



Guía Técnica de Producción de Arándanos (*Vaccinium* spp.) en Sistemas Hidropónicos en Ambientes Controlados



CIPAC AIP

Centro de Investigación y Producción en
Ambiente Controlado AIP

PRESENTACIÓN

El Centro de Investigación y Producción en Ambiente Controlado (CIPAC-AIP) es una institución líder reconocida por su enfoque innovador y tecnológico en la producción agrícola sostenible. Desde su creación, el CIPAC-AIP ha impulsado la modernización del sector agropecuario en Panamá mediante prácticas avanzadas en ambientes controlados, buscando siempre aumentar la productividad, optimizar el uso de recursos naturales y mejorar significativamente la competitividad de los productos agrícolas a nivel nacional e internacional.

Dentro de esta línea estratégica, el cultivo hidropónico de arándanos (*Vaccinium spp.*) emerge como una alternativa sumamente prometedora y rentable, especialmente bajo condiciones climáticas tropicales como las de Panamá. El arándano, altamente valorado globalmente por sus propiedades nutricionales, medicinales y comerciales, presenta una demanda creciente en los mercados internacionales debido a sus beneficios comprobados para la salud, como alto contenido de antioxidantes, vitaminas y compuestos bioactivos.

La producción tradicional del arándano, históricamente limitada a regiones con climas templados y suelos ácidos específicos, ha encontrado en la hidroponía bajo condiciones controladas una solución tecnológica revolucionaria, capaz de superar barreras naturales y ampliar considerablemente la frontera agrícola para este cultivo. Entre las principales ventajas de la producción hidropónica controlada de arándanos destacan:

- **Uso eficiente y sostenible del agua y nutrientes:** La hidroponía permite reciclar y optimizar la solución nutritiva, reduciendo significativamente el consumo de agua y fertilizantes en comparación con sistemas tradicionales.
- **Alta productividad y calidad constante:** Al controlar estrictamente las condiciones ambientales y nutricionales, se obtienen frutos homogéneos, de excelente calidad, tamaño uniforme y alto valor comercial durante todo el año.
- **Reducción del uso de agroquímicos:** Un ambiente controlado disminuye la incidencia de plagas y enfermedades, minimizando el empleo de productos químicos y favoreciendo estrategias integradas y biológicas de manejo.
- **Superación de limitaciones climáticas regionales:** El sistema permite ajustar factores críticos como temperatura, humedad, iluminación y oxigenación radicular, haciendo factible la producción rentable en regiones tropicales con clima adverso para este cultivo.

Este manual técnico ha sido elaborado con el objetivo específico de proporcionar a productores, técnicos, estudiantes, investigadores y profesionales agrícolas las herramientas necesarias para implementar y manejar exitosamente sistemas hidropónicos especializados en el cultivo de arándanos. A lo largo del manual, se abordarán en detalle todos los aspectos esenciales del manejo agronómico, incluyendo la selección de materiales, variedades recomendadas, diseño del sistema hidropónico, estrategias nutricionales avanzadas, manejo integrado de plagas y enfermedades, y manejo postcosecha óptimo.

El objetivo final del CIPAC-AIP con esta guía técnica es promover la adopción generalizada de tecnologías modernas y sostenibles que aumenten la competitividad y rentabilidad del sector agrícola nacional, ofreciendo alternativas comerciales innovadoras y fortaleciendo la seguridad alimentaria y económica del país. Con la implementación rigurosa y adecuada de las técnicas descritas en este manual, los productores podrán no solo aumentar significativamente sus rendimientos y calidad, sino también posicionarse favorablemente en mercados internacionales altamente exigentes, contribuyendo así al desarrollo de una agricultura moderna, sostenible y económicamente rentable.

INTRODUCCIÓN

El cultivo de arándanos (*Vaccinium spp.*), originario de regiones templadas, ha experimentado un crecimiento exponencial a nivel mundial en las últimas dos décadas, impulsado por la demanda de productos con propiedades funcionales y beneficios comprobados para la salud. Reconocidos por su alto contenido en antioxidantes, vitaminas, fibra y compuestos fenólicos, los arándanos se han posicionado como un “superalimento”, ganando espacios estratégicos en mercados internacionales de alto valor, desde la industria alimentaria hasta la farmacéutica y cosmética.

Sin embargo, su producción en regiones tropicales como Panamá representa un desafío técnico y agroclimático significativo. El cultivo tradicional de arándanos requiere suelos ácidos, bien drenados, temperaturas moderadas (entre 10 y 25 °C), alta luminosidad y un manejo cuidadoso de la humedad y la nutrición. Estas condiciones son difíciles de alcanzar de manera natural en climas cálidos y húmedos, lo que ha impulsado el desarrollo de soluciones innovadoras mediante el uso de **sistemas de cultivo en ambientes controlados**.

La hidroponía y otras técnicas de agricultura protegida se han consolidado como estrategias viables para introducir y adaptar el cultivo de arándanos en nuevos entornos. La posibilidad de cultivar en **sustratos inertes** (como fibra de coco o leca), el uso de **fertirrigación automatizada**, y la capacidad de regular parámetros como la temperatura, la humedad relativa, el pH del medio, y la conductividad eléctrica de la solución nutritiva, permite a los productores tropicales crear microambientes altamente eficientes y productivos, ajustados a las necesidades fisiológicas específicas de la planta.

Sistemas como **contenedores individuales con drenaje controlado**, **canales con flujo laminar (NFT)**, o incluso módulos verticales, están siendo explorados y adaptados para maximizar el rendimiento por metro cuadrado, reducir el uso de agua, minimizar el impacto ambiental y garantizar estándares de calidad que cumplan con los requisitos del comercio internacional. De manera particular, el uso de **macetas rígidas con leca y fertirrigación por goteo** ha demostrado ser una de las alternativas más viables y replicables en condiciones tropicales, tanto para pequeños como grandes productores.

Este manual técnico ha sido diseñado como una herramienta integral para orientar a productores, técnicos, investigadores y estudiantes en el desarrollo de **proyectos de arándanos en sistemas hidropónicos en ambientes controlados**. A partir de evidencia científica, ensayos regionales y estudios de caso, se presentan recomendaciones prácticas sobre el manejo del cultivo, los requerimientos ambientales, la formulación de soluciones nutritivas por etapa fenológica, y las técnicas de propagación más eficientes, incluyendo la micropropagación, la siembra por semilla y los esquejes semileñosos.

Además, se abordan aspectos fundamentales como el **manejo integrado de plagas**, el diseño del sistema de producción, y los retos logísticos y comerciales que enfrentan los países tropicales al incorporar este tipo de cultivos no tradicionales en su matriz productiva.

En línea con su misión institucional, el **CIPAC-AIP** reafirma con este documento su compromiso con la transferencia de tecnología agrícola avanzada y la promoción de sistemas resilientes, sostenibles y competitivos. El arándano, aunque exótico para muchas regiones tropicales, tiene el potencial de convertirse en un cultivo clave dentro de una estrategia de diversificación agrícola orientada a mercados premium, con alto valor agregado, bajo impacto ambiental y posibilidades de escalamiento regional.

*Los arándanos contienen un compuesto llamado **pterostilbeno**, un antioxidante estructuralmente similar al resveratrol de las uvas, pero con mayor biodisponibilidad. Este fitoquímico no solo contribuye a las propiedades antiinflamatorias y neuroprotectoras del arándano, sino que también está siendo estudiado por su potencial en la prevención de enfermedades metabólicas y degenerativas. Además, su presencia influye sutilmente en el sabor astringente y en el tono ligeramente amargo que diferencia a los arándanos silvestres de los cultivados.*



Importancia Económica y Comercial

El arándano (*Vaccinium* spp.) se ha convertido en uno de los cultivos de mayor crecimiento económico y comercial en el sector agrícola mundial durante las últimas décadas. Este incremento en la demanda se relaciona directamente con las propiedades nutricionales y nutracéuticas del fruto, así como por su versatilidad en la industria alimenticia, cosmética y farmacéutica.

Demanda global y nacional

A nivel global, el mercado del arándano ha experimentado un crecimiento constante y significativo. Según datos de organismos internacionales como la FAO y diversos reportes comerciales, el consumo mundial de arándanos frescos y procesados ha crecido anualmente entre 8% y 10% en los últimos cinco años, destacándose en regiones como Norteamérica, Europa y Asia, donde los consumidores valoran especialmente sus beneficios para la salud y sus propiedades antioxidantes.

En Panamá, aunque la producción local de arándanos es prácticamente inexistente debido a las limitaciones climáticas, existe una fuerte dependencia de las importaciones para satisfacer la creciente demanda local. Este escenario representa una oportunidad económica importante para productores nacionales que puedan implementar con éxito sistemas hidropónicos bajo condiciones controladas, reduciendo así la dependencia de importaciones y ofreciendo un producto local competitivo y de alta calidad.

Rentabilidad del cultivo hidropónico de arándanos

La producción hidropónica del arándano presenta notables ventajas económicas frente a los métodos tradicionales, especialmente en regiones tropicales. Este sistema de cultivo permite obtener cosechas tempranas, frutos homogéneos, mayores rendimientos por unidad de superficie y una producción continua durante todo el año, lo que favorece una rentabilidad sostenida en el tiempo.

Diversos estudios y experiencias comerciales recientes en países como México, Colombia y Perú, demuestran que la producción hidropónica en sustratos adecuados (por ejemplo, fibra de coco y perlita) puede incrementar significativamente la producción por hectárea, alcanzando rendimientos desde 15 a 25 toneladas por hectárea por año, muy superiores a las cifras obtenidas en suelo tradicional (10 a 15 toneladas por hectárea). Adicionalmente, los frutos producidos en hidroponía suelen alcanzar precios más altos en el mercado, debido a su calidad superior, uniformidad y mejor vida útil postcosecha.

Oportunidades comerciales y nichos de mercado

La producción hidropónica de arándanos bajo ambientes controlados ofrece numerosas oportunidades comerciales, tanto en mercados nacionales como internacionales. Algunos de los principales nichos comerciales identificados incluyen:

- **Mercado fresco:**
El arándano fresco producido en sistemas hidropónicos tiene alta demanda en supermercados, hoteles y restaurantes premium, debido a su calidad superior en términos de tamaño, sabor, firmeza y vida útil prolongada.
- **Mercado procesado:**
Existe un creciente mercado para productos procesados a base de arándanos como mermeladas, jugos, yogures, snacks deshidratados, congelados y productos farmacéuticos o nutracéuticos.

- **Mercado de exportación:**

La producción fuera de temporada mediante sistemas hidropónicos ofrece ventajas estratégicas para acceder a mercados internacionales altamente rentables durante ventanas de comercialización en las que otros países productores no pueden suplir.

En conclusión, el cultivo hidropónico de arándanos presenta una gran oportunidad para diversificar la producción agrícola de Panamá, reducir la dependencia de importaciones y posicionar al país como productor competitivo en el mercado regional e internacional.

Ventajas Puntuales de la Producción en Ambientes Controlados

El cultivo hidropónico de arándanos en ambientes controlados ofrece diversas ventajas técnicas, económicas y ambientales respecto a métodos tradicionales de cultivo en suelo abierto. Estas ventajas contribuyen directamente a mejorar la eficiencia productiva, calidad del fruto, sostenibilidad del proceso agrícola y la rentabilidad para el productor.

Producción continua y estable durante todo el año

Una de las ventajas más significativas del cultivo hidropónico en ambientes controlados es la posibilidad de obtener producción constante durante todo el año, eliminando así las limitaciones estacionales típicas de este cultivo. Mediante la gestión precisa de condiciones ambientales como temperatura, humedad, iluminación y nutrición, se pueden mantener las plantas en producción permanente, logrando ofrecer frutos frescos y consistentes a los mercados nacionales e internacionales de manera continua.

Eficiencia en el uso de agua y nutrientes

Los sistemas hidropónicos permiten una eficiencia excepcional en el uso del agua y nutrientes. A diferencia del cultivo convencional, el uso de la solución nutritiva recirculante o riego localizado en sustrato evita pérdidas por lixiviación y evaporación. Este tipo de manejo puede reducir el consumo hídrico hasta en un 60-80%, aspecto especialmente relevante en regiones con limitaciones o elevados costos del recurso hídrico. Además, la dosificación precisa de nutrientes permite minimizar el desperdicio, optimizando costos de fertilización y garantizando un uso más sostenible de los recursos naturales.

Reducción del uso de agroquímicos

El ambiente controlado y la ausencia del contacto directo con el suelo disminuyen significativamente la incidencia de plagas y enfermedades del cultivo. Esto permite reducir de manera importante el uso de agroquímicos y fungicidas convencionales, lo cual no solo representa un ahorro económico importante para el productor, sino también genera productos más seguros, saludables y aceptados en mercados con estrictas normativas fitosanitarias y de calidad alimentaria. Adicionalmente, la reducción en el uso de químicos contribuye positivamente al medio ambiente y a la salud de los consumidores y trabajadores agrícolas.

Alta calidad y uniformidad del fruto

El control preciso de las condiciones ambientales, sumado a un manejo nutricional óptimo, asegura una producción de frutos de calidad superior, uniformes en tamaño, firmeza, sabor y características nutricionales. Esta uniformidad mejora notablemente la aceptación del producto en mercados exigentes, tanto locales como

internacionales, lo que incrementa el valor comercial del cultivo y facilita el acceso a nichos de alto valor agregado, como supermercados premium, hoteles, restaurantes y exportación directa.

Rápido establecimiento y mayor rendimiento productivo

La hidroponía en ambientes controlados permite obtener una producción significativamente mayor en menor tiempo comparado con el cultivo tradicional en suelo. Esto es especialmente importante para los productores que requieren recuperar rápidamente la inversión inicial. Estudios y experiencias comerciales han demostrado que los sistemas hidropónicos pueden adelantar el inicio de producción hasta en un año, ofreciendo rendimientos desde el primer ciclo, lo que aumenta considerablemente la rentabilidad a corto plazo.

Menor dependencia climática

El uso de estructuras controladas y técnicas de manejo ambiental (enfriamiento evaporativo, ventilación forzada, mallas de sombreado, etc.) disminuye sustancialmente los riesgos asociados a condiciones climáticas adversas como sequías, lluvias excesivas, calor extremo o eventos climáticos inesperados. Esto proporciona una estabilidad productiva que no puede garantizarse en sistemas de producción convencional al aire libre.

En resumen, el cultivo hidropónico controlado de arándanos ofrece ventajas claras en términos de eficiencia productiva, sostenibilidad, rentabilidad económica y calidad del producto final. Estas características convierten a la hidroponía en una excelente alternativa tecnológica y comercial para la producción competitiva de arándanos en climas tropicales como Panamá.

Contexto Regional y Desafíos del Cultivo en Panamá

Panamá, con su clima tropical húmedo, presenta condiciones particulares que pueden representar desafíos importantes para la producción convencional de arándanos. Aunque estos desafíos existen, la implementación de sistemas hidropónicos en ambientes controlados ofrece soluciones efectivas para superarlos. A continuación, se abordan las principales limitaciones y consideraciones regionales para este cultivo en el contexto panameño.

Clima tropical y limitaciones ambientales

El clima en Panamá se caracteriza por temperaturas constantemente elevadas (24-33 °C), alta humedad relativa (más del 80% anual promedio) y ausencia significativa de horas frío, condiciones muy distintas a las tradicionalmente requeridas por el cultivo de arándanos (temperaturas moderadas y períodos de frío necesarios para la floración). Estas condiciones dificultan seriamente la producción en campo abierto, aumentando el riesgo de enfermedades fúngicas, estrés hídrico y estrés térmico.

Para mitigar estos efectos negativos, es imprescindible adoptar sistemas controlados con técnicas como enfriamiento evaporativo, sombreado adecuado y ventilación forzada, las cuales permiten mantener temperaturas favorables (18-25 °C diurnas, 10-15 °C nocturnas) y una humedad relativa moderada (60-80%), esenciales para el desarrollo óptimo del cultivo.

Escasez de tecnología especializada y conocimientos técnicos

La hidroponía, especialmente aplicada a un cultivo exigente como el arándano, requiere no solo infraestructura tecnológica adecuada, sino también conocimiento técnico especializado en manejo agronómico, nutrición vegetal, y control ambiental. Actualmente, Panamá enfrenta limitaciones en la disponibilidad local de tecnología específica y personal técnico capacitado, lo cual representa una barrera inicial para nuevos proyectos.

Es necesario fortalecer la formación técnica especializada mediante programas de capacitación intensivos, asesoría técnica continua y la implementación de unidades demostrativas que permitan la transferencia tecnológica efectiva hacia productores locales.

Costos de inversión elevados en infraestructura

Establecer un sistema hidropónico controlado para el cultivo de arándanos **implica costos iniciales elevados debido a la necesidad de infraestructura especializada** como invernaderos con enfriamiento evaporativo o sistemas HVAC, riego tecnificado, sistemas de fertirrigación automatizados, y materiales específicos como sustratos ácidos y macetas adecuadas.

Si bien la inversión inicial puede ser significativa, estudios recientes y experiencias regionales indican que la recuperación económica de estos proyectos es factible a mediano plazo debido a los altos rendimientos, la calidad superior del producto y la posibilidad de ofrecer frutos fuera de temporada con altos precios comerciales.

Competencia con productos importados

La mayor parte de los arándanos consumidos en Panamá son importados, principalmente de países productores consolidados como Estados Unidos, Chile, México y Perú. Esta dependencia afecta la competitividad de la producción nacional debido a los costos de transporte, logística y fluctuaciones de precio internacional.

Sin embargo, la producción hidropónica local bajo ambientes controlados permite ofrecer un producto fresco de alta calidad, reduciendo tiempos de transporte y costos logísticos, lo que se traduce en ventajas comerciales importantes en el mercado interno. Además, la producción fuera de temporada puede posicionar al producto nacional con mayor ventaja competitiva.

Infraestructura logística y distribución en mercados locales

La infraestructura logística en Panamá, especialmente relacionada con la cadena de frío, puede representar un desafío adicional para la distribución de productos altamente perecederos como el arándano. La disponibilidad limitada de centros de acopio adecuados, transporte refrigerado eficiente y sistemas de comercialización organizados puede afectar negativamente la calidad postcosecha del producto.

Para enfrentar este reto, se recomienda desarrollar una infraestructura propia en finca para el manejo postcosecha inmediato (pre-enfriado y almacenamiento refrigerado), así como establecer acuerdos comerciales claros con cadenas de distribución y mercados especializados, garantizando así que la calidad del fruto se conserve desde la cosecha hasta el consumidor final.

Costos energéticos asociados al control térmico

La necesidad de mantener temperaturas moderadas implica costos energéticos importantes. La elección del sistema adecuado (por ejemplo, enfriamiento evaporativo combinado con ventilación forzada o sistemas de sombreo) puede reducir significativamente estos costos en comparación con sistemas convencionales de aire acondicionado (HVAC).

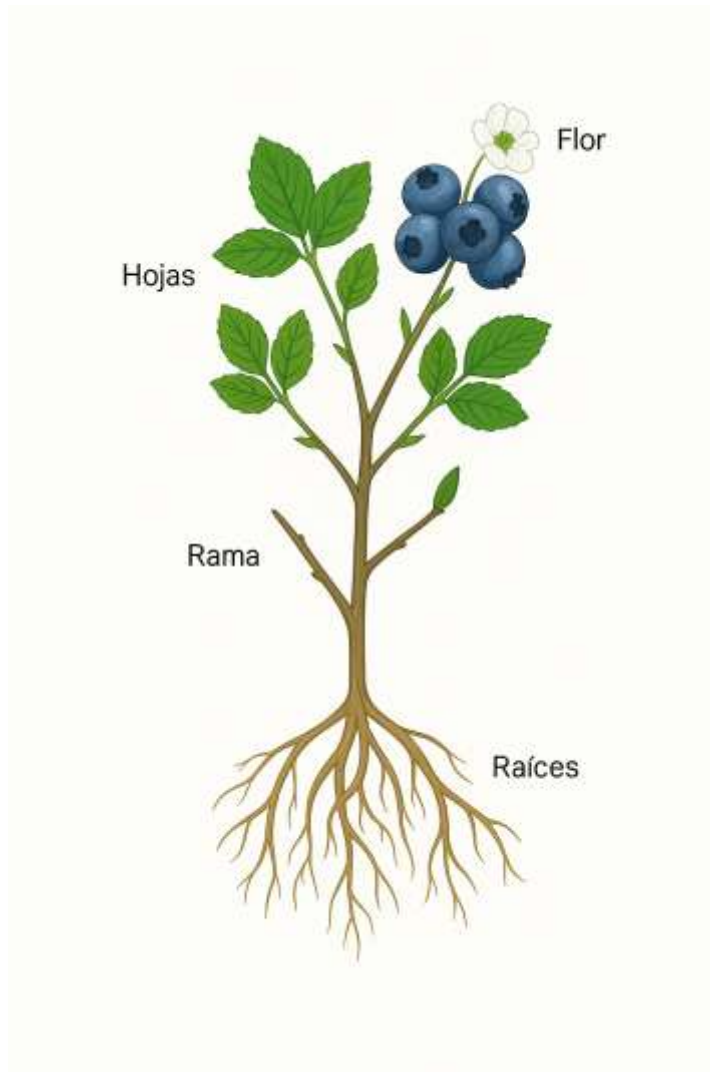
Una alternativa para reducir costos a largo plazo es integrar fuentes de energía renovable, especialmente solar fotovoltaica, permitiendo disminuir gastos operativos asociados a la refrigeración y manejo climático.

Conclusión sobre el contexto regional

Si bien existen desafíos importantes para cultivar arándanos en Panamá, especialmente en relación con el clima tropical, infraestructura y logística, estos pueden ser enfrentados eficazmente mediante el uso adecuado de tecnología hidropónica, control ambiental inteligente y la formación técnica continua del personal involucrado. La hidroponía controlada ofrece una solución viable, económicamente atractiva y sostenible para introducir exitosamente el cultivo de arándanos en la región.



Características de la Planta: Botánica y Morfología de la fresa



El arándano (*Vaccinium spp.*) pertenece a la familia botánica Ericaceae, caracterizada por plantas arbustivas que prosperan naturalmente en condiciones de suelos ácidos, bien drenados, ricos en materia orgánica y con alta humedad ambiental.

Morfología general:

El arándano es un arbusto perenne que puede alcanzar entre 0.5 y 2.5 metros de altura, dependiendo de la especie y variedad cultivada. Presenta un sistema radicular superficial, fino y fibroso, carente de pelos absorbentes, lo cual hace que la planta sea altamente dependiente de condiciones óptimas de humedad y nutrientes disponibles en su entorno inmediato.

Raíces:

- Finas, superficiales, muy ramificadas y fibrosas.
- Altamente sensibles a la falta de oxígeno y al estrés hídrico.
- Se desarrollan principalmente en los primeros 40-50 cm del medio de cultivo.

Tallos:

- Leñosos, erectos y ramificados.
- Las ramas jóvenes suelen tener coloración verdosa que evoluciona hacia tonos grises o marrones conforme envejecen.
- La poda de formación es esencial para asegurar una adecuada renovación y vigor de la planta, manteniendo ramas productivas.

Hojas:

- De forma ovalada a lanceolada, con bordes ligeramente aserrados y ápice agudo.
- Color verde intenso en el haz, con tonalidades más claras en el envés.
- Son de textura cerosa, lo que les permite tolerar ciertos **niveles de estrés hídrico**.

Flores:

- De forma acampanada, pequeñas (5-10 mm), color blanco o rosado pálido, dispuestas en racimos o inflorescencias en las puntas de ramas jóvenes.
- Las flores son polinizadas principalmente por insectos (abejas, abejorros), por lo que la presencia de polinizadores o métodos alternativos de polinización son esenciales en ambientes controlados.

Frutos (Bayas):

- Los frutos son bayas globosas, de tamaño variable entre 6 a 20 mm de diámetro según la variedad.
- La epidermis es lisa y cerosa, inicialmente de color verde, pasando a rojo y finalmente a azul oscuro o púrpura intenso al madurar.
- Los frutos maduros poseen una pulpa jugosa, con numerosas semillas pequeñas en su interior.

Semillas:

- Son pequeñas, numerosas por fruto, de color marrón claro, y generalmente dispersas en la pulpa.
- Su viabilidad y germinación natural suelen ser bajas, por lo que la propagación comercial se realiza principalmente mediante métodos vegetativos (esquejes, micropropagación).

Adaptación fisiológica:

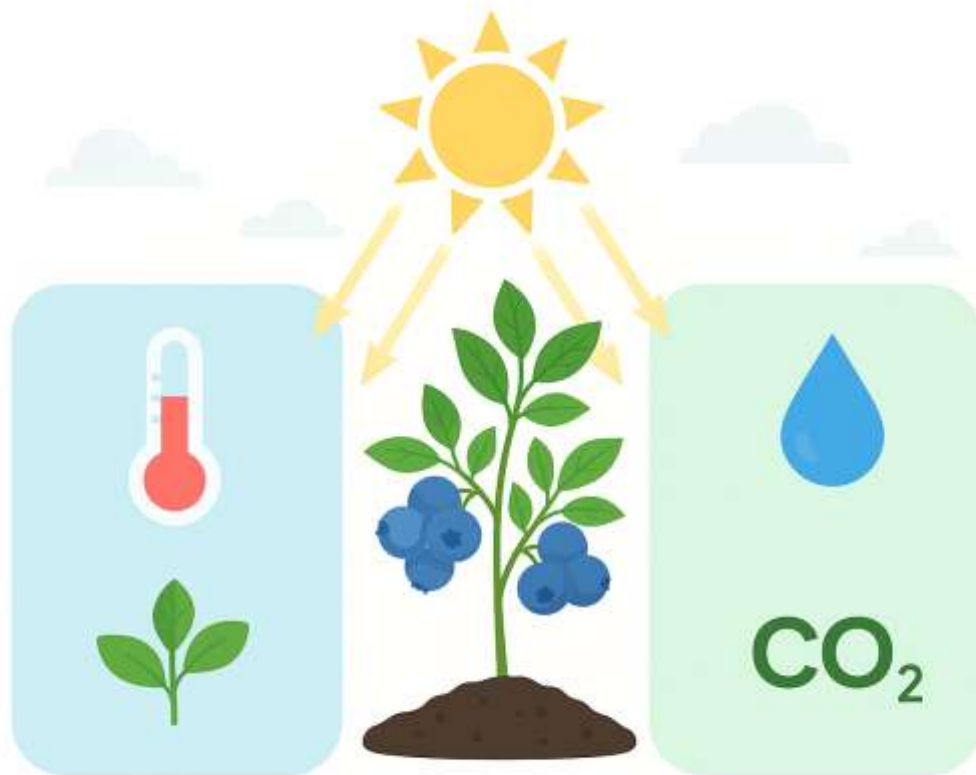
- Las plantas de arándano poseen mecanismos de adaptación a condiciones ácidas (pH óptimo entre 4.5 y 5.5), y bajos niveles de sales (EC ideal menor de 1.5 mS/cm).
- Prefieren nitrógeno en forma amoniacal (NH_4^+), debido a su adaptación evolutiva a suelos ácidos donde prevalece esta forma de nitrógeno.
- Son sensibles al exceso de calcio (Ca) y sales de sodio (Na), por lo que requieren soluciones nutritivas balanceadas específicamente para esta especie.

Estas características botánicas y morfológicas condicionan significativamente el manejo agronómico del cultivo hidropónico de arándano. Por lo tanto, es fundamental conocerlas y entenderlas a profundidad para implementar estrategias efectivas en términos de nutrición, riego, manejo de poda, polinización y control ambiental, logrando así un cultivo saludable y altamente productivo

El pigmento que da a los arándanos su color azul intenso se llama antocianina, un flavonoide con potentes propiedades antioxidantes. Lo curioso es que, aunque los arándanos parecen azules a simple vista, su jugo es en realidad púrpura o rojizo. Esto se debe a que el color final de la antocianina varía según el pH del medio: en ambientes ácidos es rojiza, en neutros es púrpura, y solo en condiciones alcalinas tiende al azul. Esta característica ha sido utilizada incluso como indicador natural de pH en laboratorios escolares.



Condiciones Óptimas para el Crecimiento del Arándano



El arándano (*Vaccinium spp.*) es un cultivo que, debido a su fisiología particular, presenta requerimientos ambientales y edafoclimáticos muy específicos para lograr un crecimiento vigoroso, una producción constante y una calidad de fruto óptima. En sistemas hidropónicos en ambientes controlados, la capacidad de ajustar y mantener estos parámetros resulta fundamental para el éxito del cultivo.

Temperatura

La temperatura es uno de los factores más críticos para el desarrollo del arándano.

- **Temperatura diurna óptima:** 18°C a 25°C
- **Temperatura nocturna óptima:** 10°C a 15°C

Temperaturas superiores a 30°C pueden inducir estrés térmico, afectando la floración, el cuajado del fruto y la calidad del producto final. Es necesario implementar estrategias de control climático como ventilación forzada, enfriamiento evaporativo (cooling pads) o sombreado inteligente para mantener el rango óptimo.

Humedad Relativa

El cultivo de arándanos requiere una humedad relativa moderada.

- **Humedad relativa óptima:** 60% a 80%

Humedades superiores al 85% favorecen la aparición de enfermedades fúngicas como botrytis y mildiu. Humedades por debajo del 50% pueden provocar estrés hídrico, afectando el desarrollo de brotes y frutos.

Luz

El arándano es una planta que responde favorablemente a condiciones de alta luminosidad.

- **Intensidad lumínica óptima:** 800 a 1000 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ (radiación fotosintéticamente activa, PAR)
- **Duración del fotoperiodo:** 12 a 14 horas diarias de luz

En zonas o temporadas de baja luminosidad, se recomienda suplementar con iluminación artificial (por ejemplo, lámparas LED de espectro completo), especialmente durante etapas críticas como floración y formación de frutos.

Ventilación y Circulación del Aire

Una adecuada ventilación es indispensable para:

- Regular la temperatura interna del invernadero.
- Evitar condensaciones que favorecen enfermedades.
- Mejorar la polinización natural en cultivos bajo invernadero.

Se recomienda la instalación de sistemas de ventilación forzada y el uso de mallas antiinsectos que permitan la renovación de aire sin comprometer la sanidad del cultivo.

Oxigenación Radicular

El sistema radicular del arándano es muy sensible a la falta de oxígeno.

- **Oxígeno disuelto recomendado en la solución nutritiva:** 6 a 8 mg/L

La selección de sustratos altamente aireados (fibra de coco, perlita, mezclas con turba) y la gestión adecuada del riego y drenaje son fundamentales para garantizar una buena oxigenación en la zona radicular.

Requerimientos de pH y Conductividad Eléctrica (CE)

El arándano presenta una alta sensibilidad al pH y a la concentración de sales en el medio de cultivo.

- **pH óptimo del sustrato y solución nutritiva:** 4.5 a 5.5
- **Conductividad eléctrica (CE) ideal de la solución nutritiva:** 0.8 a 1.5 mS/cm

Es necesario un monitoreo constante del pH y CE tanto en la solución de riego como en el drenaje para evitar desequilibrios nutricionales que afecten el crecimiento y desarrollo del cultivo.

Tipo de Sustrato Ideal

El sustrato debe cumplir con las siguientes características:

- Alta porosidad total (>75%)
- Buena capacidad de retención de humedad (30-50% del volumen)
- pH naturalmente ácido o capacidad de acidificación controlada

- Baja conductividad eléctrica inicial
- Buena estabilidad estructural a largo plazo

Los sustratos más recomendados para el cultivo hidropónico de arándanos incluyen:

- **Fibra de coco:**
Ofrece alta retención de humedad, excelente aireación y un pH naturalmente ácido, ideal para las necesidades del arándano.
- **Mezclas de turba con perlita:**
Combinan buena capacidad de retención de agua con una excelente oxigenación radicular.
- **LECA (Arcilla Expandida):**
Utilizada como complemento o en mezclas, la arcilla expandida proporciona un excelente drenaje, aireación superior y estabilidad estructural en cultivos de largo plazo. Es particularmente útil para mejorar la oxigenación radicular en condiciones de alta humedad.
- **Mezclas específicas de fibra de coco con corteza compostada:**
Proporcionan estabilidad física y ayudan a mantener un ambiente radicular sano, favoreciendo el desarrollo vigoroso de las plantas.

La correcta selección y manejo del sustrato son claves para garantizar un balance óptimo entre retención de agua, oxigenación y estabilidad química, fundamentales para el crecimiento y alta productividad del cultivo hidropónico de arándanos.

Especies y Variedades Recomendadas para Cultivo Hidropónico en Climas Cálidos

La elección de la variedad adecuada de arándano es uno de los factores determinantes para el éxito del cultivo en condiciones tropicales o subtropicales. Dado que el arándano es tradicionalmente un cultivo de clima templado, para sistemas hidropónicos en Panamá y regiones similares se deben seleccionar variedades de bajo requerimiento de horas frío y alta adaptabilidad a temperaturas moderadamente elevadas.

Principales grupos de arándanos cultivados

Existen distintos tipos de arándanos, clasificados principalmente por su adaptación climática:

- **Highbush del Norte (*Vaccinium corymbosum*):**
Requieren entre 800 a 1200 horas frío. No aptos para climas cálidos tropicales.
- **Highbush del Sur (Southern Highbush):**
Híbridos desarrollados para climas cálidos, con bajo requerimiento de frío (menos de 300 horas frío). Son las variedades más apropiadas para hidroponía en ambientes tropicales.
- **Rabbiteye (*Vaccinium virgatum* o *ashei*):**
Moderadamente adaptables a temperaturas altas, pero con frutas de menor calibre y sabor más ácido en comparación al Southern Highbush.

Características deseables en variedades para ambientes tropicales

Para el éxito en ambientes controlados en zonas tropicales, las variedades deben presentar:

- Bajo requerimiento de horas frío (menos de 300 horas frío).
- Alta tolerancia a temperaturas diurnas de hasta 28-30 °C.
- Buena adaptación a sistemas de cultivo sin suelo (hidroponía o en sustrato).
- Frutos de tamaño grande (>18 mm de diámetro) y buena firmeza.
- Alta resistencia a enfermedades fúngicas en condiciones de alta humedad.
- Capacidad de floración y fructificación escalonada para optimizar cosechas continuas.

Variedades recomendadas para hidroponía en clima cálido

A continuación se presentan algunas variedades de arándano tipo Southern Highbush especialmente recomendadas para cultivo hidropónico en regiones tropicales como Panamá:

Variedad	Características principales	Observaciones
Biloxi	Baja necesidad de frío, frutos de buen tamaño y excelente sabor. Muy adaptable a climas cálidos.	Ideal para hidroponía; alta productividad.
Emerald	Fruto grande, firme y dulce. Planta vigorosa y de alta adaptabilidad.	Necesita poda adecuada para evitar sobrecarga de brotes.
Ventura	Fruto muy firme, buen tamaño y sabor equilibrado. Maduración temprana.	Se adapta bien a sistemas de producción intensiva.
Misty	Fruto de excelente sabor y dulzura. Planta vigorosa de hábito abierto.	Requiere buena polinización para máximo rendimiento.
Star	Fruto grande y muy firme, sabor suave. Maduración temprana.	Variedad muy uniforme y de alta aceptación comercial.

Estas variedades, al ser cultivadas bajo sistemas hidropónicos en ambientes controlados, pueden ofrecer producciones estables, frutas de calidad superior y la posibilidad de abastecer mercados exigentes durante todo el año.

Consideraciones adicionales para la selección varietal

- Es fundamental asegurar la disponibilidad de plántulas certificadas libres de enfermedades.
- Se recomienda considerar la instalación de colmenas de abejorros o implementar polinización manual asistida dentro de los invernaderos, ya que algunas variedades presentan mejor rendimiento con polinización cruzada.
- Algunas variedades muestran mejor comportamiento productivo si se combinan dos o más genotipos compatibles en el mismo invernadero, favoreciendo así la polinización cruzada natural.



Diseño del Sistema hidropónico



CIPAC AIP

Centro de Investigación y Producción en
Ambiente Controlado AIP

Diseño del Sistema Hidropónico

7.1 Selección del Sistema Hidropónico para Arándanos

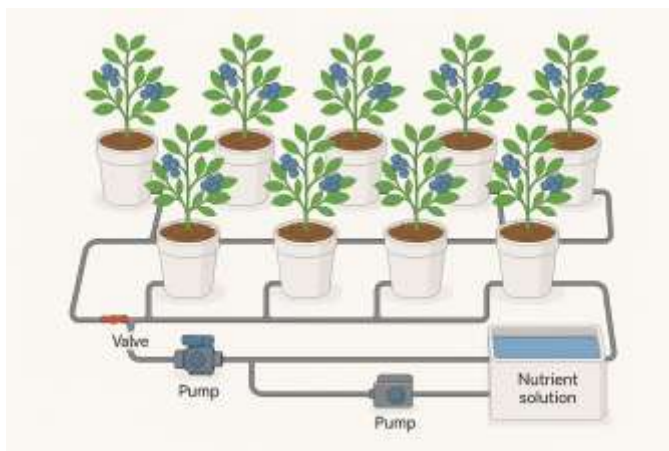


La elección del sistema hidropónico más adecuado es un factor crítico para garantizar el éxito en la producción de arándanos en ambientes controlados. Debido a las características particulares de su sistema radicular — extremadamente fino, superficial y sensible a la falta de oxígeno—, el arándano requiere sistemas que ofrezcan un equilibrio preciso entre aireación, retención de humedad y soporte estructural.

En base a la literatura científica disponible y a las experiencias comerciales más recientes, los sistemas hidropónicos más adecuados para el cultivo de arándanos son los que incorporan un medio sólido (sustrato), en contraste con sistemas de raíz desnuda como el NFT o DWC, que han mostrado limitaciones importantes para esta especie.

Sistemas más adecuados para arándanos

1. Cultivo en Contenedores con Sustrato



Actualmente, esta es la técnica más difundida y probada a nivel mundial para la producción de arándanos en hidroponía. El sistema consiste en el uso de macetas o contenedores individuales, generalmente de gran tamaño (mínimo 30-40 litros), donde se aloja un sustrato especializado que actúa como soporte físico y reserva de humedad.



- **Sustratos recomendados:**

Los materiales más utilizados son la fibra de coco de alta calidad, mezclas de turba con perlita, combinaciones con LECA (arcilla expandida) para mejorar la aireación, o mezclas específicas diseñadas para mantener un pH ácido (entre 4.5 y 5.5).

- **Ventajas principales:**

Permite un control preciso sobre la humedad y los nutrientes, protege el sistema radicular frente a fluctuaciones drásticas, y facilita el reemplazo o manejo individualizado de plantas cuando es necesario.

2. Sistema de Grow Bags (Bolsas de Cultivo)

Una variante moderna del cultivo en contenedor es el uso de grow bags: bolsas de polietileno o material geotextil rellenas de sustrato, dispuestas sobre bancales elevados o estructuras metálicas.



- **Ventajas:**
 - Reducción de costos iniciales en comparación con macetas tradicionales.
 - Mayor eficiencia en el manejo del espacio y en la distribución del drenaje.
 - Flexibilidad para adaptarse a diferentes configuraciones de invernadero.

2. Sistemas Avanzados Tipo NGS Adaptado

El New Growing System (NGS), tradicionalmente usado en cultivos como fresa, puede ser adaptado para arándanos mediante el uso de bolsas de cultivo multicapa rellenas de sustrato.

- **Aspectos clave:**

Aunque este sistema ofrece ventajas en términos de densidad de cultivo y optimización de espacio, es indispensable realizar ajustes para garantizar niveles óptimos de oxígeno en las raíces y evitar problemas de anegamiento. Su implementación requiere un nivel técnico más avanzado y un monitoreo constante del sistema.

Sistemas NO recomendados para arándanos

1. NFT (Nutrient Film Technique)

El NFT tradicional, donde las raíces crecen en una delgada película de solución nutritiva, no es apropiado para arándanos debido a la fragilidad de su sistema radicular. Las raíces sufren fácilmente estrés por falta de anclaje, deficiencia de oxígeno o fluctuaciones hídricas.

2. DWC (Deep Water Culture)

El cultivo en sistemas de agua profunda (DWC) tampoco resulta favorable, ya que el contacto prolongado de las raíces con agua puede provocar hipoxia, pudriciones y reducción significativa de la vitalidad de la planta.

Conclusiones sobre la selección de sistemas

Para la producción exitosa de arándanos en hidroponía en Panamá o en condiciones similares de clima tropical, los sistemas más recomendables son:

- Contenedores individuales con sustrato ácido.
- Grow bags de alta capacidad dispuestos en bancales elevados.
- Sistemas NGS adaptados cuidadosamente para mantener alta oxigenación radicular.

La selección debe hacerse en función de las condiciones climáticas locales, los recursos disponibles, el nivel técnico del proyecto y los objetivos de producción. Independientemente del sistema elegido, el énfasis debe mantenerse siempre en proteger y estimular el desarrollo del sistema radicular, ya que la salud de las raíces define directamente la productividad y calidad de los frutos.

Infraestructura y Equipamiento Necesario

El éxito de un cultivo hidropónico de arándanos en ambientes controlados no depende únicamente de la selección del sistema de producción, sino también de la infraestructura y equipamiento que permita mantener las condiciones óptimas de crecimiento de manera constante y precisa. A continuación se describen los principales componentes que deben considerarse para el diseño y operación de un proyecto exitoso.

Invernadero o Ambiente Controlado

El primer elemento fundamental es la estructura que proteja el cultivo de las inclemencias del clima tropical, minimice el impacto de plagas y enfermedades, y permita un control ambiental efectivo.

Tipo de estructura recomendada:

- Invernaderos tipo túnel alto o multitúnel, preferiblemente con techos altos (mínimo 4-5 metros) para facilitar la ventilación.
- Cubierta plástica térmica difusa que permita el paso de luz PAR (radiación fotosintéticamente activa) pero reduzca la radiación infrarroja excesiva.

Elementos adicionales esenciales:

- Mallas antiinsectos en entradas y ventanas.
- Pantallas de sombreado retráctiles (30-50% de sombra) para mitigar estrés térmico durante horas de alta radiación solar.
- Cooling pads y ventiladores para control evaporativo de la temperatura.

Sistema de Riego y Fertirrigación

Un sistema de riego altamente preciso es indispensable para el manejo de la humedad y la nutrición en hidroponía.

- Tipo de riego:
 - Riego por goteo localizado, con emisores autocompensantes de bajo caudal (1-2 L/h por gotero).

Componentes del sistema de fertirrigación:

- Tanques de preparación de soluciones nutritivas A y B.
- Bombas de inyección dosificadoras (fertilizantes líquidos).
- Mezclador automático de fertilizantes (fertimix).
- Filtros de malla o anillas para evitar obstrucciones.
- Válvulas de control por sectores para irrigación diferenciada.

Automatización:

- Programadores de riego por tiempos o volumen aplicado.
- Sistemas de monitoreo de pH, conductividad eléctrica (CE) y oxígeno disuelto en línea.

Sustrato y Contenedores

Contenedores recomendados:

- Macetas rígidas o grow bags de alta resistencia con capacidad mínima de 30 a 40 litros por planta.

Sustratos preferidos:

- Fibra de coco de alta calidad.
- Mezclas de turba con perlita.
- Incorporación parcial de LECA para mejorar la aireación radicular.

Consideraciones para el drenaje:

- Instalación de bancales elevados o estructuras de canalización que permitan recoger y recircular el drenaje si se implementa un sistema cerrado.

Equipos de Monitoreo Ambiental

Para mantener las condiciones óptimas de crecimiento, es esencial integrar un sistema de monitoreo ambiental continuo.

- Variables a monitorear:
 - Temperatura del aire y del sustrato.
 - Humedad relativa.
 - Radiación solar (luz PAR).
 - Concentración de CO₂ (opcional para optimizar la fotosíntesis en etapas de alta demanda).
- Equipos recomendados:
 - Estaciones meteorológicas de invernadero.
 - Sensores de humedad y temperatura del sustrato.
 - Monitores de pH y CE en drenaje y solución de riego.

Infraestructura de Manejo Postcosecha

El manejo postcosecha es un factor clave para preservar la calidad del fruto.

- Áreas recomendadas:

- Área de pre-enfriamiento inmediato después de la cosecha (idealmente cámaras de enfriamiento rápido a 1-2 °C).
- Espacios refrigerados de almacenamiento temporal.
- Áreas de empaque con condiciones higiénicas controladas.

Esta infraestructura y equipamiento básico proporcionan la base para establecer un cultivo hidropónico de arándanos eficiente, rentable y capaz de cumplir con los estándares de calidad exigidos en los mercados nacionales e internacionales.

Manejo Agronómico del cultivo

8.1 Propagación y Selección de Material Vegetal

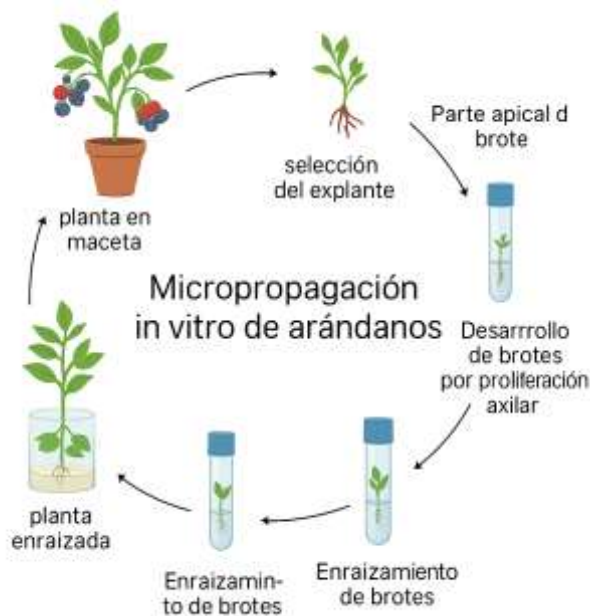
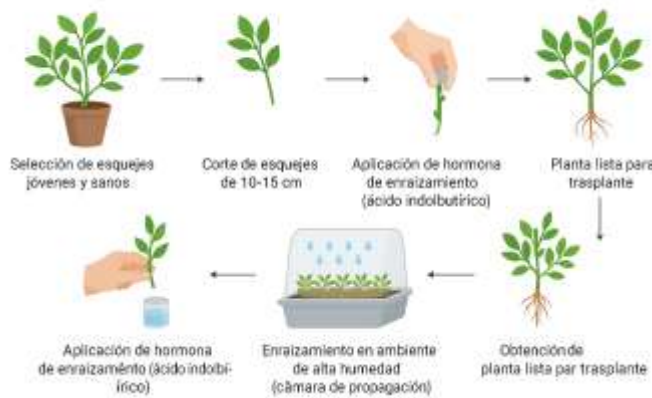
El establecimiento exitoso de un cultivo hidropónico de arándanos en ambientes controlados inicia con la correcta selección del material vegetal. Una planta sana, vigorosa y genéticamente uniforme es esencial para lograr una producción constante y de alta calidad. La propagación adecuada garantiza homogeneidad en el cultivo y un mejor aprovechamiento de los recursos tecnológicos. En la producción moderna de arándanos, se emplean diversos métodos de propagación, cada uno con aplicaciones específicas dependiendo de los objetivos del proyecto, el nivel tecnológico disponible y la escala de producción. A continuación, se describen las principales técnicas:

Métodos de propagación de arándanos



- **Propagación por semilla:** Utilizada principalmente en programas de mejoramiento genético, la siembra de semillas permite obtener nuevas combinaciones genéticas. Sin embargo, este método presenta alta variabilidad en las plantas obtenidas y un largo período hasta la entrada en producción, por lo que no se recomienda para proyectos comerciales hidropónicos.

Propagación de arándanos por esquejes



- **Propagación por esquejes:**
Es el método más utilizado en la producción comercial. Consiste en cortar segmentos jóvenes de ramas vigorosas, tratarlos con hormonas enraizantes (como ácido indolbutírico, IBA) y establecerlos en sustratos ligeros y aireados bajo condiciones controladas de temperatura y humedad. Este método permite obtener plantas uniformes, listas para el trasplante en un período de cuatro a seis meses.

- **Propagación in vitro (micropropagación):**
Esta técnica avanzada utiliza tejidos vegetales cultivados en medios estériles para multiplicar plantas a gran escala. Ofrece ventajas como alta uniformidad genética, ausencia de patógenos y la posibilidad de producir grandes cantidades de plantas en tiempos reducidos. Aunque implica un costo inicial mayor y la necesidad de aclimatación posterior, resulta ideal para proyectos tecnificados o destinados a la exportación.

Selección de plántulas para cultivo hidropónico

Para garantizar el éxito en un sistema hidropónico de arándanos, es fundamental utilizar plántulas certificadas y libres de patógenos. Las plántulas ideales deben mostrar un sistema radicular fibroso y bien desarrollado, adaptado a sustratos ácidos y con alta capacidad de absorción. Además, deben presentar un crecimiento vegetativo vigoroso, estructura uniforme y una respuesta adecuada a las condiciones de ambiente controlado.

La correcta elección y establecimiento de las plantas desde el inicio del proyecto permite maximizar los rendimientos, reducir riesgos fitosanitarios y asegurar la calidad de los frutos a lo largo del ciclo productivo.

8.2 Trasplante, Establecimiento y Formación de las Plantas

Una vez obtenidas plántulas vigorosas, ya sea por esquejes, micropropagación o cualquier otro método previamente descrito, el siguiente paso fundamental es su trasplante al sistema hidropónico definitivo. Esta etapa requiere especial atención, ya que define el éxito en el establecimiento del cultivo y marca el inicio del desarrollo vegetativo productivo.

Trasplante al sistema definitivo

El momento óptimo para realizar el trasplante es cuando la plántula presenta un sistema radicular bien desarrollado, con raíces blancas, sanas, visibles por la base del recipiente de propagación, y una parte aérea firme y estable. En condiciones normales, esto ocurre entre 4 a 6 meses luego de la propagación por esqueje, o tras 3 a 4 semanas de aclimatación en el caso de plantas obtenidas por micropropagación.

Antes del trasplante, es importante preparar el sustrato definitivo (fibra de coco, mezcla con LECA o turba-perlita) y asegurarse de que esté previamente humedecido y con pH ajustado entre 4.5 y 5.5. Se recomienda realizar el trasplante en horas frescas del día o bajo sombra, evitando el estrés térmico y la deshidratación.

El trasplante se realiza ubicando cuidadosamente la plántula en el centro de la maceta o bolsa de cultivo, asegurando un buen contacto entre las raíces y el sustrato. Se debe evitar comprimir demasiado el medio, para no afectar la oxigenación radicular. Inmediatamente después del trasplante, se aplica un primer riego con solución nutritiva diluida (aproximadamente al 50% de concentración), y se mantiene el área en condiciones de humedad moderada y luz difusa durante los primeros días.

Cuidados durante el establecimiento

Durante las dos primeras semanas posteriores al trasplante, la planta atraviesa una fase crítica de adaptación al nuevo entorno. Es esencial:

- Evitar encharcamientos que provoquen asfixia radicular.
- Mantener una humedad del sustrato constante pero no excesiva.
- Aplicar riegos cortos y frecuentes con soluciones de baja conductividad eléctrica (0.8–1.0 mS/cm).
- Proteger las plantas de radiación solar directa intensa mediante mallas de sombreo si es necesario.
- Realizar un monitoreo constante del desarrollo radicular, pH y drenaje.

Una vez que las plantas comienzan a emitir nuevos brotes, se considera que han superado la fase de establecimiento.

Formación inicial de las plantas

La formación de la planta de arándano es clave para su productividad futura. Durante los primeros 3 a 5 meses luego del trasplante, el objetivo agronómico es lograr una estructura equilibrada, con buen desarrollo de ramas principales, sin sobrecargar la planta con frutos en esta etapa.

Se recomienda realizar:

- Eliminación temprana de flores o botones florales durante el primer ciclo, para redirigir la energía al crecimiento vegetativo.
- Selección de ramas principales (entre 3 y 5) que formarán la base estructural de la planta.
- Eliminación de brotes débiles o mal orientados, especialmente los que crecen hacia el interior de la planta.
- Amarre o tutorado de ramas principales para favorecer una arquitectura abierta y aireada.

Una planta bien formada facilita el manejo sanitario, mejora la penetración de luz, reduce la incidencia de enfermedades y favorece un cuajado uniforme de frutos en las siguientes etapas del cultivo.

Consideraciones para Indoor Farming

En sistemas de producción en ambientes completamente cerrados o indoor farming, el proceso de trasplante y establecimiento requiere adaptaciones específicas. La ausencia de luz solar directa obliga a utilizar iluminación artificial de espectro completo (LED) desde el primer día del trasplante. Se recomienda mantener intensidades lumínicas moderadas durante la primera semana ($200\text{--}300\ \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) e incrementarlas gradualmente hasta alcanzar niveles óptimos de fotosíntesis ($>600\ \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$), según la variedad y etapa de desarrollo.

La temperatura del ambiente debe mantenerse en un rango de $20\text{--}24\ ^\circ\text{C}$ con humedad relativa entre 65 y 75 % para reducir el estrés en las plantas jóvenes. Es recomendable utilizar ventilación suave o circulación forzada para prevenir condensaciones excesivas y evitar problemas fúngicos.

En indoor farming, los ciclos de riego pueden ser más precisos, ya que no hay influencia de lluvias o variaciones externas. Sin embargo, esto también implica que cualquier error en el manejo del agua o de la solución nutritiva puede amplificarse. Por tanto, se aconseja usar sensores de humedad y automatización del riego desde las primeras etapas.

Finalmente, debido a que los sistemas indoor suelen estar diseñados para alta densidad de cultivo y múltiples niveles, es importante formar plantas compactas y bien estructuradas. Esto se logra mediante podas tempranas, manejo de luz direccional y aplicación cuidadosa de reguladores de crecimiento (si se permiten en el sistema de producción).

8.3 Poda y Manejo Fenológico del Arándano

El manejo de la estructura vegetal del arándano mediante podas estratégicas es clave para mantener la productividad, facilitar el control sanitario y asegurar una buena calidad de fruto. La poda también permite dirigir la energía de la planta hacia el desarrollo de brotes jóvenes y ramas fructíferas.

Tipos de poda

- **Poda de formación:**
Se realiza durante los primeros 6 a 12 meses del cultivo. Consiste en seleccionar 3 a 5 ramas principales bien distribuidas, eliminando brotes débiles o mal orientados. Su objetivo es establecer una arquitectura abierta que favorezca la ventilación y la penetración de luz.
- **Poda de mantenimiento:**
Se efectúa anualmente para renovar ramas envejecidas, eliminar madera muerta, y reducir densidad de follaje. Estimula la producción de nuevos brotes fértiles.
- **Poda de limpieza:**
Puede hacerse en cualquier momento. Se eliminan hojas o ramas secas, brotes adventicios y ramas cruzadas.
- **Poda de control de floración temprana:**
Durante el primer ciclo es recomendable retirar botones florales para que la planta concentre su energía en el crecimiento vegetativo.

Manejo fenológico

El ciclo del arándano se divide en cuatro fases principales: brotación, floración, cuajado y maduración. En sistemas controlados, estas etapas pueden adelantarse o sincronizarse mediante el control de luz, temperatura y fotoperiodo.

El monitoreo del desarrollo fenológico permite ajustar riegos, fertirrigación, y realizar intervenciones oportunas como deshojes o control de plagas. En sistemas indoor, la manipulación precisa del ambiente permite realizar hasta dos ciclos productivos al año, siempre que se respete un periodo de reposo relativo.

El monitoreo constante de la solución es esencial para ajustar las concentraciones de nutrientes y evitar acumulaciones o deficiencias.

a combinación de buenas prácticas agrícolas, monitoreo constante y el uso de biocontroladores permite minimizar la incidencia de problemas fitosanitarios sin comprometer la producción ni la seguridad del cultivo.

El uso del polvo de diatomeas se ha convertido en una alternativa efectiva dentro del manejo integrado de plagas y enfermedades en cultivos hidropónicos de fresas, debido a su capacidad de controlar insectos, reducir la humedad en el sustrato y limitar el desarrollo de hongos sin generar residuos tóxicos.

9. Gestión de Nutrición y Agua

En los sistemas hidropónicos de arándanos, el control preciso de la nutrición y el riego es una de las tareas más importantes para asegurar el desarrollo óptimo del cultivo. A diferencia del cultivo en suelo, donde existen ciertos amortiguadores naturales, en hidroponía todo lo que la planta necesita debe ser aportado de manera directa y controlada a través de la solución nutritiva.

Requerimientos nutricionales del arándano

El arándano (*Vaccinium spp.*) tiene requerimientos nutricionales específicos, condicionados por su fisiología radicular. Al carecer de pelos absorbentes, las raíces son más sensibles al estrés salino, a desequilibrios iónicos y a problemas de oxigenación. Además, se desarrollan mejor en medios ligeramente ácidos, lo cual obliga a mantener un pH ajustado y una solución nutritiva bien balanceada.

Las plantas jóvenes, en su etapa de establecimiento, requieren niveles moderados de nitrógeno, fósforo y calcio. En la fase vegetativa activa, aumenta la demanda de nitrógeno y magnesio, mientras que durante la floración y el cuajado del fruto es fundamental un buen aporte de potasio, fósforo y calcio. Los micronutrientes como hierro, zinc y manganeso son especialmente importantes en este cultivo y deben estar disponibles en formas quelatadas estables a pH bajos (4.5–5.5).

Formulación de la solución nutritiva

A continuación, se presenta una formulación estándar para 1 m³ de solución nutritiva destinada al cultivo hidropónico de arándanos en sustratos como fibra de coco, turba o mezclas con LE

Solución Nutritiva para Arándanos Hidropónicos (mg/L según etapa fenológica)

Compuesto químico	Establecimiento (trasplante – 4 semanas)	Crecimiento vegetativo	Floración y cuajado	Fructificación y engorde
Nitrato de calcio (Ca(NO ₃) ₂)	500 mg/L	600 mg/L	700 mg/L	700 mg/L
Nitrato de potasio (KNO ₃)	200 mg/L	350 mg/L	400 mg/L	500 mg/L

Fosfato monopotásico (KH ₂ PO ₄)	100 mg/L	150 mg/L	200 mg/L	250 mg/L
Sulfato de magnesio (MgSO ₄ ·7H ₂ O)	200 mg/L	250 mg/L	250 mg/L	300 mg/L
Quelato de hierro (Fe-EDDHA 6%)	8 mg/L	8 mg/L	8 mg/L	8 mg/L
Ácido bórico (H ₃ BO ₃)	1.5 mg/L	2 mg/L	2 mg/L	2 mg/L
Sulfato de zinc (ZnSO ₄ ·7H ₂ O)	1 mg/L	1 mg/L	1 mg/L	1 mg/L
Sulfato de manganeso (MnSO ₄ ·H ₂ O)	1 mg/L	1.5 mg/L	1.5 mg/L	1.5 mg/L
Sulfato de cobre (CuSO ₄ ·5H ₂ O)	0.2 mg/L	0.3 mg/L	0.3 mg/L	0.3 mg/L
Molibdato de sodio (Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O)	0.05 mg/L	0.1 mg/L	0.1 mg/L	0.1 mg/L

Parámetro	Establecimiento	Vegetativo	Floración / Cuajado	Fructificación
pH ideal	5.2 – 5.5	4.8 – 5.3	4.5 – 5.0	4.5 – 5.0
CE recomendada (mS/cm)	0.8 – 1.0	1.0 – 1.3	1.2 – 1.5	1.3 – 1.6
Frecuencia de riego	2 – 3 / día	3 – 4 / día	4 – 5 / día	5 – 6 / día
Oxígeno disuelto	≥ 6.0 mg/L	≥ 6.0 mg/L	≥ 6.5 mg/L	≥ 7.0 mg/L

Manejo del riego

El sistema de riego más adecuado para el cultivo hidropónico de arándanos es el riego por goteo, que permite la aplicación localizada y eficiente de la solución nutritiva. Este debe complementarse con un sistema de drenaje adecuado y monitoreo constante de pH y CE tanto en el ingreso como en el drenaje del sistema.

Frecuencia y volumen de riego

La frecuencia de riego dependerá del tipo de sustrato, las condiciones climáticas y la etapa del cultivo:

- Etapa de establecimiento (trasplante): 2 a 3 riegos cortos al día con baja CE (0.8–1.0 mS/cm).
- Etapa vegetativa activa: 3 a 5 riegos diarios, dependiendo de la temperatura y humedad ambiental.
- Etapa de fructificación: Aumentar la frecuencia a 4–6 veces por día, asegurando un buen drenaje (20–30%).
- Volumen aproximado diario por planta: 1.5 a 3.0 litros, según densidad, tamaño de la maceta y condiciones ambientales.

Consideraciones específicas para sistemas indoor

En sistemas de indoor farming, la transpiración de las plantas es menor debido a la ausencia de viento y radiación solar directa. Esto requiere ajustar la programación de riego con base en sensores de humedad en el sustrato y balanzas de peso de bandejas o macetas.

La recirculación de la solución nutritiva es viable siempre que se monitoreen regularmente el pH, CE y niveles de oxígeno. Se recomienda utilizar sistemas automatizados de fertirrigación y equipos de medición en línea, con alarmas ante desviaciones críticas.

Además, se debe evitar el calentamiento excesivo de la solución en los tanques. Mantener el agua de riego entre 18 y 22 °C favorece la absorción de nutrientes y la salud radicular. El uso de enfriadores de agua o circulación por zonas protegidas puede ser necesario en climas cálidos.

10. Cosecha y Manejo Postcosecha

El momento de la cosecha representa el cierre del ciclo productivo y es determinante para asegurar la calidad final del fruto, su vida útil, y la aceptación en el mercado. En sistemas hidropónicos y ambientes controlados, los arándanos pueden alcanzar un alto estándar comercial, pero esto solo se concreta si el proceso de recolección y postcosecha se realiza cuidadosamente.

10.1 Cosecha

Momento óptimo

El arándano debe cosecharse cuando el fruto alcanza su color azul intenso homogéneo, sin restos de tonos rojizos o verdes. En esta etapa, el contenido de azúcares (°Brix) está en su punto máximo, la firmeza es ideal, y el desprendimiento del pedúnculo se realiza con facilidad sin dañar el fruto.

- En sistemas bajo ambiente controlado, la cosecha puede iniciarse entre 4 a 6 meses después del trasplante, dependiendo de la variedad y el manejo de luz y temperatura.
- Es recomendable cosechar en las primeras horas de la mañana, cuando la temperatura del fruto es más baja y hay menor riesgo de deterioro.

Técnica de recolección

- Se debe recolectar manualmente, sujetando con cuidado el fruto con los dedos y girándolo suavemente.
- Evitar dañar el pedicelo o ejercer presión sobre el fruto, ya que esto afecta directamente su vida útil.
- Utilizar guantes limpios o manos higienizadas, y colocar los frutos directamente en envases con fondo acolchado para evitar magulladuras.

Frecuencia de cosecha

Dado que los frutos no maduran de forma totalmente sincronizada, se recomienda realizar cosechas cada 2 a 3 días durante el pico de producción, para asegurar uniformidad y calidad en el lote recolectado.

10.2 Manejo Postcosecha

Preenfriamiento

El preenfriamiento rápido es crucial. Idealmente, los frutos deben ser enfriados a 1–2 °C dentro de las primeras 4 horas posteriores a la cosecha. Este paso reduce la tasa respiratoria del fruto, retrasa la senescencia y previene el desarrollo de hongos.

- Se puede utilizar túneles de enfriamiento forzado o cámaras frías con buena circulación de aire.
- No debe usarse agua para enfriar a menos que se aplique sanitización adecuada, ya que la humedad libre favorece la proliferación de hongos.

Clasificación y empaque

Una vez enfriado, el fruto debe clasificarse visualmente para descartar aquellos que presenten defectos como:

- Golpes o magulladuras visibles
- Presencia de hongos (*Botrytis*)
- Tamaño o color no uniforme

Los frutos seleccionados deben empacarse en recipientes ventilados (clamshells o bandejas) y con etiqueta de trazabilidad si se destina a mercados exigentes.

Almacenamiento

- Temperatura óptima: 0.5 a 2 °C
- Humedad relativa: 90–95 %
- Vida útil esperada en condiciones óptimas: 14 a 21 días

La atmósfera modificada o controlada puede extender la conservación, pero solo es recomendable en exportaciones de larga distancia. Se debe evitar el uso de materiales plásticos que generen condensación.

11. Optimización y Escalabilidad del Cultivo

Una vez establecido el sistema productivo de arándanos en hidroponía, se puede avanzar hacia la optimización del rendimiento, la reducción de costos y la planificación de la expansión del proyecto a mayor escala.

Monitoreo técnico y toma de decisiones

La base de un cultivo optimizado es el monitoreo constante de variables críticas. Para lograrlo se recomienda:

- Registrar diariamente el pH, CE, temperatura del agua y oxígeno disuelto.
- Usar sensores de humedad en sustrato y estaciones ambientales para correlacionar clima y consumo hídrico.
- Implementar bitácoras agronómicas donde se documenten podas, fertirrigación, incidencia de plagas y rendimiento.

Estos registros permiten tomar decisiones informadas, ajustar riegos, mejorar formulaciones nutritivas y prevenir problemas antes de que impacten la productividad.

Tecnología y automatización

Para aumentar eficiencia y reducir errores humanos, se recomienda automatizar al menos:

- La mezcla y dosificación de fertilizantes (fertimix).
- El encendido y apagado de luces y ventilación (en indoor).
- El riego basado en cronogramas o sensores.

El uso de softwares de agricultura de precisión o plataformas de manejo técnico también puede integrarse según el nivel del proyecto.

Producción anual y ciclos escalonados

En ambientes controlados es posible producir arándanos fuera de época, lo que abre ventanas comerciales estratégicas. También se puede escalonar la producción dividiendo lotes según su edad o fase, permitiendo cosechas continuas durante todo el año.

En sistemas indoor, se pueden lograr hasta dos ciclos productivos completos por año si se gestiona bien la iluminación, el fotoperiodo y la fertilización.

Escalabilidad

Para escalar el sistema, se debe considerar:

- Disponibilidad de energía, agua y logística para ampliar la infraestructura.
- Capacitación del personal técnico y operario.
- Planificación de la demanda: producción vs. capacidad de poscosecha y comercialización.
- Costos iniciales de expansión: nuevas unidades, clonado del sistema de fertirriego, ampliación del sistema eléctrico.

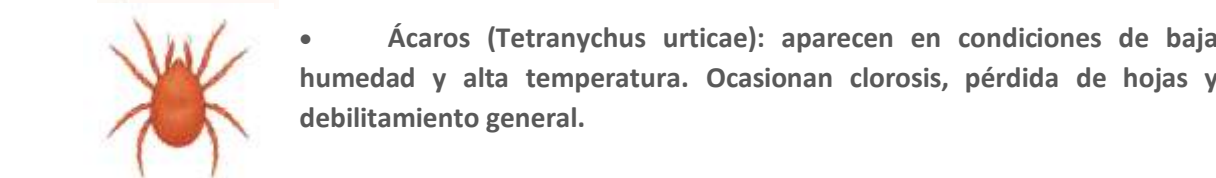
Una expansión bien planificada puede permitir la incorporación de nuevas variedades, exportación o alianzas comerciales más sólidas.

En los cultivos de arándanos en sistemas hidropónicos, especialmente bajo ambientes controlados o indoor, el riesgo de infestaciones es más manejable en comparación con el cultivo a campo abierto. Sin embargo, el carácter cerrado y la alta densidad de las plantaciones generan condiciones propicias para brotes rápidos si no se implementa una estrategia de control adecuada. Por ello, se recomienda adoptar un enfoque de Manejo Integrado de Plagas (MIP) basado en prevención, monitoreo y control biológico.

Las plagas más comunes en cultivos de arándano bajo ambiente protegido incluyen:



- **Trips (Frankliniella spp.):** atacan flores y frutos jóvenes, causando manchas plateadas y deformaciones.





- Mosca blanca (*Bemisia tabaci*): excreta melaza que favorece la aparición de fumagina. También actúa como vector de virus.



- Escamas y cochinillas: se establecen en tallos y hojas, debilitando la planta y favoreciendo infecciones secundarias.



- Minadores de hoja y larvas masticadoras: dependiendo de la zona geográfica, pueden representar un problema puntual.

Estrategias de manejo integrado

1. Prevención y diseño del sistema

- Usar plántulas certificadas y libres de plagas.
- Instalar mallas antiinsectos en entradas de aire.
- Mantener una buena ventilación y limpieza de la infraestructura.
- Evitar acumulación de restos vegetales en el área de producción.

2. Monitoreo sistemático

- Revisión visual periódica de hojas nuevas, flores y frutos.
- Colocación de trampas adhesivas cromáticas (azules para trips, amarillas para mosca blanca).
- Registro del umbral de daño económico y tendencia de aparición.

3. Control biológico y bioinsumos

- Introducción preventiva o curativa de enemigos naturales:
 - *Amblyseius swirskii* y *Neoseiulus californicus* (ácaros depredadores)
 - *Phytoseiulus persimilis* (para arañita roja)

- *Encarsia formosa* (para mosca blanca)

Uso de extractos botánicos como neem, canela o ajo.

- Aplicaciones de hongos entomopatógenos (*Beauveria bassiana*, *Metarhizium anisopliae*) en etapas vegetativas.

4. Aplicación racional de insumos convencionales

- Si se requiere el uso de insecticidas, estos deben:
 - Tener bajo impacto en organismos benéficos.
 - Utilizarse rotando modos de acción para evitar resistencia.
 - Aplicarse de manera dirigida, en dosis técnicas y con intervalos seguros.

5. Condiciones ambientales adecuadas

- Mantener una humedad relativa superior al 65 % y temperatura estable entre 20 y 26 °C reduce el estrés de la planta y dificulta la proliferación de algunas plagas.
- Controlar la iluminación y evitar puntos ciegos donde se acumule materia orgánica o humedad.

La implementación de un programa integral de monitoreo y control con enfoque preventivo permite mantener poblaciones de plagas bajo niveles no perjudiciales, reduciendo el uso de insumos químicos y contribuyendo a la sostenibilidad del sistema productivo.



CIPAC AIP

Centro de Investigación y Producción en
Ambiente Controlado AIP

