



UNIVERSIDAD DE BURGOS  
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR  
Grado en Ingeniería Informática



**TFG del Grado en Ingeniería  
Informática**

**Análisis de datos de  
temperatura y humedad de  
suelo procedentes de sensores  
IoT desplegados en un viñedo**



Presentado por Gabriel Hernández Vallejo  
en Universidad de Burgos — 2 de julio de 2023  
Tutores: Rubén Ruiz González, Alejandro  
Merino Gómez







UNIVERSIDAD DE BURGOS  
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR  
Grado en Ingeniería Informática



D. Rubén Ruiz González y D. Alejandro Merino Gómez, profesores del departamento de Digitalización, área de Ingeniería de Sistemas y Automática.

Exponen:

Que el alumno D. Gabriel Hernández Vallejo, con DNI 71709111-X, ha realizado el Trabajo final de Grado en Ingeniería Informática titulado *"Análisis de datos de temperatura y humedad de suelo procedentes de sensores IoT desplegados en un viñedo"*.

Y que dicho trabajo ha sido realizado por el alumno bajo la dirección del que suscribe, en virtud de lo cual se autoriza su presentación y defensa.

En Burgos, 2 de julio de 2023

Vº. Bº. del Tutor:

Vº. Bº. del co-tutor:

Rubén Ruiz González

Alejandro Merino Gómez





## Resumen

Con el avance del cambio climático en las últimas décadas, gran parte del campo español se encuentra afectado por sus efectos (temperaturas extremas, precipitaciones escasas, aumento de la temperatura de ríos y lagos, diferentes plagas, etc.).

Por otro lado, en España la cultura del vino se encuentra muy arraigada, por lo que es de vital importancia gestionar los recursos disponibles con distintos mecanismos, para conservar la producción y la tradición.

En el proyecto se plantea la creación de modelos que permitan realizar predicciones futuras a corto y medio plazo sobre variables de humedad y temperatura, para, de este modo, ser capaces de optimizar el uso de diferentes tecnologías como los sistemas automáticos de riego, adaptándolos a las necesidades de los cultivos y reduciendo el consumo de recursos hídricos.

De esta manera, se abordan distintas fases para obtener los modelos predictivos, comenzando con las etapas relacionadas con los datos adquiridos y terminando con la evaluación de los resultados obtenidos.

Se han obtenido arquitecturas con errores cuadráticos medios promedio cercanos a  $2,6 \cdot 10^{-7}$ , lo que supone menos de 0,5 unidades de error en cada variable.

## Descriptores

Redes Neuronales Artificiales, Predicción de Series Temporales, Redes Neuronales Recurrentes, Regresión meteorológica, Machine Learning, KDD.

### **Abstract**

Climate change in recent decades has altered the way humans consume certain resources such as water or fossil fuels, thus limiting the amount of irrigation hours available in vine crops and causing various issues in the outcomes.

This project proposes the creation of neural models that enable short and medium-term predictions regarding some of the most critical variables in the mentioned crop, such as humidity and ambient or underground temperatures.

In this way, vineyard growers will be able to modify automatic irrigation systems to adapt to the needs of the fields while optimizing different resources.

The project encompasses various phases to obtain predictive models, starting with the stages related to acquired data and concluding with the evaluation of the results obtained.

### **Keywords**

Artificial Neural Networks, Time Series Forecasting, Recurrent Neural Networks, Weather regression, Machine Learning, KDD.



---

# Índice general

---

<b>Índice general</b>	<b>iii</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>v</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>vi</b>
<b>Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Estructura de la memoria . . . . .	3
1.2. Materiales adjuntos . . . . .	4
<b>Objetivos del proyecto</b>	<b>5</b>
2.1. Objetivos generales . . . . .	5
2.2. Objetivos técnicos . . . . .	5
2.3. Objetivos personales . . . . .	6
<b>Conceptos teóricos</b>	<b>7</b>
3.1. Pre-procesamiento de datos . . . . .	8
3.2. Modelado . . . . .	11
<b>Técnicas y herramientas</b>	<b>19</b>
4.1. Metodologías . . . . .	19
4.2. Control de versiones . . . . .	19
4.3. Alojamiento del repositorio . . . . .	19
4.4. Gestión del proyecto . . . . .	20
4.5. Comunicación . . . . .	20
4.6. Entorno de desarrollo . . . . .	20
4.7. Creación de diagramas . . . . .	21

4.8. Librerías . . . . .	21
4.9. Restful API . . . . .	22
<b>Aspectos relevantes del desarrollo del proyecto</b>	<b>23</b>
5.1. Inicio del Proyecto . . . . .	23
5.2. Fase de preparación de los datos . . . . .	24
5.3. Fase de creación de modelos . . . . .	25
5.4. Fase de evaluación de modelos . . . . .	27
<b>Trabajos relacionados</b>	<b>35</b>
6.1. <i>Weather forecasting model using Artificial Neural Network</i> . . . . .	35
6.2. <i>Humidity forecasting in a potato plantation using time-series neural models</i> . . . . .	36
6.3. <i>BMAE-Net: A Data-Driven Weather Prediction Network for Smart Agriculture</i> . . . . .	36
<b>Conclusiones y Líneas de trabajo futuras</b>	<b>39</b>
7.1. Conclusiones . . . . .	39
7.2. Líneas de trabajo futuras . . . . .	40
<b>Bibliografía</b>	<b>43</b>

---

# Índice de figuras

---

3.1. <i>Proceso KDD</i> . Extraído de [1] . . . . .	7
3.2. Perceptrón Multicapa. Extraído de [2] . . . . .	12
3.3. Red Neuronal Recurrente. . . . .	13
3.4. Representación de la RNN en el tiempo. . . . .	14
3.5. Celda de memoria de LSTM . . . . .	16
3.6. Celda de memoria de GRU . . . . .	17
5.1. Esquema del proceso de preparación de datos . . . . .	26
5.2. Función ReLU . . . . .	27
5.3. Comparativa de ratio de aprendizaje para GRU . . . . .	29
5.4. Comparativa de ratio de aprendizaje para GRU (0.01 y 0.001) . . . . .	29
5.5. Comparativa de ratio de aprendizaje para GRU . . . . .	30
5.6. Comparativa de ratio de aprendizaje para LSTM (0.01) . . . . .	30
5.7. Comparativa de ratio de aprendizaje para LSTM (0.01) . . . . .	31
5.8. Comparativa de frecuencias de menor error en combinaciones. . . . .	33

---

# Índice de tablas

---

5.1. Tabla comparativa de modelos . . . . .	32
7.1. Resumen de ejecuciones . . . . .	40

---

# Introducción

---

El cuidado de las tierras de cultivo vitícolas ha supuesto a menudo a lo largo de la historia diferentes retos desde el comienzo de su domesticación entorno al 3500-3100 a.C., continuando en la época del Antiguo Egipto, lugar en el que se cree se comenzó a popularizar la ingesta del producto resultante de la labranza y cosecha de los cultivos: el vino [3].

En la península ibérica el interés por este proceso y su resultante comenzó en el periodo fenicio cerca del 1100 a.C., expandiéndose por todo el territorio peninsular gracias al comercio, lo que dio como resultado que los procesos enológicos fueran ya bien conocidos en los siglos IV-III a.C. [3, 4].

Entre los principales retos a los que se han enfrentado los viticultores en la península ibérica se encuentran numerosas plagas de insectos, ácaros, nematodos, diferentes vertebrados, moluscos, bacterias, etc [5]. Siendo la más devastadora la causada por la histórica plaga de filoxera (*Phylloxera vastatrix*) a finales del siglo XIX y comienzos del XX, que obligó a una reestructuración prácticamente completa de la viticultura española [6].

Sin embargo, el principal factor influyente en el cultivo de la vid es el clima, siendo este el causante de sus alteraciones, fisiopatías y la presencia de casi todas las plagas, de manera que estas se encuentran relacionadas con diferentes factores climáticos como la temperatura, las precipitaciones, la humedad y la humectación. De esta forma, por ejemplo, las altas lluvias o humedades y/o bajas temperaturas pueden producir corrimiento del racimo (escasez anormal de bayas en los racimos) o las altas temperaturas pueden generar desequilibrios hídricos que afecten a los injertos y a aquellas cepas infectadas por hongos de la madera [5].

Por otro lado, los datos climatológicos históricos indican que la temperatura global ha aumentado  $1,1^{\circ}\text{C}$  desde el inicio de la Revolución Industrial hasta nuestros días, siendo este desequilibrio causado en los últimos años por la actividad humana, produciéndose a velocidad tal que los ecosistemas no tienen tiempo de adaptarse [7]. Las precipitaciones, además, no son uniformes, sino que aumentan en zonas donde ya son muy abundantes y disminuyen en las regiones más secas [7].

Ante esta situación se plantea la cuestión de cuáles de estos efectos podríamos ser capaces de predecir y en qué proporción para, si bien no subsanar completamente, sí ser capaces de paliar en cierta medida conociendo con anterioridad ciertos datos climatológicos que ayudarán a las diferentes tomas de decisiones de los viticultores.

De esta manera, siendo conocedores a corto o medio plazo la humedad y la temperatura superficial del suelo, entre otras variables, podríamos adaptar los sistemas de riego para adecuarlos a las necesidades de los cultivos y por otro lado, gestionar de forma adecuada los recursos hídricos nacionales (en este caso de la zona hidrográfica del Duero) al mismo tiempo que protegemos a las vides de plagas y trastornos fisiológicos debidos a diferentes factores como la humectación o la temperatura del suelo.

En los últimos años las mejoras en los modelos predictivos basados en los datos, han hecho posible la aplicación de diferentes soluciones en multitud de aplicaciones, ayudando a resolver distintos problemas relacionados con diversos campos, como la evolución futura de precios en el mercado bursátil, recomendación de productos, diagnósticos médicos, detección de fraudes, etc.

En este proyecto se propone el análisis de los datos de temperatura y humedad del suelo procedentes de sensores IoT (*Internet of Things*) desplegados en un viñedo situado en la zona sur de la provincia de Burgos, para, de esta forma, obtener modelos predictivos que nos permitan conocer el comportamiento de ciertas variables en función de otras y anticipar su evolución futura a corto plazo.

Se emplearán diferentes modelos, siendo *Long Short-Term Memory (LSTM)* y *Gated Recurrent Unit (GRU)* las estructuras recurrentes estudiadas y *Multi-Layer Perceptron (MLP)* la contraparte convencional, realizando una comparación entre las distintas soluciones para observar su comportamiento con los datos proporcionados.

## 1.1. Estructura de la memoria

La memoria del proyecto cuenta con la siguiente estructura:

- Introducción: descripción del problema que el proyecto pretende resolver junto con la estructuración de la memoria y los materiales adjuntos.
- Objetivos del proyecto: descripción de los objetivos a cumplir con el desarrollo del proyecto.
- Conceptos teóricos: explicación de los conceptos teóricos necesarios para la comprensión del proyecto, el problema a abordar y la solución propuesta.
- Técnicas y herramientas: listado de técnicas y herramientas empleadas durante el desarrollo del proyecto.
- Aspectos relevantes del desarrollo: aspectos a destacar durante la realización del proyecto.
- Trabajos relacionados: trabajos relacionados con el problema que aborda el proyecto.
- Conclusiones y líneas de trabajo futuras: conclusiones obtenidas de la realización del proyecto y posibilidades de ampliarlo o de introducir mejoras.

Además de la memoria, se incluyen una serie de anexos:

- Plan de proyecto software: planificación temporal y estudio de viabilidad del proyecto.
- Comprensión del negocio: especificación de los objetivos y requisitos que el proyecto pretende abordar.
- Comprensión de los datos: estudio del conjunto de datos inicial y su adecuación al problema.
- Preparación de los datos: proceso llevado a cabo para seleccionar los datos empleados en el modelado.
- Modelado: creación de los diferentes modelos.

- Evaluación: evaluación de los modelos obtenidos.
- Manual del programador: aspectos relevantes del código fuente del proyecto.
- Manual de usuario: guía de usuario para el manejo de la aplicación asociada al proyecto

## 1.2. Materiales adjuntos

El proyecto incluye el siguiente contenido:

- Python Notebook con el pre-procesamiento de datos (denominado **data-preprocessing.ipynb**) y las diferentes explicaciones.
- Python Notebook con la integración de los diferentes conjuntos de datos (**data-integration.ipynb**) en un único fichero.
- Python Notebook con el modelado de la Red Neuronal Artificial empleada para la regresión de humedad y temperatura y las explicaciones correspondientes, denominado **ann-modeling.ipynb**.
- Conjunto de datos de los sensores desplegados en el viñedo.
- Conjunto de datos del pluviómetro desplegado en el viñedo.
- Scripts de Python para mostrar las gráficas de los datos (de sensores y pluviómetro) sin procesar.
- Scripts de Python para mostrar las gráficas de los datos (de sensores y pluviómetro) procesados
- Script de Linux para la instalación del entorno virtual.
- Script de Windows PowerShell para la instalación del entorno virtual.
- Script de Windows CMD para la instalación del entorno virtual.
- Scripts para crear el contenedor de Docker en WSL y Linux y, de este modo, virtualizar el servicio de Jupyter Notebook y poder realizar ejecuciones con GPU.

Los recursos mencionados se encuentran disponibles en GitHub [8].



---

# Objetivos del proyecto

---

El proyecto aborda diferentes objetivos. Podemos hacer una distinción entre objetivos generales, objetivos técnicos y objetivos personales.

## 2.1. Objetivos generales

- Realizar un análisis de datos para ser capaces de predecir la temperatura y humedad del suelo en un viñedo.
- Facilitar la comprensión de los datos recogidos mediante representaciones gráficas.
- Buscar las correlaciones entre las diferentes medidas obtenidas y las diferentes variables ambientales y/o de características del suelo.
- Encontrar modelos predictivos que permitan explicar el comportamiento de ciertas variables en función de las otras y anticipar la evolución futura a corto plazo.

## 2.2. Objetivos técnicos

- Realizar visualizaciones de los datos recogidos por los sensores IoT (*Internet of Things*) desplegados en el viñedo.
- Realizar un pre-procesamiento de datos mediante librerías de manipulación de datos de Python como Pandas.

- Modelar una Red Neuronal Artificial con Keras que permita predecir la humedad y temperatura del suelo gracias a los datos proporcionados.
- Emplear Git como sistema de control de versiones distribuido mediante la plataforma GitHub.
- Emplear ZenHub para la gestión de proyectos mediante las metodologías ágiles.
- Aplicar en la medida de lo posible las metodologías ágiles mediante la técnica Scrum aprendida durante el desarrollo del grado (ciertos aspectos como las “*daily*” no pueden aplicarse debido al carácter del TFG).

## 2.3. Objetivos personales

- Emplear los conocimientos y técnicas adquiridas durante el desarrollo de los diferentes cursos del Grado en Ingeniería Informática.
- Profundizar en el uso de la inteligencia artificial para la resolución de problemas cotidianos que tendrán un reflejo en un sistema real (como es el campo del cultivo de la vid).
- Profundizar en la utilización de un lenguaje de programación tan versátil como es Python para el análisis de datos, empleando diferentes librerías nativas y de terceros, así como crear nuevos módulos.
- Profundizar en la librería de Tensorflow que se encuentra tan extendida en los diferentes ámbitos de la vida cotidiana en los que se emplean las redes neuronales (mundo laboral e investigador).

---

## Conceptos teóricos

---

El desarrollo del proyecto cuenta con diferentes fases siguiendo el proceso de *descubrimiento de conocimiento en bases de datos*, *KDD*, compuesto por la comprensión del negocio, la comprensión de los datos, la preparación de datos, el modelado, la evaluación del modelo y el despliegue del producto software [1].

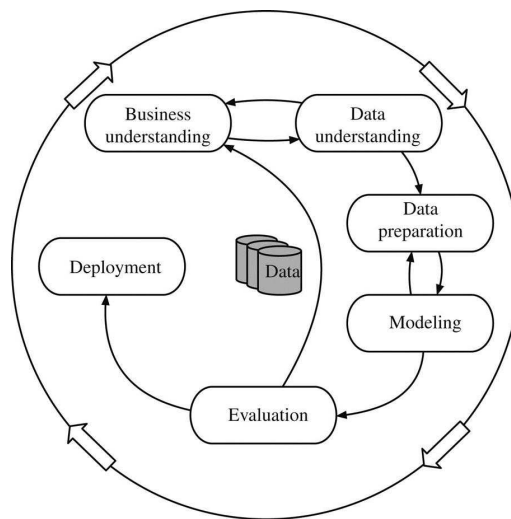


Figura 3.1: *Proceso KDD*. Extraído de [1]

Esta será, en términos generales, la estructura seguida en el desarrollo de los anexos del proyecto.

En la fase de comprensión del negocio se analizan los objetivos y requisitos del proyecto. En este caso quedan bien marcados en la descripción del proyecto y la introducción, así como en la sección de los objetivos.

En la etapa de comprensión de los datos se crea el conjunto de datos inicial y se comprueba si este es adecuado, de forma que si se determina que no lo es, se deberá continuar con la recopilación. En el caso que nos atañe como estamos sujetos a los plazos del curso, la recopilación de más datos puede complicarse.

En la preparación de los datos se realiza el pre-procesamiento de estos, de forma que puedan ser empleados en el modelado.

En la fase de modelado, como su propio nombre indica, se crean los modelos, lo que se encuentra relacionado estrechamente con la fase de preparación, puesto que algunas herramientas de pre-procesamiento incluyen un modelo interno de los datos para transformarlos [1].

En la fase de la evaluación se estima el rendimiento del modelo, reconsiderándose en su caso los objetivos, de forma que si los modelos son poco efectivos se vuelve a la primera fase, ya que se trata de un proceso iterativo.

No se contempla realizar un despliegue de los modelos resultantes en ninguna aplicación, puesto que se sale del alcance del proyecto, sin embargo, se obtendrán resultados que pueden ser empleados en posteriores desarrollos de diferentes índoles.

En esta sección se presentarán los conceptos teóricos relevantes en cada etapa para facilitar su comprensión.

### 3.1. Pre-procesamiento de datos

En el pre-procesamiento de datos se pretende realizar la integración y limpieza de estos, de forma que disminuyan los posibles problemas de calidad que puedan surgir en los diferentes sistemas de información.

Como norma general el **proceso de integración** debe ser realizado durante la fase de recopilación de los datos. La **limpieza** permite la detección y corrección de los problemas no resueltos en la fase anterior como los valores anómalos (*Outliers*) o faltantes [9].

En este caso, los datos si bien no se encontrarán integrados de forma completa, estarán en formatos compatibles (tanto en lo referente a los nombres de los atributos como las dimensiones de los valores), de forma que no es necesario realizar un proceso exhaustivo, simplificando las operaciones a añadir exclusivamente una clase identificativa de los sensores concretos.

Tras la integración de las diferentes fuentes (e.g. bases de datos), se puede realizar un resumen de los atributos, en la que se mostrarán las

características generales de estos como medias, mínimos, máximos y valores posibles. En esta tabla podríamos obtener información trascendental para proceso de análisis, sobre todo para atributos categóricos. En el caso de atributos numéricos un mecanismo visual que es especialmente útil es la gráfica de dispersión [9], que es la técnica de visualización de datos que se empleará mayoritariamente durante el desarrollo del proyecto.

En el conjunto de datos podemos encontrar **valores faltantes**, que pueden ser reemplazados por diferentes razones. Una de ellas es que el modelo que empleemos puede no tratar bien estos valores o que utilice un mecanismo de tratamiento que no sea adecuado. Un problema asociado a su detección es que estos no estén representados como nulos, lo que puede introducir sesgo en el conocimiento extraído [9].

Ante esta situación se puede actuar de diferentes maneras [9]:

- Ignorarlos (ciertos algoritmos son tolerantes a los valores faltantes).
- Eliminar el atributo que contiene valores faltantes.
- Filtrar las filas: eliminar las filas afectadas, lo que introduce cierto sesgo en muchas ocasiones.
- Reemplazar el valor por otro que preserve la media y la varianza del conjunto de datos en caso de atributos numéricos y la moda en atributos categóricos. Una forma de reemplazar los valores faltantes es la imputación de datos perdidos, que consiste en predecirlos a partir de otros ejemplos. Existen también algoritmos que se emplean tradicionalmente para este fin.
- Segmentar: se segmentan las filas por los valores disponibles y se obtiene un modelo por cada uno de los segmentos y se combinan.
- Modificar la política de calidad de datos y esperar a que los faltantes estén disponibles.

Además de las situaciones anteriores, es posible que el conjunto de datos cuente con **valores erróneos** que se deben detectar y tratar. La detección de estos campos puede realizarse de diferentes maneras.

En el caso que nos atañe se deben buscar los **valores extremos**, que no significa que sean erróneos, sino que estadísticamente se clasifican como anómalos, aunque representen un estado genuino de la realidad. Con todo y con eso, estos valores pueden suponer un problema para algunos métodos

que se basan en el ajuste de pesos como las redes neuronales. En otras ocasiones puede haber datos erróneos que caen en la normalidad, por lo que no pueden ser detectados estadísticamente sin conocimiento explícito del dominio del problema [9].

No detectar estos valores puede resultar en problemas si posteriormente se normalizan los datos, puesto que la mayoría de datos estarían en un rango muy pequeño [9], mientras que unos pocos se encontrarán en rangos más grandes y alejados de estos, lo que puede introducir problemas de eficiencia y precisión.

El tratamiento de los datos erróneos o anómalos pueden ser tratados de forma similar a los faltantes [9]:

- Ignorarlos (ciertos algoritmos son robustos a datos anómalos).
- Eliminar el atributo que contiene los datos anómalos, por ejemplo, si esta situación se produce continuamente (es preferible reemplazarla por otra columna con valores discretos estableciendo la corrección o no del valor).
- Filtrar las filas: eliminar las filas afectadas, lo que, de nuevo, puede introducir cierto sesgo.
- Reemplazar el valor por nulo, por los máximos o mínimos del atributo o por las medias (se debe tener en cuenta que los modelos sean capaces de procesar los valores nulos, ya que en caso contrario se deberá hacer frente a un nuevo problema en el conjunto de datos).
- Discretizar: transformar un valor continuo en uno discreto.

Los atributos con valores erróneos serán más graves cuando este sea empleado como clase o valor de salida de la predicción [9], puesto que afectarán directamente al cálculo del rendimiento del modelo.

## Filtro de Hodrick-Prescott

Además de los mecanismos descritos para realizar el pre-procesamiento de los datos, se emplea el filtro de Hodrick-Prescott, que permite extraer los componentes tendenciales y cíclicos de una secuencia temporal, de manera que de los originales se puedan utilizar las tendencias para entrenar los diferentes modelos [10].

Para el cálculo del componente tendencial ( $\tau_t$ ), se emplea un valor positivo  $\lambda$ , de forma que se resuelve:

$$\min \sum_{t=1}^T (y_t - \tau_t)^2 + \lambda \sum_{t=2}^{T-1} [(\tau_{t+1} - \tau_t) - (\tau_t - \tau_{t-1})]^2 \quad (3.1)$$

Dónde  $y_t$  se corresponde con:

$$y_t = \tau_t + c_t \quad (3.2)$$

Siendo de esta forma la componente cíclica calculada cómo:

$$c_t = y_t - \tau_t \quad (3.3)$$

## 3.2. Modelado

Para la creación de los modelos emplearemos diferentes tipos de *Redes Neuronales Artificiales*, como el perceptrón multicapa (*MLP*), *Gated Recurrent Unit* y *Long Short-Term Memory*.

### MLP

El perceptrón multicapa además de una capa de entrada y salida contiene varias capas intermedias llamadas ocultas (*hidden layers*), denominadas de este modo puesto que los cálculos internos están ocultos al usuario [2].

En este tipo de redes las señales se propagan inicialmente hacia delante para obtener un resultado, de forma que las neuronas de una capa se encuentran interconectadas con las de la capa siguiente y así sucesivamente en todas ellas (*feed-forward*).

Cada una de estas conexiones cuenta con un peso, que se inicializa generalmente de forma aleatoria. Estos son empleados para el cálculo de las señales de activación de cada neurona que se utilizarán en la función de activación:

$$\begin{aligned} \bar{h}_1 &= \Phi(W_1^T \bar{x}) \\ \bar{h}_{p+1} &= \Phi(W_{p+1}^T \bar{h}_p) \quad \forall p \in \{1 \dots k-1\} \\ \bar{o} &= \Phi(W_{k+1}^T \bar{h}_k) \end{aligned} \quad (3.4)$$

Donde  $\bar{h}_1$  será el resultado de aplicar la función de activación (denotada por  $\Phi$ ) en la primera capa oculta (la capa de entrada actúa de intermedio entre las entradas y la *RNA*),  $\bar{h}_{p+1}$  serán los resultados de la función de activación en la capa  $p$ -ésima y  $\bar{o}$  en la capa de salida.

Con respecto a  $W_i$ , se trata de la matriz de pesos sinápticos empleados para ajustar los modelos a la función objetivo, mientras que  $\bar{x}$  se corresponde con los valores de entrada, siendo, de este modo,  $\bar{h}_i$  las salidas en las capas  $i$ -ésimas.

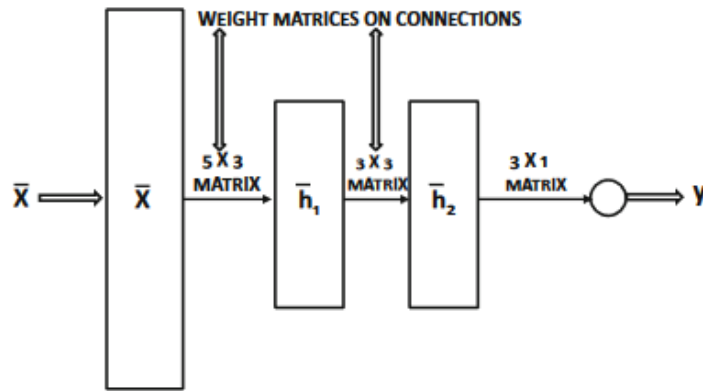


Figura 3.2: Perceptrón Multicapa. Extraído de [2]

Existen diversas funciones de activación entre las que destacan las sigmoideas por ser aplicadas de forma elemental [2].

Tras la propagación de las señales de activación hacia adelante, se calculará el gradiente del error empleando el algoritmo de *Backpropagation*, que utilizará la regla de la cadena del cálculo diferencial para realizar este propósito, de forma que los gradientes calculados se emplearán posteriormente para actualizar los pesos de las conexiones sinápticas.

## Redes Neuronales Recurrentes (*RNN*)

Las redes neuronales convencionales (véase por ejemplo los *MLP*, las redes neuronales de base radial, etc.) están diseñadas para datos multidimensionales cuyos estados actuales son independientes de los pasados. Sin embargo, existen datos que contienen dependencias de valores previos como los datos de series temporales, biológicos o cadenas de texto [2].

Las redes neuronales recurrentes pueden ser empleadas para este tipo de datos y, además, a diferencia de las redes convencionales recibe y procesa las



entradas en el orden de llegada y las trata de igual manera que los instantes anteriores.

Además, en lugar de un número variable de entradas, contienen un número variable de celdas (operaciones sobre los datos de entrada, para obtener las predicciones), y cada una de estas se corresponde con un instante de tiempo, lo que permite a cada una interactuar con otras más cercanas a la salida [2].

Cada una de las celdas realiza operaciones con dos entradas y dos salidas que se calculará en cada instante de tiempo  $t$  como:

$$\begin{aligned} f : \quad \mathbb{R}^{m+n} &\rightarrow \mathbb{R}^{n+l} \\ (x_t, s_{t-1}) &\mapsto (y_t, s_t) \end{aligned} \quad (3.5)$$

Donde  $x_t$  es el vector de entrada de dimensión  $m$  a la celda en el instante  $t$ ,  $y_t$  es el vector de salida de dimensión  $n$  y  $s_t$  es el vector de dimensión  $l$  que representa el estado actual de la red. Estas celdas compartirán los parámetros internos, por lo que la diferencia entre un instante u otro será las entradas a la celda.

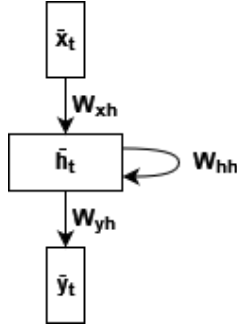


Figura 3.3: Red Neuronal Recurrente.

En la Figura 3.3 puede observarse la representación de una celda de una red recurrente. En esta puede verse cómo dada una secuencia en el instante  $t$ , se produce una salida  $y$  que generará una secuencia en el tiempo compartiendo parámetros (pesos sinápticos) como puede apreciarse en la Figura 3.4.

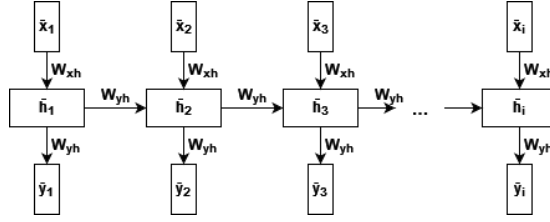


Figura 3.4: Representación de la RNN en el tiempo.

La salida del modelo en un instante de tiempo se calculará, de esta forma cómo [11]:

$$y_t = f(W_{yx}x_t + U_{yy}y_{t-1} + b) \quad (3.6)$$

Donde  $W_{yx}$  son los pesos sinápticos en el instante actual en la celda, mientras que  $U_{yy}$  se trata de los pesos de la conexión recurrente, es decir, depende de la salida del instante anterior. La primera matriz, de esta forma, tendrá un tamaño de  $|x| \cdot |y|$ , mientras que la segunda será de tamaño  $|y| \cdot |y|$ . De manera similar  $|b| = |y|$ , tratándose este del vector de sesgo.

A diferencia del modelo expuesto con anterioridad, las redes neuronales recurrentes no pueden aplicar el algoritmo de retropropagación (*Backpropagation*) directamente, puesto que en este caso las celdas de instantes posteriores se encontrarán directamente conectadas con las anteriores. En este caso se emplea una adaptación conocida como *Backpropagation through time*, que consiste en “desenrollar” la red recurrente, convirtiéndola en una red *feed-forward* y posteriormente aplicar el algoritmo de retropropagación, teniendo en cuenta que dependiendo de los instantes que se consideren como salidas de la red el gradiente puede afectar a un mismo parámetro de la red de forma repetida [11].

## LSTM

Las redes neuronales recurrentes tradicionales pueden encontrar dificultades en capturar y recordar información a largo plazo debido al problema denominado *desvanecimiento del gradiente*, que ocurre cuando los gradientes disminuyen excesivamente a medida que se retropropagan a través del tiempo, produciendo problemas en el aprendizaje a largo plazo.

Para abordar estos problemas, *LSTM* introduce una estructura de memoria adicional denominada celda de memoria que permite al modelo recordar información durante largos periodos de tiempo. Estos modelos emplearán para ello puertas que controlan el flujo de información dentro de estas.

Cada celda en *LSTM* cuenta con tres puertas: la puerta de entrada *Input Gate*, la puerta de salida (*Output Gate*) y la puerta de olvido (*Forget Gate*). La primera decide cuánta información nueva debe agregar a la memoria, la segunda cuánta transmitir como salida y la tercera cuánta información antigua se debe de descartar.

En las celdas del modelo se calculan 3 funciones:

$$f_t = \sigma(W_f x_t + U_f y_{t-1} + b_f) \quad (3.7)$$

$$i_t = \sigma(W_i x_t + U_i y_{t-1} + b_i) \quad (3.8)$$

$$o_t = \sigma(W_o x_t + U_o y_{t-1} + b_o) \quad (3.9)$$

La función  $f_t$  se corresponde con la puerta de olvido (*Forget Gate*), mientras que  $i_t$  con la compuerta de entrada (*Input Gate*) y  $o_t$  con la de salida (*Output Gate*).

De esta manera, cada una de estas empleará dos matrices de pesos diferentes ( $W$  y  $U$ ) en cada caso, que se compartirán en distintos instantes de tiempo.

Con los valores de las compuertas, posteriormente se calcula un candidato de la cantidad de información a añadirse:

$$\tilde{c}_t = \tanh(W_c x_t + U_c y_{t-1} + b_c) \quad (3.10)$$

Finalmente, el estado de la red se actualiza siguiendo la ponderación:

$$c_t = f_t \odot c_{t-1} + i_t \odot \tilde{c}_t \quad (3.11)$$

Una vez calculado el nuevo estado, se emplea la puerta de salida, junto con la tangente hiperbólica del nuevo estado oculto de la celda para obtener la nueva salida de la celda:

$$y_t = o_t \odot \tanh(c_t) \quad (3.12)$$

En la Figura 3.5 puede observarse el diagrama con las operaciones mencionadas para producir la salida de la celda en el modelo *LSTM*.

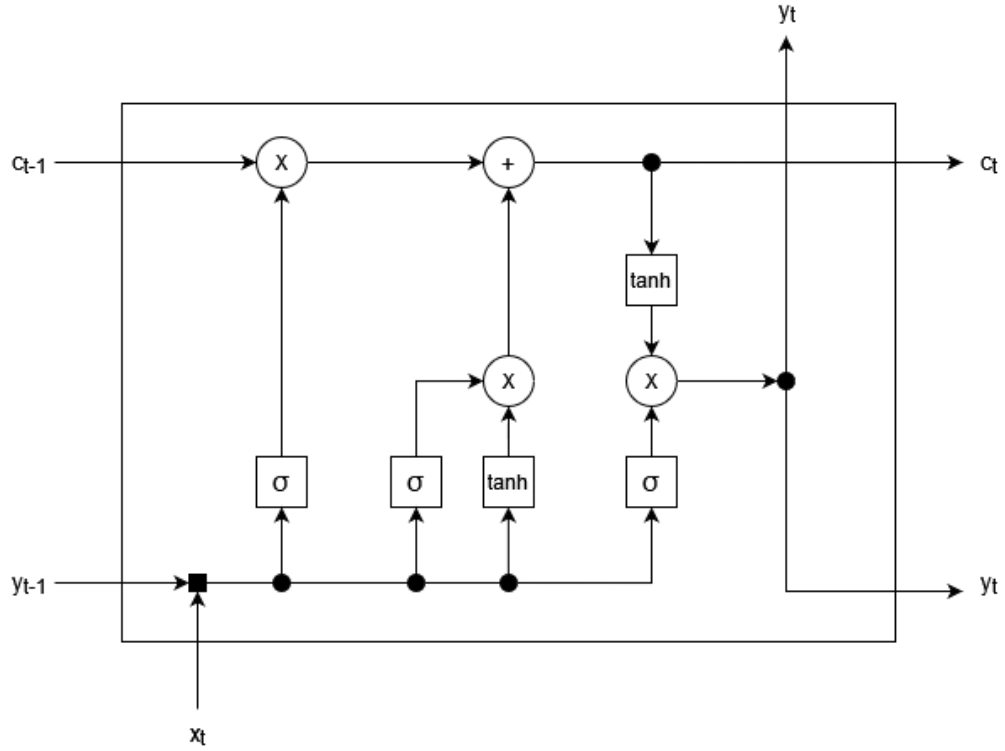


Figura 3.5: Celda de memoria de LSTM

## GRU

A diferencia de *LSTM*, este modelo contará con dos compuertas en lugar de tres. Estas serán la puerta de *reset* y la de actualización.

Al igual que antes, los valores en la salida de la puerta se calculan de forma similar, con matrices de pesos diferentes en cada caso. La puerta de actualización se calcula entonces como:

$$z_t = \sigma(W_z x_t + U_z y_{t-1} + b_z) \quad (3.13)$$

De forma análoga la puerta de *reset* se obtiene con la fórmula:

$$r_t = \sigma(W_r x_t + U_r y_{t-1} + b_r) \quad (3.14)$$

De nuevo se calcula la información candidata a añadirse a la memoria:

$$\tilde{c}_t = \tanh(W_c x_t + U_c (r_t \odot y_{t-1}) + b_c) \quad (3.15)$$

Por último, se calcula el nuevo estado de la celda empleando una media ponderada entre el estado anterior y la nueva información:

$$c_t = (1 - z_t) \odot y_{t-1} + z_t \odot \tilde{c}_t \quad (3.16)$$

Los modelos *GRU* se contemplan como una simplificación de *LSTM*, en la que se fusionan los estados con la respuesta de la red y se fuerza para que estos sean una media ponderada, llevando a obtener resultados similares que con las redes mencionadas [11].

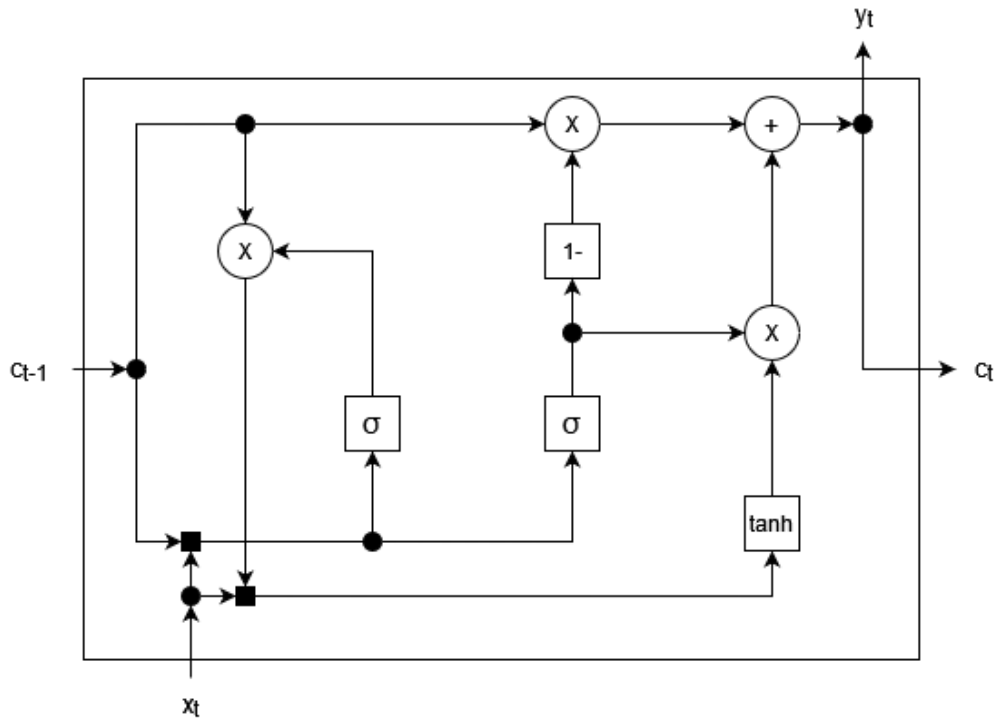


Figura 3.6: Celda de memoria de GRU



---

## Técnicas y herramientas

---

### 4.1. Metodologías

#### Scrum

La metodología *Scrum* es un marco de trabajo de desarrollo ágil de software iterativo (dividido en líneas de tiempo denominados *sprints*) e incremental, que surge como antítesis a la gestión de proyectos predictiva (centrada en la planificación, presupuestos y los plazos de entrega) [12, 13].

### 4.2. Control de versiones

El control de versiones se realizará mediante **Git** puesto que, a diferencia de otras herramientas de control de versiones, provee de una administración del repositorio distribuida en lugar de centralizada, lo que permite a los desarrolladores tener un clon del repositorio en su equipo local [14].

### 4.3. Alojamiento del repositorio

Para el *hosting* del repositorio se ha barajado emplear: **GitHub**, **Bitbucket**, **GitLab**.

Se ha optado por emplear **GitHub** debido a la facilidad de uso que ofrece y las múltiples funcionalidades disponibles, sumado a la destreza adquirida durante el desarrollo del grado con esta plataforma de alojamiento de repositorios.

## 4.4. Gestión del proyecto

Para la gestión del proyecto se ha considerado emplear [ZenHub](#), por su integración completa con GitHub.

Esta herramienta proporciona un *canvas* que permite gestionar las tareas (*issues*) en el *sprint* ordenándolas en columnas según sea su estado y priorizándolas según se encuentren en esta, además de permitir una estimación de su duración, asignar su desarrollo a uno o más desarrolladores e indicar el *milestone* y el *sprint* al que pertenecen las tareas.

## 4.5. Comunicación

La comunicación durante desarrollo del proyecto se realiza vía e-mail, debido a la rapidez, versatilidad y facilidad de la comunicación, además de la familiaridad de las partes con el medio de comunicación.

Para las tutorías telemáticas se escogió emplear [Microsoft Teams](#) por la existencia de forma predefinida de una cuenta de usuario de la Suite Office de Microsoft proporcionada por la Universidad.

## 4.6. Entorno de desarrollo

Debido a la flexibilidad que aporta Visual Studio Code (editor de texto bajo licencia MIT desarrollado por Microsoft [15]) gracias a el entorno proporcionado de forma nativa y a las extensiones disponibles de Microsoft y terceros, se ha optado por emplearlo para el desarrollo de los scripts de Python, los Python Notebooks, la documentación del repositorio en Markdown y la realización de la memoria en LaTeX.

En cuanto al intérprete Python se ha empleado [Python 3.9.13](#) mediante un entorno virtual que permite instalar las dependencias sin modificar el entorno base.

En lo referente a la compilación de los ficheros LaTeX, se ha optado por emplear MikTeX debido a la facilidad de actualización e instalación de dependencias. Para la integración del compilador de LaTeX con Visual Studio Code se emplea [LaTeX Workshop](#), puesto que permite la compilación automática al guardar los cambios en los ficheros sin realizar ninguna configuración explícita.



## 4.7. Creación de diagramas

Para la creación de diagramas en la memoria y anexos se ha empleado `diagrams.net` (anteriormente denominada `draw.io`), puesto que se trata de una herramienta gratuita y de código abierto que puede emplearse de forma *on-line* [16].

Además, permite exportar a diferentes formatos como PNG, JPEG, SVG y PDF.

## 4.8. Librerías

### Pandas

*Pandas* es una herramienta de análisis de datos escrita en Python que ofrece estructuras de datos y operaciones para manipular tablas numéricas y series temporales [17].

### Tensorflow

*Tensorflow* es una librería de código abierto para aprendizaje automático desarrollada por Google [18].

En concreto se ha optado por emplear su *API*: *Keras*, debido a su modularidad y extensibilidad [19].

### Matplotlib

*Matplotlib* es una librería para generar gráficos bidimensionales en Python a partir de diferentes estructuras de datos como listas [20].

### Json

El módulo JSON de Python proporciona una *API* (interfaz de programación de aplicaciones) para manejar objetos en formato JSON (*JavaScript Object Notation*) [21].

### Os

El módulo OS de Python proporciona una manera portable de emplear la funcionalidad del sistema operativo [22].

## Statsmodel

Módulo que proporciona diferentes clases y funciones de distintos modelos estadísticos [23].

## 4.9. Restful API

Para obtener los datos meteorológicos de la zona en la que se sitúa el viñedo y poder realizar la comparación con las muestras obtenidas en el pluviómetro desplegado se han estudiado diferentes opciones:

- [OpenWeatherMap](#)
- [Weatherbit](#)
- [AEMET OpenData](#)

Todas las opciones requieren de una petición al servidor mediante HTTPS o HTTP, sin embargo, en el primer caso a pesar de que se muestran los datos en una frecuencia de una hora, el limitante se encuentra en que solo permite recuperar hasta un año atrás. En el segundo caso los requerimientos se cumplen al completo, pero tras contactar con el soporte de la *API* no hay respuestas que permitan el acceso al *endpoint* correspondiente.

Finalmente, la última opción proporciona datos históricos sin límite, la contraparte es que la estación meteorológica consultada se encuentra en Aranda de Duero y se tratan de datos diarios.

---

# Aspectos relevantes del desarrollo del proyecto

---

En este apartado se describirán los aspectos más importantes surgidos a partir del desarrollo del proyecto, estos incluyen las complicaciones encontradas, así como las decisiones tomadas para solucionar todos los problemas surgidos y sus implicaciones. Para una especificación más concreta de las situaciones presentadas pueden consultarse los anexos del proyecto correspondientes.

La sección se orientará siguiendo una estructura parecida a la introducida en *Conceptos teóricos*, es decir, desarrollando los aspectos relevantes según la fase del proyecto en la que se produjo.

## 5.1. Inicio del Proyecto

Una de las motivaciones que se tuvo en cuenta para el desarrollo del proyecto fue la cercanía del tema tratado con el lugar que se desarrolló. Y es que la provincia de Burgos se encuentra en la denominación de origen “Ribera del Duero”, una de las regiones que cuenta con algunos de los mejores vinos del mundo [24].

Otro impulso que llevó a realizar el Trabajo Final de Grado con este tema fue, de igual forma, la importancia del vino en la familia, pues el sustento de parte de esta es gracias a la viticultura, además de la historia e importancia de la cultura del vino en el todo el territorio español.

Tras contactar con los docentes, se proporcionó el conjunto de datos empleado en el proyecto. En estas conversaciones iniciales se consideró que

estos contaban con ciertas características que debían tenerse en cuenta: en primer lugar, los presentaban valores faltantes debidos a la posible desconexión de los sensores de la red, lo que provocaba que estos dejaran de enviar datos al servidor. Por otro lado, las labores del campo podían haber afectado a la calidad de estos por la extracción de las sondas de los sensores de sus posiciones originales.

Además, el pluviómetro instalado en un origen se encontraba anclado de forma débil, lo que propiciaba que el viento produjera lecturas erróneas en el movimiento del balancín empleado en el registro de las precipitaciones.

Tras estas reuniones se inició el proceso de la comprensión del negocio, es decir, se comenzó con la definición de los objetivos del proyecto y los requisitos. Simplificando lo mencionado en la introducción y los objetivos, la finalidad era analizar los datos proporcionados (centrándose en la temperatura y humedad) realizando las visualizaciones pertinentes y encontrar modelos predictivos que intenten anticipar la evolución a corto plazo empleando diferentes técnicas como las Redes Neuronales Artificiales.

## 5.2. Fase de preparación de los datos

En la fase de preparación se determinó que los datos proporcionados contaban con diferentes situaciones. En algunos de los sensores la calidad de estos era bastante adecuada a pesar de contar con valores faltantes, en otros, en cambio, existían numerosos problemas.

Por un lado, contaban con valores extremos que debían tenerse en cuenta para que los modelos que se desarrollasen no encontraran problemas al generalizar, desviándose de ese propósito por el posible ruido introducido. Para solucionar este problema se empleó el mecanismo de detección de *outliers* mediante el rango intercuartílico, sustituyendo los datos identificados como extremos con la mediana del día en el que se realizó la muestra.

Por otro lado, algunos de los sensores contaban con valores matemáticamente correctos (dentro de límites lógicos de las diferentes variables) pero que contextualmente eran incorrectos. Un ejemplo de esto eran las lecturas artificiales de distintas variables como la temperatura cuando el nivel de la batería de los sensores caía por debajo de 3,3V, lo que provocaba un desbordamiento de la variable en el controlador correspondiente.

Ante esta situación se decidió eliminar aquellas muestras cuyo nivel de batería se encontrara por debajo del mencionado y por encima de los 4,1V (el máximo). Sin embargo, tras realizar esta operación se observó que ciertas

muestras continuaban siendo contextualmente incorrectas arrojando datos inverosímiles (bajadas de temperaturas y/o humedades extremas en periodos de tiempo cortos) debidas en gran medida, como se confirmó posteriormente, a la extracción de las sondas de la situación original, por lo que se acordó con los docentes la eliminación de estos valores que continuaban siendo erróneos.

El proceso se realizó a mano teniendo en cuenta las situaciones localizadas con anterioridad y con las nuevas necesidades, marcando en los diferentes ficheros la validez de la entrada (cabe destacar que la recuperación de estos datos no era viable por las condiciones en la que se encontraban, puesto que el lapso temporal era demasiado elevado).

Además de estas condiciones, algunos de los sensores contaban con muestras con discontinuidades inexplicables mediante los datos, por lo que se acordó el intento de la recuperación de estos. Para ello, se observaron los muestreos de los sensores geográficamente más cercanos al afectado, de forma que se pudiera conocer de manera más precisa cuál de las series era la que contaba con la lectura correcta y actuar en consecuencia.

A pesar de que se haya podido introducir algún sesgo debido a la modificación de los valores plasmados en los muestreos, los datos reales serán más cercanos a los nuevos valores asignados que a las lecturas anteriores, es decir, aún si estos fueran incorrectos serían menos incorrectos que anteriormente.

Ante la premura de los plazos del proyecto, realizar de nuevo el muestreo de los datos suficientes para crear un modelo predictivo eficiente no era viable, por lo que se tuvo que trabajar con la cantidad proporcionada.

### 5.3. Fase de creación de modelos

Tras realizar una investigación preliminar acerca de los modelos con mayor precisión en la regresión de series temporales, se llegó a la conclusión de emplear redes neuronales recurrentes con memoria como primer objetivo de modelado, puesto que sobre datos meteorológicos contaban con un buen rendimiento.

Por ese motivo, se escogió utilizar las redes neuronales con memoria a corto y medio plazo como son *GRU* y *LSTM*, empleando los mismos hiperparámetros y, de esta manera, poder realizar una comparativa para tener una idea de cómo se ajustan estos modelos a las diferentes funciones objetivo.

Además, otra opción a emplear fue la tradicional *MLP* para poder observar cómo la linealidad de este modelo (no tiene en cuenta instantes

anteriores) impide obtener unos resultados aceptables en comparación de sus contrapartes recurrentes.

El primer reto consistía en preparar los datos de entrada a la red neuronal y las correspondientes salidas de forma que estos fueran muestras homogéneas sin saltos temporales que impidieran a los modelos ajustarse adecuadamente.

En primer lugar, en un espacio de 10 minutos se podían encontrar 2 o 3 muestras según fuera el *offset* del controlador de muestreos de los sensores. Además, como en la fase de preparación de los datos se realizaron descartes, se generaron, de esta manera, saltos temporales que podían afectar a la predicción de la tendencia.

Una solución fue recorrer el conjunto de datos del sensor con una ventana deslizante del tamaño equivalente a las instancias de entrada (establecido por parámetro) y el dato de salida (se realizó una aproximación preliminar realizando una única predicción, que posteriormente se modificó para que los modelos fuesen capaces de realizar varias), de esta forma en ventanas en las que no había datos suficientes para la entrada se descartaban.

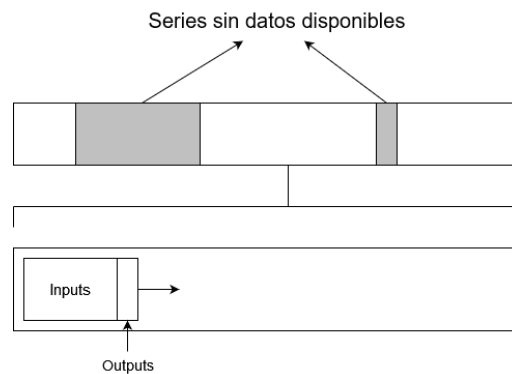


Figura 5.1: Esquema del proceso de preparación de datos

Cabe destacar que inicialmente se emplearon todos los datos para entrenamiento y validación, no estableciendo el conjunto de test, lo que fue modificado más tarde añadiendo el tercer conjunto, permitiendo reducir el sesgo en la evaluación del modelo, pues, a diferencia de las instancias de validación, se tratan de datos que no han sido empleados por el modelo tanto para ser entrenado como validado.

Tras la preparación de los datos de entrada de la red se comenzó a realizar el modelo *GRU*, de forma que se debían establecer sus capas y las celdas en estas. Posteriormente se realizaron los modelos *LSTM* y *MLP*. Para agilizar

la construcción y verificar su funcionamiento se estableció inicialmente 3 capas en todos ellos, con 36, 16 y 8 unidades sucesivamente.

A diferencia de los dos primeros, *MLP* requería de una ligera modificación, puesto que no aceptaba secuencias, por lo que se estableció una neurona de entrada por cada valor en la serie de tiempo y de igual forma una neurona en la capa de salida por cada predicción.

## 5.4. Fase de evaluación de modelos

En la fase de evaluación se estableció realizar pruebas sobre los modelos modificando ciertos hiperparámetros como el número de capas ocultas, el número de unidades (celdas o neuronas dependiendo del contexto) por capa, el ratio de aprendizaje y el número de predicciones que se realizan por cada dato de entrada.

De esta forma, los modelos empleados tendrán las especificaciones estándar en el caso de *GRU* y *LSTM*, modificando la función de activación de las neuronas en las capas ocultas en *MLP* por una función *ReLU* (Figura 5.2), que aportará la no linealidad al modelo, lo que previsiblemente mejoraría el rendimiento concreto con los datos empleados.

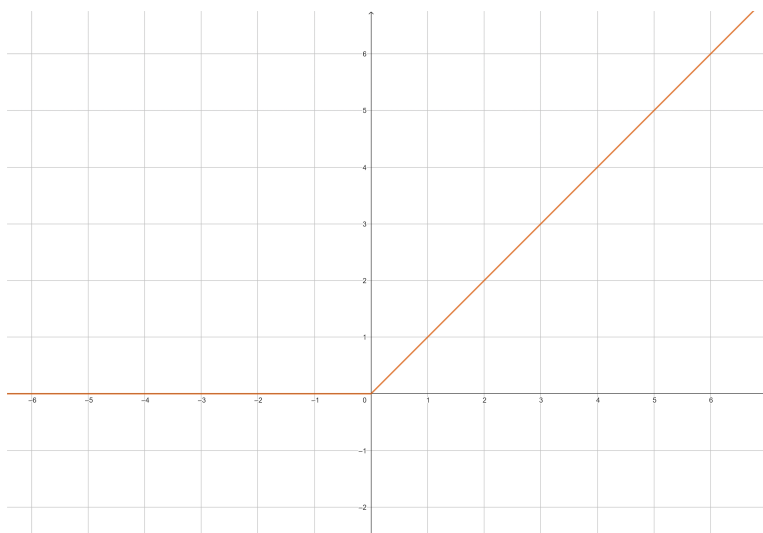


Figura 5.2: Función ReLU

Se realizarán, entonces, combinaciones con diferentes valores:

- Capas: 1, 2 y 3 capas.

- Tamaño de capa: 8, 16 y 32 celdas/neuronas.
- Ratio de aprendizaje: 0.1, 0.01 y 0.001.
- Número de ejemplos de salida: 1, 2 y 3 predicciones.

Por otro lado, para agilizar el proceso de las pruebas y el entrenamiento, se acordó emplear alguna plataforma que permitiera la ejecución paralelizada, haciendo hincapié en tecnologías como Google Colab o CUDA.

En el primer caso, la ejecución no requería de mayor preocupación de cara al usuario, más allá de realizar un par de configuraciones básicas en los entornos. En el segundo caso, sin embargo, se optó por emplear Docker para crear los contenedores proporcionados por TensorFlow para crear el entorno que permitiera la ejecución de los entrenamientos de forma paralela, siendo, de esta manera, una solución portable y fácil de instalar en cualquier máquina.

Los resultados finales se encuentran detallados en los anexos del proyecto, siendo la siguiente información un resumen de las pruebas realizadas.

La Figura 5.3 y 5.4 muestra una comparativa de los resultados promedio obtenidos con diferentes valores de ratio de aprendizaje (0.1, 0.01 y 0.001). En ella se puede observar que se obtienen mejores resultados por término medio con un ratio de aprendizaje de 0.01, siendo los modelos de 1 predicción por entrada los que generalmente obtienen errores menores.



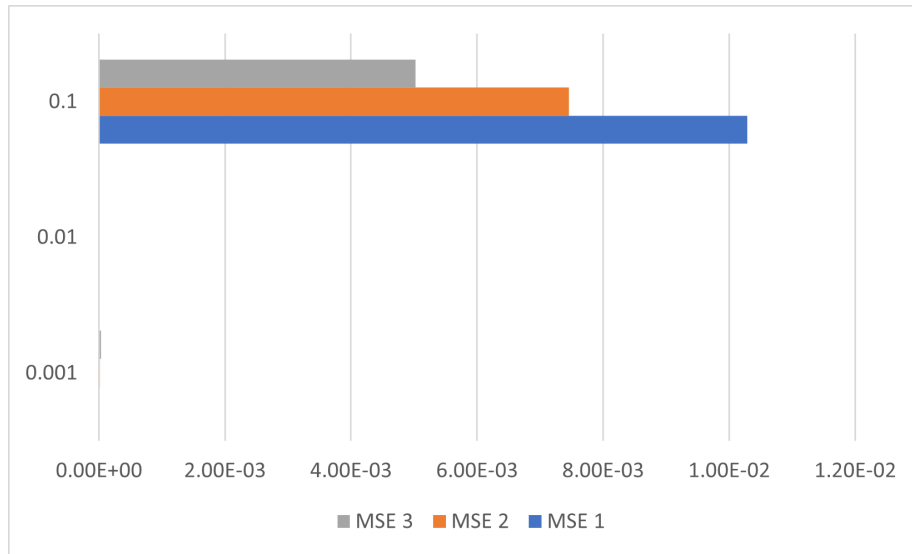


Figura 5.3: Comparativa de ratio de aprendizaje para GRU

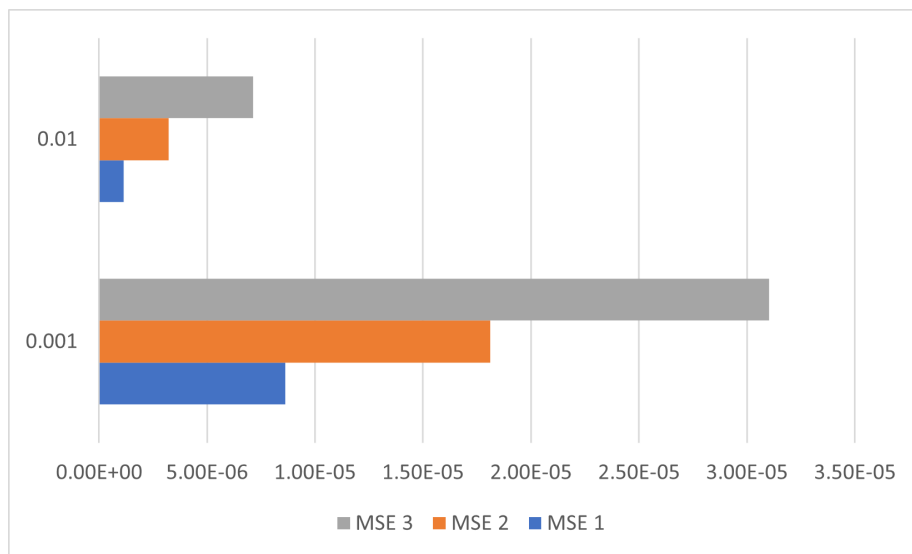


Figura 5.4: Comparativa de ratio de aprendizaje para GRU (0.01 y 0.001)

En la Figura 5.5 se presentan, de igual forma, los resultados de los modelos obtenidos con la arquitectura *LSTM*, dónde puede observarse que para 0.01 de ratio de aprendizaje se obtienen los modelos con mayor precisión por término medio con 1 y 2 predicciones por entrada. Siendo, de esta forma,

la configuración de 1 predicción la que menores errores arroje en promedio en comparación con el resto de parámetros (Figura 5.6).

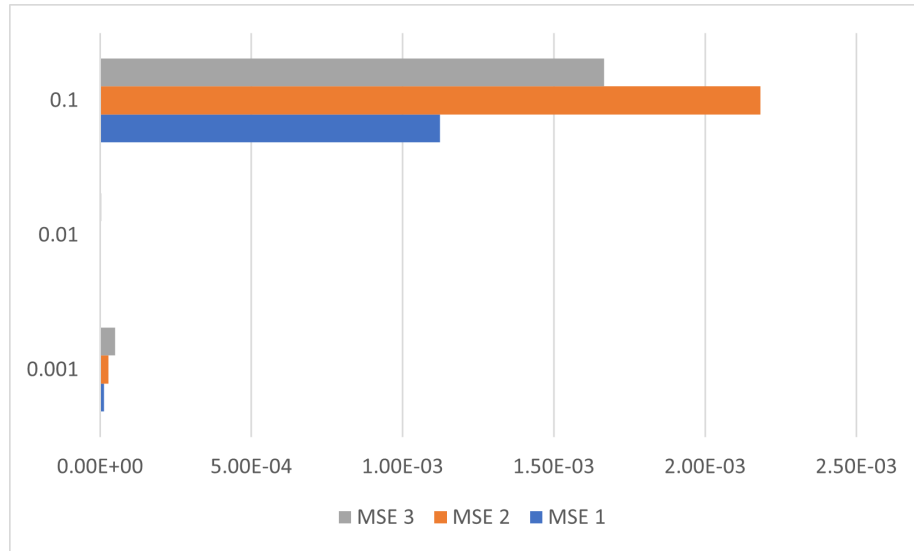


Figura 5.5: Comparativa de ratio de aprendizaje para GRU

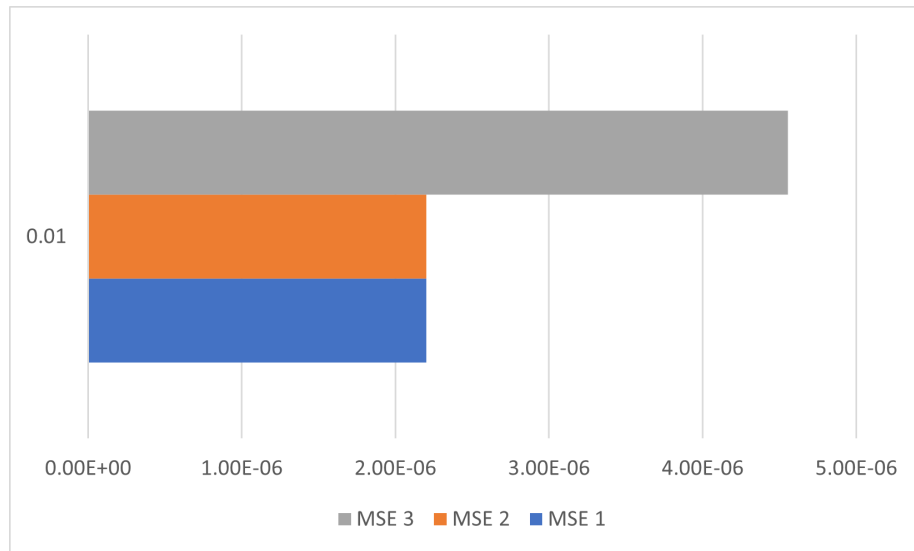


Figura 5.6: Comparativa de ratio de aprendizaje para LSTM (0.01)

Por otro lado, la Figura 5.7 puede observarse que el ratio de aprendizaje tiene una aparente mayor influencia sobre los resultados, siendo la confi-

guración de 0.001 la que menores errores por término medio proporcionan.

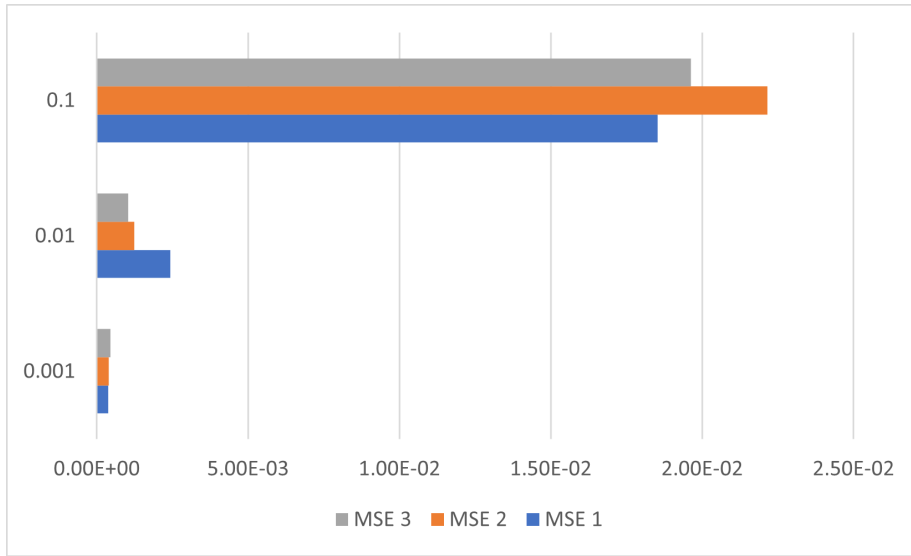


Figura 5.7: Comparativa de ratio de aprendizaje para LSTM (0.01)

De este modo, se puede realizar también una comparativa de las combinaciones obtenidas de forma individual, puesto que aunque en término medio los modelos *LSTM* parecen obtener resultados más precisos, los resultados con los errores cuadráticos medios más bajos se han obtenido con arquitecturas *GRU*.

La Tabla 5.1 muestra los menores errores cuadráticos medios promedio (de las 5 ejecuciones por cada una de las combinaciones) junto con el modelo al que se corresponde el dato.

Capas	Tamaño capa	LR	Modelo con menor error
1	8	0.001	GRU (1.72183E-05)
1	8	0.01	GRU (3.37952E-06)
1	8	0.1	LSTM (3.9049E-06)
1	16	0.001	GRU (9.1907E-06)
1	16	0.01	GRU (9.55771E-07)
1	16	0.1	LSTM (0.00138)
1	32	0.001	GRU (4.50204E-06)
1	32	0.01	GRU ( <b>5.96471E-07</b> )
1	32	0.1	LSTM (9.51891E-07)
2	8	0.001	GRU (1.56769E-05)
2	8	0.01	GRU (1.65277E-06)
2	8	0.1	LSTM (6.85972E-06)
2	16	0.001	GRU (5.07987E-06)
2	16	0.01	GRU ( <b>5.66822E-07</b> )
2	16	0.1	LSTM (6.65626E-06)
2	32	0.001	GRU (2.18717E-06)
2	32	0.01	GRU ( <b>2.69205E-07</b> )
2	32	0.1	LSTM (4.20038E-06)
3	8	0.001	LSTM (4.58400E-06)
3	8	0.01	GRU (1.42658E-06)
3	8	0.1	LSTM (5.90159E-06)
3	16	0.001	GRU (5.18860E-06)
3	16	0.01	GRU ( <b>4.66034E-07</b> )
3	16	0.1	LSTM (1.02880E-05)
3	32	0.001	GRU (0.01457)
3	32	0.01	LSTM (6.54021E-07)
3	32	0.1	LSTM (0.00491)

Tabla 5.1: Tabla comparativa de modelos

Como puede observarse en la Figura 5.8, los modelos con menor error para las combinaciones probadas se obtendrán en mayor frecuencia con arquitecturas *GRU*.

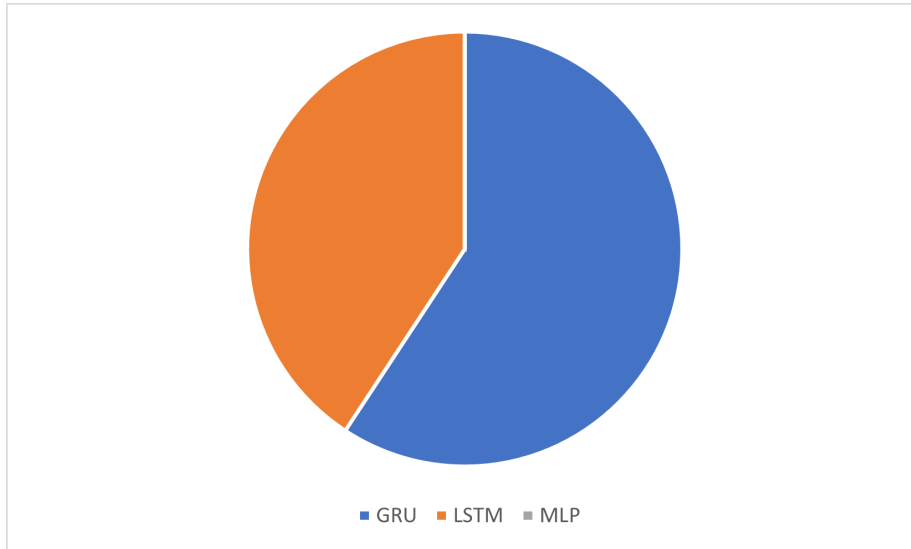


Figura 5.8: Comparativa de frecuencias de menor error en combinaciones.



---

## Trabajos relacionados

---

En esta sección se introducirán los trabajos que guardan relación con el proyecto desarrollado, es decir, aquellos cuyo objetivos, técnicas y modelos sean similares.

Y es que, como se ha comentado en la introducción, la optimización de recursos hídricos en los últimos años ha crecido en importancia debido principalmente a la escasez de precipitaciones por el cambio climático, lo que provoca que las horas y cantidad de riego disminuyan en todo el territorio español, especialmente en las zonas del sur de la Península Ibérica [25, 26].

### 6.1. *Weather forecasting model using Artificial Neural Network*

En este artículo publicado en 2012 se presenta un método de predicción del tiempo atmosférico empleando modelos neuronales *feed-forward* con retropropagación, de forma que se busca explorar la importancia de las redes neuronales artificiales y sus componentes unitarios.

Se experimenta, entonces, cómo incrementa el rendimiento al aumentar el número de neuronas, el número de capas ocultas del modelo y se presentan las conclusiones de integrar ambas decisiones del diseño. En esta ocasión se emplean en los datos variables de temperatura (máximos y mínimos), así como velocidades diarias del viento [27].

## 6.2. *Humidity forecasting in a potato plantation using time-series neural models*

En el año 2022 el Grupo de Inteligencia Computacional Aplicada (GICAP) y el Composting Research Group (UBUCOMP) de la Universidad de Burgos publican un artículo dónde presentan un mecanismo de control de irrigación de una plantación de patatas en la localidad de Cobia en la provincia de Burgos.

En este trabajo se muestrean diversas variables del suelo como la temperatura del aire, las precipitaciones, la altura y anchura de las plantas, el porcentaje de humedad y su contenido en nitrógeno entre otros valores, para, de este modo, predecir la necesidad de realizar o no la irrigación de la plantación y optimizar los recursos hídricos.

En este artículo se propone emplear diferentes tipos de interpolación como técnica básica para comparar resultados y varios modelos neuronales como métodos de refinado de predicciones de las series de tiempo. Se utilizarán, de esta forma, los modelos *Non-linear Input-Output (NIO)*, *Non-linear Autoregressive with Exogenous Input (NARX)* y *Non-linear Autoregressive (NAR)* [28].

## 6.3. *BMAE-Net: A Data-Driven Weather Prediction Network for Smart Agriculture*

En este artículo publicado en 2023 se presenta un método de predicción de cambios de series de tiempo meteorológicas basadas en *encoders* y *decoders* de atención multicabezal [29] optimizados mediante estrategias de inferencia bayesiana.

Este mecanismo permite diseñar una novedosa estructura neuronal que mejora el rendimiento de compatibilidad para predicciones de distinta duración [29].

Se emplean, de esta manera, diferentes componentes; uno de ellos es un módulo bayesiano-GRU, utilizado para muestrear los pesos de la red con una distribución de probabilidad y optimizar sus parámetros, en lugar de establecer un peso concreto en la modelo neuronal.



Además, cuenta con un módulo de atención multicabeza bayesiano, que se encarga de la predicción de los diferentes intervalos y mejora la capacidad de extracción de características.



---

# Conclusiones y Líneas de trabajo futuras

---

En esta sección se presentan las conclusiones derivadas del desarrollo del trabajo, así como las líneas de trabajo futuras con las que se podría dar continuidad al proyecto.

## 7.1. Conclusiones

En lo referente a los aspectos generales del desarrollo del proyecto, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Los objetivos del proyecto se han llevado a término de forma correcta, cumpliendo, por otro lado, los requisitos impuestos durante el desarrollo de este. La predicción de los valores futuros de la serie temporal es funcional y arroja errores que pueden calificarse como aceptables en ciertos modelos y con los datos proporcionados.
- Las entradas y salidas de los modelos se han parametrizado, de modo que puedan variarse el número de ejemplares utilizados para las predicciones o la propia cantidad de valores futuros. Por otro lado, también es posible modificar otros parámetros como el ratio de aprendizaje, las épocas o el tamaño del lote de entrenamiento.
- Además de parametrizar aspectos del diseño de los modelos, se permite variar la cantidad de datos con la que se entrenan, validan y comprueban, de forma que el proceso llevado a cabo durante el desarrollo pueda emplearse en trabajos futuros o en posibles cambios de diseño en el *KDD*.

- Durante el proyecto se han empleado diferentes librerías para diversos propósitos, como Pandas en el caso de la manipulación de grandes conjuntos de datos o Keras para realizar los distintos modelados, así como módulos nativos del lenguaje de programación empleado.
- A pesar del incidente surgido con el sistema de gestión del proyecto ZenHub, se ha profundizado y continuado en la medida de lo posible con la aplicación de las metodologías ágiles en el desarrollo de proyectos, utilizando como proceso de desarrollo los incrementos iterativos (*sprint*) cada dos semanas.
- La investigación llevada a cabo permite mejorar los procesos y los conocimientos adquiridos en la búsqueda de bibliografía y la lectura de artículos científicos de los campos relacionados con el desarrollo.

Respecto a los modelos obtenidos, se puede concluir que para los datos proporcionados y los hiperparámetros empleados, las redes neuronales recurrentes tienen un desempeño mayor que los modelos neuronales convencionales para predicciones de series de tiempo, destacando *GRU* entre los tres del ensayo y siendo la variante de 2 capas, 32 celdas de memoria y un *learning rate* de 0.01 la que mejor precisión proporciona, obteniéndose, de igual forma, mejores resultados en promedio en arquitecturas *LSTM*.

La Tabla 7.1 muestra los 4 mejores resultados por modelo (que se corresponden en todas las situaciones a arquitecturas con una única predicción) junto con el promedio total de los resultados de cada uno.

	GRU	LSTM	MLP
	<b>2.69205E-07</b>	4.56945E-07	5.56436E-06
	4.66034E-07	6.54021E-07	5.57840E-06
	5.66822E-07	6.62421E-07	6.49630E-06
	5.96471E-07	9.51891E-07	6.91262E-06
Promedio Total	2.57000E-03	<b>5.64000E-04</b>	0.00736

Tabla 7.1: Resumen de ejecuciones

## 7.2. Líneas de trabajo futuras

El desarrollo del proyecto podría continuarse con diferentes líneas de trabajo, que por su naturaleza no caben en el planteamiento inicial, ya sea

porque no se han previsto o porque el tiempo de desarrollo es más elevado del disponible.

A continuación se presentan un conjunto de posibles líneas futuras:

- Emplear una combinación de los modelos propuestos en el proyecto con redes convolucionales para introducir una componente espacial en los datos y, de esta forma, ser capaces de predecir valores en una situación concreta del viñedo.
- Emplear los datos de la variación de las precipitaciones para realizar un estudio de la precisión de los modelos con este nuevo atributo. De esta forma, se podría mejorar el rendimiento obtenido en variables como las humedades.
- Para conocer el desempeño de los resultados se puede desarrollar una comparativa de las precisiones con datos extraídos de otros viñedos. De modo que se observaría si los modelos son extrapolables a otras situaciones o si en cambio se tratan de resultados específicos.
- Realizar una integración completa en un producto software de cualquier índole relacionado con la empresa de la que se han extraído los datos, véase, por ejemplo, la automatización de los sistemas de riego instalados. En este ejemplo se desarrollaría un sistema de toma de decisiones basado en los resultados obtenidos con los modelos implementados.
- En lo referente al propio resultado del proyecto, para que los usuarios con menos conocimientos puedan manipular los hiperparamámetros de los modelos, seleccionar los datos deseados y realizar visualizaciones más guiadas de los resultados, podría implementarse una interfaz que ocultara la complejidad del código fuente final.



---

## Bibliografía

---

- [1] I. H. I. H. Witten, *Data mining : practical machine learning tools and techniques*, fourth edition. ed. Amsterdam: Elsevier, 2017.
- [2] C. C. Aggarwal, *Neural networks and deep learning : a textbook*, 1st ed. Cham: Springer International Publishing, 2018.
- [3] J. Piqueras, *Historia de la vid y el vino en España edades Antigua y Media*. Valencia: Univeritat de València, 2014, ch. 1.
- [4] Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, “El cultivo de la vid en españa,” [Online; Accedido 20-marzo-2023]. [Online]. Available: <https://www.mapa.gob.es/es/ministerio/archivos-biblioteca-mediateca/archivos/Cultivo.aspx>
- [5] Mundi-Prensa, *Los parásitos de la vid estrategias de protección razonada*, 5th ed. Madrid: Mundi-Prensa, 2004, ch. 1, pp. 17–18.
- [6] —, *Los parásitos de la vid estrategias de protección razonada*, 5th ed. Madrid: Mundi-Prensa, 2004, ch. 3, p. 66.
- [7] I. Z. L. Zúñiga, *Meteorología y climatología*, Ed. digital act.: sept. de 2021 ed., ser. Grado. Madrid: Universidad Nacional de Educación a Distancia, 2021, ch. 11, pp. 194, 216.
- [8] G. Hernández, “Repositorio del Trabajo Fin de Grado ‘Análisis de datos de temperatura y humedad de suelo procedentes de sensores IoT desplegados en un viñedo’ por Gabriel Hernández Vallejo.” [Online]. Available: <https://github.com/GabiHV/TFG22-23>
- [9] J. Hernández Orallo, *Introducción a la minería de datos*. Madrid: Pearson Educación, 2004, ch. 4.

- [10] Wikipedia, “Filtro de hodrick-prescott — wikipedia, la enciclopedia libre,” 2023, [Internet; descargado 3-febrero-2023]. [Online]. Available: [https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Filtro\\_de\\_Hodrick-Prescott&oldid=149041721](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Filtro_de_Hodrick-Prescott&oldid=149041721)
- [11] A. Bosch Rueé, *Deep learning : principios y fundamentos*, primera edición en lengua castellana ed., ser. Manuales (Tecnología). Barcelona: Editorial UOC, 2019 - 12??
- [12] Wikipedia contributors, “Scrum (software development) — Wikipedia, the free encyclopedia,” 2023, [Online; accessed 24-March-2023]. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Scrum\\_\(software\\_development\)&oldid=1144400875](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Scrum_(software_development)&oldid=1144400875)
- [13] M. Palacio, *Scrum Master*. Iubaris Info 4 Media SL, 2021, ch. 1, p. 11.
- [14] S. F. Conservancy, “About - git,” 2023. [Online]. Available: <https://git-scm.com/about/distributed>
- [15] Wikipedia contributors, “Visual studio code — Wikipedia, the free encyclopedia,” 2023, [Online; accessed 24-March-2023]. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Visual\\_Studio\\_Code&oldid=1145496466](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Visual_Studio_Code&oldid=1145496466)
- [16] —, “Diagrams.net — Wikipedia, the free encyclopedia,” 2023, [Online; accessed 30-May-2023]. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Diagrams.net&oldid=1142089111>
- [17] Wikipedia, “Pandas (software) — wikipedia, la enciclopedia libre,” 2023, [Internet; descargado 24-marzo-2023]. [Online]. Available: [https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Pandas\\_\(software\)&oldid=148434974](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Pandas_(software)&oldid=148434974)
- [18] —, “Tensorflow — wikipedia, la enciclopedia libre,” 2021, [Internet; descargado 24-marzo-2023]. [Online]. Available: <https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=TensorFlow&oldid=139184038>
- [19] —, “Keras — wikipedia, la enciclopedia libre,” 2022, [Internet; descargado 25-marzo-2023]. [Online]. Available: <https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Keras&oldid=148156962>
- [20] —, “Matplotlib — wikipedia, la enciclopedia libre,” 2022, [Internet; descargado 24-marzo-2023]. [Online]. Available: <https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Matplotlib&oldid=146868590>



- [21] P. S. Foundation, “json — json encoder and decoder,” 2023. [Online]. Available: <https://docs.python.org/3/library/json.html#module-json>
- [22] —, “os — miscellaneous operating system interfaces,” 2023. [Online]. Available: <https://docs.python.org/3/library/os.html?highlight=os#module-os>
- [23] J. T. Josef Perktold, Skipper Seabold, “statsmodels 0.14.0,” 2023. [Online]. Available: <https://www.statsmodels.org/stable/index.html>
- [24] ABC.es, “Dos vinos de la ribera del duero entre los ‘7 magníficos’ del mundo,” Sep 2021. [Online]. Available: [https://www.abc.es/viajar/noticias/abci-vinos-ribera-duero-entre-7-magnificos-mundo-202109160047\\_noticia.html](https://www.abc.es/viajar/noticias/abci-vinos-ribera-duero-entre-7-magnificos-mundo-202109160047_noticia.html)
- [25] Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. [Online]. Available: <https://www.mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/gestion-sostenible-regadios/plan-nacional-regadios/texto-completo/>
- [26] —. [Online]. Available: [https://www.mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/gestion-sostenible-regadios/apartado4-9\\_tcm30-150011.pdf](https://www.mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/gestion-sostenible-regadios/apartado4-9_tcm30-150011.pdf)
- [27] K. Abhishek, M. Singh, S. Ghosh, and A. Anand, “Weather forecasting model using artificial neural network,” *Procedia Technology*, vol. 4, pp. 311–318, 2012, 2nd International Conference on Computer, Communication, Control and Information Technology (C3IT-2012) on February 25 - 26, 2012. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221201731200326X>
- [28] M. E. d. Yartu González, C. Cambra Baseca, M. Navarro González, J. C. Rad Moradillo, A. Arroyo Puente, and A. Herrero, “Humidity forecasting in a potato plantation using time-series neural models,” 2022-03.
- [29] J.-L. Kong, X.-M. Fan, X.-B. Jin, T.-L. Su, Y.-T. Bai, H.-J. Ma, and M. Zuo, “Bmae-net: A data-driven weather prediction network for smart agriculture,” *Agronomy*, vol. 13, no. 3, 2023. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2073-4395/13/3/625>