ISSN: 1692-7257 - Volumen 1 – Número 47 - 2026

ORIGINAL

RCTA
Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada
UNIPAMPLONA

Evaluación del efecto de la concentración de CO_2 en el crecimiento y rendimiento de Pisum sativum L. mediante un invernadero automatizado con control difuso

Evaluation of the effect of CO_2 concentration on the growth and yield of Pisum sativum L. using an automated greenhouse with fuzzy control

Leónides Castellanos González[1]
Jhon Fredy Basto Barajas[2]
Luis Ernesto Neira Ropero[2]
Aldo Pardo García[2]

[1] **Universidad de Pamplona, Facultad de Ciencias Agrarias, Programa de Ingeniería Agronómica, Grupo de Investigación en Agroecología y Transformación Agraria Sostenible (GIATAS), Pamplona, Norte de Santander, Colombia.**

[2] **Universidad de Pamplona, Facultad de Ingenierías, Programa de Ingeniería Mecatrónica, Grupo de Investigación Automatización y Control (A&C), Pamplona, Norte de Santander, Colombia.**

Recibido: 01 julio 2025. Revisado: 01 septiembre 2025. Aceptado: 29 diciembre 2025. Publicado: 16 enero 2026.

Cómo citar: L. Castellanos González, J. F. Basto Barajas, L. E. Neira Ropero, and A. Pardo García, "Evaluación del efecto de la concentración de CO_2 en el crecimiento y rendimiento de Pisum sativum L. mediante un invernadero automatizado con control difuso", *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada (RCTA)*, vol. 1, no. 47, ene. 2026, art. no. 4312, doi: 10.24054/rcta.v1i47.4312

Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0.

Resumen:

El objetivo de la investigación fue evaluar la influencia de la concentración de CO2 sobre las variables morfométricas y fisiologías, y el rendimiento de la arveja en Pamplona Norte de Santander. La investigación se desarrolló en un invernadero experimental automatizado construido en la Universidad de Pamplona. Se evaluó una concentración de CO2 de 1300 ppm y en el otro de 600 ppm. Se midieron variables morfométricas y fisiológicas, número de vaina, número de granos y el peso de los granos. Se verificaron incrementos significativos en la altura, número de hojas, número de brotes laterales y de la superficie de las hojas, no así del diámetro del tallo y el índice de clorofila. Una mayor concentración de CO2 influyó en un aumento del área foliar de las plantas de alverja lo que se reflejó en un mayoro número de vainas, numero de grano y peso de los granos.

Palabras clave: invernadero automatizado, control difuso, concentración de CO_2, cultivo C3, Pisum sativum L., simulación de escenarios climáticos.

Abstract:

The objective of this research was to evaluate the influence of CO2 concentrations on morphometric and physiological variables, as well as on pea yield in Pamplona, North Santander. The research was conducted in an automated experimental greenhouse built at the University of Pamplona. One greenhouse was tested at a CO2 concentration of 1300 ppm, while the other was tested at 600 ppm. Morphometric and physiological variables, including pod number, grain number, and grain weight, were measured. Significant increases were observed in height, leaf number, number of lateral shoots, and leaf surface area, but not in stem diameter and chlorophyll index. Higher CO2 concentrations led to an increase in leaf area in pea plants, which was reflected in a higher pod number, grain number, and grain weight.

Keywords: automated greenhouse, fuzzy control, CO_2 concentration, C3 crop, Pisum sativum L., climate scenario simulation.

INTRODUCCIÓN

El clima es uno de los principales factores que regulan la distribución de las especies de plantas, ya sea directamente o a través de limitaciones fisiológicas en el crecimiento y la reproducción o, indirectamente, por medio de los factores ecológicos, como la competencia por recursos[1].

El cambio climático afecta de manera diversa a los ecosistemas agrícolas, lo cual impacta en el desarrollo, la propagación de plagas y enfermedades y rendimiento de los cultivos [2]. Se plantea que un incremento significativo en las temperaturas y cambios en los patrones de precipitación provocados por este cambio climático en los andes tropicales, probablemente afectarán en tamaño y distribución a los glaciares y humedales en función a su integridad ecosistémica, agua disponible para consumo humano, riego y producción de energía [3], [4].

La concentración atmosférica de CO2 atmosférica aumentó hasta niveles entre 370-380 ppm desde la era pre-industrial [5] y los pronósticos de cambio climático prevén que podría llegar a alcanzarse ~550 ppm en el 2050 y ~730-1020 ppm para el 2100 [6]. Se plantea que una duplicación de los niveles de CO2, incrementará la temperatura entre 1,5-4,5 ºC, lo cual tendrá un notable impacto en el ciclo de vida de las plantas, en los ecosistemas y sistemas socioeconómicos en todas las regiones del planeta [7].

Con respecto a las investigaciones relacionadas con el cambio climático y las políticas a seguir en Colombia, se plantea que debido al grado de incertidumbre se debe continuar las investigaciones sobre la modelación climática en diferentes escenarios, a escala geográfica detallada y a largo plazo, para conocer el grado de afectación en que diferentes sistemas, regiones y cultivos. Los resultados de los estudios permitirían a los científicos y los formuladores de políticas desarrollar planes de adaptación apropiados, por lo que se necesita más investigación para desarrollar cultivos resistentes al clima, a las plagas y a las enfermedades, por lo que la preservación de la agrobiodiversidad y de los recursos genéticos resultan cruciales para este fin[8].

La arveja (Pisum sativum L.) es un grano seco o verdura fresca para el consumo humano aprovechando sus granos, los países de Canadá, Rusia, China, USA, India y Australia son los países de mayor área sembrada a nivel mundial[9]. En el año 2015 se sembraron 30.907 hectáreas de arveja en Colombia, de las cuales se cosecharon 24.481 hectáreas. De estas se obtuvieron 100.548 toneladas de arveja en vaina verde, con rendimientos promedios de 4,1 toneladas por hectárea al año. El departamento de Nariño fue el principal productor, con 58.401 toneladas, seguido por los departamentos de Cundinamarca y Boyacá[10].

Se afirma que en las plantas como la arveja cuyo metabolismo es C3 el CO2 se dispersa a través de las estomas y los espacios de aire intercelulares y finalmente llega al cloroplasto. La anhidrasa carbónica cataliza la hidratación reversible de CO2.

a HCO3 en la fase acuosa, es decir, (cloroplasto, citosol y membrana plasmática) y se cree que mantiene el suministro de CO2[11].Kumar et al. (2020).

Las plantas tienen la capacidad de captar el CO2 atmosférico y mediante procesos fotosintéticos, metabolizarlo para la obtención de azúcares y otros compuestos que requieren para su desarrollo (biomasa). La biomasa al descomponerse se convierte en parte del suelo (en forma de humus) o en CO2 (a través de la respiración de los microorganismos que la procesan). Sin embargo, las explotaciones agrícolas también llevan asociadas otra serie de emisiones de CO2 que denominaremos “directas” e “indirectas”. Emisiones directas son aquellas que se generan en el proceso de cultivo como consecuencia del combustible utilizado en las labores agrícolas, así como los óxidos de nitrógeno procedentes del suelo por fertilización (recordemos que el efecto del calentamiento del N2O es 310 veces mayor que el del CO2). Las emisiones indirectas, se producen debido al consumo eléctrico, energía necesaria para la fabricación y mantenimiento de los equipos agrícolas, la producción de semillas o plántulas, la fabricación de insumos. Poe esta razón se hace necesario determinar el balance neto de CO2 resultado de sustraer de la cantidad fijada por la planta, las emisiones directas e indirectas producidas, lo que permitirá determinar el carácter emisor o sumidero de CO2 de los diferentes cultivos[12].

En la Universidad de Pamplona, Norte de Santander, Colombia, se desarrolla un proyecto encaminado a evaluar la influencia de concentración de CO2 en los componentes de rendimiento, y la fisiología de diferentes cultivos en condiciones de invernadero con una atmosfera controlada simulando escenarios futuros y de esta forma verificar como plantas C3 o C4 podrían beneficiarse o afectarse por una mayor concentración de CO2. A partir de estos antecedentes surge la siguiente interrogante: ¿En qué medida influye la concentración de CO2 en el crecimiento, los procesos fisiológicos de una planta C3 como la arveja (Pisum sativum L.)?

Por lo tanto, el objetivo de la presente investigación fue evaluar la influencia de la concentración de CO2 sobre las variables morfométricas y fisiologías en la etapa inicial de desarrollo de la arveja (Pisum sativum L.) en condiciones de invernadero.

METODOLOGÍA

La investigación se desarrolló en el primer semestre de 2023 en la sede central de la Universidad de Pamplona, Colombia

Se diseñó y construyó un invernadero experimental por el Grupo de Investigación de Automatización como parte proyecto de la Convocatoria Interna de la Universidad de Pamplona que permitiera simular escenarios futuros y se pudieran estudiar los efectos del cambio climático sobre los cultivos.

Implementación de un invernadero automatizado.

Medición de variables morfométricas, fisiológicas y productivas en el cultivo de alverja.

Se desarrolló un diseño experimental bajo condiciones controladas de dos tratamientos, uno con la concentración de CO2 actual (aproximadamente 600 ppm, (µmol·mol-1) y otra con una concentración superior que la presente (1300 ppm), teniendo en cuenta los pronósticos de escenarios futuros para el 2100[6],[13]. Esta variable independiente fue manipulada a esos niveles mientras que el resto de las variables se controlaron y regularon en ambos cubículos herméticos para que se mantuvieran con valores similares.

El CO2 se produjo por medio de la quema de Gas Licuado del Petróleo (GLP) a partir de una innovación realizadas por el Grupo de Automatización y Control, se almacenó y se suministró al invernadero en forma gaseosa en las cantidades necesarias a partir del almacenamiento de este y regulado a partir de diferentes válvulas. Para la medición de la concentración del CO2 se empleó un sensor SENO220 que permite lecturas desde mide de 0 a 60000 ppm.

Se trabajó por mantener el resto de las condiciones de temperatura similares en ambos cubículos a partir de los controladores de temperatura. Para regular la temperatura se dispuso de un aire acondicionado de 900 BTU que puede subir o bajar la temperatura a partir de los sensores y los dispositivos acoplados (válvula inversora).

La humedad relativa se controló en el cubículo con intercambio con el medio ambiente y se regularon con equipos y sensores que se ubicaron en ambos cubículos de tal forma que se mantuvieran estas variables de manera similar en ambos. La radiación de cada cubículo fue similar, al tener la misma cubierta plástica tanto de techo como laterales. Se emplearon ventiladores acoplados a diferentes sensores para mantener uniforme la atmosfera dentro de cada cubículo hermético.

Todos los equipos se instalaron a un gabinete metálico, para protección y seguridad del sistema a 10 m del invernadero, este contaba con su alimentación eléctrica y su respectivo punto de internet, el cual permite conectar los equipos a la nube y de esta manera tener un backup de la data recogida de la sensórica instalada. Esta información se procesó con diferentes softwares (IDE Arduino, Visual Code Studio) para ponerla al servicio de los investigadores y realizar la toma de decisiones de todas las actividades, a partir de control de las variables planificadas en los dos cubículos del invernadero y de esta manera tener una regulación oportuna. Los históricos de la nube descargaron archivos tipo .CSV para luego importar desde Excel o Block de Notas, y de esta manera poder realizar el análisis pertinente.

El experimento se desarrolló bajo las siguientes condiciones: promedio de concentración de CO2, temperatura y humedad del suelo hasta los 42 días de sembrado el cultivo de alverja (Tabla 1)

Tabla 1: condiciones promedio de las variables durante el tiempo que duró el experimento.

Variables	Cubículo 1 Concentración alta de CO2	Cubículo 2. Concentración alta de CO2
Concentración de CO2 (ppm)	1251,0	606,2
Humedad Suelo (%)	72,5	71,8
Temperatura del aire (◦C)	19,3	19,5

Como sustrato para las plantas de arveja se utilizó tierra del horizonte A de un sitio cercano a la piscina de la UP con lo cual se llenó cada canaleta hasta ¾ de su volumen total (30 cm de altura). Antes de iniciar el ensayo se tamizo la tierra y se realizo un muestreo y análisis químico del suelo. La corrección y la fertilización del suelo se realizó a todo el volumen de suelo necesario según la recomendación al respecto[14]. Con el análisis químico de la fertilidad del suelo se realizó una fertilización a todo el volumen de suelo de manera uniforme en dependencia de los requerimientos nutricionales de la arveja. Como, por ejemplo: nitrógeno (200 mg dm 3) en forma de sulfato de amonio (20% N) y potasio (150 mg dm3) en forma de cloruro potásico (60% K2O).

Se usó la variedad Santa Isabel. Las semillas botánicas se sembraron a una distancia de siembra de 20 cm entre plantas 3 por cada sitio de siembra y finalmente se dejó una planta por nido. La siembra del experimento se realizó en mayo de 2023. Finalmente, en cada cubículo quedaron 30 plantas. Para los muestreos se hicieron mediciones en 12 plantas de cada tratamiento (2 por cada canaleta). A las plantas se le dio un manejo agronómico según Normas Técnicas del cultivo[10].

Cada siete días a partir del 13 de junio cundo las plantas cumplían 15 días de sembradas se evaluaron las variables morfométricas (altura, diámetro del tallo, número de hojas, largo de las hojas y ancho de las hojas) (Tabla 2):

La altura se midió desde la base de la planta, hasta la primera hoja extendida con cinta métrica. El grosor del tallo a 1cm de la base de este con un pie de rey. Se estimó el área foliar a los 42 y 62 días después de sembrado el cultivo (DDS) con el empleo de la ecuación S= 0,6789 L*A[15].

A los 95 DDS se evaluaron las variables no de vainas por plantas y granos por vainas en 12 plantas y se pesaron los granos de cada una de las 30 plantas de cada tratamiento.

Tabla 2: forma en que se evaluaron las variables

Variable	U.M.	Medio para la medición
Altura de las plántulas	(cm)	Regla graduada
Grosor del tallo	(mm)	Pie de Rey
Emisión hojas verdaderas	(No.)	Conteo físico
Largo de las hojas	(cm)	Regla graduada
Ancho de las hojas.	(cm)	Regla graduada
Área foliar de las hojas	cm2	Ecuación (Galindo y Clavijo, 2007).

Las variables consideradas como fisiológicas en este objetivo fueron el área foliar total fotosintética de la planta y el índice de clorofila. El Área total fotosintética de la planta (ATFP) se estimó multiplicando del número de hojas por planta por la superficie promedio de las hojas o área foliar de las hojas estimado en el epígrafe anterior.

Las mediciones de la intensidad de clorofila de cada planta en ambos tratamientos se realizaron usando un clorofilómetro FieldScout CM 1000. Se hicieron lecturas en tres niveles de las plantas, hoja inferior, hojas del nivel medio y del nivel superior. Se promediaron los tres valores para cada planta.

Se realizaron comparaciones para todas las variables morfométricas, área foliar promedio de las hojas. Se compararon los datos por la prueba de Mann Whitney, por no haber normalidad, con una probabilidad de error de 5%. Se empleó el paquete estadístico SPSS.

Se realizaron comparaciones del área foliar por plantas y del contenido de clorofila, por medio de la prueba T de Student con 5% de probabilidad de error. Se empleó el paquete estadístico SPSS.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Implementación de un invernadero automatizado.

El invernadero se construyó con dos cubículos de 2,5m de largo y 2,5m de ancho, y una altura de 2,5m. (Figura 1). Para garantizar la bioseguridad se le pusieron puertas trampas y evitar incrementos y descensos de las variables. El invernadero quedó hermético forrado con polietileno de baja densidad, calibre 6 con aditivo UV (Figura 2).



Fig. 1. *Vista lateral del invernadero (Izquierda). Fig. 2. Vista frontal del invernadero (Derecha).*

Para la producción del CO2 a suministrar a uno de los locales del invernadero se realizó una innovación por el Grupo de Automatización y Control, que consistió en un equipo de producción de este gas por medio de la quema de Gas Licuado del Petróleo (GLP), el cual se suministró al invernadero en forma gaseosa en las cantidades necesarias a partir del almacenamiento de este y regulado a partir de diferentes válvulas. Para la medición de la concentración del CO2 se empleó un sensor SENO220 que permite lecturas desde mide de 0 a 60000 ppm (Figura 3).

Para mantener las condiciones de temperatura similares en ambos cubículos y medir la temperatura exterior, se realizaron a partir de los transductores de temperatura (Figura 4) y (Figura 5). Se ubicó un aire acondicionado de 9000 BTU que podía subir o bajar la temperatura por medio de una válvula inversora y de acuerdo a la señal de control de la tarjeta embebida.

La humedad relativa se controló con intercambio entre el cubículo y el medio ambiente, y se regularon con equipos y sensores que se ubicaron en ambos cubículos de tal forma que se mantuvieran estas variables de manera similar en ambos; la radiación de cada cubículo, al tener la misma cubierta plástica tanto de techo como laterales era similar. Adicionalmente, se emplearon ventiladores acoplados a la estructura del invernadero en diferentes ubicaciones, para de esta manera poder obtener uniformidad en la atmosfera dentro de cada cubículo.

Se realizaron ensayos en blanco de todo el funcionamiento de los controles necesarios antes de entregar la instalación para los experimentos de los cultivos, y se ubicó también un sistema de riego por goteo automatizado, iniciando el riego cuando se rebasara el mínimo de 50% de humedad de campo y se cerró el sistema a 60% de humedad, Cada sección del invernadero tuvo su sistema de riego independiente y se podía medir el consumo por sección semanalmente.



Fig. 3. Sensor para CO2 marca SEN0220 (Izquierda). Fig. 4. Control de humedad y temperatura marca Rika330-02 (Centro). Fig. 5. Control de humedad y temperatura marca Rika330-01 (Derecha).

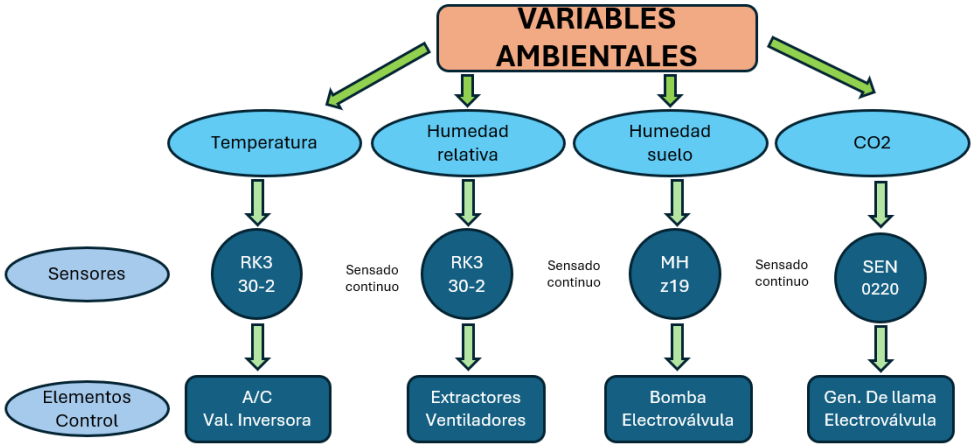


Fig. 6. Esquema de lectura y control.

Etapa de control

El procedimiento para el Desarrollo del Sistema de Control PID y Difuso (Fuzzy) se presenta en la Figura 6. Se realizó una caracterización del entorno del invernadero, identificando las variables ambientales críticas para el bienestar de los cultivos: temperatura, humedad relativa, humedad del suelo y concentración de CO_2. Se definieron los rangos operativos deseados para cada variable, tomando como referencia literatura técnica y recomendaciones agronómicas para condiciones ideales de crecimiento vegetal. Luego, se seleccionaron sensores comerciales confiables, compatibles con la plataforma de adquisición de datos (los sensores fueron calibrados y probados en condiciones controladas antes de ser integrados al sistema) (Tabla 3).

Tabla 3: Variables y control recomendado.

Variable	Tipo De Control Recomendada	Comentarios
Temperatura	Control Difuso tipo Mamdani con entrada: temperatura actual, error y tasa de cambio.	Alta sensibilidad a perturbaciones; buen ajuste con difuso.
Humedad Relativa	Control ON/OFF o difuso, con histéresis.	Puede usarse lógica booleana o difusa.
Humedad del Suelo	Control por umbrales supervisado con lógica difusa o reglas	Control de riego: no conviene activar por cada pequeña variación.
Nivel de CO_2	Control Proporcional + reglas lógicas (por ventilación o inyección)	No requiere control complejo, pero sí supervisión.

Diseño e implementación del controlador difuso (Fuzzy Logic Controller)

El proyecto se desarrolló en un invernadero ya construido y de producción bajo ambiente regulado y protegido de dimensiones reducidasV=2.5m*2.5m*2.5m=15.625m^(3). Debido a este bajo volumen, el sistema presenta una baja inercia térmica, exigiendo un control preciso para evitar fluctuaciones bruscas de temperatura. Para la adquisición de datos, se utiliza el sensor de grado industrial RK330-02, reconocido por su alta estabilidad y precisión. El procesamiento de la lógica de control se centraliza en una placa Arduino Mega, cuya capacidad de memoria permite gestionar las librerías de lógica difusa y múltiples periféricos. La etapa de potencia se gestiona mediante un Relé de Estado Sólido (SSR), el cual comanda un sistema de aire acondicionado con válvula inversora, permitiendo transiciones suaves entre los modos de calefacción y refrigeración. (Tabla 4).

El controlador se basa en dos variables de entrada fundamentales que describen el estado térmico del sistema en el tiempo$t$, y de las cuales tenemos el error de temperatura(e)(Ecu.1) y la variación del errorΔe(Ecu.2); la primera representa la desviación instantánea respecto al punto de consigna (setpoint) y la segunda indica la tendencia o velocidad con la que cambia la temperatura, permitiendo al sistema anticiparse a sobreimpulsos. La salida(u)es una señal normalizada entre -100 y 100, donde los valores negativos activan el ciclo de refrigeración y los positivos el de calefacción, modulados por ancho de pulso (PWM) a través del SSR.

Tabla 4: Parámetros Matemáticos.

Variable	Conjunto	Tipo	Parámetros ([a,b,c,d])
Error	MN (Calor)	Trapezoidal	[-10, -10, -5, -2]
	Z (Ideal)	Triangular	[-0.5, 0, 0.5]
	MP (Frío)	Trapezoidal	[2, 5, 10, 10]
Salida	AF (Enfriar)	Trapezoidal	[-100, -100, -70, -40]
	NULA	Triangular	[-10, 0, 10]
	CF (Calentar)	Trapezoidal	[40, 70, 100, 100]

Caracterización del Sistema

Dimensiones:V=2.5m*2.5m*2.5m=15.625m^(3).

- Sensor RK330-02: Es un sensor de alta precisión. con salida de 4-20mA, pero se utilizó un módulo xy-IT05, que permite pasar esa señal de corriente a una señal de voltaje de 0-5V (compatible con Arduino Mega).
- Actuador: Aire acondicionado con válvula inversora controlado por SSR. Esto permite un control bidireccional: Calefacción (Válvula ON) y Refrigeración (Válvula OFF), regulando la intensidad mediante PWM o ciclos de trabajo sobre el SSR.

Arquitectura del Controlador Difuso

Modelo de inferencia tipo Mamdani.

Ante la variabilidad y no linealidad de las condiciones ambientales, se diseñó un controlador difuso tipo Mamdani con dos variables de entrada: error de temperatura (E) y derivada del error (dE). La salida corresponde al nivel de actuación del sistema de ventilación, expresado en términos de porcentaje de PWM aplicado al actuador.

Variables de Entrada

Error ($\in$) = Diferencia entre la temperatura de consigna (T_{set}) y la temperatura actual (T_{act}) (Ecu.1).

$$e(t) = T_{set} - T_{act}(t) \#Ecu\ [\ seq\ Ecuaciones\ 1]$$

Variación del Error (Δe) = Velocidad de cambio de la temperatura (Ecu.1).

$$\Delta e(t) = e(t) - e(t-1) \#Ecu\ [\ seq\ Ecuaciones\ 2]$$

Variables de salida

Señal de Control (μ) = Ciclo de trabajo (Duty Cycle) para el SSR.

- Rango: [-100,100].
- Valores negativos: Enfriamiento.
- Valores negativos: Calefacción.

Fuzzificación (Conjuntos Difusos)

En esta etapa, los valores numéricos "nítidos" (crisp) del sensor se transforman en grados de pertenencia a conjuntos lingüísticos. Se han definido funciones de membresía triangulares y trapezoidales (Ecu.3) para las variables de entrada, categorizándolas desde "Muy Negativo" (exceso de calor) hasta "Muy Positivo" (exceso de frío). Lo primero es definir los términos lingüísticos usando funciones de membresía triangulares y trapezoidales por su eficiencia computacional en Arduino.

Para el Error (e):

- MN (Muy Negativo): [-10, -5, -2] (Mucho calor en el invernadero)
- N (Negativo): [-3, -1, 0]
- Z (Zero): [-0.5, 0, 0.5] (Temperatura ideal)
- P (Positivo): [0, 1, 3]
- MP (Muy Positivo):[2, 5, 10](Mucho frío en el invernadero)

Para la Salida (μ):

- AF (Enfriamiento Fuerte): [-100, -100, -60]
- AM (Enfriamiento Moderado): [-70, -40, -10]
- NULA: [-10, 0, 10]
- CM (Calor Moderado): [10, 40, 70]
- CF (Calor Fuerte): [60, 100, 100]

Base de Reglas Agronómicas

La lógica se basa en el comportamiento termodinámico del cultivo. Si el error es positivo (hace frío) y el error crece (se está enfriando más), la respuesta debe ser agresiva.

Tabla 5: Reglas Agronómicas.

$\frac{\Delta e}{e}$	MN	N	Z	P	MP
N	AF	AF	AM	NULA	CM
Z	AF	AM	NULA	CM	CF
P	AM	NULA	CM	CF	CF

Formalismo Matemático

Grado de Membresía (μ)

Para una función triangular definida por los puntos (a, b, c)(ecu.3):

$$\mu_A(x) = \max\left(0, \min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right)\right) \ \#Ecu\ [\ seq\ Ecuaciones\ 3]$$

Inferencia, agregación y desdifusificación:

Se empleó inferencia Mamdani, agregación mediante el operador máximo y desdifusificación usando el método del centroide (Figura 7).

Inferencia (Mecanismo de Mamdani)

La inteligencia del sistema reside en una matriz de decisión de 25 reglas basadas en el conocimiento agronómico. El motor de inferencia utiliza el método de Mamdani. Para cada regla*i*, el sistema evalúa la fuerza de activación$\alpha_i$aplicando el operador mínimo (AND lógico) (Ecu.4):

$$\alpha_i = min\left(\mu_{A_i}(e), \mu_{B_i}(\Delta e)\right) \#Ecu\ [\ seq\ Ecuaciones\ 4]$$

Defuzzificación (Centroide)

Para obtener una señal eléctrica aplicable al SSR, se convierte el agregado de los conjuntos difusos de salida en un valor real único. Se utiliza el método del Centro de Gravedad (COG), que calcula el punto donde el área bajo la curva de la función de pertenencia agregada está equilibrada: Ecu.5:

$$u^* = \frac{\int \mu_{agg}(u)*u(du)}{\int \mu_{agg}(u)du} \ \#Ecu\ [\ seq\ Ecuaciones\ 5]$$

En Arduino, esto se discretiza como:

La señalu^*es procesada por el Arduino Mega para ejecutar la acción física (Ecu.6).

- Siu^(*)>0:Válvula inversora ON
- Siu^(*)<0:Válvula inversora ON
- Zona muerta: Se establece un rango de histéresis cerca del cero para evitar el desgaste mecánico por conmutaciones innecesarias del compresor.

$$u^* = \frac{\sum_{i=1}^{n} u_i*\mu(u_i)}{\sum_{i=1}^{n} \mu(u_i)} \ \#Ecu\ [\ seq\ Ecuaciones\ 6]$$

Medición de variables morfométricas, fisiológicas y productivas en el cultivo de arveja

Las plantas de arveja manifestaron mayor altura cuando estaban sometidas a mayor concentración de CO2 en la mayor parte del experimento excepto a los 42DDS, momento en el cual a pesar de tener las plantas un valor relativo mayor de altura, no se manifestó diferencia estadística (Tabla 6).

Tabla 6: Resultado del análisis estadístico de la altura (cm) de las plantas de alverja sometidas a diferentes concentraciones de C02 en los diferentes momentos de nuestros.

Tratamientos	Muestreo (DDS)				
	14DDS	21DDS	28DDS	35DDS	42DDS
Alto CO2	11,0 a	24,9 a	42,1 ns	57,8 a	86,8 a
Bajo CO2	7,8 b	19,5 b	34,91 ns	51,5 b	68,7 a
T de Student	3,8	2,4	1,7	2	6,5
P valor	0,001	0,028	0,098	0,054	0

*NS: Sin diferencia significativa *: Valores seguidos por letras distintas en las columnas indican diferencia significativa por la prueba prueba de T de Student para P<0,05.*

No se evidenció influencia de la concentración de CO2 sobre el diámetro de las plantas de alverja medido a un centímetro de altura del suelo desde el inicio del experimento hasta los 42 DDS las plantas (Tabla 7).

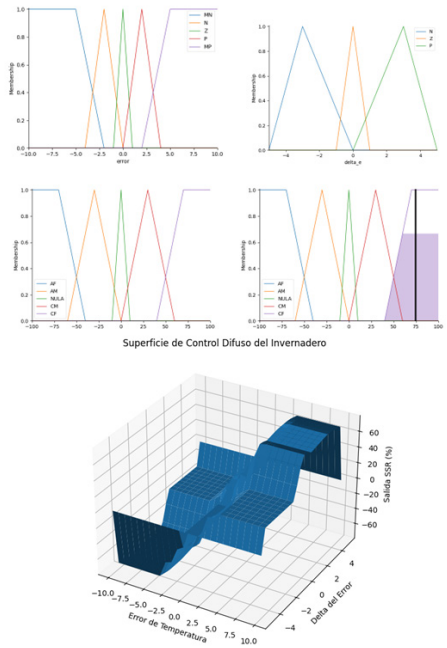


Fig. 7. *Rango de funciones de membresía del error.*

Tabla 7: Resultado del análisis estadístico del diámetro de las plantas de alverja sometidas a diferentes concentraciones de CO2 en los diferentes momentos de nuestros.

Tratamientos	Muestreo (DDS)				
	14DDS	21DDS	28DDS	35DDS	42DDS
Alto CO2	3,00 a	3,00 NS	3,00 NS	3,00 NS	3,00 NS
Bajo CO2	2,91 b	3,00 NS	3,00 NS	3,00 NS	3,00 NS
T de Student	1,00	NP	NP	NP	NP
P valor	,328	NP	NP	NP	NP

NS: Sin diferencia significativa. NP-No procedió el análisis estadístico

Las plantas de arveja manifestaron mayor número de hojas cuando estaban sometidas a mayor concentración de CO2 en todos los momentos de muestreos (Tabla 8).

Se presentó un adelanto en la emisión de brotes laterales en el tratamiento con CO2 alto, de igual forma mayor número de brotes laterales los muestreos de los 28 DDS el cultivo hasta los 42DDS (Tabla 9).

Tabla 8: Resultado del análisis estadístico del número de hojas de las plantas de alverja sometidas a diferentes concentraciones de CO2 en los diferentes momentos de nuestros.

Tratamientos	Muestreo (DDS)				
	14DDS	21DDS	28DDS	35DDS	42DDS
Alto CO2	9,83 a	21,50 a	32,83 a	53,66 a	74,50 a
Bajo CO2	7,50 b	19,33 b	22,50 b	38,41 b	54,33 b
T de Student	3,694	2,600	3,528	5,948	4,770
P valor	0,001	0,016	0,002	0,000	0,000

**: Valores seguidos por letras distintas en las columnas indican diferencia significativa por la prueba prueba de T de Student para P<0,05.*

Tabla 9: Resultado del análisis estadístico No de brotes laterales de las plantas de alverja sometidas a diferentes concentraciones de CO2 en los diferentes momentos de nuestros.

Tratamientos	Muestreo (DDS)		
	28DDS	35DDS	42DDS
Alto CO2	3,25 a	4,08 a	4,75 a
Bajo CO2	0,25 b	3,00 b	3,75 b
T de Student	13,519	3,767	4,506
P valor	0,001	0,001	0,001

**: Valores seguidos por letras distintas en las columnas indican diferencia significativa por la prueba prueba de T de Student para P<0,05.*

Se observó diferencia estadística significativa entre los dos tratamientos de Concentración de CO2 con relación a la superficie foliar de las hojas de las plantas manteniéndose diferencia significativa en todos los muestreos realizados hasta los 35 DDS,

a los 42 DDS ya no se observó diferencia (Tabla 10).

Tabla 10: Resultado del análisis estadístico de la superficie foliar de las hojas de alverja sometidas a diferentes concentraciones de CO2 en los diferentes momentos de nuestros.

Tratamientos	Muestreo (DDS)				
	14DDS	21DDS	28DDS	35DDS	42DDS
Alto CO2	3,38 a	4,39 a	5,10 a	5,28 a	5,45 NS
Bajo CO2	3,17 b	3,58 b	4,30 b	4,54 b	5,34 NS
T de Student	1,755	3,732	2,401	3,013	0,643
P valor	0,093	0,001	0,025	0,006	0,527

*NS: Sin diferencia significativa *: Valores seguidos por letras distintas en las columnas indican diferencia significativa por la prueba prueba de T de Student para P<0,05.*

Se observó diferencia estadística entre los dos tratamientos de concentración de CO2 con relación al área foliar total de las plantas manteniéndose una diferencia significativa en todos los muestreos realizados en los diferentes momentos (Tabla 11).

Tabla 11: Resultado del análisis estadístico del área foliar total de las plantas de alverja sometidas a diferentes concentraciones de CO2 en los diferentes momentos de nuestros.

Tratamientos	Muestreo (DDS)				
	14DDS	21DDS	28DDS	35DDS	42DDS
Alto CO2	33,16 a	94,38 a	168,56 a	276,21 a	397,55 a
Bajo CO2	23,27 b	69,82 b	98,68 b	163,80 b	291,44 b
T de Student	4,804	4,234	3,876	5,285	3,570
P valor	0,000	0,000	0,001	0,000	0,002

**: Valores seguidos por letras distintas en las columnas indican diferencia significativa por la prueba prueba de T de Student para P<0,05.*

El índice de clorofila no evidenció diferencia estadística en los tratamientos en ninguno de los cinco momentos de muestreo (Tabla 12).

Las plantas sometidas a una mayor concentración de CO2 lograron un número significativamente mayor de vainas por planta y de granos por vaina que aquellas mantenidas a baja concentración, así como una producción de peso de grano significativamente mayor (Tabla 13).

Tabla 12: Resultado del análisis estadístico del índice de clorofila de las plantas de alverja sometidas a diferentes concentraciones de CO2 en los diferentes momentos de nuestros.

Tratamientos	Muestreo (DDS)				
	14DDS	21DDS	28DDS	35DDS	42DDS
Alto CO2	141,77 NS	146,61 NS	214,52 NS	220,41 NS	138,20 NS
Bajo CO2	137,30 NS	139,78 NS	167,96 NS	169,13 NS	135,31 NS
T de Student	2,059	0,887	1,085	1,211	0,608
P valor	0,052	0,385	0,290	0,239	0,549

NS: Sin diferencia significativa

Tabla 13: Resultado del análisis estadístico para el número de vainas sometidas a diferentes concentraciones de CO2 en los diferentes momentos de nuestros.

Tratamientos	Muestreo (95 DDS)		
	No de vainas/ planta	No de granos/ vaina	Peso de granos/ planta (g)
Alto CO2	26,33 a	5,33 a	83,23 a
Bajo CO2	16,58 b	4,66 b	41,06 b
T de Student	9,03	2,27	9,82
P valor	0,000	0,033	0,000

**: Valores seguidos por letras distintas en las columnas indican diferencia significativa por la prueba prueba de T de Student para P<0,05.*

DISCUSIÓN

La mayor altura experimentada por las plantas sometidas a mayor concentración de CO2 es importante ya que es una variable relevante en el desarrollo de la arveja, debido a que su elongación permite acumular nutrientes que son producidos mediante el proceso de la fotosíntesis y de esta manera se transfieren a los demás partes como las hojas, vainas, granos. Se verificó una respuesta positiva de esta variable, la cual aumentó de manera proporcional con la edad, pero en mayor medida en las plantas sometidas a mayor concentración de CO2.

La mayor superficie foliar de las hojas en las plantas sometidas a mayor concentración de CO2 constituye un índice importante para estimar la capacidad de las plantas para interceptar la luz, realizar fotosíntesis y alcanzar mayores rendimientos como plantean algunos autores[15]. En un estudio de la influencia de la concentración de Trichoderma en el desarrollo de la arveja se midió la variable altura la cual tuvo diferencia entre los tratamientos y se reflejó posteriormente en un aumento del área foliar fotosintética[18].

Teniendo en cuenta los resultados sobre mayor altura, superficie foliar y área foliar en la etapa inicial de las plantas se hace necesario continuar las evaluaciones durante todo el ciclo del cultivo para verificar si este hallazgo se relaciona con la obtención de mayor producción y rendimiento[15].

En ninguno de los momentos de muestreo se observó diferencia estadística entre los dos tratamientos de Concentración de CO2 con relación los diámetros de las plantas de arveja medidos a 1 cm de altura del tallo, sin embargo, la concentración de CO2 influyó sobre una la mayor producción de brotes laterales, lo cual contribuyó también a un mayor número de hojas indicativos de mayor actividad y estimulación del crecimiento de las plantas de alverja sometidas a una concentración alta de CO2.

En esta investigación los brotes laterales se observaron con mayor anticipación en el tratamiento con CO2 alto. La emisión del número de tallos. secundarios emergidos por planta fue tenido en cuenta en plantas de arveja como parte de la bio-estimulación por Trichoderma, lo cual se relacionó posteriormente con el mayor número de hojas y la mayor área fotosintética de algunos tratamientos[18].

Los presentes resultados se relacionan con los de otros autores que compararon y comprobaron un aumento del 45% de biomasa en especies de herbáceas C3 sometidas a ambientes con alta concentración de CO2[19].

La no diferencia de los contenidos de clorofila no es de extrañar, lo cual sucede con frecuencia en muchos experimentos donde este parámetro ha demostrado ser no muy variable como en un experimento desarrollado para evaluar variedades de arveja [20] u otro para evaluar variedades de Opuntia [21].

Teniendo en cuenta los datos obtenidos se puede afirmar que el aumento de dióxido de carbono acelera el crecimiento en las plantas de arveja. Las plantas combinan este gas con agua y luz para el proceso de fotosíntesis, que permite la producción de glucosa. Al respecto se tiene el resultados que el área foliar del maíz, especie C4, evaluada 80 DDS, no fue afectada por la alta concentración de CO2 (T-CO2); en contraste el frijol, especie C3, que mostró incrementos en el área foliar bajo esta condición, de 19 % en la primera fecha y de 25 % en la segunda, aunque tales incrementos no fueron significativos Estos incrementos fueron el resultado del desarrollo de por lo menos una rama más, así como de un mayor número y tamaño de las hojas de las plantas expuestas a la alta concentración de CO2; semejante a lo señalado en soya (Glycine max L.)[22], aunque en tomate (Lycopersicon esculentum) no se observó una respuesta similar[23].

Otros estudios reportan que un aumento en la concentración de CO2 a 800 ppm promueve un crecimiento en la acumulación de biomasa y área foliar para la estevia (Stevia rebaudiana Bert.)[24].

Lo anterior se puede relacionar con la posibilidad para aumentar el rendimiento en la producción de las diferentes plantas con concentraciones CO2 simulando escenarios futuros, lo cual se podrá verificar para otros cultivos ya que la existencia del invernadero automatizado en la Universidad de Pamplona con dos cubículos para comparar diferentes concentraciones de CO2 es una oportunidad para continuar estudios como el presente.

CONCLUSIONES

Se logró la implementación de un invernadero automatizado para investigaciones simulando escenarios futuros para los cultivos en la universidad de Pamplona.

Se verificó que una concentración alta de CO2 provocó incrementos significativos en la altura, número de hojas, número de brotes laterales y de la superficie de las hojas en el cultivo de alverja en una etapa temprana de desarrollo, no así del diámetro del tallo.

Una mayor concentración de CO2 influyó en un aumento del área foliar de las plantas de alverja en una etapa inicial de desarrollo del cultivo, pero no sobre el índice de clorofila.

REFERENCIAS

[1] A. Jarma - Orozco, C. Cardona-Ayala & H. Araméndiz-Tatis. Efecto del cambio climático sobre la fisiología de las plantas cultivadas: Una revisión. Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica, vol. 15 no 1, pp. 63-76. 2012. https://doi.org/10.31910/rudca.v15.n1.2012.803

[2] CBD (Convenio sobre la Diversidad Biológica). Cambio Climático y Diversidad Biológica. CBD. 47 p. 2007.

[3] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Ginebra, IPCC. 104 p. 2007.

[4] R. Urrutia & M. Vuille. Climate change projections for the tropical Andes using a regional climate model: Temperature and precipitation simulations for the end of the 21st century. Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984- 2012) vol. 114, pp. 1–15. 2009. Disponible en: http://doi.org/10.1029/

[5] D.L. Albritton, M.R. Allen & A.P.M Baede. Summary for policy makers. In: Climate Change 2001: The Scientific Bases. Contribution

of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Houghton J.T., Ding Y., Griggs D.J., Noguer M., Van der Linden P.J., Dai X., Maskell K., Johson C.A., Eds.). University Press, Cambridge UK/New York, NY, USA. 2001

[6] S. Solomon (Ed.). Climate change 2007-the physical science basis: Working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC (Vol. 4). Cambridge University Press. 2007.

[7] M. Maslin. Global Warming, a very short introduction. Oxford University Press, Oxford. 2004.

[8] C. Lau, A. Jarvis & J. Ramírez. Agricultura colombiana: Adaptación al cambio climático. CIAT Políticas en Síntesis no. 1. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. 4 p. 2011.

[9] J. E. Checa- Bastidas, & T. O. Narváez. Evaluación agronómica y económica de arveja arbustiva (Pisum sativum L.) en diferentes épocas de siembra y sistemas de tutorado. Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica vol. 20 no. 2, pp. 279- 288. 2017.

[10] DANE. El cultivo de la arveja en Colombia. Boletín 33. 2015.

[11] V. Kumar, A. Sharma, J. K. Soni, & N. Pawar. Physiological response of C3, C4 and CAM plants in changeable climate. The Pharma Innovation, vol. 6, no 9 Part B, pp. 70. 2017.

[12] Martínez, M. B. P. Contribución de la agricultura valenciana al calentamiento global Revista digital de medio ambiente "ojeando la agenda" vol. 38, pp. 2. 2015.

[13] A. Pardo-García, L. Castellanos-González. Automation of environments in greenhouses simulating future scenarios. vol. 1 – no. 29, pp. 133-137 – 2017.

[14] B. V. Raij, & H. A. Cantarella. A quadratic model for fertilizer recommendations based on results of soil analyses., Communications in soil science and plant analysis, vol. 27, no 5-8, pp. 1595-1610.

[15] J. R. Galindo & J. Clavijo. Modelos alométricos para estimar el área de los foliolos de arveja (Pisum sativum L.). Ciencia y Tecnología Agropecuaria, vol. 8, no. 1, pp. 37-43. 2007.

[16] V. I. M. González & L. A. Aguilera. Determinación de la calidad fisiológica de semillas de arveja Pisum sativum L. Por medio de diferentes metodologías. Investigación agraria, vol. 6, no. 1, pp. 5-9. 2004

[17] M. Jaime-Guerrero, J. Álvarez-Herrera & J. Camacho-Tamayo. Germinación y crecimiento de semillas de arveja Var. 'Santa Isabel' sometidas a diferentes dosis de giberelinas. Revista de Investigación Agraria y Ambiental vol. 14, no. 2, pp. 91 - 112. 2023. https://doi.org/10.22490/21456453.6506

[18] D. F. Camargo-Cepeda, & E. R. Ávila. Efectos del Trichoderma sp. sobre el crecimiento y desarrollo de la arveja (Pisum sativum L.). Ciencia y Agricultura, vol. 11, no. 1, pp. 91-100. 2014.

[19] H. Poorter & M. L. Navas. Plant growth and competition at elevated CO2: on winners, losers and functional groups. New Phytologist vol. 157, pp. 175-198. 2023.

[20] V. L. Latorre, E. D. Diego Mejía & M. O. Osorio. Cambios en el contenido de clorofila y peso en dos variedades de arveja (Pisum sativum L.) almacenada a diferentes temperaturas. Vitae, vol. 23, (Supl 1), pp. 836-839. 2016.

[21] R. Bacarrillo-López, A., Pedroza-Sandoval, MA. Inzunza Ibarra, A. Flores-Hernández & F.J. Macías Rodríguez. Productividad de forraje de variedades de nopal (Opuntia spp.) bajo diferentes regímenes de humedad del suelo. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios vol. 8 no. 3: e2878. 2021. DOI: 10.19136/era.a8n3.2878.

[22] D. W. Lawlor & R. A. C. Mitchell. The effects of increasing CO2 on crop photosynthesis and productivity: a review of field studies. Plant, Cell and Environment. vol. 14 no. 8, pp. 807-818. 1991. https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1991.tb01444.x

[23] R. T. Besford, L.J. Ludwig & A. C. Withers. The greenhouse effect: Acclimation of tomato plants growing in high CO2, photosynthesis and ribulose-1, 5-bis phosphate carboxylase protein. Journal of Experimental Botany, vol. 41 no. 8, pp. 925-931. 1990.

[24] A. De J. Jarma- Orozco., & Epitia-Romero, C. A.. Distribución de biomasa y área foliar Stevia rebaudiana Bertoni en atmósferas saturadas de CO2. Temas Agrarios, vol. 26. Sup 1. Pp. 36. 2021.

FINANCIACIÓN

Ninguna

CONFLICTOS DE INTERÉS

No existen

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Redacción - borrador original: Leónides Castellanos González, Jhon Fredy Basto Barajas, Luis Ernesto Neira Ropero, Aldo Pardo García.

Redacción - revisión y edición: Leónides Castellanos González, Jhon Fredy Basto Barajas, Luis Ernesto Neira Ropero, Aldo Pardo García.