

## Título provisional

CFD-Integrated Microclimate Modeling for Precision Cultivation of *Pleurotus* spp.: Coupled Airflow, Heat, Moisture and CO<sub>2</sub> Transport with Data-Driven Source Reconstruction

## Problema / Oportunidad

La calidad y el rendimiento en el cultivo de *Pleurotus ostreatus* dependen críticamente de microclimas controlados (temperatura, humedad, CO<sub>2</sub>). La mayoría de cámaras comerciales usan reglas simples de encendido/apagado para ventilación y humidificación; faltan modelos espaciales que integren la producción biológica de CO<sub>2</sub> desde el sustrato y permitan diseñar ventilación y estrategias de control óptimas. Con sensores de alta frecuencia disponibles, existe la oportunidad de combinar medidas reales con CFD para crear herramientas predictivas y operativas que aumenten rendimiento y reducen pérdidas.

## Objetivo general

Desarrollar, validar y aplicar un flujo de trabajo reproducible en ANSYS Fluent que integre: (i) reconstrucción basada en datos de la tasa de producción de CO<sub>2</sub> a partir de señales de sensores; (ii) simulaciones CFD acopladas de flujo, transporte de CO<sub>2</sub> y vapor y modelado poroso del sustrato; y (iii) calibración/validación con la red sensorial disponible, con el fin de optimizar diseño de ventilación y proponer estrategias de control operativas.

## Metodología (resumida)

1. **Preprocesamiento de datos:** convertir series de CO<sub>2</sub> (ppm) a concentración molar, suavizar y estimar  $dC/dt$ ; calcular la tasa observada  $r_{CO_2,obs}(t) = V \, dC/dt + Q(C - C_{ext})$   $r_{\{CO_2,obs\}}(t) = V \, dC/dt + Q(C - C_{\{ext\}})$   $r_{CO_2,obs}(t) = V \, dC/dt + Q(C - C_{ext})$  bajo hipótesis sobre volumen y ventilación.
2. **Reconstrucción espacial de la fuente:** distribuir  $r_{CO_2,obs}(t)$   $r_{\{CO_2,obs\}}(t)$   $r_{CO_2,obs}(t)$  en la zona de sustrato como fuente volumétrica o superficial (opciones: uniforme, superficial, parcheada).
3. **CFD en Fluent:** modelo transitorio pressure-based; RANS (k- $\omega$  SST) para runs principales; species transport (CO<sub>2</sub>), energía (si procede) y zona porosa para sustrato (Darcy/Forchheimer). Integración temporal de la fuente mediante UDF que lee la serie CSV.

4. **Calibración:** optimización por lote (Python + Fluent batch) para ajustar parámetros no conocidos (Q, distribución espacial, permeabilidad) minimizando RMSE entre lecturas y simulación en puntos sensor.
5. **Análisis y recomendaciones:** mapas 3D de CO<sub>2</sub>/RH/T, diagnóstico de zonas estancadas, escenarios de ventilación y reglas de control, estimación del tiempo con CO<sub>2</sub>>1000 ppm y propuestas de diseño operativo.

### Entregables principales

- Repositorio con casos Fluent (mallas, UDFs, scripts).
- CSV(s) de series r\_CO2 para Fluent (variantes calibradas).
- Informe técnico y conjunto de figuras (mapas 3D, validación sensorial, sensibilidad).
- Manual operativo con recomendaciones de ventilación/humidificación y esquema de control.
- Artículo científico orientado a revista de ingeniería agrícola / bioprocesos.

### Validación y limitaciones

Validación usando la red sensorial existente (T, RH, CO<sub>2</sub>, humedad sustrato, luz). Identificabilidad limitada (escala absoluta entre biomasa y  $\alpha$ ) mitigada por calibración puntual y análisis de sensibilidad. Recomendado medir o estimar V y caracterizar Q (decay test) para robustez.

### Impacto esperado

- **Académico:** método replicable para integrar datos experimentales con CFD en cultivos porosos; publicaciones y datos abiertos.
- **Industrial:** pautas concretas para reducir tiempo con CO<sub>2</sub>>1000 ppm, mejorar uniformidad T/RH y optimizar consumo energético de ventilación; herramienta de diseño para cámaras de cultivo.