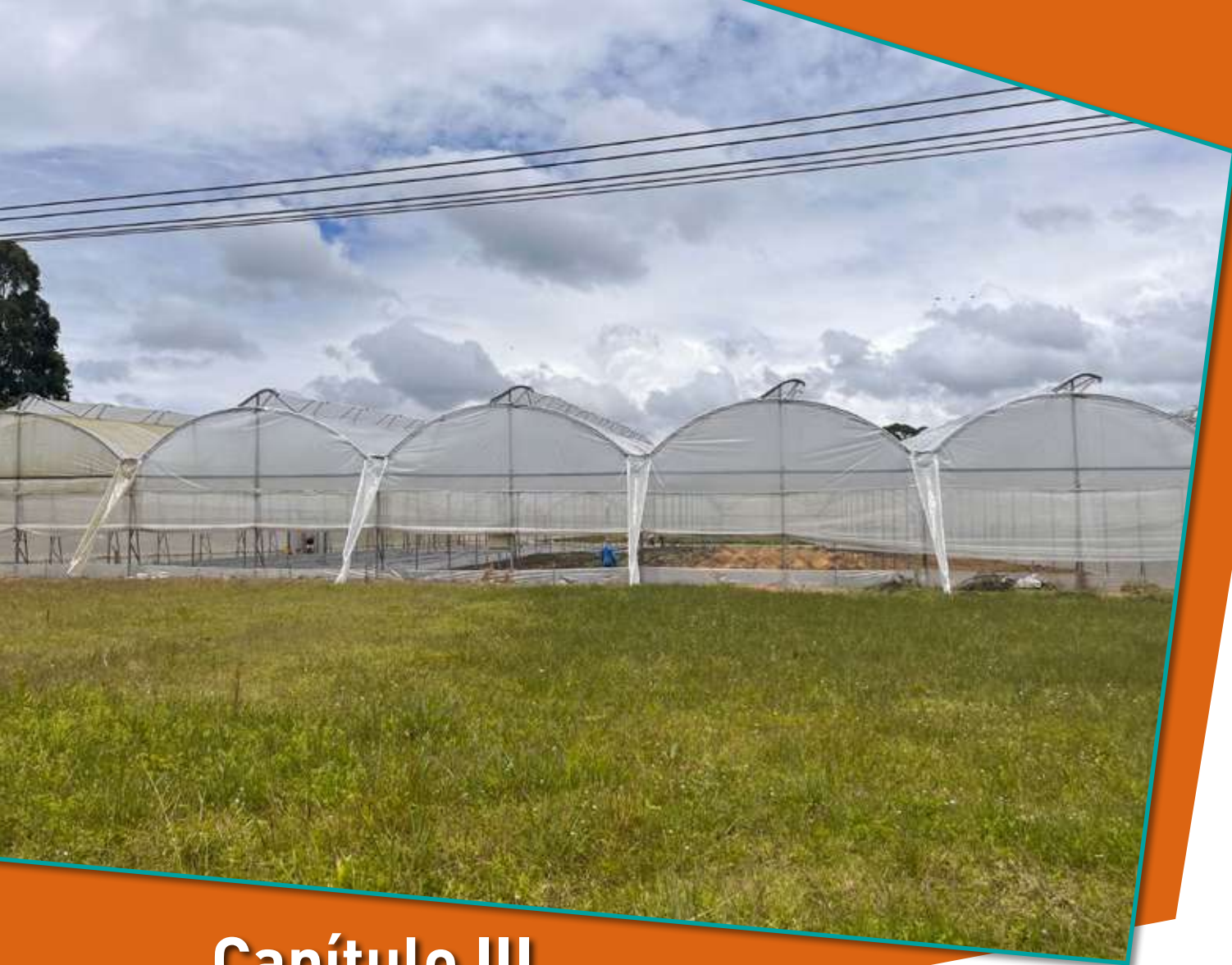




Capítulo III

48

Criterios para la selección de la ubicación adecuada para la construcción de una estructura de invernadero

Edwin Andrés Villagrán Munar
Iván Edilberto Chacón Garzón
Linda Gómez Arias

Introducción

El área cultivada bajo estructuras de agricultura protegida a nivel mundial ha aumentado notablemente en las últimas décadas. En la actualidad, existen aproximadamente 6 millones de hectáreas cultivadas bajo estructuras de diferente nivel tecnológico y enfocadas en la producción de frutas, hortalizas, flores, y plantas aromáticas y medicinales (Baeza et al., 2020). El cultivo bajo condiciones protegidas o bajo invernadero se establece con el fin de generar unas condiciones de microclima óptimas para el crecimiento y desarrollo de las plantas. Por lo anterior, es posible intensificar la producción agrícola y obtener un mayor rendimiento en los cultivos respecto a la producción a campo abierto (Sánchez-Molina et al., 2017).

Uno de los factores clave del éxito en la producción bajo cubierta rentable y sostenible es la selección de la ubicación del invernadero (Castilla, 2013). Sin duda alguna, el sitio seleccionado influirá en la cantidad y calidad de la producción, así como en la rentabilidad obtenida de la venta de los productos en los mercados específicos (Baudoin et al., 2013). Por otro lado, el costo y la calidad de los productos finales obtenidos en el invernadero dependerán en gran medida de las condiciones de clima local dominantes en el sitio o región seleccionada. Asimismo, estas condiciones de clima local determinarán el grado de inversión que se debe realizar en la construcción de la infraestructura, tanto para el nivel tecnológico del invernadero como para los equipamientos de control necesarios en la gestión microclimática (Castilla & Hernández, 2005).

En este capítulo, se incluyen algunas recomendaciones generales para la selección del sitio óptimo para la construcción de un invernadero o de cualquier otro tipo de estructura de agricultura protegida.

Estrategias de producción en invernaderos

En el momento que decide incursionar en la agricultura protegida como estrategia de producción alternativa respecto a la de campo abierto, un productor o un empresario del sector agrícola debe definir los siguientes aspectos: i) qué tipo de productos agrícolas se producirán en el interior del invernadero y ii) cuáles serán los mercados objetivo de los productos cosechados. Lo anterior determinará en cierta medida el tipo de infraestructura que se debe construir, lo que a su vez determinará si el productor debe enfocarse en el control microclimático activo o en el pasivo (Castilla & Hernández, 2005).

Los métodos pasivos de climatización predominan a nivel mundial, ya que son estrategias de bajo costo, muy asociadas a invernaderos de baja tecnología (Villagrán & Bojacá, 2020). Este tipo de manejo microclimático se enfoca principalmente en la ventilación natural de los invernaderos como herramienta de control para regular la temperatura, la humedad relativa y el nivel de CO_2 (Baeza, 2007). Sin embargo, este tipo de manejo es altamente dependiente de las condiciones climáticas locales y de la adaptación de las plantas al microclima generado, por lo tanto, en algunas regiones la producción agrícola queda restringida a unos meses específicos del año (Teitel et al., 2011).

Por el contrario, los métodos de climatización activa se asocian a invernaderos de alta o mediana tecnología, con los que se busca optimizar el microclima generado en el interior, con el fin de brindar a las plantas un ambiente con condiciones óptimas para su crecimiento y desarrollo. Así, este tipo de control de clima requiere de equipos robustos y de la energía necesaria para el acondicionamiento climático. El tipo de control de clima seleccionado, por lo tanto, estará estrechamente relacionado con la competitividad y la calidad comercial de los productos que exige el mercado objetivo (Castilla, 2013).

Microclima generado

La construcción de un invernadero o de una estructura de agricultura protegida permite generar un microclima en el aire circundante al cultivo. La modificación de las condiciones de microclima ocurre por efecto invernadero debido a la radiación solar que incide en el interior de la estructura (Villagrán et al., 2020). Asimismo, el microclima es modificado por la dinámica de los patrones de flujo de aire que se movilizan por vía de convección libre o forzada, al tiempo que las relaciones de transferencia de calor y de masa que ocurren entre el aire y las plantas de cultivo son determinantes en la generación del microclima (Majdoubi et al., 2016) (figura 13).

La finalidad de un invernadero es proveer a las plantas de las condiciones microclimáticas óptimas para garantizar su adecuado crecimiento y desarrollo, además de acelerar los ciclos de cultivo y obtener altos rendimientos (Flores-Velázquez, 2010). Por otra parte, un invernadero puede brindar al productor la posibilidad de alcanzar un grado de gestión mediante el cual sea posible modificar las condiciones microclimáticas del invernadero, hasta lograr llevarlas a los niveles adecuados para las especies cultivadas (Villagrán et al., 2020).

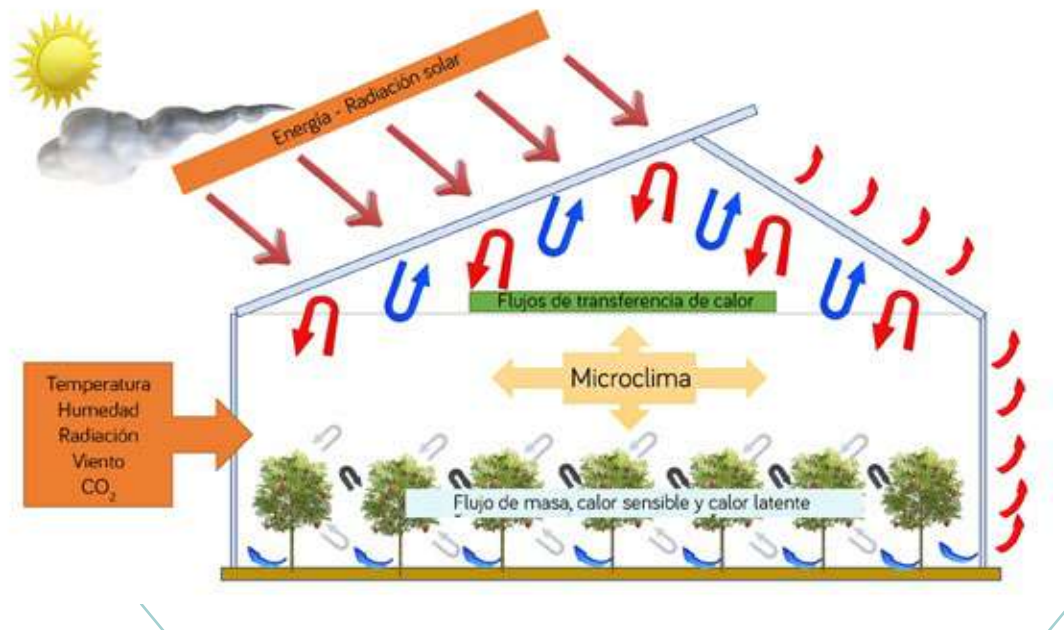


Figura 13. Balances de masa y energía que ocurren en un invernadero.

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con lo anterior, se debe mencionar que las principales variables microclimáticas a controlar en el interior de un invernadero son la temperatura ambiental y la temperatura del suelo y de la hoja, dependientes de la temperatura ambiental, la humedad relativa, el déficit de presión de vapor (DPV), el nivel de radiación solar y de radiación fotosintéticamente activa (PAR), y la concentración de CO₂ (Montero et al., 2016). Por lo tanto, el control y la definición de los rangos en que estas variables deben operar dependerán en gran medida del tipo de especie cultivada que se tenga en el invernadero.

En regiones como Colombia, de acuerdo con sus condiciones climáticas, sociales y económicas, lo ideal es lograr la gestión del microclima a través de métodos pasivos que no requieran de grandes inversiones y consumos energéticos. Lo anterior promueve, sin duda, el desarrollo de sistemas productivos bajo agricultura protegida asequibles y rentables para los agricultores. Por último, en el caso específico de que se requieran equipos de acondicionamiento climático, se recomienda al productor hacer un análisis económico previo a la inversión inicial, con el fin de determinar la rentabilidad del sistema productivo.

Ubicación del invernadero

Topografía

La topografía del terreno donde se construya el invernadero debe tener, preferiblemente, unas pendientes longitudinales y transversales inferiores al 2%. Los sitios con mayor pendiente requerirán de labores de nivelación de terreno, que aumentarán los costos de construcción de la estructura. Por otro lado, en países como Colombia, donde predominan los terrenos dedicados a la producción agrícola en zonas de ladera, es posible construir invernaderos en terrenos con pendiente. Sin embargo, la recomendación, en estos casos específicos, es analizar el sentido de movimiento de los vientos, el sentido en que cae la lluvia y las curvas de nivel de los terrenos, todo esto con el fin de garantizar buenas tasas de renovación de aire, un microclima uniforme y adecuado, y una apropiada evacuación del agua de lluvia (Villagrán et al., 2021). Por último, no es recomendable que los productores establezcan los invernaderos en terrenos con áreas significativamente hondonadas, ya que esta tipología de terrenos dificulta la gestión microclimática de invernadero, las labores de riego y otras actividades asociadas al manejo agronómico de los cultivos (figura 14).

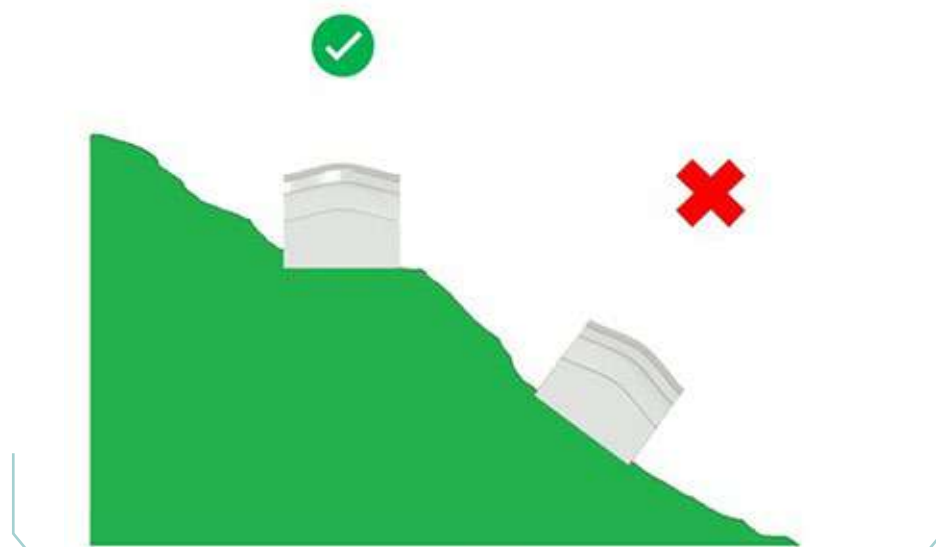


Figura 14. Topografía adecuada para establecer un invernadero.

Fuente: Elaboración propia

Clima

La sostenibilidad de un cultivo bajo invernadero dependerá directamente de las condiciones climáticas del sitio seleccionado para la construcción de la estructura. Por lo tanto, es necesario que, previamente a la construcción del invernadero, se analicen los valores de las variables meteorológicas de temperatura, humedad relativa, radiación solar, velocidad y dirección del viento. Estas, en conjunto, sumadas a la concentración de CO_2 , determinarán las condiciones de microclima generadas en el interior del invernadero (Molina-Aiz et al., 2005; Sase, 2006) (figura 15).

En el caso de los productos hortofrutícolas, que son las especies más cultivadas bajo cubierta a nivel mundial, entre las que se destacan productos como tomate, pimentón, pepino, lechuga, melón y sandía, es recomendable seleccionar regiones donde la temperatura media oscile entre 17 y 22 °C, la temperatura máxima no supere los 32 °C y la temperatura mínima no se encuentre por debajo de 16 °C. Asimismo, el valor medio de la humedad relativa debe ser cercano al 70 % y la radiación solar mínima debe ser de 2,34 kWh/m², con horas de luz superiores a seis horas al día (FAO, 1988).

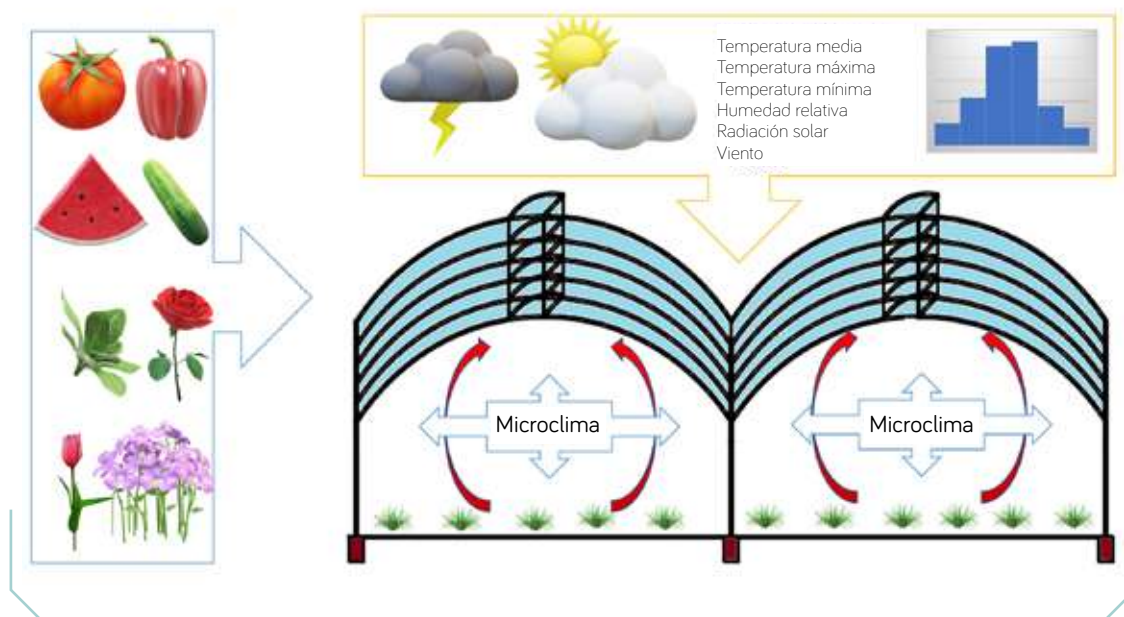


Figura 15. Factores de clima que inciden en la producción bajo invernadero.

Fuente: Elaboración propia

En el caso de los productos ornamentales, que se comercializan principalmente en el mercado internacional y entre los que se destacan especies como rosa, clavel y crisantemo (Villagrán & Bojacá, 2019b), es recomendable buscar regiones donde la temperatura media se encuentre entre 14 y 17 °C, con valores de temperatura máxima de 25 °C y temperaturas mínimas de 8 °C. En el caso de la humedad relativa, esta debe tener un valor medio de 70 a 75 %, con valores mínimos de 60 % y máximos de 90 %. En términos de luminosidad, se requieren 11 horas de luz y regiones con vientos entre 1,5 y 3,0 m/s, lo cual promueve mayores tasas de ventilación y, por lo tanto, una mejor gestión del microclima (Villagrán & Bojacá, 2019a). Se recomienda que, antes de seleccionar la región donde se construirá el invernadero, el productor haga un análisis inicial de las series históricas de clima, las cuales pueden estar disponibles en las bases de datos correspondientes a las estaciones meteorológicas del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam), o de redes de meteorología privadas que puedan facilitar esta información, tales como Canal Clima.

Características del suelo

El suelo o sustrato que se empleará para el establecimiento de los sistemas productivos, bien sea en macetas, bandejas germinadoras o directamente en el suelo, debe cumplir con las propiedades físicas, químicas y microbiológicas adecuadas para la producción agrícola que se desea establecer (figura 16). Si por algún motivo estas características no se cumplen, es recomendable establecer prácticas presiembra de acondicionamiento, con el fin de mejorar la calidad del suelo, ya que de esta dependerán en gran medida la productividad y la sanidad de los cultivos. Con la implementación de prácticas de manejo del suelo se busca mejorar la estabilidad estructural, la infiltración, la retención de humedad, y la disponibilidad de agua y fertilizantes para las plantas (Manik et al., 2019).

Asimismo, si el sistema productivo se va a establecer bajo sistemas de producción de cultivo sin suelo, ya sea con el uso de contenedores para sustratos inertes, hidroponía o aeroponía, se recomienda que el terreno donde se construya el invernadero tenga las características físicas mínimas que garanticen la estabilidad y la duración en el tiempo de las estructuras de soporte para el establecimiento y desarrollo del cultivo. Las técnicas de cultivo sin suelo permiten optimizar el uso del agua y de los fertilizantes, mejorando de esta forma la disponibilidad de nutrientes para el crecimiento de las plantas y, por ende, su rendimiento productivo. Del mismo modo, esta práctica permite que se desarrolle la agricultura en regiones donde el suelo no reúne las características mínimas para la producción agrícola, debido a problemas sanitarios o de degradación física y química (Fernández, 1994).

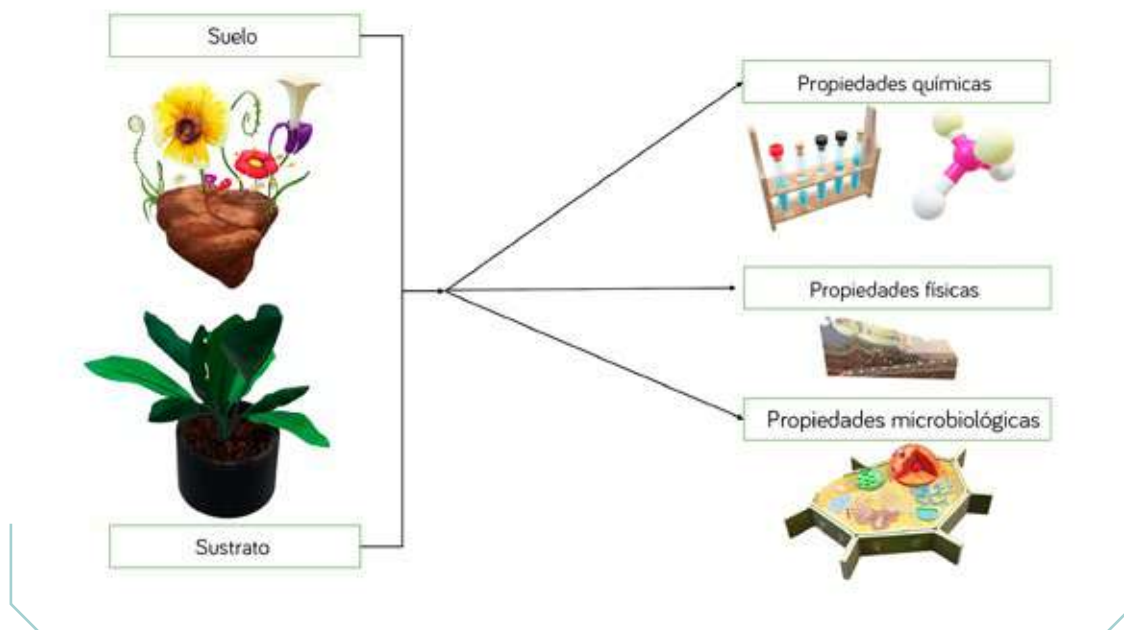


Figura 16. Características de suelos y sustratos relevantes para la producción agrícola bajo invernadero.

Fuente: Elaboración propia

Disponibilidad de agua para labores de riego

El sitio seleccionado también deberá tener disponibilidad de agua para fines de riego. El agua puede venir de una fuente superficial o subterránea, y se debe garantizar la cantidad necesaria para satisfacer los requerimientos hídricos de los cultivos. Asimismo, es importante que el recurso sea de fácil aprovechamiento y pueda almacenarse a nivel finca (Bojacá et al., 2017) (figura 17). Por lo tanto, es indispensable que el tipo de agua que se utiliza presente una calidad mínima para fines de irrigación y fertirrigación, con el fin de evitar problemas de salinidad en los suelos de los sistemas productivos que son establecidos directamente sobre el terreno, o problemas de toxicidad en las plantas y productos de cultivo.

La calidad del recurso hídrico en la agricultura bajo invernadero es un componente muy importante, ya que garantiza o limita los altos rendimientos de los cultivos. Por lo tanto, es recomendable realizar análisis de calidad del agua con los que se determinen, como mínimo, las siguientes características: sólidos disueltos totales, concentración de sales disueltas, presencia relativa de sodio, nivel de pH, contenido de bicarbonatos y carbonatos, y, por último, la

presencia de manganeso, hierro, boro y cloro. Los elementos anteriormente mencionados determinan el balance final de nutrientes que debe tener la solución nutritiva que se suministrará a las plantas mediante el agua de riego. Asimismo, estas características determinarán las labores de filtrado y acondicionamiento (desalinización, corrección del pH, acidificación, adición de bicarbonatos, control microbiológico) que se deben realizar, con el fin de prevenir taponamientos y malos funcionamientos de los sistemas de riego y fertirriego (Gómez et al., 2015). En la tabla 10, se incluyen algunas características relevantes que se deben tener en cuenta en el agua usada para riego.

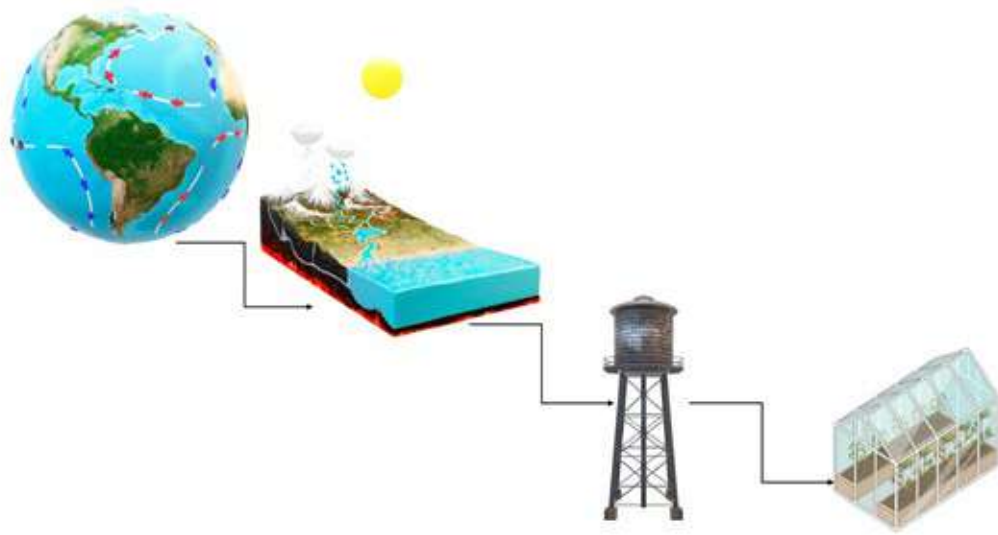


Tabla 10. Características relevantes en el agua usada para riego

Característica	Recomendación
Fuente de agua.	Puede ser una fuente superficial o subterránea. Es importante que, antes de ser usada en riego, se realice un análisis en un laboratorio certificado, para determinar la calidad física, química y microbiológica del agua. De no ser posible realizar un análisis en el laboratorio, por lo menos debe hacerse en campo un análisis simplificado utilizando instrumentos portátiles, como el conductímetro y medidor de pH.
Sistemas de filtrado.	Los resultados del análisis de calidad de agua permitirán establecer los tipos de filtros de agua que se deben implementar en el sistema de riego y los tratamientos adicionales que deban realizarse para acondicionar el agua para tal fin. Todo esto permitirá realizar las actividades de riego y fertirriego sin poner en riesgo el crecimiento y desarrollo de las plantas, y el buen funcionamiento de los sistemas de irrigación.
Nivel de pH.	El nivel de pH óptimo del agua para riego debe estar entre 6,5 y 7,5. Incluso, es posible que aguas con niveles de pH entre 6,0 y 8,5 puedan ser usadas en actividades de riego. Sin embargo, nunca se debe regar con aguas con niveles de pH inferiores a 5,5 o superiores a 8,5.
Nivel de alcalinidad.	El rango de alcalinidad óptimo en agua para riego debe estar entre 0,75 y 2,6 meq/l.
Nivel de salinidad.	El nivel de salinidad del agua se mide indirectamente mediante la determinación de la conductividad eléctrica (CE). Los niveles óptimos de CE en el agua deben ser inferiores a 0,75 dS/m, aunque en algunos casos es posible usar aguas para riego con niveles de CE hasta máximo 2,0 dS/m.

Fuente: elaboración propia

Drenaje

Las condiciones de drenaje del sitio seleccionado deben ser óptimas, con el fin de evitar problemas de anegamiento en el área de los cultivos, así como para garantizar la estabilidad estructural de la cimentación y, por ende, de la estructura del invernadero. Por lo tanto, es importante que en regiones de alta pluviosidad se tengan sistemas de captación de agua y drenajes parcelarios que permitan evacuar y almacenar el agua lluvia. Asimismo, se deben evitar regiones donde los niveles freáticos sean excesivamente altos o superficiales.

Polución

En el caso de invernaderos que se construyen en zonas rurales, donde predominan las vías terciarias que no cuentan con capa asfáltica, se debe seleccionar una zona alejada de la carretera, con el fin de limitar la caída de polvo y suciedad sobre el plástico de cubierta. Si lo anterior no es posible, debido a disponibilidad de terreno en la finca, se recomienda seleccionar una película plástica autolimpiable o repelente al polvo. Esto permitirá mantener niveles adecuados de transmisión de radiación solar al interior del invernadero, lo que

busca no limitar procesos fotosintéticos de las plantas (Appelbaum & Aro-nescu, 2020). Asimismo, se recomienda construir el invernadero en un área donde no existan árboles de gran tamaño que puedan generar sombras en el interior de este o caídas de ramas o semillas que provoquen daños sobre la cubierta plástica y la estructura (figura 18).

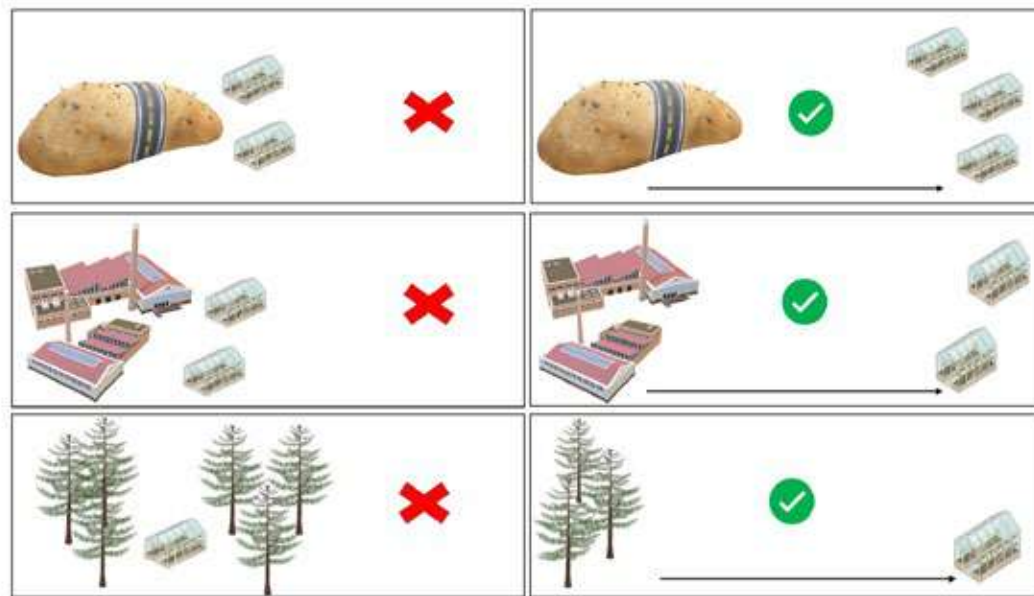


Figura 18. Ubicación del invernadero respecto a elementos que puedan generar polución.

Fuente: Elaboración propia

Por el contrario, en zonas urbanas y periurbanas donde coexisten fábricas dedicadas a labores industriales o de procesamiento de alimentos junto a invernaderos dedicados a la producción agrícola, se recomienda tener en cuenta el tipo de polución que se pueda generar y su afectación sobre el material de cubierta, con el fin de seleccionar el tipo de cubierta más adecuada o planificar labores de mantenimiento preventivo (Baudoin et al., 2013).

Espacio disponible

Idealmente, cuando se proyecta la construcción del primer invernadero, se debe tener en cuenta la planificación de la distribución de la finca. Esto permitirá determinar: i) áreas para construcción de invernaderos futuros; ii) áreas para construcción de reservorios de almacenamiento de agua y construcción de cabezales de riego; iii) construcción de carreteables y edificaciones para recepción de insumos, labores de poscosecha y almacenamiento, y, por último, iv) áreas para construcción de edificaciones administrativas.

Orientación

En Colombia y en países de la región intertropical, con unas condiciones de luminosidad medias aproximadas de 12 horas al día durante todo el año, el factor más relevante para seleccionar la ubicación del invernadero es la dirección del viento dominante. Por lo tanto, el invernadero debe disponer de sus áreas de ventilación en sentido perpendicular a la dirección de los vientos dominantes, lo que permite maximizar el efecto de gestión climática obtenido mediante ventilación natural (figura 19).



Figura 19. Orientación correcta para invernaderos en zonas tropicales.

Fuente: Elaboración propia

Infraestructura

Se recomienda que el área donde se construya el invernadero o clúster de invernaderos sea una zona donde existan vías de comunicación, preferiblemente de fácil acceso, y transitables tanto en épocas secas como en épocas de lluvia. Asimismo, debe tener disponibilidad de servicio de energía eléctrica, agua potable, gas natural e internet, ya que cada uno de estos servicios puede ser relevante para la operación de la explotación agrícola (Baudoin et al., 2013).

Conclusiones

La selección del lugar más adecuado para la construcción de un invernadero es, sin duda, una de las primeras decisiones que van a influir en la sostenibilidad del sistema productivo propuesto. El lugar específico seleccionado tendrá factores clave para la producción, como el clima, el tipo de suelo y el agua, que, sin lugar a dudas, determinarán el nivel tecnológico de la infraestructura seleccionada y, por lo tanto, los rendimientos finales que presenten los cultivos, tanto en calidad como en cantidad. Asimismo, el lugar seleccionado también determinará las labores de poscosecha y comercialización que se deben desarrollar para disponer los productos y darles valor agregado en los mercados objetivo. Finalmente, el sitio seleccionado será un factor clave al momento de analizar la viabilidad económica, el nivel tecnológico y el grado de rentabilidad que se busca generar con el sistema productivo.

Referencias

- Appelbaum, J., & Aronescu, A. (2020). Distribution of Solar Radiation on Greenhouse Convex Roof-top. *Sustainability*, 12(17), 7197.
- Baeza, E. (2007). *Optimización del diseño de los sistemas de ventilación en invernaderos tipo parral*. Universidad de Almería.
- Baeza, E., Hemming, S., & Stanghellini, C. (2020). Materials with switchable radiometric properties: could they become the perfect greenhouse cover? *Biosystems Engineering*, 193, 157-173. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.02.012>
- Baudoin, W., Nono-Womdim, R., Lutaladio, N., Hodder, A., Castilla, N., Leonardi, C., Pascale, S. De, & Qaryouti, M. (2013). *Good agricultural practices for greenhouse vegetable crops: principles for Mediterranean climate areas*. In *Good Agricultural Practices for greenhouse vegetable crops* [FAO plant production and protection paper 217].
- Bojacá, C. R., Villagrán, E. A., Gil, R., & Franco, H. (2017). *El riego y la fertilización del cultivo del tomate*. Universidad Jorge Tadeo Lozano.

- Castilla, N. (2013). *Greenhouse technology and management*. Cabi.
- Castilla, N., & Hernández, J. (2005). The plastic greenhouse industry of Spain. *Chronica Horticulturae*, 45(3), 15-20.
- Fernández, M. M. (1994). *Suelo y medio ambiente en invernaderos*. Junta de Andalucía; Consejería de Agricultura y Pesca.
- Flores-Velázquez, J. (2010). *Análisis del clima en los principales modelos de invernaderos en México (malla sombra, multitúnel y baticenital) mediante la técnica del cfd*. Universidad de Almería.
- Food and Agriculture Organization [FAO]. (1988). *Cultures protégées en climat méditerranéen*. FAO.
- Gómez, J. C., Muñoz, R. B., & Rodríguez, M. de L. H. (2015). Calidad del agua para riego en la agricultura protegida en Tlaxcala. *Ingeniería*, 19(1), 39-50.
- Majdoubi, H., Boulard, T., Fatnassi, H., Senhaji, A., Elbahi, S., Demrati, H., Mouqallid, M., & Bouirden, L. (2016). Canary Greenhouse CFD nocturnal climate simulation. *Open Journal of Fluid Dynamics*, 6(6), 88-100. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4236/ojfd.2016.62008>
- Manik, S. M., Pengilley, G., Dean, G., Field, B., Shabala, S., & Zhou, M. (2019). Soil and crop management practices to minimize the impact of waterlogging on crop productivity. *Frontiers in Plant Science*, 10(140). <https://www.readcube.com/articles/10.3389/fpls.2019.00140>
- Molina-Aiz, F. D., Valera, D. L., Peña, A. A., & Gil, J. A. (2005). Optimization of Almería-type greenhouse ventilation performance with computational fluid dynamics. *Acta Horticulturae*, 691, 433-440. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2005.691.52>
- Montero, J. I., Muñoz, P., Baeza, E., & Stanghellini, C. (2016). Ongoing developments in greenhouse climate control. *Acta Horticulturae*, 1182, 1-14.
- Sánchez-Molina, J. A., Li, M., Rodríguez, F., Guzmán, J. L., Wang, H., & Yang, X. T. (2017). Development and test verification of air temperature model for Chinese solar and Spanish Almería-type greenhouses. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 10(4). <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20171004.2398>
- Sase, S. (2006). Air movement and climate uniformity in ventilated greenhouses. *Acta Horticulturae*, 719, 313-323.
- Teitel, M., Montero, J. I., & Baeza, E. J. (2011). Greenhouse design: concepts and trends. *Acta Horticulturae*, 952, 605-620. https://www.ishs.org/ishs-article/952_77
- Villagrán, E. A., Bojacá, C., & Akrami, M. (2021). Contribution to the sustainability of agricultural production in greenhouses built on slope soils: a numerical study of the microclimatic behavior of a typical Colombian structure. *Sustainability*, 13(9), 4748.
- Villagrán, E. A., León, R., Rodríguez, A., & Jaramillo, J. (2020). 3D numerical analysis of the natural ventilation behavior in a Colombian greenhouse established in warm climate conditions. *Sustainability*, 12(19), 1-26. <https://doi.org/10.3390/su12198101>

Villagrán, E. A., & Bojacá, C. R. (2019a). Numerical evaluation of passive strategies for nocturnal climate optimization in a greenhouse designed for rose production (*Rosa* spp.). *Ornamental Horticulture*, 25(4), 351-364. <https://doi.org/10.1590/2447-536X.V25I4.2087>

Villagrán, E. A., & Bojacá, C. R. (2019b). CFD simulation of the increase of the roof ventilation area in a traditional Colombian greenhouse: effect on air flow patterns and thermal behavior. *International Journal of Heat and Technology*, 37(3), 881-892. <https://doi.org/10.18280/ijht.370326>

Villagrán, E. A., & Bojacá, C. R. (2020). Study using a CFD approach of the efficiency of a roof ventilation closure system in a multi-tunnel greenhouse for nighttime microclimate optimization. *Revista Ceres*, 67(5), 345-356. <https://doi.org/10.1590/0034-737x202067050002>