



Cultivos inteligentes: simulación de la dinámica de aire para optimizar las condiciones ambientales y el diseño invernaderos

Cruz Ernesto Aguilar Rodríguez^{1*}, Jorge Flores Velázquez², Oscar Eduardo Aguilar Rodríguez¹

¹Tecnológico Nacional de México/ITS de Los Reyes,

²Posgrado en Hidrociencias, Colegio de Postgraduados Campus Montecillos

*Contacto: ernesto.ar@losreyes.tecnm.mx



Imagen generada por Adobe Firefly

Resumen

En la actualidad, la tecnología no solo está disponible en los teléfonos o computadoras: también entra a los invernaderos. Gracias a la simulación por computadora, es posible conocer el comportamiento del aire dentro de un invernadero y cómo afecta al cultivo, incluso antes de construirlo. La herramienta, conocida como Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), ayuda a diseñar invernaderos más eficientes y productivos.

Con CFD es posible identificar las zonas de baja velocidad del viento dentro del invernadero, lo que permite observar las regiones con mayor gradiente térmico que puedan ocasionar problemas en el desarrollo de los cultivos. Con estos datos, se pueden realizar ajustes en el manejo de los invernaderos para que los cultivos crezcan sanos sin necesidad de gastar en ventilación o calefacción. En zonas calurosas, como Michoacán, se ha usado esta tecnología para analizar la viabilidad de cultivar tomate bajo invernadero durante todo el año. Los resultados mostraron que sí, siempre que el invernadero esté bien diseñado y aproveche la velocidad del aire para reducir el gradiente térmico entre el exterior. Los investigadores usan CFD para calcular cuántos días son necesarios para completar los requerimientos de calor que necesita un cultivo para crecer, ayudando a planear mejor las fechas de siembra y cosecha. Con estas nuevas herramientas digitales, los invernaderos se pueden diseñar con mayor eficiencia, usando el aire como aliado, y así lograr cosechas abundantes, sanas y sostenibles.

Palabras clave: Temperatura, diseño, control ambiental.

Imagina un invernadero diseñado a partir del conocimiento científico antes de su construcción. Un espacio donde cada corriente de aire, cada grado de temperatura y cada ventana están planeados para darle a los cultivos exactamente lo que necesitan. Hoy en día, esto es posible gracias a la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés), una herramienta que permite “ver” el aire y entender cómo se comporta dentro de un invernadero.

A nivel mundial, las pérdidas en la producción agrícola derivadas de eventos climáticos extremos y estrés térmico representan un desafío económico significativo. Se estima que las olas de calor y sequías causaron pérdidas acumuladas de \$237 mil millones en la producción global durante el período 1961-2014 [1]. En el contexto de la agricultura protegida, el diseño térmico adecuado se revela como un factor crítico para la viabilidad económica y productiva de los sistemas de invernadero. El consumo energético asociado al control climático puede representar hasta el 50% de los costos de producción en invernaderos agrícolas [2], mientras que diseños innovadores como los invernaderos cerrados pueden reducir el consumo de combustibles fósiles entre 25-35% en comparación con sistemas abiertos en climas templados [3]. Estudios de simulación han demostrado que estrategias de control térmico optimizadas pueden lograr mejoras del 8.5% en eficiencia energética, reducciones del 12.5% en consumo energético y ganancias promedio de hasta 60% en rentabilidad para la producción de tomate en invernadero [4].

En México, miles de hectáreas de cultivos se pierden cada año por plagas, enfermedades o climas extremos. Por ejemplo, en la región de Los Reyes, Michoacán, la producción de zarzamora se desplomó debido a enfermedades como la pudrición de raíz, generando pérdidas de hasta 125 millones de dólares anuales [5]. Para recuperar

estas tierras, muchos productores voltearon a ver alternativas. Pero, ¿cómo asegurar que este nuevo cultivo tenga las mejores condiciones?

El aire, un componente invisible que transforma la productividad en los invernaderos

Un invernadero funciona como una cubierta que protege a los cultivos de las condiciones climáticas externas. Sin embargo, su éxito depende de cómo circula el aire dentro de él. Si el gradiente térmico es demasiado (para el cultivo de tomate el umbral máximo es de 30 °C), los cultivos sufren. Si el aire no se renueva bien, la humedad o el calor se acumulan, lo que permite el crecimiento de hongos y desarrollo de enfermedades [6].

Aquí es donde CFD se convierte en una herramienta clave. Esta tecnología usa modelos matemáticos para simular cómo se mueve el aire dentro del invernadero. Su base son las ecuaciones de Navier–Stokes, que describen cómo se conserva la masa, el movimiento y la energía en los fluidos. Al resolver estas ecuaciones de manera numérica, es posible predecir cómo circula el aire, cómo se distribuye la temperatura y cómo se transfiere el calor. En los invernaderos, este enfoque permite analizar procesos como la convección del aire, la radiación solar, la conducción térmica en las estructuras y la evapotranspiración de los cultivos. Gracias a ello, CFD se convierte en una herramienta esencial para diseñar ambientes uniformes y eficientes, mejorando el confort térmico de los cultivos y reduciendo el consumo energético en los sistemas de climatización [7,8]. Así, los ingenieros y agricultores pueden probar diferentes

diseños desde la computadora: mover ventanas, cambiar materiales de cubierta o probar extractores de aire lo que permite ahorrar en costos de construcción.

En Michoacán se han realizado estudios utilizando la herramienta CFD en la plataforma Ansys, con el objetivo de analizar la eficiencia en la producción de tomate durante todo el año bajo condiciones de agricultura protegida. Para ello, se desarrolló un modelo numérico basado en un invernadero del Instituto Tecnológico Superior de Los Reyes. El modelo consideró variables como la temperatura, la velocidad del viento y la humedad relativa, registradas mediante sensores y una estación meteorológica. Los resultados confirmaron la confiabilidad del modelo para realizar estudios de comportamiento ambiental en invernaderos.

Se demostró que, construyendo un invernadero con ventilación pasiva eficiente, se puede mantener la temperatura ideal para el tomate (entre 10 y 30 °C) casi todo el año [5]. Además, se identificaron los meses críticos de marzo a junio cuando el calor supera el umbral máximo de temperatura del tomate y se requiere reforzar la ventilación (Fig. 1). En marzo (a) y junio (d) predominan los colores verdes y azules, lo que refleja un ambiente más fresco y homogéneo dentro del invernadero. En cambio, en abril (b) y especialmente mayo (c) se observa un incremento notable de temperatura, con amplias zonas amarillas y rojas concentradas hacia un extremo del invernadero, indicando acumulación de calor.

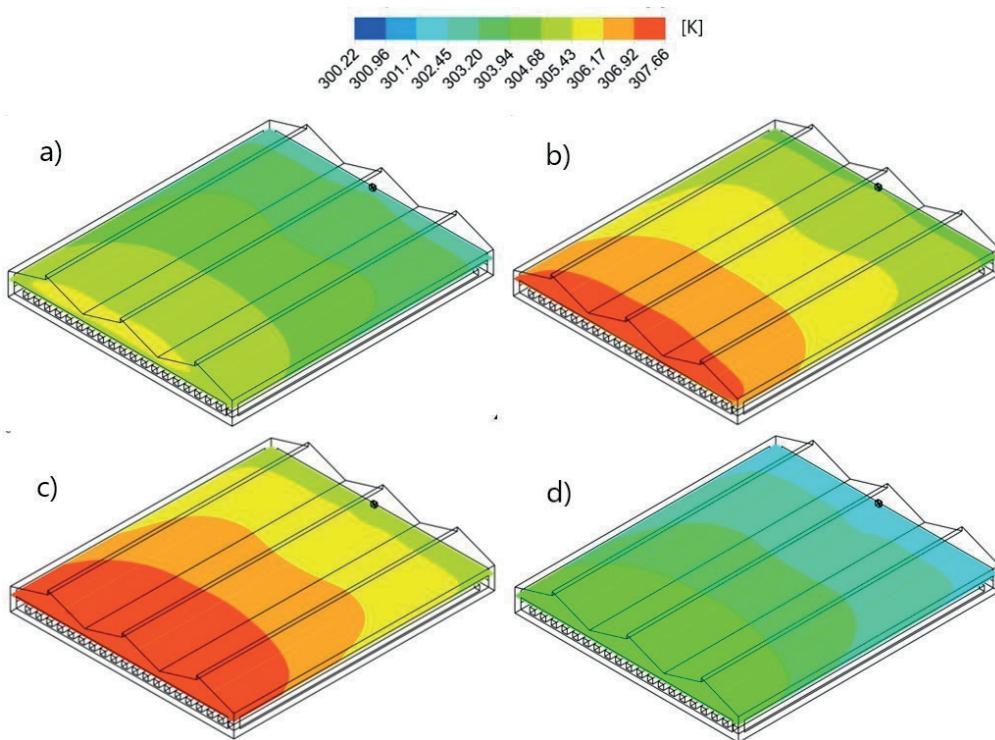


Figura 1. Distribución de temperatura (K) simulada a 2 m de altura en el invernadero 2 con datos de temperatura máxima mensual durante a) marzo, b) abril, c) mayo, d) junio [5]. La escala de colores representa la temperatura en Kelvin, donde los tonos azules indican las zonas más frías y los rojos las más cálidas.

Un invernadero bien diseñado produce más y gasta menos

Un punto clave que revelaron los resultados experimentales y simulados es que la forma y longitud del invernadero importan mucho. Si es demasiado largo, la renovación de aire se vuelve más lenta y se reduce la zonificación térmica. Lo ideal es que la longitud del invernadero no supere seis veces su altura (Fig. 2) [5]. También se demostró que la apertura total de las ventanas cenitales (las que están en el techo) y laterales puede mejorar la ventilación natural sin necesidad de costosos equipos de enfriamiento [9]. En la Figura 2 se muestra la distribución de temperatura y velocidad del aire en un invernadero. En la parte superior, sin cultivo, el flujo de aire es más rápido, lo que favorece una mejor ventilación y menores temperaturas. En la parte inferior, con cultivo, el viento se desplaza más lentamente debido a la resistencia del follaje, lo que provoca un incremento en la temperatura interna.

Todo esto se traduce en ahorro de energía y mayor rendimiento. Un diseño optimizado permite a los agricultores producir más, gastar menos y reducir su impacto ambiental [10,11]. Además, CFD permite prever escenarios futuros: ¿qué pasaría si cambia la dirección y velocidad del viento? ¿Cómo afectaría el aumento de la temperatura, debido al cambio climático? El modelo lo simula y da respuestas a estas y otras preguntas. La ciencia del aire aplicado al confort térmico y la productividad vegetal.

Gracias a estas simulaciones, la agricultura protegida se convierte en un sistema más inteligente. No se trata de construir un invernadero solo por construir, sino de diseñar un ambiente que trabaje a favor del cultivo. Actualmente, herramientas como CFD permiten planear mejor, corregir errores antes de construir y tomar decisiones basadas en datos, no en suposiciones [5].

En tiempos donde producir alimentos de forma sostenible es urgente, la tecnología se vuelve nuestra mejor aliada. Cultivar más y mejor, utilizando menos recursos, es posible cuando entendemos cómo fluye algo tan invisible y vital como el aire. Su integración en programas de extensión agrícola y capacitación pudiera traducirse en herramientas visuales y prácticas para los productores, facilitando decisiones informadas sobre ventilación, enfriamiento, diseño de invernaderos por zonas o distribución de cultivos. No obstante, la adopción de estas tecnologías enfrenta retos importantes, como la necesidad de personal capacitado, el acceso a equipo especializado y los costos asociados a licencias de software. Superar estas barreras requiere

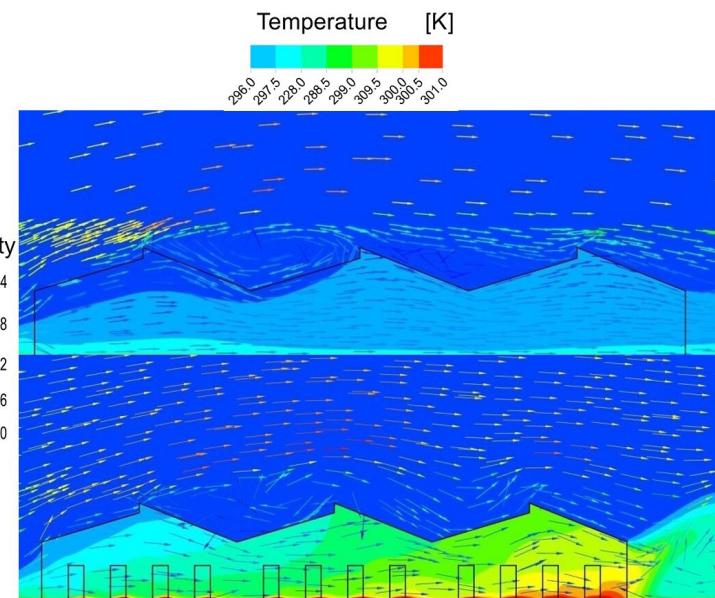


Figura 2. Efecto que tiene la longitud y el cultivo sobre la temperatura (K) y velocidad del viento (ms^{-1}). Los colores cercanos al rojo indican zonas con mayor temperatura y velocidades del viento más altas, mientras que los tonos azules representan áreas más frías y con velocidades más bajas. Elaboración propia

una visión integral que combine innovación tecnológica con formación y acompañamiento técnico en el campo. En el futuro, la incorporación de la inteligencia artificial permitirá automatizar el diseño y la optimización los sistemas ambientales en invernaderos, haciendo la simulación más accesible, rápida y útil para mejorar la eficiencia y competitividad en el sector agrícola. Sin embargo, para que esta transición sea efectiva y equitativa, es indispensable el impulso de políticas públicas que fomenten la adopción de tecnologías sostenibles, faciliten su acceso a pequeños y medianos productores, y promuevan la investigación aplicada en ingeniería agrícola y ambiental. Solo así la tecnología podrá convertirse en una herramienta real para alcanzar una agricultura más resiliente, eficiente y comprometida con el cuidado del planeta.

Referencias bibliográficas

1. Lesk C, Rowhani P, Ramankutty N. Influence of extreme weather disasters on global crop production. *Nature*, 2016. 529(7584), 84-87. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/nature16467>
2. Argento S, Garcia G, Treccarichi S. Sustainable and Low-Input Techniques in Mediterranean Greenhouse Vegetable Production. *Horticulturae*, 2024, 10(9), 997. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/horticulturae10090997>
3. de Gelder A, Dieleman JA, Bot GPA, Marcelis LFM. An overview of climate and crop yield in closed greenhouses. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, 2012, 87(3), 193-202. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/14620316.2012.11512852>
4. Tap F. Economics-based optimal control of greenhouse tomato crop production. PhD Thesis, Wageningen University; 2000 [Consultado Jun 2025]. Disponible en: <https://scispace.com/papers/3jczmtfz4w>
5. Aguilar-Rodríguez CE, Flores-Velázquez J, Rojano-Aguilar F, Ojeda-Bustamante W, Iñiguez-Covarrubias M. Estimación del ciclo de cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en invernadero, con base en grados días calor (GDC) simulados con CFD. *Tecnología y ciencias del agua*, 2020, 11(4), 27-57. Disponible en: <https://doi.org/10.24850/j-tca-2020-04-02>
6. Acevedo-Romero MM, Aguilar-Rodríguez CE, Hernández-Bocanegra CA, Ramos-Banderas JA, Solorio-Díaz G. Computational analysis of the effect of an external barrier on the ventilation and thermal performance of a greenhouse. *Agrociencia*, 2025, 1-17. Disponible en: <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v59i4.329>
7. Acevedo-Romero MM, Hernández-Bocanegra CA, Aguilar-Rodríguez CE, Ramos-Banderas JA, Solorio-Díaz G. Vapor Pressure Deficit as an Indicator of Condensation in a Greenhouse with Natural Ventilation Using Numerical Simulation Techniques. *Sustainability*, 2025, 17, 1957. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/su17051957>
8. Aguilar-Rodríguez CE, Flores-Velázquez J, Ojeda-Bustamante W, Iñiguez-Covarrubias M, Jesus Arzeta A. Innovación tecnológica basada en dinámica de fluidos computacional para el desarrollo de la agricultura protegida. III Congreso Nacional de Riego y Drenaje COMEII, 2020, 1-9. Disponible en: <https://www.riego.mx/congresos/comeii2017/assets/documentos/ponencias/extenso/COMEII-17008.pdf>
9. Flores-Velázquez J, Vega-García M. Regional management of the environment in a zenith greenhouse with computational fluid dynamics (CFD). *Ingeniería agrícola y biosistemas*, 2020, 11(1), 3-20. Disponible en: <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2018.04.007>
10. Jilani MNH, Mohapatra P. Computational fluid dynamics simulation of earth air heat exchanger combined with the Quonset type greenhouse to develop a sustainable controlled environment. *Geothermics*, 2024, 116, 102845. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2023.102845>
11. Sejun P, In-Bok L, Jeongwook S, Uk-Hyeon Y, Jeong-Hwa C, Cristina Decano V. Ventilation Rate Prediction in Naturally Ventilated Greenhouses Using a CFD-Driven Machine Learning Model. *ASABE*, 2025, 68(4), 573-589. Disponible en: <https://doi.org/10.13031/ja.16019>