



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

Modelo matemático para la predicción del crecimiento del *Brassica oleracea* var, *itálica* (brócoli) en el invernadero 1, de la Finca Freire del cantón Latacunga basado en redes neuronales.

JESSICA NATALY CASTILLO FIALLOS

Trabajo de Titulación modalidad: Proyectos de Investigación y Desarrollo, presentado ante el Instituto de Posgrado y Educación Continua de la ESPOCH, como requisito parcial para la obtención del grado de:

**MAGÍSTER EN MATEMÁTICA MENCIÓN MODELACIÓN Y
DOCENCIA**

Riobamba – Ecuador

Agosto- 2022

©2022, Jessica Nataly Castillo Fiallos

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

EL TRIBUNAL DE TRABAJO DE TITULACIÓN CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo, titulado: **Modelo matemático para la predicción del crecimiento del *Brassica oleracea var, itálica* (brócoli) en el invernadero 1, de la Finca Freire del cantón Latacunga basado en redes neuronales.**, de responsabilidad de la señorita Jessica Nataly Castillo Fiallos, ha sido prolijamente revisado y se autoriza su presentación.

Tribunal:

Dr. Juan Mario Vargas Guambo; Mag.

PRESIDENTE

Dr. José Rigoberto Muñoz Cargua; Mag.

DIRECTOR

Ing. Cristian Luis Inca Balseca; Msc.

MIEMBRO

Ing. Ángel Patricio Mena Reinoso; Mag.

MIEMBRO



Firmado digitalmente por:
**JUAN MARIO
VARGAS GUAMBO**

FIRMA



Firmado digitalmente por:
**JOSE RIGOBERTO
MUNOZ CARGUA**

FIRMA

**CRISTIAN
LUIS INCA
BALSECA**

Firmado digitalmente
por CRISTIAN LUIS
INCA BALSECA
Fecha: 2022.08.01
18:30:01 -05'00'

FIRMA

**ANGEL
PATRICIO
MENA REINOSO**

Firmado digitalmente
por ANGEL PATRICIO
MENA REINOSO
Fecha: 2022.08.01
10:34:55 -05'00'

FIRMA

Riobamba, agosto 2022

DERECHOS INTELECTUALES

Yo, Jessica Nataly Castillo Fiallos, declaro que soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en el **Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo**, y que el patrimonio intelectual generado por la misma pertenece exclusivamente a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.



Firma electrónicamente por:
**JESSICA NATALY
CASTILLO
FIALLOS**

Jessica Nataly Castillo Fiallos
C.I. 060459021-6

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Yo, Jessica Nataly Castillo Fiallos, declaro que el presente Trabajo de **Titulación modalidad proyectos de investigación y desarrollo**, es de mi autoría y que los resultados del mismo proyecto son auténticos y originales los textos constan en el documento que provienen de otra fuente están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este proyecto de investigación de maestría.

Riobamba, Agosto 2022



Firma electrónicamente por:
**JESSICA NATALY
CASTILLO
FIALLOS**

Jessica Nataly Castillo Fiallos
C.I. 060459021-6

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de titulación primero a Dios, a mi madre que siempre está presente, a mi hija que es la fuerza para seguir adelante, a mi papá a mis hermanas y a mis lindos sobrinos.

Jessica Nataly Castillo

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xiv
CAPÍTULO I	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 Planteamiento del problema.....	3
1.3 Título.....	3
1.4 Situación problemática.....	3
1.5 Formulación del problema	4
1.5.1 Preguntas directrices	4
1.6 Justificación	4
1.7 Objetivos.....	5
1.7.1 Objetivo general.....	5
1.7.2 Objetivos específicos	5
1.8 Hipótesis	5
1.9 Variables	5
1.10 Operacionalización de las variables.....	5
1.11 Alcance de la investigación	8
CAPÍTULO II	9
2 MARCO TEÓRICO	9
2.1 Antecedentes	9
2.2 Fundamentación teórica	11
2.2.1 Producción del Brócoli en el Ecuador.....	11
2.2.2 Brócoli	13
2.2.3 Brócoli de variedad Legacy	15
2.2.4 Descripción morfológica.....	16
2.2.5 Técnicas de producción del Brócoli Legacy	17
2.2.6 Fases de crecimiento	18
2.2.7 Requerimientos Edafoclimáticos del Brócoli	19
2.2.8 Fertilización	20
2.2.9 Modelos matemáticos	23
2.2.10 Redes Neuronales.....	25
2.2.11 Tipos de redes neuronales	28

2.2.12	Elementos de una red neuronal	28
2.2.13	Programas informáticos	30
CAPÍTULO III.....		33
3.	DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN.....	33
3.1.	Diseño de la investigación	33
3.2.	Método y enfoque de la investigación	33
3.3.	Población de estudio	33
3.4.	Muestra de estudio	33
3.5.	Técnica de recolección de datos.....	33
3.6.	Diseño e implementación del experimento	34
3.7.	Características del área experimental.....	34
3.8.	Ciclo Vegetativo	34
3.9.	Condiciones de Cultivo.....	35
3.10.	Análisis de Datos	36
3.11.	Modelo Matemático del crecimiento del brócoli legacy.....	40
3.11.1.	Ecuación de predicción del crecimiento del Brócoli Legacy	45
3.12.	Implementación del modelo matemático en Matlab	48
CAPÍTULO IV		51
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	51
4.1.	Evaluación del modelo.....	51
4.1.1.	Escenario 1	51
4.1.2.	Escenario 2.....	51
4.1.3.	Escenario 3.....	52
4.2.	Problemas derivados del Entrenamiento en el uso de RNA.	53
4.2.1.	Overfitting.....	53
4.2.2.	Underfitting.....	53
4.3.	Validación del Modelo.....	53
4.4.	Error Medio Absoluto Porcentual (Mean Absolute Percentage Error - MAPE).....	54
4.5.	Escenario 4.....	55
4.6.	Comprobación de la Hipótesis	56
CONCLUSIONES.....		57
RECOMENDACIONES.....		58
BIBLIOGRAFÍA		

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1: Operacionalización de las variables.....	6
Tabla 2-1: Matriz de consistencia	7
Tabla 1-2: Siembra, cosecha, producción y ventas de brócoli en Ecuador (2014 – 2019)	12
Tabla 2-2: Cosecha de brócoli por provincia	13
Tabla 3-2: Composición nutricional de 100g de una porción de brócoli	14
Tabla 4-2: Brócoli Híbrido Legacy.....	16
Tabla 5-2: Cerebro humano vs Computador	26
Tabla 1-3: Minerales ppm – Camas	35
Tabla 2-3: Datos de Crecimiento del brócoli legacy en diversos escenarios.	37
Tabla 3-3: Variables de entrada de la Red Neuronal	42
Tabla 4-3: Software Matlab	48
Tabla 5-3: Entrenamiento Red Neuronal	49
Tabla 6-3: Predicción del rendimiento del brócoli	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-2. Brócoli Legacy	15
Figura 2-2. Nivel esquemático de una neurona.....	25
Figura 3-2. Redes neuronales con Perceptrón Multicapas	27
Figura 4-2. Función de activación logsig.....	30
Figura 5-2. Función de activación tansig	30
Figura 1-3. Hacienda Freire, 2022	34
Figura 2-3. Crecimiento del Alto del tallo y diámetro del florete.....	38
Figura 3-3. Escenario 1	38
Figura 4-3. Crecimiento modificado el pH, escenario 3	40
Figura 5-3. Arquitectura Red Neuronal Perceptron	41
Figura 6-3. Arquitectura de la Red del crecimiento del brócoli legacy	43
Figura 7-3. Funciones de activación o Transferencia	44
Figura 8-3. Estructura de la Red Neuronal, predicción del crecimiento del brócoli legacy.....	44
Figura 9-3. Épocas 1000	47
Figura 10-3. Convergencia del error a 0,01	47
Figura 1-4. Crecimiento del brócoli con niveles óptimos de productos químicos en el suelo	51
Figura 2-4. Crecimiento del brócoli en suelos con poco calcio.....	52
Figura 3-4. Crecimiento del brócoli en suelos ácidos	52
Figura 4-4. Error	54
Figura 5-4. Escenario 1 con valores obtenidos en RN.	55
Figura 6-4. Predicción de la RN.....	55
Figura 7-4. Comprobación hipótesis.....	56

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A. Finca Freire.

RESUMEN

El objetivo fue diseñar un modelo matemático para predecir el crecimiento del brócoli Legacy en el cantón Latacunga usando redes neuronales, una herramienta de apoyo conocida como simulación que permita mejorar el proceso de producción, tomando en consideración 3 escenarios distintos, en el primer escenario se realiza la plantación con estándares normales, mientras que en el segundo y tercer escenario se analizan las variaciones químicas con la finalidad de observar si el producto se adapta a estas circunstancias. El modelo matemático está basado en la red neuronal perceptron de tres capas, en la primera capa cuenta con 12 parámetros, la segunda capa cuenta con 10 neuronas y la capa de salida cuenta con dos parámetros que ayudan a identificar la predicción del crecimiento del brócoli legacy. Usando el programa Matlab se obtiene la predicción del crecimiento, dando como resultado la comprobación de la hipótesis en el quinto escenario (escenario simulado), se cambió el químico calcio a 501 ppm obteniendo una altura del tallo de 53.97cm y un diámetro del florete de 17.73 ahí se evidencio que aumentado el calcio en 5ppm el brócoli se desarrolla de mejor manera. Finalmente, se valida el modelo matemático mediante Mean Absolute Percentage Error, usando datos reales y datos simulados dando como resultado un error del 2.936%.

Palabras Clave: MATEMÁTICAS, MODELO MATEMÁTICO, PROCESO DE CULTIVO, BROCOLI LEGACY, EFECTIVIDAD.



27-07-2022

0087-DBRA-UPT-IPEC-2022

ABSTRACT

The objective of this paper was to design a mathematical model to predict the growth of Legacy broccoli in the Latacunga canton using neural networks, a support tool known as simulation that allows improving the production process, taking into consideration 3 different scenarios: in the first scenario, plantation with normal standards, while in the second and third scenarios the chemical variations are analyzed to observe if the product adapts to these circumstances. The mathematical model is based on the three-layer perceptron neural network. The first layer has 12 parameters, the second layer has 10 neurons and the output layer has two parameters that help identify the prediction of the growth of Legacy broccoli. Using the Matlab program, the growth prediction is obtained, resulting in the verification of the hypothesis of the fifth scenario (simulated scenario), the element calcium was altered to 501 ppm, obtaining a stem height of 53.97 cm and a foil diameter of 17.73. It was, at this point, proven that increasing calcium by 5ppm, broccoli develops better. Finally, the mathematical model is validated by Mean Absolute Percentage Error, using real data and simulated data, resulting in an error of 2.936%.

Keywords: MATHEMATICS, MATHEMATICAL MODEL, CULTIVATION PROCESS, BROCCOLI LEGACY, EFFECTIVENESS.

CAPÍTULO I

1.1 INTRODUCCIÓN

El brócoli es considerado un vegetal, su procedencia inició en el Oriente Próximo y en el Mediterráneo Oriental, actualmente se ubica en Siria, Turquía y Grecia, gracias al esparcimiento de los comerciantes y navegantes que viajan a través del Mediterráneo, llegando años más tarde a Inglaterra, España y al resto de países en el que hoy en día se cultiva este vegetal.

Celta y Sajones eran los primeros habitantes en realizar el cultivo o siembra al norte de Europa, fue utilizado inicialmente con un fin medicinal enfocado en contrarrestar la sordera y la diarrea, más tarde la siembra de este vegetal fue considerada para la alimentación. En España la siembra del brócoli tuvo gran auge en la década del año 1970.

El brócoli es parte de la familia de las Brassicas, como el kale y la coliflor. Este cultivo se desarrolla de mejor manera en regiones que cuentan con climas frescos, además se debe considerar que la siembra se da entre septiembre y octubre. El brócoli es considerado una verdura nutritiva que contiene vitamina C y A, Calcio, Hierro y Azufre. También tiene propiedades que ayudan a controlar la diabetes y antimicrobianas, sulforafanos que matan las células de cáncer y controlan la presión arterial.

En los últimos años la producción de brócoli se ha convertido en un producto no tradicional de mayor exportación, que benefician al sistema económico del país. Por lo que su producción debe estar supeditado a un proceso riguroso y sobre todo considerar varios factores exógenos y endógenos que pueda afectar la producción. Este vegetal además debe estar dotado de cantidades suficientes de fósforo y potasio que lo hacen apetecible en los mercados nacionales e internacionales, conocer el proceso de siembra y cultivo es importante ya que en este proceso se conoce las adversidades que se pueden presentar, principalmente contar con estrategias o alternativas que permitan mitigar posibles problemas que afecten la producción del brócoli, la utilización de fertilizantes químicos que deben ser utilizados adecuadamente con la finalidad de que no causen residuos tóxicos en la planta, ya que están compuestos por nutrientes que pasan a ser elementos integrantes de la estructura química de la planta.

Los agricultores actualmente siguen utilizando técnicas de siembras precarias, ya que se enfocan en obtener un mayor volumen de producción dejando a un lado la calidad y el cuidado de los suelos que

afectan a la producción de este vegetal, para este método de siembra los agricultores aplican fertilizantes en exceso los cuales representan el 20% y 30% de los costos de producción del cultivo, desmejorando la calidad y la fertilidad de los suelos que tiene un clima adecuado para la producción agrícola.

Los agricultores del país además deben considerar la incidencia de diferentes factores que pueden coadyudar en el proceso de producción del brócoli, en donde la distribución adecuada de fertilizantes permitirá mejoras que precautelen el proceso de siembra ya que las adiciones innecesarias de fertilizantes, fosforados, nitrogenados y potásicos aplicados al suelo generan desventajas en la producción. La iluminación es una fuente indispensable para la fotosíntesis de las plantas, es también un factor importante para el crecimiento y para su desarrollo, son capaces de responder a la intensidad y al color de la luz por medio de sus foto receptores: fototropinas, criptocromos y fitocromos, los cuales son precisos en su desarrollo y crecimiento con respecto a las distintas condiciones ambientales, los sistemas de iluminación para la producción en ambientes controlados son de suma importancia así como los avances tecnológicos que puedan surgir en el área permitirán generar y pronosticar

Está investigación se fundamenta en el diseño de un modelo matemático para la predicción del crecimiento del brócoli legacy en la Finca Freire en el invernadero #1 ubicado en el cantón Latacunga usando redes neuronales, para lo cual se considerarán parámetros, proposiciones de hechos reales y la relación existente entre las variables operacionales que interviene en el proceso de producción del brócoli, este modelo permitirá consolidar una producción de calidad.

Actualmente la Invernadero 1 no posee una herramienta informática que prediga en crecimiento del brócoli al modificar parámetros químicos, y cuál sería el comportamiento de su desarrollo, por lo mencionado el objetivo fundamental es realizar un análisis físico del crecimiento, desarrollar un modelo matemático con redes neuronales en una interfaz de Matlab. Considerando que la Finca Freire se fundamenta en hechos históricos o empiristas para tomar sus decisiones de producción, esto genera alternativas inadecuadas para lograr el desarrollo efectivo de cada etapa del cultivo del brócoli legacy.

El diseño de un modelado que proporcione instrumentos que sirvan de apoyo en cada una de las etapas de producción del brócoli, permita mantener un análisis adecuado de la situación real del cultivo, suministrando alternativas que favorezcan a la toma de decisiones y permitan mitigar posibles problemáticas que se presentan.

1.2 Planteamiento del problema

1.3 Título

Modelado matemático para la predicción del crecimiento del brócoli legacy en el cantón Latacunga usando redes neuronales.

1.4 Situación problemática

En la Finca Freire, invernadero 1, el resultado adecuado de la producción de brócoli legacy se refleja en la calidad, minimización de plagas y en la dotación adecuada de nutrientes que hacen al producto más apetecible en los mercados nacionales e internacionales.

Dicho proceso de producción está sujeto a múltiples factores que inciden en el mismo como: Uso adecuado de fertilizantes químicos, temperatura, ventilación, iluminación, tipo de cama, calidad del agua entre otros que están presentes a lo largo del ciclo de producción del brócoli, que pueden ser factores incidentes al momento de cosechar una producción de calidad.

En el cantón Latacunga se ha evidenciado que los invernaderos no cuentan con una herramienta informática expresada en un modelo matemático que permita proyectar y predecir el crecimiento del brócoli durante el proceso de producción, lo que genera una gran problemática y pérdida para la Finca Freire.

Considerando el apartado anterior surge la necesidad de diseñar una herramienta informática de fácil manejo, utilizando una interfaz amigable y basada en fundamentos matemáticos, que permitan a los representantes del invernadero contar con una alternativa de solución que ayude a tomar una decisión a corto plazo, dicha herramienta debe ser diseñada mediante los datos históricos recolectados de la producción ya que estos serán la guía de cómo la producción de brócoli se ha ido desarrollando en puntos específicos y con la intervención de factores propios del proceso..

Contar con una herramienta tecnológica que permita proyectar datos beneficiaria a la consecución de alternativas que permita optar decisiones adecuadas para el desarrollo adecuado de la producción, que permita minimizar costos, y maximizar beneficios.

1.5 Formulación del problema

¿El diseño de un modelo matemático utilizando redes neuronales permitirá pronosticar el crecimiento del brócoli legacy considerando la influencia de factores externos?

1.5.1 Preguntas directrices

- ¿Cuál es el tiempo, características y beneficios del crecimiento normal de la siembra del brócoli legacy?
- ¿Cuáles son los factores externos que influyen en el crecimiento del brócoli legacy?
- ¿Qué tipo de red neuronal se acopla a la complejidad del crecimiento del brócoli legacy?

1.6 Justificación

El propósito de la investigación es plantear una estrategia tecnológica que permita la formulación sistemática de un modelo matemático que facilite el estudio del crecimiento del brócoli legacy, con la finalidad de minimizar los riesgos externos que influyen en la etapa de producción.

La Finca Freire ubicada en el Catón Latacunga, Provincia de Cotopaxi cuentan con una producción por cosecha de 3300 floretes de brócoli, la problemática que presenta en la actualidad está dada al momento de obtener información que permita evaluar el comportamiento del crecimiento diario de los cultivos de brócoli, este proceso requiere mucho tiempo debido a que la manipulación utilizada para realizar las mediciones es manual y el área de cultivo de brócoli es muy extenso lo que implica una problemática con respecto al tiempo, la utilización de mano de obra y poder identificar con certeza las plagas que afecten la planta.

Considerando lo expuesto anteriormente el objetivo fundamental el estudio se enfoca en plantear un modelo matemático que permita visualizar el comportamiento del crecimiento del brócoli, en sus diferentes etapas en donde se considere la modificación de los parámetros que poseen una relación directa en el desarrollo de la planta como el agua, la humedad, el tiempo de producción, la temperatura, la utilización adecuada de fertilizantes, los macros y micro elementos.

Este modelado se enfocará en establecer la relación entre variables, como la utilización de las dosis de fertilizante y el crecimiento, la cantidad de riego, el porcentaje de luz, el nivel de temperatura, todos los factores relacionados con el crecimiento de los floretes del brócoli.

Con el diseño de este modelado se facilitará a la Finca Freire, contar con un análisis de los procesos de crecimiento, analizar la incidencia de los factores externos que afectan el desarrollo del brócoli legacy, y ser una herramienta que permita la experimentación.

1.7 Objetivos

1.7.1 *Objetivo general*

Diseñar un modelo matemático para predecir el crecimiento del brócoli Legacy en el cantón Latacunga usando redes neuronales.

1.7.2 *Objetivos específicos*

- Recolectar y sistematizar los registros relevantes del proceso de cultivo del brócoli legacy en la finca Freire, para contar con una base inicial para la investigación.
- Establecer todas las variables externas que inciden en el crecimiento del brócoli legacy.
- Validar el modelo matemático con datos reales.

1.8 Hipótesis

- El diseño de un modelo matemático para la predicción del crecimiento del brócoli en el invernadero Freire de la ciudad de Latacunga, ayudara a la toma de decisiones.

1.9 Variables

- Modelo Matemático
- Predicción del crecimiento del brócoli

1.10 Operacionalización de las variables

A continuación, se detalla la operacionalización de las variables presentes en el trabajo de investigación.

Tabla 1-1: Operacionalización de las variables

Variable	Tipo de variable	Conceptualización	Indicador	Tipo estadístico	Criterio de medición	Instrumento
Modelo matemático	Independiente.	Representación simplificada, a través de ecuación, del crecimiento del brócoli	Crecimiento del tallo y el floral	Cuantitativo continuo.	<ul style="list-style-type: none"> Los valores emitidos por el invernadero son medidos de manera manual directamente por los obreros y emitidos en el crecimiento. 	<ul style="list-style-type: none"> Historial de registros de crecimiento Historial informes de proyección. Entrevista técnica Matlab
Crecimiento del Brócoli	Dependiente	Dato calculado entre el valor de predicción arrojado por la red neuronal y el valor físico medido.	Eficiencia del aprendizaje del modelo matemático	Cuantitativo continuo.	<ul style="list-style-type: none"> Validación del modelo 	<ul style="list-style-type: none"> Historial de registros de crecimiento Historial informes de proyección. Entrevista técnica

Realizado por: Castillo Jessica, 2022

Tabla 2-1: Matriz de consistencia

Formulación del Problema	Objetivo General	Hipótesis	Variabes	Indicador	Técnicas	Instrumentos
¿El diseño de un modelo matemático utilizando redes neuronales permitirá pronosticar el crecimiento del brócoli legacy considerando la influencia de factores externos?	Diseñar un modelo matemático para predecir el crecimiento del brócoli Legacy en el cantón Latacunga usando redes neuronales.	<ul style="list-style-type: none"> El diseño de un modelo matemático para la predicción del crecimiento del brócoli en el invernadero Freire de la ciudad de Latacunga, mejorara el nivel de producción. 	<p>Variabes</p> <p>Variabes independientes</p> <ul style="list-style-type: none"> Modelo matemático <p>Variable Dependiente</p> <p>Crecimiento del Brócoli</p>	<p>Crecimiento del tallo y el floril</p> <p>Eficiencia del aprendizaje del modelo matemático</p>	<ul style="list-style-type: none"> Bases de datos. Herramientas informáticas. 	<ul style="list-style-type: none"> Historial de registros de crecimiento Historial informes de proyección. Entrevista técnica. Programa de proyección en Matlab.

Realizado por: Castillo, Jessica, 2022

1.11 Alcance de la investigación

Con el presente trabajo de titulación se pretende dotar al Invernadero Freire de un instrumento informático que permita predecir el crecimiento del brócoli, creando así un simulador que logre variar las entradas considerando factores exógenos que nos permita acceder a diferentes escenarios, esto permitirá mitigar los gastos ya que no será necesario realizar pruebas físicas para identificar el comportamiento del brócoli.

CAPÍTULO II

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

En la actualidad los modelos matemáticos se utilizan como una herramienta informática que permiten generar respuestas o soluciones a posibles problemas prácticos, mediante la predicción de la incidencia de factores externos. A continuación, se analizará algunos estudios relacionados que se han basado en modelos matemáticos.

Según los autores (López, Ramirez, & Rojano, 2018), en su artículo “MODELOS MATEMÁTICOS DE HORTALIZAS EN INVERNADERO: TRASCENDIENDO LA CONTEMPLACIÓN DE LA DINÁMICA DE CULTIVOS”. El objetivo principal de la investigación se centra en dotar de un escrito donde se describa como actúan un modelo matemático aplicado al cultivo de hortalizas bajo invernadero, y además se identificar los parámetros más relevantes del modelado, de la siembra de tomate, lechuguilla y pepino. Metodología: El modelo utiliza incrementos de tiempo basados en una dinámica diaria y lazos de trabajo rápidos ocurriendo en un lapso de 30 minutos. En esta dinámica se calculan las variables temperatura, CO₂, y radiación fotosintética activa, así como los procesos de fotosíntesis y respiración.

El crecimiento es calculado en la dinámica diaria en la que se actualizan las variables de estado. Se registra la dinámica de aparición de brotes, de muerte de ramas, de corte de tallos florales, de crecimiento de las ramas que desarrollan flores y ramas de orilla que no desarrollan flores. Conclusión: Los modelos mecanicistas de hortalizas desarrollados hasta ahora se han concentrado en el estudio de procesos fundamentales como producción y distribución de biomasa, procesos de fotosíntesis y respiración. A pesar de lo anterior se requiere aún del estudio más preciso de algunos procesos como respiración de mantenimiento para lograr.

Los autores (Víctor, Artega, Chanamé, & Esquivel, 2018), en su artículo “MODELAMIENTO MATEMÁTICO Y POR REDES NEURONALES ARTIFICIALES DEL CRECIMIENTO DE SPIRULINA SP. EN FOTOBIORREACTOR CON FUENTE DE LUZ FLUORESCENTE E ILUMINACIÓN EN ESTADO SÓLIDO”. El objetivo principal, es Se evaluaron los modelos matemáticos de Gompertz y logístico en la cinética de crecimiento de Spirulina sp., los cuales fueron comparados con un modelamiento por Redes Neuronales Artificiales Backpropagation (RNA-BP). La Spirulina fue cultivada en un fotobiorreactor de laboratorio aireado (3 L/min) de 500 mL, con iluminación fluorescente de 40W y en Estado Sólido (LED-Light Emitting Diode) de 1W; obteniendo

con ambos sistemas 11,0 klx. Metodología: Se utilizó la RNA feedforward con los algoritmos de entrenamiento Backpropagation (BP) y de ajuste de pesos Levenberg Marquardt (LM); empleándose para el entrenamiento, los datos de tiempo (TA) como datos de entrada y el valor YA como datos de salida (Figura 2).

Para la validación se introdujeron como datos de entrada intervalos de tiempo (TA) que permitan graficar una curva suavizada de cinética de crecimiento, con respecto a los valores YA. Lo cual permitió construir la curva sigmodal de crecimiento de la *Spirulina* sp., cuyos valores fueron comparados con los obtenidos con el modelo función de Gompertz. Conclusión: La iluminación en Estado Sólido LED, permitió obtener un valor elevado de biomasa de *Spirulina* sp. (α) de 0,90, en comparación con la obtenida con iluminación fluorescente de 0,82; así como una mayor velocidad de crecimiento de 0,63 h⁻¹, precedida de un menor tiempo de latencia de 0,4 h.

La Red Neuronal Artificial Backpropagation RNA-BP mostró buena precisión con respecto al modelo corregido de Gompertz I, tanto para el caso del cultivo de *Spirulina* sp. con iluminación fluorescente y con LED, mostrando coeficientes de correlación (R) del orden de 0,993 y 0,994, respectivamente, con respecto a los datos experimentales. Resulta ventajoso el modelamiento a través del modelo corregido de Gompertz I, porque además de valores de R de 0,987 y 0,990 en los cultivos de *Spirulina* sp. con iluminación fluorescente y con LED respectivamente, permite obtener los parámetros de la cinética de crecimiento de manera directa.

Para el autor (Jiménez, 2020), en su investigación “REDES NEURONALES Y PREPROCESADO DE VARIABLES PARA MODELOS Y SENSORES EN BIOINGENIERÍA”, cuyo objetivo principal se enfoca en Metodología: El circuito en que se basa el sistema de posicionamiento del setup consta de una sección analógica y una sección digital, tal y como puede observarse en la Figura 5.1. La sección analógica es el paso previo a la fase digital y ha sido implementada en un ASIC. El ASIC recibe como entradas el conjunto de I pixels procedentes del PSPD, organizados como un vector q_j , $j = 1, \dots, I$, $I \in \mathbb{N}/\{0\}$ correspondiente a las cargas detectadas en cada pixel del detector, y reordenadas en una sola columna (en nuestro caso se reciben $I = 64$ canales procedentes de un detector de 8×8 pixels).

Esta etapa constituye el readout o lectura de los estímulos de entrada al detector. A diferencia de otros estudios en los que el readout se realizaba por medio de redes resistivas de estructura fija, en este caso se realiza un readout dinámico en el sentido que los pesos asociados a cada señal procedente de cada ánodo pueden ser programados libremente mediante una estructura configurable basada en sumas ponderadas. Conclusiones: A primera vista se aprecia que todos los métodos presentados logran una

mejora de resultados frente al hecho de utilizar a ciegas los 8 momentos proporcionados por el circuito de redituó, luego el preprocesado realizado ha sido conveniente.

Los menores valores de error sistemático se obtienen al combinar escalado y proyección, pero la resolución es aproximadamente la misma que la que se logra con escalado. En general, el objetivo es buscar el error sistemático mínimo en la estimación de la posición de impacto en el cristal, pero el incremento en tiempo de computación para la búsqueda puede no compensar la ligera mejora en el resultado

2.2 Fundamentación teórica

2.2.1 Producción del Brócoli en el Ecuador

En la actualidad el brócoli es considerado como una fuente de calcio y fósforo, consumida principalmente en los países de Oriente debido a sus propiedades nutritivas y saludables. De acuerdo a la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura mencionan que a nivel mundial para el año 2019 el consumo del brócoli alcanzó una producción de 38.241.388 toneladas, de las cuales, el 81% se concentra en tres países, China, China continental e India. México ocupa el quinto lugar con el 2% y Ecuador el veintitresavo puesto con 0,29%.

Con respecto a hectáreas sembradas, India, China y Estados Unidos ocupan los primeros puestos, mientras que Ecuador ha incrementado su producción situándose en 13avo lugar en el listado de 98 países. Ecuador es un país con una gran biodiversidad, espacialmente goza de un clima que favorece a la producción de esta hortaliza, pero hoy en día este potencial no está siendo aprovechado, Esto quiere decir que, Ecuador necesita de más hectáreas de terreno para poder producir brócoli, frente a otros países que producen más en menores extensiones de terreno.

Los cultivos de brócoli son transitorios en Ecuador, entre 2017 y 2019, se sembró un promedio de 9.000 hectáreas de esta hortaliza, consiguiendo una cosecha equivalente al 99.8% de la siembra. El tiempo promedio entre la siembra y cosecha lleva de 90 a 100 días. Al 2019, la producción en toneladas métricas de brócoli, decreció 10%, cuando en años anteriores había crecido más del 55%. Se observa en la data histórica que, en 2017, para que la producción crezca 54%, se debió incrementar el número de hectáreas sembradas en 31%. Lo mismo sucedió en 2018, con una relación de 59% más en hectáreas sembradas para 65% más de toneladas producidas. En cuanto a ventas, se observa un crecimiento promedio de 8% dentro del periodo analizado.

El año 2019 es el que menor cantidad de toneladas métricas vendió, 5.676 menos que en 2018 y sólo el 96.7% de la producción total, cuando el promedio fue de 98.6%. (Sánchez, Vayas, Mayorga, & Freire, 2020). En el Ecuador, los precios promedio que maneja para la venta por kilogramo de brócoli de los productores, varían entre \$0,25 y \$0,29 centavos, en los mercados internos.

Tabla 1-2: Siembra, cosecha, producción y ventas de brócoli en Ecuador (2014 – 2019)

Año	Siembras ha.	Cosecha ha.	Producción TM	Ventas TM
2014	6.868,00	6.868,00	113.029,00	112.703,00
2015	7.816,95	7.606,05	107.386,14	106.149,37
2016	5.520,26	5.519,02	74.190,08	73.110,59
2017	7.213,75	7.192,50	114.271,86	110.656,46
2018	11.461,84	11.431,27	188.094,55	186.755,96
2019	9.923,43	9.919,01	169.724,75	164.048,17
Promedio	8.134,04	9-089,31	127.782,73	125.570,59
Máximo	11.461,84	11.431,27	188.094,55	186.755,96
Mínimo	5.520,26	5.529,02	74.190,08	73.110,59

Fuente: INEC, ESPAC 2014 - 2019

El brócoli de Ecuador se produce principalmente en tres provincias de la Sierra: Cotopaxi, Chimborazo e Imbabura, a una altura entre los 2.600 y 3.300 metros sobre el nivel del mar. Cotopaxi es la región que más sobresale en la producción de esta hortaliza, ya que produce un promedio del 90% de brócoli en todo el país, seguido del 4,7% que corresponde a Chimborazo y el 2,6% a Tungurahua y en pequeñas proporciones otras provincias. Cañar empezó a producir brócoli en el 2015 y dejó de hacerlo en 2016, mientras que Loja inicia esta producción en 2018 con 28.09 toneladas métricas llegando a 2019 con 61.95 TM. (Sánchez, Vayas, Mayorga, & Freire, 2020).

Resaltar que gracias a la ubicación geográfica de Ecuador facilita que las plantaciones de brócoli reciban gran cantidad de luz solar durante el día, logrando un producto con un tono muy verde y un florete compacto y de calidad.

Tabla 2-2: Cosecha de brócoli por provincia

Provincia	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Cotopaxi	6.472,03	6.374,88	4.584,91	5.496,09	10.190,79	9.333,55
Chimborazo	48,42	251,53	508,25	678,07	628,89	335,05
Tungurahua	257,94	115,82	48,79	868,59	462,79	41,40
Imbabura	83,75	768,24	-	111,47	99,10	109,61
Pichincha	0,90	14,59	86,76	27,03	45,59	94,44
Azuay	5,00	19,25	111,62	11,25	-	0,65
Cañar	-	62,75	65,30	-	-	-
Loja	-	-	-	-	4,12	4,30
Total, cosecha	6.868,03	7.606,05	5.405,63	7.192,50	111.431,27	9.919,01
Total sembrado	6.868,43	7.816,95	5.406,86	7.213,75	11.461,27	9.923,43
% cosecha/sembrado	100%	97%	100%	100%	100%	100%

Fuente: INEC, ESPAC 2014 - 2019

Elaborado; Castillo Jessica, 2022

Con respecto al comercio exterior, se puede mencionar que Ecuador es el principal exportador de brócoli a nivel de Sudamérica debido a su calidad, sus principales compradores son actualmente Estados Unidos, Japón, la Unión Europea, Canadá y Guatemala. Las exportaciones del brócoli han mantenido un crecimiento constante del 8% anual, los exportadores de esta hortaliza manejan precios que fluctúa entre 13,47 y 32,65 dólares por cada cartón de 20 libras. Hoy en día el brócoli se encuentra dentro de los 25 productos principales no petroleros de exportación (Estados Unidos mayor comprador).

2.2.2 *Brócoli*

El brócoli es parte de la familia Cruciferae y su nombre botánico es Brassica oleracea var Itálica., variedad botrytis subvar. cymosa Lam. El brócoli, aporta vitaminas y elementos esenciales a la dieta humana, debido a sus compuestos antioxidantes que mejoran la salud, fortalece el sistema inmunológico, mantiene los huesos fuertes, ayuda a prevenir el cáncer y enfermedades del corazón. Contiene una gran cantidad de vitaminas, minerales y antioxidantes. Es considerado como la hortaliza de mayor valor nutritivo por unidad de peso, se caracteriza por su fácil procesamiento. (Toledo, 2020).

Es una planta similar a la coliflor, aunque las hojas son más estrechas y más erguidas, con peciolo generalmente desnudos, limbos normalmente con los bordes más ondulados; así como nervaduras más marcadas y blancas; pellas claras o ligeramente menores de tamaño, superficie más granulada, y constituyendo conglomerados parciales más o menos cónicos que suelen terminar en este tipo de formación en el ápice, en bastantes casos muy marcada. Es importante resaltar la posible aparición de brotes laterales en el brócoli de pella blanca en contraposición a la ausencia de este tipo de brotes en la coliflor. La raíz es pivotante con raíces secundarias y superficiales.

Las flores del brócoli son pequeñas, en forma de cruz de color amarillo y el fruto es una silicua de valvas ligeramente convexas con un solo nervio longitudinal. Produce abundantes semillas redondas y de color rosáceo. El brócoli contiene vitaminas A y C, potasio y fibra. El consumo frecuente de esta hortaliza reduce el riesgo de contraer diabetes y anemia ya que es altamente nutritivo y alto en hierro.

Tabla 3-2: Composición nutricional de 100g de una porción de brócoli

Nutrientes	Valor
Agua (%)	91
Energía (kcal)	28
Proteína	3.0
Grasa (g)	0.4
Carbohidrato (g)	5.2
Fibra (g)	1.1
Ca (mg)	48
P (mg)	66
Fe (mg)	0.9
Na (mg)	27
K (mg)	325
Vitamina A (UI)	1542
Tiamina (mg)	0.07
Riboflavina (mg)	0.12
Niacina (mg)	0.64
Ácido ascórbico (mg)	93.2
Vitamina B6	0.16

Fuente: (Zamora, 2017)

Elaborado por: Castillo Jessica; 2022

2.2.2.1 Variedades de Brócoli

Existen diferentes clases de brócoli y su diversidad están sujeta a la ubicación geográfica donde se siembre la hortaliza: En el caso de España encontramos más de 5 variedades entre ellas están:

- Belstar
- Carusso
- Chios
- Marathon

- Mónaco
- Parthenon, etc.

Mientras que en México podemos encontrar diferentes variedades como:

- Heritage
- Ironman
- Arcadia
- Expo

En Ecuador en cambio podemos encontrar

- Legacy
- Domador
- Marathon
- Legacy

Es necesario mencionar que para la variedad del brócoli se considera además según su ciclo de crecimiento. (Bastidas, 2017)

- Precoz o Temprana: Este tipo de brócoli se recolecta entre 50-75 días, Cicco, Calabres.
- Intermedias o de media estación: Se recolectan entre los 90 y 110 días desde su siembra, Waltham, Atlantic
- Tardías: Esta supera los 110 días antes de su recolección. Green Duke
- Cultivares Híbridos: En periodo comprendido entre 90 a 110 días, Montecristo, Dalmira, Pirata

2.2.3 *Brócoli de variedad Legacy*



Figura 1-2. Brócoli Legacy
Fuente: (Agronegocios, 2021)

Esta variedad de brócoli “Legacy” ha tenido un buen desarrollo en las regiones especialmente de las regiones de la sierra productoras de brócoli del Ecuador, y la razón principal es que se adapta con facilidad a las zonas altas. Se caracteriza por tener una pella bien formada que permite cortes de tallos relativamente cortos, con flores (cabezas) de consistencia firme, de grano pequeño lo que la hace más compacta, forma adecuada y un color verde grisáceo. (Novoa, 2020)

Tabla 4-2: Brócoli Híbrido Legacy

Características	Ventajas	Beneficios
Planta vigorosa y rústica.	Presenta alta uniformidad y productividad.	Buena rentabilidad a la cosecha, asegura tu inversión generando ganancia.
Híbrido de gran adaptabilidad a condiciones frías templadas. Cabeza compacta, de domo perfecto, firme, de granos muy finos de color verde oscuro.	Ideal para ser sembrado en condiciones de sierra. Híbrido ideal para mercado fresco e industria.	Se adapta a diferentes condiciones de producción. Buena aceptación de mercado.
Híbrido precoz de 85-90 días, con cabezas que pesan entre 700 y 800 gr.	Tolerante a enfermedades fungosas causadas por la acumulación de gotas de lluvia en el domo.	Mayor rendimiento en kilos de primera con plus de ganancia por brotes laterales, peso de cabezas de buena calidad con mejores ganancias.

Fuente: (Agronegocios, 2021)

Elaborado por: Castillo Jessica, 2022

2.2.4 Descripción morfológica

Según el autor Limongelli, (2017), menciona que el brócoli es una planta perenne, generalmente de mayor tamaño que la coliflor, pero que se asemeja desde el punto de vista botánico, con la diferencia que, en su caso, la parte comestible resulta ser la inflorescencia no madura de color verde, mientras que el caso de la coliflor, la parte comestible es la inflorescencia de color blanco, en su estado primordio.

Hay que destacar las siguientes características morfológicas:

- **Raíz:** La raíz principal es pivotante, puede llegar a penetrar hasta 1.20 m de profundidad, el sistema de raíces secundario es muy profuso y abundante. (Valadez, 2018, pág. 45)
- **Hojas:** Las hojas son de color verde oscuro, con espículas largas, limbo hendido, en la base de las hojas puede dejar a lo largo del nervio central que es muy pronunciado, pequeños fragmentos de limbo foliar a manera de foliolos, sus hojas pueden llegar a los 40 o 50 cm de largo. (Limomgelli, 2017)

- Flor: Se caracterizan por ser de tamaño pequeñas, notables debido a su gran número, son completas, regulares e hipóginas, tienen cuatro sépalos y cuatro pétalos de color amarillo, por lo general en ángulo agudo, cerca de la línea mediana y doblada hacia atrás. Cuentan con 6 estambres, 4 más largos que los otros 2, su pistilo es simple y está compuesto de dos carpelos y 2 lóbulos. La disposición de los pétalos es en forma de cruz. (Weir, Stocking, & Barbour, 2019)
- Inflorescencia: El Brócoli forma a una cabeza principal y otras laterales de color verde oscuro, no tan compactas, sobre un tallo floral menos corto y en un estado de desarrollo más avanzado. La parte comestible está formada por unas yemas florales, el tallo y alguna porción de la hoja. (Gordon & Barden, 2018)
- Fruto: Esta hortaliza cuenta con una silicua de color verde oscuro cenizo que mide en promedio de 3 a 4 cm de largo, y que contiene las semillas, esta es considerado como fruto. (García, 2020)
- Semilla: La semilla de esta hortaliza, tiene forma de una munición y miden de 2 a 3 mm, de diámetro. (Valadez, 2018)

2.2.5 Técnicas de producción del Brócoli Legacy

Para la producción de brócoli Legacy, el proceso inicia con la selección y preparación del suelo, ya que es una hortaliza de trasplante, además se considerando los siguientes pasos a seguir:

Preparación de la tierra: La tierra del invernadero debe contar con un buen labrado para mejorar las condiciones del suelo para la siembra.

- Siembra: En esta etapa la semilla es sembrada en unos semilleros en donde permanecen aproximadamente entre 40 a 45 días hasta su trasplante. Aquí la semilla se cubre con una capa de tierra de 1 a 1.5 cm, esta etapa debe ser manejada con mucho cuidado para que la planta puede desarrollarse de manera adecuada.

Es necesario que se empleen semilleros adecuados para obtener las plántulas de brócoli, por lo que se recomienda la utilización de bandejas plásticas debido a los beneficios que se pueden obtener con esta técnica: estrés mínimo al trasplante, se puede trasplantar todo el día, y demás se puede aprovechar mejor la semilla.

- Trasplante: Para realizar este proceso la planta debe tener aproximadamente de 18 a 20cm de altura y de 6 a 8 hojas. Una recomendación adicional es que es necesario hacer el trasplante con parte del suelo para que mantenga los nutrientes y adquiera estabilidad y firmeza.

- Riego: La planta necesita abundante agua principalmente en la fase de crecimiento. En las siguientes fases como la inducción floral y formación de pella, conviene que el suelo no esté tan húmedo, pero sí en estado de tempero para preservar la planta.
- Abonado: Este componente es muy importante por lo que debe contener un alto nivel de materia orgánica, la cual se incorpora un mes o dos meses antes de la siembra.
- Malas hierbas: Este proceso permite mantener limpio el terreno y poder eliminar las malas hierbas los cuales pueden impedir el buen desarrollo de la planta.
- Recolección: Esta es la última etapa de producción por lo que el brócoli se debe cosechar con el número de hojas necesario para su protección. La recolección inicia cuando el tallo alcanza una longitud de 5 o 6 cm. Un brócoli de buena calidad debe tener; las inflorescencias cerradas y de color verde oscuro brillante compacta y el tallo bien cortado y de la longitud requerida.

2.2.6 Fases de crecimiento

En esta fase el brócoli desarrolla simplemente hojas, es una planta alógama, herbácea y erecta, su producción es anual por lo que requiere de una vernalización o tratamiento en frío para poder emitir un vástago floral. (Barahona, 2020, págs. 22-25)

- Raíz: Cuenta con raíces secundarias abundantes en donde se desarrolla una raíz principal pivotante y bien definida, que penetra hasta 1.20 m de profundidad. Su zona radicular amplia facilita un buen anclaje y alta capacidad de absorción de nutrientes y agua. (Barahona, 2020)
- Tallo: En la etapa de floración, los tallos son cortos, alargado, erectos y carnosos, emergen de axilas foliares formando inflorescencias y alcanzan alturas aproximadas entre 30 a 45 cm., estos sujetan las partes de la pella e inician un crecimiento en longitud, dando paso a la apertura de las flores.
- Hojas: son erguidas, de tamaño grande y estrechas, alcanzan una longitud de 30 a 50 cm, albergan los pecíolos generalmente desnudos, sus limbos tienen bordes ondulados. El color es verde oscuro.
- Flores: En la fase de inducción floral el brócoli después de haber transcurrido un número determinado de días a bajas temperaturas se da paso al inicio de la formación de la flor, compuesta por 4 sépalos, 4 pétalos de color amarillo y tienen forma de cruz, por esta razón se las denominaba crucíferas. (Huerta del Corneja, 2017)
- La pella: es una inflorescencia que mide de 7 a 20 cm. de diámetro.

La inflorescencia, del Brócoli está conformada principalmente por primordios floreales inmaduras, dispuestas en un colimbo primario, en el extremo superior del tallo de las yemas axilares. (Krarup, 2018).
Formación de Pellas. La planta en la yema terminal desarrolla una inflorescencia, al mismo

Fructificación: En esta fase se forman los frutos los cuales se ubican en una vaina conocida como Silicua, esta contiene semillas cuyo periodo de germinación aproximadamente de 4 años. Considerando que un gramo de semillas contiene 340 granos aproximadamente. (Barahona, 2020).

2.2.7 Requerimientos Edafoclimáticos del Brócoli

Dentro de los requerimientos o factores edafoclimáticos podemos destacar diferentes factores que son capaces de regular los procesos fisiológicos y metabólicos de las plantas.

2.2.7.1 Suelo

El Brócoli es una hortaliza de fácil adaptabilidad a cualquier superficie de suelos, pero su mejor productividad se da en los suelos profundos y francos. Considerando que se puede necesitar más nitrógeno en especial para el desarrollo de las yemas laterales. Una alternativa que permite mejorar el rendimiento del brócoli es la aplicación nitrógeno después de cortar la inflorescencia principal. (Vigliola, 2019, págs. 19-72)

Según Sobrino (1989), indica que para mejorar la productividad se requiere un pH cercano a la neutralidad, es decir que el intervalo debe aproximarse entre 6.0 y 6.8, ya que es una planta poco tolerable a la acidez, se desarrolla en una diversidad de suelos, pero son preferibles los francos arcillosos y limosos profundos compuesta por un gran contenido de materia orgánica y con una buena capacidad de retención de agua.

2.2.7.2 Clima

El Brócoli es una hortaliza que se adapta con facilidad a los climas fríos y frescos, lo que le facilita tolerar las heladas que pueden suscitarse. (-2 °C), considerando que siempre y cuando no se haya formado aun la inflorescencia, ya que puede presentar daños por las bajas temperaturas, por lo que se recomienda que el rango de temperaturas para la germinación es de 5 a 25 °C, pudiendo llegar a emerger a los 3 y 8 días respectivamente, las temperaturas ambientales para su desarrollo son de 15 a 25 °C, siendo la óptima de 17 °C, a temperaturas de 0 °C o mayores a 30 °C, puede detener su desarrollo de la inflorescencia, siendo necesario cosecharlo a tiempo para evitar la apertura de las yemas florales. (Valdez, 2018, pág. 19)

El desarrollo de inflorescencias, son ideales a temperaturas promedio de 15°C, el Brócoli es sensible al calor, pero puede ser capaz de resistir las heladas pero que pueden afectar a las inflorescencias, produciéndose manchas de color marrón que desmerecen la calidad comercial. (Vigliola, 2019)

2.2.8 Fertilización

Para el autor Cásseres (2018), menciona que el brócoli necesita de gran cantidad de abono, nitrógeno, potasio, es menores cantidades fósforo. En la mayoría de los casos se recomienda la incorporación de estiércol o abonos verdes al suelo, supliendo más tarde con aplicaciones de nitrógeno al lado del surco.

Además, se debe considerar que el 75% de nitrógeno y el potasio son absorbidos por la planta a partir de la formación de la cabeza, mientras que el fósforo se aplica durante todo el ciclo de manera constante. Mencionar que esta hortaliza es exigente en boro y molibdeno, debido a los beneficios que presta en relación al crecimiento rápido, ciclo corto y sobre todo la producción elevada. (Rodríguez, Urrego, Martinez, & Bernal, 2018, pág. 28)

En otros caos los productores suelen incorporar como abono orgánico gallinaza en la proporción de 20000 kilos por hectárea que han dado buenos resultados. Considerar que los aportes en abono en cobertura se hacen diferentes veces, considerando que cuando se de paso la formación de la inflorescencia se deben cortar las aportaciones de abono nitrogenado, para que estas cierren bien de forma que se obtengan inflorescencias firmes y compactas. Igualmente, el potasio tiene incidencia en la formación de inflorescencias firmes.

2.2.8.1 Nitrógeno

El nitrógeno es un componente que se encuentra en forma libre ya que es un componente del aire; en forma orgánica, constituyendo la formación de órganos y tejidos animales, vegetales, desechos y en forma mineral como compuestos simples que se caracterizan por su disolución mayor o menor según los distintos medios. (Rodríguez, Urrego, Martinez, & Bernal, 2018)

El brócoli puede presentar síntomas de deficiencia de nitrógeno cuando se presentan las siguientes características: (Mirat, 2019)

- Vegetación raquítica
- Maduración acelerada con frutos pequeños.
- Poca calidad causada por la inhibición de formación de carbohidratos
- Hojas de color verde amarillento
- Caída prematura de las hojas

- Disminución del rendimiento
- Coloración púrpura en los pecíolos y nervios de las hojas, debido a la formación de pigmentos antociánicos.

Cuando se suministra a las plantas elevadas cantidades de nitrógeno se puede originar una tendencia de aumento en el número y tamaño de células de las hojas, es decir que se produciría un incremento de hojas, dando paso a una vegetación excesiva en la planta lo que provoca retraso en la maduración la planta, es decir se desarrolla, pero tarda en madurar, en perjuicio de la producción de semillas. (Devlin, 2010). El elevado nitrógeno además produce mayor sensibilidad a enfermedades, los tejidos permanecen verdes y tiernos más tiempo, siendo más vulnerables (Mirat, 2019)

Contar con un suministro adecuado de nitrógeno favorecerá a la planta ya que el nitrógeno mejora la absorción de fósforo, lo que ayuda a mantener una condición ácida en la superficie de la raíz mejorando el crecimiento de la planta.

2.2.8.2 *Fósforo*

El fósforo es un mineral que no se encuentra en estado de pureza química, si no se necesita combinar compuestos orgánicos e inorgánicos como:

- Compuestos orgánicos: fosfolípidos, ácidos nucleicos, fitina e inositol, estos componentes provienen de la composición de la materia orgánica de vegetales y animales
- Compuestos inorgánicos: estos compuestos proceden de la descomposición bacteriana del material orgánico, provenientes además de los materiales del suelo del grupo del apatito y de los fosfatos como el calcio, hierro y aluminio. (Rodríguez, Urrego, Martínez, & Bernal, 2018)

Al no suministrara suficiente fósforo, el brócoli puede presentar síntomas de deficiencia que afectan a la planta como. (InfoJardín, 2018)

- Presencia de un estado de achaparramiento
- Las puntas de las hojas se secan, son de color amarillento y presentan una peculiar ondulación.
- El proceso de deficiencia inicia en las hojas inferiores que son más viejas.
- Las hojas presentan un verde oscuro apagado que más tarde se convierten en un color rojizo o púrpura hasta llegan a secarse.
- El número de brotes disminuye, formando tallos finos y cortos con hojas pequeñas
- Menor desarrollo radicular

- Menor floración
- Menor cuajado de frutos

En cambio, cuando existe un exceso de Fósforo se pueden generar las siguientes situaciones: (Jacob & Kull, 2017)

- Aceleración unilateralmente la madurez a costo del crecimiento vegetativo
- Se puede dar paso a las deficiencias de elementos menores particularmente zinc y hierro
- Origina depresiones en el rendimiento.

2.2.8.3 *Potasio*

Para calcular las cantidades de potasio (K) absorbido por la planta de brócoli es necesario conocer el peso de la materia seca y su concentración en el tejido vegetal. (Vidal, Núñez, Lazcano, & Etchevers, 2018). La planta utiliza un proceso de absorción del potasio de formación K^+ . Este mineral es uno de los tres cationes principales que utilizan las plantas. Es una de las bases retenida en forma intercambiable por los aniones orgánicos y las arcillas. Es un catión bastante móvil, tanto en el suelo como en la planta. (Thompson & Troeh, 2018)

En el proceso de cultivo del brócoli se pueden presentar dos situaciones que pueden dar paso a la existencia de la deficiencia de potasio o exceso del mismo en la planta.

Para poder determinar el déficit del potasio en la planta se debe considerar los siguientes síntomas:

- Reducción del crecimiento de los tallos
- Consistencia general de la planta son de menos resistencia física
- Presentan un menor vigor de crecimiento.
- Aparición de moteado de manchas cloróticas
- Desarrollo de zonas necróticas en la punta y borde de las hojas.

Estos síntomas suelen aparecer primero en las hojas maduras debido a la gran movilidad de este elemento en la planta. (Espinosa & Molina, 2019). Las plantas de brócoli son capaces de asimilar grandes cantidades de potasio sin que este mineral afecte su calidad.

2.2.8.4 Calcio

El brócoli es una fuente de calcio, considerando que una ración de 200g de esta hortaliza contiene 186 mg del mineral. El calcio en la planta de brócoli es absorbido en forma de catión Ca^{++} . El calcio dentro de la planta cumple varias funciones como: (InfoJardín, 2018)

- a) Estimula el desarrollo de las raíces y de las hojas
- b) Ayuda a reduce el nitrato (NO_3^-) en la planta
- c) Permite la activa varios sistemas de enzimas
- d) Ayuda a neutralizar los ácidos orgánicos en la plata

Se debe considerar que en el proceso de suministrar el calcio se pueden originar un escenario que afecta el desarrollo de la planta, una deficiencia de calcio. Cuando se da paso a una deficiencia de calcio se debe analizar los siguientes síntomas.

- Precario crecimiento de las raíces
- Las raíces se tornan negras y se pudren.
- Con respecto a las hojas jóvenes y otros tejidos nuevos desarrollan síntomas debido a que el calcio no se transloca dentro de la planta.
- Los tejidos nuevos necesitan calcio para la formación de sus paredes celulares, por lo tanto, la deficiencia de calcio causa que los filos de las hojas y que los puntos de crecimiento sean gelatinosos.
- Los puntos de crecimiento mueren

La planta puede adquirir el calcio de dos formas, un buen programa de encalado puede incrementar el contenido de este nutriente en el suelo de una manera más eficiente. La calcita y la dolomita son excelentes fuentes de calcio. (Higuaita, 2018)

2.2.9 Modelos matemáticos

“Un modelo es un objeto, concepto o conjunto de relaciones, que se utiliza para representar y estudiar de forma simple y comprensible una porción de la realidad empírica” (Navas, 2018).

Una de las herramientas más interesantes que hoy en día disponemos para predecir y analizar el comportamiento de los fenómenos, está basado en la construcción y simulación de los conocidos modelos matemáticos, que además sirven de apoyo para la toma de decisiones, permitiendo lograr un acercamiento a la realidad. (Navas, 2018)

Estos modelados permiten construir una planeación por etapas o escenarios, calificar esos escenarios y evaluarlos en relación a potenciales riesgos, considerando además que estos buscan representar la realidad por medio de la utilización de ecuaciones matemáticas que nos permitirá predecir qué pasaría con diferentes fenómenos. Los modelos matemáticos son una herramienta que permiten predecir cómo puede comportarse y evolucionar el medio, considerando las consecuencias que se pueden originar en base a cambios de variables como movimiento, temperatura, presiones, etc. Ejemplo: variables medio ambientales con respecto a la agricultura. Los modelos matemáticos hoy en día son solucionadores de problemas originados en varias ciencias tales como la economía, bioquímica, medicina, epidemiología, farmacología, agricultura etc.

Los objetivos de un modelo matemático se enfocan principalmente en detallar, expresar, pronosticar las actividades y procesos generadas en diferentes ciencias. El objetivo central para construir un modelo matemático se basa principalmente en los siguientes aspectos: (Navas, 2018, pág. 2)

- Observación y descripción del fenómeno
- Desarrollo de hipótesis o explicaciones.
- Comprobación por experimentación de la hipótesis planteada
- Aplicación de los nuevos conocimientos con el fin de resolver problemas similares.

2.2.9.1 Etapas de un modelo matemático

Un modelo matemático está enfocado principalmente en interpretar los fenómenos físicos de manera técnica, con la finalidad de facilitar el análisis de cualquier sistema, para el desarrollo del modelo matemático es necesario analizar la ejecución de varios parámetros. (Castillo, 2019)

- Definición y formulación del problema a investigar.
- Identificar las variables dependientes e independientes de la investigación.
- Implementar y ejecutar el modelo matemático de acuerdo a las necesidades que se presenten en la investigación.
- Establecer y emitir los resultados obtenidos, con la finalidad de poder predecir los cambios que pueden generar las variables de la investigación.
- Recoger la información física del fenómeno investigado en el estudio.
- Comprobar los datos obtenidos en las predicciones realizadas, mediante la utilización del software Matlab.
- Elaboración de resultados finales.

Este procedimiento permitirá obtener los datos mediante las predicciones, si estos resultados coinciden con los datos reales, se podrá concluir que la hipótesis y las variables dependientes e independientes son las apropiadas, considerando que el modelo matemático es una herramienta que permite confirmar información, de experimentos de datos.

2.2.10 Redes Neuronales

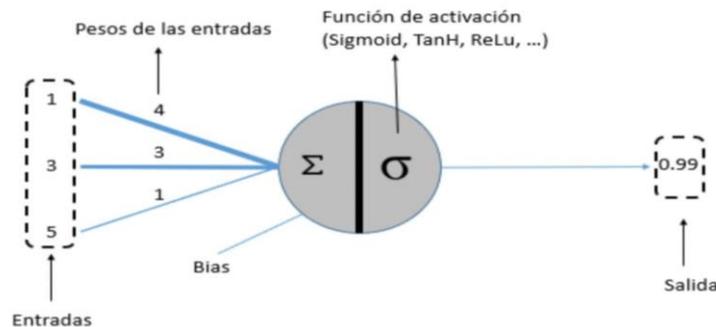


Figura 2-2. Nivel esquemático de una neurona

Fuente: (Xeridia, 2019)

Esta terminología aparece aproximadamente desde la década de los 40, con el surgimiento de la informática, el modelo neuronal se fue desarrollando con el pasar de los tiempos hasta convertirse en una teoría moderna que se enfoca en el aprendizaje y del procesamiento neuronal, el autor Frank Rosenblatt fue el primer desarrollador de redes neuronales en los años 50 quien propuso un dispositivo denominado perceptrón. Hoy en día y gracias a los avances tecnológicos se entiende a las redes neuronales como una tecnología que incluye modelos inspirados en la comprensión y el comportamiento del cerebro humano, su continua investigación ha permitido que las redes neuronales sean partícipes en la resolución de diversas problemáticas que se presentan en la sociedad actualmente mediante la utilización de técnicas algorítmicas convencionales, que han permitido diagnósticos de enfermedades, la aproximación de funciones o el reconocimiento de imágenes, proyección de fenómenos, etc. (Universidad de Salamanca, 2018)

Las redes neuronales son sistemas de conexión que facilitan el procesamiento de información cuya estructura y funcionamiento se enfocan en las redes neuronales biológicas. “Las redes neuronales son aquellas redes en las que existen elementos procesadores de información de cuyas interacciones locales depende el comportamiento del conjunto del sistema.” (Raquel & Fernández, 2018). Las redes neuronales intentan simular el funcionamiento del cerebro humano, y se enfocan en el aprendizaje adquirido mediante la utilización de procesos de extracción de conocimientos genéricos que inicia con

un conjunto de datos iniciales y se desarrolla en cada etapa que recorre, estas redes utilizan softwares donde se da paso a la simulación con la finalidad de predecir cualquier modelado matemático.

Tabla 5-2: Cerebro humano vs Computador

Características	Computador	Cerebro Humano
Rapidez del proceso	Entre 10^{-8} y 10^{-9} seg	$1/10^3$; $1/10^2$ seg
Estilo de procedimiento	Secuencial (en serie)	Paralelo
Número de procesadores	Pocos	Entre $1/10^{-11}$ y $1/10^{-14}$
Enlaces	Pocas	$1/10^{-4}$
Almacenaje de información	En direcciones fijas posiciones precisas	Repartido
Umbral de falla	poca o nula	Amplia
Dominio de control	Centralizado (dictatorial)	Organización propia (democrática)
Energía necesaria para efectuar una tarea	10^{-6} Julios	10^{-16} Julios

Fuente: (Raquel & Fernández, 2018, pág. 13)

Elaborado por: Ing. Castillo Jessica, 2019

El objetivo principal de las redes neuronales es aprender modificándose automáticamente a si mismo con el fin de realizar tareas complejas que no podrían ejecutar con una programación clásica basada en reglas. De esta forma se pueden consolidar una automatización que solo el ser humano es capaz de realizar. “Las redes neuronales, son neuronas conectadas una tras otra de forma jerárquica, de modo análogo con elementos simples, estas tratan de interactuar con los fenómenos de la realidad de la misma manera que un procedimiento nervioso biológico lo hace”. (Raquel & Fernández, 2018). es decir, que está formado por un conjunto de nodos o neuronas artificiales conectadas entre sí y que son capaces de transmitir señales entrada y concluir con la generación de una salida.

En la actualidad se puede manifestar que las redes neuronales logran aprender generando un proceso de aprendizaje basado en experiencias anteriores que pueden ser aplicados en nuevos eventos o casos.

2.2.10.1 Funcionamiento de las redes neuronales

Inicia cuando recibe los valores de entrada y cada una de estas entradas llega a un nodo llamado neurona. Las neuronas de la red están agrupadas en capas que forman la red neuronal. Cada una de las neuronas de la red posee a su vez un peso y un valor numérico, que permite modificar la entrada recibida. Los nuevos valores obtenidos salen de las neuronas y continúan su ruta por la red. Una red neuronal está compuesta por tres capas. Capa de entrada, se encargada de procesar la información que ingresa; Capa

oculta, es la encargada de procesar los datos; Capa de salida, en esta capa se generan los resultados. (Castillo, 2019)

El número de capas dependerá del diseño de la red que se haya programado y según el fin para lo cual fue creada la red, las neuronas mantienen una relación directa ya que las neuronas en la primera capa se enlazan con las neuronas de la siguiente capa. Es así como una neurona obtiene un resultado, el cual es transmitido a cada uno de los nodos de la siguiente capa, teniendo en cuenta que el resultado será ponderado dependiendo el grado de influencia que tiene el dato sobre la red de acuerdo al peso sináptico. (González, 2019)

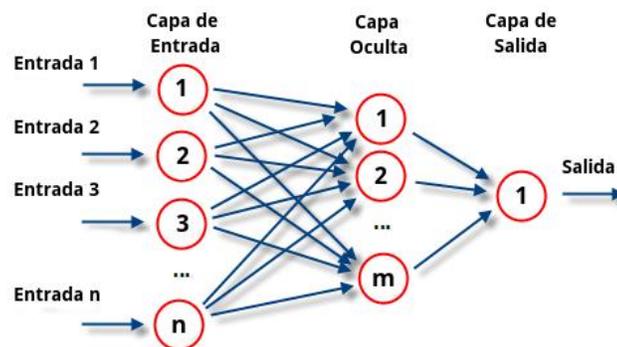


Figura 3-2. Redes neuronales con Perceptrón Multicapas
Fuente: (ATRIA Innovation, 2019)

La red neuronal utiliza un aprendizaje adquirido por lo que es necesario que exista un entrenamiento con el fin de que está pueda aprender como descubrir las conexiones lineales y no-lineales entre los datos de dos conjuntos, este proceso tiene como fin proporcionar a la red la información inicial y generar a su vez los datos de salida esperados, durante este proceso la red utiliza de forma repetitiva el algoritmo de aprendizaje el cual va cambiando la información de los pesos que inicialmente posee un valor aleatorio, hasta lograr el conjunto de pesos en la información de entrada que permitan alcanzar los objetivos planteados. (Castillo, 2019). Para lo cual se utiliza un algoritmo de aprendizaje.

2.2.10.2 Algoritmo de aprendizaje

El algoritmo de aprendizaje es un componente importante dentro de la red neuronal, este permite modificar y adecuar el valor de los pesos, mediante la ejecución de datos a través de varias capas de algoritmos de redes neuronales, las cuales pasan a una representación simplificada de los datos a la siguiente capa. Estos algoritmos aprenden progresivamente sobre la imagen a medida que pasa por cada capa de red neuronal. En donde las primeras capas aprenden a detectar características de bajo nivel como

los bordes, y las capas posteriores combinan las características de las capas anteriores en una representación holística.

Para poder realizar la programación de una red neuronal, se puede considerar dos alternativas: (González, 2019, pág. 2)

- Cambiando las fuerzas de estas interconexiones.
- Alterando las estructuras de interconexión entre las células.

2.2.11 Tipos de redes neuronales

En la actualidad se considera el reconocimiento de patrones, para poder definir los tipos de redes neuronales, dando paso a los siguientes modelos de redes neuronales como: (González, 2019, pág. 4)

- Self-Organizing-Map (SOM)/Topology-Preserving-Map (TPM): Fue creado Teuvo Kohonen, en el año de 1980, con la finalidad de realizar mapas de características básicas de los datos aprendidos.
- Backpropagation: Fue creado por Paul Werbos, David Parker y David Rumelhart, en el año de 1985, con el objeto de crear un tipo de red de aprendizaje supervisado, que utiliza un ciclo de propagación y adaptación de dos fases. En donde se aplico un patrón a la entrada de la red como estímulo, este se propaga desde la primera capa a través de las capas superiores de la red, hasta generar una salida. (Cornejo, 2008)
- Máquinas de Boltzman y Cauchy: Fue creado por Jeffrey Hinton, Terry Sejnowski, en el año de 1986, son redes simples que se enfocan en representar patrones de manera óptima y se utilizan para realizar funciones de muestreo, presentan una desventaja en el periodo de aprendizaje es de larga duración,
- Teoría de la resonancia adaptativa (ART): Fue creado por Gail Carpenter y Stephen Grossberg en el año de 1986, este tipo de red es sofisticada pero poco utilizada ya que cuenta con limitaciones de sensibilidad a la translación, distorsión y escala.

2.2.12 Elementos de una red neuronal

La Red Neuronal es un procesador paralelo que se enfoca en reproducir el comportamiento de una neurona biológica y cuenta con dispositivos elementales de proceso. Cada neurona está representada por un valor numérico o denominado estado de activación $a_i(t)$; asociado a cada unidad, existe una función de salida f_i , que transforma el estado inicial de activación en una señal de salida y_i . Esta señal es enviada

por medio de los canales de comunicación unidireccionales a otras unidades de la red; en estos canales la señal se modifica de acuerdo con la sinapsis asociada a cada uno de ellos.

Las señales moduladas que han llegado a la señal j -ésima se combinan entre ellas, generando así la entrada total. (González, 2019, pág. 5)

$$\text{Net}_j = \sum_i y_i w_{ji}$$

Considerar que una función de activación F , determina el nuevo estado de activación $a_j(t+1)$ de la neurona, considerando que la entrada total calculada y el anterior estado de activación $a_j(t)$. La dinámica que rige la actualización de los estados de las unidades, dando paso a la evolución de la red neuronal se puede dar por medio de dos tipos:

- Modo asíncrono: Las neuronas analizan, evalúan su estado continuamente, de acuerdo a la información que les va llegando, y lo hacen de forma independiente.
- Modo síncrono. La información llega de manera continua, pero los cambios se realizan simultáneamente, simulando a un reloj interno que les permite cambiar su estado.

El aprendizaje de la red neuronal artificial se encuentra en los pesos de las conexiones entre neuronas, este proceso de aprendizaje implica cierto número de cambios en estas conexiones. En conclusión, se puede mencionar que se aprende modificando los valores de los pesos de la red. Considerando que el funcionamiento de una red depende del número de neuronas que disponga y de cómo estén conectadas entre sí, cada modelo dispone de sus propias técnicas de aprendizaje. (González, 2019, pág. 5)

2.2.12.1 Funciones de activación.

Las funciones de activación se enfocan en limitar el rango de salida de la neurona, este puede ser lineal o no lineal, están en función del problema investigado y se genera en base al criterio del investigador en donde se cimentará las pruebas de ensayo y error, en la velocidad y precisión requerida; y del algoritmo de aprendizaje seleccionado. Los rangos de la función de activación utilizada enmarcan si es necesario escalar o transformar los datos de entrada para ajustarlos a los rangos requeridos por la investigación

La función de activación logística, es la más utilizada debido a las características de derivación, que permiten resolver problemas de predicción. La función de activación logística está compuesta por una amplia parte lineal y así logra máxima velocidad del entrenamiento y aproximación oportuna a los

resultados deseados, en efecto la función logística es de uso común porque su derivada es una de las más fáciles de resolver (Castillo, 2019).

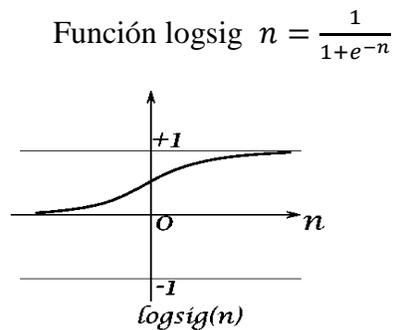


Figura 4-2. Función de activación logsig
 Fuente: (The MathWorks Inc, 2018)

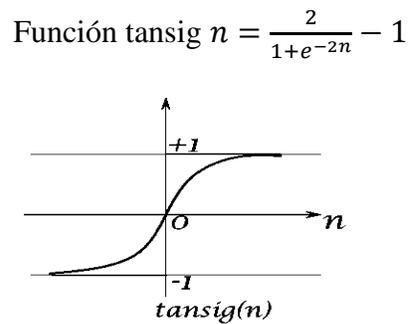


Figura 5-2. Función de activación tansig
 Fuente: (The MathWorks Inc, 2018)

2.2.13 Programas informáticos

Hoy en día se puede mencionar que los programas informáticos son un “conjunto de instrucciones que persiguen como fin que las computadoras realicen una función o tareas específicas, siendo estos conjuntos de instrucciones parte de una serie de avances que coadyuvan en el desarrollo de las comunidades y que tienden a estar dirigidas al crecimiento de un país” (Zuñiga, 2018). Es decir que un programa informático, es una secuencia de instrucciones, escritas que permiten ejecutar una tarea específica en un computador, en donde los programadores emiten la codificación de fuente para que se pueda ejecutar dicha tarea.

2.2.13.1 MATLAB

MATLAB es un lenguaje de alto nivel que incluye funciones matemáticas que permite resolver problemas científicos y de ingeniería. Puede generar resultados inmediatos ejecutando los comandos de uno en uno de forma dinámica e interactiva. Además, MATLAB también proporciona características de los lenguajes de programación tradicionales, incluido el control de flujo, el manejo de errores y la programación orientada a objetos (OOP). MATLAB® para analizar y diseñar los sistemas y productos que transforman nuestro mundo. MATLAB está presente en sistemas de seguridad activa de automóviles, naves espaciales interplanetarias, dispositivos de monitorización de la salud, redes eléctricas inteligentes y redes móviles LTE. Se utiliza para aprendizaje automático, procesamiento de señales, procesamiento de imágenes, visión artificial, comunicaciones, finanzas computacionales, diseño de control, robótica y muchos otros campos.

La plataforma de MATLAB hoy en día está enfocada en resolver problemas de ingeniería y científicos. El lenguaje de MATLAB, se basa en matrices, es la forma más natural del mundo para expresar las matemáticas computacionales. esta plataforma cuenta con gráficos integrados que facilitan la visualización de los datos y la obtención de información a partir de ellos. (MultiON Consulting S.A., 2021). Este programa informático permite ejecutar un análisis de los conjuntos de datos de mayor tamaño y escalar a clústers y nubes. El código MATLAB se puede relacionar e integrar con otros lenguajes, lo que le permite desplegar algoritmos y aplicaciones en sistemas web, empresariales o de producción.

MATLAB es una herramienta de computación que permite resolver problemas matemáticos y de cálculo matricial. Las principales funciones y comandos internos del programa de MATLAB son:

- Clear all, clc, syms, format short, fprintf, input, length, plot, grid on, bucle for, expand, ezplot, hold on, polyfit, polyval, entre otros. (Moore, 2018)

Matlab es un software utilizado para métodos numéricos, que permite la implementación de código propio, es usado por su compatibilidad con los sistemas operativos: Windows, Linux, Unix, etc., este software dispone de un proceso integrado, para simular e interpretar diferentes tipos de IDE. (Castillo, 2019). Es un software de código no libre, permite realizar cálculos matemáticos, su lógica se basa en vectores y matrices, esto ayuda a trabajar con un conjunto más amplio de números, por ejemplo: reales, complejos, enteros, etc. También permite la interacción con caracteres especiales, cadena de caracteres. Matlab es un lenguaje de alto rendimiento en los cómputos técnicos. Una de las ventajas de Matlab es que es útil para construir y reusar herramientas según la necesidad, dependiendo de la necesidad que se

presente para programar, se puede crear sencillamente funciones propias y programas especiales que son conocidos como M-archivos en código. (Buitrago & Jiménez, 2022)

CAPÍTULO III

3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

Para el desarrollo de la investigación se consideró la siguiente metodología.

3.1. Diseño de la investigación

El diseño de la investigación es de tipo cuantitativo ya que las variables se analizarán dentro de un intervalo de análisis y su procesamiento permitirán concluir en la validez y factibilidad del diseño del modelo matemático.

3.2. Método y enfoque de la investigación

La metodología es analítica considerando el cómo primer paso el análisis de las fases del desarrollo de la investigación, y además es objetiva debido a que se considera información de fenómenos físicos de la realidad, la investigación se enfoca en una visión práctica ya que el diseño del modelo matemático permitirá generar estrategias y resultados reales que beneficiaran al desarrollo y crecimiento adecuado del cultivo de brócoli.

Método cuantitativo: La investigación se enfoca en la utilización de las ciencias exactas, debido a que se considerarán datos cuantitativos, los cuales permitirán dimensionar y determinar el comportamiento del crecimiento del brócoli cultivado en un invernadero y como los componentes de los factores de producción se relacionan en el proceso de producción.

3.3. Población de estudio

El invernadero Freire cuenta con una capacidad de 3300 floretes de brócoli aproximadamente.

3.4. Muestra de estudio

Para realizar el entrenamiento de la red neuronal Perceptrón se tomará una muestra de 345 floretes de brócoli.

3.5. Técnica de recolección de datos

La técnica que se utilizará para la recolección de datos será de campo ya que se debe analizar el crecimiento del brócoli en cada una de sus etapas. Considerando además los registros históricos del crecimiento del brócoli con los que cuenta el invernadero.

3.6. Diseño e implementación del experimento

El trabajo se realizó en el invernadero 1 de la Finca Freire en un área de 1.40ha. Esta se encuentra ubicada en el cantón Latacunga Provincia Cotopaxi durante 12 semanas en el periodo comprendido entre enero y marzo 2022, el clima que predomina la región es frío y poco húmedo. La temperatura usual en el sector bordea los 19 °C. El pH del agua utilizada para el regadío es de 5.6. La característica del suelo es que presenta arcilla y arena. Para el sembrío se realizan caballones separados entre sí de 0.8 a 1 m, dependiendo el desarrollo de la variedad que se va a cultivar. Para el desarrollo de la investigación se toma una hilera como cama, el brócoli se encuentra separado 12 cm del siguiente. La producción cada periodo es de 45.000 unidades que exportan principalmente a Japón, Estados Unidos, Unión Europea etc.

3.7. Características del área experimental

Largo de parcela	102.5 m
Ancho de parcela	0.90 m
Área de parcela	92.25 m
Área total del experimento	6x6 m
Número de brócoli legacy	250 u



Figura 1-3. Hacienda Freire, 2022

3.8. Ciclo Vegetativo

En ese espacio se desarrolla un análisis breve de los parámetros importantes del ciclo vegetativo, los nutrientes que debe poseer para la siembra del brócoli legacy. (ppm, partes por millón)

- Nitrógeno 512 ppm
- Fósforo 96 ppm

- Potasio 416 ppm
- Calcio 496 ppm
- Azufre 108 ppm
- Temperatura 25°C
- pH 6.8

El boro es uno de los nutrientes necesario para el desarrollo de la pella, una deficiencia de este mineral podría tener un desarrollo no apto para exportación. Ya que esta afectación se evidencia en las pellas y yemas descoloridas.

El brócoli legacy es exigente en potasio y también lo es en boro; al no tener las propiedades suficientes para su crecimiento el suelo termina pudriendo y los insectos del suelo al no tener los abonos suficientes termina comiéndosela semilla o el vegetal que se esté brotando. Para los suelos ácidos conviene utilizar abonos alcalinos para poder elevar un poco el pH con el fin de evitar el desarrollo de la enfermedad denominada “hernia”.

3.9. Condiciones de Cultivo

En la siguiente tabla se evidencia los dos escenarios que se tomaron en consideración para el desarrollo de la investigación. Estos minerales son de suma importancia para el crecimiento y desarrollo adecuado del brócoli legacy, siendo así un producto de exportación.

Estos minerales son colocados en el suelo para tener un adecuado escenario de cultivo.

Tabla 1-3: Minerales ppm – Camas

Míneral	Variable	1 cama	2 cama	3 cama
Nitrógeno	Nit	512	512	512
Fósforo	Fos	96	96	96
Potasio	Pot	416	416	416
Calcio	Cal	496	96	496
Azufre	Azu	108	108	108
Hierro	Hie	0,2	0,2	0,2
Zinc	Zinc	0,88	0,88	0,88
Cobre	Cob	0,56	0,56	0,56
pH	pH	6,8	6,8	4,8
Temperatura	Tem	25	25	25

Fuente: Propietario Finca

Elaborado por: Castillo Jessica, 2022

El estudio experimental desarrollado en la finca Freire, invernadero 1, permite identificar el desarrollo del brócoli legacy al momento de variar un parámetro químico, esto nos da el comportamiento al momento de crecer en los parámetros: de alto del tallo, diámetro de pella.

Es importante recalcar que los suelos fértiles, de textura media, profundos y con buen drenaje, son óptimos para su cultivo. Asimismo, es conveniente que el suelo posea una adecuada capacidad de retención de agua y un buen nivel de materia orgánica. Otras características de importancia tales como pH neutro y la ausencia de salinidad favorecen la producción del brócoli legacy.

3.10. Análisis de Datos

En la siguiente tabla se evidencia los datos obtenidos en la investigación desarrollada en la Finca Freire, invernadero 1 del crecimiento del brócoli legacy con los diferentes químicos, estos son usados para la siembra del producto.

Tabla 2-3: Datos de Crecimiento del brócoli legacy en diversos escenarios.

Semana			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Escenario 1	Tallo	Alto	5,6	8,6	12,5	16,8	20	22,7	27,9	32,8	36,7	41	44,8	53,8
	Florete	Diámetro	0	0	0	0	0	0	0	0	5,1	9,7	13,8	17,4
Escenario 2	Tallo	Alto	5,3	7	10	12	15,2	17	20,2	23	26,2	28	32	32,5
	Florete	Diámetro	0	0	0	0	0	0	0	0,7	2	2,5	4,8	5,1
Escenario 3	Tallo	Alto	6	9	10	11.3	12	14.2	16.7	18	21.5	23.4	24.2	24,7
	Florete	Diámetro	0	0	0	0	0	0	0	3	4.1	4,7	5,4	6,1

Fuente: Datos medidos

Elaborado por: Castillo Jessica, 2022

Se puede evidenciar los diferentes comportamientos del brócoli legacy al momento de modificar un químico. La unidad de medida es el cm.

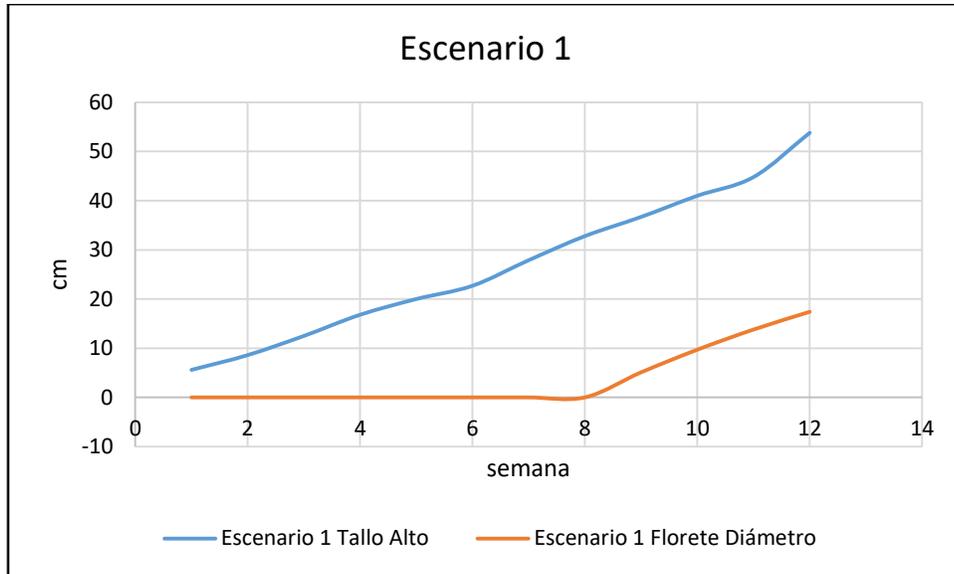


Figura 2-3. Crecimiento del Alto del tallo y diámetro del florete.

En el escenario 1: el crecimiento del brócoli legacy en la primera cama se mide cada semana, en este escenario se demuestra que con la cantidad optima de nutrientes el brócoli crece con normalidad. Se observó que el tamaño del tallo es el adecuado y el diámetro del florete es normal, entonces el brócoli legacy está listo para el corte y seguir con el proceso de exportación.

En la Figura se evidencia que el brócoli legacy obtuvo un tamaño promedio de 53,8 cm durante



Figura 3-3. Escenario 1

La tendencia del crecimiento del brócoli legacy con respecto al alto del tallo y diámetro del florete en los diversos escenarios se evidencia en la Figura 8.

En el escenario 2. El comportamiento del crecimiento al momento de variar el calcio, al momento de medir se evidencia que al colocar las mismas cantidades de minerales que en el escenario 1, excepto la cantidad de calcio, se vuelve el tallo delgado en la Tabla se evidencia que llega a 21.5cm de altura y un diámetro de florete de 5.1



Figura: 3-3. Crecimiento modificado el calcio, escenario 2

En el escenario 3. El crecimiento del brócoli legacy en la cama 3 se mide cada semana, los resultados que se obtiene después de ubicar la misma cantidad de nutrientes excepto el pH. Se puede evidenciar que el crecimiento del brócoli con respecto a la altura del tallo es de 24,7cm y con respecto al diámetro del florete es de 6,1. En la figura 4-3 se puede evidenciar el comportamiento del crecimiento del brócoli con un pH menor que el que se necesita para un mejor desarrollo.



Figura 4-3. Crecimiento modificado el pH, escenario 3

3.11. Modelo Matemático del crecimiento del brócoli legacy

Para el desarrollo del modelo matemático de la predicción del crecimiento del brócoli legacy, se usó la Redes Neuronal Perceptron Multicapa, esta red es una de las más usadas para predecir cualquier tipo de comportamiento de fenómenos físicos, ya que por su utilidad y eficiencia al momento de identificar patrones y dificultades de clasificación la hace eficiente ante para cualquier tipo de problema de predicción. En la Figura se muestra la arquitectura de la Red Neuronal Perceptron.

La ecuación que reina esta estructura es:

$$a_n = f(Wp + b) \quad (1)$$

Dónde:

a_n representa las salidas de la Red Neuronal

f representa la función de activación que se va a utilizar

W representa la intensidad o los pesos que tienen cada una de las entradas

p representa los parametros de entrada de la Red Neuronal

b representa una entrada a cada una delas neuronas de la capa oculta.

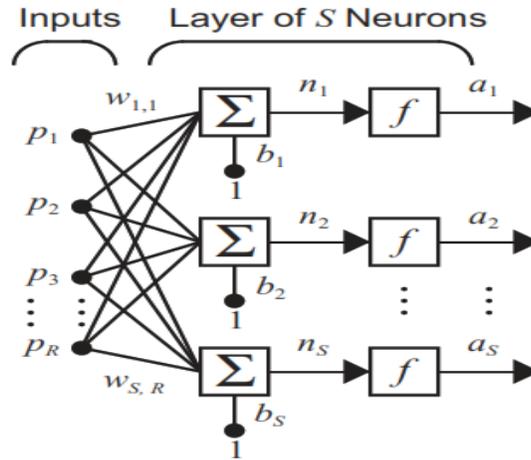


Figura 5-3. Arquitectura Red Neuronal Perceptron

En la figura se muestran todos los parámetros con los que cuenta la Red Neuronal Perceptron en el que $p_1, p_2, p_3, \dots, p_R$ representan los parámetros de entrada, tanto que el subíndice R es el número total entradas, para obtener el siguiente nodo, se realiza la suma ponderada de todas las entradas por sus pesos (W), los pesos es el conocimiento o la intensidad con la que cada una de las entradas afecta al resultado final.

En la capa ocupa existe una conexión directa llamada BIOS o SESGO, este parámetro cuenta con un valor de 1 al iniciarse y ayuda a mejorar la clasificación de la información, este se suma directamente a la salida de cada neurona obteniendo así un n_1 , de esta salida se obtiene una función lineal que no es la más adecuada para la predicción, por eso se usa las funciones de activación que ayudan a dar forma y elegir bien los datos, estas funciones convierten en no lineales a las nuevas funciones que obtuvimos como salida n_1 . Estas se convierten en una nueva entrada para la siguiente capa.

Para modelar lo que son comportamientos inteligentes, uno de los métodos más usados son las redes neuronales, usualmente cuando hablamos de estructuras avanzadas la complejidad de estos sistemas esta dado por la interacción de partes simples conjuntamente trabajando. En el sistema neuronal artificial estos parámetros son conocidos como neuronas.

La neurona es el parámetro base del proceso de las redes neuronales, estas cuentan con conexiones de entradas similares a las neuronas biológicas, en el desarrollo de la predicción del crecimiento del brócoli se establecieron 12 parámetros de entrada, estos actúan como estímulos externos que se enumeran en la siguiente tabla.

Tabla 3-3: Variables de entrada de la Red Neuronal

Entradas	Unidades
Ni (Nitrógeno)	
Fo (Fosforo)	
Po (Potasio)	
Ca (Calcio)	Partes por millón (ppm)
Az (Azufre)	
Hi (Hierro)	
Zi (Zinc)	
Co (Cobre)	
Te (Temperatura)	Grados Celsius
PH	índice de PH
Hu (humedad)	% de Humedad
Días	cantidad de días de crecimiento (entero)

Elaborado por: Castillo Jessica, 2022

Fuente: Datos

Los parámetros de la tabla son los nutrientes que el brócoli necesita para su adecuado crecimiento, el sistema de riego se lo hace frecuentemente, el cultivo de brócoli necesita altas cantidades de riego para una recomendable producción. Cuando ha llegado a su desarrollo floral, se recomienda no regar por encima de ellas para evitar las clásicas podredumbres o la aparición de hongos. Por ello es mejor el método de goteo que el de aspersión. Se pudo evidenciar que la frecuencia de riego varía en el rango de 5 - 12 días, como resultado de la práctica, con una precipitación 800 - 1200 mm.

En la arquitectura de la red neuronal se evidencia los pesos, estos parámetros son importantes para obtener la salida deseada, los pesos son asignados en orden aleatorios, y forman una matriz, en el caso de la predicción del brócoli es una matriz de 10x12.

$$W^1 = 10 \times 12$$

$$W^1 = \begin{bmatrix} W_{1,1} & W_{1,5} & \dots & W_{1,12} \\ W_{2,1} & W_{2,5} & \dots & W_{2,12} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ W_{10,1} & W_{10,5} & \dots & W_{10,12} \end{bmatrix}$$

W son parámetros que van cambiando acorde a la necesidad, por ejemplo, si un parámetro de entrada afecta más en el resultado al finalizar el aprendizaje va a tener un mayor peso.

Los pesos acompañados de los parámetros de entrada, al llegar a la neurona, genera un modelo de regresión lineal, tiene 12 entradas las mismas que definen un hiperplano, anteriormente se destacó el parámetro BIOS, este sirve para tener un control de movimiento de la función, se identifica como una conexión extra e individual al nodo o neurona, donde este parámetro se fija con un valor de 1, y que se puede modificar dependiendo los requerimientos de la red.

El tamaño de la matriz generada del parámetro sesgo es de:

$$b_1 = 4 \times 1$$

$$b_2 = 10 \times 1$$

El siguiente paso se da en la capa oculta, dónde se usa 10 nodos o neuronas, estas neuronas reciben las entradas de la primera capa, por lo tanto, recibieron datos de 12 conexiones, y la información resultante se envía a la siguiente capa que genera dos salidas, el diámetro del florete y el alto del tallo del brócoli legacy.

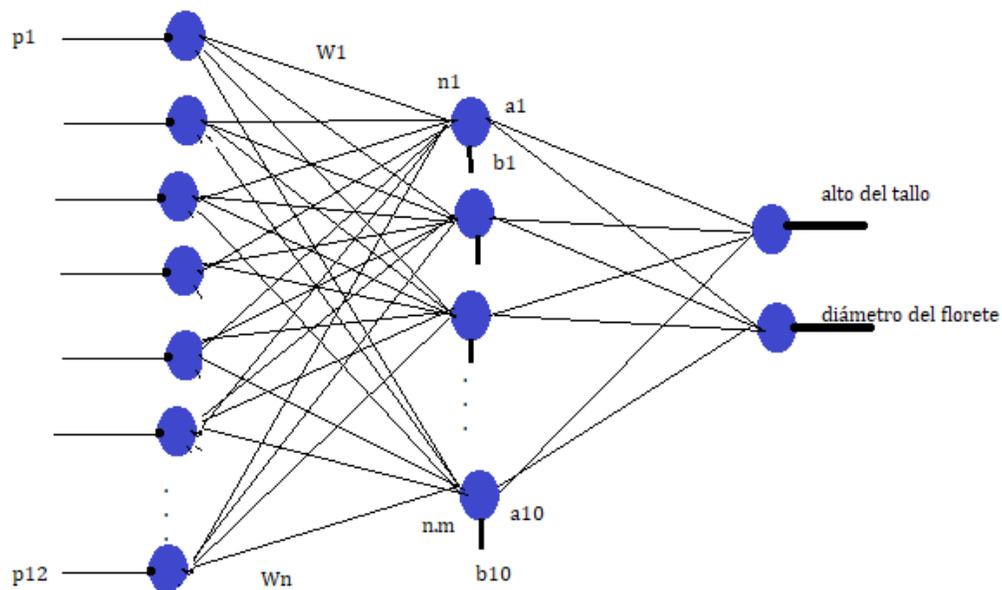


Figura 6-3. Arquitectura de la Red del crecimiento del brócoli legacy

Como se muestra en la figura la Red Neuronal Perceptron cuenta con 3 capas, la primera capa formada por 12 nodos o neuronas, la segunda capa contiene 10 neuronas y la última capa dos neuronas, cada capa recibe información procesada anteriormente, el conocimiento adquirido por la red es jerárquico.

Cada vez que se añaden más capas a la red, quiere decir que el aprendizaje es mucho más complejo, a este se denomina el Deep Learning, aquí las funciones de activación cumplen un papel importante. Estas funciones son el último componente en la estructura de la red para formar el modelo matemático. Las funciones de activación, son las encargadas de deformar el resultado, añadiendo distorsiones no-lineales, esto ayuda a tener un nivel efectivo de la sistematización de las neuronas, para lo cual se usa las funciones Logsig y Tansig.

Nombre	Relación entrada/salida	Icono	Función en Matlab
Log – Sigmoid	$a = \frac{1}{1 + e^{-n}}$		logsig
Hyperbolic Tangent Sigmoid	$a = \frac{e^n - e^{-n}}{e^n + e^{-n}}$		tansig

Figura 7-3. Funciones de activación o Transferencia

En la siguiente figura se observa la estructura definitiva de la Red Neuronal Perceptron para predecir el comportamiento del brócoli legacy, este modelo cuenta con 3 capas, en la primera capa se encuentran 12 parámetros de entrada, en la capa oculta cuenta con 10 neuronas y en la capa de salida se tiene 2 nodos, el primero da como resultado el alto del tallo y el segundo el diámetro del florete estos del brócoli legacy.

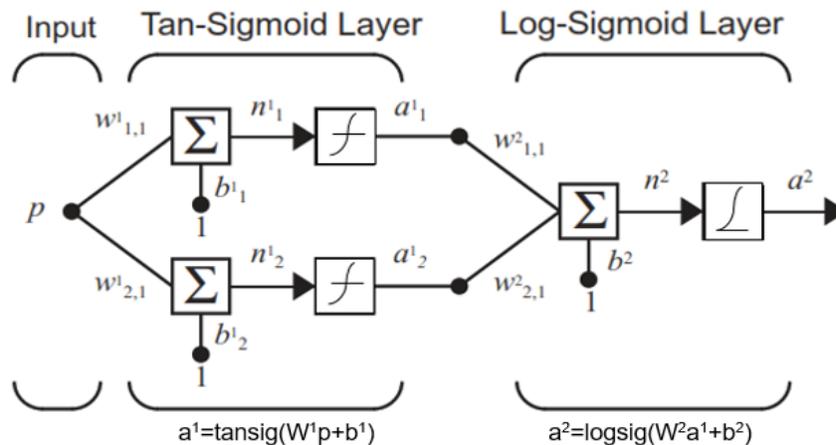


Figura 8-3. Estructura de la RNP, predicción del crecimiento del brócoli legacy.

Lo importante e innovador de esta investigación es la metodología del algoritmo de aprendizaje, Backpropagation (BP) traducido es una retro propagación, el cual actúa cada vez que cada vez que la red genera procesos con los parámetros de entrada para obtener la información de salida En la red neuronal Perceptron el aprendizaje se dio en 1000 épocas, con un valor de tolerancia de 0,01 así el error converge a lo deseado.

Con toda la información descrita anteriormente, se obtiene la ecuación de la predicción del crecimiento del brócoli.

3.11.1. Ecuación de predicción del crecimiento del Brócoli Legacy

$$a = \text{logsig}(W_2(\text{tansig}(W_1p + b_1) + b_2)) \quad (2)$$

Donde:

P = valores entrada

a = salida de la red

T = valores deseados

$f(e) = T - a$

Optimización

Criterio ↗

Optimizador

La derivada de la función de activación es el optimizador de esta forma se encontraron los gradientes.

$$\text{tansig}(n) = \frac{e^n - e^{-n}}{e^n + e^{-n}} \quad (3)$$

Se deriva con respecto a la variable independiente obteniendo

$$\text{tansig}(n) = 1 - (a)^2 \quad (4)$$

De la misma manera se derivada la función logsig con respecto a la variable independiente,

$$\text{logsig}(n) = \frac{1}{1 + e^{-n}} \quad (5)$$

de esta manera se obtiene

$$\text{logsig}(n) = (1 - a^2)(a^2) \quad (6)$$

Las ecuaciones 4 y 6 son ecuaciones que se usan para convertir las funciones de salida y convertirlas en funciones no-lineales

El cálculo del error cuadrático del rendimiento que se produce en cada entrada, se calcula con la siguiente fórmula 7.

$$F(x) = E[e^T e] = \frac{1}{Q} \sum_{q=1}^Q (t - a)^T (t - a) \quad (7)$$

Después de este paso se calcula los gradientes individuales, estos se promedian para así obtener el gradiente total, la actualización de los Pesos y el Bias se realiza con las siguientes fórmulas 8 y 9 respetivamente.

$$W^m(k + 1) = W^m(K) - \frac{\alpha}{Q} \sum_{q=1}^Q S_q^m (a_q^{m-1})^T \quad (8)$$

$$b^m(k + 1) = b^m(K) - \frac{\alpha}{Q} \sum_{q=1}^Q S_q^m \quad (9)$$

Estas fórmulas son de suma importancia, puesto son las que ejercitan a la Red Neuronal formando patrones de rendimiento del brócoli legacy, el trabajar con el gradiente estocástico tiene una gran ventaja puesto que llegar al punto de convergencia fue en 1000 épocas.

Para la implementación de las ecuaciones anteriores se debe calcular la sensibilidad, se usa en criterio de optimización de la función de corte, esto depende de la capa en que la neurona se encuentre.

$$S^M = -2F^M(n^M)(t - a) \quad (10)$$

En la ecuacion 10 de la sensibilidad existen dos parametros importantes, t es el el aprendizaje de la red y a es la salida de la red dando asi $(t - a)$ es el error resultante.

$F^M(n^M)$ es la diagonal de las derivadas de todas las funciones de cada una de las neuronas

$$F^M(n^M) = \begin{bmatrix} f^M(n_1^M) & 0 \dots & 0 \\ 0 & f(n_2^m) \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 \dots & f(n_{s^n}^m) \end{bmatrix}$$

Finalmente actúan las funciones de activación descritas anteriormente, es importante elegir bien, ya que cada una de estas funciones son eficientes para distintos problemas, logsig y tansig son recomendadas para usarlas al momento de predecir un fenómeno físico

En la siguiente figura se muestra el resultado del aprendizaje de la Red Neuronal, que predice el rendimiento del brócoli legacy

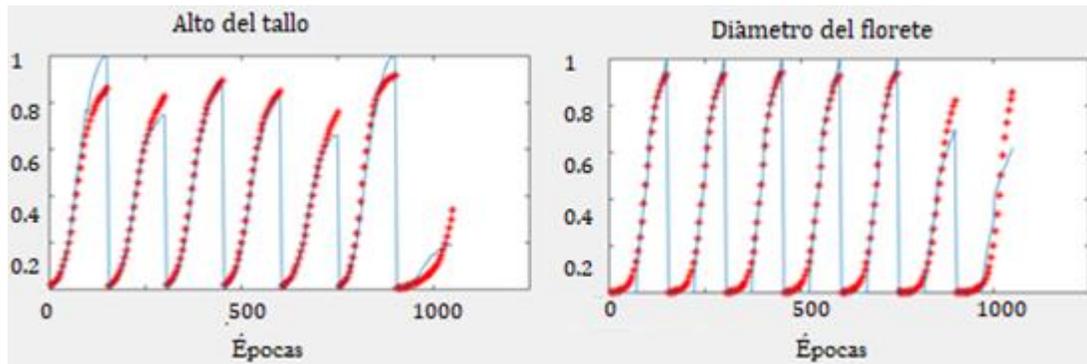


Figura 9-3. Épocas 1000

En la figura se evidencia que los valores para el entrenamiento de la red se normalizan para que la Red sea más eficiente al momento de realizar los procesos de aprendizaje lo mismo pasa con los pesos y el valor de la conexión directa que es el Bios.

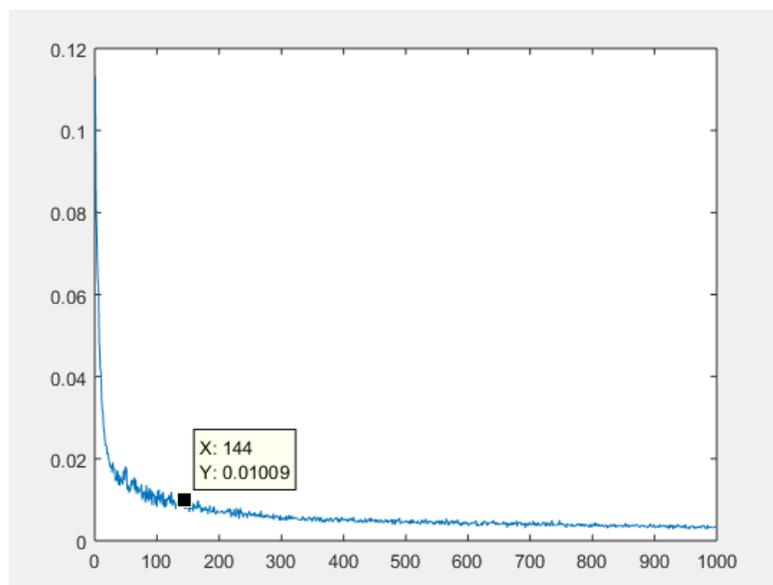


Figura 10-3. Convergencia del error a 0,01

En la fig. 10-3 se puede observar que el error converge en la época 130 aproximadamente, esto quiere decir que la utilidad de 1000 época no es necesario para que la red sea eficiente y aprenda el rendimiento del brócoli legacy.

3.12. Implementación del modelo matemático en Matlab

El software utilizado para la implementación del modelo matemático que realiza la predicción de crecimiento del brócoli legacy se realizó en el software Matlab, la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo cuenta con la licencia respetiva.

Tabla 4-3: Software Matlab

function [W1 b1 W2 b2 emedio]=neuralTrain(P,T,n1)	
Q = size(P,2);	Número de repeticiones de las pruebas
ep = 1;	
W1 = 2*ep*rand(n1,12) - ep;	Valor para escalar
b1 = 2*ep*rand(n1,1) - ep;	Pesos sinápticos iniciales y vías
W2 = 2*ep*rand(4,n1) - ep;	
b2 = 2*ep*rand(4,1) - ep;	
alfa = 0.01;	Regla de aprendizaje
for Epocas = 1:1001	Bucle finito el número de épocas
sum = [0;0;0;0];	Matriz (0,0,0,0)
for i = 1:Q	sumatorio q=1 hasta Q
q=randi(Q);	gradiente estocástico para convergencia
	Propagación hacia adelante
a1 = tansig(W1*P(:,q) + b1);	Red

<code>a2 = logsig(W2*a1 + b2);</code>	Red
	Retro propagación de la sensibilidad
<code>e = T(:,q)-a2;</code>	Error
<code>s2 = -2*diag((1-a2).^2)*e; %</code>	Derivada Sensibilidad
<code>s1 = diag((1-a1.^2))*W2*s2;</code>	
	Actualización de pesos sinápticos y vías
<code>W2 = W2 - alfa*s2*a1';</code>	
<code>b2 = b2 - alfa*s2;</code>	Actualización sesgo
<code>W1 = W1 - alfa*s1*P(:,q);</code>	
<code>b1 = b1 - alfa*s1;</code>	Error cuadrático
<code>sum = e.^2 + sum;%</code>	Fin For
<code>end</code>	Error cuadrático medio, converge a 0,01
<code>emedio(Epocas) = mean(sum)/Q;</code>	

Elaborado: Castillo Jessica 2022
Fuente Matlab

Tabla 5-3: Entrenamiento Red Neuronal

<code>load('DataInput.mat')</code>	La red tiene 3 capas 1 de entrada 1 oculta y una salida La capa de entrada no realiza ningún procesamiento
<code>Q = size(P,2);</code>	Numero de repeticiones
<code>n1 = 10;</code>	Entrenamiento de la red número de neuronas ocultas
<code>save('Pesos.mat','W1','W2','b1','b2');</code>	Se guardan los pesos y los sesgos
<code>figure, plot(emedio)</code>	Grafica el error cuadrático medio
<code>for q = 1:Q</code>	Verificación grafica de la respuesta de
<code>a(:,q) = logsig(W2*tansig(W1*P(:,q) + b1) + b2);</code>	la multicapa
<code>end</code>	Ecuación del crecimiento
<code>Figure</code>	
<code>subplot(221)</code>	
<code>plot(a(1,:), 'r*'), hold on, plot(T(1,:));</code>	
<code>title('Alto del tallo')</code>	
<code>subplot(222)</code>	

Elaborado: Castillo Jessica 2022
Fuente Matlab

Tabla 6-3: Predicción del rendimiento del brócoli

<code>load('Pesos.mat')</code>	Cargar datos de los pesos que aprendió la Red
<code>Nit= 512;</code>	Ingreso de los 12 parámetros de entrada de la primera capa
<code>Fos= 96;</code>	
<code>Pot= 416;</code>	
<code>Cal= 496;</code>	
<code>Azu= 108;</code>	
<code>Hie= 0.2;</code>	
<code>Zin= 0.88;</code>	
<code>Cob= 0.56;</code>	
<code>Tem= 25;</code>	
<code>pH= 6.8;</code>	
<code>Hu= 70;</code>	
<code>Dias=1:7:91;</code>	
<code>P=InputProcess(P);</code>	trasformas redondeo
<code>for q = 1:length(Dias)</code>	Verificación grafica de la respuesta de la Red
<code>a(:,q) =logsig(W2*tansig(W1*P(:,q) + b1) + b2);</code>	
<code>end</code>	modelo matemático del crecimiento del brócoli
<code>Figure</code>	
<code>subplot(221)</code>	

Elaborado: Castillo Jessica 2022

Fuente Matlab

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el siguiente apartado se evidencia los resultados de la implementación de la Red Neuronal.

4.1. Evaluación del modelo

A continuación, se muestran los resultados de aprendizaje de la red neuronal en los diferentes escenarios.

4.1.1. Escenario 1

Para conocer el funcionamiento de la red neuronal perceptrón, se realizó un análisis exploratorio para evaluar la eficiencia. De esta manera pudimos comparar con la predicción de la Red. A continuación, se muestra el brócoli crecimiento en el escenario 1 con valores normales.

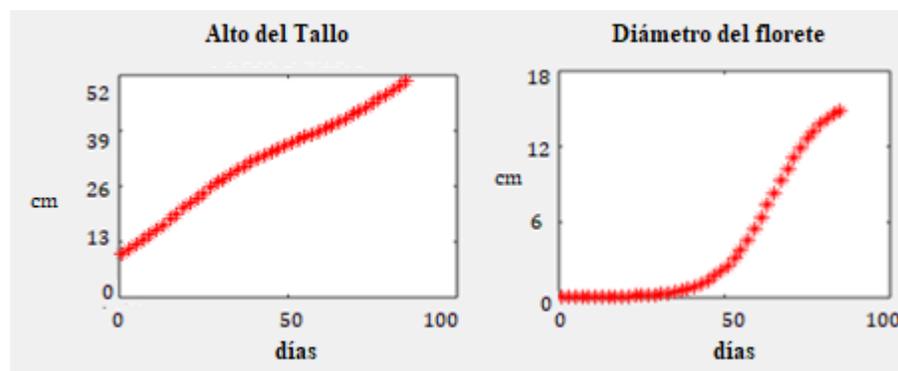


Figura 1-4. Crecimiento del brócoli con niveles óptimos de productos químicos en el suelo

La figura muestra que la predicción de la red neuronal es muy similar a los datos recogidos físicamente del escenario 1.

4.1.2. Escenario 2

En el escenario 2, el parámetro de calcio del suelo se cambió a un parámetro más bajo.

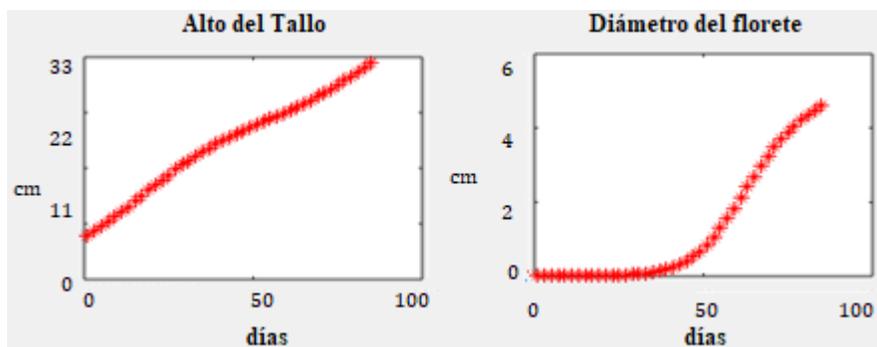


Figura 2-4. Crecimiento del brócoli en suelos con poco calcio

La escases de calcio genera perdida de la calidad en la apariencia fisicoquímica y organoléptica del cultivo, mediante la aparición de enfermedades fitosanitarias que desencadenarán pérdidas económicas, rendimientos mínimos de cultivo y tardanza en su germinación con requerimientos no deseados o no conformidades, desencadenando alteraciones en su nivel del pH, tornándolo ácido e igualmente tornándolo demasiado resistente a cambio para la mejora de su rendimiento productivo en la zona intertropical.

No obstante, déficit de calcio en el cultivo de brócoli desencadenará daños irreversibles como la formación de tallos débiles, pigmentación mínima y opaca, lo que se debe a la formación de una lámina fina de pared celular, incrementándose las posibilidades de contraer enfermedades de índole fitosanitario, cuyo surgimiento desencadenará malformaciones fenotípicas y afectarán así la pos cosecha del cultivo analizado.

4.1.3. Escenario 3

En el escenario 3, el parámetro de Ph del suelo se cambió a un parámetro más bajo.

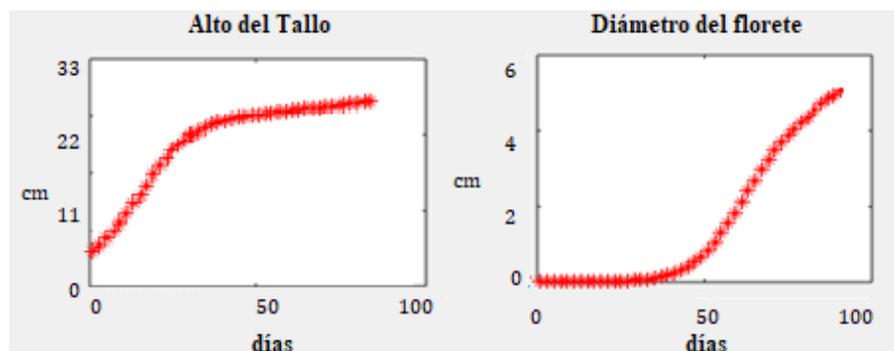


Figura 3-4. Crecimiento del brócoli en suelos ácidos

Como se observa en la figura 18, el brócoli es propenso a mostrar deficiencias de boro cuando la reacción del suelo se acerca al pH neutro. Mientras que los suelos muy ácidos pueden mostrar síntomas de deficiencias de magnesio, hasta el punto de no poder crecer en el tallo y en el florete.

4.2. Problemas derivados del Entrenamiento en el uso de RNA.

El principal desafío que se presentó al trabajar con redes neuronales artificiales es el desarrollo del algoritmo, este debe tener buen rendimiento sobre entradas nuevas que no han observadas previamente, y no solo en aquellos rendimientos para las cuales nuestro modelo fue entrenado. Esta habilidad de poder desempeñarse correctamente sobre las nuevas entradas se denomina generalización.

Típicamente, en un modelo de redes neuronales, tiene acceso a un conjunto de entrenamientos y se puede calcular alguna medida del error sobre este conjunto, denominada error de entrenamiento. Este error se define como la esperanza del error sobre una nueva entrada. Esta esperanza se toma sobre diferentes entradas posibles, extraídas a partir de la distribución de entradas que se espera que el sistema encuentre en los entrenamientos. Es usual estimar el error de generalización del modelo midiendo su rendimiento sobre un conjunto de prueba conteniendo ejemplos obtenidos separadamente del conjunto de entrenamiento.

4.2.1. *Overfitting*

A medida que se entrena y se itera en un modelo planteado, la capacidad de predicción que no puede mejorar debido al sobre entrenamiento. Matemáticamente es posible obtener una función que ajuste para casi cualquier conjunto de datos de entrenamiento. Sin embargo, el modelo gana complejidad rápidamente si se quiere minimizar al máximo el error de entrenamiento. Este aumento de la complejidad solo producirá un ajuste de peor calidad en el proceso de generación del modelo y mayor tiempo de ejecución.

4.2.2. *Underfitting*

Este caso es contrario al anterior debido a que el modelo puede no estar ajustado lo suficiente debido por falta de tiempo en los entrenamientos o la falta de obtener resultados correctos por carecer de suficientes muestras de entrenamiento. Es un problema que se puede detectar con facilidad.

4.3. Validación del Modelo

A continuación, se muestra el error que produce la Red Neuronal Perceptron al momento del aprendizaje, este error converge en 144 épocas aproximadamente, es decir no se necesitó muchas épocas para que la

RN aprenda, es importante lo que se mencionó anteriormente que no se puede sobre entrenar a la Red, y tampoco ingresar pocos datos.

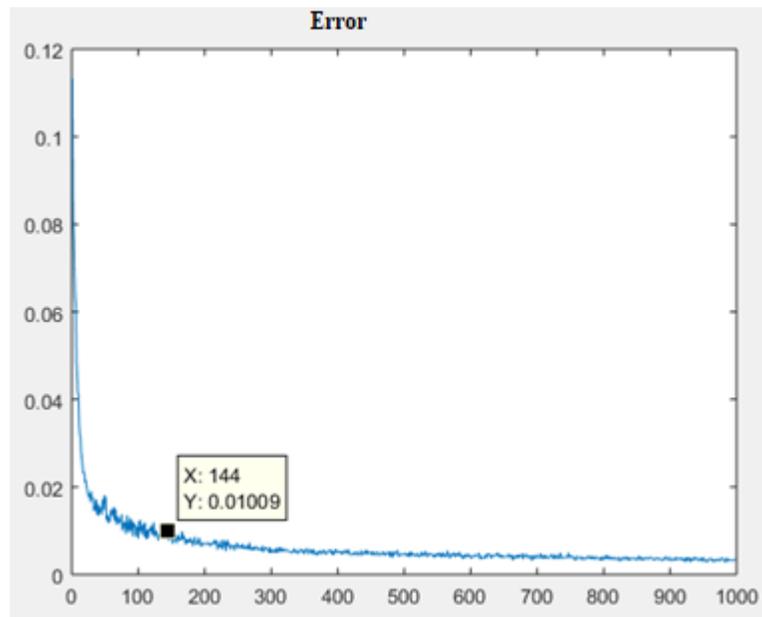


Figura 4-4. Error

En la figura 20 se identifica que el error converge aproximadamente en 144, tomando en cuenta que en épocas anteriores llega a un error de 0,01 pero no se estabiliza en el error requerido. Mientras más épocas necesite la red, mas es el tiempo de respuesta, pero hay que tener en cuenta que mientras más épocas la red tiene aproximarse a un error de 0, que es lo óptimo, ya que cada época que realiza la Red es un proceso completo del crecimiento generándose más conocimiento y menos error.

4.4. Error Medio Absoluto Porcentual (Mean Absolute Percentage Error - MAPE)

Es el promedio de los errores porcentuales absolutos expresado en términos porcentuales.

$$MAPE = \sum_{i=1}^N \left| \frac{y_i - \hat{y}}{y_i} \right| \times 100\% \quad (11)$$

y_i = valor histórico real de la variable independiente

\hat{y} = Valor estimado de la variable independiente

En la figura 21 se muestra el comportamiento del brócoli legacy con sus valores de crecimiento, estos datos obtenidos ayudan encontrar el Error Medio Absoluto Porcentual, con eso se valida el modelo matemático la Red Neuronal Preceptron Multicapa, implementado en el software Matlab.

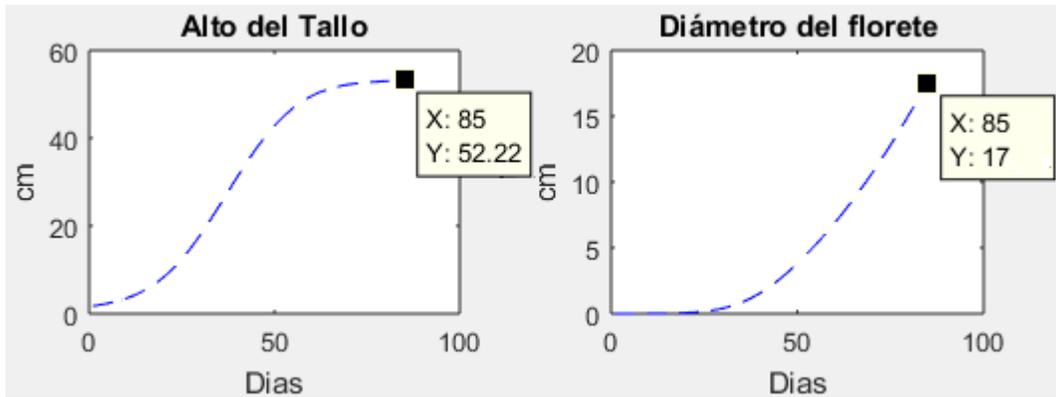


Figura 5-4. Escenario 1 con valores obtenidos en RN.

Para comprobar el Error Medio Absoluto Porcentual se usa la fórmula 11 anteriormente citada.

$$MAPE = \left| \frac{53.8 - 52.22}{53.8} \right| \times 100\%$$

$$MAPE = \left| \frac{1.58}{53.8} \right| \times 100\%$$

$$MAPE = |0.029368| \times 100\%$$

$$MAPE = 2.936\%$$

Como se puede observar el resultado da que el Error Medio Absoluto Porcentual es del 3% aproximadamente, dando, así como resultado que el aprendizaje de la Red Neuronal es eficiente.

4.5. Escenario 4

En el escenario 4, el parámetro del Hierro se disminuyó a 0.1, el comportamiento del brócoli legacy se presenta en la figura 22.

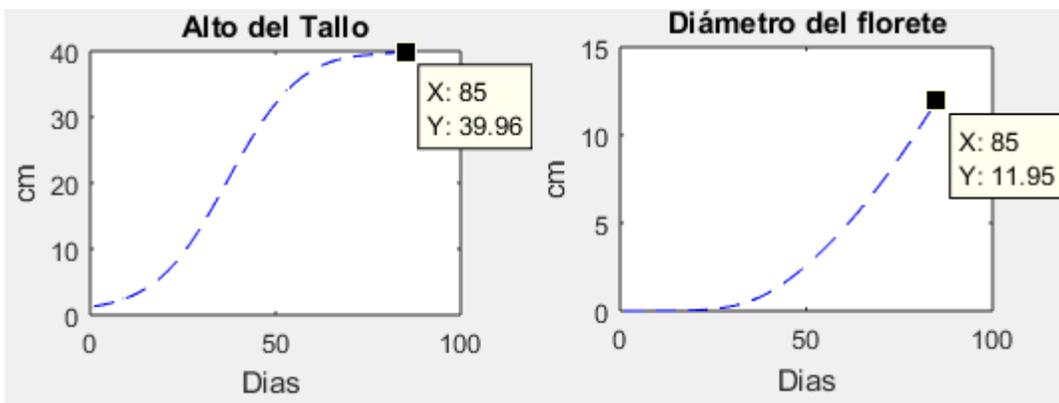


Figura 6-4. Predicción de la RN.

El brócoli (Brassica) cuando carece del hierro en cantidades fuera de los rangos aceptables, originan pérdidas tanto estructurales como funcionales, limitando básicamente sus características metabólicas, mínimos rendimientos productivos, densidades de siembras deficientes y en su composición se afectará el transporte de macro y micronutrientes, lo cual afectará la calidad final de dicho producto.

Así mismo, la ausencia de hierro generará malformación fenotípica en los tallos porque se tornarán huecos, desencadenando además una inapropiada circulación de savia bruta y elaborada, lo cual torna a dicho cultivo como una hortaliza bastante débil, con hojas pequeñas e igualmente se presentan retrasos en sus procesos germinativos, afectándose también en el crecimiento del tallo como del florete afectándolo permanentemente, afectando su pH e incluyendo malformación tanto en sus raíces y también hojas, generándose pérdidas innumerables entorno a la calidad de esta primordial hortaliza cuyas ventajas nutricionales son trascendentales para los consumidores finales a nivel global

4.6. Comprobación de la Hipótesis

En el escenario 5, el parámetro del calcio se aumentó a 501ppm, el comportamiento del brócoli legacy se presenta en la figura 23.

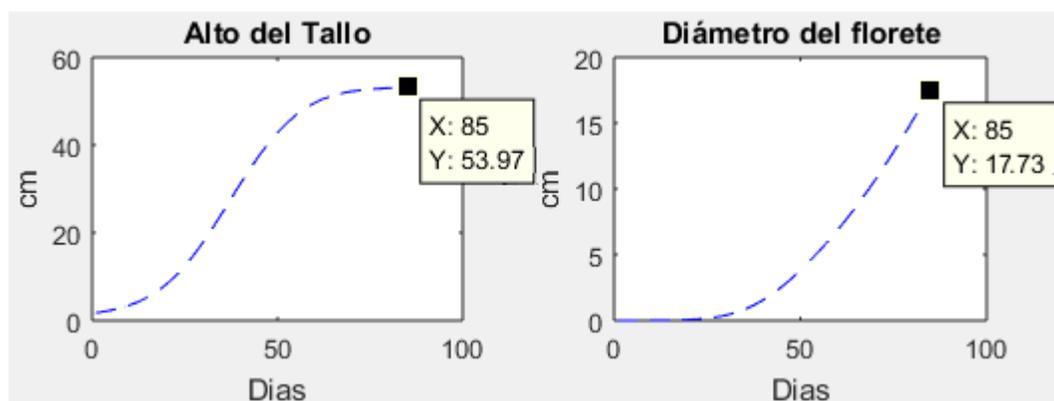


Figura 7-4. Comprobación hipótesis

Como se puede evidenciar en la figura 23 el crecimiento del alto del tallo y del diámetro del florete superan las expectativas de la producción, teniendo en cuenta que se aumentó el calcio a 501, aumenta un porcentaje en el crecimiento del alto del tallo en 0.19 y del diámetro del florete en 0.33. La herramienta informática ayuda a la toma de decisiones, evidenciando mejoras en la predicción de la red neuronal, al momento de aumentar la porción del calcio.

CONCLUSIONES

- Al realizar el estudio investigativo con la ayuda de varias referencias bibliográficas relacionadas con la predicción, se desarrolló completamente una herramienta informática en base al lenguaje Matlab que ayuda a la predicción del crecimiento del brócoli legacy basado en redes neuronales artificiales.
- Al desarrollar un análisis completo de toda la base de datos recolectados del crecimiento del brócoli legacy, se identificó las variables externas que inciden en el crecimiento, con esta idea se define la aplicación e implementación de la red neuronal artificial.
- El diseño del algoritmo para la predicción del crecimiento del brócoli legacy, se ha creado una red neuronal multicapa, la estructura de la RNA está formada con 12 neuronas de entrada, una capa oculta la cual está compuesta por 10 neuronas y dos neuronas de salida.
- La precisión y exactitud del modelo de red neuronal artificial esté ligado a la configuración de la red y el tiempo de entrenamiento, en la actualidad no existen algoritmos exactos para lograr encontrar una mejor exactitud, el modelo matemático arrojó un error 2.936% que se encuentra en el margen de aceptación.

RECOMENDACIONES

- Es recomendable elegir bien los parámetros que afectan el fenómeno físico en su desarrollo, así la predicción con la red neuronal es más eficiente.
- En desarrollo del brócoli está siendo revisado cada mes después del cultivo por si presentan cualquier enfermedad durante los 3 meses y también durante ese tiempo se fumiga 12 veces.
- Para el desarrollo de investigaciones en la producción del brócoli vienen siendo encabezados por las empresas privadas Florets Pastavi, por lo que resulta fundamental desarrollar nuevas estrategias para capacitar a los pequeños productores y de esta forma lograr que ellos también tengan acceso a estos avances investigativos en materia de cultivo, a lo que sin duda les permitirán producir más eficientemente.
- En definitivamente las exigencias de la producción, la certificación y las particularidades del mercado requieren de mayor organización para permitirles a los pequeños productores participar en este tipo de producción orgánica a gran escala.
- Las altas temperaturas si son superiores a los 26 C°, causa el exceso de nitrógeno, deficiencia del boro. Podemos prevenir monitoreando y controlando el aporte de nutrientes a la producción aplicando foliar a razón de 1,0 a 1,5 kg/ha o 20 a 35 kg/ha de Bórax

BIBLIOGRAFÍA

- Agronegocios, G. (2022). *Brócoli Legacy*. Obtenido de <http://www.agrogenesis.com/inicio/productos/semillas/hortalizas/brocoli/brocoli-hib-legacy/>
- ATRIA Innovation. (22 de Octubre de 2019). Qué son las redes neuronales y sus funciones. Obtenido de <https://www.atriainnovation.com/que-son-las-redes-neuronales-y-sus-funciones/>
- Barahona, M. (2020). *Manual de Horticultura*. El Prado: Ec,I.A.S.A.
- Bastidas, M. (Noviembre de 2017). Importancia de la producción y exportación de brócoli de la provincia de cotopaxi. Obtenido de <http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/8779/1/%C3%891%20br%C3%B2coli.pdf>
- Buitrago, S., & Jiménez, O. (2022). *¿Qué es MATLAB?* Obtenido de [https://gecousb.com.ve/guias/GECO/Computo%20Cient%C3%ADfico%201%20\(CO-2111\)/Material%20Te%C3%B3rico%20Por%20Temas%20\(CO-2111\)/CO-2111%20Tema%201%20Que%20Es%20MATLAB.pdf](https://gecousb.com.ve/guias/GECO/Computo%20Cient%C3%ADfico%201%20(CO-2111)/Material%20Te%C3%B3rico%20Por%20Temas%20(CO-2111)/CO-2111%20Tema%201%20Que%20Es%20MATLAB.pdf)
- Castillo, J. (28 de Septiembre de 2019). Modelo matemático del crecimiento de la Rosa freedom mediante Redes Neuronales.
- Cornejo, D. (2008). Aplicación del algoritmo Backpropagation de redes neuronales para determinar los niveles de morosidad en los alumnos de la Universidad Peruana Unión. *Business Intelligence*, 1-11.
- Devlin, R. (2010). *Fisiología vegetal*. Octava Edición . Barcelona: Omega.
- Espinosa, J., & Molina, E. (2019). *Acidez y encalado de los suelos*. Instituto de la potasa y el fósforo. Quito: IPNI.
- García, A. (2020). *Horticultura*. Madrid: Salvat.
- González, M. (2019). Aplicación de redes neuronales en el cálculo de sobretensiones y tasa de contorneamientos. Obtenido de https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6281/Capitulo_6a.PDF?sequence=9&isAllowed=y
- Gordon, H., & Barden, J. (2018). *Horticultura*. México: Limusa.
- Higuera, N. 1. (2018). *Horticultura*. Costa Rica: IICA.
- Huerta del Corneja. (2017). Cómo sembrar y cultivar brócoli. *La verdura del siglo XXI*. Obtenido de <https://huertadelcorneja.com/brocoli-la-verdura-del-siglo-xxi/>
- InfoJardín. (2018). Cultivo de brócoli. Obtenido de <http://www.infojardin.com/articulos/macronutrientes/micronutrientes.htm>
- Jacob, B., & Kull, H. (2017). *Fertilización, nutrición y abonado de los cultivos tropicales y subtropicales*. Holanda: Grill.

- Jiménez, F. (Junio de 2020). Redes neuronales y preprocesado de variables para modelos y sensores en bioingeniería. Obtenido de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/16702/tesisUPV3874.pdf>
- Krarup, C. (2018). Seminario sobre la producción de brócoli. Quito: Proexant Agridec.
- Limongelli, J. (2017). *El repollo y otras crucíferas de importancia en la huerta comercial*. Buenos Aires: Hemisferio Sur.
- López, I., Ramirez, A., & Rojano, A. (2018). Modelos matemáticos de hortalizas en invernadero: trascendiendo la contemplación de la dinámica de cultivos. *Chapingo serie horticultura*, 257-267.
- Maldonado, J. (jul./dic de 2017). *scielo*. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-45572017000200009
- Mirat. (21 de Noviembre de 2019). Fertilización: Nutrición vegetal. Obtenido de <http://www.mirat.com/fertilizantes/nutricion/macronutrientes/micronutrientes/htm>
- Moore, H. (2018). *MATLAB® para ingenieros*. Pearson Education Inc.
- MultiON Consulting S.A. (2022). El lenguaje del cálculo técnico. Obtenido de <https://multion.com/producto/matlab>
- Navas, J. (2018). Modelos Matemáticos. Obtenido de https://matema.ujaen.es/jnavas/web_modelos/pdf_mmb08_09/introduccion.pdf
- Novoa, P. (2020). Vademécum Agrícola del Ecuador 2007-2009 Data Power. Quito: Cámara Ecuatoriana del Libro - Núcleo de Pichincha.
- Olabe, X. B. (s.f.). Obtenido de https://ocw.ehu.es/file.php/102/redes_neuro/contenidos/pdf/libro-del-curso.pdf
- Paniagua, G. (agosto de 2015). *scielo*. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-27682015000200013&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Raquel, F., & Fernández, J. (2018). Las Redes Neuronales Artificiales. España: Netbiblo.
- Rodríguez, D., Urrego, L., Martínez, P., & Bernal, J. (2018). Evaluación preliminar de dos matrices para la inmovilización de bacterias diazotróficas y solubilizadoras de fosforo aislado de bosque alto andino cundimasqués. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- Sánchez, A., Vayas, T., Mayorga, F., & Freire, C. (Junio de 2020). *Producción De Brócoli En Ecuador*. Obtenido de <https://blogs.cedia.org.ec/obest/wp-content/uploads/sites/7/2020/12/Brocoli-en-Ecuador.pdf>
- The MathWorks Inc. (2018). *Neural Network Toolbox*. Obtenido de <http://matlab.izmiran.ru/help/toolbox/nnet/logsig.html>
- Thompson, L., & Troeh, F. (2018). Los suelos y su fertilidad. 4ta ed. México: Reverte S.A.

- Toledo, J. (Noviembre de 2020). *Cultivo del Brócoli*. Obtenido de http://repositorio.inia.gob.pe/bitstream/20.500.12955/895/1/Toledo-Cultivo_brocoli.pdf
- Universidad de Salamanca. (2018). *Redes Neuronales*. Obtenido de <http://avellano.fis.usal.es/~lalonso/RNA/index.htm>
- Valadez, A. (2018). *Producción de Hortalizas. 4a. Edición*. México: Limusa.
- Valdez, A. (2018). *Producción de hortalizas*. México: Limusa S.A.
- Víctor, V., Artega, P., Chanamé, K., & Esquivel, A. (2018). Modelamiento matemático y por redes neuronales artificiales del crecimiento de *Spirulina* sp. en fotobiorreactor con fuente de luz fluorescente e iluminación en estado sólido. *Dialnet*, 199-209.
- Vidal, J., Núñez, R., Lazcano, I., & Etchevers, J. (2018). Nutrición proteica del brócoli. *Redalyc*, 1-11.
- Vigliola, M. (2019). *Manual de horticultura*. Buenos Aires: Hemisferio Sur S.A.
- Weir, E., Stocking, R., & Barbour, M. (2019). *Botany and introduction To biology*. México: Limusa.
- Xeridia. (16 de Septiembre de 2019). *Redes Neuronales Artificiales*. Obtenido de <https://www.xeridia.com/blog/redes-neuronales-artificiales-que-son-y-como-se-entrenan-parte-i>
- Zamora, E. (2017). El cultivo del Brócoli. *Dagus Unison*, 1-18.
- Zuñiga, P. (2018). El Software y Los Programas de Computación Desarrollados Bajo Relación Laboral en el Sistema. *Redalyc*, 1316-1164.

ANEXOS

ANEXO A. Finca Freire





epoch

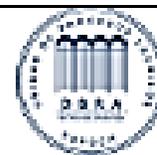
Dirección de Bibliotecas y
Recursos del Aprendizaje

**UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO Y
DOCUMENTAL**

REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 04 / 08 / 2022

INFORMACION DEL AUTOR/A (S)
Nombres – Apellidos: <i>Jessica Nataly Castillo Fiallos</i>
INFORMACION INSTITUCIONAL
Instituto de Posgrado y Educación Continua
Título a optar: <i>Magister en Matemática mención Modelación y Docencia</i>
f. Analista de Biblioteca responsable: Lic. Luis Caminos Vargas Mgs.



0087-DBRA-UPT-IPEC-2022