

SIMULACIÓN CLIMÁTICA DE UN INVERNADERO PARA ROSAS

Andrés Ricardo Duarte Gualdrón ¹, Diego Camilo Mahecha Fernández ², Robinson Osorio Hernández³

¹Ingeniero Agrícola, Facultad de Ingeniería, estudiante Maestría en Ingeniería – Ingeniería de Biosistemas, Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá.

² Ingeniero Agrícola, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá.

³ PhD, MSc, Ingeniero Agrícola, profesor Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, Grupo de Investigación Ingeniería de Biosistemas, rosorioh@unal.edu.co

RESUMEN

La producción de rosas en Colombia se desarrolla casi en su totalidad en invernaderos ventilados en forma natural. El objetivo de este trabajo fue replicar la caracterización del microclima generado en el interior de un invernadero a través de Dinámica de Fluidos Computacional, teniendo en cuenta la evapotranspiración del cultivo. El modelo CFD utilizado fue validado mediante recopilación de datos experimentales recolectados en campo, enfocándose en las variables de temperatura y humedad relativa. Los resultados obtenidos muestran que para la condición evaluada el microclima generado varía si se tiene en cuenta la evapotranspiración en el modelo, aunque las condiciones encontradas siguen siendo óptimas para la producción de rosas.

Palabras clave: simulación CFD; bioclimática; producción vegetal; ambiente protegido; ambiente higrotérmico.

Recibido: 18 de julio de 2022. Aceptado: 19 de septiembre de 2022

Received: July 18, 2022. Accepted: September 19, 2022

ROSES GREENHOUSE CLIMATE SIMULATION

ABSTRACT

Rose production in Colombia takes place almost entirely in naturally ventilated greenhouses. The objective of this work was to replicate the characterization of the microclimate generated inside a greenhouse through the modeling of air flows using CFD software, taking into account the evapotranspiration of the crop. The CFD-3D model used was validated by collecting experimental data collected in the field, focusing on the variables of temperature and relative humidity. The results obtained show that for the evaluated condition the generated microclimate varies if evapotranspiration is taken into account in the model, although the conditions found are still optimal for rose production.

Keywords: *CFD simulation; bioclimatic, vegetal production, protected environment, hygrothermal environment.*

Cómo citar este artículo: Duarte-Gualdrón, A. R., Mahecha-Fernández, D. C., Osorio-Hernández, R. (2022). "Simulación climática de un invernadero para rosas", *Revista Politécnica*, 18(36), 107-114. DOI:10.33571/rpolitec.v18n36a8



1. INTRODUCCIÓN

En Colombia, la floricultura es la tercera fuente de divisas del país, sólo superado por el petróleo y el café. Este sector es un gran generador de empleo en la zona central del país, ya que cada hectárea cultivada genera aproximadamente 17 empleos y Colombia cuenta con más de 8600 Ha sembradas en flores, lo que genera más de 146000 empleos [1]. Colombia es uno de los principales exportadores de flores a nivel mundial y es el principal exportador a Estados Unidos [2]. La producción de rosas (*Rosa sp.*) en Colombia se desarrolla casi en su totalidad en invernaderos ventilados en forma natural.

Por otra parte, un invernadero es un espacio cerrado, normalmente por polietilenos, dentro del cual se puede obtener un clima diferente al que se encuentra fuera de este, es decir, un clima diferente al clima que se tiene en el lugar donde este se ubica, lo que permite optimizar las cosechas, esto ha hecho que los productores agrícolas mejoren la calidad de sus productos y por ende sus ingresos, haciendo así que este pueda realizar una mayor inversión en el mejoramiento de sus invernaderos automatizando los mismos y así haciendo más eficiente su cultivo [3].

El microclima que se genera al interior de los invernaderos está directamente relacionado con el clima del ambiente exterior. Cuando el invernadero no cuenta con un controlador de clima activo se pueden presentar problemas en la producción [4]. El desarrollo de estos dispositivos es muy complejo en algunas ocasiones, ya que gran parte de los controladores para invernaderos son diseñados para una sola variable, es decir, son controladores mono variables [5], motivo por el cual es más rentable realizar una simulación teniendo en cuenta los puntos críticos de las variables climáticas. Lo anterior se hace con el fin de tomar decisiones con respecto a la producción.

La simulación microclimática de un invernadero se puede realizar de varias maneras siguiendo modelos empíricos de balance de energía, experimentación en campo o haciendo uso de la dinámica de fluidos computacional o CFD, la cual es una herramienta que permite desarrollar un análisis a nivel cuantitativo y cualitativo de las variables de interés dentro de una estructura [6].

Un estudio en CFD se compone de tres fases: el pre-proceso, el proceso y el post-proceso. En primera fase se crea la geometría, el enmallado y se establecen las condiciones de frontera, se indican las propiedades físicas del fluido. En la segunda fase, se define el modelo numérico que se desea utilizar y la discretización de las ecuaciones y se implementa el modelo. En la etapa final del proceso se pueden observar los resultados obtenidos, de manera numérica y gráfica [7].

Este tipo de simulaciones se basan en el modelo de Navier-Stokes, del cual no se conoce una solución analítica. Este modelo ha demostrado simular de manera correcta las tasas de ventilación global y representa la circulación general de la masa de aire y se utiliza para evaluar la geometría de los invernaderos en función del número de renovación del aire al interior de este [8].

El objetivo de este estudio fue replicar y ajustar una simulación CFD, con el fin de conocer el comportamiento de las variables como humedad relativa y temperatura dentro de un invernadero multitúnel, y analizar la relación de estas con la ventilación natural, a partir de un estudio previo desarrollado por [6].

Dicho modelo inicial, fue complementado con la inserción de parámetros psicrométricos como las presiones de vapor y la humedad relativa, y la evapotranspiración del cultivo, para evaluar el ambiente higrotérmico, siguiendo el protocolo de modelación CFD, es decir, la generación de la geometría 3D - CAD, estructuración del enmallado computacional, la inserción de las condiciones de frontera, incluyendo las ecuaciones adicionales relacionadas con la psicrometría, y el pos procesamiento.

2. MATERIALES Y METODO

Localización y descripción del invernadero

Para este estudio, se tomó un invernadero simulado por Villagrán [6], el cual es un invernadero plástico tipo multitúnel de 5610 m² de área cubierta, el cual estaba ubicado en una finca productora de rosas en el municipio de El Rosal, Cundinamarca, Colombia. El invernadero está compuesto de 15 naves, cada una con una luz de 6,9 m. Las alturas mínimas y máximas bajo el canal fueron de 3,0 y 8,2 m. La

distancia longitudinal del invernadero es de 55 m, y su orientación en el sentido este-oeste (E-W). Todas las naves disponen de un área de ventilación cenital fija de 0,53 m de apertura. Cuenta con aperturas de 2,0 m en los cuatro costados de la estructura para completar el área total de ventilación natural, por lo que el área de ventilación total era de 856 m².

Las dimensiones de las camas de cultivo son de 0,5 m de ancho por 53 m de largo cada una. La altura de las camas es de 80 cm. La geometría del invernadero se modeló en software CAD.

El clima en El Rosal es frío, se encuentra a 2586 msnm [9], la humedad relativa promedio es del 83%, mientras que la temperatura oscila entre 7°C y 19°C. La temporada cálida tiene una duración de 2,1 meses, durante los meses de enero a marzo, y una temporada fría de 1,9 durante mediados de junio a mediados de agosto. La época de cielo más despejado del año tiene una duración de aproximadamente 3,5 meses, de principios de agosto a finales de septiembre, con una nubosidad promedio del 72%, y la época nublada se extiende desde finales de septiembre a principios de junio, para un total de 8,5 meses, con una nubosidad promedio del 90%.

En el municipio llueve durante todo el año, cuenta con un periodo mojado y uno húmedo, el mojado dura 8,8 meses, el cual va de mitad de marzo a principios de diciembre, con una probabilidad de lluvia del 53%, y el periodo seco de 3,2 meses, que va de principios de diciembre a mediados de marzo con una probabilidad de lluvia del 30% (época con mayor probabilidad de heladas). La precipitación media anual es de 1216 mm/año. La velocidad del aire en el municipio varía entre 4,2 km/h y 6,7 km/h [10;11].

Generación de la malla

A partir de la geometría booleana 3D CAD del invernadero, se utilizó el software ANSYS ICEM CFD para el pre-procesamiento del modelo y generar el dominio computacional, compuesto por una malla tetraédrica. Dado que la geometría se modeló a escala real, fue necesario reducir su tamaño diez veces para facilitar el procesamiento de los datos.

Condiciones de frontera y ajustes de simulación

Los modelos de transferencia de calor y turbulencia usados fueron energía total y $k-\epsilon$, respectivamente. Este último modelo simula de forma adecuada la naturaleza turbulenta del flujo de aire, y es ampliamente usado en estudios sobre invernaderos [12]. Para la simulación se tuvo en cuenta las condiciones atmosféricas del lugar, tales como la viscosidad del aire igual a $1,7 \times 10^{-5}$ kg m⁻¹ s⁻¹, y la presión atmosférica con un valor de 749.93 hPa. Las propiedades del polietileno y del suelo agrícola como conductividad térmica (k) y densidad (ρ) fueron establecidas de acuerdo con Villagrán [6].

El software de pre-procesamiento ANSYS CFX fue usado para establecer las condiciones de frontera. Los límites perimetrales como la entrada y salida de aire, establecieron según Villagrán [6] como se observa en la Figura 1, las flechas de color negro representan la entrada de aire, y las de color azul las aberturas en el invernadero.

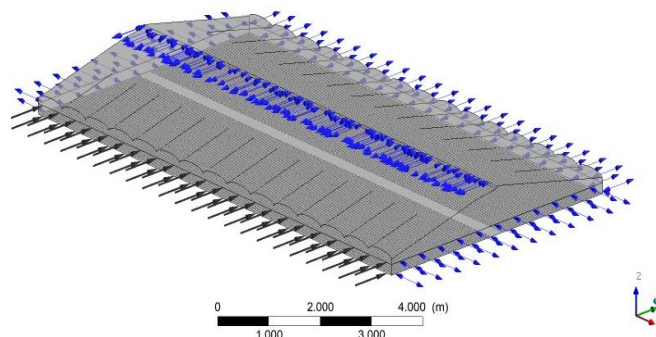


Figura 1. Geometría y condiciones de frontera usadas para la simulación

Se consideró un perfil uniforme de velocidad del viento con un valor de 1,22 m s⁻¹ y una temperatura de 16.59°C. La humedad relativa fue de 74,7% y la temperatura de bulbo húmedo fue de 12.05 °C. Villagrán [6] aclara que estos valores fueron establecidos a partir de la información climática tomada en campo en el periodo de medición experimental. En cuanto a las propiedades del cultivo, el valor de la evapotranspiración de las rosas fue de 3,7 mm día⁻¹ [13], este valor tuvo que ser llevado a unidades de Kg m⁻² s⁻¹ debido a las unidades de cálculo del software. El coeficiente global de transferencia de calor del invernadero fue de 4.7 W m⁻² k⁻¹. La radiación solar fue de 380,9 W m⁻². Un resumen de los valores de las variables utilizadas se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Valores de las variables usadas en la simulación.

| Variable | Valor |
|--|--|
| Temperatura de bulbo seco | 16.59°C |
| Temperatura del suelo | 13°C |
| Humedad Relativa | 74.70% |
| Temperatura de bulbo húmedo | 12.05°C |
| Presión atmosférica | 749.93hPa |
| Conductividad térmica del polietileno | 0.38 Wm ⁻¹ K ⁻¹ |
| Conductividad térmica del suelo | 1W m ⁻¹ K ⁻¹ |
| Transmitancia térmica del invernadero | 4.7W m ⁻² K ⁻¹ |
| Transmitancia térmica del suelo | 1.67 W m ⁻² K ⁻¹ |
| Radiación solar | 380.9 W m ⁻² |
| Evapotranspiración del cultivo | 3.7 mm día ⁻¹ |
| Difusividad cinemática del vapor de agua | 1.29e-5 m ² s ⁻¹ |

Fuente: Tomado de [4] y [6]

Se crearon variables adicionales que no hacían parte de la simulación inicial manejada por el software, estas fueron la Evapotranspiración y la humedad relativa (HR). La humedad relativa se simuló por medio de las ecuaciones 1, 2, 3 y 4. Para el cálculo de la ecuación del psicrómetro (ecuación 2) se tuvo en cuenta la presión atmosférica del lugar y la constante de un psicrómetro no ventilado (8.0 e-4 °C⁻¹).

$$HR = \frac{e}{e_s} * 100 \quad (1)$$

$$e = e_{sh} - AP(T_{bs} - T_{bh}) \quad (2)$$

$$e_{sh} = 6.1078 * 10^{(7.5T_{bh}/(237.3+T_{bh}))} \quad (3)$$

$$e_s = 6.1078 * 10^{(7.5T_{bs}/(237.3+T_{bs}))} \quad (4)$$

Donde:

e_{sh} : Presión de saturación a temperatura de bulbo húmedo (hpa)

e_s : Presión de saturación a temperatura de bulbo seco (hpa)

T_{bs} : Temperatura de bulbo seco (°C)

T_{bh} : Temperatura de bulbo húmedo (°C)

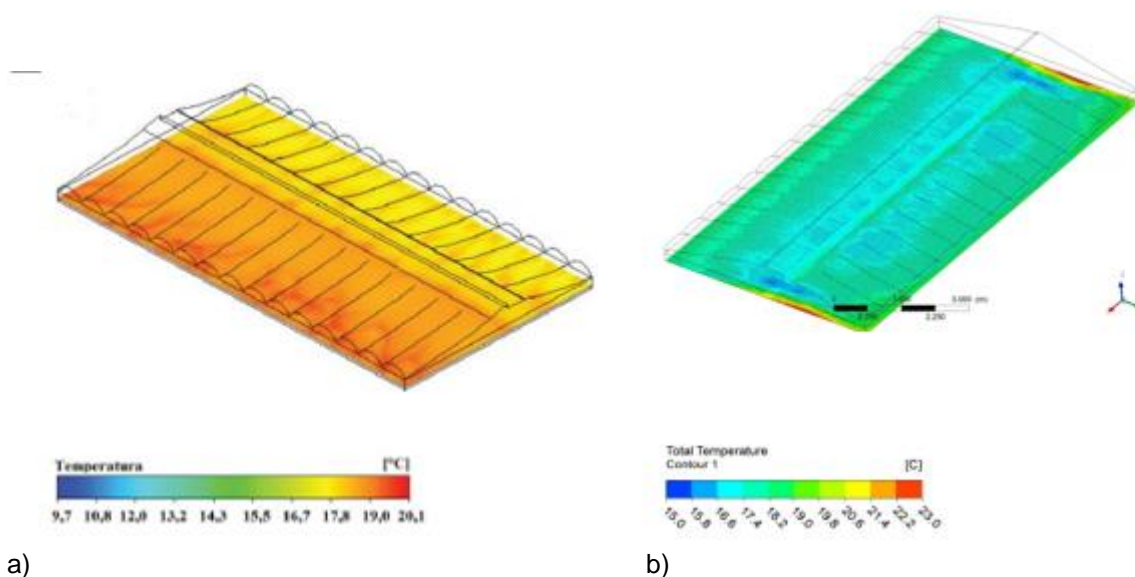
P : Presión atmosférica del lugar (hpa)

A : Constante del psicrómetro (°C⁻¹)

Para ingresar las ecuaciones 1, 2, 3 y 4 como condiciones de frontera en el software, fue necesario crear una variable auxiliar que permitiera adimensionalizar la variable temperatura. Además, para la simulación se trabajó en escala de temperatura Kelvin, por lo que fue necesario usar factores de conversión en las demás ecuaciones. Los criterios de convergencia del modelo fueron de tipo residual RSM, con un valor de 10^{-4} . El número máximo de iteraciones del programa se configuró en 1000.

3. RESULTADOS

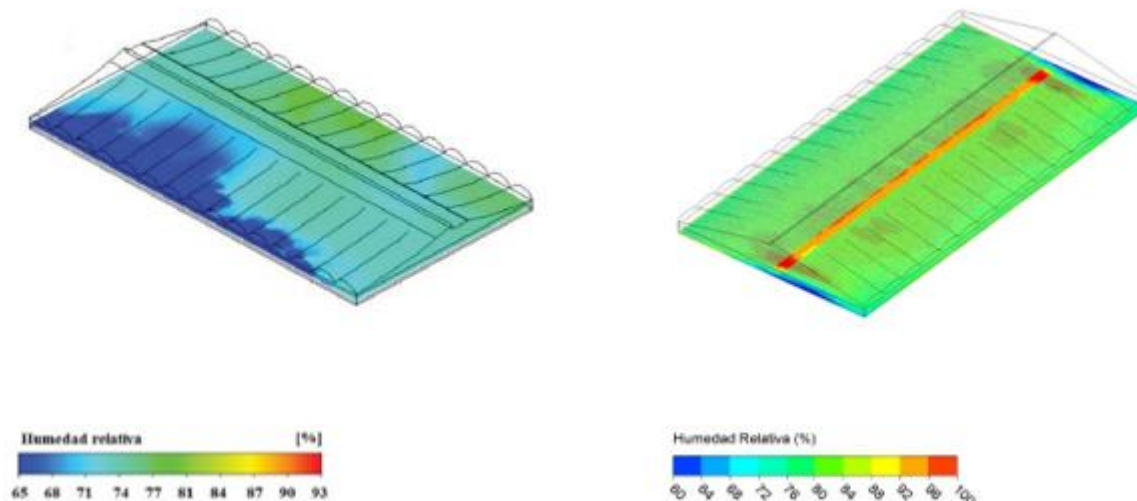
Villagrán [6] muestra la distribución de la temperatura del aire en una vista isométrica a 1.5 m sobre el nivel del suelo (Figura 2a), donde obtuvo como resultado un comportamiento heterogéneo con dos zonas diferenciadas que son la zona central del invernadero y los costados de este. La temperatura alcanzó un valor medio de 17°C y 19°C , respectivamente. En general, se observa que el invernadero presenta condiciones de temperatura aceptables para la producción de rosas, ya que está debe oscilar preferiblemente deben oscilar entre 17 y 25°C [14].



a) b)
Figura 2. Ambiente térmico en invernadero, a) temperaturas obtenidas por Villagrán [6], b) temperaturas obtenidas teniendo en cuenta la evapotranspiración

En la simulación realizada teniendo en cuenta la evapotranspiración se obtuvo una zona homogénea casi en su totalidad, en la cual la temperatura del aire a 1.5 m sobre el nivel del suelo oscila entre los 17°C y 18°C , y temperaturas mayores 20°C cerca al plástico, por efecto de la radiación solar, como se puede observar en la Figura 2b. Cabe aclarar que existen algunas zonas donde la temperatura registró valores inferiores a 17°C debido al efecto chimenea, y la turbulencia, pero se observa un cambio importante en esta variable cuando se considera la evapotranspiración del cultivo.

El comportamiento de la humedad relativa (HR) obtenido por Villagrán [6] se puede observar en la Figura 3a. La distribución espacial de la humedad relativa a 1,5 m sobre el nivel del suelo muestra un comportamiento heterogéneo en el invernadero. Se encontraron zonas con valores máximos de HR de 87%, y valores mínimos de 73%. Esto no es recomendado para la producción agrícola, ya que se somete a las plantas a condiciones propicias para problemas fitosanitarios. Esto puede traducirse en una producción heterogénea tanto en cantidad como en calidad.



a) b)
 Figura 3. Humedad relativa en el invernadero, a) obtenida por Villagrán [6], b) obtenida teniendo en cuenta la evapotranspiración.

4. DISCUSIÓN

En la simulación realizada teniendo en cuenta la evapotranspiración, se obtuvo un ambiente más húmedo que el reportado por Villagrán [6], como consecuencia de la humedad producida por el cultivo, situación que puede acercarse más a las condiciones reales de este tipo de producciones agroindustriales bajo invernadero.

La distribución espacial de la humedad relativa a 1.5 m del suelo presentó un comportamiento homogéneo a lo largo de las camas de cultivo, a excepción de algunas zonas donde bajo esas condiciones puede presentarse saturación del aire como se observa en la Figura 3b.

Este ambiente con alta humedad relativa puede ser peligroso para el cultivo, ya que cuando la humedad relativa es muy alta pueden presentarse enfermedades en el follaje de las plantas inducidas por *Peronospora sparsa* y *Botrytis cinerea*. Se debe tener en cuenta que estas enfermedades pueden generar altas pérdidas económicas tanto por la necesidad de uso intensivo de fungicidas para su manejo y control [15], como por las pérdidas en la cosecha producto de problemas fitosanitarios.

Lo anterior sugiere que se requiere aumentar la tasa de ventilación ya sea natural o mecánica, con el fin de evacuar el exceso de humedad y evitar así problemas fitosanitarios en el cultivo, es decir que, aunque las condiciones de temperatura se encuentren adecuadas para el cultivo de rosas, la humedad relativa puede generar peligros desde el punto de vista biológico.

5. CONCLUSIONES

Todo proceso de simulación implica una aproximación a los fenómenos reales, a partir de simplificaciones y supuestos que hacen viable dicho proceso desde el punto de vista matemático y computacional, y teniendo en cuenta que las plantas interactúan con el ambiente construido (invernadero) de diferentes formas como la evapotranspiración, fotosíntesis, la rugosidad de la superficie, entre otros, la inclusión de este tipo de variables puede hacer que el modelo sea más preciso, y por ende, ser más adecuado

para la predicción del ambiente bioclimático, y ser una herramienta para el diseño y rediseño de este tipo de estructuras.

La inclusión de la evapotranspiración en el modelo, aunque no modificó en gran medida los resultados obtenidos por Villagrán, si mostró que la temperatura puede ser más uniforme producto del efecto invernadero generado por el vapor de agua producido por el cultivo, así como la humedad relativa es más alta, lo que sugiere la necesidad de aumentar la tasa de ventilación, ya sea de forma natural o mecánica.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Nacional de Colombia y a su programa de Maestría en Ingeniería – Ingeniería de Biosistemas por su apoyo.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Sierra Labrador S (2020). Evolución y perspectiva de la industria de flores frescas cortadas colombianas para exportación. Bogotá D. C., Colombia [Tesis para optar por el título de Especialista en Negocios internacionales e integración económica, Fundación Universitaria de América]. Repositorio Institucional - Fundación Universitaria de América.

[2] Abuchaibe del Hierro, M. C. (2020). La floricultura colombiana: Cuestiones sin resolver en el marco del tratado de libre comercio con Estados Unidos. Bogotá D. C., Colombia. [Tesis para optar por el título de Abogado, Universidad Pontificia Javeriana]. Repositorio Institucional - Universidad Pontificia Javeriana.

[3] Díaz, H. O., and Solano, O. F. (2006). Diseño y simulación del control climático para un invernadero y base de datos de registro. Bogotá D. C., [Tesis para optar por el título de Ingeniero de Automatización, Universidad de La Salle] Repositorio Institucional - Universidad de La Salle.

[4] E. A. Villagrán., R. Gil., J. F. Acuña and C. R. Bojocá, C. R. (2012). Optimization of ventilation and its effect on the microclimate of a colombian multispans greenhouse. *Agronomía Colombiana*. 30(2), 282-288.

[5] H. Pérez. and M. De Paul. (2007). Simulación y control de la temperatura dentro de un invernadero. Bogotá D. C., Colombia. [Tesis para optar por el título de Ingeniero de Automatización, Universidad de La Salle] Repositorio Institucional - Universidad de La Salle.

[6] Villagrán, E. A., and Bojacá, C. R. (2019). Simulación del microclima en un invernadero usado para la producción de rosas bajo condiciones de clima intertropical. 2019. *Chilean journal of agricultural & animal sciences*. <http://dx.doi.org/10.4067/S0719-38902019005000308>

[7] Espinel, V., López, I., Rojas, A., Romantchik, E., and Ramirez, A. Determinación de los gradientes térmicos nocturnos en un invernadero usando dinámica de fluidos computacional. *Agrociencia*. 49(3), 233–247. 2015.

[8] Prado, J. V., Rojano, A., De León, B., Ibañez, L., Ángeles, V., and López, I. (2013). Simulación del movimiento del aire en un invernadero tipo Venlo. *Terra Latinoamericana*. 31(4), 325-337.

[9] Municipios de Colombia. (1 de noviembre de 2021). El municipio del Rosal. <https://www.municipio.com.co/municipio-el-rosal.html>

[10] Cuándo visitar. (1 de noviembre de 2021). Mejor época para viajar, tiempo y clima del Rosal. <https://www.cuandovisitar.co/colombia/el-rosal-1143078/>

- [11] Weatherspark. (1 de noviembre de 2021). El clima y el tiempo promedio en todo el año en El Rosal. Available: <https://es.weatherspark.com/y/23372/Clima-promedio-en-El-Rosal-Colombia-durante-todo-el-a%C3%B1o>
- [12] Piscia, D., Muñoz, P., Panadès, C. y Montero, J. I. (2015). A method of coupling CFD and energy balance simulations to study humidity control in unheated greenhouses, *Computers and Electronics in Agriculture*, 115, 129–141. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.05.005>
- [13] Arévalo Hernández, J. (2011). Evaluación del efecto de la aplicación de diferentes láminas de riego en el cultivo de rosa (rosa sp) cv. freedom, bajo invernadero en la sabana de Bogotá. [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional – Universidad Nacional de Colombia.
- [14] Mitiku Kinfu, Vanthoor, and Ooster Van't. (2014). Effect of greenhouse cover spectral properties on rose yield for Ethiopia highland, *International Journal of Innovation and Applied Studies*. 9 (4), 1926–1937.
- [15] Castillo, C., E. Álvarez, Eduardo Gómez, G. Llano and J. C. Zapata. (2010). Mejoramiento nutricional de la rosa para el manejo de *Peronospora sparsa* Berkeley, causante del mildew veloso. 34 (131), 137-142.