

# **Growth and Climate Model for Meñaka Greenhouse**

HortiMED Report

Deyviss Jesús Oroya-Villalta<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Universidad de Deusto, Avenida de las Universidades 24, 48007 Bilbao, Basque Country, Spain*

May 20, 2021

# Contents

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Datasets description</b>	<b>4</b>
2.1	Datos Disponibles . . . . .	4
2.1.1	Datos Brutos . . . . .	4
2.1.2	Pre-procesado preliminar . . . . .	7
2.2	Separación de datos con Heater . . . . .	9
2.3	Conclusion . . . . .	9
<b>3</b>	<b>External Climate Variables prediction</b>	<b>10</b>
3.1	Datos disponibles en API libres . . . . .	10
3.2	Predicción local mediante los datos de <i>Sysclima</i> . . . . .	10
3.3	Radiación Externa . . . . .	11
<b>4</b>	<b>Current Controls Law</b>	<b>12</b>
4.1	Pantalla de Sombreado . . . . .	12
<b>5</b>	<b>Inndoor Climate Model</b>	<b>13</b>
5.1	Inner temperature Modelling . . . . .	13
5.1.1	Modelos . . . . .	14
<b>6</b>	<b>Crop Model</b>	<b>18</b>
6.1	Variables Description . . . . .	18
6.1.1	Input Variables . . . . .	18
6.1.2	State Variables . . . . .	19
6.1.3	Measurements Variables . . . . .	19
6.2	Mathematical relations . . . . .	19
6.2.1	Relation of Daily Radiation and PAR . . . . .	19
6.2.2	Relation LAI and PTI . . . . .	20
6.2.3	Relation LAI and FPAR . . . . .	20
6.2.4	Relation: FPAR & PTT . . . . .	21
6.3	Metabolical effects by climate variables . . . . .	21
6.3.1	Inhibición de crecimiento por Temperatura . . . . .	21
6.4	Dinamical Models . . . . .	23

<b>7 Data Pre-procesing</b>	<b>24</b>
7.1 Test and Train Trayectories	24
7.2 Obtención de Señal de clima con la mínima composición harmónica	24
7.3 Selección de sesiones de cultivo	24
<b>8 Validation of Temperature Models</b>	<b>25</b>
8.1 Descripción de medidas disponibles	25
8.2 Obtención de Señal de clima con la mínima composición harmónica	25
8.3 Selección de sesiones de cultivo	25
<b>9 Validation of Crop Models</b>	<b>26</b>
<b>10 Conclusions</b>	<b>27</b>
<b>A Parameters</b>	<b>28</b>

# Chapter 1

## Introduction

El invernadero en cuestión es se trata de un invernadero comercial que cuenta con un sistema de toma de medidas climáticas. Además la producción de kilos de tomates es contabilizado.

# Chapter 2

## Datasets description

Con el fin del modelado del sistema completo del invernadero describiremos las bases de datos disponibles de este. Como veremos tenemos una gran cantidad de información en las variables de clima, mientras que las medidas crecimiento de la plantación se reduce a la producción del fruto. Además procederemos a explicar un preprocesado preliminar que podemos realizar sin necesidad de tener en cuenta los modelos de clima, ni de crecimientos. Este constará de un eliminación de ruido y una pre-selección de variables con información relevante

En este capítulo seguiremos de la siguiente manera: (1) Presentaremos las bases de datos históricos en bruto tal y como se recogieron antes de empezar el proyecto, realizando pequeñas modificaciones. (2) Realizaremos un análisis de correlaciones lineales preliminar con el fin de remover variables linealmente dependientes.

### 2.1 Datos Disponibles

El invernadero consta de un sistema de captura de datos llamado *sysclima*, enfocado en las variables climáticas, a continuación la describiremos la base de datos capturado por *sysclima*.

#### 2.1.1 Datos Brutos

**Dataset 2.1.1** (SysClima Bruto). *Serie temporal de variables climáticas con una frecuencia de muestreo no uniforme de aproximadamente 2 minutos. Además de las variables de clima esta base de datos contiene información sobre el estado de la pantalla de sombreo y del porcentaje de apertura de las ventanas, variables que podemos considerar como variables manipulables. Mostramos una descripción detallada de las variables en la tabla 2.1 y una representación gráfica en la Figura 2.1.*

Por razones que profundizaremos más adelante ha sido necesario obtener datos climáticos de la estación meteorológica de Derio. Este es la estación más cercana al invernadero de Meñaka con históricos que coinciden temporalmente con los datos del DataSet 2.1.1

**Dataset 2.1.2** (Meteorologic Station of Derio - Euskalmet). *Serie temporal de variables climática de la estación meteorológica de Derio, desde 2016 hasta 2020 con una frecuencia de muestreo de diez minutos. Utilizaremos esta base de datos de clima con el fin de complementar las regiones sin medidas de la base de datos 2.1.1.*

Name	Units	Description
Time Stamp	-	
Var2	-	Sección de invernadero
Text	°C	Temperatura exterior
HRExt	%	Humedad relativa Exterior
RadExt	W/m <sup>2</sup>	Radiación Exterior
Vviento	km/s	Wind Velocity
DireccinViento	°	Dirección del Viento
RadAcumExt	W/m <sup>2</sup>	Radiación Acumulada diaria Exterior
AlarmaLluvia	-	Alarma de Viento
AlarmaVto	-	Alarma de Lluvia
Tinv	°C	Temperatura interior
Troco	°C	Temperatura de Rocio
RadInt	W/m <sup>2</sup>	Radiación Interior
xDemPant1	%	Demanda de Pantalla de Sombreado
xEstadoPant1	%	Estado de Pantalla de Sombreado
TVentilacin	°C	Temperatura de Ventilación
EstadoCenitalE	%	Porcentaje de apertura Cenital Este
EstadoCenitalO	%	Porcentaje de apertura Cenital Oeste
MaxHR	%	Maxima Humedad Relativa
MinHR	%	Mínima Humedad Relativa
DeltaX	g/m <sup>3</sup>	
DeltaT	°C	
DPV	mbar	Déficit de Presión de Vapor
HRInt	%	Humedad relativa Interior
Ventiladores2Activo	-	-
Aerotermo1Activo	-	none
Sonda1		none
Sonda2		-
Sonda3		-
Sonda5		-
Sonda6		-

Table 2.1: Variables of dataset [2.1.1](#)

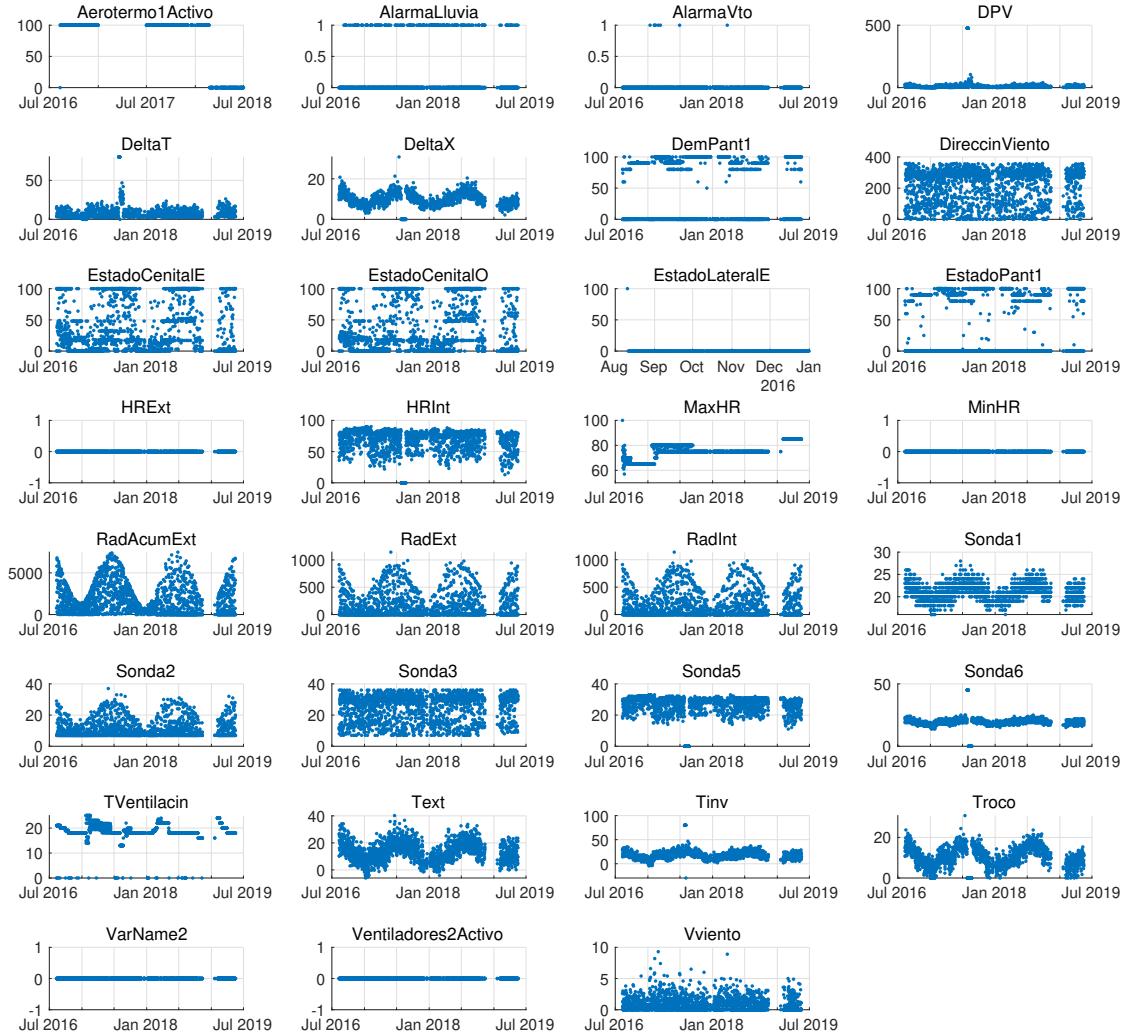


Figure 2.1: Preliminary view of Dataset 2.1.1 from Jul-2016 to Jun-2019

Por otro lado, como hemos mencionado anteriormente el único registro claro con respecto al crecimiento de la plantación la masa de fruto recogido. Este registro se encuentra en la siguiente base de datos.

**Dataset 2.1.3 (Tomatoes Production).** *Serie temporal de masa de tomates producidos con una frecuencia de muestreo aproximada diaria y medido en kilogramos. Estos datos son recogidos manualmente por el personal del invernadero.*

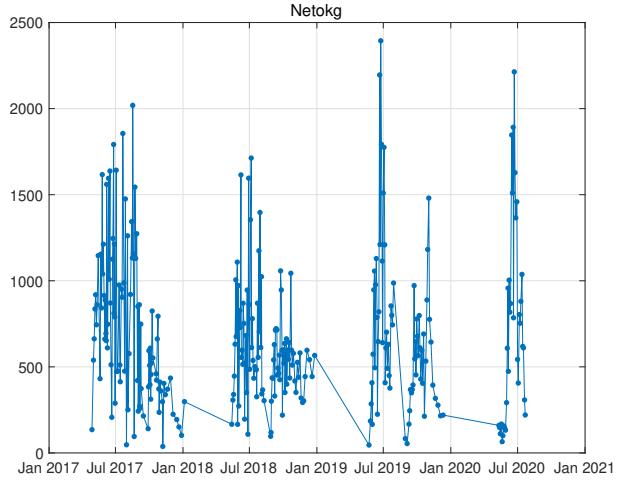


Figure 2.2: View of Dataset 2.1.3

### 2.1.2 Pre-procesado preliminar

Las medidas de sysclima serán la base de los modelos basados en datos además servirán para la validación de los modelos mecanísticos e híbridos. Crearemos una nueva base de datos que será una copia de la base de datos 2.1.1 pero donde solo serán seleccionadas las una pocas variables. A continuación la definiremos como:

**Dataset 2.1.4** (SysClima Compact). *Serie Temporal copia del Dataset 2.1.1 considerando las variables mostradas en la Tabla 2.2. En la Figura 2.3 se puede ver una representación gráfica de sus variables.*

Name	Units	Description
Time Stamp	-	
Text	°C	Temperatura exterior
RadExt	W/m <sup>2</sup>	Radiación Exterior
Vviento	km/s	Wind Velocity
DireccinViento	°	Dirección del Viento
Tinv	°C	Temperatura interior
RadInt	W/m <sup>2</sup>	Radiación Interior
xEstadoPant1	%	Estado de Pantalla de Sombreado
EstadoCenitalE	%	Porcentaje de apertura Cenital Este
EstadoCenitalO	%	Porcentaje de apertura Cenital Oeste
EstadoLateralE	%	Porcentaje de apertura Lateral Este
HRInt	%	Humedad Relativa Interior

Table 2.2: Variables of dataset 2.1.1

Las variables de la base de datos 2.1.4 se pueden clasificar variables dependientes e independientes. Esta clasificación separa las variables que pueden depender de otros con las variables que

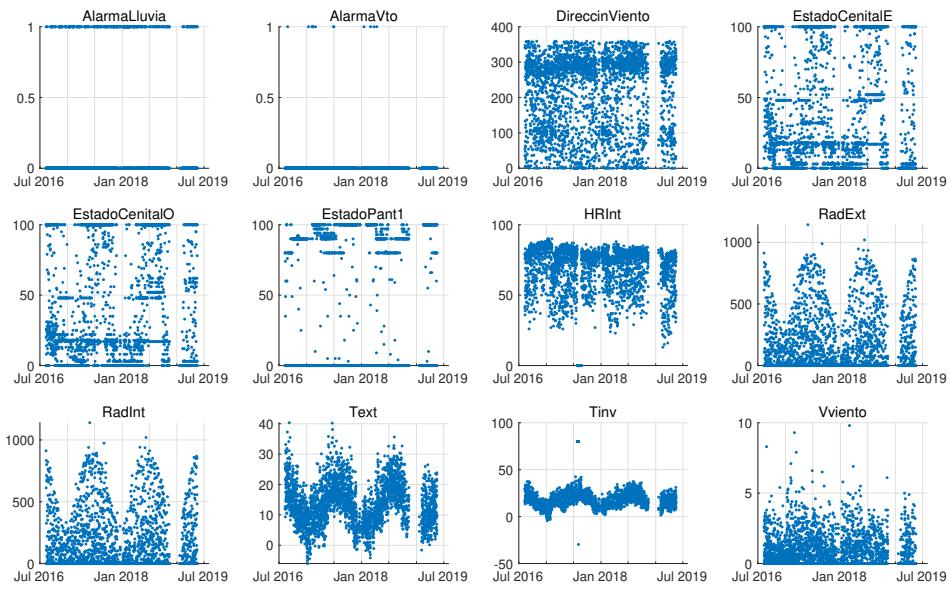


Figure 2.3: Selection of variables

dependen de procesos externos.

## 1. Variables de Entrada

### (a) Perturbaciones

- i. Temperatura Exterior
- ii. Radiación Exterior
- iii. Velocidad del viento
- iv. Dirección del viento

### (b) Controles

- i. Pantalla de Sombra
- ii. Estado de la Cenital Este
- iii. Estado de la Cenital Oeste
- iv. **Pellet Heater**: No tenemos este dato, pero sabemos que existe una fuente de calor adicional en el invernadero en invierno. Es conocido que este calentador funciona con un termostato a un temperatura fija de  $12^{\circ}C$

## 2. Variables de Salida

- (a) Temperatura Interior
- (b) Radiación Interior
- (c) Humedad Relativa Interior

## 2.2 Separación de datos con Heater

Es conocido que una de las variables más relevantes dentro de un invernadero es el calentador interior. Este mantiene una temperatura adecuada para la cosecha en los días de extremo frío. Concretamente en el invernadero de Meñaka se sabe que existe un calentador con un mecanismo de termostato, cuya consigna está alrededor de  $10^{\circ}C$ . Sin embargo la señal de potencia del calentador nos ha sido capturado complicando la generación de un modelo de temperatura basado en datos.

Es común pensar que un modelo de caja negra es capaz de simular cualquier comportamiento o función que se le ponga en frente, sin embargo para ello es necesario que la función exista. Dicho de otra manera, es necesario que el proceso a modelar solo tenga una sola respuesta posible ante un vector de entrada concreto, es es pues la definición de función. En el caso que nos compete, es necesario encontrar un modelo que responda de la misma manera para las mismas condiciones de variables de entrada y de perturbaciones.

El hecho de no considerar el calentador como señal de entrada hace que un modelo de caja negra intente encontrar causalidad en correlaciones no causales. Dado que conocemos que existe calentador buscaremos un procedimiento objetivo para la selección de tramos de días en los que efectivamente no existe calentador. De esta manera, la obtención de los modelos de caja negra sin tener en cuenta la señal de calentador es plausible. Luego podremos encontrar la señal de calentador con ayuda del modelo calculado previamente.

Es necesario notar que solo existen tres procesos por los que la temperatura de un cuerpo puede variar, estos son: Conducción térmica, Convección Térmica y Radiación. Dado que no tenemos modelos para estos datos es necesario utilizar el uso la conservación de energía.

## 2.3 Conclusion

## Chapter 3

# External Climate Variables prediction

Para una predicción adecuada de las variables internas del invernadero, deberemos conocer las variables externas que afectan a la dinámica climática. En concreto nos referimos a las variables de temperatura, radiación y humedad exterior. Las dos primeras son recogidas por el sistema *sysclima*, mientras que la humedad relativa exterior no es conocida.

### 3.1 Datos disponibles en API libres

Es conocido los servicios de predicción meteorológicas es estas variables, sin embargo es necesario comprobar la frecuencia máxima, además

1. **Open Data Euskadi** Predicción meteorológica actual y datos acumulados de 2021: <https://opendata.euskadi.eus/catalogo/-/prediccion-meteorologica-de-2021/>. Temperatura máxima y temperatura mínima por día, además de una descripción en texto de como será el día. Además solo se centra en ciudad grande. La medida más cercana a menuda, es la medida a la que relaciona a la zona de Bilbao.
2. **AEMET** <https://opendata.aemet.es/centrodedescargas/inicio> (contacto 902 887 060)
3. OpenWeather

### 3.2 Predicción local mediante los datos de *Sysclima*

Consideraremos un time series supongamos que tenemos  $M$  trayectorias que denotaremos como  $\{\mathcal{T}_m\}_{m=1}^M$ . Además donde cada  $\mathcal{T}_m$  está compuesta de la siguiente manera  $\mathcal{T}_m = \{\mathbf{y}_t^m\}_{t=0}^{N_T^m}$ . A su vez cada trayectoria está compuesta por vectores  $\mathbf{y}_t^m \in \mathbb{R}^{N_y}$ .

Entonces nos gustaría encontrar una función que sea capaz de tomando una trayectoria de longitud pequeña  $\mathcal{T}_0$ , generar una trayectoria en el futuro  $\mathcal{T}_f$ .

$$\mathcal{T}_f = \mathcal{F}(\mathcal{T}_0) \quad (3.1)$$

¿Cómo encontramos la función  $\mathcal{F}$ ?

Podemos presuponer que la señal proviene de un sistema dinámico de manera que la secuencia de puntos  $\mathcal{T}$  es una trayectoria continua  $\mathcal{T} = \{\mathbf{y}(t) \in \mathbb{R}^{N_y} \mid \forall t \in [0, T]\}$ , y que sigue la siguiente ecuación diferencial

1. Without memory

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{y}}_m(t) = \mathcal{F}_\omega(\mathbf{y}_m(t)) \\ \mathbf{y}_m(0) = y_0^m \end{cases} \quad (3.2)$$

2. With memory

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{y}}_m(t) = \mathcal{F}_\omega(\mathbf{y}_m(t), \mathbf{h}_m(t)) \\ \dot{\mathbf{h}}_m(t) = \mathcal{G}_\gamma(\mathbf{y}_m(t), \mathbf{h}_m(t)) \end{cases} \quad \text{I.C.} \quad \begin{cases} \mathbf{y}_m(0) = y_0^m \\ \mathbf{h}_m(0) = 0 \end{cases} \quad (3.3)$$

En ambos casos trateremos de resolver el problemas minimización

$$\min_{\Omega} \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^{N_t^m} (y_m(t) - y_t)^2 \quad (3.4)$$

Donde  $\Omega$  en el caso con memoria es  $\Omega = \{\omega, \gamma\}$ , mientras que en el caso sin memoria  $\Omega = \omega$

### 3.3 Radiación Externa

## Chapter 4

# Current Controls Law

### 4.1 Pantalla de Sombreo

# Chapter 5

## Inndoor Climate Model

### 5.1 Inner temperature Modelling

En este sección solo consideraremos la temperatura interior  $x_T$  como variable de estado.

La transferencia de la temperatura de un medio es muy proceso muy conocido estudiadas en el siglo XVII. Esta variación de la temperatura puede provenir de tres tipos de fuentes. Estas son mediante convección, conducción y radiación. Las fuentes puede afectar al estado del sistema mediante:

1. **Heat Sources:** Añadiendo fuentes de energía. Debido a la conservación de la energía.
  - (a) Conduction Sources: Transmisión de calor por contacto sin transferencia de materia.
  - (b) Convection Sources: Transmisión de calor por contacto con transferencia de materia. En nuestro caso el Heater  $u_T$  y la temperatura exterior  $f_T$ .
  - (c) Radiation Sources: Transmisión de calor por ondas electromagnéticas. En nuestro caso la radiación exterior  $f_r$ .
2. **Perturbation:** Alteración en la manera en la que se conduce la temperatura:
  - (a) Conduction Perturbation: Transmisión de calor por contacto sin transferencia de materia.
  - (b) Convection Perturbation:  $u_w$ : Windows.
  - (c) Radiation Perturbation:  $u_r$ : Shade screens

De esta manera, podemos entender la naturaleza de nuestras fuentes controladas y no controladas. Además de ciertas restricciones que deben cumplir la variación de las fuentes. Por ejemplo, la variación de las perturbaciones nunca debe generar energía sino favorecer o mitigar su transmisión.

Por el contrario las fuentes de calor podrían afectar la manera en la que el sistema intercambia temperatura, es decir que la capacidad calorífica de los distintos elementos pueda depender de la temperatura, sin embargo obviaremos este efecto por simplicidad

### 5.1.1 Modelos

#### Cooling Newton law with external sources

##### Model 5.1.1: Cooling Newton law with external sources

Consideramos las siguiente variables:

Type	Dim	Name	Notation	Units
States	$x \in \mathbb{R}$	Inner Temperature	$x_T$	$K$
Sources	$f \in \mathbb{R}^2$	Exterior Temperature Exterior Radiation	$f_T$ $f_r$	$K$ $W/m^2$
Controls	$u \in \mathbb{R}$	Heater	$u_T$	$W$

Given a exterior temperature  $f_T$ , the inner temperature of greenhouse  $x_T$  can be determined by following ordinaly differential equation:

$$\frac{dx_T(t)}{dt} = -\underbrace{c_d[x_T(t) - f_T(t)]}_{\text{Newton law}} + 3.6e3 \left[ \underbrace{\left( \frac{u_T(t)}{c_H} \right)}_{\text{Heater Term}} + \underbrace{\left( \frac{f_r(t)}{c_R} \right)}_{\text{Radiation Term}} \right] \quad (5.1)$$

Parámetros a estimar

1.  $c_d(h^{-1})$ : Coeficiente de difusión del invernadero.
2.  $c_H(JK^{-1})$ : Capacidad calorífica del invernadero debido a las calderas.
3.  $c_R(JK^{-1}m^{-2})$ : Capacidad calorífica del invernadero por unidad de superficie debido a la radiación.

Ajustamos este modelo con la Trayectoria ???. Suponiendo que esta trayectoria tiene una señal de heater  $u_T(t) = 0$  , podemos simplificar la formula (5.1):

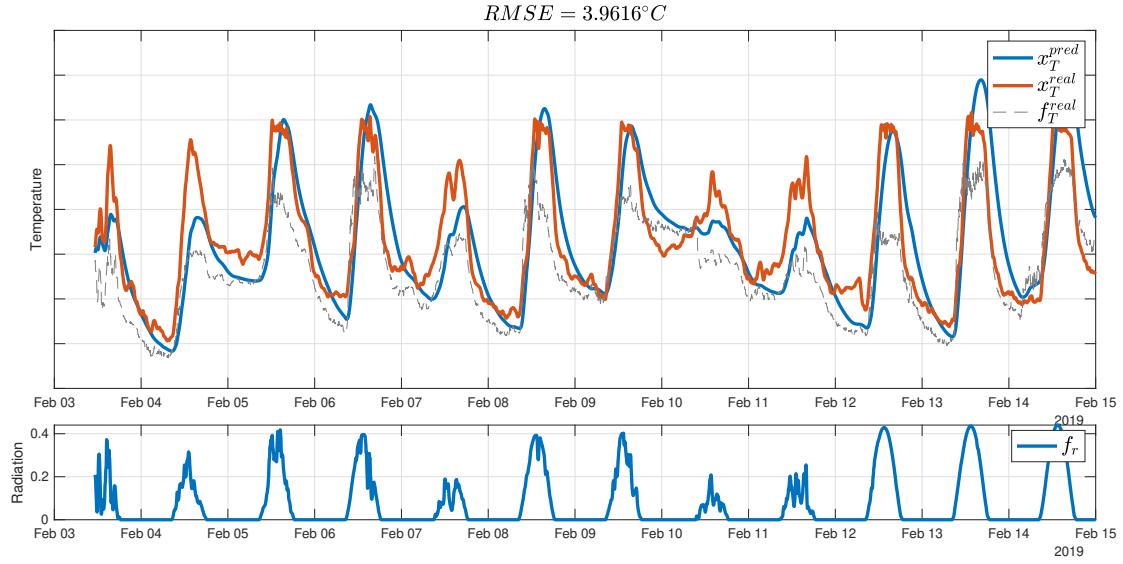
$$\frac{dx_T(t)}{dt} = -c_d[x_T(t) - f_T(t)] + 3.6e3 \left( \frac{f_r(t)}{c_R} \right) \quad (5.2)$$

Entonces para  $t \in \{t_1, t_2, \dots, t_T\}$

$$\frac{dx_T(t)}{dt} = [-(x_T(t) - f_T(t)) \quad 3.6e3f_r(t)] \begin{bmatrix} c_d \\ (1/c_R) \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

De manera que tenemos podemos formular una ecuación matricial

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \frac{dx_T}{dt}(t_1) \\ \frac{dx_T}{dt}(t_2) \\ \frac{dx_T}{dt}(t_3) \\ \dots \end{bmatrix}}_{d\mathbf{X}} = \underbrace{\begin{bmatrix} -(x_T(t_1) - f_T(t_1)) & 3.6e3f_r(t_1) \\ -(x_T(t_2) - f_T(t_2)) & 3.6e3f_r(t_2) \\ -(x_T(t_3) - f_T(t_3)) & 3.6e3f_r(t_3) \\ \dots & \dots \end{bmatrix}}_G \begin{bmatrix} c_d \\ (1/c_R) \end{bmatrix} \quad (5.4)$$



Entonces

$$\begin{bmatrix} c_d \\ (1/c_R) \end{bmatrix} = \mathbf{G}^{-1} d\mathbf{X} \quad (5.5)$$

Donde  $\mathbf{G}^{-1}$  es la pseudo-inversa de Penrose.

Hemos obtenido  $c_d(h^{-1}) = 0.0054$ ,  $c_R(JK^{-1}m^{-2}) = 1.5519e + 04$ . Obteniendo  $RMSE \approx 4^\circ C$ . Además, suponiendo que el modelo obtenido es capaz de reproducir el comportamiento del invernadero podemos obtener una señal de heater asociada a la Trayectoria ??.

#### Newton Law & external sources with variable convection diffusion

Presentamos una manera huerística del efecto de las ventanas en la temperatura interior.

**Model 5.1.2: Newton Law & external sources with variable convection diffusion**

$$\frac{dx_T(t)}{dt} = -\underbrace{c_d(u_w(t))}_{\text{Windows dependence}}[x_T(t) - f_T(t)] + \left[ \frac{3.6 \times 10^3}{c_H} \right] u_T(t) + \left[ \frac{3.6 \times 10^3}{c_R} \right] f_r(t) \quad (5.6)$$

Donde:

$$c_d(u_w) = c_d^{\min} + (c_d^{\max} - c_d^{\min}) \frac{u_w}{100} \quad (5.7)$$

Parámetros a estimar

1.  $c_d^{\min}(h^{-1})$ : Coeficiente de difusión del invernadero debido a las calderas con las ventanas cerradas.
2.  $c_d^{\max}(h^{-1})$ : Coeficiente de difusión del invernadero debido a las calderas con las ventanas abiertas.
3.  $c_R(JK^{-1}m^{-2})$ : Capacidad calorífica del invernadero por unidad de superficie debido a la radiación.

**Model 5.1.3: NARX**

Consideramos las siguiente variables:

Type	Set	Name	Notation	Units
States	$\mathbf{x} \in \mathbb{R}^3$	Inner Temperature	$x_T$	$K$
		Inner Radiation	$x_r$	$W/m^2$
		Inner Relative Humidity	$x_h$	%
Sources	$\mathbf{f} \in \mathbb{R}^4$	Exterior Temperature	$f_T$	$K$
		Exterior Radiation	$f_r$	$W/m^2$
		Exterior Relative Humidity	$f_h$	%
		Wind Velocity	$f_w$	$Km/h$
Controls	$\mathbf{u} \in \mathbb{R}^3$	Heater	$u_T$	$W$
		Windows	$u_w$	%
		Shade screens	$u_r$	%

Let  $\Delta t$ , we can define a NARX model of oder 1:

$$\mathbf{x}(t + \Delta t) = c_{\omega_d} \left[ \mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), \mathbf{f}(t), \mathbf{x}(t - \Delta t), \mathbf{u}(t - \Delta t), \mathbf{f}(t - \Delta t) \right] \quad (5.8)$$

**Model 5.1.4: ANN**

Consideramos las siguientes variables:

Type	Set	Name	Notation	Units
States	$\mathbf{x} \in \mathbb{R}^3$	Inner Temperature	$x_T$	K
		Inner Radiation	$x_r$	$W/m^2$
		Inner Relative Humidity	$x_h$	%
Sources	$\mathbf{f} \in \mathbb{R}^4$	Exterior Temperature	$f_T$	K
		Exterior Radiation	$f_r$	$W/m^2$
		Exterior Relative Humidity	$f_h$	%
		Wind Velocity	$f_w$	$Km/h$
Controls	$\mathbf{u} \in \mathbb{R}^3$	Heater	$u_T$	W
		Windows	$u_w$	%
		Shade screens	$u_r$	%

Let  $\Delta t$ , we can define a NARX model of order 1:

$$\mathbf{x}(t + \Delta t) = c_{\omega_d}(\mathbf{u}(t), \mathbf{f}(t)) \quad (5.9)$$

**Model 5.1.5: Nueronal Ordinary differential Equation**

$$\frac{dx_T(t)}{dt} = c_{\omega_d}(\cdot)[x_T(t) - f_T(t)] + c_{\omega_f}(\cdot) \quad (5.10)$$

Donde los parámetros de difusión y el término de fuentes son aproximados por perceptrones multicapa.

$$c_{\omega_d} = c_{\omega_d}(u_w, f_H) \quad (5.11)$$

$$c_{\omega_f} = c_{\omega_f}(u_T, u_r, f_r) \quad (5.12)$$

**Model 5.1.6: Modelo híbrido**

$$\frac{dx_T(t)}{dt} = \mathcal{C}_{\omega_d}(\cdot)[x_T(t) - f_T(t)] + \mathcal{Q}_{\omega_f}(\cdot) \quad (5.13)$$

Donde los parámetros de difusión y el término de fuentes son aproximados por perceptrones multicapa.

$$c_{\omega_d} = c_{\omega_d}(u_w, f_H) \quad (5.14)$$

$$c_{\omega_f} = c_{\omega_f}(u_T, u_r, f_r) \quad (5.15)$$

# Chapter 6

# Crop Model

El crecimiento de las plantas de tomate esta determinado por las variables climáticas: radiación, temperatura. Estas variables determinan los procesos biológicos dentro de la planta, como por ejemplo:

- Photosynthesis. Proceso de transformación de radiación solar a carbohidratos.
- Photorespiration. Consumo de carbohidratos para el mantenimiento de procesos biológicos.

Aunque el crecimiento de la planta tiene dependencias con respecto a los nutrientes aportados o la humedad relativa, siempre que de la cosecha no tenga ni limitación de agua, ni limitación de nutrientes estas variables pueden no ser consideradas.

Tomaremos como referencia el modelo *HortSys* [Martínez-Ruiz et al., 2019] este es un modelo simplificado de producción de tomates en invernaderos con sistemas de hidroponía. Hemos agregado de una variable más que representa la temperatura media cada veinticuatro horas y hemos cambiado la formulación de tiempo discreto a tiempo continuo.

## 6.1 Variables Description

Esta sección esta dedicada a la descripción de cada una de las variables involucradas en el modelo dinámico, con el fin de asimilar su significado físico. A continuación describiremos en detalle cada una de las variables necesarias

### 6.1.1 Input Variables

Consideraremos que somos capaces de medir de manera instantánea los valores de temperatura y radiación recibida por la plantación.

1. **Global Radiation** ( $u_R[W/m^2]$ ) Radiación recibida entre el área total del invernadero.
2. **Temperature** ( $u_T[^{\circ}C]$ ) Temperatura en el interior del invernadero.

### 6.1.2 State Variables

En HortSys las variables de estado guardan la información sobre la radiación acumulada y la temperatura durante todo el día. A partir de estas variables se pueden realizar estimaciones en concreto de LAI.

1. **Photothermal time** (pt): Denotada por  $x_{pt}[Js^{-1}]$  representa la energía electromagnética capturada en un rango de temperatura concreto. Este rango de temperatura actúa como una ventanada de temperatura donde la captura de radiación es posible. Esta variable determina el crecimiento de las cada uno de los distintos componentes de la planta, además de marcar las etapas de crecimiento.
2. **Dry Fruit Matter**(dfm): Denotada por  $x_{dfm}[kg]$ , es la cantidad de tomate en la cosecha. Deberemos diferenciar el tomate que ha sido recogido, con el tomate verde que se encuentra en la planta. Por lo general los modelos se refieren a los kilos de tomate recogido, sin embargo en modelos propuestos en [Vanhoor, 2011] o
3. **Dry Steam Matter** ( $x_{dsm}[kg]$ ):  $dsm$  Masa de carbohidratos correspondientes a la de ramas.
4. **Dry Leaf Matter** ( $x_{dlm}[kg]$ ):  $dlm$  Masa de hojas de toda la plantación.
5. **Dry Matter Production** ( $x_{dmp}[kg]$ ):  $dmp$  es una medida de la cantidad de masa en la totalidad de la planta. Es decir, esta contiene a la masa total de los frutos, hojas, ramas y raíces. Esta variable es una simplificación que aglutina la información de  $x_{dsm}$ ,  $x_{dfm}$  y  $x_{dlm}$ .

### 6.1.3 Measurements Variables

En [Martínez-Ruiz et al., 2019] se describen varias variables intermedias que tienen significado físico. Sin embargo en aras de la simplicidad de las expresiones, denotaremos estas variables intermedias como la letra  $y$ . Es importante notar que estas variables son dependientes de las variables de estado  $x$ , por lo que en cada

1. **Leaf Area Index** ( $y_{la}[(m^2 \text{hojas})/(m^2 \text{invernadero})]$ ): Se define como Leaf Area Index al área total de hojas de total de la plantación entre el área total de cultivo. Esta variable nos da un medida de las dimensiones de la plantación. Suele tomar valores del orden de  $(1 \sim 10) \text{ m}^2/\text{m}^2$
2. **Intercepted Radiation Fraction** ( $y_{fpar}[-]$ ): Es la fracción radiación que puede aprovechar la plantación con respecto a la radiación total recibida en todo el invernadero. Por su naturaleza de fracción solo puede tomar valores comprendidos en  $y_{fpar} \in [0, 1]$ .
3. **Photosynthetical Active Radiation** ( $y_{PAR}[Wm^{-2}]$ ): Esta es la fracción de radiación de todo el espectro electromagnético que contribuye a la fotosíntesis.

## 6.2 Mathematical relations

### 6.2.1 Relation of Daily Radiation and PAR

En HortSys, considera solo el 50% de las frecuencias recibidas son utilizadas para la producción de carbohidratos.

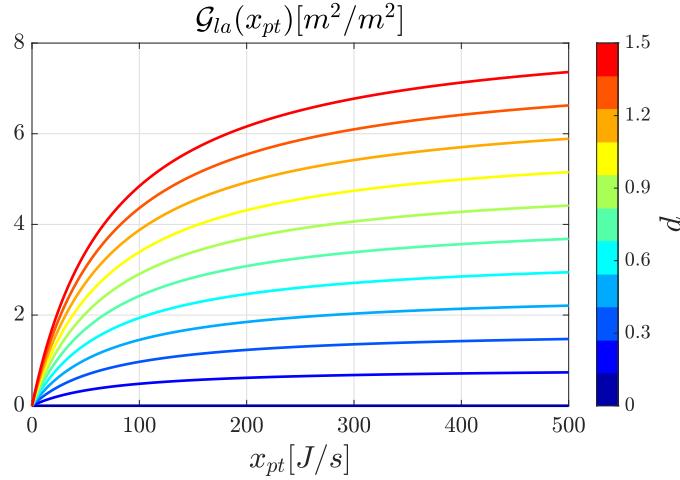


Figure 6.1:  $\mathcal{G}_{la}$  para distintos valores de  $d$ . Se puede ver que el valor de *Leaf Area Index* se satura según aumenta el valor de  $x_{pt}$ . En concreto toma el valor de saturación  $y_{la} = c_1 d$ . Es decir el área de hoja máxima es proporcional a la densidad de superficie de plantas.

$$\mathcal{G}_{par} = \frac{u_R}{2} \quad \Rightarrow \quad y_{par}(t) = \mathcal{G}_{par}(u_R) \quad (6.1)$$

### 6.2.2 Relation LAI and PTI

En [Martínez-Ruiz et al., 2019] LAI es considerado una variable dependiente de la variable de estado *Photothermal Time* ( $x_{pt}$ ), siguiente la siguiente relación:

$$\mathcal{G}_{la}(z) = \frac{z}{c_2 + z} c_1 d \quad \Rightarrow \quad y_{la} = \mathcal{G}_{la}(x_{pt}) \quad (6.2)$$

Donde  $d$  es densidad de plantas por metro cuadrado.

Cabe mencionar la correspondencia de comportamiento asintótico de la relación anterior con la experiencia observada (Figure 6.1).

1. Cuando  $x_{pt} \ll c_2$  esperamos un comportamiento lineal entre  $y_{la} \approx (c_1 d / c_2) x_{pt}$ .
2. Cuando  $x_{pt} \rightarrow \infty$  entonces  $y_{la} \rightarrow c_1 d$ . Es decir, si recordamos que  $x_{pt}$  representa la cantidad de energía solar acumulada, podemos notar que este modelo predice una relentización y luego un estancamiento del área total de las hojas. Esto se puede interpretar como un balance, entre la maximización en la recepción de radiación y el mantenimiento de estos órganos.

### 6.2.3 Relation LAI and FPAR

Se considera que depende del LAI de la siguiente manera:

$$\mathcal{G}_{fpar}(z) = 1 - e^{-kz} \quad \Rightarrow \quad y_{fpar} = \mathcal{G}_{fpar}(y_{la}) \quad (6.3)$$

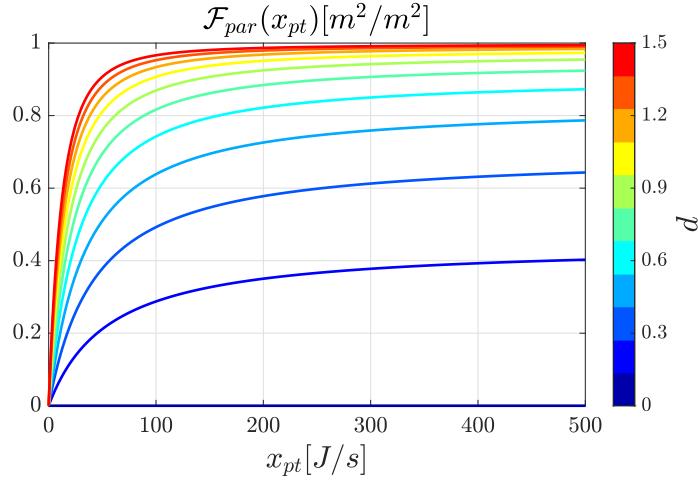


Figure 6.2: Fraction de radación captada debido con respecto al valor de  $x_{pt}$ .

#### 6.2.4 Relation: FPAR & PTT

Con el fin de simplificar las expresiones podemos definir la siguiente función ( $\mathcal{F} : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ ). Esta es la función que tomando el valor de radiación diaria y Photothermal time devuelve un ratio de crecimiento común para las variables  $x_{pt}$  y  $x_{dmp}$

$$\mathcal{F}_{fpar}(x_{pt}) = \mathcal{G}_{fpar}[\mathcal{G}_{la}(x_{pt})] \quad (6.4)$$

Desarrollando la expresión

$$\mathcal{F}_{fpar}(x_{pt}) = 1 - \exp\left(-\frac{c_1 x_{pt}}{c_2 + x_{pt}} kd\right) \Rightarrow y_{fpar} = \mathcal{F}_{fpar}(x_{pt}) \quad (6.5)$$

Comportamiento asintótico (Figure 6.2)

1. Cuando  $x_{pt} \rightarrow \infty$  el valor de  $y_{fpar} \rightarrow 1 - \exp(-kc_1 d/c_2)$ . Es decir, la fracción interceptada para cualquier condición inicial del sistema siempre se saturará en este valor.

### 6.3 Metabolical effects by climate variables

#### 6.3.1 Inhibición de crecimiento por Temperatura

$(\mathcal{G}_T^d : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R})$ : Tomado del [Martínez-Ruiz et al., 2019]

$$\mathcal{G}_T^d(z) = \begin{cases} 0 & z < T_{min} \\ (z - T_{min})/(T_{ob} - T_{min}) & T_{min} < z < T_{ob} \\ 1 & T_{ob} \leq z < T_{ou} \\ (T_{max} - z)/(T_{max} - T_{ou}) & T_{ou} < z < T_{max} \\ 0 & z > T_{max} \end{cases} \quad (6.6)$$

Función de inhibición de Temperatura Suavizada ( $\mathcal{G}_T : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ ): Consideraremos una función de inhibición de crecimiento, de manera que la recepción de radiación solo es posible dentro de uno rango concreto de temperatura. De manera que podemos escribir esta función como:

$$\mathcal{G}_T(z) = 1 - h_\eta(z - T_{max}) - h_\eta(T_{min} - z) \quad (6.7)$$

Donde  $h_\eta$  es un aproximación suave de la función escalón

$$h_\eta(z) = [1 + \tanh(\eta z)]/2 \quad (6.8)$$

De manera que podemos reescribir (6.7) como:

$$\mathcal{G}_T(z) = -\frac{1}{2} \tanh[\eta_{max}(z - T_{max})] - \frac{1}{2} \tanh[\eta_{min}(T_{min} - z)] \quad (6.9)$$

De manera que esta función tiene el valor de uno cuando la temperatura se encuentra en el intervalo  $[T_{min}, T_{max}]$  y cero fuera de él.

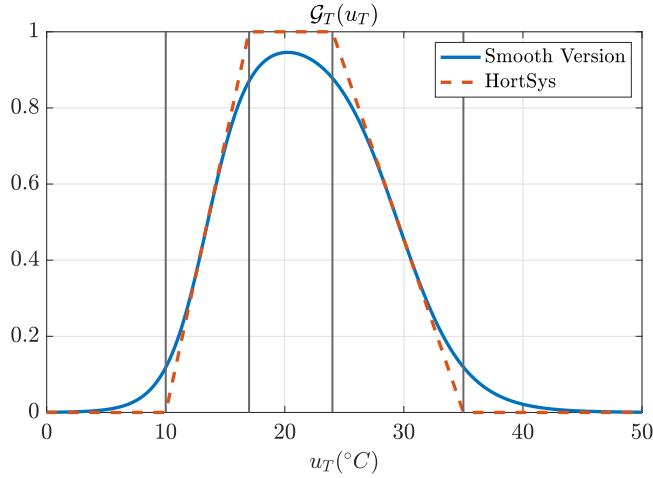


Figure 6.3: Función de inhibición de crecimiento por temperatura

## 6.4 Dynamical Models

### Model 6.4.1: HortSys

Modelo dinámico. Denotaremos con el superíndice  $t$  para determinar la iteración de tiempo del estado  $x^t$ . Cada iteración representa un día.

$$\begin{cases} x_{pt}^{t+1} = x_{pt}^t + \Delta x_{pt} \\ x_{dmp}^{t+1} = x_{dmp}^t + \Delta x_{dmp} \end{cases} \quad (6.10)$$

A continuación describiremos  $\Delta x_{pt}$ ,  $\Delta x_{dmp}$ .

$$\begin{cases} \Delta x_{pt} = u_R \cdot \mathcal{F}_{fpar}(x_{pt}) \cdot \mu[\mathcal{G}_T(u_T)] \\ \Delta x_{dmp} = u_R \cdot \mathcal{F}_{fpar}(x_{pt}) \cdot p_{rue} \end{cases} \quad (6.11)$$

Donde  $\mu[\mathcal{G}_T(u_T)]$  la media en todo el día de la función de inhibición de crecimiento por temperatura.

### Model 6.4.2: HortSys LAI and - Continuous Time Formulation

odelo dinámico

$$\begin{cases} \dot{x}_{nt} = \mathcal{G}_{TT}(u_T(t)) - \mathcal{G}_{TT}(u_T(t-1)) \\ \dot{x}_{pt} = u_R \cdot \mathcal{F}_{fpar}(x_{pt}) \cdot x_{nt} \\ \dot{x}_{dmp} = u_R \cdot \mathcal{F}_{fpar}(x_{pt}) \cdot p_{rue} \end{cases} \quad \text{Initial.Cond.} \quad \begin{cases} x_{nt}(0) = \mu(\mathcal{G}_T(u_T(1))) \\ x_{pt}(0) = x_{pt}^0 \\ x_{dmp}(0) = 0 \end{cases} \quad (6.12)$$

### Model 6.4.3: Simplify TOMGRO

odelo dinámico

$$\begin{cases} \dot{x}_{nt} = \mathcal{G}_{TT}(u_T(t)) - \mathcal{G}_{TT}(u_T(t-1)) \\ \dot{x}_{pt} = u_R \cdot \mathcal{F}_{fpar}(x_{pt}) \cdot x_{nt} \\ \dot{x}_{dmp} = u_R \cdot \mathcal{F}_{fpar}(x_{pt}) \cdot p_{rue} \end{cases} \quad \text{Initial.Cond.} \quad \begin{cases} x_{nt}(0) = \mu(\mathcal{G}_T(u_T(1))) \\ x_{pt}(0) = x_{pt}^0 \\ x_{dmp}(0) = 0 \end{cases} \quad (6.13)$$

# Chapter 7

## Data Pre-procesing

### 7.1 Test and Train Trayectories

**Dataset 7.1.1** (without Heater). *Abarca desde 03-Feb-2019 hasta 15-Feb-2019. En esta trayectoria del sistema no se observa oscilaciones en la horas de mínima temperatura. De manera que, supondremos que durante esta trayectoria la caldera siempre se encuentra apagada.*

**Dataset 7.1.2** (Heater). *Abarca desde 17-Feb-2019 hasta 28-Feb-2019. En esta trayectoria del sistema no se observa oscilaciones en la horas de mínima temperatura. Es decir, podemos presuponer que no existe calor aportado por la caldera de pellet en esta base de datos*

De manera que, supondremos que durante esta trayectoria la caldera se comporta como se esta descrito en el deliverable D1.1:

**From D1.1 Page 82** Each pellet boiler has a PLC for its automatic activation and/or deactivation based on the value of air temperature inside the greenhouse (measured with an integrated PT100 temperature probe). The temperature set point is usually set at 12°C.

### 7.2 Obtención de Señal de clima con la mínima composición harmónica

### 7.3 Selección de sesiones de cultivo

## Chapter 8

# Validation of Temperature Models

### 8.1 Descripción de medidas disponibles

1. Temperatura.
2. Radiación
3. Dry Matter Fruit

### 8.2 Obtención de Señal de clima con la mínima composición harmónica

### 8.3 Selección de sesiones de cultivo

## Chapter 9

# Validation of Crop Models

## Chapter 10

# Conclusions

## Appendix A

### Parameters

Name	Value	Units
$c_1$	2.82	$m^{-2}$
$c_2$	74.66	-

Table A.1: Parámetros tomados de [Martínez-Ruiz et al., 2019]

# Bibliography

[Martínez-Ruiz et al., 2019] Martínez-Ruiz, A., López-Cruz, I. L., Ruiz-García, A., Pineda-Pineda, J., and Prado-Hernández, J. V. (2019). HortSyst: A dynamic model to predict growth, nitrogen uptake, and transpiration of greenhouse tomatoes. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 79(1):89–102.

[Vanthoor, 2011] Vanthoor, B. H. (2011). *A model-based greenhouse design method*. PhD thesis, Wageningen University, Droevedaalsesteeg 4, 6708 PB Wageningen, The Netherlands.