FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

Principios de Modelamiento Microclimatológico de una Especie Vegetal con OpenModelica

AUTORA

Andrea Carolina Rosero Cascante

AÑO

2017

FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

PRINCIPIOS DE MODELAMIENTO MICROCLIMATOLÓGICO DE UNA ESPECIE VEGETAL CON OPENMODELICA

Trabajo de Titulación presentado en conformidad con los requisitos establecidos para optar por el título de Ingeniería Ambiental en Prevención y Remediación

Profesor Guía
Msc. Santiago Daniel Piedra Burgos

Autora
Andrea Carolina Rosero Cascante

Año
2017

DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

“Declaro haber dirigido este trabajo a través de reuniones periódicas con el estudiante, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”

_____

Santiago Daniel Piedra Burgos
Máster en Hidrociencias e Ingeniería
C.I.: 1715384150

DECLARACIÓN DEL PROFESOR CORRECTOR

“Declaro haber revisado este trabajo, dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”

_____

Yasser Alejandro González Romero

Máster en Ingeniería Ambiental

C.I.: 0703737627

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

“Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes.”

_____

Andrea Carolina Rosero Cascante

C.I.: 1723125926

AGRADECIMIENTOS

A mis padres y hermanos, que siempre me han empujado a ser la mejor versión de mi misma; y a mi esposo Daniel por ser mi mejor compañero de equipo.

DEDICATORIA

A mi profesor guía Santiago,
por haberme ayudado a innovar
y a ser ingenieros vanguardistas
con la mente siempre abierta.

RESUMEN

Con un enfoque en generar herramientas viables que contribuyan con la generación de soluciones frente al cambio climático, el presente trabajo de titulación recopiló ecuaciones matemáticas referentes a los diferentes componentes micro climatológicos del ambiente con el fin de relacionarlas con el desarrollo de una especie vegetal y entre sí. A través de una profunda indagación bibliográfica, se escogieron 25 ecuaciones propuestas por investigadores rusos, italianos, chinos, japoneses, entre otros; y, con la utilización del software OpenModelica v1.9.6, se pudieron ingresar algunas de estas ecuaciones programando sus variables, unidades, incógnitas y demás parámetros matemáticos para construir diagramas de cajas con los componentes ambientales micro climatológicos respectivos y de esta manera pre dimensionar el modelo final del sistema completo. Se obtuvieron tres alternativas de posibles modelos a generarse, considerando que la selección de alguno de ellos en el futuro, dependerá de los propósitos específicos del investigador y el tipo de herramienta que necesite.

ABSTRACT

Focusing on the increasing need of generating viable tools that contribute to the generation of solutions to climate change, the present titling work compiled mathematical equations referring to the different microclimatological components of the environment in order to relate them to the development of a plant species and among each other. Through a thorough bibliographical research, 25 equations were chosen from Russian, Italian, Chinese, Japanese and other researches; and, using the OpenModelica v1.9.6 software, some of these equations could be entered by programming their variables, units, unknowns and other mathematical parameters to construct box diagrams with the respective microclimatological environmental components and thus to predefine the final model of the complete system. Three alternatives of possible models were obtained to be generated in the future, considering that the selection of any of them, will depend on the specific purposes of the researcher and the type of tool needed.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN 1

1.1 Antecedentes 1

1.2 Planteamiento del problema 3

1.3 Objetivo General 4

1.4 Objetivos específicos 4

1.5 Justificación 5

2. DESARROLLO 6

2.1 Marco teórico 6

2.1.1 Microclimatología 6

2.1.2 Crecimiento vegetal y conceptos asociados 8

2.1.3 Cambio Climático 9

2.1.4 Modelamiento jerárquico 11

2.1.5 Software utilizado 12

2.1.6 Variables consideradas 15

3. METODOLOGÍA 18

3.1 Análisis de flujos 18

3.2 Algoritmos matemáticos 20

3.2.1 Ecuaciones relacionadas con el crecimiento vegetativo de una planta 20

3.2.1.1 Sistema de ecuaciones para el modelo de una dimensión sin ramificaciones: 20

3.2.1.2 Sistema de ecuaciones para el modelo de crecimiento vegetativo en función del concepto de tiempo hidrotermal 22

3.2.1.3 Ecuación para el modelo bioclimático de desarrollo vegetal PHENOFIT 24
3.2.2 Ecuaciones relacionadas con el funcionamiento del sistema suelo-planta…… ……..24
3.2.2.1 Sistema de ecuaciones para el flujo volumétrico suelo-raíz en 1D…… ……24
3.2.3 Ecuaciones relacionadas con el funcionamiento del sistema de factores meteorológicos-ambientales que inciden sobre el desarrollo de la planta……. ……..26
3.2.3.1 Ecuación para el cálculo de calentamiento del aire: considera un flujo de calor que naturalmente interactúa con el suelo para determinar el calentamiento del aire..... 26
3.2.4 Ecuaciones relacionadas con el sistema de radiación solar entrante……..27
3.2.4.1 Sistema de ecuaciones para el cálculo de radiación solar global horizontal y radiación solar normal directa (FARMS): considera la nubosidad parcial del cielo 27
3.3 Pre modelamiento en OpenModelica..... 29
4. RESULTADOS 34
4.1 Alternativa 1: basada en el modelo de una dimensión sin ramificaciones..... 34
4.1.1 Diagrama 34
4.1.2 Modelo..... 35
4.1.3 Sustentación..... 36
4.2 Alternativa 2: basada en el concepto del tiempo hidrotermal ……38
4.2.1 Diagrama 38
4.2.2 Modelo..... 39

4.2.3 Sustentación 40
4.3 Alternativa 3: basada en el modelo bioclimático de desarrollo PHENOFIT 42
4.3.1 Diagrama 42
4.3.2 Modelo 43
4.3.3 Sustentación 43
5. DISCUSIÓN 44
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 47
6.2 Conclusiones 47
6.2 Recomendaciones 48
REFERENCIAS 50

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Modelo no jerárquico (izquierda) y modelo jerárquico (derecha) 11
Figura 2. Modelo sencillo generado en OpenModelica (gráfico y en lenguaje de programación). 14
Figura 3. Diagrama de proceso de la metodología utilizada a lo largo del trabajo de titulación. 18
Figura 4. Líneas de códigos de programación del paquete de unidades del Sistema Internacional con el cual se trabajó en cada una de las alternativas construidas. 30
Figura 5. Líneas de códigos de programación de las cajas correspondientes a suelo (C2), radiación solar(C3) y parámetros meteorológicos (C3). 31
Figura 6. Líneas de códigos de programación de las cajas correspondientes a la planta (C1) utilizada en el pre modelamiento de cada una de las alternativas planteadas. 32
Figura 7. Líneas de códigos de programación del conector importado para el flujo de agua. 33
Figura 8. Diagrama de cajas de la Alternativa 1. 34
Figura 9. Gráfico variables - tiempo de la C1 de la Alternativa 1. 35
Figura 10. Curvas de crecimiento lineal (a) y periódico (b) de una especie vegetal en el tiempo; considerando tan solo al suelo y al funcionamiento intrínseco de la planta como factores limitantes. 36
Figura 11. Diagrama de cajas de la Alternativa 2. 38
Figura 12. Gráfico variables – tiempo de la Alternativa 2. 39
Figura 13. Curvas de crecimiento vegetativo acumulativo de una especie vegetal en el tiempo, considerando al tiempo hidrotermal como el factor más incidente en el desarrollo y crecimiento vegetal; y por tanto también al suelo y a los factores meteorológicos. 40
Figura 14. Diagrama de cajas de la Alternativa 3. 42
Figura 15. Síntesis de alternativas de modelos generadas. 44

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Intercambio de flujos entre elementos del sistema. 19
Tabla 2. Variables de las ecuaciones 1 – 5. 22
Tabla 3. Variables de las ecuaciones 6 – 11. 23
Tabla 4. Variables de la ecuación 12. 24
Tabla 5. Variables de las ecuaciones 13 - 17. 25
Tabla 6. Variables de la ecuación 18. 27
Tabla 7. Variables de las ecuaciones 19-79. 28
Tabla 8. Íconos creados en OpenModelica para premodelamiento de alternativas. 29
Tabla 9. Conectores utilizados para los flujos entre cajas. 32

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1..... 21
Ecuación 2..... 21
Ecuación 3..... 21
Ecuación 4..... 21
Ecuación 5..... 21
Ecuación 6..... 22
Ecuación 7..... 22
Ecuación 8..... 22
Ecuación 9..... 23
Ecuación 10..... 23
Ecuación 11..... 23
Ecuación 12..... 24
Ecuación 13..... 25
Ecuación 14..... 25
Ecuación 15..... 25
Ecuación 16..... 25
Ecuación 17..... 25
Ecuación 18..... 27
Ecuación 19..... 27
Ecuación 20..... 27
Ecuación 21..... 27
Ecuación 22..... 27
Ecuación 23..... 27
Ecuación 24..... 28
Ecuación 25..... 28
Ecuación 26..... 28
Ecuación 27..... 28

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

El acelerado crecimiento demográfico, la sostenida explotación de recursos naturales y las actividades industriales son tres de los factores antropogénicos que, sumados con aquellos geológicos, espaciales y temporales, han incrementado la temperatura media del planeta y causado un cambio climático notable en los últimos años. Por otro lado, las diferencias sociales y la creciente necesidad de satisfacer cada vez más necesidades humanas, han motivado el desarrollo de tecnologías que permitan una adaptación a este cambio climático de manera efectiva y de bajo costo (Paloma Esteve, 2015, págs. 49-58)

A nivel mundial se han realizado varios estudios sobre la correlación entre factores meteorológicos del medio y el crecimiento vegetal: pues las plantas son seres vivos que si bien mantienen toda una configuración genética y fisiológica, se ven altamente influenciadas e incluso son dependientes de componentes abióticos como la cantidad de agua, composición del suelo, temperatura del aire, etc. (Niles, Lubell, & Brown, 2015, págs. 178-182)

El modelamiento de sistemas ambientales reales es una de las consecuencias del uso de las Tecnologías de la Información (TICs) en diferentes campos de la ciencia, para la generación de instrumentos de predicción, entendimiento y análisis de información. Los modelos meteorológicos, por otro lado, han sido mayormente utilizados a nivel mundial para la predicción del clima en diferentes locaciones; sin embargo, el cambio climático ha despertado el interés de la comunidad científica para desarrollar sistemas de alerta temprana a sequías, inundaciones y demás problemas climatológicos predictibles. La determinación de patrones puede ser posible gracias a la compilación ordenada de datos meteorológicos a lo largo del tiempo, en función de los objetivos y propósitos del investigador, así como del grado de incidencia que las demás variables del

microclima del ecosistema analizado tengan sobre el mismo. Alrededor del mundo se han venido desarrollando modelos meteorológicos que facilitan el uso de datos climáticos, a través de enfoques específicos: dentro del campo de la agricultura, el manejo de recursos hídricos, la planificación territorial y por supuesto, la economía a gran escala (Niles, Lubell, & Brown, 2015, págs. 183-185).

La aplicación de modelos numéricos para el entendimiento del comportamiento de especies vegetales es una idea vanguardista que compila las etapas de observación, análisis, descripción cualitativa o cuantitativa, inducción de mecanismos y predicción (Jones, 2014, pág. 389). Debido a la limitada variedad de parámetros meteorológicos realmente incidentes sobre la producción de biomasa de una planta, se han propuesto ya algunas teorías que proponen el estudio de las relaciones entre la temperatura ambiental, la radiación y la interacción planta-suelo con el crecimiento de la misma; confirmando la existencia de una problemática climatológica a nivel mundial que puede ser resuelta a través de modelo numéricos de experimentación y/o predicción (Chiou & Chien, 2015, pág. 56).

Considerando la relevancia creciente del cambio climático, la utilización de modelos estadísticos para la predicción de las respuestas de plantas ante parámetros climáticos extremos parece ser muy prometedora; sin embargo se mantiene empírica. El funcionamiento óptimo de un ecosistema se ve influenciado no solamente por sus componentes sino también por las variables externas que influyen sobre el mismo, tal como el clima y los parámetros que lo conforman. Los elementos celulares de las plantas presentan funciones específicas para reaccionar antes las situaciones del ecosistema y conseguir la materia prima que necesitan para desarrollarse, es así como la adaptación al cambio climático puede ser una realidad que tome menos tiempo si se encamina la ciencia hacia las necesidades específicas de las especies con

respecto a ciertos parámetros climáticos. La experimentación con ecosistemas resulta compleja sobre todo por las abundantes y complejas interrelaciones ente los elementos bióticos y abióticos con el entorno, pero estudiar por separado cada una de las reacciones ocurrentes en una especie específica resulta útil para cualquier análisis de sensibilidad más global, es así como algunos autores a nivel mundial reconocen al modelamiento numérico y/o estadístico como una herramienta primaria para el entendimiento y mejoramiento del desarrollo de un ecosistema o de una especie vegetal en específico (Ascione, Deus, & Alves, 2013, págs. 1470-1476)

Mediante la presente investigación se propone un modelo de correlación del desarrollo de una especie vegetal en función de las condiciones micro meteorológicas de su entorno. El análisis en el tiempo es importante porque en los niveles de aplicación de modelos similares tales como la agricultura y la economía a gran escala, uno de los factores externos más limitantes del proceso de desarrollo de las plantas es la cantidad de días que se toma la especie para germinar, desarrollarse, producir frutos, reproducirse, etc. Asimismo, se pretende determinar los factores micro climatológicos que más influyen sobre el crecimiento vegetal a través de un pre modelamiento en caja gris que involucre tanto a la planta como a los componentes meteorológicos más importantes.

1.2 Planteamiento del problema

Varios autores a nivel mundial han advertido la complejidad de determinar los factores bióticos y abióticos que inciden sobre el crecimiento de una planta, y centrarse en ellos en vez de seguir generando compuestos químicos que arreglen problemas que no han sido completamente entendidos previamente (Main, Steckel, Hayes, & Mueller, 2006, págs. 1101-1105). La fusión de diferentes ciencias aplicadas tales como la ingeniería ambiental y la meteorología junto con ciencias madres como la matemática y la biología,

resulta muy vasta al momento de definir concretamente el funcionamiento o desarrollo normal de una indeterminada especie vegetal tan solo en función del entorno que la misma necesita o bajo el entorno en el cual se encuentra. Las proyecciones sobre el cambio climático requieren de investigaciones que utilicen menos recursos para obtener resultados más eficaces y aplicables a la realidad de agricultores, economistas, científicos e incluso de la sociedad civil en general (Quiggin, 2007, pág. 5). El principal problema a resolverse con la presente investigación radica en la propuesta de un modelo matemático que incluya factores micro climatológicos y fisio biológicos propios de una planta de manera que pueda utilizarse como una herramienta práctica de predicción, validación y prueba de las infinitas variaciones que puede tener ese microclima, a través de una línea base sólida y sustentada de los métodos utilizados y los resultados obtenidos.

1.3 Objetivo General

Seleccionar los principales componentes de un modelo micro climatológico considerando los factores que influyen significativamente sobre el desarrollo de una planta.

1.4 Objetivos específicos

a) Diseñar diagramas de caja en OpenModelica que representen los factores micro climatológicos determinantes en el crecimiento de una planta, a través de modelos.
b) Sustentar la presencia o ausencia de factores micro climatológicos en cada uno de los modelos propuestos.
c) Definir la alternativa más viable entre los diagramas diseñados para un futuro modelamiento completo del microclima de una planta.

1.5 Justificación

En el Ecuador, el INAMHI ha venido utilizando modelos numéricos para la predicción meteorológica a diferentes escalas de tiempo: el modelo Weather Research and Forecasting (WRF) y el modelo Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5); utilizando el software estadístico Climate Predictability Too (CPT) para la generación de pronósticos estacionales de clima (INAMHI, 2016). Los principales parámetros meteorológicos considerados por el Instituto son la precipitación, temperatura, humedad y viento. A nivel nacional se mantiene constante la elaboración de boletines, anuarios e informes climatológicos periódicos; así como caracterizaciones climáticas y registro de datos meteorológicos oficiales, sin embargo, el Ecuador no cuenta con sistemas de modelamiento públicos o entidades que se dediquen al estudio del comportamiento de especies vegetales a estímulos diferentes de temperatura, precipitación, humedad o radiación solar. (INAMHI, 2016). Por otro lado, a nivel mundial tampoco se ha elaborado un modelo de microclimas que permita realizar predicciones sobre el crecimiento de ciertas especies vegetales en función de los factores que lo limitan; debido a la complejidad de interrelacionar todos los factores ambientales en una herramienta completa. Sin embargo, se han estudiado y generado diferentes algoritmos matemáticos que describen cómo calcular el grado de influencia de ciertos factores micro climatológicos sobre el crecimiento vegetativo de una planta; en este trabajo de investigación se pretende analizar estos modelos matemáticos existentes y determinar una alternativa viable para la elaboración futura de un modelo micro climatológico específicos. Asimismo, se pretende utilizar diferentes sistemas de ecuaciones para enriquecer los modelos existentes apartados, complementarlos entre sí y contribuir con sustentaciones argumentadas que permitan utilizar el modelamiento micro climatológico en la vida cotidiana y contribuir con las soluciones de adaptación al cambio climático.

2. DESARROLLO

2.1 Marco teórico

2.1.1 Microclimatología

Hace más de 3000 años, China empezó a comprender de la importancia entre la correlación la bioclimatología de las plantas con los factores que inciden sobre ella, a través de observaciones empíricas. Pero no fue hasta mediados del siglo XVIII que la ciencia occidental generó el término de fenología para referirse a todos aquellos fenómenos estacionarios y periódicos a los que los organismos vivos se exponen; sin embargo, el término se fue volviendo obsoleto conforme los descubrimientos bioclimatológicos se profundizaban y actualizaban cobrando cada vez más importancia hasta absorber a la fenología como parte de una ciencia mayor que involucre variables tanto climáticas como biológicas, la bioclimatología moderna. Si bien esta ciencia es vanguardista, los esfuerzos del pasado consistieron principalmente en experimentaciones estadísticas y recopilación de datos, originando por ejemplo a los diarios lunares y calendarios de siembra en la agricultura. Hoy en día, la bioclimatología se ha dividido en dos ramas principales: aquella enfocada en la recopilación de datos de diferentes especies y sus reacciones a fenómenos como el cambio climático; y aquella dedicada al modelamiento bioclimático, un alcance más práctico y de gran utilidad que aplica conceptos indispensables efectivamente inciden sobre el comportamiento vegetal, tales como las funciones matemáticas del crecimiento de una planta, el estrés ambiental y la composición micro climatológica de los ecosistemas (Chiou & Chien, 2015, pág. 43).

Los microclimas se pueden definir esencialmente como el arreglo meteorológico en una superficie reducida tal como un bosque, un estanque, un edificio o incluso un mesocosmos artificial; teniendo en cuenta que este arreglo consiste en las características específicas del estado de esa atmósfera particular y las condiciones que la rigen (Gosling, y otros, 2014, págs. 277-308).

A continuación se describen estas condiciones o propiedades atmosféricas determinadas elementos meteorológicos, en función de las definiciones propuestas de la Asociación Meteorológica Americana:

- **Radiación solar:** consiste en la radiación electromagnética total emitida por el sol. Para aproximaciones iniciales, el sol emite radiación a temperaturas cercanas a los 5700°K, de la cual el 99.99% posee un rango de longitud de onda de entre 0.15 y 4.0 micrómetros (µm) con una intensidad pico de 0.5µm. Cerca del 50% de la energía total del haz solar es parte del espectro visible (0.4 – 0.7 µm), y casi la totalidad del otro 50% se encuentra cerca del espectro infrarrojo, muy poca energía se ubica dentro del espectro ultravioleta.
- **Temperatura del aire:** consiste en la temperatura indicada por un termómetro expuesto al aire en un lugar cubierto de radiación solar directa.
- **Humedad del aire:** magnitud dada por la fracción de vapor de agua presente en una cantidad específica de aire.
- **Viento:** aire en movimiento en relación a la superficie de la Tierra; por lo general se considera solamente el componente horizontal debido a los bajos valores los componente verticales.
- **Nubosidad:** porción de nubes presente en la atmósfera, sobre un área determinada. Una nube se define como la acumulación de partículas gaseosas de agua en diferentes capas atmosféricas (Gosling, y otros, 2014, pág. 296).
- **Presión atmosférica:** presión ejercida por la atmósfera como consecuencia de la atracción gravitacional ejercida sobre la columna de aire vertical en el punto de estudio.
- **Precipitación:** profundidad de partículas líquidas formadas en la atmósfera que han que ha caído sobre un área determinada de la superficie de la Tierra, en una cantidad de tiempo definida.

2.1.2 Crecimiento vegetal y conceptos asociados

La función de crecimiento de una planta puede empíricamente determinarse como auto catalítica y representar la variación del tamaño de un individuo en el tiempo (Bessonov & Volpert, 2014, pág. 112) , en donde ese crecimiento se da por parámetros tales como el arreglo genético de la especie, la presencia de nutrientes en el suelo, las condiciones meteorológicas adecuadas, el funcionamiento biológico del organismo, entre otros. Asimismo, el clima puede definirse como el conjunto de procesos atmosféricos típicos de un lugar específico compuesto por variables como la temperatura, precipitación, nubosidad, radiación solar, humedad, etc. Otro importante concepto relacionado con la bioclimatología surgió en el año 2013: la biometeorología. Este término hace referencia a una "ciencia interdisciplinaria de las interacciones entre procesos atmosféricos y seres vivos" (Gosling, y otros, 2014, pág. 303).

El estrés ambiental, por otro lado, tiene diferentes efectos sobre diferentes especies vegetales debido justamente a que éstas se desarrollan en diferentes entornos y presentan diferentes genotipos; pero el análisis de la variación de estos procesos atmosféricos llamados clima, puede conducir hacia respuestas referidas a los parámetros más cambiantes y fuera del control humano que inciden sobre el desarrollo de una planta. El estrés ambiental se puede representar de tres formas principales: las alteraciones en la iniciación de eventos de desarrollo, las alteraciones del tiempo normal de esos eventos de desarrollo y las alteraciones de la arquitectura de la planta y/o sus órganos; en donde, se pueden ejemplificar estos tipos de estrés cuando una planta no desarrolla la cantidad óptima de raíces laterales debido a un déficit hídrico, cuando la planta acelera su transición vegetativa a la reproductiva debido a temperaturas elevadas, o cuando la planta muta creando hojas más largas y más gruesas en respuesta a un exceso de dióxido de carbono. La plasticidad de las plantas frente a ambientes perturbados es considerablemente elevada, y justamente los modelos micro climatológicos pretenden conocer qué tipo de

alteraciones podría presentar una especie determinada frente a una situación específica y cómo evitarlas o acelerarlas (Gray & Brady, 2016, pág. 17).

Dos conceptos muy relevantes para el entendimiento del crecimiento vegetal son la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente. El primer término se refiere a la concentración de agua en un determinado suelo que permanece constante después de un período de drenaje, es decir el nivel de humedad que el sustrato saturado con agua en cada uno de sus poros mantendrá luego de que esta saturación drene a través de la estructura del suelo. Por otro lado, el punto de marchitez permanente se refiere al nivel de humedad que un suelo que ha perdido toda su concentración de agua mantiene sin ésta ser aprovechable por ningún cultivo. Ambos son indicadores del estado de humedad de los suelos y del momento en el cual el agua del mismo se encuentra o no disponible para una planta (Pérez, Berberá, & Carmelo, 2015, págs. 325-345).

2.1.3 Cambio Climático

Las actividades antropogénicas han causado una aceleración en un proceso natural de calentamiento a nivel global debido a la demografía en masivo crecimiento, sobreexplotación de recursos, etc., como se mencionó previamente. El cambio climático representa una creciente urgencia de generación de soluciones, mecanismos de respuesta, actualización tecnológica y sobre todo adaptación (Cornelis van Kooten, 2013, pág. 9).

La adaptación, en el ámbito climático, puede definirse como un proceso en el cual un sistema se ajusta a una nueva disposición atmosférica y a sus efectos sobre el ambiente, incluyendo a todos los elementos de ese sistema y sus diferentes particularidades: fisiología, aspecto físico, procesos celulares y biológicos, etc. de animales y plantas (Gosling, y otros, 2014, pág. 282). A nivel agrícola, uno de los potenciales usos de modelos micro climatológicos, se

mantienen tres pilares importantes a considerar para evaluar la incidencia del cambio climático sobre la producción de ciertas especies vegetales: la incertidumbre, la tasa de cambio y los efectos secundarios. Primero, el desconocimiento general de los efectos certeros y la falta de preparación tecnológica y económica con la que los seres humanos fueron sorprendidos al confirmar que el clima estaba cambiando, interfieren con posibles predicciones y sobre todo con la toma de decisiones tanto a nivel industrial como artesanal. En segundo lugar, la rapidez con la que el clima cambia no actúa sola, puesto que genera también una respuesta en la rapidez con la que agricultores y productores masivos de especies comestibles deben ajustarse e incrementar su capacidad de renovación de procedimientos de siembra, germinación, cosecha, fumigación, etc; por lo cual se vuelve más obvia la importante participación del ser humano con todos sus recursos en el ámbito de la adaptación eficaz. Finalmente, los posibles efectos secundarios que el cambio climático promete a nivel agrícola, por ejemplo, involucran aspectos que van desde lo político hasta lo social: incremento de impuestos, disminución de recursos de uso cotidiano, aumento de la pobreza y del contraste entre clases, orientaciones educativas, etc. El análisis del campo agrícola sin duda es uno de los prioritarios debido a que representa la base de la pirámide de necesidades humanas, y sin duda los modelos micro climatológicos y las soluciones tecnologías encabezan la lista de posibles soluciones (Quiggin, 2007, pág. 4).

Como consecuencia de la necesidad de adaptación, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) ha direccionado parte de sus recursos hacia el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP) y conjuntamente con la Organización Meteorológica Mundial han venido elaborando estudios intergubernamentales de asesoría desde 1990 mediante diferentes grupos de trabajo que contemplan ámbitos como las bases físicas de la ciencia, mitigación, adaptación, vulnerabilidades, e impactos del cambio climático (IPCC, 2016). El AR5 (Quinto Reporte de Asesoría) del Panel Intergubernamental en Cambio Climático (IIPCC) fue publicado en el 2014,

después de que los miembros se reunieren en 2009 en Bali para su elaboración. El Capítulo 3 del AR5 establece un análisis esencial para la toma de decisiones que involucren soluciones tecnológicas, tales como el modelamiento micro climatológico; las mismas consideran los componentes social, ético y económico como indispensables al momento de proponer mecanismos que puedan interferir peligrosamente con el sistema climático.

2.1.4 Modelamiento jerárquico

El modelamiento de sistemas naturales puede ser de tipo descriptivo (la validación ocurre después de la repetición y confirmación estadística de la hipótesis) o analítico (la validación ocurre a través de la demostración matemática de las variables del sistema). El presente trabajo de titulación se ha encaminado por el modelamiento analítico, específicamente por un tipo de modelamiento conocido como jerárquico. Este tipo de modelamiento permite predecir lo que ocurrirá con un parámetro final después de que los niveles de parámetros inferiores concuerden y se hayan solventado todas las interacciones aplicables entre sí; en la Figura 1 se puede observar una comparación entre modelo no-jerárquicos y modelos jerárquicos:

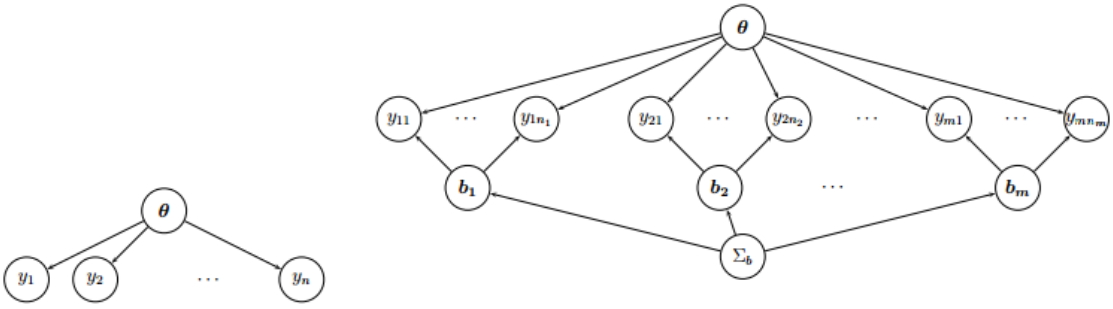


Figura 1. Modelo no jerárquico (izquierda) y modelo jerárquico (derecha).
Tomado de: (Levy, 2012)

En la Figura 1, se puede observar que en un modelo jerárquico las observaciones se agrupan en racimos que a su vez generan resultados que comparten parámetros entre sí o que comparten parámetros dentro de un solo racimo debido a las interacciones entre las observaciones del mismo. La

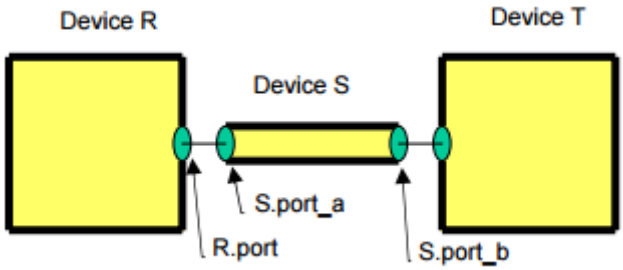
principal ventaja de utilizar modelos jerárquicos es la premisa de que una observación tal vez no sea independiente de otra, clarificando los elementos del sistema para volverlo de “caja blanca” y reduciendo el margen de error e incertidumbre derivados de interacciones omitidas entre las observaciones realizadas. Los modelos más precisos comprenden diferentes niveles de atributos que al estar interconectados permiten incrementar el alcance de la predicción deseada y englobar la mayor cantidad de variables directas e indirectas posibles, debido a que los sistemas naturales en más de uno de los niveles de análisis considerados: por ejemplo, para el sistema del cuerpo humano puede presentarse un modelo que prediga el crecimiento al final de la edad adulta en función del arreglo genético del individuo, pero esta predicción no será del todo exacta si no se consideran las posibles enfermedades a lo largo de su vida, accidentes, práctica de deportes, nutrición, etc.; los modelos jerárquicos pretenden interrelacionar las variables del sistema organizándolas en niveles por los parámetros que pudieran compartir (Levy, 2012, págs. 175-206).

2.1.5 Software utilizado

OpenModelica es un software desarrollado por la compañía de programación, simulación y modelamiento mediante el Consorcio de Libre Acceso Modelica (OSMC) y con el respaldo de la Asociación Modelica, con la intención de crear una herramienta de libre acceso que permita desarrollar productos relacionados a nivel académico e incluso industrial. La OSMC se enfoca que los participantes del software contribuyan con el enriquecimiento del programa y éste pueda continuar desarrollándose a largo plazo. La Asociación Modelica inició sus actividades en el año de 1996 en Suecia, cuando se empezó a desarrollar el SiE-WG (Grupo de Trabajo de Simulación Básica Europea), con el liderazgo del Ing. Hilding Elmqvist y ha continuado desarrollándose por más de 18 años mediante reuniones anuales del directorio de la Asociación. El software contiene decenas de librerías precargadas que incluyen desde modelos básicos del cuerpo humano hasta modelos complejos de sistemas

termodinámicos o automotrices, a través de un lenguaje de programación sencillo que sintetiza el funcionamiento de un modelo y lo representa gráficamente, facilitando la visualización de cada elemento e incluso permitiendo modelarlos morfológicamente al principio y luego introduciendo ecuaciones que los configuren (OpenModelica, 2016).

OpenModelica incluye una configuración específica para sistemas termodinámicos, tal como el sistema micro climatológico al que pertenece una especie vegetal. El programa ha definido implícitamente ecuaciones de balance, patrones de fluidos, modelos básicos de agua y gases, elementos básicos para construcción de modelos tales como fuentes, sensores, tuberías, conectores, entre otros. OpenModelica considera, por ejemplo para un sistema termodinámico, componentes como tanques, reactores, válvulas y tuberías; a través de los cuales pueden ocurrir cambios de presión o entalpía que se registrarán en las líneas de código del modelo a través de un lenguaje de programación simplificado en el cual se pueden definir variables, ecuaciones, interacciones entre puertos, etc. En la Figura 2 consta un ejemplo de la interfaz gráfica que se puede generar en OpenModelica en comparación con la programación detrás de la misma:



```
package SimpleAir
  ...
  constant Integer nX = 0;
  model BaseProperties
    AbsolutePressure       p;
    Temperature            T;
    Density                d;
    SpecificInternalEnergy u;
    SpecificEnthalpy       h;
    MassFraction           X[nX];
    constant Real R_air = 287.0506;
    constant Real h0    = 274648.7;
  equation
    p = d*R_air*T;
    h = 1005.45*T + h0;
    u = h - p/d;
  end BaseProperties;
  ...
  end SimpleAir;

model ClosedDevice
  import M = Modelica.Media;
  replaceable package Medium=
         M.Interfaces.PartialMedium;
  Medium.BaseProperties medium
  parameter …
equation
  // Mass balance
  der(m) = 0;
  m = V*medium.d;

  // Energy balance
  der(U) = Q;
  U = m*medium.u;
end ClosedDevice;

ClosedDevice device(redeclare
        package Medium = SimpleAir);
```

Figura 2. Modelo sencillo generado en OpenModelica (gráfico y en lenguaje de programación).

Para la interacción entre las diferentes cajas o dispositivos que componen el sistema, OpenModelica ofrece diferentes puertos de conexión (los mismos que a su vez poseen líneas de códigos de programación específicos) que inciden considerablemente sobre el diseño y funcionamiento óptimo del modelo: estos puertos pueden conectar fluidos compresibles o incompresibles, en una o más fases o de una o más sustancias; dependiendo de los requerimientos del modelador. Por otro lado, la interface gráfica requiere concordancia con las líneas de código utilizadas: se deberán definir las constantes del modelo (incluyendo el número y nombre de las sustancias, por ejemplo), las ecuaciones que interrelacionan las variables, funciones opcionales para

calcular propiedades específicas (necesitadas en ciertas circunstancias dependiendo del modelo, por ejemplo la viscosidad dinámica en un sistema de fluidos termodinámicos), y se deberán tipificar las definiciones de los parámetros considerados (por ejemplo los atributos de validación de una región, tales como los límites para la temperatura “máxima” o “mínima” de un medio acuoso en el modelo) (Elmqvist, Tummescheit, & Otter, 2003, pág. 149).

2.1.6 Variables consideradas

A continuación se describen algunas de las variables más representativas utilizadas a lo largo del presente trabajo de investigación, esenciales en el ámbito de la climatología y el modelamiento:

- El albedo, o coeficiente de reflexión, determina las propiedades reflectivas de una superficie; representado usualmente en una escala entre cero y uno, en donde una superficie completamente negra con ninguna capacidad de reflexión adoptaría el menor valor y en cambio una superficie blanca con la máxima capacidad de reflexión el mayor (Gosling, y otros, 2014, pág. 300).
- Los diagramas de caja son una herramienta gráfica muy útil al momento de generar modelos son los diagramas multicajas, los mismos que utilizan figuras planas interconectadas entre sí a través de líneas para representar sistemas de todo tipo. El contenido de caja está implícito en la representación gráfica pero debe detallarse de manera separada, así como de las líneas de interconexión que las unen, simplificando la visualización de sistemas complejos organizándolos cronológica o funcionalmente.
- **Tiempo hidrotermal (HT):** cantidad de tiempo en el que una semilla germinará en relación al nivel de temperatura y potencial de agua del ambiente. El HT será menor cuando el ambiente presta una temperatura mayor a la mínima para la germinación, menor a la temperatura de inhibición de germinación y diferente a la temperatura óptima; y será mayor cuando la temperatura ambiental sea menor a la mínima, mayor a

la temperatura de inhibición de germinación y diferente a la óptima. Teóricamente, cada especie presenta un HT específico, en función de su temperatura óptima de germinación (Alvarado & Bradford, 2002, págs. 1061-1069).

- **Conductancia estomatal:** parámetro que estima la tasa de intercambio gaseoso y transpiración a través de los estomas de las hojas de una planta, determinado por el grado de apertura estomatal (y por lo tanto las resistencias físicas del movimiento de gases entre la atmósfera y el interior de la hoja) (Gosling, y otros, 2014, pág. 291).
- **Conductancia aerodinámica:** función inversa a la resistencia aerodinámica, equivalente a la conductancia del aire respecto al flujo de vapor de agua desde la capa más externa de la hoja de una planta en el punto de medición de temperatura, humedad relativa y velocidad del viento (Gracia, 2016).
- **Longitud de onda:** distancia recorrida por una onda en un determinado tiempo.
- **Calor específico:** cantidad de calor por unidad de masa de un cuerpo requerida para aumentar la temperatura del mismo en un grado Celsius (C°).
- **Presión de vapor:** presión a la que, para diferentes temperaturas, las fases gaseosa y líquida de una sustancia se encuentran en equilibrio; considerándose como vapor saturado y líquido saturado.
- **Potencial mátrico:** parámetro que al sumarse con la presión y potencial osmótico dan como resultado el potencial hídrico.
- **Conductividad hidráulica:** constante referida al volumen de agua que se mueve a través de un medio poroso (saturado con un líquido) cuando el gradiente hidráulico es igual a uno.
- **Calor sensible:** intercambio de calor de un cuerpo o un sistema termodinámico que genera una variación en la temperatura del mismo y afecta algunas de sus variables macroscópicas pero otras, tales como volumen o presión, no se ven afectadas.

- **Retraso de crecimiento vegetativo:** retraso en el inicio del crecimiento de una planta debido a condiciones intrínsecas de la especie (Alvarado & Bradford, 2002, págs. 1061-1069).

3. METODOLOGÍA

A través de una profunda revisión bibliográfica y la utilización del software OpenModelica, se pre dimensionaron tres modelos micro climatológicos a través de la utilización de algoritmos matemáticos expresados en diagramas de cajas de tipo gris. A continuación se resume el proceso ejecutado:

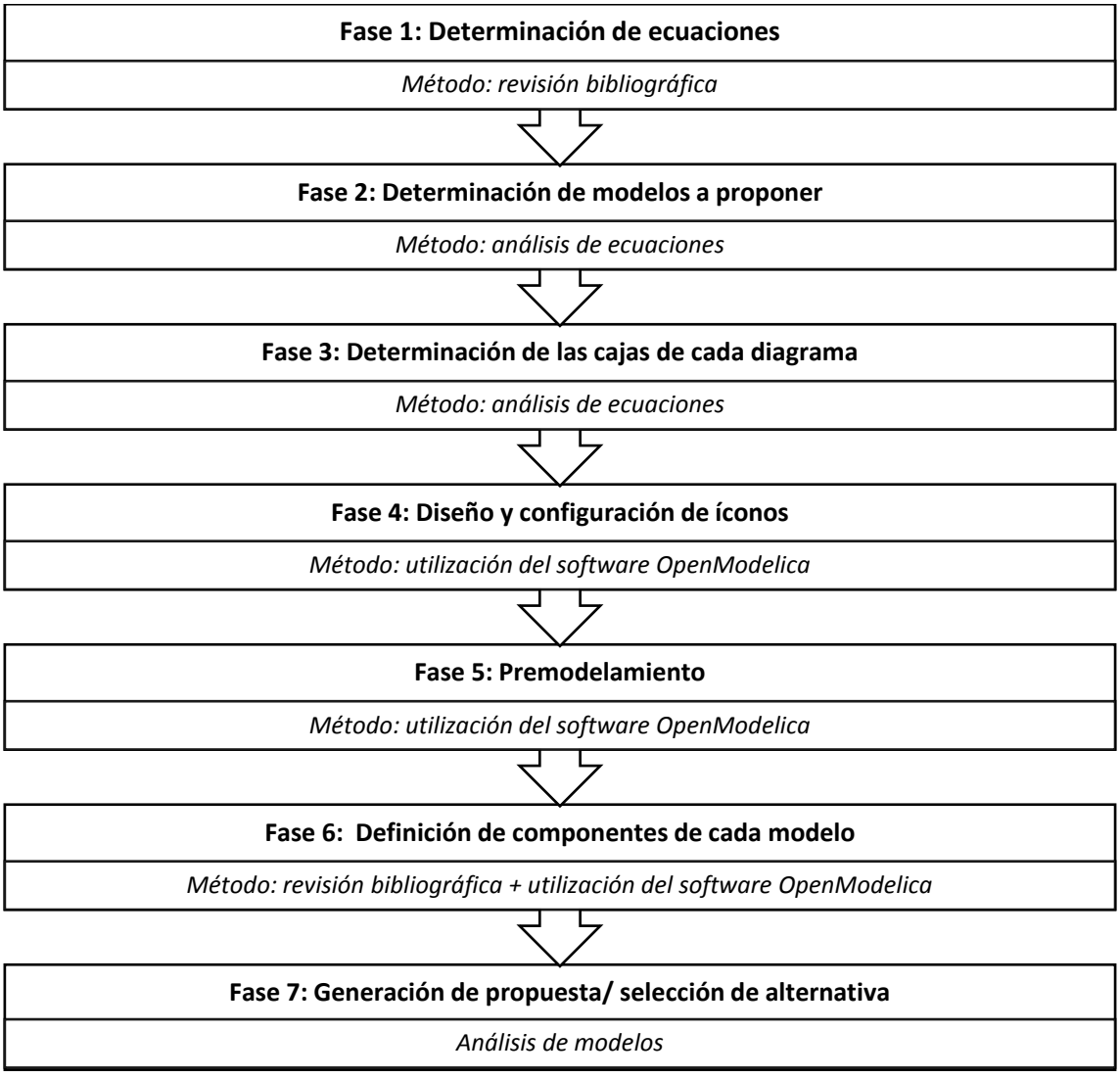


Figura 3. Diagrama de proceso de la metodología utilizada a lo largo del trabajo de titulación.

3.1 Análisis de flujos

Para la determinación de los algoritmos matemáticos necesarios para la configuración del sistema de desarrollo vegetal en función del microclima de la planta, es indispensable también considerar a un elemento suelo puesto a que

el sistema estaría incompleto sin una matriz ambiental que contemple los factores mínimos necesarios de crecimiento. Es así como se han considerado cuatro cajas principales correspondientes a los elementos del sistema, segregándolos de acuerdo a su importancia de manera que matemáticamente puedan ser mejor configurados y se disminuya el margen de error del modelo de desarrollo vegetal. Las cajas consideradas representan a la planta per se, pues su funcionamiento intrínseco sin duda incide sobre su desarrollo; a los factores meteorológicos del ambiente (precipitación, temperatura y humedad principalmente); al suelo como una caja separada de la planta que provee de nutrientes y estabilidad, indispensable para el crecimiento de cualquier especie vegetal; y a la radiación solar entrante, puesto que el crecimiento de la planta depende considerablemente de la fotosíntesis que realice.

Una vez determinados los elementos principales del sistema, el intercambio de flujos que realicen entre sí permitirá definir los algoritmos matemáticos necesarios para la programación completa del modelo a futuro; en la Tabla 1 constan los flujos que cada caja intercambia con las demás.

Tabla 1.
Intercambio de flujos entre elementos del sistema.

Elemento	**C1**	**C2**	**C3**	**C4**
C1	NA	Calor, agua	Agua, nutrientes	Calor, luz
C2	Calor, agua	NA	Agua	Calor
C3	Agua, nutrientes	Agua	NA	Calor
C4	Calor, luz	Calor	Calor	NA

NOTA. *C1: Caja 1 = Planta; C2: Caja 2 = Factores meteorológicos; C3: Caja 3 = Suelo; C4: Caja 4 = Radiación Solar; NA = No Aplica (no existe intercambio de flujos entre los elementos)*

Como se puede observar en le Tabla 1, la planta intercambiará calor y agua con los factores meteorológicos; por ejemplo a través de la transpiración de la hoja y del aumento de temperatura de la planta debido al aumento de temperatura ambiental. Asimismo, en lo que respecta al intercambio planta-suelo, se considerará únicamente al flujo de agua y nutrientes absorbidos por la

planta y no al flujo de dirección contraria debido a que el modelo supone que la matriz suelo podrá satisfacer al individuo de los nutrientes que necesita; otras investigaciones se han realizado específicamente sobre la composición, estructura y distribución de concentraciones específicas de sustancias y elementos químicos en el suelo, las mismas que se alejan de los objetivos del modelo matemático micro climatológico a proponerse. Igualmente, la planta recibirá radiación solar entrante, absorbiendo el calor y la luz de la caja respectiva.

Otros intercambios indispensables para el entendimiento holístico del sistema consisten en el balance hídrico entre los factores meteorológicos y el suelo; puesto que, por ejemplo, la humedad de ambos depende de la diferencia de concentraciones en las dos cajas. Sintetizando lo mencionado, la caja suelo presentará un mayor contenido de humedad en caso de que aumentara la precipitación en la caja factores meteorológicos, y un menor contenido de humedad si aumentase la temperatura ambiental en la misma caja. Es indispensable considerar todos estos tipos de relaciones entre los elementos del sistema para no idealizarlo sino ajustarlo a una realidad micro climatológica que englobe a la mayor cantidad de factores que puedan incidir sobre el crecimiento o desarrollo vegetal. En ese sentido, la caja de factores meteorológicos sin duda intercambiará calor con la caja de radiación solar, y ésta a su vez con el suelo, puesto que incide sobre el grado de evaporación de agua y temperatura del mismo.

3.2 Algoritmos matemáticos

3.2.1 Ecuaciones relacionadas con el crecimiento vegetativo de una planta

3.2.1.1 Sistema de ecuaciones para el modelo de una dimensión sin ramificaciones:

considera al suelo y a una

planta más alta que ancha como los factores más incidentes sobre el crecimiento simplificado de la misma. (Bessonov & Volpert, 2014)

$$\frac{dL}{dt} = f(R)$$ Ecuación 1

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u\frac{\partial C}{\partial x} = d\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$ Ecuación 2

$$u = \frac{dL}{dt}$$ Ecuación 3

$$x = 0: C = 1, x = L(t): d\frac{\partial C}{\partial x} = -g(R)C$$ Ecuación 4

$$h\frac{dR}{dt} = g(R)C - \sigma R$$ Ecuación 5

Tabla 2.
Variables de las ecuaciones 1 – 5.

Símbolo	Variable que representa
$\boldsymbol{R}$	Concentración del factor de crecimiento de la planta
$\boldsymbol{t}$	Tiempo
$\boldsymbol{C}$	Concentración de nutrientes
$\boldsymbol{x}$	Tamaño de la planta en un tiempo determinado
$\boldsymbol{u}$	Velocidad del fluido de nutrientes
$\boldsymbol{d}$	Coeficiente de difusión de nutrientes
$\boldsymbol{g}$	Función en la cual el factor de crecimiento de la planta no se produce si no existe la suficiente concentración de nutrientes (si los nutrientes disminuyen, se deja de producir el factor de crecimiento y por tanto su concentración disminuye y la planta deja de crecer)
$\boldsymbol{f}$	Función en la cual el crecimiento de la planta es lineal (si no hay nutrientes, no hay factor de crecimiento y por tanto no crece)

3.2.1.2 Sistema de ecuaciones para el modelo de crecimiento vegetativo en función del concepto de tiempo hidrotermal (Masin, Loddo, Benvenuti, Otto, & Zanin, 2012)

$$HT_i = n \times \max\left(T_{s_i} - T_b, 0\right) + HT_{i-1} \qquad \text{Ecuación 6}$$

$$CE = 100\exp(-\alpha \exp(-\beta HT)) \qquad \text{Ecuación 7}$$

$$n = 0 \; cuando \; T_{s_i} < T_o \; y \; si \; \boldsymbol{\delta_{s_i}} \leq \boldsymbol{\delta_b} \qquad \text{Ecuación 8}$$

$$n = 1\ cuando\ T_{s_i} < T_o\ y\ si\ \boldsymbol{\delta_{s_i}} > \boldsymbol{\delta_b}$$ Ecuación 9

$$n = 0\ cuando\ T_{s_i} > T_o\ y\ si\ \boldsymbol{\delta_{s_i}} \leq \left[\boldsymbol{\delta_b} + \boldsymbol{K_t}\left(T_{s_i} - T_o\right)\right]$$ Ecuación 10

$$n = 1\ cuando\ T_{s_i} > T_o\ y\ si\ \boldsymbol{\delta_{s_i}} > \left[\boldsymbol{\delta_b} + \boldsymbol{K_t}\left(T_{s_i} - T_o\right)\right]$$ Ecuación 11

Tabla 3
Variables de las ecuaciones 6 – 11.

Símbolo	Variable que representa
$\boldsymbol{T_s}$	Temperatura media diaria del suelo
$\boldsymbol{T_b}$	Temperatura base
$\boldsymbol{T_o}$	Temperatura óptima
$\boldsymbol{\alpha}$	Retraso antes de crecimiento vegetativo
$\boldsymbol{\beta}$	Pendiente de la curva de tiempo hidrotermal
$\boldsymbol{n}$	Constante de cálculo
$\boldsymbol{\delta_{s_i}}$	Potencial de agua a 5cm de profundidad
$\boldsymbol{\delta_b}$	Potencial de agua base
$\boldsymbol{K_t}$	Pendiente de la relación entre el potencial de agua base y la temperatura media diaria del suelo
$\boldsymbol{CE}$	Crecimiento vegetativo acumulativo
$\boldsymbol{HT}$	Tiempo hidrotermal
$\boldsymbol{i}$	Capa del suelo

3.2.1.3 Ecuación para el modelo bioclimático de desarrollo vegetal PHENOFIT (Chiou & Chien, 2015)

$$S_t(1-\propto_1)+L_d-\varepsilon\sigma T_a^4=\frac{\rho C_p(T_l-T_a)}{r_a}+\frac{\rho C_p(e_o-e_a)}{\gamma^*(r_s+r_a)} \quad \text{Ecuación 12}$$

Tabla 4
Variables de la ecuación 12.

Símbolo	Variable que representa
S_t	Radiación solar entrante
$\propto_1$	Albedo de la hoja de la planta
L_d	Longitud de onda de la radiación entrante
$\varepsilon\sigma T_a^4$	Longitud de onda de la radiación emitida por la hoja
ρ	Densidad del aire alrededor de la hoja
C_p	Calor específico del aire
T_l	Temperatura de la hoja
T_a	Temperatura ambiental
r_a	Conductancia aerodinámica de transferencia de calor
r_s	Conductancia estomatal
e_o	Presión de vapor saturado
e_a	Presión de vapor
γ^*	constante psicrométrica

3.2.2 Ecuaciones relacionadas con el funcionamiento del sistema suelo-planta

3.2.2.1 Sistema de ecuaciones para el flujo volumétrico suelo-raíz en 1D:

describe el volumen de agua intercambiado

entre la raíz de la planta y la capa de suelo en un tiempo determinado (Janott, y otros, 2010)

$$j_{r,e} = k_r s_{r,e}(z)[A_s(z) - A_x(z)]$$ Ecuación 13

$$k_{rs(z)} = \sqrt{\frac{k_r k_s(\mathring{A}_s(z))}{l_{rs}}}$$ Ecuación 14

$$\mathring{A}_s(z) = \frac{\gamma_1 A_x(z) + \gamma_2 A_s(z)}{\gamma_1 + \gamma_2}$$ Ecuación 15

$$S_x(z) = \sum_e \frac{j_{r,e}(z)}{s_{x,max,e}(z) l_e}$$ Ecuación 16

$$S_{w,i} = \sum_e \frac{j_{r,e}(z) f_{e,i}}{\Delta V_i}$$ Ecuación 17

Tabla 5
Variables de las ecuaciones 13 - 17.

Símbolo	Variable que representa
$\boldsymbol{e}$	Elemento “raíz”
$\boldsymbol{j_{r,e}}$	Flujo volumétrico suelo-raíz
$\boldsymbol{k_r}^{\boldsymbol{s^{-1}}}$	Conductividad radial de la raíz a través de la estructura celular radicular entre el xilema de la raíz y el suelo
$\boldsymbol{s_{r,e}(z)}$	Capa externa de la raíz en el suelo a una profundidad z
$\boldsymbol{A_s(z)}$	Potencial mátrico del suelo en la superficie de la raíz a una profundidad z
$\boldsymbol{A_x(z)}$	Potencial mátrico del suelo en el xilema de la raíz a una profundidad z
$\boldsymbol{k_{rs}}$	Conductividad radial de la rizósfera
$\boldsymbol{k_r}$	Conductividad radial de la raíz

Símbolo	Variable que representa
k_s	Conductividad hidráulica del suelo
$l_{rs(z)}$	Espesor radial del suelo de la rizósfera que se encuentra alrededor de las raíces
$Å_s(z)$	Potencial mátrico equivalente entre los potenciales mátricos del suelo y el xilema
γ_1, γ_2	Constantes de cálculo para obtención de potencial mátrico equivalente
S_x, S_w	Disminución de agua debajo del suelo (términos de origen)
l_e	Longitud del elemento “raíz”
$s_{x,max,e}$	Área de albura máxima del xilema
i	Capa del suelo
V_i	Volumen de suelo en la capa i
$S_{w,i}$	Disminución de agua debajo del suelo en la capa i (término de origen)
$f_{e,i}$	Fracciones de los ejes de intersección de raíces con cada capa de suelo

3.2.3 Ecuaciones relacionadas con el funcionamiento del sistema de factores meteorológicos-ambientales que inciden sobre el desarrollo de la planta

3.2.3.1 Ecuación para el cálculo de calentamiento del aire: considera un flujo de calor que naturalmente interactúa con el suelo para determinar el calentamiento del aire (Oke, 1988)

$$Q_H = -C_a K_H \left(\frac{dT}{dz}\right) = -C_a K_H \left(\frac{d\theta}{dz}\right)$$ Ecuación 18

Tabla 6
Variables de la ecuación 18.

Símbolo	Variable que representa
K_H	Conductividad del suelo
θ	Temperatura potencial
z	Profundidad
C_a	Capacidad de calor del aire
Q_H	Flujo de calor sensible
T	Temperatura

NOTA. *El signo del Q_H está determinado por la dirección de la transferencia de calor (si el gradiente de temperatura es negativo, Q_H es positivo; si el gradiente de temperatura es positivo, Q_H es negativo).*

3.2.4 Ecuaciones relacionadas con el sistema de radiación solar entrante

3.2.4.1 Sistema de ecuaciones para el cálculo de radiación solar global horizontal y radiación solar normal directa (FARMS):

considera la nubosidad parcial del cielo (Xie, Sengupta, & Dudhia, 2016)

$$GHI = fGHI_{cld} + (1 - f)GHI_{clr}$$ Ecuación 19

$$DNI = fDNI_{cld} + (1 - f)DNI_{clr}$$ Ecuación 20

$$F_d = \mu_0 f_0 T_{dd}^{cld} T_{dd}^{clr}$$ Ecuación 21

$$F_1 = \mu_0 f_0 T_{dd}^{cld} T_{dt}^{clr} + \mu_0 f_0 T_{du}^{cld} T_{uu}^{clr}$$ Ecuación 22

$$T_{dt}^{clr} = T_{dd}^{clr} + T_{du}^{clr}$$ Ecuación 23

$$T_{uu}^{clr} \approx \frac{\int_0^1 \mu I T_{dd}^{clr} \mu(d\mu)}{\int_0^1 \mu I d\mu} = 2\int_0^1 \mu\, T_{dd}^{clr}(\mu) d\mu$$ Ecuación 24

$$F_{total} = F_1[1 - R_s(R_{uu}^{clr} + R_{uu}^{cld} T_{uu}^{clr2})]^{-1} = GHI$$ Ecuación 25

$$DHI = F_{total} - F_d$$ Ecuación 26

$$T_{dd}^{cld} = e^{\frac{-\tau}{u_0}}$$ Ecuación 27

Tabla 7
Variables de las ecuaciones 19-79.

Símbolo	Variable que representa
$\boldsymbol{GHI}$	Radiación Global Horizontal
$\boldsymbol{DHI}$	Radiación Horizontal Difusa
$\boldsymbol{DNI}$	Radiación Normal Directa
$\boldsymbol{cld}$	Condición de cielo nublado
$\boldsymbol{clr}$	condición de cielo despejado
$\boldsymbol{f}$	fracción de nubes
$\boldsymbol{\mu_0}$	Coseno del ángulo cenital solar (para un haz de luz individual)
$\boldsymbol{f_0}$	Flujo de radiación en el tope de la atmósfera
$\boldsymbol{T_{dd}^{cld}}$	Transmitancia de la nube para radiación directa incidente y radiación saliente luego de la dispersión por parte de la nube
$\boldsymbol{T_{dd}^{clr}}$	Transmitancia de la atmósfera despejada relativa a los flujos de incidencia directa y de salida
$\boldsymbol{T_{dt}^{clr}}$	Transmitancia de la atmósfera despejada relativa a los flujos de incidencia directa y flujos totales de salida

Símbolo	Variable que representa
F	Flujo de radiación en la dirección de hundimiento
d	Radiación solar incidente directa (primer carácter)
u	Radiación solar incidente difusa (primer carácter)
d	Radiación solar de salida directa (segundo carácter)
u	Radiación solar de salida difusa (segundo carácter)
R_s	Reflectancia de la superficie
R_{uu}^{clr}	Reflectancia del aerosol atmosférico para flujo difuso
R_{uu}^{cld}	Reflectancia de las nubes para flujo difuso
u	Espesor óptico de las nubes en la región solar

3.3 Pre modelamiento en OpenModelica

A continuación se especifican los íconos creados en el software para su posterior utilización en la generación de modelos:

Tabla 8
Íconos creados en OpenModelica para pre modelamiento de alternativas.

ÍCONO	CAJA REPRESENTADA
	Radiación solar
	Suelo
	Factores meteorológicos

ÍCONO	CAJA REPRESENTADA
	Planta

Después de la creación de los íconos, se procedió a crear un paquete que contenga a todas las unidades del Sistema Internacional, de manera que los modelos a generarse verifiquen que las variables introducidas tengan coherencia entre sí y las ecuaciones estén correctamente inscritas de manera que los resultados correspondan a la unidad esperada. Las unidades se importaron desde una de las librerías de OpenModelica, así:

```
package Unidades
  extends Modelica.SIunits;
end Unidades;
```

Figura 4. Líneas de códigos de programación del paquete de unidades del Sistema Internacional con el cual se trabajó en cada una de las alternativas construidas.

Posteriormente, se configuraron las variables de los diferentes algoritmos matemáticos de cada una de las cajas del sistema analizadas para analizar su comportamiento.

```
model Suelo
  import T.DisAguaSuelo;
  import T.FlujoVolumetricoSueloRaiz;
  import T.AlburaXilema;
  parameter T.DisAguaSuelo Das=1;
  parameter T.FlujoVolumetricoSueloRaiz Fsr=5;
  parameter T.AlburaXilema Ax=0.8;
T.Unidades.Length Lr;
equation
Das=(Fsr/(Ax*Lr));
end Suelo;


model RadiacionSolar
  import T.FraccionNublada;
  import T.FraccionDespejada;
```

```
  parameter T.FraccionNublada FN=0.8;
  parameter T.FraccionDespejada FD=0.2;
  T.Unidades.Irradiance GHI;
equation
GHI = FN -(1-FD);
end RadiacionSolar;


model ParametrosMeteorologicos
  import T.FlujoCalorSensible;
  import T.CapCalorAire;
  import T.ConductividadSuelo;
  parameter T.FlujoCalorSensible Fcs=0.5;
  parameter T.CapCalorAire Ca=1;
  parameter T.ConductividadSuelo Cs=10;
T.Unidades.ThermodynamicTemperature Ts;
equation
Fcs=-Ca*Cs*(der(Ts));
end ParametrosMeteorologicos;
```

Figura 5. Líneas de códigos de programación de las cajas correspondientes a suelo (C2), radiación solar(C3) y parámetros meteorológicos (C3).

Luego, se programaron las C1: Planta para cada una de las Alternativas a generarse, puesto que cada modelo consideró diferentes ecuaciones para la planta. La programación se realizó inscribiendo cada una de las variables de cada ecuación en OpenModelica, así:

```
model PlantaAlt1
  import T.FactorCrecimientoPlanta;
  import T.ConcentracionNutrientes;
  parameter T.FactorCrecimientoPlanta FC = 0.5;
  parameter T.ConcentracionNutrientes CN = 0.2;
  T.Unidades.Length AltP;
equation
  CN = der(AltP);
end PlantaAlt1;


model PlantaAlt2
  import T.TiempoHidrotermal;
  import T.LagCrecimiento vegetativo;
  import T.PendienteHT;
  parameter T.TiempoHidrotermal HT = 5000;
  parameter T.LagCrecimiento vegetativo a = 200;
  parameter T.PendienteHT b = 0.75;
```

```
  T.Unidades.Length CE;
equation
  CE=100*exp(-a*exp(- b * HT));
end PlantaAlt2;

model PlantaAlt3
  import T.DensidadAire;
  import T.CalorEspecificoAire;
  import T.TemperaturaHoja;
  import T.TemperaturaAmbiental;
  import T.ConductanciaAerodinamica;
  import T.PresionVapor;
  import T.ConductanciaEstomatal;
  import T.PresionVaporSaturado;
  parameter T.DensidadAire Da=0.4;
  parameter T.CalorEspecificoAire Cpa=1;
  parameter T.TemperaturaAmbiental Ta=300;
  parameter T.TemperaturaHoja Th=350;
  parameter T.ConductanciaAerodinamica Ca=0.567;
  parameter T.PresionVapor PV=10;
  parameter T.ConductanciaEstomatal Ce=0.876;
  parameter T.PresionVaporSaturado PVs=15;
T.Unidades.Irradiance GHI;
equation
GHI=((Da*Cpa*(Th-Ta))/Ca)+((Da*Cpa*(PVs-PV))/(Ce-Ca));
end PlantaAlt3;
```

Figura 6. Líneas de códigos de programación de las cajas correspondientes a la planta (C1) utilizada en el pre modelamiento de cada una de las alternativas planteadas.

Para la conexión de los flujos de la Tabla 1 con las cajas que forman parte de cada una de las alternativas a generarse, se utilizó la librería “Modelica” para importar puertos de conexión pre configurados que puedan transportar los flujos requeridos. Se importaron cuatro conectores de la librería predeterminada: flujo de calor, flujo de agua, de nutrientes y de luz. A continuación se detallan los conectores importados para cada flujo mencionado:

Tabla 9
Conectores utilizados para los flujos entre cajas.

CONECTOR	TIPO DE CONECTOR
Flujo de calor	Modelica.Thermal.HeatTransfer.Interfaces.HeatPort
Flujo de agua	Modelica.Fluid.Interfaces.FluidPort
Flujo de luz	Modelica.Thermal.FluidHeatPort.Interfaces.FlowPort

Flujo de nutrientes	Modelica.Electrical. Analog. Interfaces

Para la selección de cada uno de los conectores, se revisó la documentación del programa OpenModelica con la finalidad de comprender qué es capaz de transportar cada uno de ellos. A pesar de que los conectores fueron importados, se revisó la programación interna de cada uno; a continuación se detalla, como ejemplo, la programación del puerto de fluidos (utilizado para el flujo de agua):

```
connector FluidPort
  "Interface for quasi one-dimensional fluid flow in a
piping network (incompressible or compressible, one or
more phases, one or more substances)"

  replaceable package Medium =
Modelica.Media.Interfaces.PartialMedium
    "Medium model" annotation (choicesAllMatching=true);

  flow Medium.MassFlowRate m_flow
    "Mass flow rate from the connection point into the
component";
  Medium.AbsolutePressure p "Thermodynamic pressure in
the connection point";
  stream Medium.SpecificEnthalpy h_outflow
    "Specific thermodynamic enthalpy close to the
connection point if m_flow < 0";
  stream Medium.MassFraction Xi_outflow[Medium.nXi]
    "Independent mixture mass fractions m_i/m close to
the connection point if m_flow < 0";
  stream Medium.ExtraProperty C_outflow[Medium.nC]
    "Properties c_i/m close to the connection point if
m_flow < 0";
end FluidPort;
```

Figura 7. Líneas de códigos de programación del conector importado para el flujo de agua.

Como se puede observar en las líneas de códigos, el conector importado a su vez importa también la configuración de otro conector de la librería de Modelica; por lo cual fue indispensable revisar que los conectores importados sí puedan transportar lo requerido.

4. RESULTADOS

4.1 Alternativa 1: basada en el modelo de una dimensión sin ramificaciones

4.1.1 Diagrama

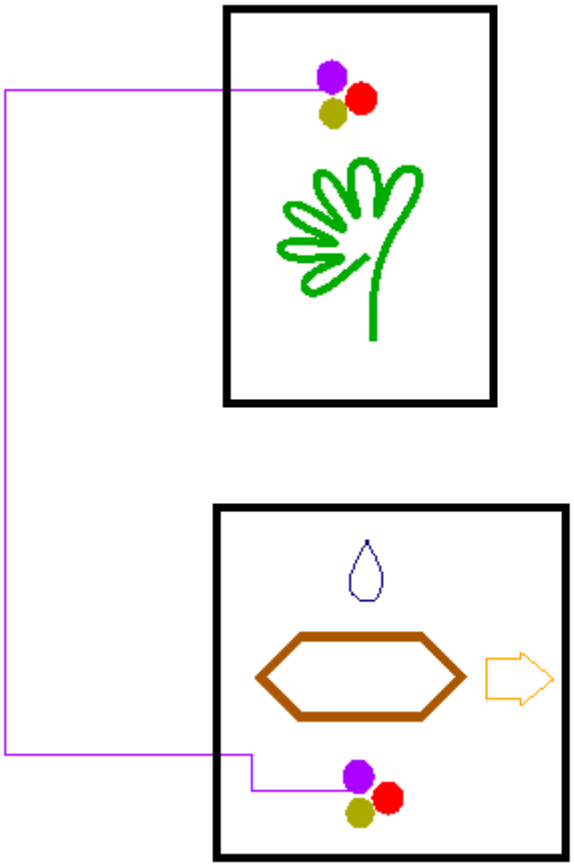


Figura 8. Diagrama de cajas de la Alternativa 1.

En la Figura 8 consta el diagrama de cajas correspondiente a la Alternativa 1. Como se puede observar, el suelo mantiene un flujo de nutrientes con la planta (línea de color lila), a través del cual la planta obtiene aquellos necesitados para su crecimiento y para la producción del factor de crecimiento conocido como GM-Factor, asumiendo un funcionamiento fotosintético óptimo (Bessonov & Volpert, 2014, pág. 42). Se observa que los puertos de calor y agua de la C3 no se interconectan con la planta puesto que las Ecuaciones 1 -5 no consideran tales flujos.

4.1.2 Modelo

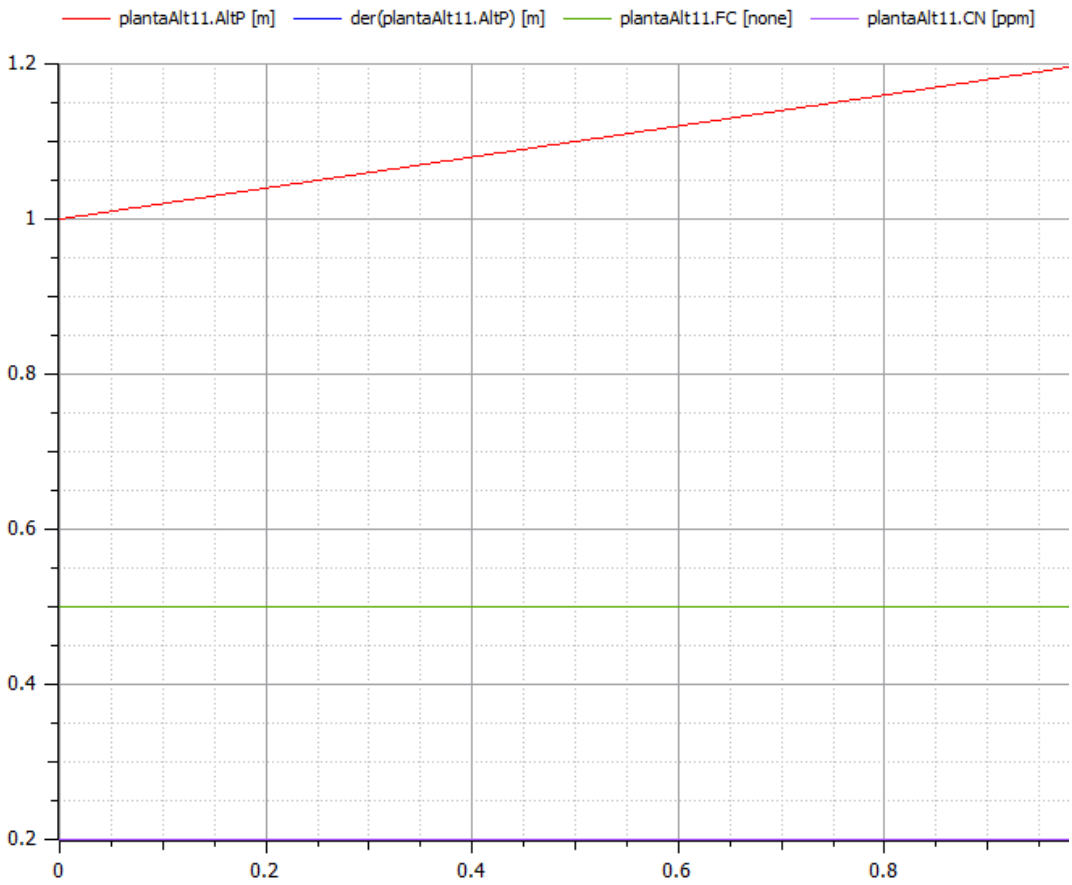
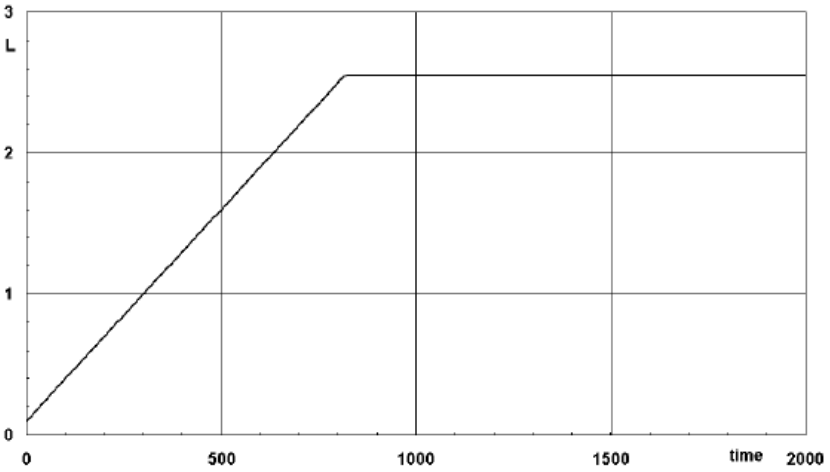


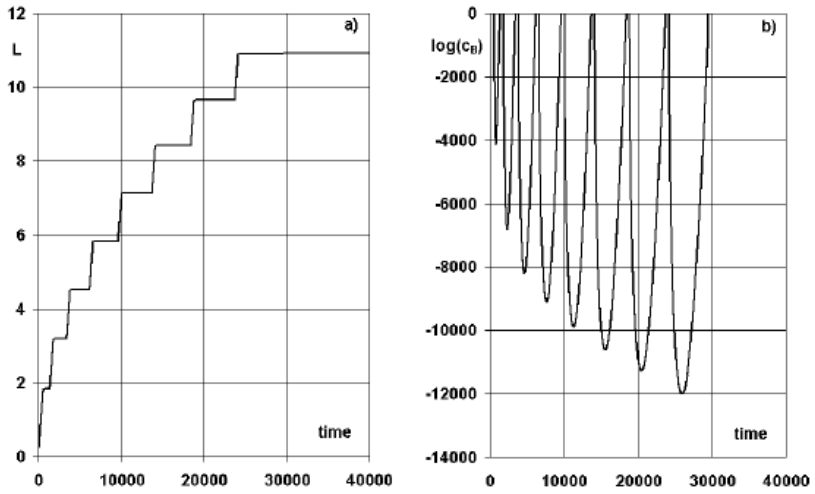
Figura 9. Gráfico variables - tiempo de la C1 de la Alternativa 1. Tomada de: (Bessonov & Volpert, 2014).

Al simular el modelo con OpenModelica, el programa calcula las variables incógnitas de las ecuaciones ingresadas y grafica la respuesta en función del tiempo (eje X). Así, se puede observar en la Figura 9 que la línea roja representa el crecimiento en el tiempo del individuo indefinidamente (empezando con un valor de 1), mientras que la línea verde se grafica con pendiente de cero debido a que es el valor de la altura de la planta calculado para la concentración de nutrientes referencial ingresada en ese instante de tiempo (línea de color lila). La Figura 9 justifica la limitación de hardware e incluso temporal del presente trabajo de titulación, puesto que el programa necesita de ecuaciones más complejas que transformen a la línea roja en una curva que alcance un valor máximo que represente el momento en el que la planta dejará de crecer. Además, un modelo completo deberá relacionar las ecuaciones de la C1 con la C3 de la Alternativa 1, a través de la resolución del

sistema de ecuaciones de la planta con las ecuaciones del suelo. Las curvas ideales a obtenerse constan en la Figura 10:



a)



b)

Figura 10. Curvas de crecimiento lineal (a) y periódico (b) de una especie vegetal en el tiempo; considerando tan solo al suelo y al funcionamiento intrínseco de la planta como factores limitantes.
Tomado de: (Bessonov & Volpert, 2014)

4.1.3 Sustentación

Esta alternativa partió del modelo propuesto por (Bessonov & Volpert, 2014). El modelo ruso considera que el factor más incidente sobre el crecimiento de una especie vegetal es su interacción con el suelo; puesto que de él obtiene los flujos de nutrientes y agua; desprecia a los factores meteorológicos y a la radiación solar y considera un parámetro interno de la planta: el factor de

crecimiento (GM-Factor). Este factor se generará cuando la planta esté obteniendo del recurso suelo la cantidad y calidad necesaria de los flujos mencionados (es decir que la capacidad de campo del sustrato sea suficiente), por tanto la planta crecerá. Asimismo, cuando la planta deje de absorber los flujos de los que requiere, el factor de crecimiento dejará de generarse, por lo cual la planta empezará a dejar de crecer (debido a que la capacidad de campo disminuye y eventualmente se alcanza el estado de marchitez permanente). De esta manera el crecimiento de la planta pierde su cualidad lineal y se determina tanto por factores externos como internos de su cuerpo, es así que si representa un sistema natural fácilmente verificable: una planta no deja instantáneamente de crecer cuando no recibe agua o nutrientes, debido a que almacena cierta cantidad de factor de crecimiento en su organismos; sin embargo, cuando se deja de generar este factor y se agotan las reservan previamente generadas, la planta deja de crecer. El estrés ambiental en este modelo se entiende como el momento mismo en el cual la planta deja de generar su factor de crecimiento al no conseguir una fuente de agua y nutrientes que provienen del suelo.

Para la construcción del diagrama se consideraron las Ecuaciones 1-5 debido a que las mismas determinan la programación de la C1: Planta; sin embargo, se ha propuesto un pre modelamiento que en la caja C3: Suelo considere las Ecuaciones 13-15 con la finalidad de que cada caja contemple una programación específica basada en algoritmos matemáticos obtenidos en estudios específicos.

4.2 Alternativa 2: basada en el concepto del tiempo hidrotermal

4.2.1 Diagrama

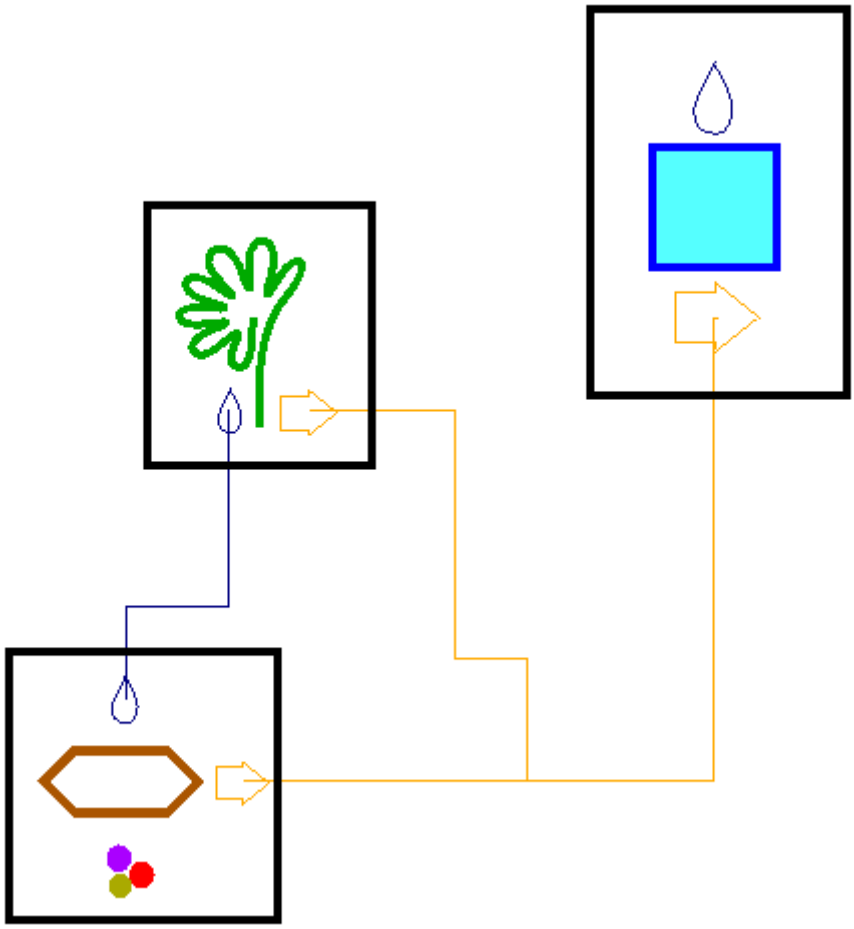


Figura 11. Diagrama de cajas de la Alternativa 2.

En la Figura 11 consta el diagrama de cajas correspondiente a la Alternativa 2. Como se puede observar, el suelo mantiene un flujo de calor con la planta y con los factores meteorológicos (línea de color naranja), a través del cual aumenta o disminuye la temperatura de las tres cajas. Se observa además que la planta y el suelo intercambian un flujo de agua; y que el flujo de nutrientes ha sido despreciado, así como el intercambio de agua entre los factores meteorológicos de las C1 y C3; debido a que las Ecuaciones 6 -11 y 16, respectivamente, no consideran tales flujos.

4.2.2 Modelo

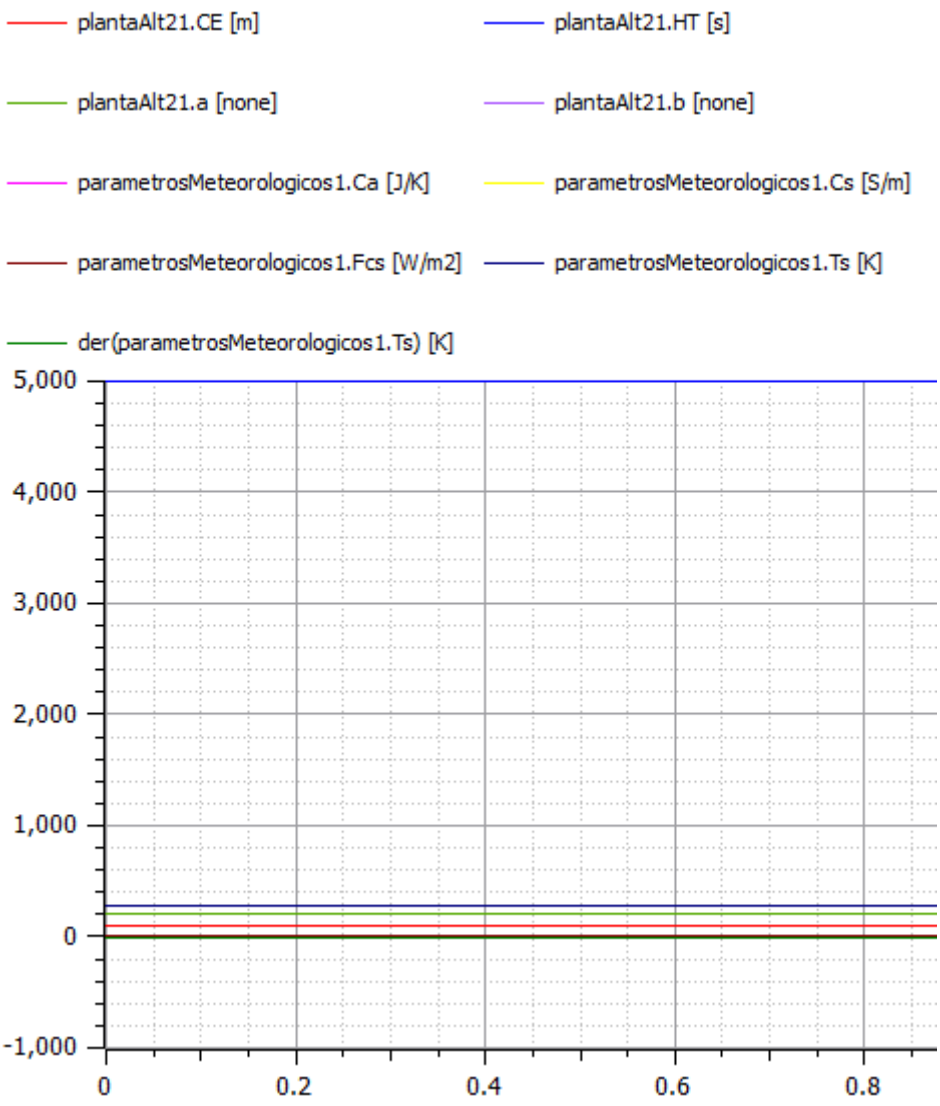
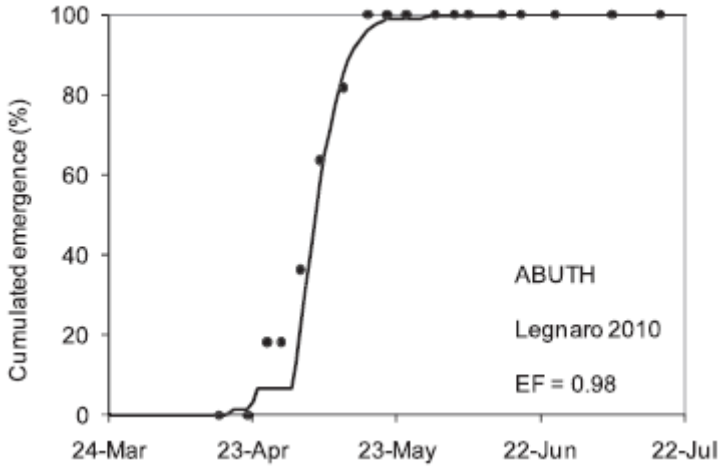


Figura 12. Gráfico variables – tiempo de la Alternativa 2.

Nuevamente, el programa OpenModelica ha resuelto la ecuación configurada para la Alternativa 2 dando como resultado curvas sin pendiente que ordenan los parámetros para el instante preciso y los valores referenciales ingresados para cada variable. Todas las líneas de la Figura 12 representan el valor de cada una de las variables (incluso de aquellas incógnitas) como constante en el tiempo; por las mismas razones expuestas para el modelo de la Alternativa 1. Las curvas ideales de esta Alternativa tienen la forma de las expuestas a continuación:

a)



b)

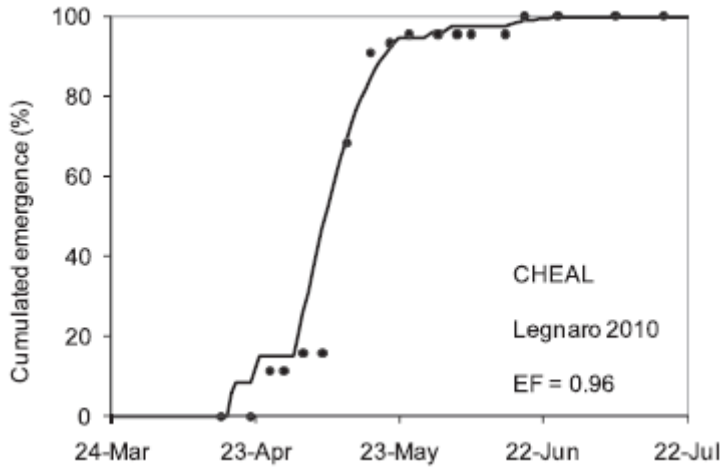


Figura 13. Curvas de crecimiento vegetativo acumulativo de una especie vegetal en el tiempo, considerando al tiempo hidrotermal como el factor más incidente en el desarrollo y crecimiento vegetal; y por tanto también al suelo y a los factores meteorológicos.
Tomado de: (Masin, Loddo, Benvenuti, Otto, & Zanin, 2012).

4.2.3 Sustentación

Esta alternativa partió del modelo propuesto por (Chiou & Chien, 2015). El modelo chino considera que la planta se encuentra dentro de un ambiente con varios factores que inciden sobre su crecimiento: el calor y humedad que recibe de la atmósfera, el flujo de aire de la misma, la radiación que recibe del sol y las características específicas de esa planta (como el albedo y la conductancia estomatal). Este modelo se basa en la premisa de que la planta sufrirá de estrés ambiental cuando su disponibilidad de agua (capacidad de campo del suelo en donde esté plantada) se vea reducida debido, por ejemplo, al aumento

de la temperatura del aire y consecuentemente al incremento de evapotranspiración, desperdiciando recursos que en situaciones normales utiliza para crecer; dándole especial importancia a la temperatura, puesto que al ésta aumentar, la carga termal de las hojas de la planta se comporta de igual manera debido a que la absorción de radiación con ondas de alta longitud disminuye.

Al igual que para la Alternativa 1, se utilizaron las Ecuaciones 13-15 para programar la C3: Suelo. Sin embargo, se generó una nueva C1: Planta con la Ecuación 12 generada por (Chiou & Chien, 2015). Además, en esta alternativa se ha considerado la C2: Factores Meteorológicos utilizando la Ecuación 16 que relaciona el calentamiento del suelo con el aumento de la temperatura ambiental. Se propone un pre modelo que pueda desarrollarse a través del relacionamiento matemático entre cada caja utilizando métodos de resolución de sistemas de ecuaciones complejos.

4.3 Alternativa 3: basada en el modelo bioclimático de desarrollo PHENOFIT

4.3.1 Diagrama

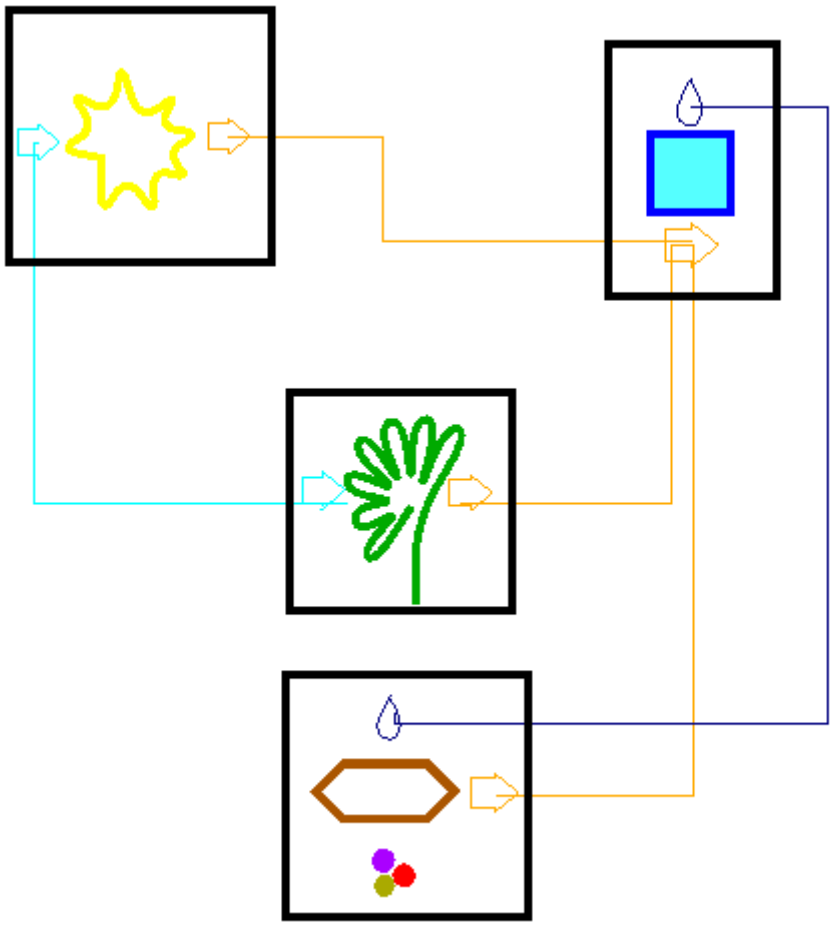


Figura 14. Diagrama de cajas de la Alternativa 3.

En la Figura 14 consta el diagrama de cajas correspondiente a la Alternativa 3. Como se puede observar, los factores meteorológicos mantienen un flujo de calor con la planta, el suelo y la radiación solar (línea de color naranja), a través del cual aumenta o disminuye la temperatura de todo el sistema. Se observa además que la planta recibe un flujo de luz proveniente de la radiación solar (línea de color celeste) y que el suelo y los factores meteorológicos intercambian un flujo de agua. El flujo de nutrientes ha sido despreciado, así

como el intercambio de calor entre la planta y el suelo, debido a que la Ecuación 12 no considera tales flujos.

4.3.2 Modelo

El modelo de la Alternativa 3 se basa en el estrés ambiental que inicia cuando la planta empieza a demandar de una mayor cantidad de agua del medio cuando ha transpirado demasiado. Sin embargo, el aumento de la demanda de agua no representa un aumento en la oferta del medio; por lo cual la planta entra en un estado de “sequía interna” y eventualmente deja de crecer. El modelo generado para la Alternativa 3 involucra a todas las cajas consideradas en el presente trabajo de titulación (planta, radiación solar, factores meteorológicos y suelo), por lo cual la resolución de estos sistemas de ecuaciones requiere de una mayor disponibilidad de tiempo y hardware avanzado.

4.3.3 Sustentación

Esta alternativa partió del modelo propuesto por (Masin, Loddo, Benvenuti, Otto, & Zanin, 2012). El modelo italiano parte del concepto de tiempo hidrotermal, el mismo que afirma que las plantas acumulan tiempo hidrotermal en proporción a la temperatura del suelo solamente cuando el potencial de agua del suelo se encuentra sobre un determinado valor, el mismo que aumenta cuando la temperatura se aleja positiva y linealmente de la óptima hasta llegar a una presión y temperatura máxima (Masin, Loddo, Benvenuti, Otto, & Zanin, 2012). Este modelo, si bien considera al suelo como el factor más importante en el crecimiento de una planta, está estrechamente relacionado con el sistema térmico-micro climatológico ocurrente en el ambiente de la planta: la variación de temperatura del aire incide sobre el potencial de agua del suelo (capacidad de campo) y por esta razón la planta puede dejar de crecer e incluso alcanzar la marchitez permanente.

Para esta Alternativa se generó también una nueva C1: Planta en base a las Ecuaciones 6-11. Asimismo, se añadieron las cajas C2 y C3 con las mismas

ecuaciones utilizadas en las Alternativas 1 y 2; y en este caso se añadió la C4: Radiación Solar, la misa que fue programada en base a las Ecuaciones 17-25.

5. DISCUSIÓN

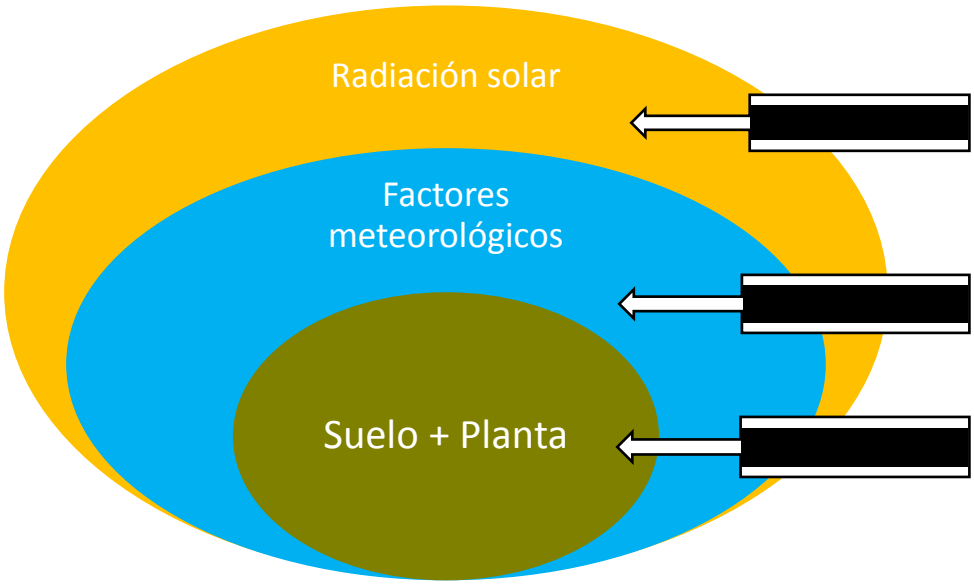


Figura 15. Síntesis de alternativas de modelos generadas.

Como se puede observar en la sustentación de cada una de las Alternativas planteadas, se han generado tres diagramas que representan el pre modelamiento hipotético del ambiente cuyas fluctuaciones interfieren sobre el crecimiento de una especie vegetal. Se utilizaron ecuaciones matemáticas deducidas por diferentes investigaciones para interrelacionar los elementos ambientales que interfiriesen en cada alternativa y proponer alternativas de modelos precisos.

Como consta en la Figura 15, las alternativas generadas han sido propuestas en base a tres modelos de desarrollo vegetal: el sistema de una dimensión sin ramificaciones, el concepto del tiempo hidrotermal y el desarrollo bioclimático PHENOFIT. Cada una de ellas considera al menos a dos elementos: la planta y el suelo, por lo que la Alternativa 1 representa el modelo más sencillo de desarrollo. Por otro lado, las Alternativas 2 y 3 técnicamente engloban a la Alternativa 1 puesto que consideran también a las cajas de suelo y planta, pero incorporan a los factores meteorológicos y a la radiación solar respectivamente.

Sin embargo, es importante considerar que ninguna de las alternativas de modelos utiliza los mismos sistemas de ecuaciones para la planta, puesto que al ser el elemento principal, puede configurarse matemáticamente de distintas maneras y justamente por las variables de las ecuaciones de cada modelo se añaden o no más elementos al sistema.

A simple vista se podría afirmar que mientras más complejo sea un sistema y más cajas sean consideradas, más preciso y ajustado a la realidad será. Sin embargo, un análisis matemático de las variables de las ecuaciones de caja es indispensable para conocer que modelar el ambiente en un solo sistema de ecuaciones resulta extremadamente complicado y tal vez requiera de una alta cantidad de recursos humanos, técnicos, económicos y temporales. Es así que la premisa parece ser cierta y difícil, pero no imposible: todas las variables identificadas en el presente trabajo de investigación se relacionan unas con otras, independientemente de que no exista una “ecuación universal” o que englobe a todos los parámetros micro climatológicos de un medio en una expresión matemática sencilla.

Por otro lado, el análisis independiente de cada uno de los componentes de ese microclima, también parece resultar útil al momento de trabajar con información real limitada y situaciones específicas para cada especie. Por ejemplo, al momento de obtener resultados de crecimiento tardío de una especie debido al aumento de la temperatura ambiental, la caja suelo podría parecer insignificante y podría incluso despreciarse, mientras que la caja planta determinará la curva de crecimiento de esa especie conforme aumenta o disminuye la temperatura, y las cajas de radiación solar y factores meteorológicos estarán estrechamente relacionadas entre sí.

Las tres Alternativas planteadas pueden ser utilizadas en diferentes situaciones y en base a las necesidades del investigador, agricultor, biólogo o ingeniero;

pero sin duda la Alternativa 3 engloba a la mayor cantidad de factores micro climatológicos relevantes sobre el crecimiento de cualquier planta.

Como un posible trabajo a futuro, a través de la presente investigación se han propuesto modelos matemáticos que permitan conocer el comportamiento del desarrollo vegetal de cualquier especie, despreciando los arreglos genéticos y biológicos de las mismas debido al enfoque de aplicaciones micro climatológicas de las alternativas planteadas.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.2 Conclusiones

Se diseñaron diagramas de caja en OpenModelica que representan los factores micro climatológicos determinantes en el crecimiento de una planta, a través del análisis riguroso de tres modelos base: aquel correspondiente al sistema de una dimensión sin ramificaciones, aquel basado en el tiempo hidrotermal y aquel referido al modelo PHENOFIT.

En la Alternativa 1 (dimensión sin ramificaciones) se incluyeron los factores micro climatológicos correspondientes a la planta per se y al suelo, con algoritmos matemáticos de (Bessonov & Volpert, 2014) y (Janott, y otros, 2010) respectivamente; debido a que la misma representa el modelo micro climatológico más sencillo a proponerse.

Por otro lado, en la Alternativa 2 (tiempo hidrotermal) se incluyeron nuevamente a la planta, el suelo y también a los factores meteorológicos del ambiente basados en algoritmos matemáticos de (Chiou & Chien, 2015), (Janott, y otros, 2010) y (Oke, 1988) respectivamente; porque de esta manera se crea un modelo intermedio entre el básico de la primera alternativa y el global de la Alternativa 3.

Finalmente, en la Alternativa 3 (modelo PHENOFIT) se incluyeron los elementos micro climatológicos correspondientes a la planta, el suelo, los factores meteorológicos y la radiación solar como una caja separada, con algoritmos matemáticos de (Masin, Loddo, Benvenuti, Otto, & Zanin, 2012), (Janott, y otros, 2010), (Oke, 1988) y (Xie, Sengupta, & Dudhia, 2016) respectivamente; debido a que a través de este modelo se podrán considerar todas las variables meteorológicas relevantes que interfieren en el crecimiento de una especie vegetal cualquiera.

La alternativa más viable entre los diagramas diseñados para un futuro modelamiento completo del microclima de una planta es el modelo PHENOFIT, puesto que incluye ecuaciones de cada una de las variables micro climatológicas relacionadas con el desarrollo vegetal. Sin embargo, se reitera que las Alternativas 1 y 2 pueden ser de gran utilidad dependiendo de las intenciones finales de cálculo para las cuales se utilizaría cada modelo.

6.2 Recomendaciones

Para un trabajo a futuro que culmine el modelamiento micro climatológico planteado, se recomienda utilizar equipo de computación acorde a los modelos a simularse, al tipo de ecuaciones a ingresarse (derivadas parciales, segundas derivadas, integrales, exponenciales u otras) y considerando el nivel de complejidad del modelo de manera que OpenModelica funcione de la manera más óptima. La consideración del hardware es indispensable para facilitar la experimentación del investigador y poder realizar pruebas muy finas en cuanto a rangos y escalas; debido a que el programa utilizado requiere de un gran porcentaje de la memoria RAM de cualquier sistema operativo, y se comprobó que la utilización periódica del mismo necesita de equipos con tecnología suficientes para soportarlo.

Asimismo, es recomendable determinar las necesidades específicas del investigador previamente a desarrollar uno de los modelos: cada una de las alternativas puede ser aplicada para ciertos propósitos y considerando que se tiene cierta información base para cada variable de las ecuaciones a resolver.

También es importante considerar cada uno de los flujos posibles entre las cajas a incluirse en los modelos, puesto que el mismo no podrá servir como una herramienta de predicción real si se desprecian parámetros relevantes.

Finalmente, se recomienda tener en cuenta el posible desglose o agrupación de las cajas planteadas en el presente trabajo de titulación: las mismas son referenciales y han sido establecidas en base a la bibliografía detallada a lo largo de cada capítulo, mas no se propone un trabajo a futuro estrictamente basado en las ecuaciones recopiladas.

REFERENCIAS

Alvarado, V., & Bradford, K. (2002). A hydrothermal time model explains the cardinal temperatures for seed germination. *Plant, Cell and Environment*.

Ascione, I., Deus, R., & Alves, C. (2013). Modelling Seagrass Biomass and Relative Nutrient Content. *Journal of Coastal Research - IST*, 1470-1476.

Bessonov, N., & Volpert, V. (2014). *Dynamical Models of Plant Growth.* Paris: PICS 2092.

Chiou, C.-R., & Chien, C.-C. (2015). Plant bioclimatic models in climate change research. *Botanical Studies*.

Cornelis van Kooten, G. (2013). *Climate Change, Climate Science and Economics.* Londres: Springer.

Elkind, E., Blaist, G., Peled, D., & Qu, H. (2006). Grey-Box Checking. *International Federation for Information Processing*.

Elmqvist, H., Tummescheit, H., & Otter, M. (2003). Object-Oriented Modeling of Thermo-Fluid Systems. *Proceedings of the 3rd International Modelica Conference.* Linköping: Peter Fritzson.

Gosling, S., Bryce, E., Dixon, G., Gabriel, K., Gosling, E., Hanes, J., & Hondula, D. (2014). A glossary for biometeorology. *Springer*.

Gracia, C. (2 de Diciembre de 2016). *Balance energético foliar y evapotranspiración.* Obtenido de Universitat de Barcelona: http://www.ub.edu/ecologia/carlos.gracia/PublicacionesPDF/Balance_foliar.pdf

Gray, S., & Brady, S. (2016). Plant developmental responses to climate change. *Elsevier*, Developmental Biology.

INAMHI. (2016). *Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología - Modelos Numéricos*. Recuperado el: 8 de noviembre de 2016, de: http://www.serviciometeorologico.gob.ec/modelos-hidrometeorologicos/

IPCC. (2016). *Intergovernmental Panel on Climate Change*. Recuperado el: 11 de noviembre de 2016, de: https://www.ipcc.ch/report/ar5/

Janott, M., Gayler, S., Gessler, A., Javaux, M., Klier, C., & Priesack, E. (2010). A one-dimensional model of water flow in soil-plant systems base on plant architecture. *Springerlink*.

Jones, H. (2014). *Plants and Microclimate.* USA: Cambridge Univsersity Press.

Levy, R. (2012). Hierachical Models. En E. Hahn, *Probabilistic Models in the Study of Language*. Nueva York: John Wiley & Sons.

Main, C., Steckel, L., Hayes, R., & Mueller, T. (2006). Biotic and abiotic factors influence horseweed emergence. *BioOne*.

Masin, R., Loddo, D., Benvenuti, S., Otto, S., & Zanin, G. (2012). Modeling Weed Emergence in Italian Maize Fields. *Weed Science Society of America*.

Niles, M., Lubell, M., & Brown, M. (2015). How limiting factors drive agricultural adaptation to climate change. *Elsevier, Agriculture, Ecosystems ans Environment*.

Oke, T. (1988). *Boundary Layer Climates.* Londres: Routeledge.

OpenModelica. (2016). *OpenModelica*. Recuperado el: 8 de noviembre de 2016, de: https://www.openmodelica.org/

Paloma Esteve, C. V.-O.-G. (2015). A hydro-economic model for the assessment of climate change impacts and adaptation in irrigated agriculture. *Elsevier, Ecological Economics(120)*.

Quiggin, J. (2007). Counting the cost of climate change at an agricultural level. *CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources*.

Xie, Y., Sengupta, M., & Dudhia, J. (2016). A Fast All-sky Radiation Model for Solar applications (FARMS): Algorithm and Performance Evaluation. *Elsevier*.