamente involucrado en el metabolismo. La ausencia solo se corrige cuando se aporta el elemento en cuestión (Kant y Kafkari, 2001).

Basándose en este criterio, se han determinado

16 elementos esenciales: Carbono (C), Hidrogeno (H), oxígeno (O), nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), azufre (S), hierro (Fe), manganeso (Mn), zinc (Zn), cobre (Cu), boro (B), molibdeno (Mo), cloro (Cl) y sodio (Na).

Algunos otros elementos son descritos como benéficos, siempre en concentraciones muy bajas, pero no esenciales como el silicio (Si), selenio (Se), vanadio (V), bromo (Br), cromo (Cr), cobalto (Co) y níquel (Ni).

Los elementos minerales se clasifican como macronutrientes y son aquellos que se encuentran en rangos de concentraciones de 1 a 150 gr por kilogramo de materia seca, y estos son N, P, K, Ca, Mg y S; en cambio, los micronutrientes son aquellos que son contenidos en un rango de 0.1 a 100 miligramos por kilogramo de materia seca. Estos son Fe, Zn, Mn, Cu, B, Mo, Cl y Na. El cloro aunque es esencial en muy pequeñas cantidades, puede acumularse alcanzando altas concentraciones cuando la solución del suelo presenta un nivel alto de dicho elemento (Benavides, 2002).

Todos los nutrientes esenciales son requeridos por las plantas en proporciones balanceadas. Las desviaciones de esta situación resulta en desórde-

nes nutricionales que se manifiestan como carencias o exceso inducidos.

Conclusión

El conocimiento de las posibles causas de los estrés en las plantas nos permitirá un adecuado manejo de los cultivos para lograr el incremento de su producción y por otra parte el buen uso de nuestros tan preciados recursos naturales para su conservación, así como la comprensión de las limitaciones de las plantas para su adecuado crecimiento y desarrollo, como una respuesta a las condiciones ambientales, favorables y/o adversas a las cuales son sometidas.

Bibliografía

- BLUM, A.: *Plan Breeding for Estrés Environments*, Boca Raton Florida, CRP Pres Inc., 1988. p. 223.
- BEHAVIDES, M.A.: "Ecofisiología y química del estrés en plantas", Departamento de agricultura/UAAAN, 2002.
- CORNEJO, O.E.: "Factores ambientales que originan el estrés. Ecofisiología y química del estrés en plantas", Departamento de agricultura/UAAAN, 2002.
- CONAZA: *Plan de acción para combatir la desertificación en México*, Sedesol-FAO, 1a. ed., 1994, p. 110.
- EHRlich, P.R. y A.H. EHRlich: *Headling the Planet : Strategies for Resolving the Evironmental Crisis*, Mass., Center for Consevation Biology Stanford University-Addison Wesley Pub. Co. Reading, 1991, p. 366.
- FLOWERS, T.J.: "Physiology of halophytes", *Plant Soil*, 89 (1985), pp. 41-56.
- FRENSCH, J.: "Primary responses of root and leaf elongation to water deficit in the atmosphere and soil solution", *J. Exp. Bot.*, 48 (1997), pp. 985-999.
- KANT, S.S. y U. KAFKAFI: "Mineral deficiency stress and its impact/mitigation of Mineral deficiency stress", www.plant.stress.com/article/, 2001.
- KRAMER, P.J.: "Drought Tolerance and Water Efficiency", en: *Water Relations of Plants*, Nueva York, Academy Press, 1983, pp. 390-415 p.
- LARCHER, W.: *Physiological Plant Ecology*, Berlin, Heidelberg, Springer-Verlang, 1995, p. 506.
- LOONEY, N.E.: *Role of endogenous plant growth substances in regulating fruit tree growth and development in: tree fruit physiology*, Washington, WSU, 1997, pp. 31-40.
- PÉREZ-MOLPHE, B.E. y A.N. OCHOA: "Respuesta de las plantas al déficit hídrico", *Ciencia*, 1990, pp. 333-344.
- PUGNAIRE, F.; L.S. ENDOLZ y J. PARDOS: *Contrains by water stress on plant growth. In. Handbook of plant and crop stres*, Nueva York, Basel, Honk Kong, M. Pasarakli, ed., Marcel Dekker, Inc., 1994.
- PADILLA-RAMÍREZ, J.S.: *Osmotic adjustment of Cotton (G. hirsutum. L.) in Respone to Water Stress*, Las Cruces, Nuevo México, Universidad de Las Cruces, 1994, p. 110.
- ROJAS GARCIDUEÑAS, M. y H. RAMÍREZ: *Control hormonal del desarrollo de las plantas*, México, Limusa, 1996, 239 p.
- SEDESOL: *Informe de la situación geográfica en materia de equilibrio ecológico y protección al ambiente 1991-1992*, México, Secretaria de Desarrollo Social, 1993, 379 pp.
- TURNER, N.C.: "Adaptation to Water Stress Deficit : A Changing Perspective", *Aust. J. Plant. Physiol.*, 13 (1986), pp. 175-90. (S)



Ocotillos I.