


Artículo de divulgación

Microclima, nutrición de precisión y modelación matemática: Bases fisiológicas para la producción moderna de arándano en clima cálido

*Microclimate, precision nutrition, and mathematical modeling:
Physiological bases for modern blueberry production in warm climates*

Francisco Peñuelas-Montoya ^{1,*} 

¹ Universidad Autónoma de Sinaloa, Facultad de Agricultura del Valle del Fuerte; Calle 16 s/n esq, Japaraqui, Juan José Ríos, 81110, Sinaloa, México.

* Autor para correspondencia: francisco79@ms.uas.edu.mx

Recibido:

17/03/2026

Aceptado:

4/04/2026

Publicado:

1/05/2026

RESUMEN

La producción de arándano en regiones cálidas está limitada por la combinación de alta radiación solar y temperaturas elevadas, condiciones que alteran la homeostasis fisiológica de la planta y reducen la eficiencia fotosintética, la absorción de nutrientes y la calidad del fruto. En el noroeste de México, en especial el Valle del Fuerte, estos factores representan los principales desafíos para el cultivo de variedades de alto valor comercial. La nutrición de precisión basada en fertirrigación hidropónica constituye una herramienta clave para optimizar el suministro de nutrientes de acuerdo con la demanda fisiológica del cultivo durante su ciclo productivo. Sin embargo, la eficiencia de estos sistemas se ajusta a las condiciones microclimáticas donde se desarrolla la planta. La integración del manejo nutrimental de alta precisión y el control microclimático mediante mallas fotoselectivas constituye una estrategia agronómica eficaz para mejorar el desempeño fisiológico y productivo del arándano en ambientes cálidos. Las mallas actúan como filtros que modifican la calidad espectral de la radiación solar y reducen la temperatura radiante del dosel, favoreciendo la actividad fotosintética y el crecimiento vegetal. De manera complementaria, la dinámica de absorción nutrimental se describe mediante modelos de regresión polinómica de segundo orden, los cuales representan con mayor precisión la acumulación de nutrientes durante el ciclo del cultivo y permiten optimizar programas de fertirrigación. En conjunto, este enfoque integrado incrementa la eficiencia en el uso de fertilizantes, mejora la productividad y la calidad del fruto en sistemas intensivos de producción de arándano en climas cálidos.

Palabras clave: Acumulación nutrimental; fertirrigación; homeostasis fisiológica; microclima agrícola; modelos de regresión; radiación fotosintéticamente activa; sistemas hidropónicos; estrés térmico.

ABSTRACT

Blueberry production in warm regions is constrained by the combination of high solar radiation and elevated temperatures—conditions that disrupt the plant's physiological homeostasis and reduce photosynthetic efficiency, nutrient uptake, and fruit quality. In northwestern Mexico, specifically in the Valle del Fuerte, these factors represent the primary challenges for cultivating high-value commercial varieties. Precision nutrition



based on hydroponic fertigation is a key tool for optimizing nutrient supply in accordance with the crop's physiological demand throughout its productive cycle. However, the efficiency of these systems is closely tied to the microclimatic conditions in which the plants develop. The integration of high-precision nutrient management and microclimate control through photoselective nets constitutes an effective agronomic strategy to enhance the physiological and productive performance of blueberries in warm environments. These nets act as filters that modify the spectral quality of solar radiation and reduce canopy radiant temperature, thereby promoting photosynthetic activity and vegetative growth. Complementarily, nutrient uptake dynamics are described using second-order polynomial regression models, which more accurately represent nutrient accumulation over the crop cycle and allow for the optimization of fertigation programs. Taken together, this integrated approach increases fertilizer use efficiency and improves both yield and fruit quality in intensive blueberry production systems under warm climates.

Keywords: Nutrient accumulation; fertigation; physiological homeostasis; agricultural microclimate; regression models; photosynthetically active radiation; hydroponic systems; thermal stress.

INTRODUCCIÓN

El cultivo de arándano (*Vaccinium* spp.) (Figura 1) se ha consolidado como uno de los frutales de mayor crecimiento a nivel mundial debido a su elevado valor nutracéutico y a la creciente demanda del mercado por frutos con propiedades funcionales (Retamales y Hancock, 2018). En las últimas décadas, la expansión de este cultivo hacia regiones subtropicales ha generado nuevos desafíos asociados a factores ambientales limitantes.



Figura 1. Frutos de arándano (*Vaccinium* spp.) en estadio óptimo de madurez comercial. La calidad visual y el contenido de compuestos bioactivos son los principales motores de la creciente demanda de este

cultivo en los mercados internacionales. (Fotografía: Autoría propia, material inédito).

EL DESAFÍO CLIMÁTICO DEL NOROESTE DE MÉXICO: UNA BARRERA FISIOLÓGICA

En regiones agrícolas del noroeste del país, en el Valle del Fuerte, Sinaloa, el arándano se enfrenta a un triángulo de estrés compuesto por radiación fotosintéticamente activa (PAR) extrema, temperaturas superiores a los 35 °C y un marcado déficit de presión de vapor (DPV). Peñuelas-Montoya *et al.* (2024) señalan que, a diferencia de sus zonas de origen templadas, en estas latitudes la planta experimenta una saturación lumínica temprana (Figura 2). Cuando la radiación excede la capacidad de procesamiento del aparato fotosintético, se desencadena la fotoinhibición y la formación de especies reactivas de oxígeno (ROS), las cuales dañan las membranas celulares y reducen la eficiencia metabólica (Milivojević *et al.*, 2025). En este escenario, la combinación de radiación intensa y calor altera procesos críticos como la eficiencia cuántica del fotosistema II, el equilibrio hídrico y la absorción de nutrientes minerales, traduciéndose en reducciones del crecimiento y la productividad (Rengel *et al.*, 2022).



Figura 2. Sintomatología de estrés foto-térmico en follaje de arándano (*Vaccinium* spp.) cultivado a cielo abierto. Se observa necrosis marginal y clorosis foliar, efectos macroscópicos de la saturación lumínica y el cierre estomático prolongado que limitan la fijación de carbono y comprometen la homeostasis hídrica de la planta. (Fotografía: Autoría propia, material inédito).

INGENIERÍA DE LA LUZ: EL PAPEL DE LA RADIACIÓN DIFUSA

En estas condiciones, el manejo del microclima mediante mallas fotoselectivas se ha convertido en una estrategia fundamental. Lobos y Hancock (2015) señalan que las mallas no solo funcionan como una simple barrera física contra el exceso de radiación, sino como filtros ópticos que modifican la calidad de la radiación incidente (Figura 3). Uno de los beneficios técnicos más relevantes es el aumento del índice de luz difusa. Mientras que a cielo abierto la luz es de carácter directo, creando sombras densas en la parte inferior de la planta, las mallas fragmentan los haces de luz en múltiples ángulos. Esta luz difusa penetra en los estratos internos del dosel, activando hojas que en condiciones habituales estarían por debajo de su punto de compensación fotosintética, lo que optimiza la asimilación neta de carbono de toda la planta (An *et al.*, 2023).



Figura 3. Monitoreo de variables ambientales para la caracterización del microclima bajo malla fotoselectiva. (Fotografía: Autoría propia, material inédito).

HOMEOSTASIS MINERAL Y MODELACIÓN MATEMÁTICA

A su vez, la adopción de sistemas de fertirrigación hidropónica en sustratos como el tezontle ha permitido ajustar con gran precisión el suministro de nutrientes. Sin embargo, la nutrición en climas cálidos debe considerar que la transpiración es el motor principal del movimiento de elementos de baja movilidad, como el calcio (Ca^{2+}). El estrés térmico puede forzar el cierre estomático, deteniendo el flujo nutrimental hacia los puntos de crecimiento y el fruto (Peñuelas-Montoya *et al.*, 2026a).

En este contexto, la integración de herramientas de análisis cuantitativo adquiere una importancia crítica. El uso de modelos matemáticos de segundo orden para describir la dinámica de absorción facilita la comprensión de los patrones reales de demanda fisiológica, superando las limitaciones de los esquemas de fertilización lineales tradicionales. Estos modelos sincronizan la oferta mineral con las curvas de crecimiento reales bajo condiciones de malla, garantizando una homeostasis mineral óptima (Bryla y Strik, 2015).

De esta manera, la producción de arándano en el noroeste de México se sitúa en la convergencia entre la fisiología vegetal, el manejo avanzado del microclima y la modelación matemática. Este enfoque interdisciplinario no solo busca mitigar el impacto ambiental, sino redefinir

la eficiencia productiva y la sostenibilidad de los sistemas agrícolas modernos bajo condiciones climáticas variables.

DINÁMICA DEL ESTRÉS FOTO-TÉRMICO EN EL ARÁNDANO

El arándano es una especie con una ventana fisiológica óptima limitada. Su tasa fotosintética alcanza un punto de saturación térmica y lumínica temprano; temperaturas que exceden el rango óptimo inducen un incremento en la fotorrespiración y una reducción drástica de la conductancia estomática, limitando la fijación neta de carbono (Taiz *et al.*, 2017).

En latitudes como las de Sinaloa, esta saturación lumínica no solo afecta la eficiencia cuántica del fotosistema II, sino que degrada la calidad del fruto al alterar la síntesis de metabolitos secundarios (Milivojević *et al.*, 2025; Peñuelas-Montoya *et al.*, 2026b). Por lo tanto, el uso de mallas fotoselectivas no debe verse solo como una técnica de sombreado, sino como una ingeniería del espectro lumínico que protege la integridad del aparato fotosintético (Figura 4).

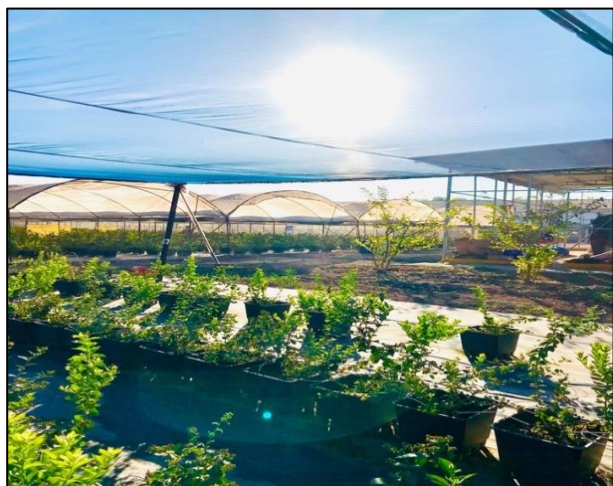


Figura 4. Vista panorámica de la infraestructura protegida para el cultivo de arándano (*Vaccinium* spp.) en el noroeste de México. El uso de cubiertas mitiga el impacto de la radiación extrema característica de la región. (Fotografía: Autoría propia, material inédito).

FISIOLOGÍA DE LA NUTRICIÓN DE PRECISIÓN Y SEÑALIZACIÓN POR NITRATO

Si las mallas controlan el microambiente lumínico, la nutrición hidropónica de precisión gobierna el metabolismo mineral. Debido a su sistema radical superficial y su afinidad por entornos ácidos, el arándano es muy susceptible a desequilibrios osmóticos en la rizosfera (Retamales y Hancock, 2018). En sistemas modernos de producción, esta limitación se supera mediante el uso de sustratos inertes, como el tezontle y fertirrigación automatizada, donde cada elemento es suministrado en concentraciones ajustadas a la demanda fenológica (Figura 5).



Figura 5. Sistema de fertirrigación hidropónica de precisión en cultivo de arándano (*Vaccinium* spp.). Se observa la arquitectura del sistema de riego mediante piquetas (estacas de goteo) insertas en sustrato inerte (tezontle), lo cual garantiza una entrega puntual de la solución nutritiva y un control estricto del bulbo húmedo para optimizar la homeostasis mineral. (Fotografía: Autoría propia, material inédito).

En este escenario, el nitrato (NO_3^-) no solo cumple su función como macronutriente esencial, sino que actúa como una molécula de señalización clave. Este proceso facilita la coordinación entre el metabolismo del nitrógeno y el estado energético de la planta mediante sensores como la proteína quinasa SnRK1. Dicha enzima integra las señales de carbono y nitrógeno, permitiendo al cultivo ajustar su crecimiento de manera eficiente ante

las condiciones ambientales cambiantes (Mao *et al.*, 2025).

Además de su papel metabólico, una disponibilidad equilibrada de nitrato es fundamental para la estabilidad del aparato fotosintético bajo estrés térmico. Estudios recientes demuestran que el nitrato favorece la eficiencia fotoquímica y contribuye a la protección del fotosistema II, incrementando la actividad antioxidante y regulando el balance redox en los cloroplastos (Wei *et al.*, 2024). En sistemas hidropónicos de precisión, la comprensión de estas interacciones optimiza los programas de nutrición, mejorando el vigor vegetativo y la calidad del fruto.

EL MODELO CUANTITATIVO: LA CONVERGENCIA FISIOLÓGICA

En términos fisiológicos, el crecimiento vegetal puede interpretarse como el resultado de la interacción entre la asimilación de carbono mediante la fotosíntesis y la disponibilidad de nutrientes minerales que sostienen la síntesis de biomasa. De manera conceptual, esta relación puede expresarse como:

$$G = f(C \times N)$$

Donde G representa la tasa de acumulación de biomasa, C la asimilación de carbono (optimizada por la fotoselectividad) y N la disponibilidad de nutrientes (regulada por la precisión hidropónica). Este enfoque conceptual basado en Mao *et al.* (2025) subraya que la productividad es el resultado de una sincronía perfecta entre el manejo lumínico y el químico.

Bajo esta perspectiva, describir la dinámica de absorción de nutrientes a lo largo del ciclo del cultivo se convierte en un paso fundamental para comprender y optimizar el crecimiento vegetal en sistemas de producción intensivos.

MODELACIÓN POLINÓMICA: EL RIGOR DE LA CURVA SIGMOIDEA

El toque maestro en la gestión agronómica actual es la transición de los modelos lineales hacia la modelación polinómica de segundo orden. Mientras que los modelos tradicionales asumen una absorción constante, la realidad biológica del arándano muestra una cinética sigmoidea: un inicio latente, una fase de aceleración

exponencial y una meseta productiva (Rengel *et al.*, 2022).

En términos matemáticos, adoptamos la forma:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 DAT + \beta_2 DAT^2 + \varepsilon$$

Donde Y representa la acumulación total de nutrientes (mg planta^{-1}), DAT corresponde a los días después del trasplante, β_0 es la ordenada al origen, y β_1 y β_2 son los coeficientes lineal y cuadrático, respectivamente. Este modelo permite al productor y al investigador identificar el momento crítico de demanda máxima, lo que facilita la programación de la fertirrigación, evitando tanto el estrés por deficiencia como la toxicidad por exceso, maximizando la eficiencia del uso de nutrientes (Bryla y Strik, 2015) (Figura 6).

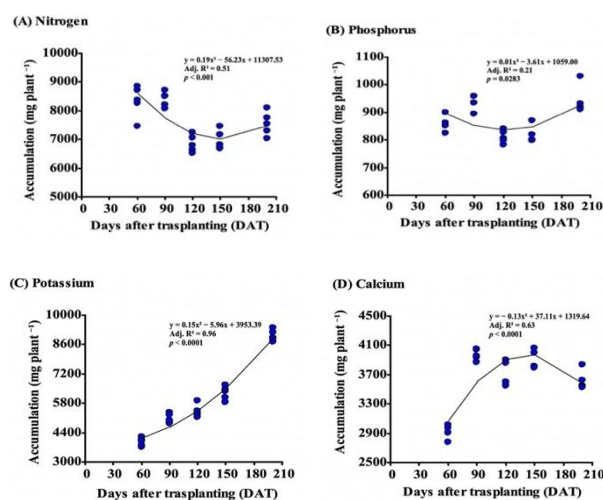


Figura 6. Modelos de acumulación nutrimental en arándano ‘Biloxi’ mediante regresión polinómica de segundo orden. Los paneles representan la dinámica de absorción para: A) Nitrógeno, B) Fósforo, C) Potasio y D) Calcio. Los puntos indican los datos observados en campo (Valle del Fuerte, Sinaloa), mientras que las curvas representan el ajuste del modelo ($Y = \beta_0 + \beta_1 DAT + \beta_2 DAT^2 + \varepsilon$). La alta correspondencia estadística predice los periodos de máxima demanda mineral para optimizar la fertirrigación. (Fuente: Reproducido de Peñuelas-Montoya *et al.*, 2026a; publicado en *Notulae Scientia Biologicae*).

HACIA UN NUEVO PARADIGMA EN LA PRODUCCIÓN DE BERRIES

La producción exitosa de arándano en climas de transición y regiones subtropicales no puede basarse solo en esquemas agronómicos tradicionales. Los hallazgos presentados subrayan que la rentabilidad y resiliencia del cultivo en el noroeste de México dependen de una triangulación tecnológica indisoluble: la ingeniería del microclima mediante foselectividad, la gestión metabólica a través de la nutrición de precisión y la validación predictiva mediante modelación matemática.

El uso de mallas foselectivas trasciende el concepto de sombreado pasivo, estableciéndose como una herramienta de manipulación espectral que preserva la estabilidad del aparato fotosintético y el balance redox celular. De forma complementaria, la adopción de modelos polinómicos de segundo orden representa el eslabón crítico en la gestión de recursos, con lo cual se logra que la oferta hídrica y mineral se sincronice con la cinética real de absorción de la planta, superando las ineficiencias de los modelos lineales convencionales.

En conclusión, la convergencia entre la fisiología vegetal, la ingeniería agronómica y el análisis cuantitativo define la nueva frontera de la agricultura de precisión. Este enfoque interdisciplinario no solo garantiza la homeostasis mineral del arándano ‘Biloxi’ bajo condiciones de estrés térmico, sino que también constituye un modelo robusto, eficiente y sostenible, capaz de transformar las limitaciones ambientales de las zonas áridas en ventajas competitivas para la agroindustria global.

Agradecimientos

El autor expresa su agradecimiento a la Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECHITI) por el financiamiento otorgado para la realización de esta investigación, a la Universidad Autónoma de Sinaloa (UAS), en especial a la Facultad de Agricultura del Valle del Fuerte (FAVF), por brindar las facilidades académicas e infraestructura necesarias para el desarrollo de esta investigación. De igual manera, se agradece de manera especial a la empresa ALGACELL por su invaluable colaboración técnica, el suministro de insumos especializados y el apoyo logístico en campo, factores determinantes para el éxito del manejo de nutrición de precisión.

Asimismo, se extiende un reconocimiento a todas las personas que auxiliaron en las labores de muestreo y mantenimiento de la plantación en el Valle del Fuerte.

Literatura citada

- An, H.; Herad, F.; Zhang, L.; Li, S.; Zhou, B.; Zhang, X. (2023) Effects of nutrition and light quality on the growth of blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) in an advanced plant factory with artificial lighting (PFAL). *Horticulturae* 9(2), 287. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9020287>
- Bryla, D.; Strik, B. (2015) Nutrient requirements, suboptimal toxicity and diagnosis of highbush blueberry. *HortTechnology* 25(4):464-484. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.25.4.464>
- Lobos, G.; Hancock, J. (2015) Blueberries: production, genetics, breeding and physiology. CABI, Wallingford.
- Mao, J.; Tian, Z.; Sun, J.; Wang, D.; Yu, Y.; Li, S. (2025) The crosstalk between nitrate signaling and other signaling molecules in Arabidopsis thaliana. *Frontiers in Plant Science*. 16:1546011. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1546011>
- Milivojević, J.; Radivojević, D.; Djekić, I.; Spasojević, S.; Dragišić Maksimović, J.; Milosavljević, D.; Maksimović, V. (2025) Differentially Colored Photosensitive Nets as a Sophisticated Approach to Improve the Agronomic and Fruit Quality Traits of Potted Blueberries. *Agronomy* 2025, 15, 697. <https://doi.org/10.3390/agronomy15030697>
- Peñuelas-Montoya, F.; López-Bautista, E.; Ruiz-Martínez, F.; Posos-Parra, O.A.; Miranda-Valdez, J.A. (2026a) Precision nutrient management in hydroponic blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) under climatic stress: uptake dynamics and accumulation patterns. *Notulae Scientia Biologicae*. 18(1), 12820. <https://doi.org/10.55779/nsb18112820>
- Peñuelas-Montoya, F.; Ruiz-Martínez, F.; López-Bautista, E.; Maldonado-Peralta, R.; Miranda-Valdez, J. (2026b) Mallas foselectivas sobre el rendimiento y la calidad del fruto de arándano (*Vaccinium corymbosum* L.) en condiciones subtropicales. *Acta Agrícola y Pecuaria* 12(1). <https://doi.org/10.30973/aap.2026.12.0121008>



- Peñuelas-Montoya, F.; Sánchez-Portillo, J.; Ruiz-Martínez, F.; Fuentes-Verduzco, C. (2024) Morfología de la planta de arándano *Vaccinium corymbosum* L. cv. “Biloxi” bajo mallas fotoselectivas en Sinaloa, México. *Temas Agrarios* 29(2):151-170. <https://doi.org/10.21897/ynpsv266>
- Rengel, Z.; Cakmak, I.; White, P.J. (2022) Marschner's Mineral Nutrition of Plants. (4.^a ed.). London Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2019-0-00491-8>
- Retamales, J. B.; Hancock, J. F. (2018) Blueberries. 2nd ed. Boston: CABI Publishing. ISBN: 978-1-78064-727-2411.
- Taiz, L.; Zeiger, E.; Møller, I. M.; Murphy, A. (2017) Plant Physiology and Development. 6th ed. Sunderland, MA: Sinauer Associates. https://sirsyedcollege.ac.in/crm/public/uploads/download_image/H8aTDrHeKuTogISO7SE1r80gJP2dmU.pdf
- Wei, X.; Han, L.; Xu, N.; Sun, M.; Yang, X. (2024) Nitrate nitrogen enhances the efficiency of photoprotection in *Leymus chinensis* under drought stress. *Frontiers in Plant Science*. 15:1348925. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1348925>

Aviso legal/Nota del editor: Las declaraciones, opiniones y datos contenidos en todas las publicaciones son exclusivamente de los autores y colaboradores, y no de Agraria ni de sus editores. Agraria y sus editores no se responsabilizan de ningún daño a personas o bienes que resulte de las ideas, métodos, instrucciones o productos mencionados en el contenido.

