



Uso de información agroclimática y su aplicación en el diseño y optimización de estructuras para sistemas de agricultura protegida – Versión 1.0

EXPERIENCIAS EN COLOMBIA Y COSTA RICA

Diego Fernando Alzate
Jorge Eliecer Jaramillo
Roberto Ramírez
Rommel Igor León
Edwin Andrés Villagrán
Miguel Ángel Ayarza
Alexandra Mañunga

CONTENIDO

Presentación.....	4
1. Introducción	5
2. ¿Qué es la gestión de la información agroclimática?	6
3. ¿Cuales son las variables de interés agroclimático?.....	7
4. Principios de la gestión de la información agroclimática	7
5. Brechas y limitantes generales para el uso de la información agroclimática.....	13
6. Amenazas agroclimáticas actuales	14
7. Experiencias en la gestión de la información agroclimática en colombia.	16
8. Experiencias en el uso y aplicación de información agrometeorológica en costa rica .	26
9. Importancia de la información agroclimática en la modelación de estructuras para agricultura protegida.....	32
10. Ejemplos de uso de información agroclimática en el modelado de estructuras	34
Bibliografía.....	43

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Variables de interés agroclimático	7
Tabla 2. Forma de medición de las variables fisiológicas.....	10
Tabla 3. Forma de medición de las variables agronómicas por producto cosechado.....	12
Tabla 4. Registros de la temperatura (°C) en el interior y exterior del invernadero (diciembre 2010 a marzo del 2011).....	28
Tabla 5. Registros de la humedad relativa (%) en el interior y exterior del invernadero, (diciembre 2010 a marzo del 2011).....	29
Tabla 6. Registros de la radiación (watts/m ²) en el interior y exterior del invernadero (diciembre 2010 a marzo del 2011).....	30
Tabla 7. . Registros de CO ₂ (ppm) en el interior y exterior del invernadero (Diciembre 2010 a marzo del 2011).	32

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de instalación de sensores agroclimáticos.	6
Figura 2. Estaciones de la red IDEAM en Colombia.	19
Figura 3. Actores mesa agroclimática nacional.	21
Figura 4. Izquierda: número de series climáticas por variable, por grupo y totales en la BD diaria. Derecha: Distribución de las estaciones con datos de precipitación en Colombia. .	22
Figura 5. Estaciones de la red agroclimática de CENICAFE.....	24
Figura 6. Estaciones de la red FEDEARROZ.	25
Figura 7. Uso de información agroclimática Comunidades de campesinos e indígenas en Proyecto Suroccidente Colombiano – Cauca – con apoyo GIZ y del Acueducto de Popayán (Fundación Río Piedras).....	26
Figura 8. Temperatura registrada en el interior y exterior del invernadero en tres diferentes horas del día (7 a.m. 9 a.m. y 1 p.m.) (Dic-10 a mar 2011).	29
Figura 9. Humedad relativa promedio registrada en el interior y exterior del invernadero en tres diferentes horas del día (7 a.m. 9 a.m. y 1 p.m.) (Dic-10 a mar 2011).....	30

Figura 10. Radiación promedio en watts/m ² registrada en el interior y exterior del invernadero en tres diferentes horas del día (7 a.m. 9 a.m. y 1 p.m.) (Dic-10 a mar 2011).	31
Figura 11. Promedio CO ₂ en ppm registrada en el interior y exterior del invernadero en tres diferentes horas del día (7 a.m. 9 a.m. y 1 p.m.) (Dic-10 a mar 2011).....	32
Figura 12. Contornos calculados de velocidad del viento (m s ⁻¹) y distribución de temperatura (°C) calculados mediante simulación CFD-2D.	34
Figura 13. Vista de isosuperficies generadas para la variable temperatura (°C), calculadas mediante simulacion CFD-3D.....	35
Figura 14. Desarrollo de una herramienta mediante CFD-3D, para la optimización de la ventilación y el microclima generado en invernaderos usados para la producción de flores de corte.	36
Figura 15. Invernadero “Guanacaste 1”. Evaluación condiciones de movimiento de aire.	37
Figura 16. Evaluación de la temperatura y movimiento del aire en FLUENT 6.2, con todas las ventanas cenitales abiertas.	38
Figura 17. Evaluación de la temperatura y movimiento del aire en FLUENT 6.2, cerrando la ventana cenital 1.	39
Figura 18. Utilización de deflector y su efecto en la aerodinámica dentro del invernadero.	40
Figura 19. Utilización de deflector y su efecto termodinámico dentro del invernadero, con cultivo.	40
Figura 20. Utilización de deflector y su efecto termodinámico dentro del invernadero, sin cultivo.	41
Figura 21. Evaluación del flujo de aire en condición de Barlovento.	42

PRESENTACIÓN

Considerando el interés expresado por la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA) y el Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA) de Costa Rica, por el desarrollo de un taller para la gestión de la información agroclimática, modelación de estructuras e indicadores de sostenibilidad de la agricultura en ambientes protegidos en ALC, el Comité Ejecutivo de FONTAGRO aprobó “Fondos Semilla” para la realización de este encuentro, cuyo objetivo es fortalecer la capacidad de los investigadores, asistentes técnicos y productores, para el monitoreo en tiempo real de las condiciones agroclimáticas y el desarrollo de los cultivos dentro de estructuras para agricultura en ambientes protegidos. Durante este taller se compartirán experiencias nacionales en la aplicación de información agroclimática para optimizar la modelación y diseño de estructuras, y desarrollar una guía con recomendaciones de manejo para agricultura en ambientes protegidos.

El presente documento se desarrolla en el marco de esta iniciativa y surge como un esfuerzo institucional para conocer el estado del arte de los procesos de gestión de la información agroclimática y modelación de estructuras en sistemas de agricultura en ambientes protegidos en ALC. Se presenta una contextualización sobre la información agroclimática, variables de interés, marcos nacionales para la gestión de la información y ejemplos de la aplicación de información agroclimática para la modelación de estructuras de ambientes protegidos en Colombia y Costa Rica.

Finalmente, es importante anotar que esta iniciativa se encuentra en el marco del proyecto ***Innovaciones para la horticultura en ambientes protegidos en zonas tropicales: opción de intensificación sostenible de la agricultura familiar en el contexto de cambio climático en ALC.***

1. INTRODUCCIÓN

La agricultura del siglo XXI enfrenta importantes desafíos sociales, económicos y ambientales. Deberá prepararse para incrementar drásticamente la producción de alimentos para sostener a una población creciente. Se espera que la población mundial alcance los 9.700 millones de personas para 2050, es decir que, bajo este escenario de crecimiento, la producción agrícola tendrá que aumentar un 60% para 2050. Por tanto, la agricultura es fundamental para satisfacer la demanda esperada; no obstante, deberá transformarse a fin de atender estos desafíos y enfrentar los importantes retos que impone el cambio climático, cuyos efectos harán más difícil esta tarea debido a los impactos esperados sobre la productividad agrícola y los medios de vida de los agricultores, especialmente los de pequeña escala. Muchos de estos pequeños productores ya se están enfrentando a una base degradada de recursos naturales y a menudo carecen de conocimientos acerca de posibles opciones para adaptar sus sistemas de producción, disponen de bienes limitados, tienen una baja capacidad adaptativa y escasa aplicación de tecnologías innovadoras (FAO, 2016).

La agricultura protegida ofrece una buena oportunidad a los pequeños productores para reconvertir y diversificar sus sistemas de producción. A través de esta tecnología se han convertido zonas marginales para la producción en campo abierto en modernas zonas de producción agrícola que hacen uso de las innovaciones en plasticultura, el uso eficiente del agua y los nutrientes, y manejo ambiental para incrementar la producción y mejorar la calidad de los productos. Por otra parte, no hay duda de que esta tecnología puede reducir de manera significativa la vulnerabilidad de los sistemas de producción a los impactos de eventos climáticos extremos (lluvias excesivas, sequías y heladas). Estos fenómenos ya se están sintiendo con mayor frecuencia e intensidad en muchos países de la región y están afectando la producción agrícola en campo abierto.

Un componente fundamental para la agricultura protegida es el diseño y modelación de las estructuras, por ejemplo, invernaderos, que requieren del uso de modelos como CFD (Computational Fluid Dynamics). Los modelos CFD se alimentan de información agroclimática, entendida ésta como datos de variables climáticas, agronómicas y fisiológicas de los cultivos cuyo registro ordenado y adecuado facilita su interpretación y posterior uso en la modelación y estudio del comportamiento micro-climático de los invernaderos

brindando información relevante para una posterior evaluación del efecto de las estructuras en el desarrollo y rendimiento de los cultivos.

2. ¿QUÉ ES LA GESTIÓN DE LA INFORMACIÓN AGROCLIMÁTICA?

La gestión de la información agroclimática es un proceso dinámico orientado al manejo adecuado de los datos, desde el registro, transmisión, almacenamiento, procesamiento, control de calidad, visualización, consulta (idealmente en tiempo real), descarga y uso por el usuario final. Su objetivo fundamental es facilitar el acceso a información de calidad para la toma de decisiones y permite a diferentes actores (agricultores, investigadores y tomadores de decisión entre otros), identificar y cuantificar los riesgos derivados de eventos de variabilidad climática extrema y cambio climático en la agricultura, cada vez más frecuentes e intensos.

Los registros agroclimáticos se generan a través de estaciones agrometeorológicas, sensores e instrumentos para medición de parámetros eco-fisiológicos de cultivos, sensores remotos como satélites meteorológicos (Figura 1): GOES, TRMM, Meteosat, entre otros y el uso de cámaras multi e hiperespectrales acopladas a UAVs (Vehículos Aéreos No Tripulados). Algunas variables de importancia se encuentran en la tabla 1.



Figura 1. Ejemplo de esquema de instalación de sensores agroclimáticos.

Fuente: <http://www.campbellsci.com/cws900-compatibility>

3. ¿CUALES SON LAS VARIABLES DE INTERÉS AGROCLIMÁTICO?

Para comprender el efecto del clima en el desarrollo y productividad de los cultivos se debe contar con información agroclimática, entendida como registros con referencia temporal y espacial de variables climáticas, agronómicas y fisiológicas cuyo manejo ordenado y adecuado facilita su interpretación y posterior uso en la modelación de cultivos. Algunas variables de importancia son las siguientes:

Tabla 1. Variables de interés agroclimático

<ul style="list-style-type: none">• Agroclimáticas: Temperatura a 2m del suelo, Precipitación, Dirección y velocidad del viento, Radiación solar, Humedad Relativa, Temperatura del suelo a diferentes profundidades, Humedad del suelo, Humedad de las hojas, Radiación PAR (Fotosintéticamente Activa)
<ul style="list-style-type: none">• Agronómicas, asociadas a la fenología del cultivo: Días a crecimiento vegetativo, a floración, a formación de fruto y a cosecha, Rendimiento por planta (g), número total de hojas, tallos, inflorescencia y/o fruto por planta, peso fresco de hojas, tallos, inflorescencia y/o fruto por planta, identificación y cuantificación de plagas, enfermedades y desordenes fisiológicos.
<ul style="list-style-type: none">• Fisiológicas: Variables de intercambio gaseoso, fotosíntesis ($\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), conductancia estomática ($\text{mmol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), transpiración ($\text{mmol H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), temperatura de la hoja ($^{\circ}\text{C}$), Grado de verdor: esta variable está asociada al contenido de clorofila y es medida con el equipo medidor spad, Potencial hídrico xilemático (kpa): esta variable es medida con la bomba de scholander (Scholander, 1965).

Para el caso colombiano el negocio de las hortalizas es un gran generador de divisas; esto lo demuestra el desempeño de países que comparten la franja ecuatorial con Colombia, como Perú, Tailandia y Ecuador; estos tres, en pocos años han logrado posicionarse en los mercados como líderes, con producción superior a las 28.000 toneladas.

En este mismo sentido, las hortalizas y frutas en el mercado Nacional han ganado importancia en los últimos años, observándose que para el período 2010-2015 la tendencia ha sido positiva, con un promedio de crecimiento de 3,2 %, iniciando en el 2010 con una producción

de 8,1 millones de toneladas, hasta 10,7 millones de toneladas estimadas para el 2015 (ASOHOFRUCOL y MADR, 2013).

En Colombia los principales departamentos que aportan en la producción de estos rubros han sido Antioquia, Santander, Valle del Cauca Cundinamarca, Meta, Boyacá, Córdoba, Caldas, Tolima, Quindío, Nariño, Arauca, Norte de Santander, Bolívar, Risaralda, Huila, Cauca y Magdalena. Este último departamento a pesar de ser una zona promisoría para la producción de hortalizas sólo aporta 1,94% de la producción de estos rubros, con una superficie sembrada de 18.869 hectáreas y una producción de 184.033 toneladas (MADR, 2005).

Sin embargo, es necesario políticas que incentiven el consumo en la población y por ende la ampliación de la frontera agrícola en estos rubros, ya que el consumo nacional presenta cifras ínfimas comparadas con las internacionales, siendo el promedio de consumo 37 kg año por persona equivalente a un consumo per cápita diario de 100 gramos (Corporación Colombiana Internacional, 2005). A pesar de la importancia de las hortalizas en el país, estas se están viendo afectadas por las variaciones climáticas globales que han ocurrido de manera constante a lo largo de la historia de la tierra; transformando la atmósfera, la hidrósfera y la biósfera, con velocidades superiores a las que normalmente ocurrían. Este efecto posiblemente, es debido a que los sistemas hortícolas son abiertos y altamente complejos, y se ven afectados por factores como el clima, el suelo y el sistema de producción, así como por la interacción entre estos factores.

Por lo anteriormente, es importante establecer líneas de investigación en ecofisiología de hortalizas que permitan caracterizar las interacciones entre los factores de estrés ambiental y la respuesta fisiológica y agronómica de los cultivos, con los objetivos de: 1) reunir herramientas agronómicas que mejoren la fotosíntesis y la productividad (riego, nutrición mineral, manejo de la luz, diseño de infraestructuras, etc.); 2) identificar genotipos adaptados a condiciones de estrés abiótico, los cuales pueden ser utilizados en los programas de mejoramiento genético y 3) zonificación de los cultivos hortícolas en la zona de estudio.

- **Ecofisiología de los cultivos:**

Los sistemas hortícolas son abiertos y altamente complejos, y se ven afectados por factores como el clima, el suelo y el sistema de producción, así como la interacción entre estos factores. Por lo anterior, la importancia de la fisiología ambiental o ecofisiología, el cual radica, en la caracterización de la interacción entre los factores de estrés ambiental y la respuesta de los cultivos, con el propósito de obtener una producción exitosa (Díaz et al., 2010). Los factores de estrés ambiental pueden causar distintos cambios morfológicos, fisiológicos y bioquímicos en los cultivos, determinando una considerable reducción en su rendimiento. La comprensión de la interacción entre estos factores ambientales y los procesos fisiológicos son importantes en el mejoramiento de las prácticas hortícolas (riego, manejo de la luz, nutrición mineral, diseño de infraestructuras, etc.), con el objetivo de optimizar la fotosíntesis e incrementar la productividad de los cultivos.

Conocer las respuestas de los cultivos hortícolas a factores ambientales como temperatura, disponibilidad de agua, luz o dióxido de carbono (CO₂) es útil para determinar el efecto de condiciones ambientales sub-óptimas y gestionar el manejo de los cultivos para obtener la máxima productividad (Schaffer y Andersen, 1994).

Entre los factores que más influyen en los cultivos hortícolas, se tienen:

- 1) La luz solar no es sólo la fuente de energía para la fotosíntesis, sino también el factor más importante que afecta a la productividad en los cultivos hortícolas. La baja irradiancia, en la medida en que determine la insuficiente penetración de luz en el dosel, influye directamente mediante la reducción de la utilización de energía fotónica, por lo tanto, una fuerte disminución de la fotosíntesis y de la productividad. El sombreado (niveles de 60-90%) afecta la morfología y anatomía de las plantas, intercambio gaseoso y las relaciones hídricas (uso eficiente del agua, conductancia estomática y por ende la fotosíntesis), así mismo, disminuye la floración, fructificación, tamaño del fruto y la fenología del cultivo (Gregoriu et al., 2007).
- 2) La temperatura es un factor importante que influye en la germinación de las semillas, el crecimiento vegetativo, floración, senescencia foliar, inhibición del enraizamiento, deterioro fisiológico (quemaduras en hojas, tallos y frutos), entre otras. (Kositsup et al., 2009).

3) La pérdida de agua por un dosel vegetal es un proceso inevitable, considerando que las plantas utilizan la transpiración como mecanismo de enfriamiento. Por otra parte, la asimilación de CO₂ a través de los estomas da lugar a la pérdida de vapor de agua, por lo tanto, para mantener un adecuado ritmo de crecimiento, las plantas normalmente pierden gran cantidad de agua con respecto al peso ganado de CO₂. Como ejemplo, una planta C₃ pierde un kilogramo de agua por cada 1-3 g de CO₂ fijados, una planta C₄ gana de 2 a 5 g de CO₂ por kg de agua transpirada, mientras que una planta CAM es capaz de fijar de 10 a 40 g de CO₂ por kg de agua transpirada.

Por todo anterior y en vista que las especies hortícolas pueden tener cambios en su fisiología y agronomía del cultivo, producto de condiciones que pueden ser estresantes, surge la necesidad de utilizar algunos parámetros fisiológicos que permitan explicar el comportamiento agronómico del cultivo, entre ellas, tenemos:

- **Variables fisiológicas:**

Es importante evaluar parámetros fisiológicos para poder encontrar explicación a las desviaciones agronómicas, causadas por el efecto de las infraestructuras entre las distintas hortalizas (Tabla 2).

Tabla 2. Forma de medición de las variables fisiológicas.

Variable	Unidades	Equipo	Forma de medición
Intercambio Gaseoso 1)Fotosíntesis	$\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	Analizador Infrarrojo de Gases LI-COR 6400.	Serán medidas en las horas comprendidas desde las 10:00 hasta las 13:00. Estas variables serán tomadas en la quinta hoja totalmente expandida en sentido ápice base para cada unidad experimental.
2) Conductancia estomática	$\text{mmol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	Se realizará la medición de igual forma que la variable fotosíntesis.	
3) Transpiración	$(\text{mmol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$		

Potencial hídrico xilemático	MPa	Bomba de Scholander o cámara de presión (Scholander et al. 1965).	Se medirá en las horas comprendidas entre las 11:00 y 13:00; se tomará de la quinta hoja totalmente expandida en el sentido ápice base en cada unidad experimental, previamente tapada con papel aluminio por 30 minutos (Celedón et al. 2012), para luego ser llevada al equipo.
Grado de verdor	SPAD	Medidor de clorofila SPAD 502 Konica Minolta	Está asociado con el contenido de clorofila en la hoja. Se tomará de la quinta hoja totalmente expandida en el sentido ápice base en cada unidad experimental.

Tabla 3. Forma de medición de las variables agronómicas por producto cosechado.

Tipo de producto cosechado/ especie	VARIABLES A EVALUAR
<p>Fruto (pimentón, chile, pepino, berenjena, tomate, calabacín, okra)</p>	<p>Días a crecimiento vegetativo, a floración, a formación de fruto, a cosecha; rendimiento por planta (g) y por m² (g), número total de frutos por planta, número de frutos/m², peso fresco del fruto, % de frutos por planta de primera, segunda y tercera categoría, identificación, cuantificación de plagas, enfermedades, desordenes fisiológicos, variables asociadas a la calidad (sólidos solubles totales (° brix), firmeza (kgf), pH, grosor de pulpa, color, forma, aroma).</p>
<p>Vaina (fríjol, habas, habichuela y habichuelin, arveja y guisantes)</p>	<p>Días a crecimiento vegetativo, a botón floral, a floración, a formación de la vaina, a cosecha, rendimiento por planta y por m², número total de vainas por planta, rendimiento/planta (g), rendimiento/m² (g), peso fresco de vainas (g), diámetro y longitud de vaina, número de granos por vaina, identificación, cuantificación de plagas, enfermedades y desordenes fisiológicos.</p>
<p>Pecíolos, tallos y hojas (acelga, apio, repollo, cebolla de ramas, puerro, col, espinaca, lechuga, cilantro, perejil, col china, espárrago, y ruibarbo)</p>	<p>Días a crecimiento vegetativo, a cosecha, en el caso de la cebolla de rama, número de pseudotallos producidos, rendimiento: por planta o por área específica, longitud y diámetro de pecíolos, tallos e hojas, identificación, cuantificación de plagas, enfermedades y desordenes fisiológicos.</p>
<p>Bulbo (cebolla de bulbo, ajo, colrábano)</p>	<p>Días a crecimiento vegetativo y a cosecha, diámetro y longitud de bulbo, peso promedio de bulbo por planta (g), número y peso (g) de bulbos de primera, segunda y tercera categoría, identificación, cuantificación de plagas, enfermedades, desordenes fisiológicos, variables asociadas a la calidad (sabor, color y forma).</p>
<p>Flor (Brocolí, coliflor y alcachofa)</p>	<p>Días a crecimiento vegetativo, a botón floral, a floración, a cosecha, peso promedio de flor por planta (g), longitud y diámetro por flor, identificación, cuantificación de plagas, enfermedades, desordenes fisiológicos, variables asociadas a la calidad (forma y color).</p>
<p>Raíz (zanahoria, arracacha, remolacha, rábano y nabo)</p>	<p>Días a cosecha, rendimiento por planta y por m², número total de raíces por planta, peso promedio de raíces por planta (g), longitud y diámetro de raíces por planta, identificación, cuantificación de plagas, enfermedades y desordenes fisiológicos, variables asociadas a la calidad (sólidos solubles totales (° brix), pH, firmeza (kgf), color y forma).</p>

- **Evaluación agronómica:**

La forma de evaluación agronómica en las hortalizas, se hace con base al producto que vaya a cosechar, por ejemplo, si es fruto, hoja, flor, o tallo.

Para ello, se debe realizar lo siguiente de forma general: con base al descriptor del BBCH para la fenología de los cultivos, se tomarán los días a crecimiento vegetativo, a floración, a formación de frutos y a cosecha. La evaluación de plagas y enfermedades se hará con base al porcentaje de incidencia y en los casos que se tenga la información, se construirá un índice de severidad. El rendimiento se reportará por planta y por metro cuadrado, a través del promedio de frutos, cabeza, pecíolo, tallo, hoja y raíz/planta, número total y % de frutos, cabeza, pecíolo, tallo, hoja y raíz por planta de primera, segunda y tercera categoría, peso de frutos de primera, segunda y tercera categoría, etc (**Tabla 3**).

4. PRINCIPIOS DE LA GESTIÓN DE LA INFORMACIÓN AGROCLIMÁTICA

Boshell (2014) menciona dos principios fundamentales:

- La información agroclimática debe beneficiar tanto a los productores que tienen fines comerciales, en general tecnificados, como a los productores cuyos fines son de autoconsumo y seguridad alimentaria y tienen condiciones tecnológicas particulares.
- El tipo de información, así como sus alcances, forma de comunicación y aplicación es distinta en los dos casos.

5. BRECHAS Y LIMITANTES GENERALES PARA EL USO DE LA INFORMACIÓN AGROCLIMÁTICA.

Los procesos para la gestión de la información agroclimática presentan brechas y limitantes en países de América Latina y El Caribe. Como lo menciona Boshell (2014), entre los principales se encuentran:

- **La calidad de los datos disponibles para los usuarios no cubre sus expectativas y necesidades:** no existen protocolos unificados de control de calidad, que se estén aplicando de modo efectivo en las diversas instituciones.

- **En estaciones convencionales, la disponibilidad de los datos no es adecuada:** existen rezagos importantes entre la fecha en que están disponibles los datos y las fechas en que fueron registrados.
- **Acceso restringido a los datos:** a pesar de los esfuerzos por facilitar el acceso a la información agroclimática no siempre los procesos de solicitud y/o entrega de información son sencillos.
- **Falta información útil para pequeños productores no tecnificados (campesinos, indígenas, agricultores “tradicionales”):** quienes demandan alertas agroclimáticas tempranas locales, construidas con su participación y en muchos casos generan estructuras para agricultura protegida sin ninguna planificación ni modelación previa.
- **Existe dispersión de los datos disponibles entre diversos actores:** quienes no comparten la información, tienen protocolos diferentes de captura, transmisión, almacenamiento, control de calidad de datos, así como de instalación, operación, calibración y mantenimiento de equipos en sus estaciones. Por ello los datos tienen diversos niveles de incertidumbre, según su fuente.
- **Los entes nacionales encargados de generar la información agroclimática no alcanzan a cubrir las necesidades del sector agropecuario y de sus sub-sectores productivos:** ya que sus funciones y alcances son de índole nacional y multi-sectorial y sus recursos no necesariamente están enfocados en las necesidades específicas del sector.
- **Escasa articulación inter institucional e inter sectorial para integrar la información agroclimática relevante para el sector agropecuario y específicamente para la agricultura protegida:** la información que se genere debe ser pertinente, accesible y de calidad, para que pueda ser utilizada apropiadamente para reducir la vulnerabilidad al cambio climático y garantizar la seguridad alimentaria de las comunidades y pueblos de la región y del mundo.

6. AMENAZAS AGROCLIMÁTICAS ACTUALES

El cambio climático y la variabilidad climática extrema suponen uno de los principales desafíos para la agricultura en América Latina y El Caribe. Boshell (2014) menciona las principales amenazas agroclimáticas actuales:

- Sequías más frecuentes (conflictos prediales, regionales y sectoriales por el acceso y uso del agua).
- Inundaciones más frecuentes (conflictos por pérdidas de cosechas y desplazamientos o inseguridad alimentaria).
- Vendavales, granizadas, heladas y temperaturas altas más frecuentes (conflictos por pérdidas de cosechas y desplazamientos o inseguridad alimentaria).

Algunos de los efectos esperados en la agricultura por el cambio climático son:

- Alteración de patrones hidrológicos
- Alteración de ciclos fisiológicos y ciclos de los cultivos
- Disminución y alteración de oferta hídrica.
- Plagas, hongos y enfermedades Asociados con niveles altos de humedad atmosférica
- Mayor uso de químicos
- Aumento de escorrentía, lavado de suelos.
- Inundaciones
- Incendios de cobertura vegetal
- Muerte súbita por Clostridiosis en suelo con encharcamiento.
- Intoxicación por acumulación de nitritos y nitratos en suelos con altos contenidos de materia orgánica
- Mayor frecuencia e intensidad de eventos extremos

La agricultura protegida es una de las principales medidas de adaptación frente a los impactos del cambio climático y la variabilidad climática extrema. Sin embargo, son requeridos adecuados procesos de gestión de la información agroclimática, superando las brechas anteriormente mencionadas y realizando modelaciones y simulaciones con rigor técnico, que permitan definir tipos de estructuras de acuerdo a las condiciones de las diferentes zonas.

7. EXPERIENCIAS EN LA GESTIÓN DE LA INFORMACIÓN AGROCLIMÁTICA EN COLOMBIA.

7.1 Marco político y legal de la gestión de la información agroclimática.

La gestión de la información agroclimática es una de las principales acciones que debe realizar el país para hacer frente a la amenaza climática. En documentos como el Plan Nacional de Desarrollo (PND) 2010-2014 “Prosperidad para Todos”, la Estrategia Institucional para la Articulación de Políticas y Acciones en Materia de Cambio Climático en Colombia (CONPES 3700), la Estrategia de adaptación del sector agropecuario a fenómenos climáticos (en formulación) y la Estrategia institucional y financiera de la red hidrológica, meteorológica y oceanográfica del país (en formulación) se presentan elementos que guían el quehacer institucional en materia de gestión de información agroclimatológica, reconociendo la importancia y el rol principal que debe tener CORPOICA frente a los retos que en esta materia debe afrontar el país.

El Plan Nacional de Desarrollo (PND) 2010-2014 “Prosperidad para Todos” menciona varios cuellos de botella que enfrenta el sector agropecuario, entre los que se encuentran: (i) baja capacidad para enfrentar factores exógenos; (ii) ausencia de una cultura para la gestión de riesgos climáticos; y, (iii) limitado acceso y uso de la información, a pesar de la casi inexistente información agroclimática oficial.

En julio de 2011 se aprobó el documento CONPES 3700 “Estrategia Institucional para la Articulación de Políticas y Acciones en Materia de Cambio Climático en Colombia”, donde se estableció que se debe construir un Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático que buscará reducir efectivamente la vulnerabilidad tanto de poblaciones, ecosistemas y sectores productivos mediante la incidencia en los procesos de planificación ambiental, territorial y sectorial de tal manera que se tomen decisiones de manera informada, teniendo en cuenta los determinantes y proyecciones climáticas.

En 2014 el DNP en articulación con otras entidades generaron la propuesta para discusión de una Estrategia de adaptación del sector agropecuario a fenómenos climáticos, en la cual se plantea:

- Definir los arreglos institucionales y la coordinación necesaria para la captura y suministro de información agroclimática a los niveles local, regional y nacional
- Promover la generación de conocimiento para la formulación de medidas de adaptación para cada subsector agropecuario, pesquero y forestal

Estas acciones se sustentan en el eje problemático 1, el cual, a nivel general plantea la existencia de brechas y un débil manejo de la información que impiden la gestión adecuada del riesgo climático en los sistemas productivos. En este sentido, la primera deficiencia en este tema es la falta de una plataforma informática y de la infraestructura tecnológica asociada, que permitan la captura y acceso a la información agroclimática por parte de:

- Autoridades agropecuarias del orden nacional y territorial para la toma de decisiones
- Entidades de investigación y de transferencia de tecnología para adelantar los análisis de vulnerabilidad e identificación de amenazas climáticas en los territorios
- Gremios y productores agropecuarios para la toma de decisiones técnicas y comerciales.

El documento plantea la necesidad de fortalecer la capacidad del país de gestionar información agroclimática (generación, disposición, acceso, uso y aplicación de información agroclimática) a través de 3 acciones puntuales:

- Conformar mecanismos de articulación entre los actores públicos y privados a través de la creación de una red público-privada de estaciones agrometeorológicas en áreas de influencia del sector agropecuario, pesquero y forestal;
- Consolidar procesos de generación, análisis y divulgación de información agroclimática
- Implementar estrategias para comunicar la información generada que sirva para la toma de decisiones para reducir la vulnerabilidad de la producción agropecuaria, pesquera y forestal en el corto y mediano plazo.

Apoyar la implementación de estas acciones y los objetivos superiores de las políticas nacionales en materia de Cambio Climático y Adaptación es un rol clave para CORPOICA y su posicionamiento en el escenario agroclimático y de investigación agropecuaria nacional y brindaría nuevos desarrollos y elementos que requiere el país, el sector y la institución.

CORPOICA cuenta con los medios técnicos y financieros para diseñar, desarrollar y operativizar la plataforma agroclimática nacional y generar la articulación interinstitucional necesaria.

7.1.1 Principales actores que generan información agroclimática

En Colombia se destacan los siguientes actores como los principales generadores y usuarios de la información agroclimática:

- IDEAM (Instituto Nacional de Meteorología)
- Cenicafé (Centro Nacional de Investigaciones Cultivo del Café)
- Cenicaña (Centro Nacional de Investigaciones Cultivo Caña)
- Corpoica (Corporación Nacional de Investigaciones Agropecuarias)
- Ceniflores (Centro Nacional de Investigaciones Floricultura)
- Fedearroz (Federación Nacional Arroceros)
- CARs (Corporaciones Ambientales Regionales)
- Otros actores: Corporación PBA (pequeños productores), Acueducto Popayán – Fundación Rio Piedras (pequeños productores), CIAT, Fedepalma, Conalgodón, Universidades.

El apoyo estratégico en materia de políticas públicas y, en algunos casos, financiero está a cargo del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR) y Departamento Nacional de Planeación (DNP).

7.1.2 Red Meteorológica IDEAM

De acuerdo con el catálogo de estaciones (IDEAM, 2017), el IDEAM dispone de una red meteorológica conformada por 1.932 estaciones activas de las cuales 208 (11%) son estaciones automáticas.

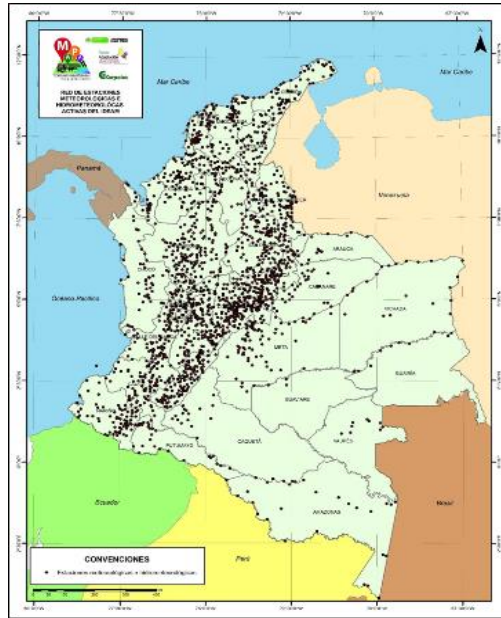


Figura 2. Estaciones de la red IDEAM en Colombia.
Fuente: CORPOICA, 2014

De las 1932 estaciones, 49 (2%) corresponden a estaciones sinópticas (principales y secundarias), 4 (0.2%) estaciones de radiosonda, 484 (25%) climatológicas, 62 (3%) agrometeorológicas, 41 (2%) estaciones especiales y 1.288 (67%) pluviométricas y pluviográficas.

7.1.3 Oferta agroclimática IDEAM

El IDEAM genera actualmente 2 productos fundamentales en materia agroclimática y que son entregados mes a mes a los integrantes de la mesa agroclimática nacional, estos son:

- **Predicción Climática mensual, trimestral y semestral:** se actualiza mensualmente y está disponible en la página web de IDEAM en la sección de Boletines. Su contenido incluye un resumen de las condiciones del océano pacífico tropical para el mes de referencia, la predicción climática mensual, trimestral y semestral y recomendaciones frente a eventuales riesgos derivados de la predicción. Está ambientado con una buena cantidad de mapas y figuras ilustrativas.
- **Boletín Semanal para el Sector Agrícola:** es un boletín que circula en formato *.pdf en el que se hace una mirada nacional a la disponibilidad hídrica en la última semana, se menciona la condición meteorológica más probable durante la siguiente semana y se

hace un abordaje para las diferentes regiones de Colombia (Andina, Caribe, Pacífica, Orinoquía y Amazonía) con mayor detalle para diversos sistemas productivos. Está disponible en la página web del IDEAM¹ y se envía semanalmente a un listado de usuarios a través de e-mail.

Adicionalmente el IDEAM posee otra serie de boletines disponibles en su página web:

- Boletín condiciones hidrometeorológicas
- Pronóstico de la amenaza diaria por deslizamientos
- Resumen mensual de la situación sinóptica
- Boletines, avisos y alertas
- Informe diario de incendios
- Boletín de predicción climática quincenal
- Boletín hidrológico diario
- Comunicados especiales
- Fenómenos el niño y la niña
- Boletín clima y salud

7.1.4 Mesa Agroclimática Nacional

De acuerdo con Lozano (2017), la MTA Nacional es una iniciativa interinstitucional que dirige a Colombia hacia una agricultura sostenible y adaptada al clima. Se desarrolla desde el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR) en asocio con CIAT –CCAFS, los gremios del sector agropecuario y el IDEAM. Su conformación se hizo en diciembre de 2014 y desde entonces elabora un Boletín Mensual que contiene la siguiente información:

- Información trimestral sobre el comportamiento de las lluvias y las predicciones climáticas para los próximos tres (3) meses, suministrada por IDEAM.
- Recomendaciones a los agricultores y ganaderos por regiones, sobre las medidas que deben adoptar para minimizar los efectos de las amenazas climáticas (sequías o exceso de lluvias).

¹ <http://www.pronosticosyalertas.gov.co/boletines-e-informes-tecnicos>



Figura 3. Actores mesa agroclimática nacional.

Fuente: MADR, 2017

Actualmente la MTA Nacional es liderada por IDEAM y existen nodos regionales en los departamentos de Córdoba, Sucre, Magdalena y Cauca. Un ejemplo del boletín agroclimático para el mes de septiembre de 2017 se encuentra en el siguiente enlace: <http://www.aclimatecolombia.org/boletin-agroclimatico/>

7.1.5 Gestión de la Información Agroclimática en Corpoica

Corpoica cuenta con un grupo de agroclimatología que trabaja desde el año 2013 en las áreas de:

- Agrometeorología y agroclimatología.
- Caracterización y zonificación de riesgos agroclimáticos para diferentes cultivos.
- Modelamiento de la productividad agropecuaria.
- Sistemas de apoyo a la toma de decisiones.
- Apropiación pública de la información y el conocimiento agroclimático.
- Percepción remota aplicada a la agricultura.
- Análisis ecofisiológico y fitosanitario.
- Huella hídrica y de carbono en sistemas agropecuarios.
- Modelamiento de gases de efecto invernadero en la producción agropecuaria.

El grupo ha generado diversos insumos agroclimáticos nacionales, en muchos casos de forma colaborativa con el IDEAM, IGAC, CIAT y otras instituciones del país. Entre los principales logros se destaca:

- **Base de datos para fines agroclimáticos a nivel mensual:** conformada por 1604 estaciones pluviométricas en 18 departamentos, 272 series de temperaturas máximas, mínimas y medias, 245 series de humedad relativa. Está disponible en formato *csv, y a través de un aplicativo de consulta.
- **Base de datos climática para modelaciones agrícolas a escala diaria:** esta base de datos está disponible para toda Colombia para las variables precipitación, humedad relativa y temperaturas máximas, mínimas y medias. Los registros se encuentran a nivel diario y están divididos en dos grupos, el primero con las estaciones que tenían más del 70% de los registros originales y el segundo para aquellas estaciones con entre 50 y 70% de datos originales (Figura 4).

Variable	Grupo 1	Grupo 2	Total
Precipitación	1631	283	1914
Temperatura máxima	179	162	341
Temperatura mínima	243	147	390
Humedad Relativa	241	150	391
TOTAL	2294	742	3036

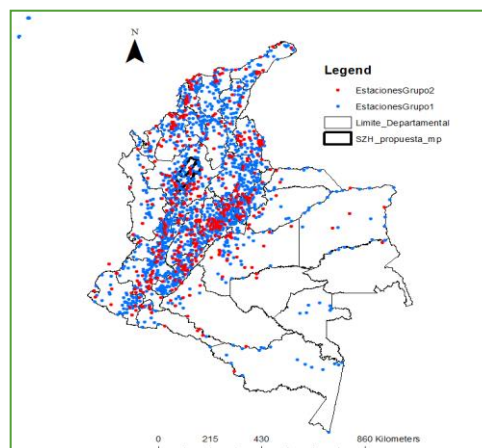


Figura 4. Izquierda: número de series climáticas por variable, por grupo y totales en la BD diaria. Derecha: Distribución de las estaciones con datos de precipitación en Colombia. Fuente: Alzate, D (2017)

- **Interpolador de datos climáticos regionalizado RegRAIN:** modelos regionalizados de lluvia y temperatura del aire, respectivamente, que integran el uso de modelos digitales de elevación (DEM), sus transformaciones (pendiente y aspecto) e información climática homogenizada. El cálculo se basa en una regresión lineal múltiple (MLR).
- **Base de datos espacial XYForestTools:** XYForestTools es una herramienta informática desarrollada para generar información climática, de relieve y edafológica como insumos básicos para la zonificación de especies forestales. Incorpora una base de datos espacial del clima y herramientas para Zonificación Forestal, está disponible para Colombia y consta de 372 rasters de cada variable climática, representando cada ráster un mes entre 1980 y 2010. La base de datos es mixta, combinando información de las estaciones climáticas IDEAM-CORPOICA (2014) y la base de datos AgMERRA

(Ruane et al, 2015) con el control de calidad, programación y SIG realizado por el SIGWEB Grupo Permanentes de CORPOICA.

Adicionalmente, se trabaja actualmente en la política corporativa para la gestión de la información agroclimática, cuyo objetivo principal es orientar y reglamentar lo referente a cada etapa del proceso de gestión de la información, generar lineamientos, protocolos y las aplicaciones informáticas necesarias para garantizar el adecuado manejo de la información y el acceso por parte de investigadores de Corpoica y usuarios externos. La política se sustenta en los siguientes ejes o líneas de trabajo:

- Manejo de las estaciones IDEAM – CORPOICA en los centros de investigación nacionales
- Manejo de las estaciones no permanentes con fines de investigación
- Desarrollo de la Plataforma de gestión de información y Red Agroclimática de Corpoica
- Gestión y actualización de las Bases de Datos Agroclimáticas IDEAM-CORPOICA escalas mensual y diaria.
- Diseño, desarrollo e implementación de índices agroclimáticos y productos agroclimáticos nacionales.
- Integración interinstitucional y proyección a nivel país.

7.1.6 Plataforma Agroclimática Cafetera CENICAFE

CENICAFE cuenta con 186 estaciones “convencionales” más alrededor de 100 estaciones automáticas integradas en la Plataforma.

Adicionalmente, generan un boletín agrometeorológico cafetero con predicciones climáticas y recomendaciones para el manejo del cultivo del café de acuerdo a unas sectorizaciones que ellos tienen de sus zonas cafeteras. El boletín está disponible en: <http://agroclima.cenicafe.org/web/guest/boletin-agrometeorologico>



Figura 5. Estaciones de la red agroclimática de CENICAFE.
 Fuente: <http://agroclima.cenicafe.org/web/guest/condiciones-actuales>

7.1.7 Red Agrometeorológica CENICANA

El Centro Nacional de Investigaciones Cultivo Caña cuenta con Red Meteorológica Automatizada (RMA) compuesta por 38 estaciones agrometeorológicas (<http://www.cenicana.org/clima/>) que tienen algunos registros desde 1993 hasta la fecha.

La información meteorológica (en tiempo real) y climatológica (registros históricos) está disponible para las variables atmosféricas temperatura, oscilación de temperatura, humedad relativa, radiación solar, precipitación, evaporación y viento en el valle del río Cauca, en un período definido por el usuario. El acceso a la plataforma se da a través del link: http://www.cenicana.org/aeps/sistema_consultas_rma.php

7.1.8 Red Agrometeorológica FEDEARROZ

La Federación Nacional Arroceros cuenta en la actualidad con una red de estaciones agrometeorológicas que se puede acceder desde su página web: Federación Nacional Arroceros:

Adicionalmente, han incorporado las estaciones del Fondo de Fomento Algodonero y Conalgodón, las cuales utilizan la misma tecnología. En su conjunto cuentan con más de 40 estaciones en tiempo real de las principales zonas arroceras y algodoneras.

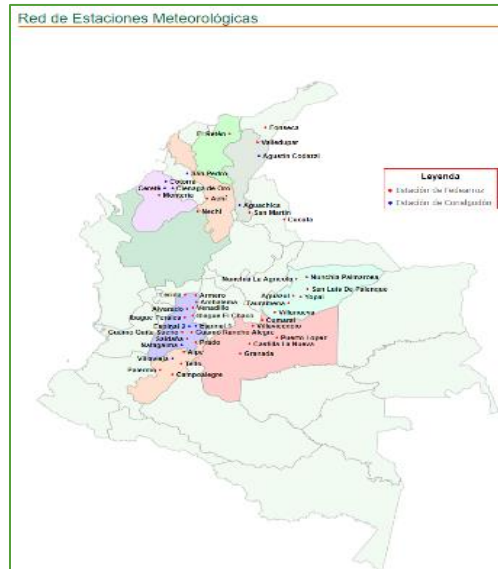


Figura 6. Estaciones de la red FEDEARROZ. Fuente: http://www.fedearroz.com.co/new/estaciones_meteorologicas.php

7.1.9 Información Agroclimática FENALCE

La Federación Nacional de Cultivadores de Cereales no cuenta con una red agroclimática, pero desde hace varios años viene apoyando los procesos interinstitucionales para la gestión de la información agroclimática en conjunto con otros actores y es miembro activo de la MTA Nacional y de la MTA Córdoba. En su página web, bajo el enlace de clima, brindan información útil a su gremio y tienen disponibles todos los boletines agroclimáticos generados en la MTA Nacional y en la de los departamentos de Córdoba y Sucre.

7.1.10 Uso de información agroclimática a partir de instrumentos artesanales

En el Suroccidente de Colombia, departamento del Cauca, se desarrolla un proyecto ejemplo del buen trabajo con comunidades indígenas y campesinas para la generación de alertas tempranas agroclimáticas. El proyecto ha sido liderado por la Fundación Río Piedras y el Acueducto de Popayán y ha contado con el apoyo de diferentes entidades y organizaciones internacionales. Una de las características relevantes del proyecto es el uso de instrumentos artesanales de bajo costo y la incorporación del conocimiento local para la realización de las predicciones y alertas



Figura 7. Uso de información agroclimática Comunidades de campesinos e indígenas en Proyecto Suroccidente Colombiano – Cauca – con apoyo GIZ y del Acueducto de Popayán (Fundación Rio Piedras)

7.1.11 Portal AGRONET

Agronet es un portal del Ministerio de Agricultura con el fin de establecer a nivel nacional la Red de Información y Comunicación del Sector Agropecuario Colombiano. Presenta todo tipo de estadísticas e información útil al sector agropecuario e incluye el componente agroclimático, sirviendo como repositorio de información interinstitucional (boletines) agroclimática, pero también de la Gestión del Riesgo Agroclimático y otros documentos técnicos de interés. Link: <http://www.agronet.gov.co/agroclima/Paginas/default.aspx>

8. EXPERIENCIAS EN EL USO Y APLICACIÓN DE INFORMACIÓN AGROMETEOROLÓGICA EN COSTA RICA

La producción de hortalizas ha tomado un auge muy importante en la zona costera de Costa Rica, debido a una creciente oferta de productos frescos e inocuos por parte de los habitantes y del sector hotelero. El Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA), viene desarrollando un proceso de investigación y transferencia de tecnologías agropecuarias que apoyen el cumplimiento del Plan Sectorial de Desarrollo Agropecuario 2015-2018 y el Plan Nacional de Desarrollo 2015-2018, en lo referente a promover el desarrollo de los territorios rurales, mediante el aumento de la competitividad y

la inserción de la mujer en la producción y comercialización de hortalizas. Según el censo nacional agropecuario realizado en año 2014, Costa Rica pasó de 680 ha en el 2008 a 5905 ha en el 2014 cultivadas en ambientes protegidos. La opción tecnológica que mayor aceptación ha tenido por parte de los productores son los túneles altos y micro túneles con cobertura plástica, que pasaron de un 13% en el 2008 a un 39% en el 2014.

La idoneidad de la opción de ambiente protegido está en función del potencial agro ecológico de cada localidad, clasificación de suelo, manejo agronómico y de los cultivos hortícolas seleccionados. Es por este motivo que la elección de los diseños de ambiente protegido, debe estar acorde con un profundo análisis técnico, en el cual se analice parámetros ambientales como temperatura, humedad relativa, radiación y CO₂.

Las plantas se pueden clasificar según su proceso fotosintético en C3, como la mayoría de las hortalizas, en C4 como las gramíneas y ornamentales; así como las CAM, que son las plantas xerófitas. Cada una de estas clasificaciones tiene diferentes niveles de eficiencia fotosintética, siendo las C3 muy sensibles a las limitaciones de los factores ambientales. Los requerimientos agro climáticos de la mayoría de las hortalizas indican que las variables ambientales deben estar en el siguiente rango: temperatura entre los 25 a 35 °C, la humedad relativa entre el 50 a 70%, radiación solar cercano a los 100 watts/m² de energía PAR durante 10 horas al día y de CO₂ entre los 700 a 1200 ppm.

Por ejemplo, en la Estación Experimental Enrique Jiménez Núñez del INTA, ubicada en la zona norte de Costa Rica a 14 m.s.n.m., dentro de la zona de vida del Bosque Tropical Seco, se llevó a cabo un experimento en el año 2010 para evaluar la adaptabilidad de cinco cultivares de chile dulce (*Capsicum annum* L) a las condiciones climáticas generadas en el interior de un invernadero multi capilla. A continuación, se muestran los resultados (Ramírez *et al* 2015).

- **Temperatura del aire:**

La temperatura es uno de los factores climáticos más difíciles de controlar en zonas de baja humedad como las que predominan en el Pacífico Seco costarricense, ya que puede influir en aspectos del crecimiento de las plantas, en la actividad metabólica, calidad de los frutos, etc. Se presentó una inercia térmica tanto en el interior como exterior del invernadero para el

tiempo comprendido entre diciembre del 2010 a marzo del 2011 (Tabla 4). En el mes de diciembre inició la época seca y coincidió con los menores registros de temperatura, los cuales no superaron los 34 °C en la hora de mayor incidencia de radiación del día (1p.m.) (figura 8). El mes de marzo registró la mayor temperatura en la nave donde estuvo ubicado el cultivo con un promedio de 38,9 °C, existiendo un salto térmico de 4,1 °C con respecto a la temperatura externa. Cabe destacar que en esta prueba no se utilizó ningún tipo de sistema de humidificación ni de sombreo para disminuir la temperatura dentro del recinto. Al comparar estos datos con los obtenidos en la prueba realizada en el mismo periodo del año 2007 (Ramírez *et al.*, 2009), se puede inferir como el promedio de las temperaturas registradas a las 9 a.m. disminuyó en 3,3 °C, con la diferencia que en el año 2007 se empleó un sistema de humidificación y una pantalla de sombreo de 50% de trasmisión de 10 a.m. a 2 p.m. la variante fue que en esta investigación (2011) la distribución del riego cambió de 12 a 22 activaciones diarias durante 5 minutos por cada una, lo que significó una precipitación de 4,6 mm por día.

Tabla 4. Registros de la temperatura (°C) en el interior y exterior del invernadero (diciembre 2010 a marzo del 2011).

Mes	Temp. Ext	Temp. Int	Temp. Ext	Temp. Int	Temp. Ext	Temp. Int
	07:00 a.m.		09:00 a.m.		01:00 p.m.	
Dic-10	25,2	24,6	27,0	29,7	29,7	33,8
Ene-11	25,1	24,9	29,4	31,9	31,3	36,2
Feb-11	24,6	25,4	30,8	34,4	34,4	38,7
Mar-11	25,7	26	30,6	34,7	34,8	38,9

La Tabla 4, muestra el ascenso vertiginoso de la temperatura en tres diferentes horas del día. Las temperaturas que se alcanzan dentro de la estructura especialmente a la 1 p.m. están por encima de los límites óptimos para el desarrollo de cultivos tipo C3, como el chile dulce. De aquí que los materiales genéticos que se deben seleccionar bajo estas condiciones deben ser tolerantes al calor y el manejo agronómico debe enfocarse en suministrar con precisión los riegos para disminuir el estrés hídrico de las plantas.

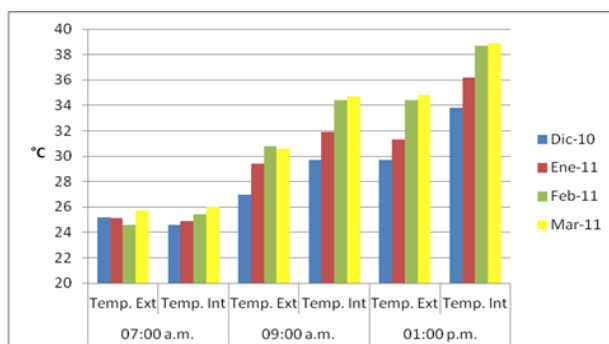


Figura 8. Temperatura registrada en el interior y exterior del invernadero en tres diferentes horas del día (7 a.m. 9 a.m. y 1 p.m.) (Dic-10 a mar 2011).

- **Humedad Relativa:**

La humedad relativa, aunque no es inversamente proporcional con la temperatura, si tienen una estrecha relación. Los menores porcentajes de humedad que se registraron en el mes de marzo a la 1 p.m. coinciden con las mayores temperaturas para el mismo momento (38,9 °C) (Tabla 5).

Tabla 5. Registros de la humedad relativa (%) en el interior y exterior del invernadero, (diciembre 2010 a marzo del 2011).

Mes	H.R. Ext	H.R. Int	H.R. Ext	H.R. Int	H.R. Ext	H.R. Int
	07:00 a.m.		09:00 a.m.		01:00 p.m.	
Dic-10	60,7	66,0	53,4	48,7	48,2	41,7
Ene-11	74,0	79,4	61,6	57,9	51,7	46,1
Feb-11	74,7	75,9	50,3	49,0	41,1	37,2
Mar-11	63,3	68,3	47,6	45,0	40,3	36,3

Las condiciones normales de la época seca se caracterizan por la disminución de la temperatura en las noches debido en gran parte por la ausencia de nubes, lo que provoca la liberación al espacio de la energía absorbida por la tierra durante el día. Esta condición físico climática origina una caída en la temperatura y aumento de la humedad relativa en el ambiente, esto aunado al punto de rocío nos indica que en la única hora del día donde la humedad relativa en el interior del invernadero es mayor a la exterior es a las 7 a.m. llegando como máximo al 79,4% en el mes de enero (Figura 9). Es importante recalcar que de las 7 a.m. a las 9 a.m. durante el periodo de la evaluación, la humedad no estuvo por debajo del 48%, lo que nos indica que las plantas tuvieron las condiciones idóneas para transpirar sin que cerraran estomas. A la 1 p.m. es claro que con las temperaturas obtenidas y la humedad relativa por debajo del 40% en los meses de febrero y marzo, se disminuye la capacidad de transpiración, lo cual nos hace suponer que en las primeras 5 horas de la mañana los

intervalos de riego se deben ajustar con el objetivo de que la planta aproveche al máximo la absorción de agua y nutrientes.

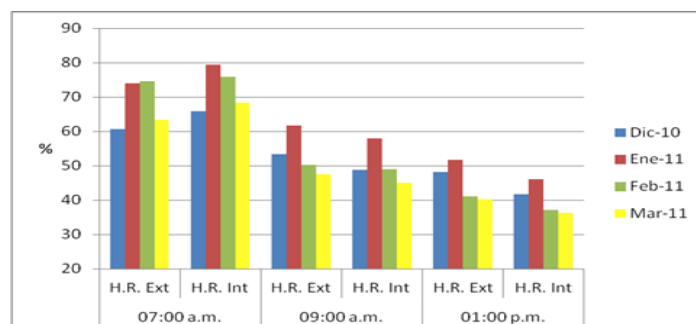


Figura 9. Humedad relativa promedio registrada en el interior y exterior del invernadero en tres diferentes horas del día (7 a.m. 9 a.m. y 1 p.m.) (Dic-10 a mar 2011)

- **Radiación:**

La menor radiación promedio en el exterior del invernadero se obtuvo en el mes de enero a las 7 a.m. con 24,5 watts/m², mientras que, a la misma hora, pero en el mes de febrero se dio la menor radiación en el interior del recinto con 13 watts/m². Por el contrario, la mayor radiación promedio registrada tanto en el exterior como en el interior de la estructura fue en el mes de febrero con 357,6 y 172,7 watts/m² respectivamente (Tabla 6). Según Langhams y Tibbitts (1997), para la mayoría de cultivos C3 como el chile dulce la saturación del sistema fotosintético se alcanza alrededor de los 90 watts/m² de radiación PAR, lo que indica que la cantidad de radiación que llegó a las plantas en estudio, fue propicia para potencializar la fotosíntesis desde las primeras horas de la mañana.

Tabla 6. Registros de la radiación (watts/m²) en el interior y exterior del invernadero (diciembre 2010 a marzo del 2011).

Mes	Luz exterior	Luz interior	Luz exterior	Luz interior	Luz exterior	Luz interior
	07:00 a.m.		09:00 a.m.		01:00 p.m.	
Dic-10	33,4	23,4	181,1	115,8	173,6	168,4
Ene-11	24,5	14,2	163,8	108,0	292,7	140,1
Feb-11	47,5	13,0	259,1	128,5	357,6	172,7
Mar-11	58,5	19,6	263,2	135,8	334,0	151,8

Durante todo el periodo del estudio a las 7 a.m. la diferencia promedio entre la radiación registrada en el exterior del invernadero y el interior fue de 23 watts/m² (57%), a las 9 a.m. de 95 watts/m² (44%) y a la 1 p.m. de 131 watts/m² (45%). Si bien es cierto que el espesor de la cobertura plástica disminuye entre un 10 a 15% la transmisibilidad de la luz, es evidente que la restante reducción en las transmisiones se debe a suciedad por efecto del polvo que es un problema que se acrecienta al inicio de la época seca (Figura 3).

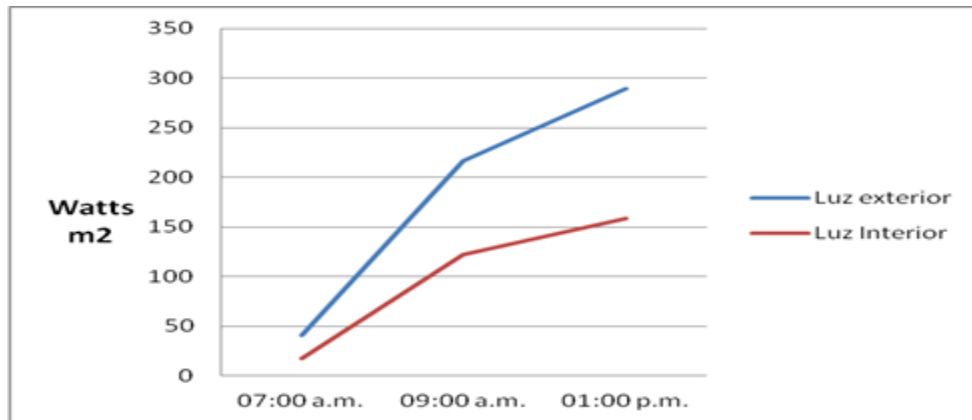


Figura 10. Radiación promedio en watts/m² registrada en el interior y exterior del invernadero en tres diferentes horas del día (7 a.m. 9 a.m. y 1 p.m.) (Dic-10 a mar 2011)

- **CO₂:**

La máxima concentración de CO₂ obtenida en el periodo de la prueba a campo abierto no superó las 255 ppm (marzo 2011) (cuadro 4), lo que ocurrió en las primeras horas de la mañana, coincidiendo en el mes e instante con las mayores concentraciones registradas en el interior del invernadero con 309 ppm. El dióxido de carbono (CO₂), es uno de los compuestos básicos de la fotosíntesis que pocas veces caracterizamos a través de mediciones. La disponibilidad de este compuesto varía según la hora del día ya que por las noches debido a la respiración de las plantas los niveles de CO₂ aumentan, mientras que en el día por efecto de la fotosíntesis bajan (Lorenzo *et al*, 1997). Los resultados demuestran que tanto los niveles de CO₂ del ambiente externo como interno al cultivo, están muy por debajo de las 700 ppm, cantidad óptima que es necesarias para que estos cultivos puedan potenciar la fotosíntesis, ya que según el principio de los factores limitantes de Blackman (Castilla, 2005), la velocidad del proceso está limitada por la velocidad del factor más lento, lo que indica que en la zona donde se realizó el estudio, la disponibilidad de este compuesto puede reducir la expresión genética en términos productivos de los cultivares evaluados.

Tabla 7. Registros de CO₂ (ppm) en el interior y exterior del invernadero (diciembre 2010 a marzo del 2011).

Mes	CO ₂ Ext	CO ₂ Chile	CO ₂ Ext	CO ₂ Chile	CO ₂ Ext	CO ₂ Chile
	07:00 a.m.		09:00 a.m.		01:00 p.m.	
Dic-10	197	203	192	190	164	145
Ene-11	232	235	176	231	141	150
Feb-11	241	317	166	215	124	179
Mar-11	255	309	162	209	113	180

La concentración de CO₂ fue muy variable a lo largo del día (Figura 11). Los mayores registros tanto en el interior como exterior del invernadero en promedio durante la investigación se dieron a las 7 a.m. con 231 y 266 ppm respectivamente, mientras que los niveles más bajos se obtuvieron a la 1 p.m. no superando las 190 ppm. Estas tendencias durante el día evidencian que este componente es un claro factor que limita el proceso fotosintético y tiene un efecto en el rendimiento productivo del cultivo de chile dulce.

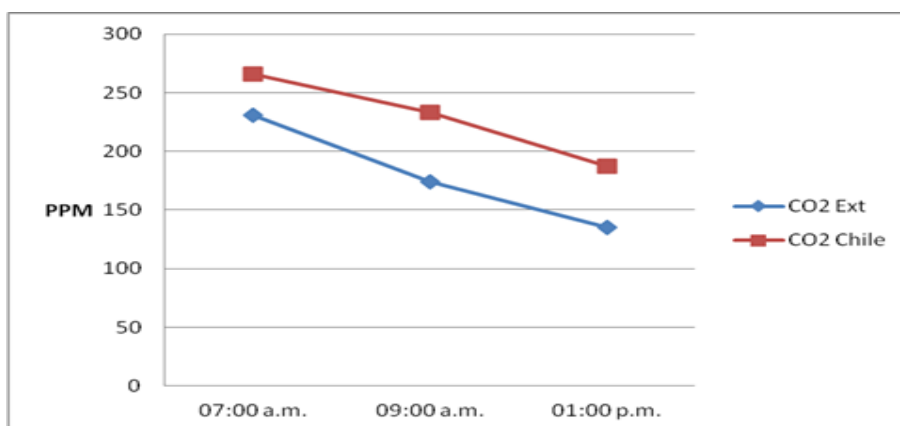


Figura 11. Promedio CO₂ en ppm registrada en el interior y exterior del invernadero en tres diferentes horas del día (7 a.m. 9 a.m. y 1 p.m.) (Dic-10 a mar 2011)

9. IMPORTANCIA DE LA INFORMACIÓN AGROCLIMÁTICA EN LA MODELACIÓN DE ESTRUCTURAS PARA AGRICULTURA PROTEGIDA

La agricultura en condiciones de ambiente protegido se define como toda aquella producción agrícola que se hace bajo estructuras cerradas cubiertas con materiales transparentes, dentro de la cual es posible cultivar plantas en condiciones óptimas. Bajo este sistema de manejo, es posible incrementar de manera significativa la productividad y calidad de los cultivos en

comparación con la producción a campo abierto. Esto se debe a un mejor control del medio edafo-climático (suelo, temperatura, radiación solar, viento, humedad entre otros). El microclima bajo invernadero es en general el más próximo a las condiciones biológicas óptimas para la variedad cultivada, maximiza el proceso de fotosíntesis y de esta manera se obtiene más producción por metro cuadrado con mayor eficiencia en el uso de insumos.

La modelación de estructuras para agricultura protegida se realiza a partir de la herramienta computacional CFD (Computational Fluid Dynamics), la cual genera simulaciones y modelación de las condiciones ambientales generadas en el interior de las estructuras de ambiente protegido, de acuerdo con parámetros de diseño y dimensiones de infraestructura, materiales de la misma y condiciones ambientales externas a la infraestructura. Generalmente, los parámetros a seguir para encontrar el prototipo ideal de estructura se basan en tasas de ventilación con saltos térmicos no mayores a 3°C sin la intervención de sistemas de humidificación y ventilación forzada.

Para la realización adecuada de las simulaciones y modelaciones de estructuras debe existir información agroclimática con controles de calidad y relleno de información con al menos 3 años de registros, de una estación climática cercana al lugar de instalación de las estructuras. Esta información es fundamental para la modelación y diseño de las estructuras y es requerida en forma horaria de acuerdo a las especificaciones del software CFD a utilizar.

Para evaluar el efecto de las estructuras en la protección de las hortalizas cultivadas y en su producción, se debe generar información agroclimática en tiempo real a partir de la instalación de sensores agroclimáticos (a campo abierto y en el interior de las estructuras) para el monitoreo de las variables agroclimáticas. Las etapas de registro, transmisión, almacenamiento, despliegue y consulta de información (en tiempo real) son esenciales para el adecuado proceso de gestión de dicha información y su publicación en plataformas agroclimáticas y/o sistemas de información en la web de fácil acceso a usuarios e interesados.

Algunas de las variables agroclimáticas a registrar tanto a campo abierto como al interior de las estructuras, son las siguientes:

- Temperatura del aire
- Humedad relativa del aire
- Velocidad y dirección del viento

- Precipitación
- Radiación solar/luminosidad y UV
- Presión del aire
- Humedad del aire
- Radiación fotosintéticamente activa (PAR)
- Concentración de CO₂

10. EJEMPLOS DE USO DE INFORMACIÓN AGROCLIMÁTICA EN EL MODELADO DE ESTRUCTURAS

10.1 Experiencia Colombia

En el contexto colombiano el uso de herramientas CFD enfocado al diseño y evaluación climática de estructuras de agricultura protegida ha sido escaso y en la actualidad se conocen 5 trabajos enfocados bajo esta metodología. Ortiz et al. (2004), evaluó las tasas de ventilación de un invernadero tradicional colombiano usado para la producción de flores de corte mediante simulación CFD-2D, reportando valores de ventilación limitados para este tipos de estructuras, Villagran et al. (2012), diseñó un invernadero tipo túnel de 4 naves adosadas para las condiciones agroclimáticas de la sabana de Bogotá mediante un modelo CFD-2D, encontrando que el uso de variantes estructurales maximizaron las tasas de ventilación en un 106% en referencia a los invernaderos tradicionales.

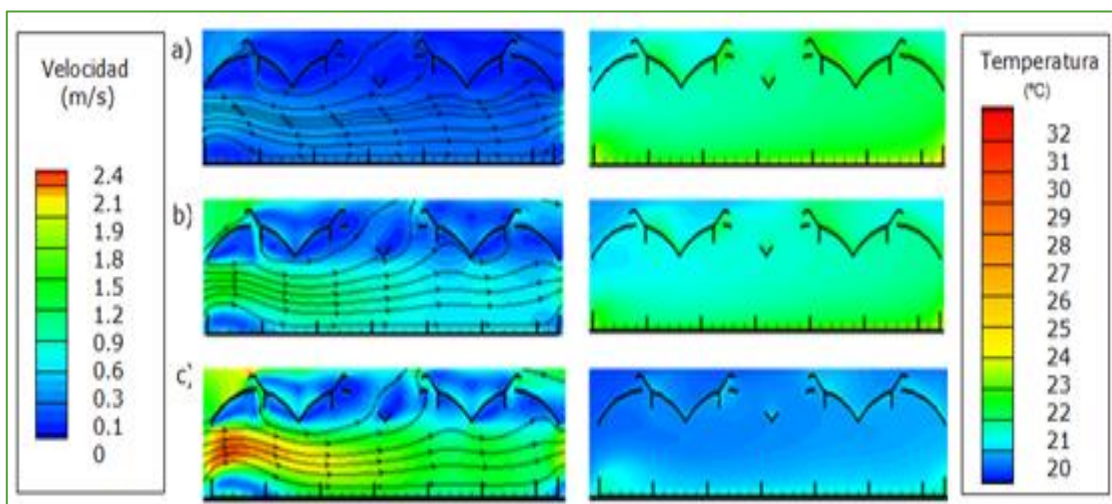


Figura 12. Contornos calculados de velocidad del viento (m s⁻¹) y distribución de temperatura (°C) calculados mediante simulación CFD-2D.

Villagran (2016) diseñó un invernadero tipo túnel para un cultivo de pimentón bajo las condiciones agroclimáticas del municipio de Filandia-Quindío, posteriormente realizó una evaluación climática del invernadero construido mediante el uso de modelos de simulación CFD-3D validados a través de la recopilación de datos de temperatura, humedad relativa y déficit de presión de vapor (DPV) analizados mediante técnicas geoestadísticas, encontrando una correlación superior al 86% del modelo CFD-3D con la variabilidad espacial de los datos recolectados experimentalmente.



Figura 13. Vista de isosuperficies generadas para la variable temperatura (°C), calculadas mediante simulación CFD-3D.

Villagran et al. (2017) generaron y validaron una herramienta de optimización mediante modelación CFD-3D de los sistemas de ventilación de 4 invernaderos de la sabana de Bogotá dedicados a la producción de flores de corte, donde las condiciones de frontera establecidas para el modelo CFD fueron calculadas a partir del uso de los datos históricos con un registro de 6 años de estaciones meteorológicas instaladas en 21 fincas de los diferentes municipios, en términos generales se encontró un ajuste adecuado de los modelos CFD-3D para la representación del fenómeno de ventilación y su efecto sobre el microclima generado en cada una de las estructuras.

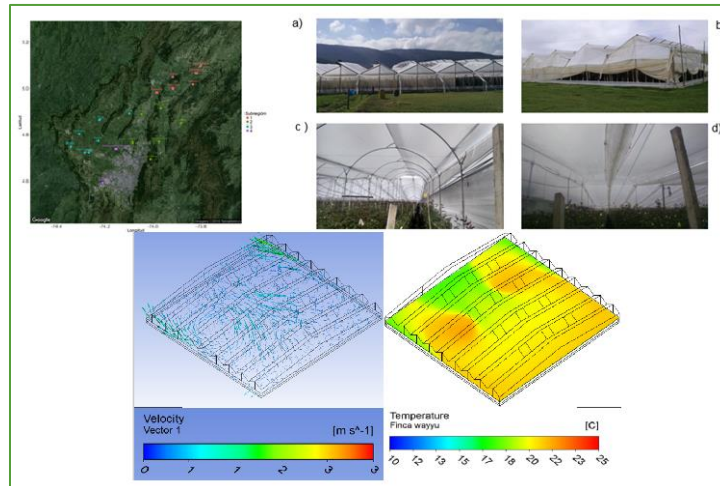


Figura 14. Desarrollo de una herramienta mediante CFD-3D, para la optimización de la ventilación y el microclima generado en invernaderos usados para la producción de flores de corte.

10.2 Experiencia Costa Rica

En el año 2007 el INTA de Costa Rica y el Instituto de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Cataluña en España (IRTA), emprendieron un proyecto para la modelación de estructuras adaptadas a las condiciones agroclimáticas de la zona costera norte de Costa Rica. Mediante el software FLUENT (CFD), el cual es un programa para simular flujos de fluidos, transferencias de calor, turbulencias, reacciones y flujo polifásico, se analizó virtualmente diferentes condiciones ambientales para evaluar un diseño de invernadero tipo dentado (Ramírez, 2007).

10.2.1 Caso 1: Evaluación de la condición de viento

Se simuló una velocidad de viento de 7 m/s, en sotavento (dirección izquierda-derecha), una barrera rompevientos a 10 m de distancia del invernadero. Las paredes de ambos lados del invernadero y los tres monitores presentan una permeabilidad al movimiento del aire correspondiente a una malla anti-áfido de 50 mesh.

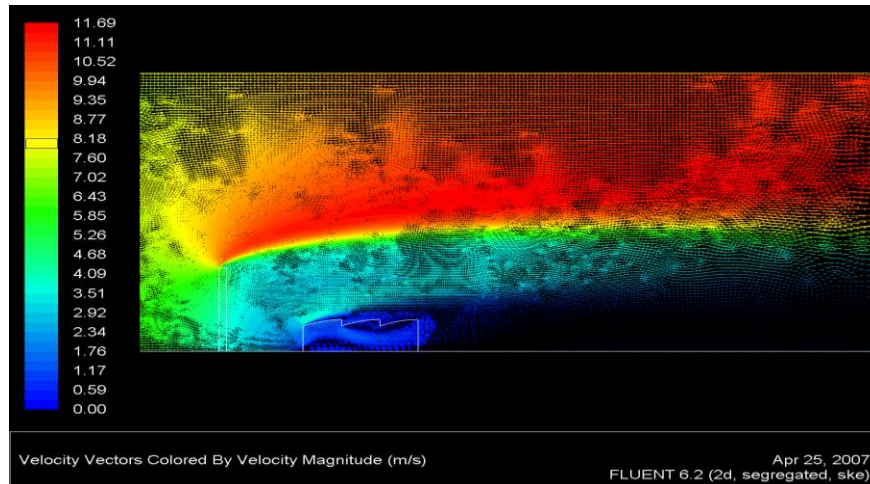


Figura 15. Invernadero “Guanacaste 1”. Evaluación condiciones de movimiento de aire.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Figura 15, se simula las diferentes velocidades de los vectores en el dominio del invernadero. En la parte izquierda de la figura se aprecia la escala con los rangos de velocidad del viento y su dinámica en el interior y exterior de la estructura del invernadero. Analizando esta información podemos entender como la velocidad del viento disminuye de 7 m/s a 3 m/s al pasar por la cortina rompevientos y al ingresar por la pared izquierda del invernadero la disminución del flujo de aire llega a alrededor de 1 m/s, observándose una alta cantidad de volumen de aire que se escapa por el monitor número 1.

10.2.2 Caso 2. Evaluación de la temperatura y velocidad de viento.

Se simuló una velocidad de viento de 5 m/s ingresando en sotavento, con una temperatura ambiental de 35 °C y una energía radiativa en el suelo de 500 watts/m², para condiciones sin cultivo, (si hubiese cultivo sería menor, entre 200 y 250 watts/m²). El diseño del invernadero incluye una barrera impermeable de un metro de altura a partir del suelo.

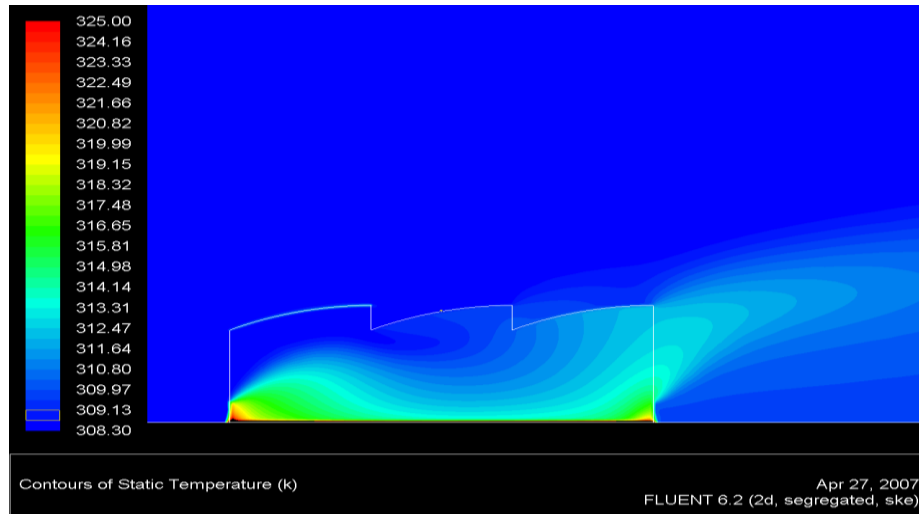


Figura 16. Evaluación de la temperatura y movimiento del aire en FLUENT 6.2, con todas las ventanas cenitales abiertas.

Bajo las condiciones antes descritas, se puede observar como la temperatura externa del invernadero se mantiene cercana a los 35 °C. En el interior del invernadero en la primera nave ocurre un salto térmico en los primeros dos metros de altura de 8 °C, disminuyendo en la parte superior del invernadero por efecto del movimiento del aire que sale por el monitor número uno. En la nave número dos se logra apreciar como el flujo de aire tiene mayor movilidad, sobre todo porque hay poca salida de aire por el monitor 2 ya que se genera una especie de turbulencia, disminuyendo el salto térmico a 4 °C, en el primer metro de altura con respecto a la temperatura externa. En la nave 3, debido a factores aerodinámicos del diseño del invernadero, se genera un arrastre de aire caliente proveniente de la nave número 2, ocurriendo un salto térmico próximo a los 5 °C.

10.2.3 Caso 3. Condiciones del caso 2, cerrando la ventana cenital 1.

Por lo analizado en caso 2, se nota claramente como la mayor parte de la masa de aire (sotavento) sale por la primera ventana cenital o monitor, disminuyendo el flujo de aire a través del invernadero, para contrarrestar esta situación se efectuó una simulación con los mismos factores del caso 2, pero cerrando la ventana cenital 1, con la indicación “wall”.

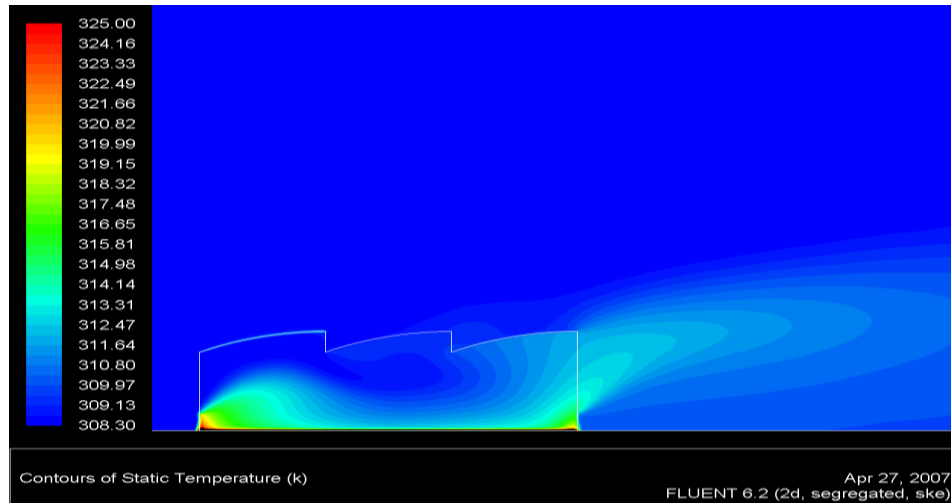


Figura 17. Evaluación de la temperatura y movimiento del aire en FLUENT 6.2, cerrando la ventana cenital 1.

La Figura 17 nos muestra como cerrando la ventana cenital 1, se produce aumento de la corriente de aire hacia la nave número 2, arrastrando las masas de aire caliente a la nave número tres, ocurriendo un salto térmico en esta nave de 5 °C. Aunque se logró un amortiguamiento del salto térmico en la nave 2, gracias a una mayor circulación del flujo de aire que pasa por el invernadero, no se logró contrarrestar el salto térmico de 8 °C en los primeros dos metros de altura de la nave 1 y 5 °C de la nave 3.

10.2.4 Caso 4. Utilización de deflector en la pared izquierda del invernadero, con cultivo.

Se simuló una condición de invernadero con una velocidad de viento de 5 m/s, en sotavento, con una temperatura de 35 °C y una radiación llegando al suelo de 250 watts/m², colocándose un deflector (alero interno) en la pared izquierda del invernadero a 3,5 m de altura, con una plantación de tomate de 2 m de altura y una distancia entre pared y el cultivo de 1.5 m.

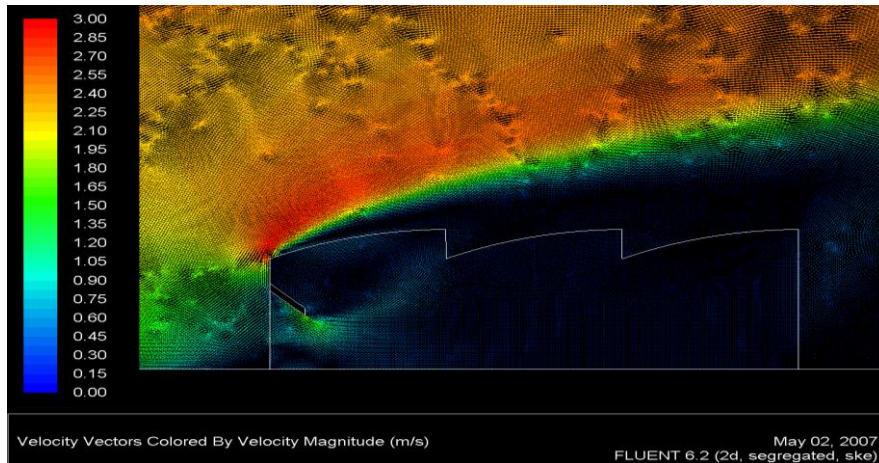


Figura 18. Utilización de deflector y su efecto en la aerodinámica dentro del invernadero.

Como ha ocurrido en los casos anteriores la cortina rompevientos amortigua considerablemente la velocidad del viento antes de ingresar al invernadero. La intención de colocar un deflector en la estructura es que funcione como un “cuello”, para aumentar la velocidad del flujo de aire interno. En la Figura 18 se observa como el aire que ingresa por la pared izquierda aumenta su velocidad en 1 m/s al pasar por el deflector, pero al entrar en contacto con el cultivo, que en este caso se simuló como un bloque de pared porosa, la corriente de aire tiende a moverse a la parte superior del invernadero.

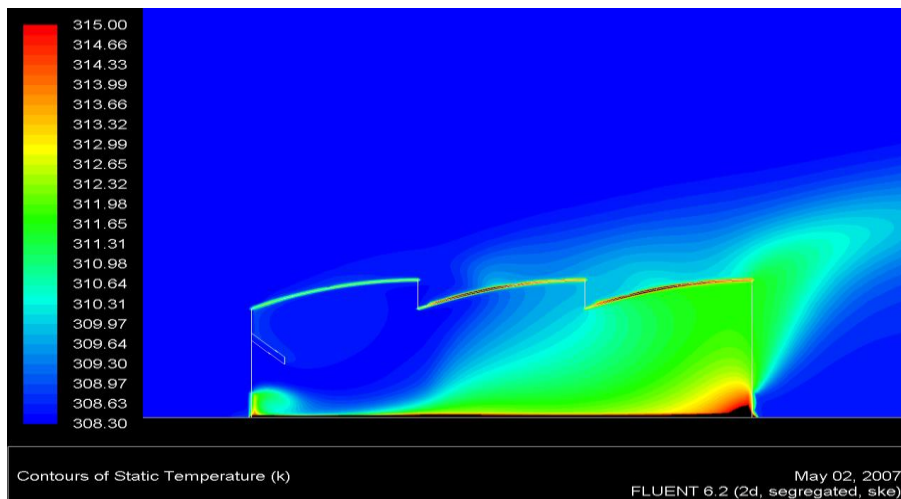


Figura 19. Utilización de deflector y su efecto termodinámico dentro del invernadero, con cultivo.

En la Figura 19, se nota claramente como el aumento en la velocidad del flujo de aire al pasar por el deflector, arrastra el aire caliente hacia la nave 2 y 3, dándose un salto térmico de 2 °C en la nave 2 y 4 °C en la nave 3. Hay que destacar que la presencia de una barrera

porosa, en este caso la simulación del cultivo a 2 m de altura, disminuye el movimiento de fluidos dentro del invernadero y por consecuencia un aumento en temperatura en las naves que presentan menor circulación de aire.

10.2.5 Caso 5. Utilización de deflector en la pared izquierda del invernadero, sin cultivo.

Para esta situación se eliminó el bloque poroso que constituía el cultivo para compararlo con el caso número 4, donde sí estaba presente, siendo ésta la única diferencia entre los casos.

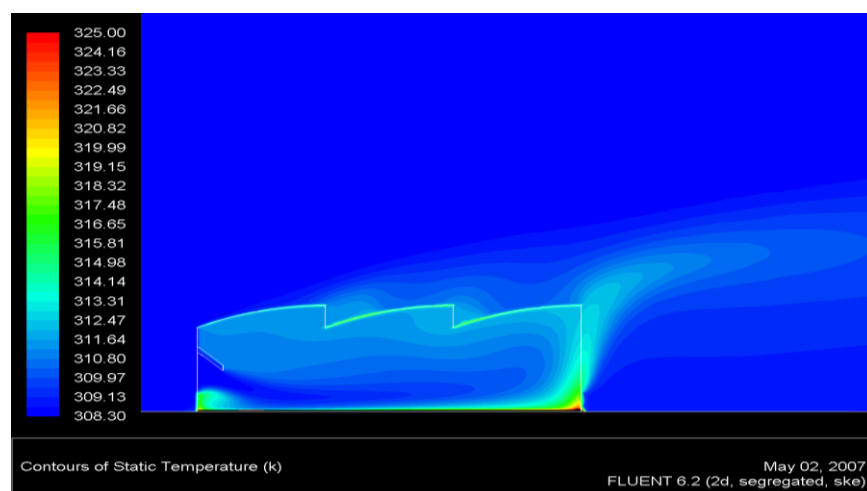


Figura 20. Utilización de deflector y su efecto termodinámico dentro del invernadero, sin cultivo.

Comparando el caso 4 con el 5, en este último se evidencia un aumento en la circulación de aire por las tres naves del invernadero al pasar por el deflector sin la presencia del cultivo. Prácticamente el salto térmico alcanza 3 °C en los dos primeros metros de altura en las naves 2 y 3. Además en la parte superior cercana al techo de la estructura el aire más caliente por diferencia de densidad sale por las ventanas cenitales del invernadero. Esta simulación nos permite entender la importancia de la orientación de los cultivos para no crear barreras que disminuyan el flujo de aire y por consiguiente saltos térmicos muy elevados.

10.2.6 Caso 6. Evaluación de la aerodinámica del invernadero, en condición de barlovento.

Todos los casos anteriores se analizaron bajo la condición de viento en sotavento, ya que los invernaderos en Costa Rica se orientan de esta forma, debido a que la gran mayoría no cuenta con sistemas automáticos de cierre de ventanas cenitales cuando hay altas velocidades de

viento. En el presente caso se analizó la aerodinámica del invernadero simulando una condición de viento en barlovento (viento en dirección a la apertura de la ventana cenital), con una velocidad de viento de 5 m/s, con la presencia de un bloque de cultivo de dos metros de altura y se colocó una barrera de plástico a una altura de dos metros hasta tres metros en la pared derecha de la estructura.

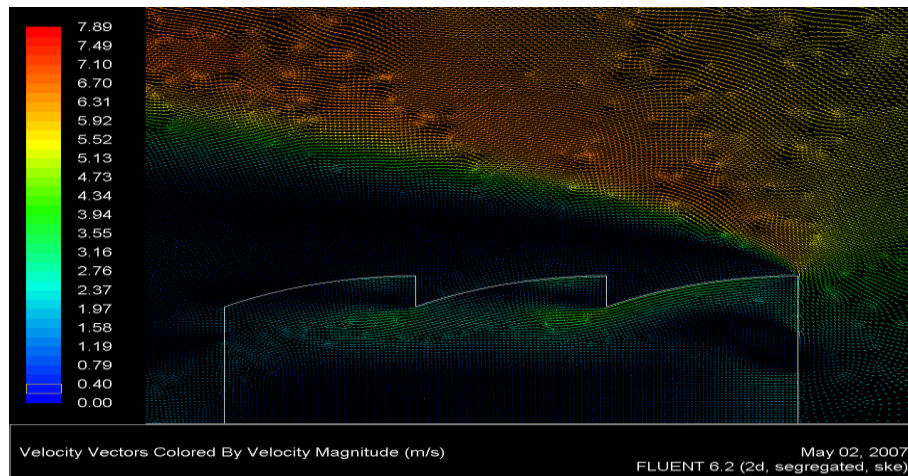


Figura 21. Evaluación del flujo de aire en condición de Barlovento.

En la Figura 21 se puede observar como el efecto de estrangulamiento que produce la barrera de plástico, colocado a dos metros de altura aumenta la velocidad de viento alrededor de 2,7 m/s por debajo de ésta, aunque la mayor velocidad de entrada ocurre por la ventana cenital número tres. Pero nuevamente se aprecia como el viento al entrar en contacto con el bloque de cultivo, la pared de aire se direcciona a la parte superior del invernadero, produciéndose escapes significativos de aire por las ventanas cenitales número 1 y 2, lo que origina saltos térmicos elevados en los dos primeros metros de altura del invernadero.

BIBLIOGRAFÍA

ASOHOFRUCOL. 2014. Plan Hortícola Nacional. (En Línea). www.ASOHOFRUCOL.org.co. P 09-539.

“Boshell, F (2014). *Análisis general de la gestión de información agroclimática en Colombia* [diapositivas de PowerPoint]. Recuperado: Taller de Gestión de la Información Agroclimática en Colombia. Corpoica Centro de Investigación Tibaitatá, Mosquera – Colombia.”

Castilla, N. 2005. Invernaderos de plástico. Editorial Mundi-Prensa. Madrid. España. Pp 201-206.

Corporación Colombia Internacional. 2005. Manual del Exportador. (En Línea). www.cci.org.co.

Díaz, H., J. Melgar and L. Lombardini. Ecophysiology of horticultural crops: an overview. 2010. *Agronomía Colombiana*. 28(1):71-79

Gregoriu, K., K. Pontikis, and S. Vemmos. 2007. Effects of reduced irradiance on leaf morphology, photosynthetic capacity and fruit yield in olive (*Olea europaea* L.). *Photosynthetica* 45(2), 172-181.

Grupo de Agroclimatología - Corpoica, 2014. Establecimiento de la base de datos para caracterización de la variabilidad climática con fines agroclimáticos, Mosquera (Cundinamarca): s.n.

IDEAM (2017). *Catálogo Nacional de Estaciones del IDEAM* [Hola de Excel]. Recuperado: <http://www.ideam.gov.co/solicitud-de-informacion>.

Kositsup, B., P. Montpied, P. Kasemsap, P. Thaler, T. Ameglio, and E. Dreyer. 2009. Photosynthetic capacity and temperature responses of photosynthesis of rubber trees (*Hevea brasiliensis* Müll. Arg.) acclimate to changes in ambient temperatures. *Tree Physiol.* 23, 357-365.

Langhams, R. and Tibbitts, T. 1997. Plant growth chamber handbook. USA. Ed. Iowa State Univ. Press. 240 p.

Lorenzo, P; Sánchez, M; Medrano, E; Aguilar, F y Castilla, N. 1999. Soilles cucumber response to mulching in unheated Mediterranean greenhouse. *Acta Horticulturae*, 491: 401-403.

Lozano, N (2017). *Experiencias en Colombia en la implementación de las Mesas Técnicas Agroclimáticas* [diapositivas de PowerPoint]. Recuperado: <https://www.slideshare.net/FAOoftheUN/colombia-mesas-agroclimticas-y-boletn-productores>. Santiago de Chile.”

Mendoza, A. Ecofisiología y bioquímica de estrés en plantas. 2002. Universidad Agraria Autónoma Antonio Narro. Buenavista, Saltillo, México. 193 p.

MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL. 2005. Documento de trabajo No 82: La industria procesadora de Frutas y Hortalizas en Colombia. Observatorio de agrocadenas en Colombia.

ORTIZ, D.M. (2004). Simulación numérica de la ventilación natural en un invernadero colombiano de diez naves. En Memorias Congreso Iberoamericano para el Desarrollo y Aplicación de los Plásticos en Agricultura, Bogotá, Colombia, p. 99-104.

Ramírez, R. 2007. Informe de Pasantía Técnicas de Dinámicas de Fluidos. Archivos Técnicos INTA. San José. Costa Rica. Pp. 2-10.

Ramírez, R; Aguilar, J; Gamboa J. 2009. Evaluación del microclima en invernadero y su interacción con la fisiología de los cultivos en la Región Chorotega de Costa Rica. En: Memoria 55 reunión anual de la sociedad del PCCMCA. Campeche. México. 147 p.

Ramírez, R; Aguilar, J, Meza, L. 2015. Evaluación del rendimiento y adaptabilidad de cinco cultivares de chile dulce en invernadero. En: Memoria LX reunión anual de la sociedad del PCCMCA. Ciudad de Guatemala. Guatemala.

Ruane, A.C., R. Goldberg, and J. Chryssanthacopoulos, 2015: AgMIP climate forcing datasets for agricultural modeling: Merged products for gap-filling and historical climate series estimation, *Agr. Forest Meteorol.*, 200, 233-248, doi:10.1016/j.agrformet.2014.09.016.

Schaffer, B. and P.C. Andersen. 1994. Handbook of environmental physiology of fruit crops. Vol. II: Sub-tropical and tropical crops. CRC Press. Boca Raton, FL.

Scholander, P., Bradstreet, E., Hemmingsen, E. and Hammel, H. 1965. Sap Pressure in Vascular Plants: Negative hydrostatic pressure can be measured in plants. *Science* 148 (3668): 339–346.

Villagrán, E. A., Gil, R., Acuña, J. F., & Bojacá, C. R. (2012). *Agronomía colombiana. Agronomía Colombiana* (Vol. 30). Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Agronomía. Retrieved from <https://revistas.unal.edu.co/index.php/agrocol/article/view/26573>.

Villagrán, E. A. (2016). *Diseño y evaluación climática de un invernadero para condiciones de clima intertropical de montaña. Maestría thesis, Universidad nacional de Colombia - Sede Bogotá.* Universidad nacional de Colombia - Sede Bogotá. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.05.034>.

Villagrán, E.A., Bojacá, C.R. (2017). Simulación con base en la técnica Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), para el diseño y optimización de la ventilación natural de los invernaderos de flores de corte en la Sabana de Bogotá" En: Colombia 2017. ed:Produmedios ISBN: 978-958-98993-59.