

Perfiles de temperatura y humedad relativa dentro del invernadero de la unidad agroecológica La Aldana de la Universidad del Quindío

Profiles of temperature and relative humidity within the greenhouse of the agroecological's unit, The Aldana at the University of the Quindío

Pablo Andrés Muñoz Gutiérrez¹
Julián Alberto Buitrago Giraldo²

Recibido: 17/05/2014 - Aceptado: 18/08/2014

Cómo citar este artículo: P. Muñoz y J. Buitrago “Perfiles de temperatura y humedad relativa dentro del invernadero de la unidad agroecológica La Aldana de la Universidad del Quindío”, *IngEam*, vol. 2, n.º 2, pp. 90-114, 2015

Resumen

En este documento se hace un análisis preliminar de las condiciones micro-climáticas del invernadero ubicado en la unidad agroecológica la Aldana de la Universidad del Quindío. Aunque las variables implicadas en el micro-clima de un sistema de invernadero son muchas, tales como la Humedad, la Temperatura, la Velocidad del Viento, la emisión de CO₂, la Radiación Solar, y la luz, para este análisis se tuvieron en cuenta únicamente la Temperatura interna y la Humedad Relativa, las cuales fueron adquiridas por un sistema de Instrumentación electrónica basado en sensores, que tomaron los datos y los pasaron a un PC en el cual se desarrolló un programa en labview, el cual fue almacenando la información suministrada por los sensores, por horas, días y semanas, para luego ser analizada y graficada y así concluir el comportamiento de estas dos variables dentro del invernadero.

Palabras clave: Microclima en invernaderos, Humedad relativa, Temperatura, Invernadero

Abstract

In this research work a deep analysis of the micro -climatic conditions in the greenhouse located in the agro-ecological unit La Aldana, University of Quindío was performed. Although the variables involved in the micro - climate of a greenhouse system are many, such as the humidity , the temperature , the wind speed , the emission of CO₂, Solar Radiation , and light, for this analysis were taken into account only the internal temperature and relative humidity, which were acquired by an Electronic Instrumentation -based sensors, which took the data and passed to a PC which is developing a program in lab view, which was storing the information provided by sensors , for hours, days and weeks , so that

¹ Ingeniero en Electrónica, Magister en Ingeniería, Estudiante de Doctorado UTP, Docente Universidad del Quindío. Correo electrónico: pamunoz@uniquindio.edu.co

² Ingeniero en Electrónica, Magister en Ingeniería, Docente Escuela de Administración y Mercadotecnia del Quindío EAM. Correo electrónico: jbuitrago@eam.edu.co

it could then be analyzed and graphed and thus conclude the behavior of these two variables inside the greenhouse.

Key words: Microclimate in greenhouses, Humidity relative, Temperature, Greenhouse

Introducción

La agricultura en los últimos años está siendo afectada por el cambio climático, ya que la predicción de condiciones no es coherente con la tradición agrícola que desarrollaba sus actividades de acuerdo al clima que se presentaba en los diferentes meses del año, las épocas de verano e invierno estaban determinadas casi con exactitud y por esta razón los agricultores podían anticiparse a las lluvias o al calor para mitigar su impacto. Pero esto ha cambiado abruptamente, y ha provocado pérdidas económicas incalculables para el campo.

Dado lo anterior, no se puede desconocer que los cultivos en invernaderos son un área de la agricultura que viene en rápido crecimiento a nivel mundial, dentro de las principales razones para esto se pueden mencionar:

- El invernadero separa el cultivo del ambiente, esto ayuda de algún modo a protegerlo de la influencia directa de las condiciones climáticas externas, lo cual permite la producción agrícola de productos en zonas específicas donde no podrían ser cultivados.
- El recinto cerrado del invernadero facilita la manipulación del ambiente para el cultivo, además esto conlleva a asegurar el desarrollo del cultivo en una dirección deseada, para de esta forma lograr un mayor rendimiento, periodo de producción prolongado, mejor calidad y menor uso de productos químicos. Adicionalmente el valor adicional por unidad de área en cultivos de invernaderos es más alta que en lo cultivo a campo abierto.

El microclima dentro de un invernadero está compuesto por muchas variables que hacen de este sistema algo muy especial con respecto al exterior, las principales son, la radiación, la temperatura, la humedad, el gas carbónico y el viento.

Desarrollo metodológico

Generalmente dentro de un invernadero las temperaturas son más altas que en el exterior de este, debido al efecto que producen algunos gases generados dentro de los procesos naturales de las plantas que los emiten, dichos gases atrapan el calor e impiden que este abandone el sitio lo cual se ve reflejado en una aumento sustancial de la temperatura interna sobre todo en horas pico de sol donde la radiación de este es mayor, ya caída la noche dicha temperatura se va perdiendo debido a la ausencia de la radiación solar. En la Figura 1 se puede apreciar una aproximación de cómo se debe comportar teóricamente la temperatura en un día promedio para este zona meridiana [1].

Una variable de alta incidencia en el análisis del microclima de un invernadero es la Humedad. Esta se puede definir como la cantidad de agua contenida en el aire o en la atmósfera. Existen dos tipos de humedades que se presentan, una es la Humedad Absoluta

la cual se entiende como el peso que tiene el vapor de agua contenido en un volumen de aire. La otra es la Humedad Relativa que es específicamente la que se analiza para monitorear y acondicionar el micro clima, y se puede definir como la razón entre el contenido efectivo de vapor en la atmosfera y la cantidad de este que saturaría el aire a la misma temperatura. Si la temperatura atmosférica aumenta y no se producen cambios en el contenido de vapor la humedad absoluta es estable y la relativa disminuye pero si por el contrario la temperatura baja la humedad relativa inmediatamente aumenta, por tal razón es que en las horas de la madrugada como se tiene las temperaturas más bajas se condensa el vapor de agua y se produce lo que se conoce como rocío. A esta condición se le llama sobresaturación y en ese momento la humedad relativa supera el 100% [2].

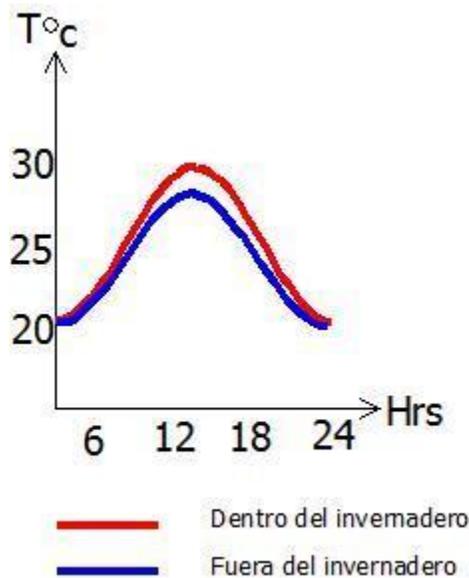


Figura 1. Aproximación del comportamiento teórico de la temperatura

Existen dos variables determinantes en el desarrollo de cultivos bajo invernaderos que son la luz y la radiación solar, aunque ambas están ligadas por la fuente que las produce, también hay que tener en cuenta que cumplen funciones diferentes dentro de lo invernadero, esto debido a que la Luz tiene efecto directo sobre el proceso de fotosíntesis y el crecimiento de las plantas, y la radiación afecta directamente la temperatura interna. [3]

Finalmente el control de la concentración de CO₂ dentro del invernadero es fundamental para el desarrollo y vitalidad de la plantación, es por esto que esta es otra de las variables que se hace necesario controlar para aprovechar su fortaleza como nutriente en el proceso de fotosíntesis y hacer que su efecto produzca el mejor rendimiento en las plantaciones [4]

El estudio de microclima ha relacionado muchos estudios, en México por ejemplo se han desarrollado diferentes trabajos que buscan no solo establecer las características del microclima dentro del invernadero, sino que además buscan ajustar modelos ya existentes a otros invernaderos con características similares. Inicialmente se puede mencionar el trabajo realizado para ajustar el modelo matemático en el interior de un invernadero, con las

condiciones climáticas del centro de México, para este caso se partió de datos obtenidos de temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar, a partir de sistemas de instrumentación ubicados en la parte exterior del invernadero. Estos datos fueron utilizados para ajustar el modelo matemático, a través de algoritmos genéticos, al comportamiento real de las variables medidas dentro del invernadero. En este trabajo se utilizó un invernadero de dos aguas con ventilación lateral en las cuatro paredes [5].

En [6] se analizó el comportamiento del microclima dentro de dos invernaderos, uno estándar y otro bioclimatizado (tipo aleta de tiburón y con ventilación natural); con el fin de determinar si a través de métodos de enfriamiento pasivos, se lograba tener una temperatura interna, en el invernadero bioclimatizado, por lo menos con 6°C por debajo de la temperatura interna del invernadero estándar. Todo esto fue observado sobre un cultivo de fresa. En este trabajo solo se supervisó el comportamiento de la temperatura y la HR (Humedad Relativa), no se modeló el microclima, pero se observó y comparó el comportamiento de las principales variables medidas dentro de los invernaderos.

En otro trabajo se obtuvo el modelo dinámico lineal auto regresivo a partir de variables exógenas, para predecir la temperatura del aire dentro del invernadero. Se tomaron como entradas variables de temperatura externa, radiación solar, humedad relativa, velocidad del viento en la parte de ventilación del invernadero; todo esto en un invernadero con ventilación cenital y natural, además de un sistema de calefacción directa, pero el cual no estuvo en funcionamiento durante el desarrollo de la investigación [7].

En Argentina se analizaron los parámetros de crecimiento del tomate ante las condiciones microclimáticas del invernadero (tipo multicapilla con ventilación lateral), trabajos realizados en las cuatro estaciones que presenta la región donde está ubicado el invernadero. Se realizaron medidas de radiación neta y total tanto interna como externa, también se hicieron medidas de temperatura y HR del aire en el interior y en el exterior del invernadero, igualmente se midió la temperatura del suelo y la temperatura de las cubiertas del invernadero [8].

En [9] se realiza el modelado dinámico usando la técnica de caja negra y se obtiene el modelo a partir de los datos experimentales medidos. Las variables dentro del invernadero, tipo capilla con ventanas laterales manuales y ventana cenital fija para la ventilación, no son manipulables, sólo se construye el modelo de acuerdo al efecto de las perturbaciones externas sobre el clima dentro del invernadero. Para esto se midieron y almacenaron las variables de temperatura y humedad relativa, también se midió la radiación solar, se instalaron cuatro instrumentos de medida a 2.5 m del suelo y otros cuatro a 1.2 m cerca del follaje; se instaló además un sistema de medida alejado del invernadero para tomar las medidas externas. El modelo teórico se obtuvo de las leyes de conservación de masa y energía, asumiendo algunos parámetros constantes con el fin de tener un modelo menos complejo. Fue representado en variables de estado con ecuaciones diferenciales no lineales. Con los datos experimentales se construyó un modelo paramétrico con múltiples entradas y salidas, representado en variables de estado.

Descripción general del sistema de instrumentación

El invernadero consta de varios elementos que miden las variables de Temperatura y Humedad Relativa. Dada la necesidad de medir variables ambientales dentro del invernadero y por consiguiente tener los sensores más adecuados el espacio está cubierto por los siguientes sensores:

- Sensor de temperatura. Se eligió el dispositivo LM35 para la medición de la temperatura dentro del invernadero, esta decisión se tomó por la su salida lineal y en voltaje, por la facilidad de implementación, por su disponibilidad en el mercado, por su costo y por ajustarse a los rangos y condiciones ambientales del invernadero [10].
- Sensor de humedad relativa. Para esta variable se seleccionó un sensor de Honeywell de referencia HIH 4000-002, esta selección se hizo de acuerdo a su salida en voltaje y a sus características de salida lineales.

Infraestructura del sistema de instrumentación

Para tal fin y de acuerdo a las dimensiones del invernadero y el número de sensores a instalar, su ubicación dentro del invernadero y la ubicación de la tarjeta de procesamiento y visualización del sistema de instrumentación [11], los sensores están distanciados 4.15 m entre ellos y separados del techo 1.40 m, esto con el fin de evitar daños en los dispositivos y medidas erróneas debido al calentamiento en horas críticas. En la Figura 2 se muestra la distribución de estos dispositivos identificada con los cuadros negros, los sensores de temperatura están identificados desde ST1 a ST6 y los sensores de humedad relativa como SH1-SH2.

94

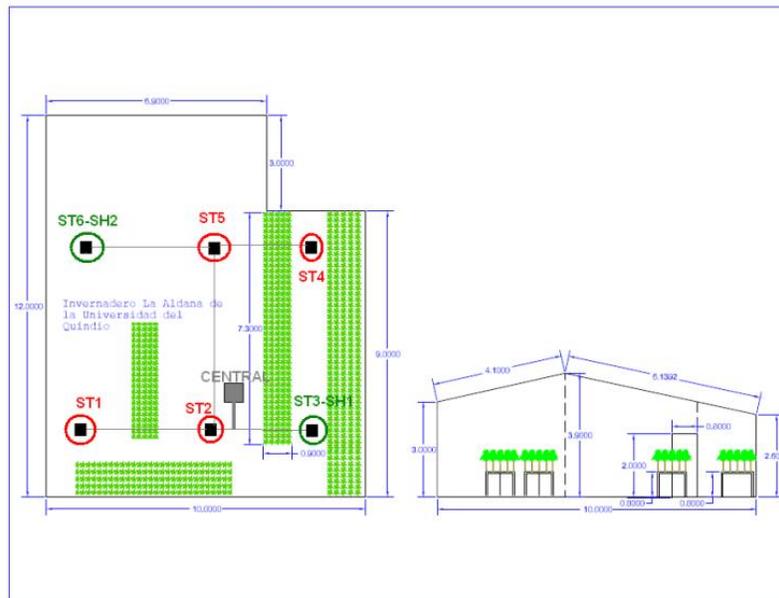


Figura 2. Plano en planta de la ubicación de sensores en el invernadero.

a. Sistemas para el acondicionamiento de señales. Los sensores por sus características tienen acondicionamiento de las señales que entregan, para llevarlas a sistemas digitales que tenían algunas restricciones en los niveles de voltaje permitidos [12].

Sensores de temperatura: Los sensores de temperatura LM35, de acuerdo a la hoja de especificaciones, cambian en su salida $1\text{mV}/^\circ\text{C}$, es decir que 25°C equivalen a 250mV en los terminales de salida del sensor y su salida es lineal, por lo tanto solo requieren de la adecuación del voltaje a los niveles exigidos por los Microcontroladores que se encargarán de la adquisición y transmisión de las señales. Los niveles de temperatura establecidos fueron 0°C como temperatura mínima (salida de 0V) y como temperatura máxima 100°C (salida de 1V), estos valores son acondicionados a los rangos manejados por el sistema de adquisición y transmisión de datos de 0V mínimo y 3.3V máximo. Fueron utilizados amplificadores operacionales LF353 para este acondicionamiento y se utilizaron amplificadores en configuración no inversora.

- Sensores de humedad relativa. Los fabricantes del sensor para medir la humedad relativa (HIH 4000-002) presentan en su hoja de datos un curva del voltaje de salida lineal (ver Figura 5), donde el voltaje de salida se encuentra entre en un rango de 0.958V para 0% de humedad relativa y 4V para aproximadamente 100% de humedad relativa [11].

Las medidas de salida del sensor se comparan con un higrómetro de Herger Instruments h270, con el fin de establecer que los rangos de funcionamiento fueran acordes a la curva de salida anterior es decir se le hace un proceso de calibración. El acondicionamiento de la señal de este sensor requiere inicialmente de un sistema de acoplamiento de impedancia a través de un amplificador seguidor y segundo un desplazamiento de offset para el cual se utiliza un amplificador en configuración restadora, con el fin de llevar la medida de 0% de humedad relativa a 0V . El sistema finalmente mantiene los rangos de trabajo entre 0V para 0% de humedad relativa y 3.04V para 100% .

Preprocesamiento de los datos adquiridos. Los datos obtenidos originalmente se pueden observar en las figura 3 y 4, se puede observar un ruido generado debido a perturbaciones propias del invernadero como el viento que fluye dentro de él por no ser hermético.

Se realizó un filtrado simple para suavizar un poco la evolución temporal de estas variables, el cual consistió en una ventana móvil de 300 s (segundos) que realizaba un promedio dato por dato, obteniendo como resultado las señales filtradas que se pueden observar en las figuras 5 y 6 (correspondientes a las de las figuras 3 y 4 pero filtradas).

En la figura 7 se muestra un comparativo de la temperatura 1 (ST1) antes (azul) y después (rojo) de ser filtrada y en la figura 8 se observa la humedad relativa del sensor SH1 antes (azul) y después (rojo) de ser filtrada.

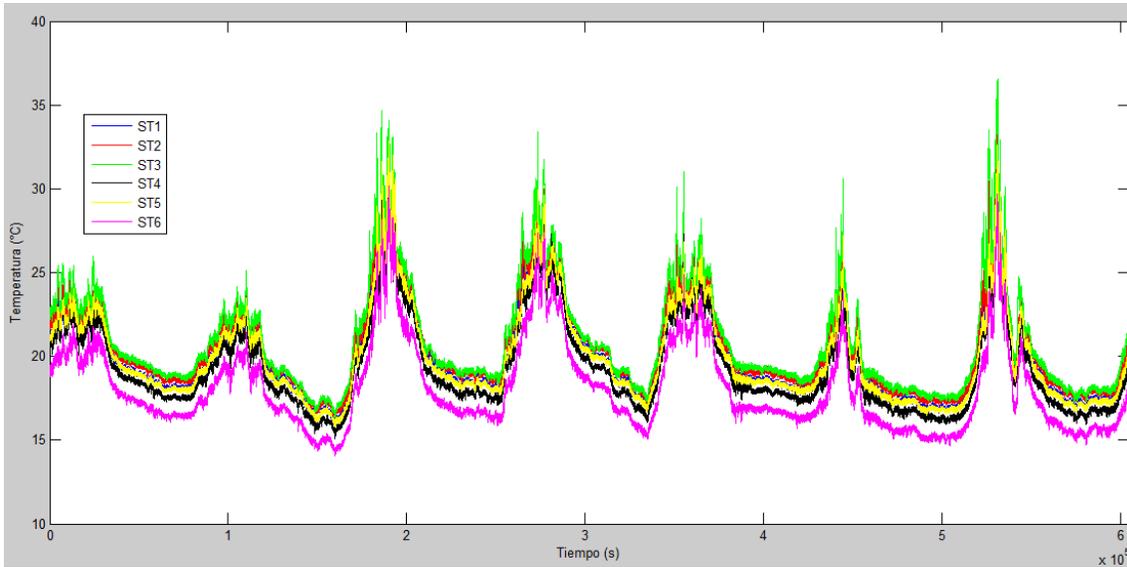


Figura 3. Datos de temperatura obtenidos durante una semana

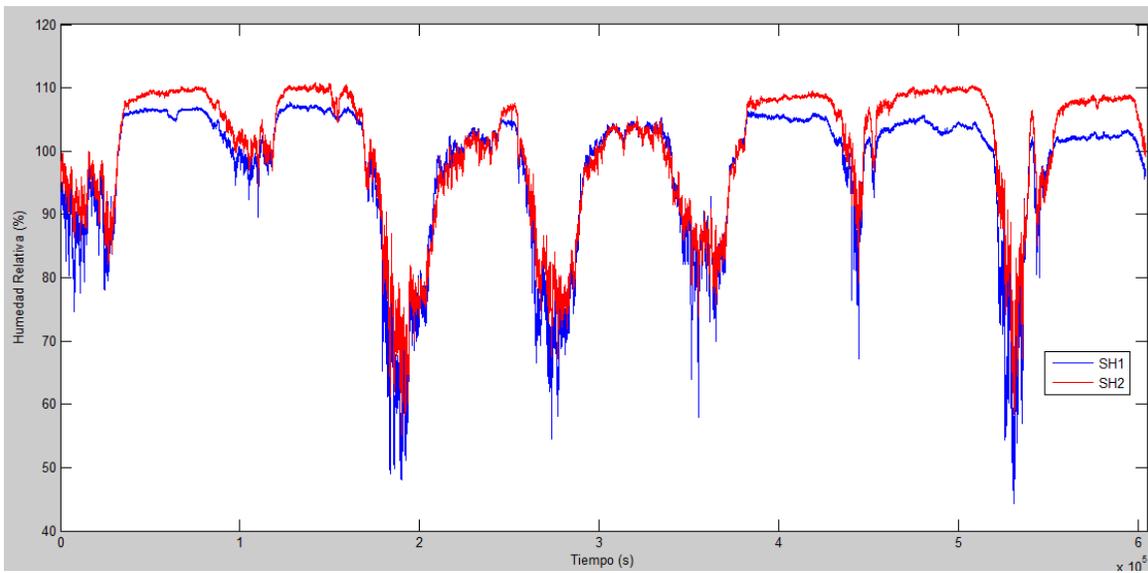


Figura 4. Datos de humedad relativa obtenidos durante una semana

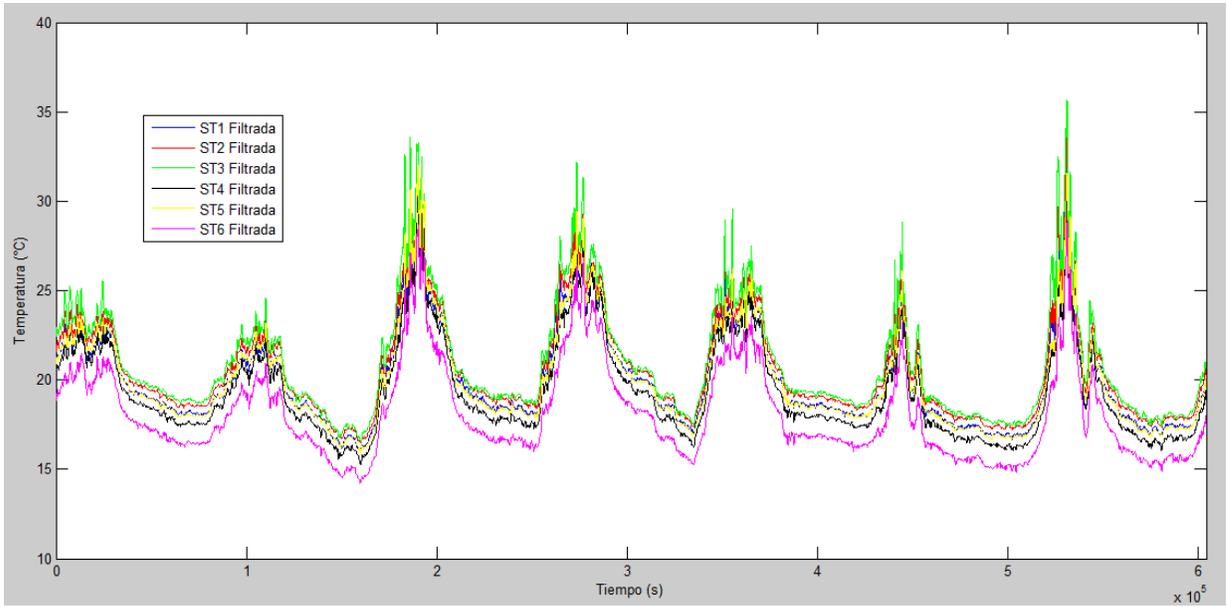


Figura 5. Datos de temperatura filtrados obtenidos durante una semana

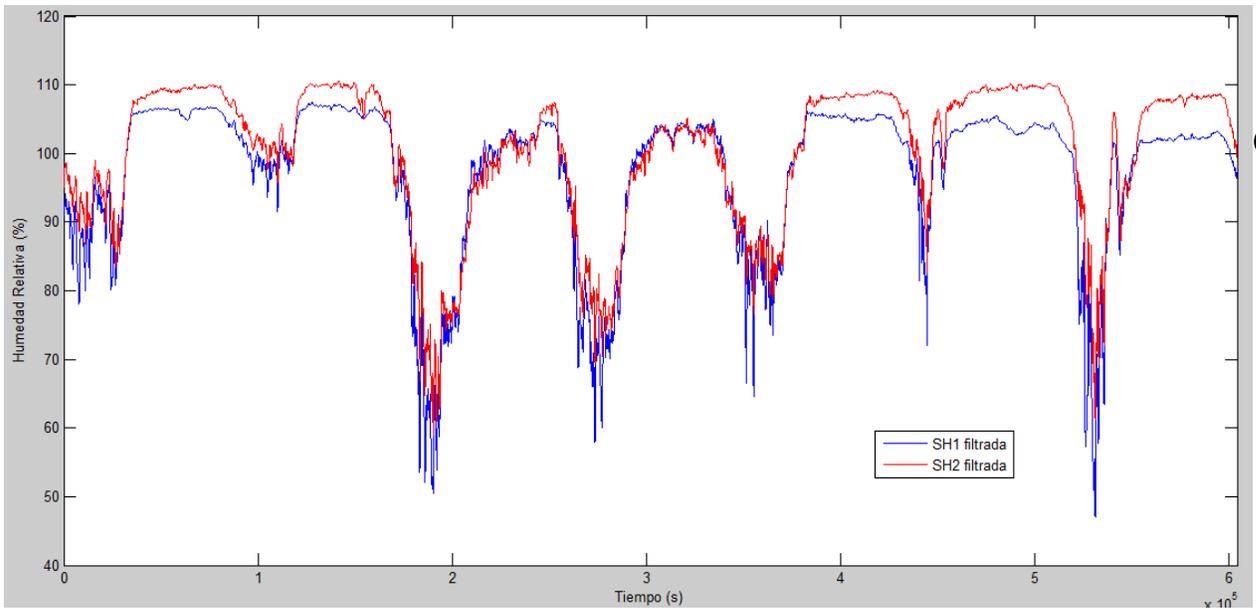


Figura 6. Datos de humedad relativa filtrados obtenidos durante una semana

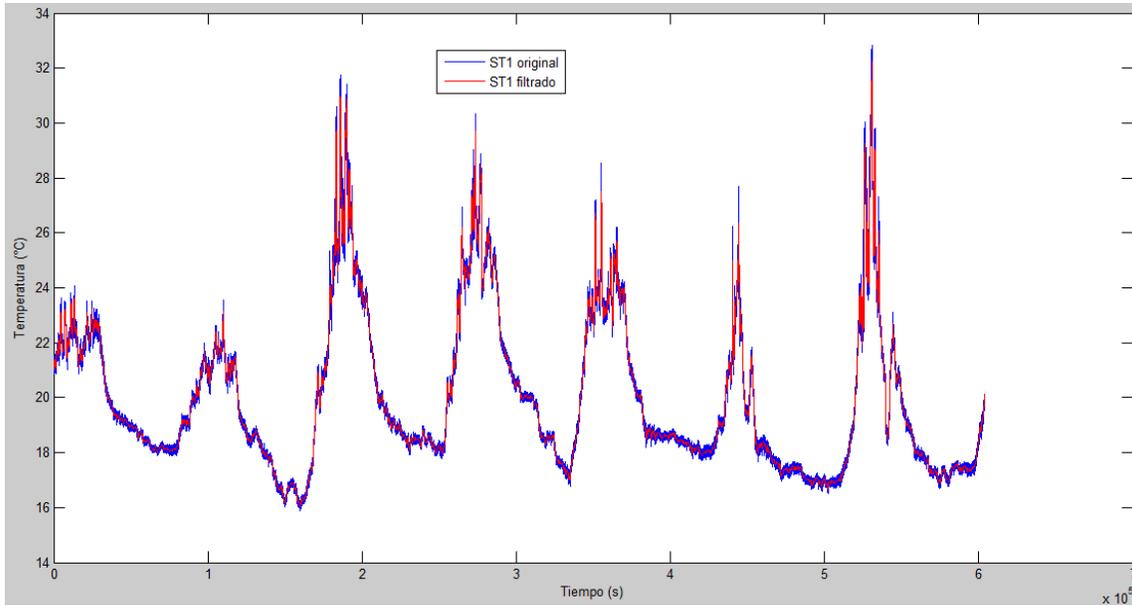


Figura 7. Comparativo entre la temperatura registrada por el ST1 antes y después de ser filtrada

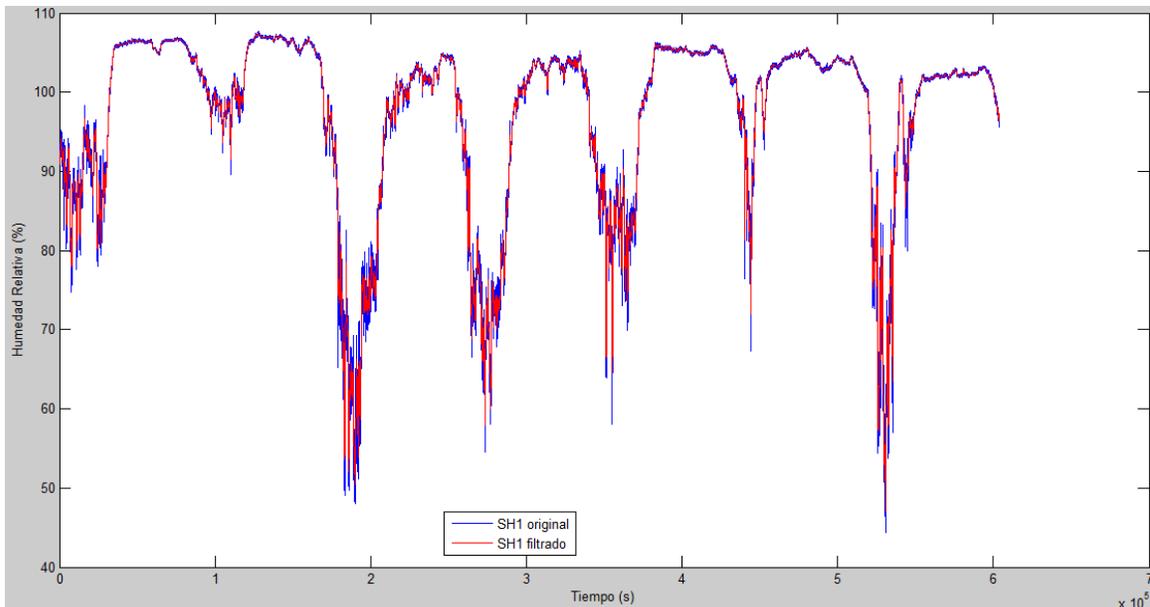


Figura 8. Comparativo entre la humedad relativa registrada por el SH1 antes y después de ser filtrada

Modelado a través de procesos Gaussianos.

Los diferentes trabajos consultados para obtener un modelo del comportamiento del microclima dentro de invernadero, de acuerdo a las variables medidas para este proyecto, se basan en modelos que inicialmente requieren construcciones de invernaderos acordes a las típicas, completamente cerradas y con ventilación natural pero ubicada estratégicamente y controlada de forma manual a través de diferentes formas.

Estos modelos adicionalmente requieren como parámetros de entrada las medidas de algunas variables externas como radiación solar, velocidad del viento, temperatura y humedad relativa externas, variables las cuales no fueron incluidas para ser medidas en este trabajo de investigación.

De acuerdo [12] un proceso Gaussiano se puede definir de la siguiente manera: “Un proceso aleatorio valuado real $X(t)$, $t \in \Gamma$, es llamado proceso Gaussiano si todas sus funciones de densidad de n-ésimo orden son Gaussianas n-variadas”, es decir, si se tiene un grupo o número finito de variables aleatorias que siguen una distribución Gaussiana conjunta, a este conjunto se le denomina un proceso Gaussiano.

Una de sus principales características es que las distribuciones de n-ésimo orden de un proceso Gaussiano dependen solo de dos funciones, la media $\mu_x(t)$ y la covarianza $C_{xx}(t, t+\tau)$ [12].

Procesos Gaussianos para regresión.

Inicialmente se debe partir de considerar el ruido sobre los valores observados de la señal objetivo y que están dados por:

$$t_n = y_n + \epsilon_n \quad (1)$$

Donde ϵ_n es una variable de ruido aleatorio seleccionada independiente para cada observación n y $y_n = y(x_n)$. Ahora, se considerarán los procesos de ruido que tienen una distribución Gaussiana tal que:

$$p(t_n|y_n) = \mathcal{N}(t_n|y_n, \beta^{-1}) \quad (2)$$

Donde β está representando un hiperparámetro de la precisión del ruido. Ya que el ruido es independiente para cada dato, una Gaussiana isotrópica de la forma:

$$p(\mathbf{t}|\mathbf{y}) = \mathcal{N}(\mathbf{t}|\mathbf{y}, \beta^{-1}\mathbf{I}_N) \quad (3)$$

Representa la distribución conjunta de los valores objetivos $\mathbf{t} = (t_1, \dots, t_n)^T$ condicionados a los valores de $\mathbf{y} = (y_1, \dots, y_n)$. Con \mathbf{I}_N como una matriz identidad de $N \times N$.

Por definición, en un proceso Gaussiano la distribución marginal $p(\mathbf{y})$ está dado por una Gaussiana cuya media es cero y cuya covarianza está definida por una matriz Gram llamada \mathbf{K} :

$$p(\mathbf{y}) = \mathcal{N}(\mathbf{y}|\mathbf{0}, \mathbf{K}) \quad (4)$$

La función kernel que determina \mathbf{K} es típicamente seleccionada para expresar la propiedad que, para puntos x_n y x_m que son similares, los correspondientes valores $y(x_n)$ y $y(x_m)$

estarán más fuertemente correlacionados que para puntos disimilares. Esto dependerá de la aplicación.

Para encontrar la distribución marginal $p(\mathbf{t})$, condicionada sobre los valores de x_n, \dots, x_m , es necesario integrar sobre \mathbf{y} . Esto puede ser hecho a través de los resultados que se pueden obtener de un modelo lineal Gaussiano, por lo tanto se tiene:

$$p(\mathbf{t}) = \int p(\mathbf{t}|\mathbf{y}) p(\mathbf{y}) d\mathbf{y} = \mathcal{N}(\mathbf{t}|\mathbf{0}, \mathbf{C}) \quad (5)$$

Donde la matriz de covarianza \mathbf{C} tiene elementos:

$$C(x_n, x_m) = k(x_n, x_m) + \beta^{-1} \delta_{nm} \quad (6)$$

El resultado anterior refleja el hecho de que las dos fuentes Gaussianas de aleatoriedad, es que se asociaron con $y(x)$ y con ϵ , son independientes y sus covarianzas simplemente se suman.

Resultados y discusión

Las características del invernadero ubicado en la unidad agroecológica La Aldana de la Universidad del Quindío, no son las más apropiadas para realizar un análisis del comportamiento del microclima dentro de él, debido a que su construcción no cumple con ninguna de las condiciones mínimas para establecer cambios significativos de temperatura o humedad con respecto al exterior. Entre las principales falencias del sistema constructivo del invernadero, está la falta de hermetismo lo cual dificulta el control de vientos, para disminuir o aumentar la temperatura, esto desencadena también en que la humedad relativa se aumenta considerablemente en las horas de la mañana, entrando el sistema en saturación por humedad sobrepasando el 100%.

A pesar de no tener condiciones apropiadas para la realización de este trabajo de investigación, si es posible analizar las generalidades del comportamiento de las variables de temperatura y humedad relativa, las cuales en el transcurso del tiempo mostraron características interesantes de su evolución en el tiempo y siguiendo, como era de esperarse, las curvas de comportamiento teóricas o típicas para este tipo de sistemas.

Se debe realizar una breve explicación espacial del invernadero, con el fin de explicar las características del comportamiento de algunos resultados obtenidos con algunos sensores y que están directamente relacionados con la ubicación de los mismos dentro del invernadero. En la Figura 2, los sensores ubicados en la parte izquierda de la figura (sensor de temperatura ST1, sensor de temperatura ST6 y sensor de humedad relativa SH2) se encuentran cercanos a una reserva natural boscosa (jardín botánico de la Universidad del Quindío), la cual crea ambientes más fríos en esta zona del invernadero y por lo tanto más húmedos. En el análisis de las gráficas siguientes se sustentarán algunos resultados con base en esta característica del entorno.

Un primer bloque de datos fue tomado entre el 11 de abril de 2013 hasta el 15 de agosto del mismo año, la evolución temporal de las variables de temperatura y humedad relativa serán mostradas por semanas, con el fin de observar el comportamiento de cada una de

ellas, cuando sea necesario se analizará el comportamiento en rangos de tiempo más pequeños para alimentar la discusión y al análisis de estos resultados.

Adicionalmente y para efectos de este análisis, la evolución temporal de las variables será mostrada en promedio por horas, con el fin de facilitar la visualización de algunos puntos o intervalos de tiempo los cuales son interesantes de observar y para analizar el comportamiento de las variables climáticas.

Semana 1 - del 11 al 18 de abril

En la figura 9 es posible ver el comportamiento por horas de la temperatura en seis zonas del invernadero, ubicadas según se muestra en la figura 2; de igual manera, en la figura 10 se puede ver la evolución por horas de la humedad relativa durante la semana 1, esta información fue obtenida con los sensores ubicados como se puede ver en la figura 3.

Los sensores de temperatura ST1 (azul), ST2 (rojo) y ST3 (negro) se muestran en la gráfica de arriba de la figura 9, los sensores ST6 (azul), ST5 (rojo) y ST4 (negro) se pueden observar en la parte de abajo. Las gráficas en azul (ST1 y ST6) muestran la tendencia de más baja temperatura hacia la zona izquierda del invernadero, sobresaliendo el ST6 con el registro continuo de las temperaturas más bajas (por su ubicación cerca de la zona boscosa ver figura 2).

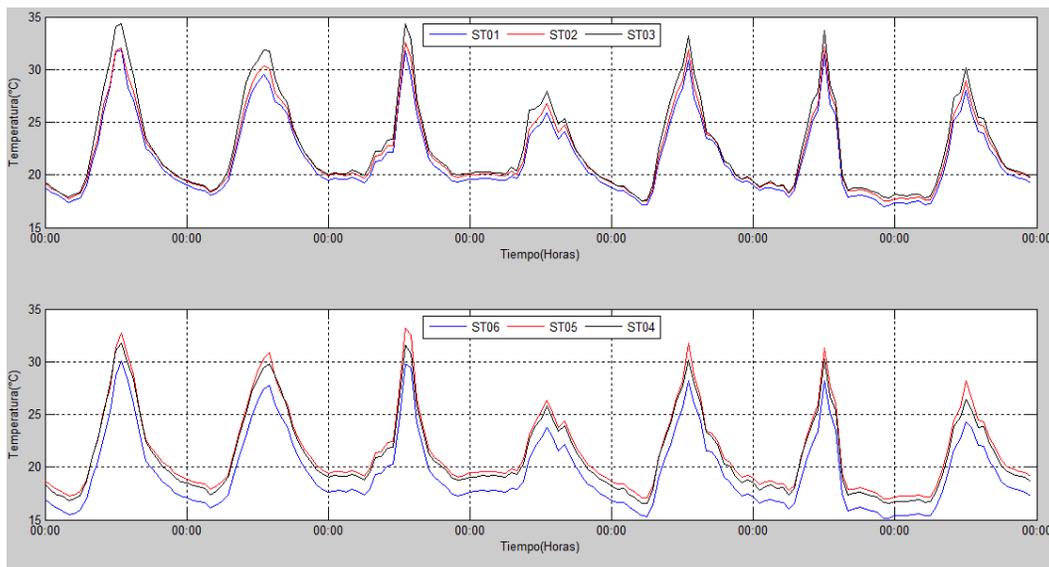


Figura 9. Comportamiento por promedio de hora de la temperatura en la semana 1. Arriba – ST1 (azul), ST2 (rojo) y ST3 (negro); Abajo - ST6 (azul), ST5 (rojo) y ST4 (negro)

En la figura 10, se puede ver como la humedad relativa (SH2 en azul) en el sector izquierdo del invernadero (figura 2) es más alta que en el sector derecho, esto debido a la zona boscosa aledaña al invernadero, la cual genera condiciones de baja temperatura y por lo tanto humedad relativa más alta, principalmente entre las 10 pm y las 2 am, con valores máximo de humedad relativa a la media noche (00:00).

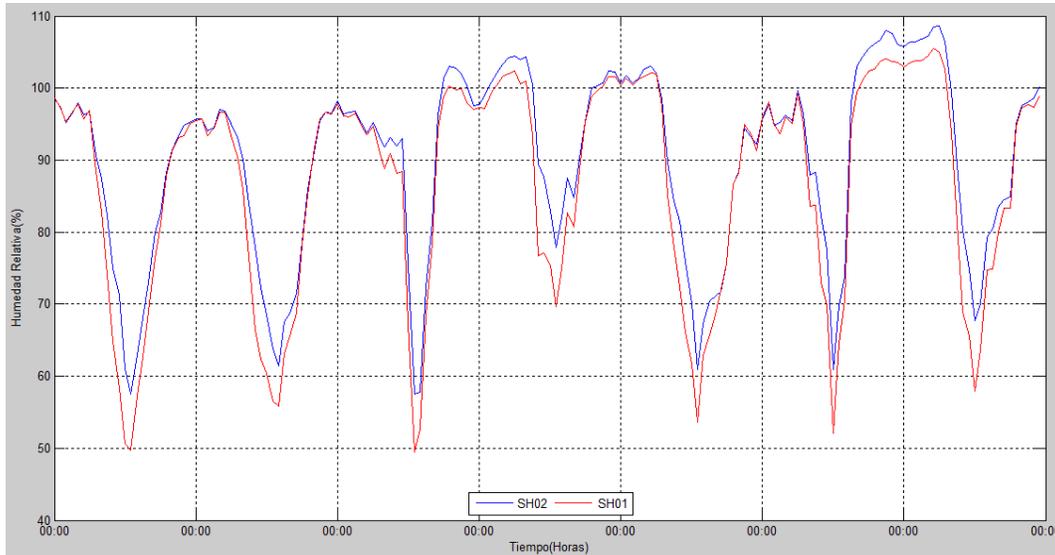


Figura 10. Comportamiento por promedio de hora de la humedad relativa en la semana 1. SH1 (rojo); SH2 (azul)

Los valores 00:00 en el eje temporal de las figuras 9 y 10, indican los comienzos de cada día, se puede observar un comportamiento diferente en el cuarto día, donde se presentaron las temperaturas más bajas en la franja de tiempo entre las 11 am y las 2 pm, con temperaturas entre 22°C y 26°C y una humedad relativa entre el 70 % y el 80%. A diferencia de los días restantes, donde se pueden observar temperaturas superiores a las 30°C y humedad relativa variando entre el 50% y el 65%.

102

En las horas de la madrugada del quinto día, después de las 00:00 hasta las 06:00, se puede ver una temperatura muy baja entre los 15°C y los 17°C (gráfica de debajo de la figura 9), lo cual genera una saturación de agua llevando a una humedad relativa superior al 100%. Un comportamiento similar se observa entre la noche del sexto día y el amanecer del séptimo día, donde la temperatura mantuvo en valores constantes entre 17°C y 18°C en la parte de arriba de la figura 9 y por debajo de los 16°C en las gráficas de debajo de la misma figura, esto valores de temperatura bajos generan la sobresaturación de agua que conlleva a valores de humedad relativa por encima del 100%. Es interesante observar como en el final del quinto día y el amanecer del sexto día, la humedad relativa no sufre sobresaturación y mantiene una humedad relativa por debajo del 100%, a pesar de que la temperatura estuvo entre los 17 y los 19 °C.

Semana 11: del 20 al 27 de junio

Durante esta semana se presentaron algunas variaciones del microclima interesantes para tener en cuenta dentro del proceso de análisis de sus características; en general se puede observar que la temperatura estuvo dentro de rangos muy similares durante los siete días de la semana, tanto en las noches como en el día. En el día y en la franja del medio día (11 am a 3 pm) la temperatura estuvo por encima de 26°C alcanzando máximas de 33°C (Figura 11

gráfica de arriba), la gráfica de abajo de la figura 11 se puede ver que estos sensores tuvieron temperaturas más baja pero dentro de los rangos anteriores (entre los 25°C y los 30°C), en la figura 12 se observa el comportamiento de la humedad relativa.

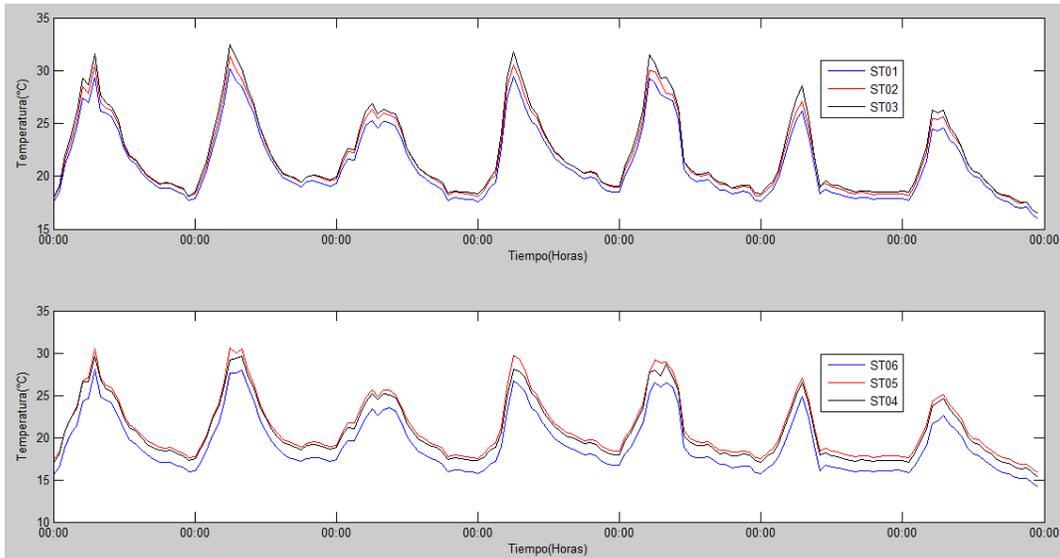


Figura 11. Comportamiento hora a hora (promediada) de la temperatura en la semana 11. Arriba – Sensores de temperatura 1 (azul), 2 (rojo) y 3 (negro); Abajo – Sensores de temperatura 6 (azul), 5 (rojo) y 4 (negro)

103

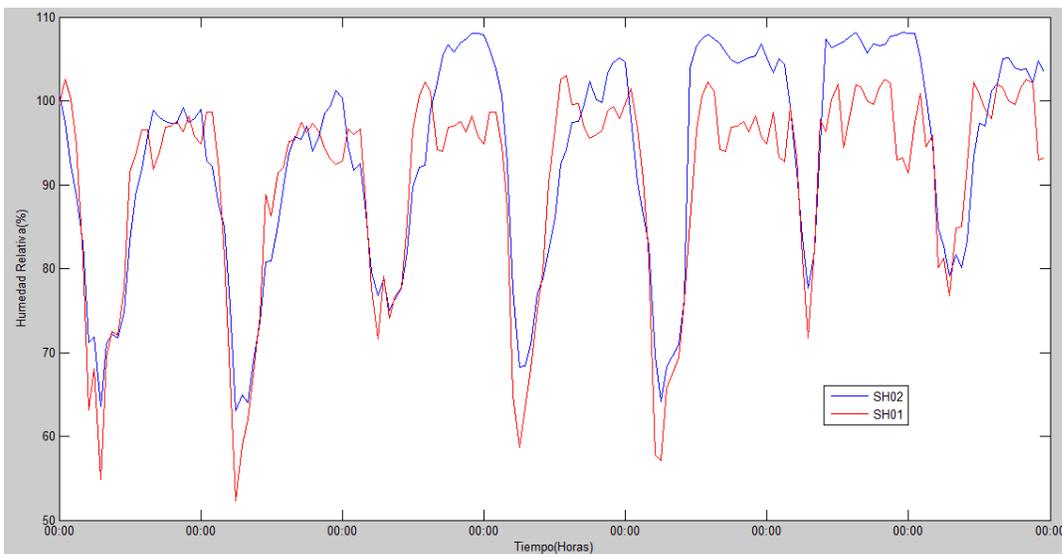


Figura 12. Comportamiento hora a hora (promediada) de la humedad relativa en la semana 11.

Modelo de temperatura y humedad relativa

Para este trabajo en particular se obtuvieron modelos independientes para cada sensor de temperatura y de humedad relativa, los cuales fueron modelados para series de tiempo diarias. La metodología seguida para obtener estos modelos se describe enseguida:

Base de datos para los modelos. Como ya fue explicado anteriormente, se tienen series de tiempo para siete días y con una frecuencia de muestreo de un (1) segundo, por lo cual se cuentan con series de tiempo, para 16 semanas, conformadas por 604800 datos (86400 datos diarios). La herramienta utilizada para modelar usando procesos Gaussianos [12], no permitía series de tiempo de más de 10000 datos para su uso directo en procesos de regresión (existen técnicas que permiten adaptar series de tiempo con más datos pero que no fueron consideradas para este trabajo), lo cual obligó a reducir las series de tiempo a través de un remuestreo de las mismas, el cual consistió en tomar un dato cada minuto, reduciéndolas a 10080 dato por semana (1440 datos por día). Por lo tanto fue necesario dividir la información semanal en series de tiempo diarias con 1440 datos para el proceso de entrenamiento y validación de los modelos Gaussianos.

Procedimiento para el modelado. La herramienta para regresión usando procesos Gaussianos utilizada es la creada por [12], el proceso de aprendizaje es de tipo supervisado y tiene cuatro aspectos previos que se tuvieron en cuenta durante el entrenamiento y validación de los modelos.

- Se decidió utilizar funciones de covarianza tipo exponencial cuadrática y Matèrn 1, 3 y 5, con funciones media cero y con función de verosimilitud de tipo Gauss.
- Las series de tiempo fueron divididas de forma aleatoria en dos conjuntos, uno para entrenamiento con el 70% de los datos y otro para validación con el 29.9% de los datos, para esta división se utilizó la herramienta de Matlab® *dividerand* que selecciona de manera aleatoria los datos para entrenar y para validar.
- Se realizaron varios procesos de entrenamiento y prueba con las diferentes funciones covarianza y con diferentes semillas ‘seed’ aleatorias, con el fin de obtener las cinco (5) semillas que generaron los mejores resultados y la mayor estabilidad de los mismos, para de esta forma garantizar congruencia en los resultados obtenidos.
- Para las medidas de error se utilizó el error cuadrático medio estandarizado (SMSE – siglas en inglés) y con el fin de incluir la varianza para el cálculo del error se utilizó la media de las pérdidas logarítmicas estandarizadas (MSLL – siglas en inglés)

Visualización días a modelar. Para este trabajo se presentan los modelos resultantes para los seis (6) sensores de temperatura y para los dos sensores de humedad relativa correspondientes al primer día de toma de datos dentro del invernadero. La figura 13 muestra el comportamiento temporal de los sensores (arriba temperatura - abajo humedad relativa):

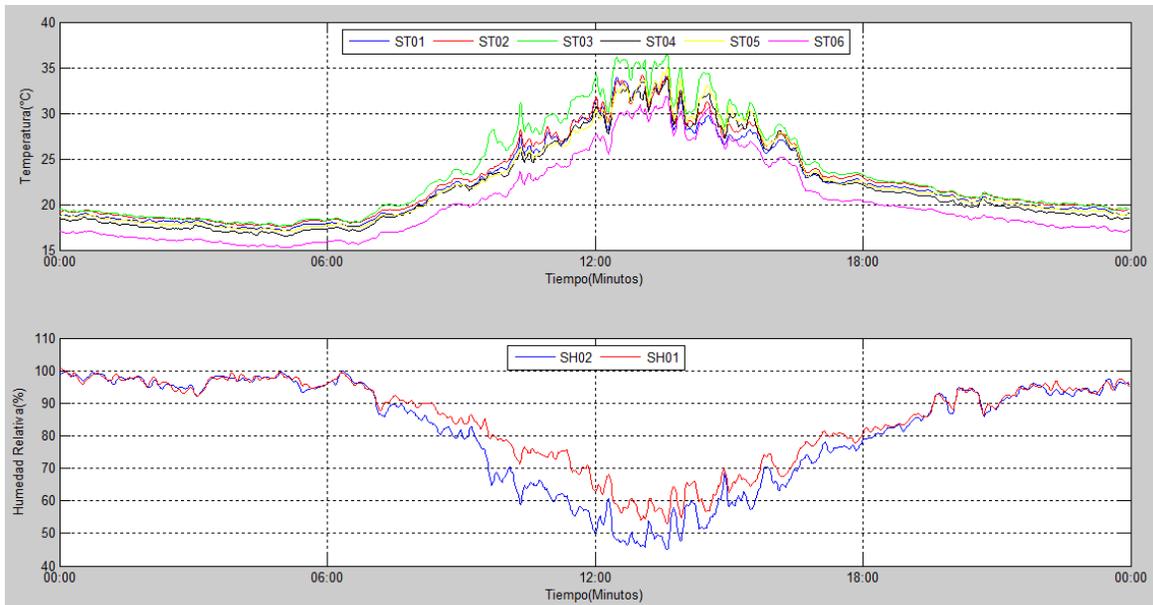


Figura 13. Datos obtenidos por los sensores para el día 1.

Modelos obtenidos. Inicialmente se mostrarán los resultados obtenidos para cuatro (4) funciones de covarianza probadas, cada una de ellas evaluada con cinco (5) semillas aleatorias usadas para obtener cinco (5) conjuntos diferentes de entrenamiento y validación de los modelos Gaussianos. Los resultados que se van a mostrar corresponden al promedio de SMSE y MSLI obtenidos para cada función de covarianza de los modelos para el día 11 de abril de 2013.

105

Cada función de covarianza fue entrenada y validada con cinco semillas aleatorias que generaron cinco conjuntos de entrenamiento y validación para los modelos Gaussianos, por lo tanto, el valor promedio obtenido de SMSE y MSLI corresponde a la media y a la desviación estándar de los resultados obtenidos a partir de los cinco conjuntos de validación. El valor SMSE corresponde al error y por lo tanto aquellos valores cercanos a cero indican el modelo validado es muy bueno; aquellos valores de MSLI muy negativos indican un grado de confianza de la función de verosimilitud, lo cual está asociado a varianzas predictivas del modelo obtenido.

Tabla 1. Sensor de humedad relativa 1

Sensor de Humedad Relativa 1 (SHR1)		
Covarianza\Tipo de error	SMSE	MSLI
Exponencial C.	0.0320±0.0049	- 4.2362±0.0263
Matern 1	0.0892±0.0176	-

		3.4726±0.0181
Màtern 3	0.0293±0.0024	- 4.3016±0.0299
Màtern 5	0.0314±0.0035	- 4.2555±0.0254

Las tablas 1 y 2 muestran los resultados de los modelos obtenidos para los dos sensores de humedad relativa; como se puede observar en ambos la función de covarianza Màtern 3 alcanzó los errores promedio más bajos de SMSE y los valores más negativos de para el MSLL, por lo tanto las gráficas de los modelos validados y probados que serán mostrados más adelante, corresponden a los obtenidos para esta función de covarianza.

Tabla 2. Sensor de humedad relativa 2

Sensor de Humedad Relativa 2 (SHR2)		
Covarianza\Tipo de error	SMSE	MSLL
Exponencial C.	0.0414±0.0059	- 4.1248±0.0324
Màtern 1	0.1155±0.0227	- 3.4003±0.0246
Màtern 3	0.0362±0.0052	- 4.2269±0.0338
Màtern 5	0.0367±0.0039	- 4.1775±0.0367

Las tablas 3, 4, 5, 6, 7 y 8 muestran los resultados de los modelos obtenidos para los seis sensores de temperatura; como se puede observar en todos ellos, la función de covarianza Màtern 3 alcanzó los errores promedio más bajos de SMSE y los valores más negativos de para el MSLL, por lo tanto las gráficas de los modelos validados y probados que serán mostrados más adelante, corresponden a los obtenidos para esta función de covarianza.

Tabla 3. Sensor de temperatura

Sensor de Temperatura 1 (T1)		
Covarianza\Tipo de error	SMSE	MSLL
Exponencial C.	0.0203±0.0038	- 4.3691±0.1204
Màtern 1	0.0706±0.0108	- 3.4628±0.0200
Màtern 3	0.0177±0.0012	- 4.4900±0.0462
Màtern 5	0.0199±0.003	- 4.4545±0.0950

Tabla 4. Sensor de temperatura 2

Sensor de Temperatura 2 (T2)		
Covarianza\Tipo de error	SMSE	MSLL
Exponencial C.	0.0246±0.0098	- 4.27981±0.1542
Màtern 1	0.0611±0.0140	-3.5194±0.0189
Màtern 3	0.0215±0.0102	-4.4024±0.1027
Màtern 5	0.0252±0.0108	-4.3049±0.1675

Tabla 5. Sensor de temperatura 3

Sensor de Temperatura 3 (T3)		
Covarianza\Tipo de error	SMSE	MSLL
Exponencial C.		
Màtern 1	0.0767±0.0116	-

		3.4170±0.0147
Màtern 3	0.0175±0.0048	- 4.4240±0.0513
Màtern 5	0.0185±0.0046	- 4.4487±0.1029

Tabla 6. Sensor de temperatura 4

Sensor de Temperatura 4 (T4)		
Covarianza\Tipo de error	SMSE	MSLL
Exponencial C.	0.0176±0.0045	- 4.4293±0.0974
Màtern 1	0.0581±0.0130	- 3.5284±0.0112
Màtern 3	0.0154±0.0056	- 4.4962±0.0722
Màtern 5	0.0170±0.0052	- 4.4743±0.1044

Tabla 7. Sensor de temperatura 5

Sensor de Temperatura 5 (T5)		
Covarianza\Tipo de error	SMSE	MSLL
Exponencial C.	0.0175±0.0044	- 4.4149±0.1017
Màtern 1	0.0584±0.0159	- 3.5430±0.0160
Màtern 3	0.0165±0.0062	- 4.4953±0.0752
Màtern 5	0.0170±0.0052	- 4.4205±0.1266

Tabla 8. Sensor de temperatura 6

Sensor de Temperatura 6 (T6)		
Covarianza\Tipo de error	SMSE	MSLL
Exponencial C.	0.0256±0.0060	- 4.2830±0.0931
Màtern 1	0.0459±0.0050	- 3.6828±0.0165
Màtern 3	0.0225±0.0060	- 4.3514±0.0963
Màtern 5	0.0236±0.0055	- 4.3036±0.0885

1. **Visualización de los modelos obtenidos.** En las figuras siguientes se mostrarán los mejores modelos obtenidos, con el conjunto de validación, para cada sensor con la función de covarianza Màtern 3 y se mostrarán las gráficas obtenidas con estos modelos probados con un conjunto de datos temporales tomados cada 5 minutos dentro de un intervalo entre 0 minutos y 1440 minutos.

- En las figuras 14 y 16 se tiene en la parte de arriba la gráfica con los datos originales de validación para los sensores de humedad relativa 1 y 2 (SRH1 y SRH2) respectivamente, obtenidos con la semilla aleatoria que arrojó el menor valor de SMSE y el valor más negativo de MSLL y corresponden al 30% de los datos medidos por los sensores. Los modelos estimados con el proceso Gaussiano son muy fieles a los valores medidos, esto se puede ver en la parte de debajo de las figuras mencionadas, donde se muestra un intervalo más corto de tiempo, con el fin de ver más detalladamente el modelo estimado (rojo) y los datos medidos (azul), el modelo se obtuvo con un grado de confianza que se muestra en una franja gris.

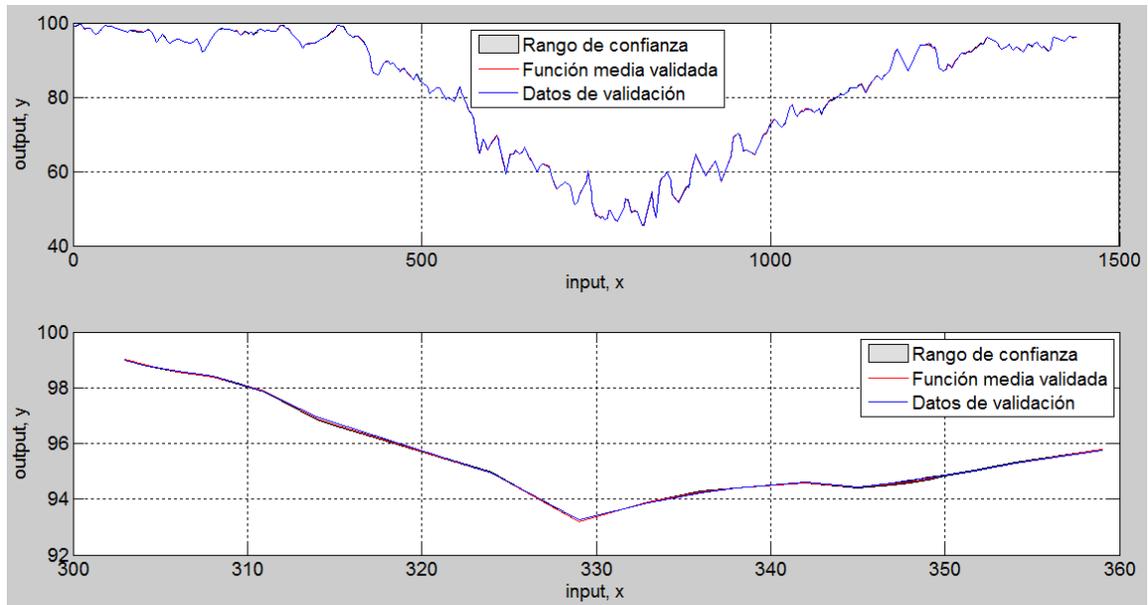


Figura 14. Modelo validado para el sensor de humedad relativa 1 (SRH1)

- En las figuras 15 y 17 se muestran los resultados de probar el los modelos obtenidos para los sensores de humedad relativa 1 y 2 (SRH1 y SRH2) respectivamente, con datos elegidos cada cinco minutos en un intervalo de tiempo entre 0 minutos y 1440 minutos, estos datos muestran el comportamiento del modelo en esos instantes de tiempo, el cual sigue la dinámica del comportamiento de las variables analizadas.

110

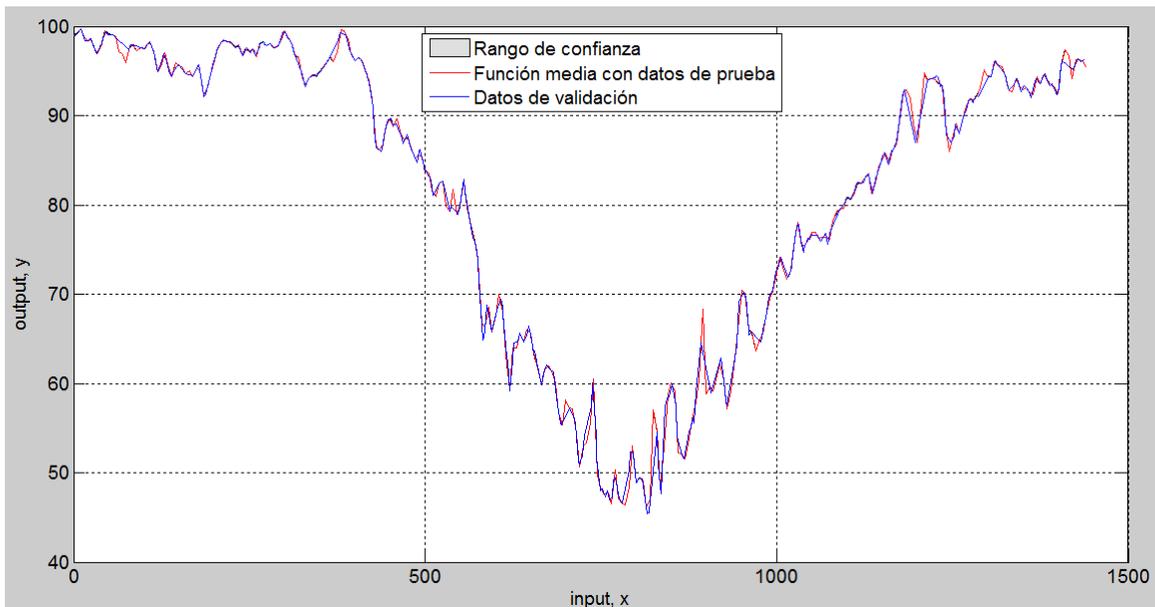


Figura 15. Modelo probado para el SRH1

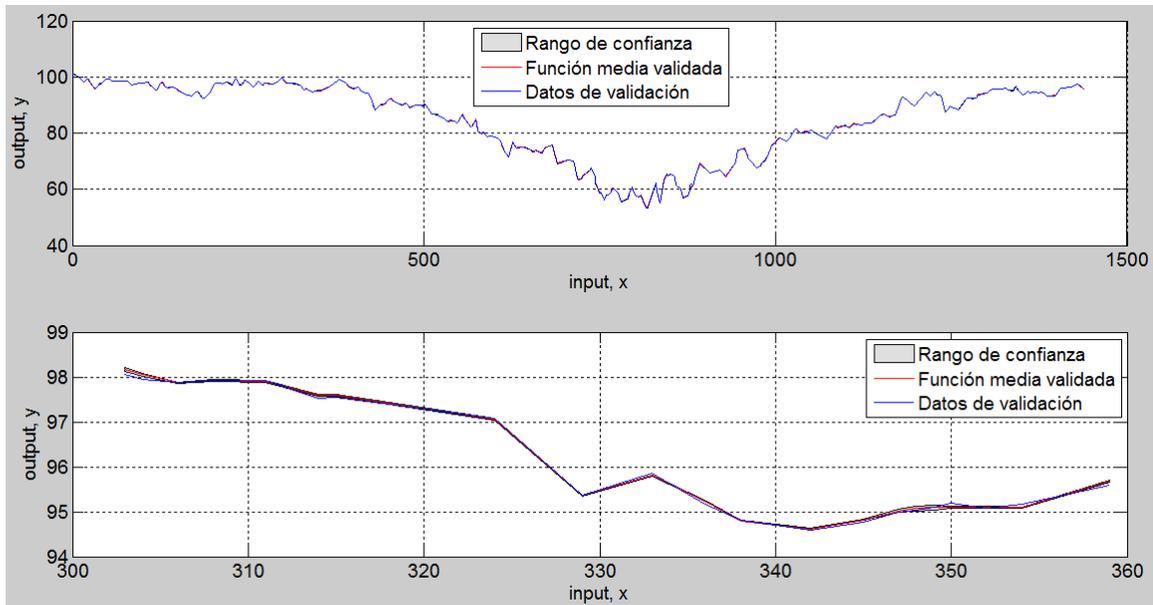


Figura 16. Modelo validado para el sensor de humedad relativa 2 (SRH2)

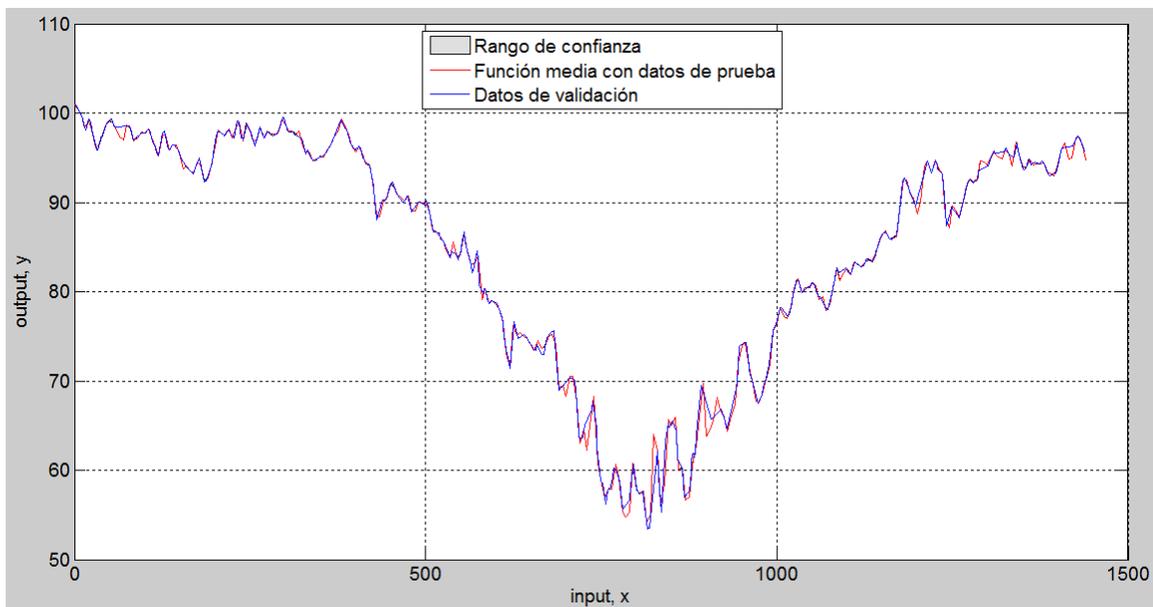


Figura 17. Modelo probado para el SRH2

En las figuras 18, 19 se tiene en la parte de arriba la gráfica con los datos originales de validación para el sensor de Temperatura 1, obtenido con la semilla aleatoria que arrojó el menor valor de SMSE y el valor más negativo de MSL y corresponden al 30% de los datos medidos por los sensores. Los modelos estimados con el proceso Gaussiano son muy fieles a los valores medidos, esto se puede ver en la parte de debajo de las figuras mencionadas, donde se muestra un intervalo más corto de tiempo, con el fin de ver más detalladamente el modelo estimado (rojo) y los datos medidos (azul), el modelo se obtuvo con un grado de confianza que se muestra en una franja gris.

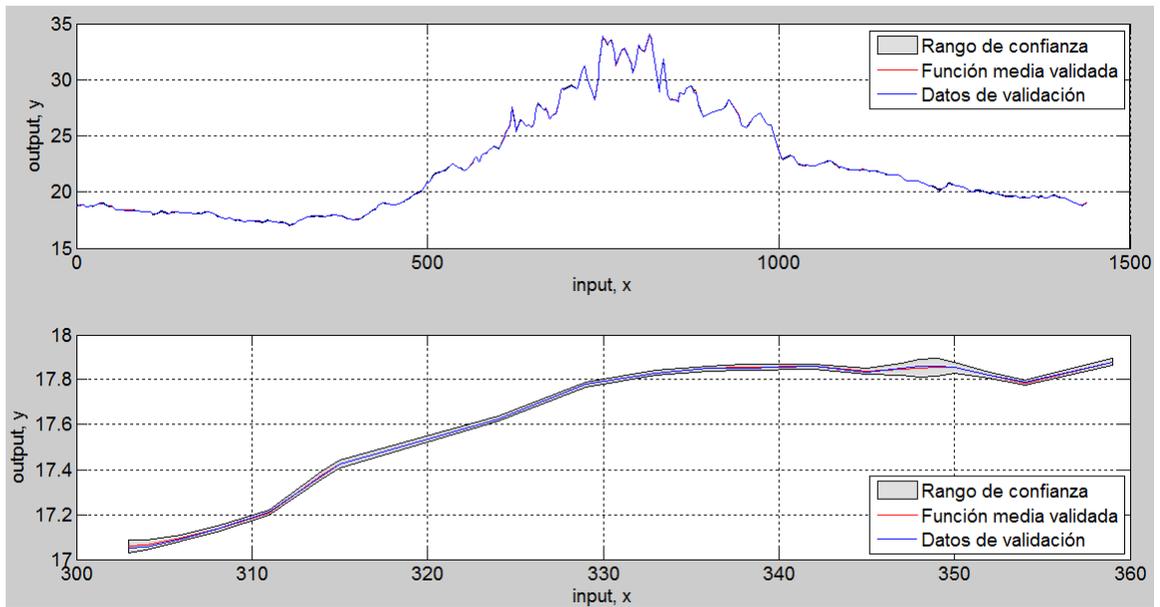


Figura 18. Modelo validado para el sensor de temperatura 1 (ST1)

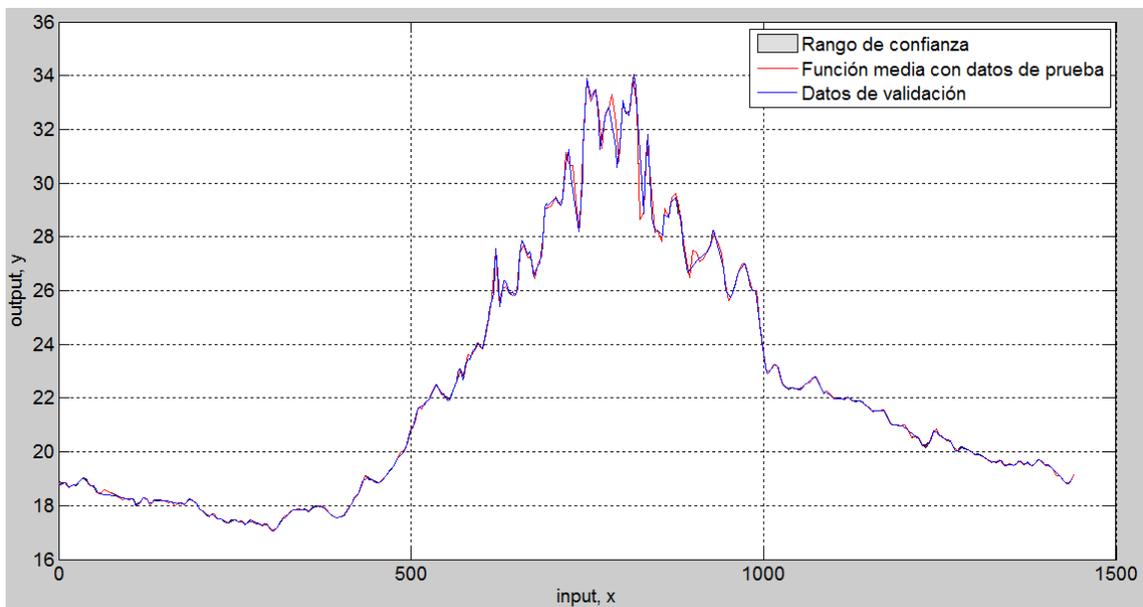


Figura 19. Modelo probado para el ST1

Conclusiones

1. Las características micro-climáticas de un sistema de invernadero, están directamente ligadas al tipo de construcción, forma y materiales de este, ya que de su correcta elección depende que las condiciones controladas cumplan los parámetros mínimos para el buen desarrollo de la plantación que se tenga dentro de él.
2. La estructura constructiva del invernadero de la Unidad Agroecológica la Aldana de la Universidad del Quindío, no cumple con las condiciones óptimas para determinar un buen modelo del microclima interno, ya que por su condición abierta sin hermetismo permite que el flujo de aire sea constante y en cualquier sentido, lo que imposibilita el control de variables como temperatura y humedad relativa fundamentales a la hora de proyectar el crecimiento de plántulas en el invernadero.
3. La humedad relativa es una variable muy importante para el control del microclima de un invernadero, en este caso específico, tiene una mayor relevancia debido a la zona boscosa que rodea la estructura, la cual aumenta notablemente el porcentaje de humedad llevándolo a la saturación en gran parte de la madrugada y la mañana.
4. La radiación solar que es de vital importancia en el desarrollo de las plantas es otra de las variables que en momentos se puede ver afectada por la incidencia del follaje de la vegetación externa al invernadero que le proporciona en algunos lapsos de tiempo sombra a la plantulación.
5. El modelo matemático del comportamiento del microclima dentro del invernadero no fue viable de realizar por varias razones:
 - Los modelos que se describen en muchas referencias parten de modelos que requieren parámetros de entrada y salida para obtener un modelo de comportamiento, generalmente los parámetros de entrada están asociados a sensores o sistemas de instrumentación ubicados en el exterior del invernadero, los cuales no fueron instalados particularmente para este trabajo, por lo cual se está explorando y está en fase de estudio la aplicación de modelos obtenidos a partir de procesos estocásticos como los Gaussianos, pero esta fase están en desarrollo.
 - Todos los modelos teóricos que se analizaron en la revisión bibliográfica estaban asociados a invernaderos construidos bajo consideraciones muy precisas en la forma, los materiales, tipo de ventilación entre otras especificaciones, condiciones que el invernadero ubicado en la unidad agroecológica La Aldana, no cumple y por lo tanto no se acomoda a ninguno de estos modelos teóricos; esto también generó dificultades para obtener uno de los objetivos del trabajo de investigación.

Referencias bibliográficas

- [1] F. Castillo, y F. Castellvi. Agro meteorología. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. 1996.
- [2] L. Enrique, W. Wilman, D. Bayona, Sistema de Monitoreo y Control Vía Inalámbrica de Humedad y Temperatura para Invernaderos, 2008.
- [3] J. Hernández, I. Escobar, N. Castilla, La radiación Solar en Invernaderos mediterráneos, Octubre 2001.
- [4] D. Marlow, Aporte de CO₂ en un Invernadero
- [5] I. López, A. Rojano, W. Ojeda, R. Salazar. Modelos arx para predecir la temperatura del aire de un invernadero: Una metodología. Agrociencia. 2007 Feb-Mar; 41(2):181-192.
- [6] N. Iglesias. Efecto del microclima de un invernadero de la Patagonia Norte (Argentina) sobre parámetros de crecimiento y productividad de tomate. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA); 2002.
- [7] F. Ruiz, C. Cotrino. Identificación de un modelo del clima en un invernadero mediante métodos por subespacios. Ingeniería e investigación. 2010 Ago; 30(2):157-167.
- [8] N. Iglesias. Efecto del microclima de un invernadero de la Patagonia Norte (Argentina) sobre parámetros de crecimiento y productividad de tomate. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA); 2002.
- [9] F. Ruiz F. O., Cotrino C. E. Identificación de un modelo del clima en un invernadero mediante métodos por subespacios. Ingeniería e investigación. 2010 Ago; 30(2):157-16
- [10] Hoja de datos sensor de humedad relativa HIH-4000-002. [En línea] Marzo de 2016. Disponible en www.datasheet.octopart.com/HIH-4000-002-Honeywell-datasheet-62840.pdf
- [11] A. Arboleda y O. Cortés. Trabajo de grado Ángela y Oscar. “Sistema de instrumentación para el invernadero de la unidad agroecológica La Aldana de la Universidad del Quindío”. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electrónico, Universidad del Quindío. Armenia (Q), diciembre de 2010.
- [12] K. Sam Shanmugan and Arthur M. Breipohl. “Random Signals: Detection, Estimation and Data Analysis”. Wiley, Primera Edición. 1988