
GENERACIÓN Y SIMULACIÓN DE UN MODELO PARA MEJORAR LOS CRITERIOS DE RIEGO EN LOS CULTIVOS DE MINI CLAVEL DE LA SABANA DE BOGOTÁ MEDIANTE TÉCNICAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Ingrid Nathaly Villamor Medina

Juan Sebastián Sativa Gamboa

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Facultad de Ingeniería

Bogotá, Colombia

2016

GENERACIÓN Y SIMULACIÓN DE UN MODELO PARA MEJORAR LOS CRITERIOS DE RIEGO EN LOS CULTIVOS DE MINI CLAVEL DE LA SABANA DE BOGOTÁ MEDIANTE TÉCNICAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Ingrid Nathaly Villamor Medina

Juan Sebastián Sativa Gamboa

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
Ingeniero de Sistemas

Director:

PH.D, MSC. ROBERTO FERRO ESCOBAR

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Facultad de Ingeniería

Bogotá, Colombia

2016

Resumen

Con el objetivo de contribuir al uso racional del Recurso Hídrico en la Sabana de Bogotá para cultivos de mini-clavel, se ha generado y simulado un modelo basado en técnicas de inteligencia artificial (IA) que predice el valor para el siguiente día de la evapotranspiración (ET), la cual es una variable con sustento científico en la toma de decisiones de volúmenes y tiempos de riego, para un cultivo de mini-clavel variedad Rony.

Conociendo la ET del cultivo y el lixiviado obtenidos por los lisímetros de pesada, se toman mediciones comprendidas en un periodo de ciento cuatro (104) días, con las cuales se entrena el modelo generado compuesto por un Sistema Difuso, que evalúa el criterio de riego aplicado en el día en curso, y una Red Neuronal de tipo *Back Propagation*, con la que se obtienen las predicciones de ET para el día siguiente, y aplicar en base a esta ET un criterio de riego favorable. El error obtenido por el modelo es -0.27 y el valor de correlación obtenido luego de la simulación respecto a los valores reales es 0.7277

Palabras clave:

Evapotranspiración, Redes Neuronales, Lisímetro de Pesada, Riego, Inteligencia Artificial

Abstract

In order to contribute to the rational use of Water Resources in the Sabana de Bogotá for growing mini-carnation, a model has been generated and simulated based on techniques of artificial intelligence (AI) that predicts the value for the next day evapotranspiration model (ET), which is a variable with scientific support in decision-making volumes and run times for a growing variety Rony mini-carnation.

Knowing the crop ET and the leachate obtained by lysimeters weighing measurements included are taken over a period of one hundred and four (104) days, with which the generated model consisting of a fuzzy system, which evaluates the criterion irrigation trains applied in the current day and a Neuronal Network Back Propagation type, with which the ET predictions for the next day are obtained and applied based on this criterion favorable ET irrigation. The error obtained by the model is -0.27 and the correlation value obtained after the simulation compared to actual values is 0.7277

Keywords: Evapotranspiration, Neural Networks, lysimeter, irrigation, Artificial Intelligence

Contenido

Lista de figuras.....	7
Lista de tablas.....	8
Lista de Símbolos y abreviaturas.....	9
1. OBJETIVOS	13
1.1 OBJETIVO GENERAL	13
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 INTELIGENCIA ARTIFICIAL.....	14
2.2 ALGORITMO GENÉTICO.....	15
2.2.1 VENTAJAS DE LOS ALGORITMOS GENÉTICOS.....	15
2.2.2 DEBILIDADES DE LOS ALGORITMOS GENÉTICOS	16
2.3 RAZONAMIENTO BASADO EN CASOS	17
2.3.1 DESVENTAJAS DE LOS CBR.....	18
2.4 REDES NEURONALES.....	18
2.4.1 CARACTERÍSTICAS	19
2.4.2 VENTAJAS	19
2.4.3 DESVENTAJAS	20
2.5 SISTEMAS DIFUSOS.....	20
2.5.1 CARACTERÍSTICAS	21
2.5.2 VENTAJAS	21
2.5.3 DESVENTAJAS	21
2.6 APRENDIZAJE SUPERVISADO	22
2.6.1 ALGORITMO DE RETROPROPAGACIÓN DE ERRORES O BACKPROPAGATION	22
2.7 SISTEMAS EXPERTOS (SS.EE.)	24
2.8 EVAPOTRANSPIRACIÓN.....	25
2.8.1 ANTECEDENTES.....	25
2.8.2 EVAPORACIÓN	26
2.8.3 CONCEPTOS DE EVAPOTRANSPIRACIÓN	27
2.8.4 EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO DE REFERENCIA (E_{To}).....	27
2.8.5 EVAPORACIÓN DEL CULTIVO BAJO CONDICIONES ESTÁNDAR (E_{Tc})	28
2.9 TRANSPIRACIÓN.	28
2.10 MÉTODOS PARA ESTIMAR LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO DE REFERENCIA EN INVERNADEROS	29
2.11 LOS LISÍMETROS	33
2.11.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS LISÍMETROS.....	34
2.12 MODELAMIENTO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POR MEDIO DE LISÍMETROS DE PESADA.....	36
2.13 FACTORES CLIMÁTICOS Y SU RELACIÓN CON LOS CULTIVOS DE MINICLAVEL	40
2.13.1 RADIACIÓN SOLAR	40
2.13.2 TEMPERATURA DEL AIRE.....	41
2.13.3 HUMEDAD DEL AIRE	41
2.13.4 VELOCIDAD DEL VIENTO.....	41

3. METODOLOGÍA.....	43
3.1 ANÁLISIS DEL SISTEMA ACTUAL DE LISÍMETROS	43
3.2 COMPARACIÓN DE TÉCNICAS.....	44
3.3 MODELO PROPUESTO	46
4. MODELO EN MATLAB	49
4.1 SISTEMA DIFUSO.....	49
4.1.1 ENTRADAS Y SALIDAS DEL SISTEMA	49
4.1.2 REGLAS.....	51
4.1.3 EVALUACIÓN.....	53
4.2 RED NEURONAL	54
4.2.1 INPUT Y TARGET.....	54
4.2.2 REDES NEURONALES GENERADAS	55
4.2.3 DESEMPEÑO.....	56
4.2.4 ENTRENAMIENTO.....	57
4.2.5 REGRESIÓN	58
4.3 SIMULACIÓN DEL MODELO GENERADO.....	59
4.3.1 COEFICIENTE DE CORRELACIÓN PARA EL RESULTADO DE LA SIMULACIÓN	59
4.3.2 ERROR DEL MODELO	60
4.4 COMPARACIÓN RESPECTO A LOS MODELOS TEÓRICOSEXISTENTES.....	61
5. OBJETIVOS vs RESULTADOS.....	63
6. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	64
6.1 CONCLUSIONES.....	64
6.2 TRABAJO FUTURO	65

Lista de figuras

Figura 2-1: Flujo del algoritmo BP. Fuente: adaptado de Bengio (1993)	23
Figura 2-2: Proceso de evapotranspiración. Fuente: (Lavao, 2016).....	26
Figura 2-3: Esquematación de un estoma durante el proceso de transpiración (Allen et al, 2006)	29
Figura 2-4: Lisímetro de Pesada. Fuente: (Lavao. S, 2016).....	35
Figura 2-5: Instalación del Lisímetro de pesada en las camas donde se siembra clavel.....	35
Figura 2-6: Esquema del sistema analizado. Fuente: adaptado de (Lavao, 2016).....	36
Figura 2-7: Comportamiento del contenedor del Lixiviado. Fuente: González C et al (2015b)	38
Figura 2-8: Comportamiento del contenedor de la planta y sustrato. Fuente: González C. , et al (2015b)	39
Figura 2-9: Comportamiento del peso de la Planta y del Lixiviado, día 20 de Abril 2014	39
Figura 2-10: Comportamiento de la Evapotranspiración con un valor 2,45 mm, día 20 de Abril de 2014	40
Figura 3-1: Diagrama de bloques del modelo de Lógica Difusa implementado. Fuente: elaboración propia	47
Figura 3-2: Modelo de la Red Neuronal Artificial tipo Backpropagation. Fuente: elaboración propia	47
Figura 3-3: Modelo propuesto para la estimación de la EVT. Fuente: elaboración propia.....	48
Figura 4-1: Lógica difusa en la herramienta Fis Editor	49
Figura 4-2: Entrada Lixiviado	50
Figura 4-3: Rangos establecidos para la variable de entrada Evapotranspiración	50
Figura 4-4: Criterio de Clasificación	51
Figura 4-5: Definición de Reglas	52
Figura 4-6: Visor de Reglas	52
Figura 4-7: Gráfica de Superficie.....	53
Figura 4-8: Herramienta nnTool de Matlab.....	54
Figura 4-9: Primera red neuronal generada	55
Figura 4-10: Segunda red neuronal generada	55
Figura 4-11: Tercera red neuronal generada.....	55
Figura 4-12: Desempeño del la primera red neuronal.....	56
Figura 4-13: Conjunto de Patrones para el entrenamiento. Fuente: elaboración propia.....	57
Figura 4-14: Resultados del entrenamiento de la primera red neuronal	57
Figura 4-15: Resultados de regresión para la primera red neuronal	58
Figura 4-16: Comportamiento del Valor de Predicción obtenido por el Modelo Generado y el Valor Real	60

Figura 4-17: Comparación de los valores de evapotranspiración obtenidos por los modelos teóricos y el modelo generado.62

Lista de tablas

Tabla 2-1: Parámetros requeridos por las ecuaciones de evapotranspiración de referencia. .	30
Tabla 4-1: Ejemplo de serie datos evaluados por el sistema difuso.	53
Tabla 4-2: Coeficiente de Correlación del Modelo Generado y los Modelos Teóricos existentes ..	61
Tabla 6-1: Mediciones registradas para el mes de Octubre de 2013 en la finca de Marengo.	70
Tabla 6-2: Calculo de coeficiente de cultivo al utilizar la ETo obtenida por el método de Garcia-Lopez, Hargreaves, Turc y Penman para Octubre de 2013.....	71
Tabla 6-3: Mediciones registradas para el mes de Noviembre de 2013 en la finca de Marengo....	72
Tabla 6-4: Calculo de coeficiente de cultivo por método de Garcia-Lopez, Hargreaves y Turc para Noviembre	73
Tabla 6-5: Mediciones registradas para el mes de Diciembre de 2013 en la Finca de Marengo.....	74
Tabla 6-6: Calculo de coeficiente de cultivo al utilizar la Eto obtenida por método de Garcia-Lopez, Turc, Hargreaves y Penman para Diciembre.....	76
Tabla 6-7: Mediciones registradas para el mes de Enero de 2014 por la finca de Marengo.....	77
Tabla 6-8: Calculo de coeficiente de cultivo al utilizar la Eto obtenida por método de Garcia-Lopez, Hargreaves, Turc y Penman para Enero de 2014.....	78

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
ECM	Error cuadrático medio		
ET	Evapotranspiración,	<i>mm/día</i>	<i>DF</i>
ET _o	Evapotranspiración del cultivo de referencia	<i>mm/día</i>	
ET _c	Evapotranspiración real	<i>mm/día</i>	
HR _{med}	Humedad relativa media	%	<i>DF</i>
HR _{mim}	Humedad relativa mínima	%	<i>df</i>
L	Lámina de agua aplicada	<i>mm/día</i>	<i>DF</i>
R	Lámina de agua aplicada,. La precipitación sería otra de las componentes de entrada, en el caso que el cultivo sea descubierto	<i>mm/día</i>	<i>DF</i>
R _a	Radiación extraterrestre	<i>MJ/m²/día</i>	<i>DF</i>
R _n	Radiación solar neta.	<i>MJ/m²/día</i>	$R_{ns} = 0.77 * R_s$
R _s	Radiación solar medida o calculada,	<i>MJ/m²/día</i>	<i>DF</i>
T	Temperatura del aire.	<i>°C</i>	<i>DF</i>
T _{max,K}	Temperatura máxima k	<i>°C</i>	$Tmax(^{\circ}C) + 273.16$
T _{min,K} :	Temperatura mínima k	<i>°C</i>	$Tmin(^{\circ}C) + 273.16$
T _{med}	Temperatura media del aire,		
T _{max}	Temperatura máxima del aire, expresada en [°C].		<i>DF</i>
T _{min}	Temperatura mínima del aire, expresada en [°C].		<i>DF</i>
u ₂	Velocidad del viento a 2 m de altura	<i>m/s</i>	<i>DF</i>

Abreviaturas

Abreviatura	Término
<i>AG</i>	Algoritmo Genético
<i>CBR</i>	Razonamiento Basado en Casos
<i>CAQ</i>	Cascarilla de arroz quemada
<i>ET</i>	Evapotranspiración
<i>ETo</i>	Evapotranspiración de Referencia
<i>Etc</i>	Evapotranspiración de Cultivo
<i>FC</i>	Fibra de coco
<i>IA</i>	Inteligencia Artificial
<i>RMSE</i>	Raíz del error cuadrático medio
<i>RN</i>	Red Neuronal
<i>RNA</i>	Red Neuronal Artificial
<i>SSE</i>	Suma de los cuadrados del error
<i>SSEE</i>	Sistemas Expertos

Introducción

De acuerdo con el Centro Internacional de Comercio (ITC, 2015), desde el año 2010, Colombia se constituye como el segundo productor de clavel a nivel mundial después de Holanda, además produce un volumen de exportación de US\$600 millones/año, ocupando el 16 % de las exportaciones del mercado internacional y superando en volumen de producción a países productores de flores como Ecuador, Kenya y Bélgica, La participación de estos países en el mercado internacional del clavel es del 9 %, 8%, y 6%, respectivamente.

En la última década el sector floricultor ha registrado incrementos en los volúmenes de exportación e incrementos moderados en la productividad, que no necesariamente se ven traducidos en aumentos en la competitividad, dado el aumento en los costos de los insumos.

Teniendo en cuenta que el recurso hídrico es uno de los principales insumos utilizados en el sector florícola y en general para la agricultura que consume un 70% del agua fresca, (Gleick, 2013) el impacto ambiental de este consumo repercute tanto en el uso como en la disposición final del agua contaminada por plaguicidas. En este trabajo se desarrolló un modelo de estimación de la evapotranspiración de agua en cultivo de clavel basado en técnicas de inteligencia artificial. Según la FAO 56(Allen et al,2006), se conoce como evapotranspiración (ET) la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación y por otra parte mediante transpiración del cultivo. La estimación se realizará por medio de técnicas de inteligencia artificial, buscando contribuir al uso racional y eficiente de agua en la producción de Clavel variedad Rony, que impacte positivamente a nivel ambiental y económico para los productores de mini clavel en la sábana de Bogotá.

De acuerdo con Bustos (Bustos,2005) la naturaleza intrínsecamente compleja, dinámica y no lineal de los sistemas agropecuarios, ha requerido siempre las soluciones basadas en técnicas y tecnologías avanzadas, para proporcionar mayor exactitud, comprensión y soluciones apropiadas. Por lo anterior el uso de las técnicas de la inteligencia artificial como lo son las redes neuronales, los algoritmos genéticos, y bioinformática, proporcionan soluciones a los problemas en sistemas agrícolas complejos de manera eficaz. Adicionalmente la promoción de estas tecnologías, así

como una disminución de costos está promoviendo las investigaciones en el uso de la Inteligencia Artificial de diversas formas en el sector agropecuario (Bustos, 2005)

El propósito de este trabajo es diseñar y simular un modelo capaz de predecir la evapotranspiración del siguiente día, y así poder aplicar un criterio de riego favorable basado en el histórico de los datos registrados por los lisímetros de pesada. Para llevar a cabo el presente trabajo de grado se trabaja a partir del registro de masa obtenido por un sistema de lisímetros de pesada que están equipados con sistemas precisos para medir flujo de agua, estos lisímetros se encuentran instalados en un invernadero del Centro Agropecuario Marengo de la Universidad Nacional de Colombia. El registro de los lisímetros comprende los datos tomados por el contenedor de la planta y los sustratos, adicionalmente hay otro contenedor para el sistema de drenaje de plantas de mini clavel, por medio del cual se determina de una forma precisa la evapotranspiración real del cultivo.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Generar y simular un modelo para mejorar los criterios de riego en cultivo de mini clavel de la sabana de Bogotá mediante técnicas de inteligencia artificial.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar los factores climáticos y su relación con los cultivos de clavel en la sabana de Bogotá.
- Comparar técnicas de Inteligencia Artificial que permitan implementar una mejora en criterios de riego de cultivo de clavel.
- Evaluar la precisión del modelo generado, con respecto a los modelos teóricos existentes.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Los libros de texto de IA definen el campo como "el estudio y diseño de agentes inteligentes", donde un agente inteligente es un sistema que percibe su entorno y lleva a cabo acciones que maximicen sus posibilidades de éxito. John McCarthy, quien acuñó el término en 1955, lo define como "la ciencia y la ingeniería de hacer máquinas inteligentes (Business Wire, 2013).

Inteligencia Artificial, la rama de la informática que se ocupan de los programas informáticos de escritura que pueden resolver problemas de forma creativa; "Los trabajadores en IA esperan imitar o duplicar la inteligencia en las computadoras y los robots"

Ésta también se puede definir como el área de la informática que se ocupa de las formas en que se pueden hacer las computadoras para llevar a cabo las funciones cognitivas adscritas a los seres humanos. Pero esta definición no menciona el grado en que se llevan a cabo, o cómo se llevan a cabo, ni a cuales funciones se refiere.

- IA es el estudio de los modelos computacionales de comportamiento inteligente, la percepción, la cognición y la acción.
- AI es la ciencia de la exploración del espacio de posibles y reales de sistemas inteligentes.
- IA es la empresa de diseño y análisis de agentes inteligentes.
- IA es una rama de la ingeniería que se ocupa de la mecanización de las tareas que se cree que requieren inteligencia cuando es realizada por los seres humanos.

De acuerdo con (Bagnall & Zatuchna, 2005) y (Gerard & Siguard, 2001) una técnica de IA es un método que utiliza conocimiento expresado, de tal forma que represente las generalizaciones, que sea comprendido por las personas que lo proporcionan, que pueda modificarse fácilmente

para corregir errores y reflejar los cambios en el mundo y en nuestra visión del mundo, que pueda usarse en gran cantidad de situaciones aun cuando no sea totalmente preciso o completo y que pueda usarse para ayudar a superar su propio volumen, ayudando a acotar el rango de posibilidades que normalmente deben ser consideradas

2.2 ALGORITMO GENÉTICO

Algoritmo genético (AG) inicialmente llamado planes genéticos por Holland (1992), es una heurística de búsqueda que imita el proceso de evolución natural. Esta técnica pertenece a la clase más amplia de algoritmos evolutivos, y se ha utilizado principalmente en los problemas de optimización y de búsqueda. En repetidas ocasiones el algoritmo genético ha demostrado su eficacia en la solución de problemas de optimización complejos. En 1989, cuando Goldberg publicó su libro, ya se habían citado más de 70 aplicaciones exitosas.

Según Koza (1992) esta heurística se puede definir como un algoritmo matemático altamente paralelo, que transforma un grupo de objetos individuales con un valor de aptitud asociada dentro de una nuevas poblaciones por medio del principio darwiniana de la reproducción y la supervivencia de los más capaces.

El proceso general del algoritmo genético se puede resumir como sigue: La primera etapa consiste en la generación aleatoria de una población (consta de n posibles soluciones al problema propuesto). Entonces, esta población tiene que ser transformada en uno nuevo mediante la aplicación de tres operadores; operadores clásicos de cualquier algoritmo genético son la selección, cruce y mutación. Y, por último, una vez que el ciclo generacional se ha terminado, el resultado tiene que ser evaluado para detener el algoritmo o para repetir el proceso.

2.2.1 VENTAJAS DE LOS ALGORITMOS GENÉTICOS

Los algoritmos se aplican con éxito a los problemas que son difíciles de resolver usando técnicas convencionales, tales como el aprendizaje de máquina y optimización. Se observa que el AG puede proporcionar grandes ventajas siguientes (Riko & Andreja, 2006)(Vasant, 2013):

- AG puede resolver todos los problemas de optimización que se puede describir con la codificación de cromosomas.

- AG resuelve problemas proporcionando múltiples soluciones.
- AG puede manejar multidimensional, no diferencial, no continua, e incluso problemas no paramétricos.
- AG es capaz de estructurar los problemas de las simulaciones y modelos disponibles.
- AG se puede conectar fácilmente a las simulaciones y modelos que se pueden obtener.
- AG es fácil de hibridar y fácil de entender.
- AG es modular, independiente de la aplicación.
- AG es capaz de obtener respuestas siempre y mejora con el tiempo.
- AG es inherentemente paralelo y fácilmente distribuido.

2.2.2 DEBILIDADES DE LOS ALGORITMOS GENÉTICOS

Según Maxim, varias debilidades de algoritmos genéticos han notado como (Maxim,2013)(Rico & Andreja, 2006):

- El conocimiento de dominio no puede ser documentado directamente a través de la estructura de AG.
- AG requiere toda la población a trabajar (se tarda un montón de tiempo y memoria) y no puede trabajar solo bien para aplicaciones en tiempo real.
- AG no puede hacer frente a la imprecisión y la incertidumbre que se consideran el requisito básico de las aplicaciones de la vida real.
- AG sólo son capaces de resolver esos problemas cuya función de aptitud es fuerte.
- AG no puede encontrar la solución óptima mundial cada vez.
- Tiempo de respuesta de AG puede ser mayor en comparación con los métodos tradicionales de gradiente que puede obligar a la AG a aplicar para cada tiempo real aplicaciones.
- Controles en línea en el sistema de tiempo real no pueden obtener ventaja de algoritmo genético sin pruebas al menos una vez porque AG se ocupa de soluciones aleatorias y convergencia de toda la población, donde un individuo no pueden ser mejorado a la vez.

2.3 RAZONAMIENTO BASADO EN CASOS

El razonamiento basado en casos o CBR por sus siglas en inglés Case-Based Reasoning, muestran una aproximación a la resolución de problemas que realmente es la base de muchas de la toma de decisiones del hombre civilizado. La esencia es que aprendamos de la experiencia: las experiencias que otros han tenido y nuestras propias experiencias. Es sobre esta base que tomamos decisiones. Naturalmente, estas experiencias de alguna manera deben ser documentadas, de lo contrario su utilidad es limitada.

Muy poco lo que se puede leer en los libros puede compensar por completo de los conocimientos adquiridos por la experiencia. Las reglas son bueno saber, por ejemplo, no debe conducir un coche nuevo a toda velocidad durante los primeros 1,000 millas; pero posiblemente, reglas generales, la heurística, son aún más importante- por ejemplo, "no maneje un gran sedán de lujo como es de conducir un coche deportivo" -son aún más importante. ¿Por qué? Porque, tales reglas empíricas tienden a cubrir un mayor número de situaciones. Lo más importante, sin embargo, que cualquier cosa que tipo de reglas o heurísticas que seguimos, entendemos el razonamiento subyacente detrás de ellos y por lo tanto sabe por qué y cuándo invocarlos.

En esencia los CBR tratan de la construcción de sistemas de IA que son capaces de igualar los casos de soluciones de acuerdo con los precedentes; En otras palabras, tratando de resolver los nuevos problemas, haciendo coincidir a soluciones de viejos problemas. Por lo tanto, se trata de la construcción de sistemas basados en el conocimiento que aprenden de las situaciones anteriores (Luger,2005)

El elemento principal de un sistema CBR es la base de casos; una estructura que almacena los problemas, elementos (casos), y sus soluciones. Por lo tanto, una base de caso puede ser visualizado como una base de datos donde se almacena una colección de problemas, manteniendo una relación con las soluciones a todos los problemas almacenado, que le da al sistema la capacidad de generalizar con el fin de resolver nuevos problemas (Aamodt, 1991)

Las capacidades de aprendizaje de los sistemas CBR son definidos por el resultado de sus propias estructuras, típicamente compuestos por cuatro fases: la recuperación, la reutilización, la revisión y retención. La primera fase, (recuperar) consiste en encontrar el caso más similar al problema propuesto, y recuperar de la base caso. Una vez que una serie de casos se extraen de la base de caso, la segunda fase (reutilización) adapta el caso seleccionado para adaptarse a la problemática

actual. Una vez que el sistema encuentra una solución al problema que se revisa y se comprueba para ver si es de hecho una solución al problema. Una vez que la solución propuesta se confirma según el caso, se retiene y puede servir como una solución para el futuro problema. (Aamodt, 1991)

2.3.1 DESVENTAJAS DE LOS CBR

De acuerdo con (Lucci & Kopec, 2013) uno de los principales problemas para el diseño de CBR es la elección de una estructura de datos. Las estructuras de datos pueden variar de tuplas simples, que almacenan los casos que se emparejaron y sus soluciones, a los árboles complejos prueba. Lo más típico son un gran número de normas situación de acción, por lo que las reglas son las características más destacadas que se emparejaron, y los operadores comprenden transformaciones que deben utilizarse en situaciones nuevas.

La decisión más difícil para los sistemas CBR es la elección de las características más sobresalientes de los casos para la indexación y *retrieval*. Kolodner sugiere que es más importante para los casos que se organizarán en los objetivos y necesidades del solucionador de problemas; esto requiere un análisis cuidadoso de los descriptores de caso en el contexto de cómo se van a utilizar en la solución de problemas.

2.4 REDES NEURONALES

Las redes neuronales (RN) son una analogía a las neuronas biológicas del cerebro, están organizadas similarmente a éste y contienen elementos en común (Rojas, 1996). Existen varios tipos de redes neuronales que tienen características específicas que aportan a diferentes problemas de la vida real y su funcionamiento permite que sea aplicado a muchos de los campos actualmente. Su crecimiento en popularidad fue disparado hacia 1985 cuando se consolidaron los primeros congresos para el estudio de las RN como el *Neural Networks for Computing* y la *Neural Information Processing Systems*. A pesar de ser una herramienta poderosa, no tuvo avances realmente significativos, hasta que en el presente siglo, se empezaron a utilizar a las RN como mecanismo de solución de problemas que requieren una respuesta evolutiva y no lineal.

El gran atractivo de las RN, surge de su capacidad de evolucionar mediante su entrenamiento o aprendizaje, que puede ser de dos tipos: supervisado o no supervisado. Como su nombre lo dice, en los casos en que el aprendizaje es supervisado, se tiene control del camino que tome la RN para resolver un problema y tenemos el poder para hacer que se tome uno u otro camino para obtener un resultado esperado. En el otro caso, cuando el aprendizaje no es supervisado, la neurored avanza dependiendo de los datos de entrenamiento que haya recibido y finalmente arroja un resultado que puede ser satisfactorio o no. (Serrano & Gallizo, 1997)

2.4.1 CARACTERÍSTICAS

- Son capaces de aprender a partir de la experiencia usando el aprendizaje adaptativo, es decir basadas en entrenamiento. Esto es posible gracias a que cada elemento “Como las redes neuronales pueden aprender a diferenciar patrones mediante ejemplos y entrenamientos, no es necesario elaborar modelos a priori ni necesidad de especificar funciones de distribución de probabilidad.”(Flórez & Fernández, 2008)
- Es tolerante a fallos, puede superar algunos tipos de fallos y seguir adelante con algunas de sus capacidades.
- Opera en tiempo real, su funcionamiento permite realizar operaciones en paralelo.

2.4.2 VENTAJAS

- Contienen auto-organización, después de una etapa de entrenamiento ella adquiere una organización propia.
- Tienen la capacidad de aprender a realizar tareas a partir de una experiencia o entrenamiento
- Son muy utilizadas en la actualidad ya que son adaptables a la tecnología actual, es decir de manera modular. Gracias a su facilidad para realizar tareas complejas, y su bajo coste en cuanto hardware, es realmente fácil implementar sistemas de control o de otro tipo, escalando sistemas paso a paso, haciendo pruebas y evaluando rendimiento en cada módulo del sistema. (Matich, 2001)

2.4.3 DESVENTAJAS

- Las redes neuronales artificiales se entrenan para cada problema, es decir que no es posible reutilizar una red neuronal para ser usada en varios ámbitos. Esto se debe a que cuando una red neuronal artificial es entrenada, se hace con datos específicos del problema en cuestión, por lo tanto se construye una red diferente para cada ejercicio.
- Para asegurarse de que una red neuronal quedó bien entrenada, es necesario realizar múltiples pruebas y comparar resultado tras resultado, efectuando cambios para obtener mejores resultados en cada iteración.
- Gracias a las ventajas que ofrecen las redes neuronales artificiales, podemos concluir que pueden ser una buena herramienta para dar solución al problema que nos compete ya que permite obtener resultados a partir del entrenamiento con datos históricos, lo cual se acopla totalmente a las necesidades de nuestro problema.

2.5 SISTEMAS DIFUSOS

La lógica de primer orden pretende describir el universo con una serie de predicados que pueden ser verdaderos o falsos y que pueden conformar conjuntos de predicados que producen una respuesta de tipo verdadera o falsa dependiendo de las intersecciones (y, o, entonces, sí y solo sí). Las anteriores son bases de los sistemas difusos los cuales han sido dotados de características que sean soporte de problemas de la vida cotidiana y así aprovechar el poder que tiene la lógica de primer orden. Debido a que el problema se define en una serie de estados previamente cargados, no es recomendable el uso de la lógica de primer orden para cualquier caso. Sin embargo, en situaciones en las que es necesario obtener una respuesta basados en métricas cuidadosamente definidas y en las que solo un agente experto puede dar su opinión, ésta es totalmente útil. Podemos evidenciar lo anterior gracias a la búsqueda realizada por Francisco Herrera en su artículo *Sistemas Difusos Evolutivos* (Herrera, 2010) en donde muestra una tabla con las ocurrencias de *fuzzylogic/fuzzysystems* en revistas hasta el 2004. Haciendo el mismo ejercicio para la actualidad se encontró que se ha incrementado en un por ciento el uso de los sistemas difusos.

Los sistemas difusos son entonces el resultado de la interacción entre dos conjuntos difusos y gira alrededor de las reglas que se planteen haciendo uso de la lógica difusa la cual es útil en casos en que los modelos matemáticos no pueden interpretar el problema y la complejidad del mismo es muy alta.

2.5.1 CARACTERÍSTICAS

- El conocimiento usado en los sistemas difusos es de tipo estático, es decir no varía en el tiempo por ello se usa en problemas en los que la base de conocimientos no sea variante en el tiempo.
- Consta de una base de conocimientos (conocimiento de un agente experto) y de allí se derivan los hechos que son subjetivos o imprecisos.
- Puede tener varias entradas y salidas que describan un ambiente, sus reglas, componentes y problemas.

2.5.2 VENTAJAS

- Su diseño es sencillo, fácil de entender ya que se basa en un conjunto de reglas unidas por operadores lógicos.
- Una peculiaridad de esta técnica y que es que hace uso del conocimiento de expertos en el tema tratado. Estos expertos conocen a cabalidad el ambiente y cada uno de sus componentes, tratando de simplificarlos en una serie de reglas que permitan al sistema difuso arrojar un resultado acorde con la realidad.

2.5.3 DESVENTAJAS

- Puede existir ambigüedad en las reglas declaradas
- Es poco flexible a grandes cambios ya que implicaría cambiar todas o la mayoría de reglas.
- Debido a que la lógica difusa usa un sistema experto para su funcionamiento, se eligió esta como el primer filtro de nuestro sistema, él se encargará de definir el peso de cada entrada con la ayuda del conocimiento de personas expertas en el tema

2.6 APRENDIZAJE SUPERVISADO

De acuerdo con (Hancock, 2011) el término supervisado se refiere al hecho de que al llevar a cabo el aprendizaje supervisado, se nos ha dado las asignaciones de terreno la verdad (la respuesta correcta) para cada una de las entidades que se está aprendiendo. Las entradas para el proceso de formación consisten en pares: un vector de características que contiene atributos de la entidad para ser clasificada, y la respuesta que ha de asociarse con ella (la realidad del terreno). La realidad del terreno se puede obtener de varias maneras y con frecuencia son los resultados almacenados para los datos históricos recopilados previamente. A veces la verdad básica es generada por un "oráculo". El término oráculo se refiere a cualquier mecanismo, manual o automatizada, para determinar la verdad de tierra asociado con entradas para clasificarse. Por lo general, es o bien un experto humano que las etiquetas de forma manual vectores de características con la verdad de tierra, o un clasificador existente.

Para llevar a cabo el aprendizaje supervisado creamos un conjunto de entrenamiento que contiene vectores de características que representan objetos o entidades para ser clasificado, junto con las tareas terrestres de referencia para cada uno. El objetivo del proceso de aprendizaje es la creación de una aplicación automatizada que puede clasificar con precisión o inferir la realidad sobre el terreno de las entidades en base a sus características.

El aprendizaje supervisado se caracteriza por la presencia de un agente externo (supervisor o maestro) que controla el proceso de entrenamiento, estableciendo la respuesta que debería generar la red (output del sistema) a partir de una entrada determinada.

De esta forma, el supervisor comprueba la salida de la red, la compara con la salida deseada y, si existen diferencias, ajusta iterativamente los pesos hasta que su salida tiende a ser la deseada, utilizando para ello información detallada del error cometido en cada paso.

2.6.1 ALGORITMO DE RETROPROPAGACIÓN DE ERRORES O BACKPROPAGATION

El algoritmo de retropropagación de errores o *backpropagation* (BP) constituye el modelo de aprendizaje de la red perceptrón multicapa más utilizado en la práctica, debido a su sencillez y eficacia para la resolución de problemas arbitrariamente complejos. El algoritmo BP está basado

en el método del gradiente descendente, que constituye a su vez uno de los métodos de optimización de funciones multivariantes más antiguos y conocidos (CAUCHY, 1847). El gradiente descendente trata de obtener una aproximación lineal de la función de error a través de la expresión:

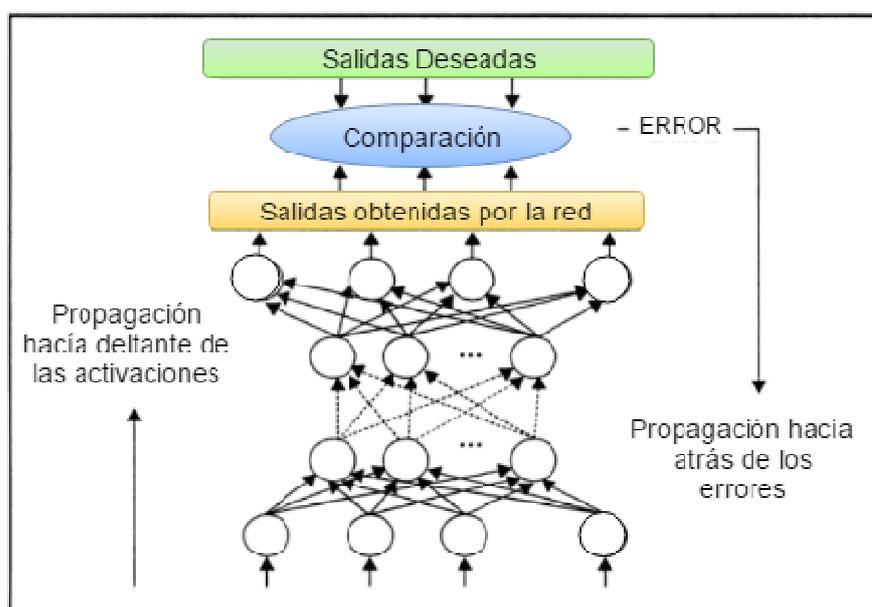
$$E(w + \Delta w) \approx E(w) + \Delta w^T E'(w)$$

De lo anterior se realiza la actualización de pesos viene dada por:

$$\Delta w = -\alpha E'(w), \alpha > 0$$

Siendo α el tamaño del paso o tasa de aprendizaje, que suele ser una constante de tamaño reducido $0 < \alpha < 1$. De forma simplificada, el algoritmo BP consiste en el aprendizaje de un conjunto predefinido de patrones de entrada-salida, empleando un ciclo "propagación-adaptación" con dos fases diferenciadas (Figura 2-1):

Figura 2-1: Flujo del algoritmo BP. Fuente: adaptado de Bengio (1993)



1. Fase de aprendizaje *hacia adelante*: los patrones de entrada son presentados a la primera capa de la red, que propaga dicho estímulo a través de todas las capas posteriores hasta generar una salida del sistema.
2. Fase de aprendizaje *hacia atrás*: a partir de la comparación de la salida generada por la red y la salida deseada, se calcula un valor de error para cada neurona de la última capa del sistema. Estos errores se transmiten desde la capa de salida hacia las neuronas de la

capa intermedia que contribuyan directamente a la salida, que reciben una parte de error aproximada a su participación en la salida original. El proceso se repite capa por capa hasta que todas las neuronas de la red hayan recibido un error que describa su aportación relativa al output final. A partir del valor de error recibido, se procede al reajuste de los pesos de cada neurona para minimizar el error cometido por la red en el futuro.

Una vez concluida la fase de aprendizaje se inicia el modo de operación o test. Si el aprendizaje ha sido eficaz, la red debe generar una salida próxima a la deseada ante la presencia de un nuevo estímulo o vector de entrada desconocido.

2.7 SISTEMAS EXPERTOS (SS.EE.).

Se puede decir que los SS.EE. son sistemas compuestos por dos partes componentes, principalmente; una llamado Motor de Inferencias y la otra Base de Conocimientos. En la primera se representa el procedimiento lógico que sigue un experto en determinada área del conocimiento y en la segunda se representa el propio conocimiento del experto, pudiendo ser uno sólo o un grupo de expertos dentro de la misma área, inclusive pueden ser libros especializados en el tema de interés (Bargiela, 2013).

Este tipo de sistemas se desarrolla con los objetivos de imitar la inteligencia humana, en este caso de un experto, y de tener asistencia de un experto en cualquier lugar en poco tiempo con respecto al tiempo que tarda en formarse un profesional humano incluyendo el tiempo de experiencia.

Uno de los requisitos para realizar un SS.EE. es poseer el conocimiento de uno o varios expertos con amplia experiencia en el campo del conocimiento que les compete, ya que es la experiencia quien agrega valor al conocimiento. Un SS.EE. que se basa en los conocimientos de un novato poco puede aportar a un profesional que, si bien, no es un experimentado tampoco es un novato, pero que necesita la asistencia o los conocimientos de un experto que lo guíe en su búsqueda de una solución a un problema complejo o nuevo para el profesional. Existen diferentes tipos de SS.EE. clasificados según el modelo que utilizan, sin embargo SSEE basado en lógica difusa.

Giarratano y Riley (2005) resumen las ventajas de los sistemas expertos de la siguiente manera:

- Aumento de la disponibilidad
- Eficiencia de Costes
- Realización de múltiples fuentes de conocimientos
- Múltiples fuentes de información
- respuesta rápida

A pesar de todas estas ventajas, hay algunas debilidades conocidas de los sistemas expertos. En primer lugar, su comprensión profunda objeto, en un sentido causal es poco profunda. En segundo lugar, carecen de sentido común. Por ejemplo: puede ser que sepa que el agua hierve a 212 ° F, pero no tienen ninguna idea de que el agua hirviendo se puede convertir en vapor, que puede ser utilizado para ejecutar la turbina (Lucci & Kopec, 2013)

2.8 EVAPOTRANSPIRACIÓN

2.8.1 ANTECEDENTES

De acuerdo con la FAO 56 Allen et al (2006), se conoce como evapotranspiración (ET) la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación y por otra parte mediante transpiración del cultivo.

Según González et al (2015) la definición de evapotranspiración de referencia (ET_o) ha evolucionado desde una noción muy ambigua como la expresada por Thornthwaite (1948), como la máxima evapotranspiración que se alcanza por un cultivo cuando no hay déficit de humedad del suelo, hasta la aceptada hoy en día (FAO 56). Grassi (1988) expresa que la tendencia fue ubicar el proceso evapotranspiratorio en una situación análoga a la evaporación de una superficie de agua libre, en cuyo caso son los factores climáticos los determinantes de la velocidad de evapotranspiración.

Doorenbos y Pruitt (1977)(FAO 24) introducen el concepto que revalida lo que se manejaba como ET_o, acuñando como nuevo término Evapotranspiración del Cultivo de Referencia (ET_c), el cual se maneja actualmente; definida como la velocidad de evapotranspiración de una superficie extensa de pasto verde de altura uniforme entre 8 y 15 cm de alto, creciendo activamente y ofreciendo cobertura total y que no tiene déficit de humedad.

Según la FAO 56 Allen et al (2006) la evaporación y la transpiración ocurren simultáneamente y no hay una manera sencilla de distinguir entre estos dos procesos. Aparte de la disponibilidad de agua en los horizontes superficiales, la evaporación de un suelo cultivado es determinada principalmente por la fracción de radiación solar que llega a la superficie del suelo.

La evapotranspiración se expresa normalmente en milímetros (mm) por unidad de tiempo. Esta unidad expresa la cantidad de agua perdida de una superficie cultivada en unidades de altura de agua., en la Figura 2-2 se presenta el proceso de evapotranspiración.

Figura 2-2: Proceso de evapotranspiración. Fuente: (Lavao, 2016)



En el sistema suelo-planta, se destacan las condiciones de humedad del suelo y estado fenológico de la planta. Según Brown (2000), la humedad del suelo es el parámetro más importante que interviene en la ET. El tipo de planta está relacionado con la variedad o especie del cultivo y el estado de la planta se relaciona con el tamaño y actividad de crecimiento de la misma. La cantidad de ET producida en un cultivo depende en gran medida de la cobertura del suelo y el área de la hoja expuesta al proceso de transpiración.

2.8.2 EVAPORACIÓN

La evaporación es el proceso por el cual el agua líquida se convierte en vapor de agua (vaporización) y se retira de la superficie evaporante (remoción de vapor). El agua se evapora de una variedad de superficies, tales como lagos, ríos, caminos, suelos y la vegetación mojada. Allen et al (2006).

Según Allen et al (2006) para cambiar el estado de las moléculas del agua de líquido a vapor se requiere energía. La radiación solar directa y, en menor grado, la temperatura ambiente del aire, proporcionan esta energía. A medida que ocurre la evaporación, el aire circundante se satura gradualmente, y el proceso se vuelve cada vez más lento hasta detenerse completamente si el aire mojado circundante no se transfiere a la atmósfera o en otras palabras no se retira de alrededor de la hoja.

2.8.3 CONCEPTOS DE EVAPOTRANSPIRACIÓN

El concepto de evapotranspiración incluye tres diferentes definiciones según la FAO 56 (Allen et al, 2006): Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o), evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c), y evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ET_{caj}). ET_o es un parámetro relacionado con el clima que expresa el poder evaporante de la atmósfera. ET_c se refiere a la evapotranspiración en condiciones óptimas presentes en parcelas con un excelente manejo y adecuado aporte de agua y que logra la máxima producción de acuerdo a las condiciones climáticas. ET_c requiere generalmente una corrección, cuando no existe un manejo óptimo y se presentan limitantes ambientales que afectan el crecimiento del cultivo y que restringen la evapotranspiración, es decir, bajo condiciones no estándar de cultivo, denominado ET_{caj}.

2.8.4 EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO DE REFERENCIA (ET_o)

Según la FAO 56 Allen et al (2006), la tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia, que ocurre sin restricciones de agua, se conoce como evapotranspiración del cultivo de referencia, y se denomina ET_o. La superficie de referencia corresponde a un cultivo hipotético de pasto con características específicas.

Los únicos factores que afectan ET_o son los parámetros climáticos. Por lo tanto, ET_o es también un parámetro climático que puede ser calculado a partir de datos meteorológicos. ET_o expresa el poder evaporante de la atmósfera en una localidad y época del año específicas, y no considera ni las características del cultivo, ni los factores del suelo. Desde este punto de vista, el método FAO

Penman-Monteith se recomienda como el único método de determinación de ETo con parámetros climáticos. Allen et al (2006).

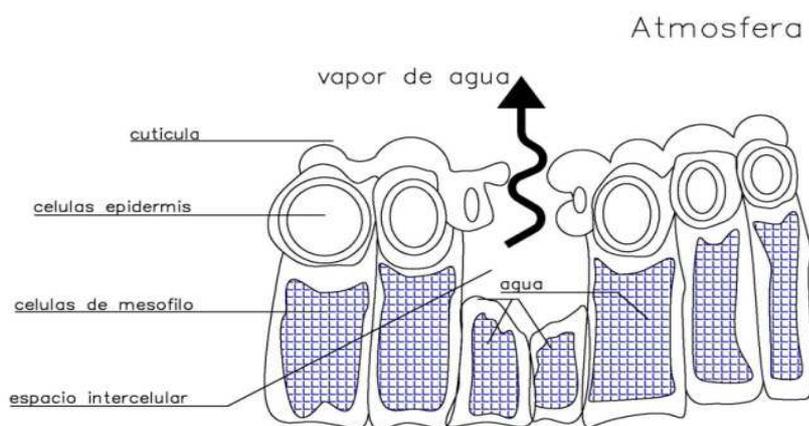
2.8.5 EVAPORACIÓN DEL CULTIVO BAJO CONDICIONES ESTÁNDAR (ETc)

Según la FAO 56 Allen et al (2006), La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar se denomina ETc, y se refiere a la evapotranspiración de cualquier cultivo cuando se encuentra exento de enfermedades, con buena fertilización y que se desarrolla en parcelas amplias, bajo óptimas condiciones de suelo y agua, y que alcanza la máxima producción de acuerdo a las condiciones climáticas reinantes.

2.9 TRANSPIRACIÓN.

El proceso por el cual la evaporación del agua líquida contenida en los tejidos de la planta y su posterior remoción hacia la atmósfera, se llama transpiración. La pérdida de agua es predominantemente a través de los estomas. Los cuales son aberturas en la hoja de la planta a través de las cuales atraviesan los gases y el vapor de agua de la planta hacia la atmósfera (Figura 2-3). Según la FAO 56 Allen et al (2006) casi toda el agua absorbida del suelo se pierde por transpiración y solamente una pequeña fracción se convierte en parte de los tejidos vegetales. La transpiración, igual que la evaporación directa, depende del aporte de energía, del gradiente de presión del vapor y de la velocidad del viento. Por lo tanto, la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y el viento también deben ser considerados en su determinación. El contenido de agua del suelo y la capacidad del suelo de conducir el agua a las raíces también determinan la cantidad de transpiración, así como la salinidad del suelo y del agua de riego. La tasa de transpiración también es influenciada por las características del cultivo, el medio donde se produce y las prácticas de cultivo.

Figura 2-3: Esquematación de un estoma durante el proceso de transpiración (Allen et al, 2006)



2.10 MÉTODOS PARA ESTIMAR LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO DE REFERENCIA EN INVERNADEROS

Varias fórmulas empíricas han sido desarrolladas para obtener la evapotranspiración. Estas se encuentran basadas en mediciones climatológicas (temperatura, radiación solar, velocidad del viento, etc.). Las fórmulas más sencillas son las basadas en la medida de la temperatura y la radiación solar, destacándose los modelos de Hargreaves-Samani(1985) y Turc (1961).

La metodología estándar propuesta en el documento Evapotranspiración del Cultivo (Allen et al, 2006), que tiene como fin determinar los requerimientos de agua en los cultivos usa el producto de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) obtenidos mediante la estimación del modelo Penman-Monteith. La Comisión Internacional de Riego y Drenaje (ICID) y la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación (FAO) recomiendan el uso de la ecuación Penman-Monteith para calcular la evapotranspiración de referencia (ET_o) con datos climáticos y evaluar la confiabilidad de otros métodos que predicen la ET_o.(Stefano & Ferro, 1997).

Según Kashyap y Panda (2001), al igual que Casanova et al (2009), el uso de esta ecuación presenta el inconveniente que requiere los datos de clima, de radiación solar incidente, temperatura del aire, presión real de vapor de agua, presión de saturación de vapor de agua,

velocidad del viento y número de horas reales de sol, las cuales en algunos casos no están disponibles

Entre los numerosos estudios que la FAO ha desarrollado en aras de generar estrategias de solución a la crisis hídrica, ha propuesto la metodología de evapotranspiración de cultivo con el fin de obtener los parámetros básicos para aumentar la eficiencia de las programaciones de riego.

Ecuación 2-1

$$ET_c = ET_o * k_c$$

Donde

- ET_c : Evapotranspiración real del cultivo
- ET_o : Evapotranspiración del cultivo de referencia
- k_c : Coeficiente del cultivo

La ET_o es estimada por Penman-Monteith u otros modelos y está en función de las condiciones climáticas, mientras que k_c se encuentra en función de las condiciones del cultivo.

En la Tabla 2-1 se describen algunas ecuaciones usadas para estimar ET_o , así mismo se mencionan los parámetros requeridos para su estimación.

Tabla 2-1: Parámetros requeridos por las ecuaciones de evapotranspiración de referencia.

AUTOR	T	H	V	S	R	E	I	ECUACIÓN
Penman-Monteith	0	0	0	0	0			$ET_o = \frac{1}{\lambda} * \frac{(R_n - G) + a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)}$
Hargreaves-Samani (1985)	0				0			$ET_o = 0.0135 * R_s (T_{med} + 17.8)$
Turc (1961)	0			0				$ET_o = 0.4 * (R_s + 50) * \left(\frac{T_{med}}{T_{med} + 15}\right)$
Tanque de						0		$ET_p = k_c k_p E_{pan}$

evaporación								
<i>T: Temperatura, H: Humedad, V: Velocidad del Viento, S: Horas sol, R: Radiación solar, E: Evaporación, I: Índice de Área foliar</i>								

ECUACIÓN DE PENMAN-MONTEITH

Esta ecuación combina el balance de energía con el método de transferencia de masas. La ecuación se define en términos de datos de clima (horas de sol, temperatura, humedad y velocidad del viento), resistencia aerodinámica y resistencia superficial. Se expresa de la siguiente manera:

Ecuación 2-2

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)}$$

Dónde:

- ET_o evapotranspiración de Referencia (mm día^{-1})
- R_n radiación neta en la superficie del cultivo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$)
- R_a radiación extraterrestre (mm día^{-1})
- G flujo del calor de suelo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$)
- T temperatura media del aire a 2 m de altura ($^{\circ}\text{C}$)
- u_2 velocidad del viento a 2 m de altura (m s^{-1})
- e_s presión de vapor de saturación (kPa)
- e_a presión real de vapor (kPa)
- $e_s - e_a$ déficit de presión de vapor (kPa)
- Δ Pendiente de la curva de presión de vapor ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$)
- γ Constante psicrométrica ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$)

ECUACIÓN DE TURC (1961)

Ecuación Turc (1961). Se basa en la radiación solar y la temperatura media del aire. Se expresa de la siguiente manera:

Ecuación 2-3

$$ET_o = 0.4 * (R_s + 50) * \left(\frac{T_{med}}{T_{med} + 15} \right)$$

Donde:

- ET_o = Evapotranspiración Referencia
- R_s = Radiación Solar
- T_{med} = Temperatura media

ECUACIÓN HARGREAVES-SAMANI (1985)

Ecuación Hargreaves-Samani (1985). Esta ecuación se describe en términos de la radiación solar y la temperatura media del aire, se expresa de la siguiente manera:

Ecuación 2-4

$$ET_o = 0.0135 * R_s (T_{m d} + 17.8)$$

Donde:

- ET_o = Evapotranspiración Referencia
- R_s = Radiación Solar
- T_{med} = Temperatura media

ECUACIÓN GARCÍA-LÓPEZ (1970)

El método de García-López (1970) para el cálculo de la evapotranspiración está en término de las Humedad Relativa (Hr) y la temperatura (T) a continuación:

Ecuación 2-5

$$ET_o = [1.21 * 10^n * (1 - 0.01Hr)] + 0.21T - 2.3$$

$$n = \frac{7.45T}{234.7 + T}$$

Donde:

- ET_o = Evapotranspiración de Referencia
- HR = Humedad Relativa
- T = Temperatura
- n = Constante dependiente de la temperatura

2.11 LOS LISÍMETROS

De acuerdo a Tzenova L. (1978) el termino Lisímetro significa en griego medidor de infiltración, representa un equipo en el cual un volumen determinado de suelo, se coloca en un recipiente especial con el fin de aislarlo del medio externo. Un lisímetro es un dispositivo de medición que se puede utilizar para medir la cantidad de evapotranspiración real que es liberada por las plantas, al registrar la cantidad de precipitación que cae en un área determinada y la cantidad perdida a través del suelo, Davie (2003). Uno de los usos que los lisímetros persigue es la determinación de la demanda de agua de los cultivos con fines de la planificación de riego y más específicamente:

- Determinar la evapotranspiración real de los cultivos ETC. Perrier et al (1980)
- Investigar la influencia de los factores climáticos y sus combinaciones, en el proceso evapotranspiratorio. Perrier et al (1980).
- Obtener relaciones entre la evapotranspiración medida y la computada mediante fórmulas meteorológicas que involucren variables meteorológicas medidas in-situ. Rijtema (1965).
- Medir la evapotranspiración real ETC y sus relaciones con la evapotranspiración de referencia ET_o en diferentes estados de cobertura y crecimiento, (Estadios fenológicos del cultivo). Blad y Rosenberg (1974).

- Medir la influencia de la disponibilidad de agua en el suelo y sus relaciones con la evapotranspiración. Blad y Rosenberg (1974).

2.11.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS LISIMETROS

De acuerdo con González C. et al (2015b) el lisímetro consiste en un recipiente impermeable que contiene un volumen de suelo y que mediante el monitoreo de algunos parámetros del suelo que puedan ser usados en el balance hídrico del volumen de control, permita estimar las variables de interés.

En general, los lisímetros están orientados a la obtención de datos experimentales que permitan tener un mejor conocimiento de los factores que influyen en el proceso evapotranspiratorio y medir el grado de exactitud de procedimientos indirectos que se utilizan para estimarlo.

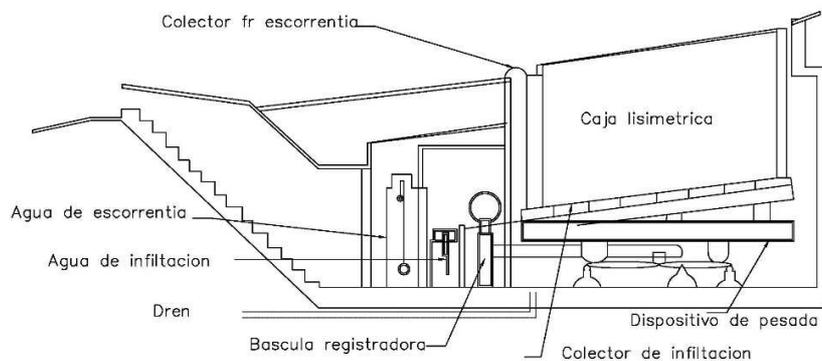
En lisímetros de pesada, los cambios de peso representan una medida directa del flujo de agua que entra y sale del lisímetro. El peso total de un lisímetro en un momento dado (M_t) se puede expresar por la siguiente ecuación:

Ecuación 2-6

$$M_t = M_o + P_{cv} - ET - D + R + P$$

Donde M_o es el peso inicial del lisímetro; P_{cv} es la acumulación de biomasa de la cubierta vegetal; ET es la pérdida de agua del lisímetro por evapotranspiración; D es el agua de drenaje recibida en recipientes que están afuera del lisímetro; R es la cantidad de agua aplicada mediante el riego; y P es la precipitación recibida por lisímetro. Olalla et al (2005).

Figura 2-4: Lisímetro de Pesada. Fuente: (Lavao, S, 2016)



De acuerdo con González C. et al (2015a) este el de lisímetro de pesada se desarrolló para estimar el consumo de agua de plantas sembradas en contenedor. Aprovechar las condiciones como se siembra el clavel en la sabana de Bogotá (ver Figura 2-5), en camas conformadas por dos hileras de contendores.

Figura 2-5: Instalación del Lisímetro de pesada en las camas donde se siembra clavel.



2.12 MODELAMIENTO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POR MEDIO DE LISÍMETROS DE PESADA.

El equipo mide la masa de agua aplicada al contenedor de la planta durante el pulso de riego, así como la masa de agua lixiviada o drenada, por medio del balance hídrico el sistema permite determinar la Evapotranspiración real del cultivo ETC..

De acuerdo con Lavao, (Lavao, 2016) las variables que se tienen en cuenta son: A_i agua aplicada al contenedor y A_o agua lixiviada son medidas directamente por cada una de las celdas de carga que tienen los contenedores de planta y de drenaje o lixiviado.

La Figura 2-6, muestra el sistema evaluado, el cual se compone de una entrada correspondiendo a la entrada (Fertirriego), el contenedor de plantas y de drenaje y una salida que es la ETC. En la Figura 2-7 se observa el comportamiento del agua lixiviada en el contenedor y en Figura 2-8 se muestra el comportamiento del sistema completo. Para este sistema, se consideran las variaciones de masa producidas por el agua aplicada, lixiviada y evapotranspirada durante uno o más pulsos de riego. El agua aplicada al contenedor y medida con su respectiva balanza puede empezar a drenarse aún antes de que termine el pulso. Sin embargo, dado que es un sistema cerrado para el agua aplicada, por el corto lapso de tiempo, se puede afirmar que el agua aplicada es la suma del agua medida en el contenedor de la planta más el agua que se ha lixiviado. El agua total aplicada es entonces:

Figura 2-6: Esquema del sistema analizado. Fuente: adaptado de (Lavao, 2016)



Donde:

- A_T = Agua Total en el sistema

- $A_i = \text{Agua aplicada al contenedor}$
- $A_o = \text{Agua lixiviada}$

El Agua Total ingresada al sistema solo experimenta variaciones significativas durante el tiempo del pulso. Es decir, que cuando el diferencial del agua total sea aproximadamente cero para una ventana de tiempo pequeña (Menor a 5 minutos), sabemos que no se está aplicando agua.

$$\frac{dA_T}{dt} \approx 0$$

Una vez la razón de cambio sea aproximadamente igual a cero, se inicia la medición de pérdida de masa en el sistema, la cual se debe a la evapotranspiración. En este caso el diferencial del Agua Total se vuelve una herramienta importante de análisis para la medición de la evapotranspiración. Luego de un pulso se tiene un Agua Total Inicial en el sistema. En el siguiente pulso de agua se tendrá una variación del agua total mucho mayor que cero.

$$\frac{dA_T}{dt} \gg 0$$

Justo antes de esta variación, para efectos de análisis y medición se tiene el Agua Total Final. Es decir, corresponde a la cantidad de agua que tiene el sistema entre dos pulsos consecutivos.

$$A_{Ti} = \text{AguaTotalInicial}$$

$$A_{Tf} = \text{AguaTotalFinal}$$

Dado que el sistema es cerrado, la única razón para que el Agua Total Inicial y el Agua Total Final sean distintas es la evapotranspiración real (ETc), que se expresaría como:

$$ETc = A_{Ti} - A_{Tf}$$

Ampliando esta ecuación a las variables medidas que son las masas de agua del contenedor y el lixiviado se llega a:

$$A_{Ti} = A_{ii} + A_{oi}$$

$$A_{Tf} = A_{if} + A_{of}$$

Donde:

- A_{ii} = Masa Agua en el lisímetro inicial
- A_{oi} = Masa Agua del lixiviado al inicio
- A_{if} = Masa Agua en el lisímetro al final
- A_{of} = Masa Agua del lixiviado al final

La ETC se obtendría como:

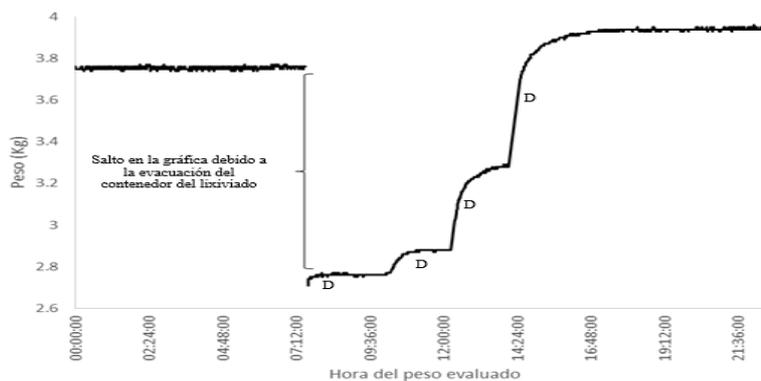
$$ETc = (A_{ii} + A_{oi}) - (A_{if} + A_{of})$$

Para determinar los tiempos t_i y t_f en los que se debe considerar las masas de los recipientes, se debe usar análisis numérico, para determinar cuándo se cumple que la razón de cambio del agua total sea aproximadamente cero

$$\frac{dA_T}{dt} \approx 0$$

González *et al.* (2015b) presentan en la Figura 2-7 el comportamiento del contenedor del lixiviado, similar al comportamiento expresado en las ecuaciones planteadas anteriormente. Se observa en el contenedor de drenaje como el peso del mismo declina en la hora nocturna cuando se vacía el mismo y se va llenando a lo largo del día producto del drenaje del contenedor principal que contiene las plantas con sustrato.

Figura 2-7: Comportamiento del contenedor del Lixiviado. Fuente: González C et al (2015b)



La Figura 2-8 muestra los aumentos de peso debidos al riego así como las disminuciones que se presentan después del mismo debido a la velocidad de percolación que presenta el sustrato al inicio así como las disminuciones lentas generadas por el consumo de agua del cultivo. Este mismo comportamiento es el expresado en las ecuaciones descritas anteriormente, lo cual es evidenciado en la Figura 2-9y Figura 2-10.

Figura 2-8: Comportamiento del contenedor de la planta y sustrato. Fuente: González C. , et al (2015b)

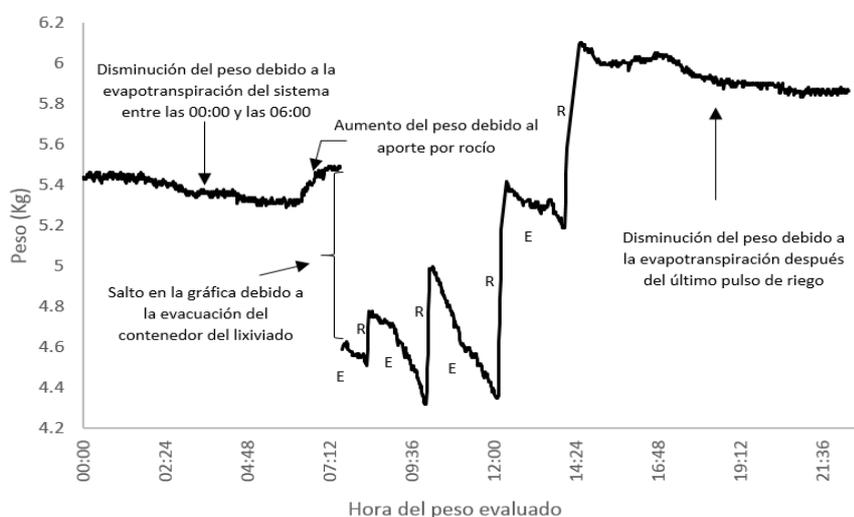


Figura 2-9: Comportamiento del peso de la Planta y del Lixiviado, día 20 de Abril 2014

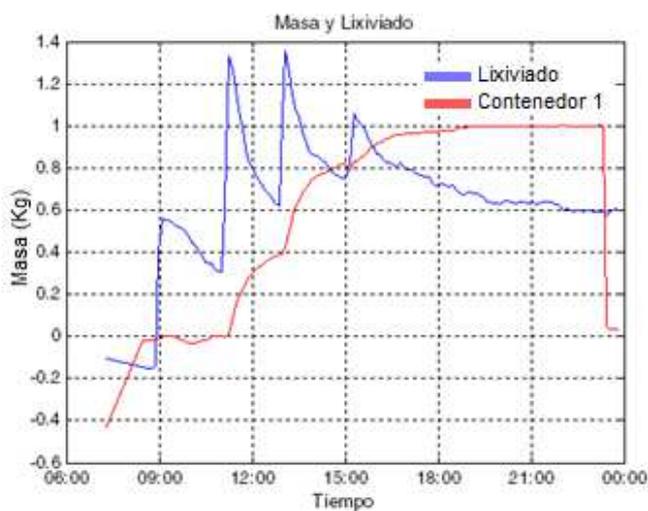
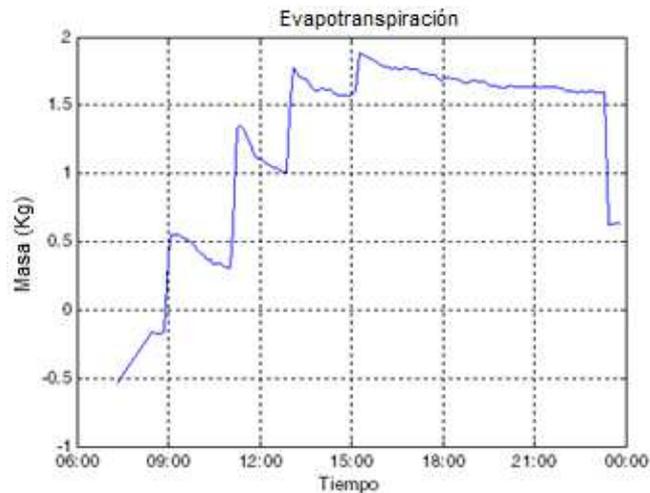


Figura 2-10: Comportamiento de la Evapotranspiración con un valor 2,45 mm, día 20 de Abril de 2014



2.13 FACTORES CLIMÁTICOS Y SU RELACIÓN CON LOS CULTIVOS DE MINICLAVEL

El cambio natural de las lluvias, de la temperatura y de otras condiciones del clima es el principal factor que explica la variabilidad de la producción agrícola, así mismo es afectada la evapotranspiración propia del cultivo de clavel. Se tiene 4 principales factores que afectan los cultivos de clavel, al hacer variar su evapotranspiración que son: la humedad, la radiación, la temperatura y la velocidad del viento.

2.13.1 RADIACIÓN SOLAR

De acuerdo con la FAO 56, el proceso de la evapotranspiración está determinado por la cantidad de energía disponible para evaporar el agua. La radiación solar es la más importante fuente de energía en el planeta y puede cambiar grandes cantidades de agua líquida en vapor de agua. La cantidad potencial de radiación que puede llegar a una superficie evaporante viene determinada por su localización y época del año. Debido a las diferencias en la posición del planeta y a su movimiento alrededor del sol, esta cantidad potencial de radiación es diferente para cada latitud y para las diversas estaciones del año. La radiación solar real que alcanza la superficie evaporante depende de la turbidez de la atmósfera y de la presencia de nubes que reflejan y absorben

cantidades importantes de radiación. Cuando se determina el efecto de la radiación solar en la evapotranspiración, se debe también considerar que no toda la energía disponible se utiliza para evaporar el agua. Parte de la energía solar se utiliza también para calentar la atmósfera y el suelo.

2.13.2 TEMPERATURA DEL AIRE

La radiación solar absorbida por la atmósfera y el calor emitido por la tierra elevan la temperatura del aire. El calor sensible del aire circundante transfiere energía al cultivo y entonces ejerce un cierto control en la tasa de evapotranspiración. En un día soleado y cálido, la pérdida de agua por evapotranspiración será mayor que en un día nublado y fresco (FAO 56,2006).

2.13.3 HUMEDAD DEL AIRE

Según el estudio de la FAO 56, mientras que el aporte de energía del sol y del aire circundante es la fuerza impulsora principal para la evaporación del agua, la diferencia entre la presión de vapor de agua en la superficie evapotranspirante y el aire circundante es el factor determinante para la remoción de vapor. Áreas bien regadas en regiones áridas secas y calientes, consumen grandes cantidades de agua debido a la gran disponibilidad de energía y al poder de extracción de vapor de la atmósfera. En cambio en regiones húmedas tropicales, a pesar de que el ingreso de energía es elevado, la alta humedad del aire reducirá la demanda de evapotranspiración. En este último caso, como el aire está ya cerca de saturación, puede absorber menos agua adicional y por lo tanto la tasa de evapotranspiración es más baja que en regiones áridas.

2.13.4 VELOCIDAD DEL VIENTO

Del estudio realizado por la FAO 56, el proceso de remoción de vapor depende en alto grado del viento y de la turbulencia del aire, los cuales transfieren grandes cantidades de aire hacia la superficie evaporante. Con la evaporación del agua, el aire sobre la superficie evaporante se satura gradualmente con vapor. Si este aire no se substituye continuamente por un aire más seco, disminuye la intensidad de remoción de vapor de agua y la tasa de evapotranspiración disminuye. La demanda evapotranspiratoria es alta bajo condiciones de tiempo caliente y seco debido a la sequedad del aire y de la cantidad de energía disponible como radiación solar directa y calor latente. Bajo estas circunstancias, mucho vapor de agua puede ser almacenado en el aire

mientras que el viento puede promover el transporte del agua permitiendo que se retire mayor cantidad de vapor de agua. Por otra parte, bajo condiciones atmosféricas húmedas, la alta humedad del aire y la presencia de nubes hacen que la tasa de evapotranspiración sea más baja. El aumento de la velocidad del viento para las dos condiciones climáticas presentadas, afecta la evapotranspiración en diferente forma como muestra la pendiente de las curvas en la Figura 10. Cuanto más seca esté la atmósfera, más grande será el efecto sobre la ET y mayor es la pendiente de la curva. Para las condiciones húmedas, el viento puede sustituir el aire saturado solamente por aire levemente menos saturado y así reducir la energía térmica. Por tanto, bajo condiciones húmedas la velocidad del viento afecta la evapotranspiración en un grado mucho menos importante que bajo climas áridos en los que variaciones pequeñas en la velocidad del viento pueden dar lugar a importantes variaciones en la evapotranspiración.

3. METODOLOGÍA

3.1 ANÁLISIS DEL SISTEMA ACTUAL DE LISÍMETROS

Con el sistema actual de lisímetros se puede establecer si un criterio de riego aplicado fue suficiente o si tuvo un impacto negativo en el cultivo. De acuerdo a la experiencia de los floricultores el criterio que se tiene para decir si el criterio de riego fue suficiente, es cuando luego del riego el lixiviado llega al 30% del agua total aplicada, es en este punto que los floricultores consideran que no hay sobresaturación de agua. Por otro lado se dice que tuvo un impacto negativo cuando se presenta un exceso de agua, esto es cuando se pierden los nutrientes del suelo por el flujo alto de agua, también es negativo cuando hay una insuficiencia del recurso hídrico, y se presenta cuando no se aplica agua suficiente, que tiene como consecuencia un fenómeno llamado el estrés hídrico; cuando se produce este fenómeno la planta se seca y no vuelve a absorber agua con lo cual la planta muere.

La evaluación del criterio se realiza según la evapotranspiración y el lixiviado obtenidos en la medición del día, por lo cual el criterio para el siguiente día se va tomar teniendo en cuenta el resultado del día anterior, éste criterio es basado únicamente en la experiencia del floricultor, y el éxito o el fracaso de la producción depende de ello, de esta manera se establecen los criterios de riego en la actualidad en la sabana de Bogotá. El problema identificado respecto a la manera en la que se definen los criterios de riego actualmente, es que no hay manera de establecer un criterio que satisfaga los requerimientos hídricos del cultivo teniendo en cuenta su historial y sus condiciones actuales, tampoco se puede tener certeza sobre si el criterio de riego aplicado es bueno o malo, porque no se puede predecir por medio de técnicas controladas el tipo de resultado esperado.

Para este problema se hace necesario la aplicación de un sistema de inteligencia artificial que permita predecir criterios favorables, para evitar daños en la producción del cultivo y el desperdicio de agua mejorando así el proceso de cultivo en una de sus etapas.

3.2 COMPARACIÓN DE TÉCNICAS

Teniendo en cuenta el funcionamiento de los lisímetros de pesada, de la manera en la que se generan los criterios actualmente, y del tipo de mejora que se quiere implementar, se procede a realizar comparaciones de las técnicas de IA, para determinar cuales se podrían ajustar a la solución que se quiere dar, y para lo cual se requiere un sistema predictivo, debido a que el principal problema es que no se cuenta con un criterio anticipado que satisfaga el recurso hídrico necesario por el cultivo de mini-clavel, el cual permita el uso de múltiples variables de entradas y salidas minimizando el error haciendo así el sistema confiable.

Además de esto el sistema debe permitir la implementación de rangos para el control de cada una de sus variables de acuerdo a los parámetros encontrados después de analizar cada una de ellas. Es necesario que el sistema cuente con una base de conocimiento para ser entrenado continuamente y finalmente pueda decidir qué criterio es el adecuado para el siguiente día de riego.

Por medio de los sistemas expertos se aprovecha el conocimiento de los floricultores en cuanto a la manera de que ellos toman un criterio y así evaluar el impacto de un criterio. Teniendo en cuenta que existen sistemas expertos basados en reglas, y que dichas reglas se pueden simular por medio de la lógica difusa, se podría así obtener un variable de salida que indique la eficiencia de un criterio aplicado.

Haciendo uso de las Redes Neuronales Artificiales (RNA) y del tipo de RNA como lo es la *backpropagation* se puede predecir el valor de la evapotranspiración, que es la variable mediante la cual se pretende mejorar el criterio de riego en esta propuesta, también se aprovechan las ventajas como la auto-organización, para que después de una etapa de entrenamiento adquiera una organización propia basada en las variables definidas. Debido a la capacidad de aprender a realizar tareas a partir de una experiencia o entrenamiento, se obtendría un resultado basado en los registros históricos.

El razonamiento basado en casos se podría ajustar a la solución en el caso de que se contara con una base del conocimiento amplia, que cuente con los casos registrados con la información del lixiviado, la evapotranspiración para el día n de medición, el criterio tomado en el día n , y la

evaluación del resultado del criterio para el día $n+1$, sin embargo no se cuenta con una base de casos y resultados tan amplia para poder evaluar los criterios de riegos por medio de esta técnica de IA.

Por medio del Aprendizaje Supervisado se puede obtener una aplicación automatizada capaz de clasificar con precisión o que infiera la realidad sobre el criterio de riego en base a sus características, con la presencia de un agente externo que controle el proceso de entrenamiento, estableciendo la respuesta que debería generar la red (output del sistema) a partir de una entrada determinada.

Algoritmos genéticos podría ser una técnica aplicada al problema para mejorar los criterios de riego, por medio de la obtención de la evapotranspiración, si se contara con una función *fitness* o función objetivo, como lo es en el caso de los modelos teóricos existentes basados en variables climáticas, sin embargo para este tipo de problema al no contar con una función objetivo no se podrían evaluar la población ni sus siguientes generaciones.

Por lo anterior las técnicas de IA que se ajustan a las necesidades son los *Sistemas Expertos* basados en reglas, ya que permiten definir una serie de reglas que a partir de la experiencia de los agricultores hacen que el sistema esté ligado a su conocimiento. Por otro las *Redes Neuronales* permiten obtener resultados a partir del entrenamiento con datos históricos entregando a cada variable un peso determinado el cual define como a una entrada como buena, regular o mala, *Aprendizaje Supervisado* es implementado por la red neuronal en el entrenamiento, y con esto por medio de casos buenos proporciona una base del conocimiento más favorable.

3.3 MODELO PROPUESTO

El modelo propuesto en este trabajo consta de dos entradas, la Evapotranspiración y el Lixiviado. Estos datos son obtenidos del sistema de lisímetros de pesada, lo cuales cuentan con registros históricos que soporten el entrenamiento del modelo. Se llega a la deducción de estas 2 variables, después de evaluar y descartar otras variables posibles; se encuentra que tomando la evapotranspiración como variable de entrada, se evita el problema de tener un registro erróneo por el peso de la planta, debido a que se hace difícil deducir si el incremento del peso del contenedor de la planta se debe al crecimiento natural de la misma, o si es debido al agua aplicada.

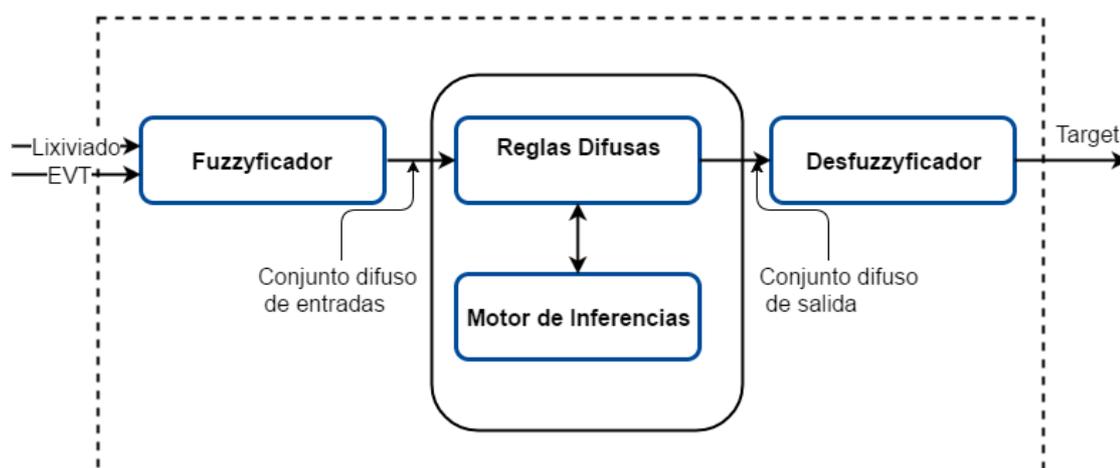
Por otro lado las variables climáticas no han sido tomadas en cuenta puesto que ya existen estudios y modelos teóricos que se tienen como foco dichas variables, sin embargo dichos modelos teóricos desarrollados no fueron creados teniendo en cuenta las condiciones de un clima tropical, tal cual es el que se presenta en Colombia. Por tanto se quiere tomar un enfoque distinto, que no dependa de algo que aún y con los desarrollos tecnológicos llevados a cabo es difícil de predecir con exactitud como lo es el clima.

Las mediciones que realiza el sistema de lisímetros da como resultados el peso en kilogramos para el peso para el contenedor del lixiviado y para el contenedor de la planta y los sustratos, tratando la medición realizada en un día y procesando los datos por el modelo se puede obtener la evapotranspiración en kg, por medio de una conversión a lámina de agua, que es el valor teórico en el cual es expresada la evapotranspiración, se obtiene la cantidad en el Litros de agua que requiere la planta, y la cantidad en litros que se encuentra en el recipiente del el lixiviado. El lixiviado está comprendido en un rango de un rango de 0,1 a 0,7 litros y para la evapotranspiración el rango es de 3 a 8 litros de agua.

El modelo propuesto está separado en dos partes, la primera es un filtro de lógica difusa (Figura 3-1) que va a determinar si un grupo de entradas (lixiviado y evapotranspiración) forman un criterio bueno, regular o malo con el fin de asignar un peso determinado a dicha entrada para el siguiente filtro. Todo esto se hace a partir de unas reglas definidas por nuestro sistema experto que son en realidad personas dedicadas al tema de siembra de mini-clavel y que tiene experiencia

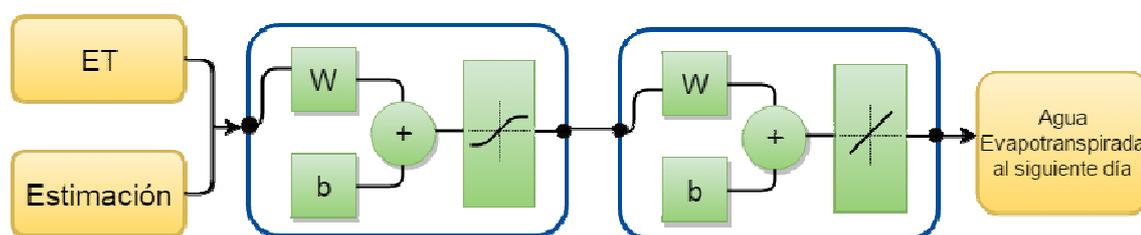
y total voto de confianza en su declaración. La salida del sistema de lógica difusa completa el grupo de entradas para la red neuronal predictiva que es el segundo filtro del sistema.

Figura 3-1: Diagrama de bloques del modelo de Lógica Difusa implementado. Fuente: elaboración propia



La red neuronal de tipo *backpropagation* (Figura 3-2) es entrenada con el objetivo que genere como salida la cantidad de agua que será evapotranspirada al siguiente día de la medición. La evapotranspiración es así el criterio con el cual se va a indicar la cantidad de agua que la planta necesita realmente, esta variable cuenta con sustento científico en la toma de decisiones de volúmenes y tiempos de riego. Este resultado obtenido debe pasar primero por una función matemática de conversión, para así saber la cantidad de agua se debe aplicar la planta.

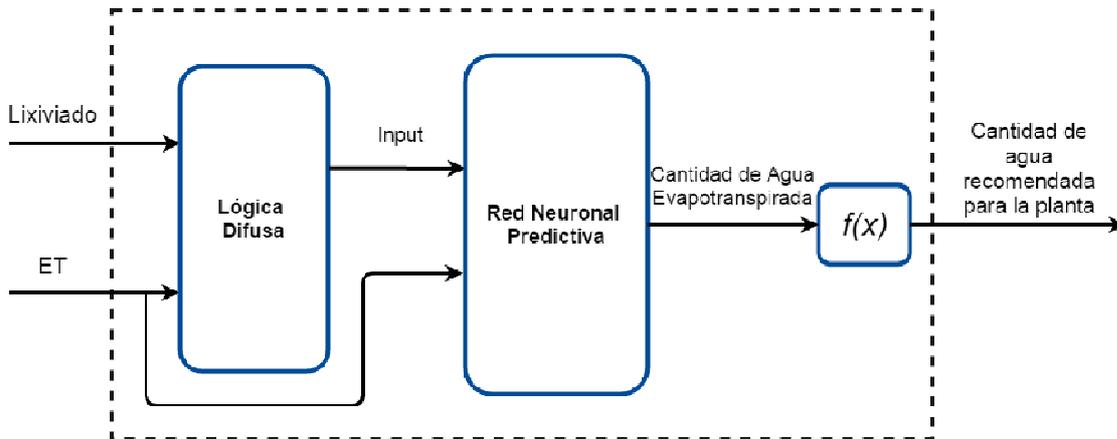
Figura 3-2: Modelo de la Red Neuronal Artificial tipo Backpropagation. Fuente: elaboración propia



Ensamblando las partes descritas anteriormente se obtiene el modelo final, mostrado en la Figura 3-3. Este modelo cuenta con las variables suficientes para la toma de decisiones, que obtiene como resultado la predicción de la evapotranspiración para el día siguiente, que es la variable con sustento teórico de la cual se deduce el criterio de riego, y así aprovechar de mejor manera el

recurso hídrico que se utiliza para el riego, aportando a la planta las mejores condiciones y partiendo de entradas de fácil acceso para la mayoría de sistemas de riego de mini-clavel en la Sabana de Bogotá. De esta manera se espera, mejorar el criterio de riego para estos cultivos y predecir así la cantidad de agua exacta que la planta necesita para su correcto crecimiento.

Figura 3-3: Modelo propuesto para la estimación de la EVT. Fuente: elaboración propia



4. MODELO EN MATLAB

Para la elaboración de este modelo se utilizó Matlab como herramienta, debido a la facilidad en el proceso de modelamiento, y el análisis de resultados por medio de las herramientas gráficas que ofrece.

4.1 SISTEMA DIFUSO

Para esta parte del modelo en específico se utilizó la herramienta de Matlab, *Fis Editor* (Figura 4-1). Se implementó con la función triangular para describir valores intermedios, su principal ventaja reside en que la función triangular implica un margen de tolerancia alrededor del valor que se toma como más representativo al valor lingüístico (malo, regular y bueno) asociado al conjunto difuso.

4.1.1 ENTRADAS Y SALIDAS DEL SISTEMA

En primer lugar se definieron las entradas del modelo, las cuales son el Lixiviado y la Evapotranspiración. Para el lixiviado se definen los rangos mostrados en la Figura 4-2. Estos rangos fueron escogidos después de hacer un análisis a los datos históricos previamente mencionados, buscando que cada rango acogiese de la mejor manera todos los posibles valores.

Figura 4-1: Lógica difusa en la herramienta Fis Editor

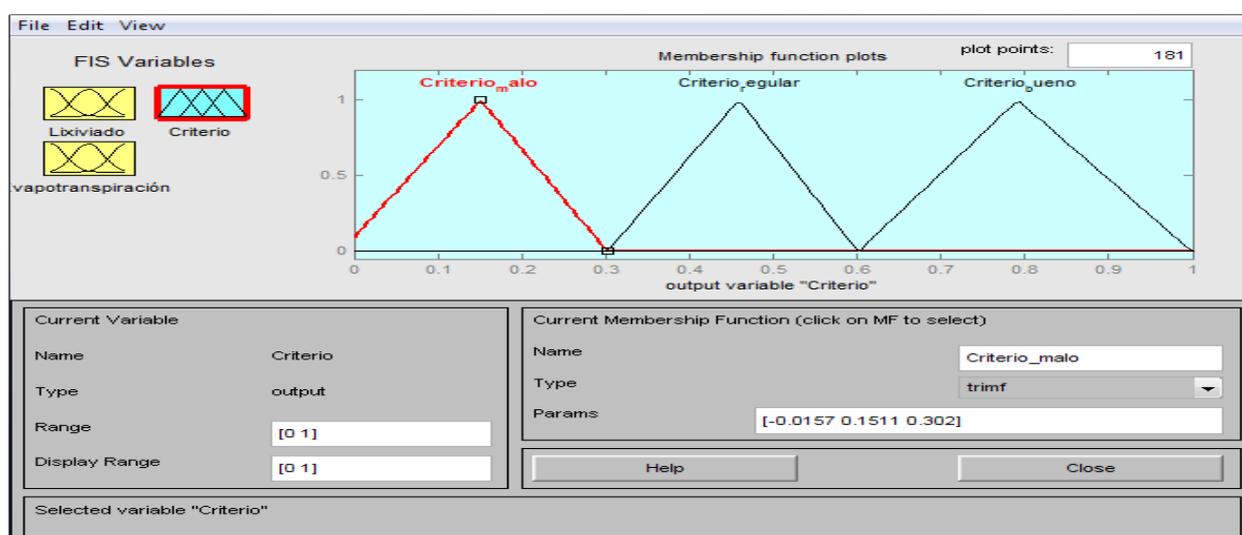
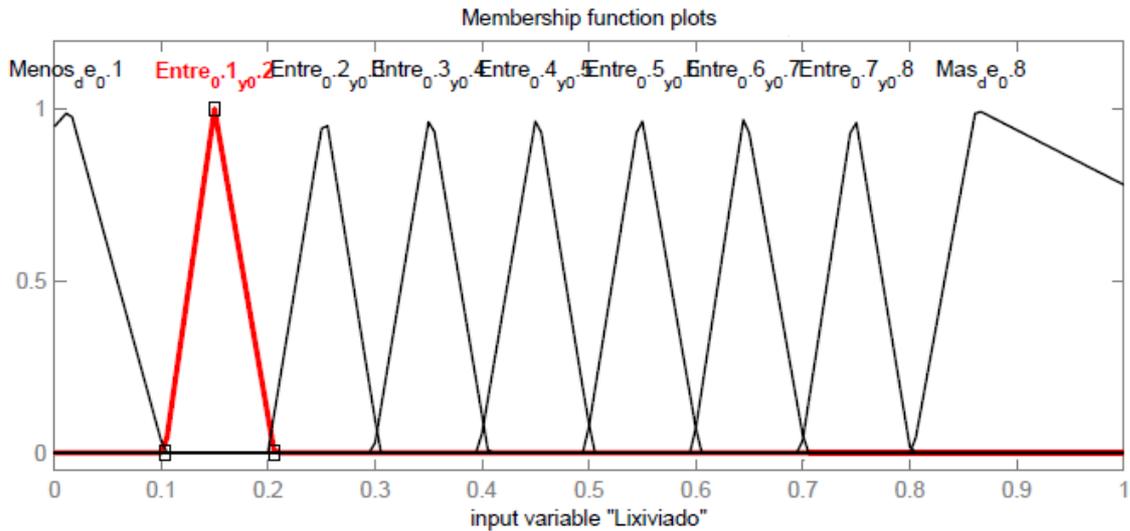
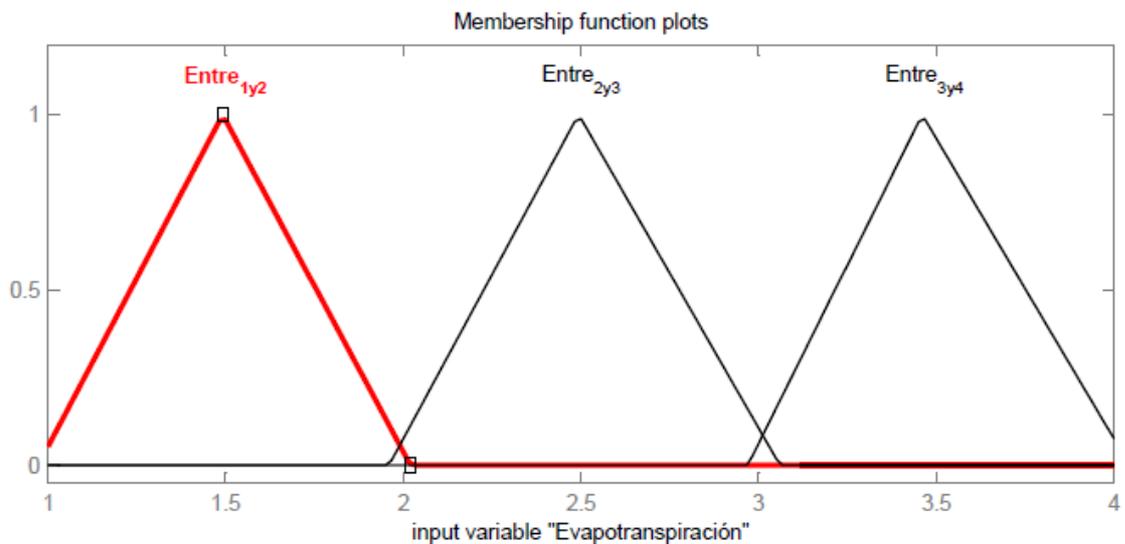


Figura 4-2: Entrada Lixiviado



El lixiviado puede tomar valores entre 0 y 1, en el histórico se reflejó que no hay un patrón completamente definido por el cual crear sub-rangos más grandes, que faciliten la definición de reglas, por lo tanto se decidió dividir en intervalos de 0,1.

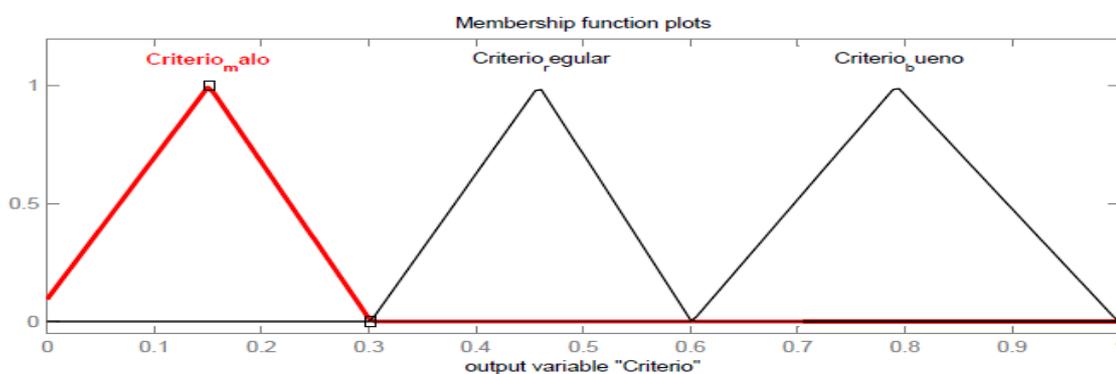
Figura 4-3: Rangos establecidos para la variable de entrada Evapotranspiración



En el caso de la evapotranspiración, los datos históricos se encuentran en un rango entre 1 y 4, y se hizo por medio de divisiones de cada unidad obteniendo así tres rangos. Para ambas entradas y la salida se utilizaron funciones *TrimF*, que es la función aplicada a los conjuntos triangulares en cada uno de los rangos.

En cuanto a la salida, se definieron tres criterios que permiten evaluar cada uno de los días de medición en los datos históricos y los definen como una buena, regular o mala medición.

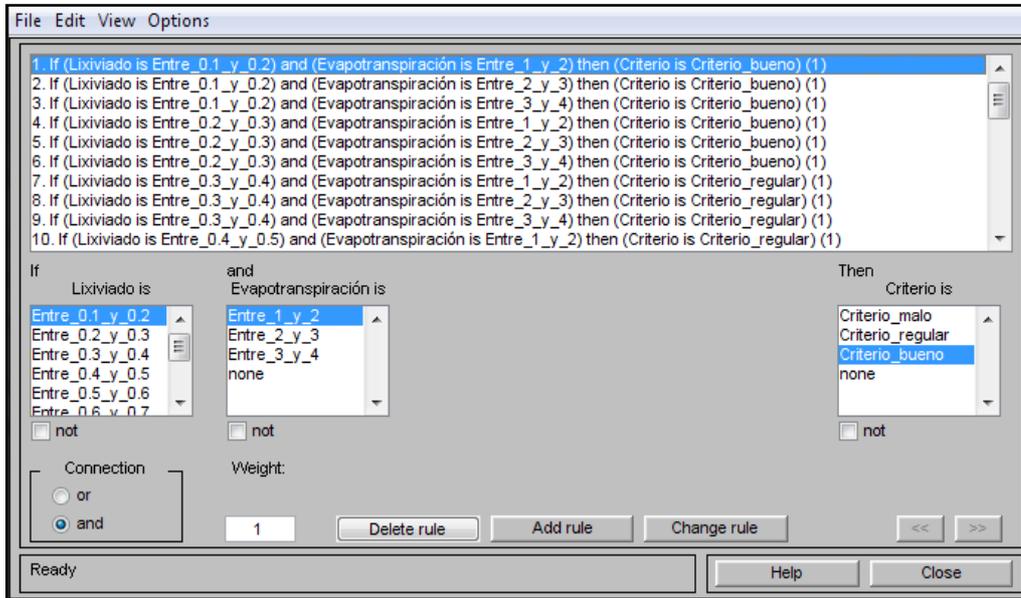
Figura 4-4: Criterio de Clasificación



4.1.2 REGLAS

Las reglas del sistema fueron escritas en base al conocimiento de nuestro agente experto, es decir los floricultores que tienen un amplio conocimiento en el tema y conocen el comportamiento de los cultivos. En la Figura 4-5 se muestran las reglas y como están definidas, el compendio completo de reglas se muestra en el Anexo B.

Figura 4-5: Definición de Reglas



Se utilizaron conexiones *and* y *or* para la definición de un total de 36 reglas, este fue el resultado de un análisis profundo y concienzudo de la influencia de cada variable en la evapotranspiración.

Figura 4-6: Visor de Reglas

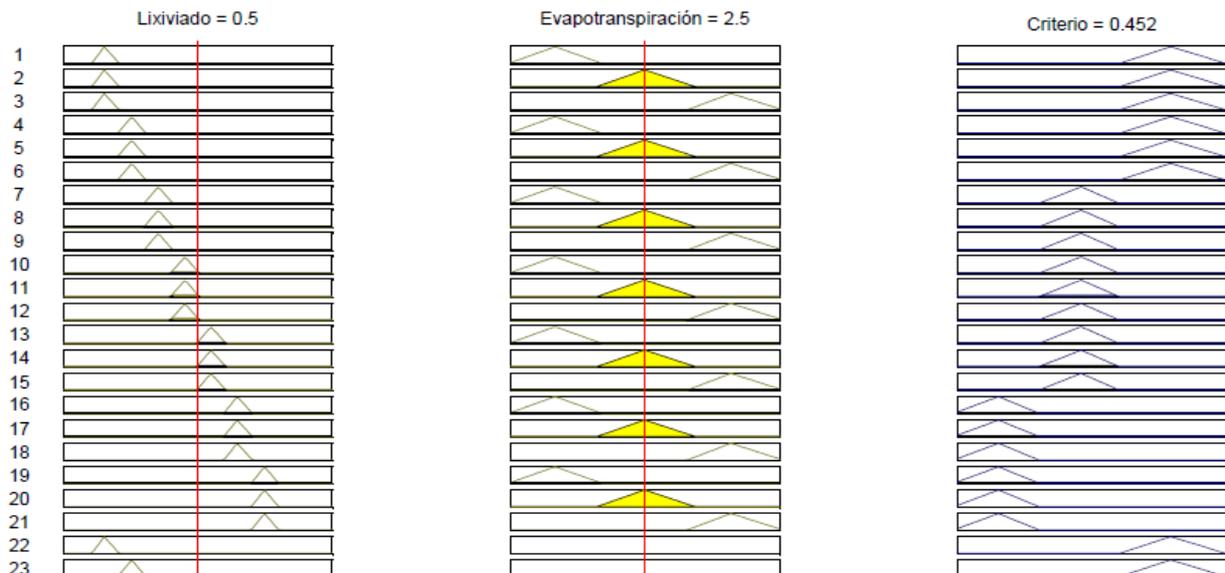
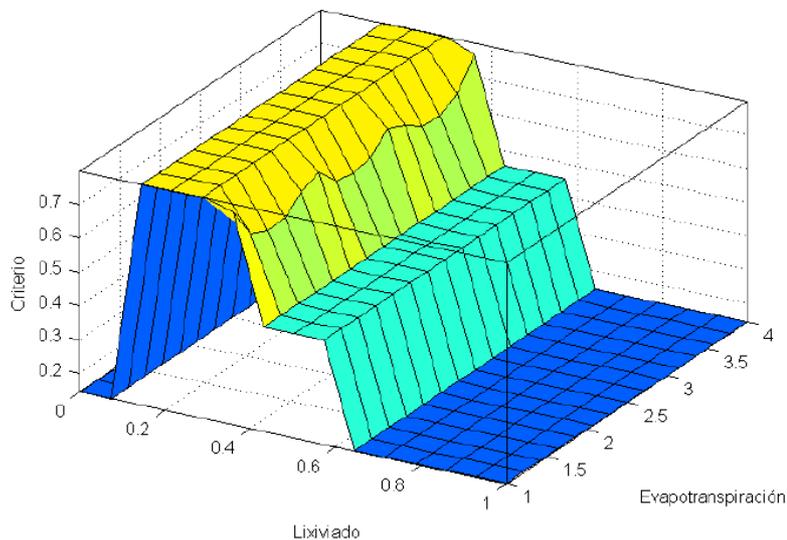


Figura 4-7: Gráfica de Superficie



De la Figura 4-7 se observa que de acuerdo al sistema difuso generado, hay una mayor dependencia respecto al lixiviado que a la evapotranspiración, para la evaluación de un criterio de riego aplicado.

4.1.3 EVALUACIÓN

Para la evaluación del sistema difuso se utilizaron los datos históricos del lixiviado y la evapotranspiración, dando como resultado el vector de entrada para la red neuronal. Datos para la evaluación del problema (Anexo A)

Tabla 4-1: Ejemplo de serie datos evaluados por el sistema difuso.

Evapotranspiración	Lixiviado	Salida
2.1300	0.5960	0.4521
2.0500	0.6110	0.1449
2.7600	0.4120	0.4524
2.8800	0.2870	0.7990
2.0800	0.7490	0.1461
2.1400	0.6420	0.1461
1.6500	0.7100	.1448

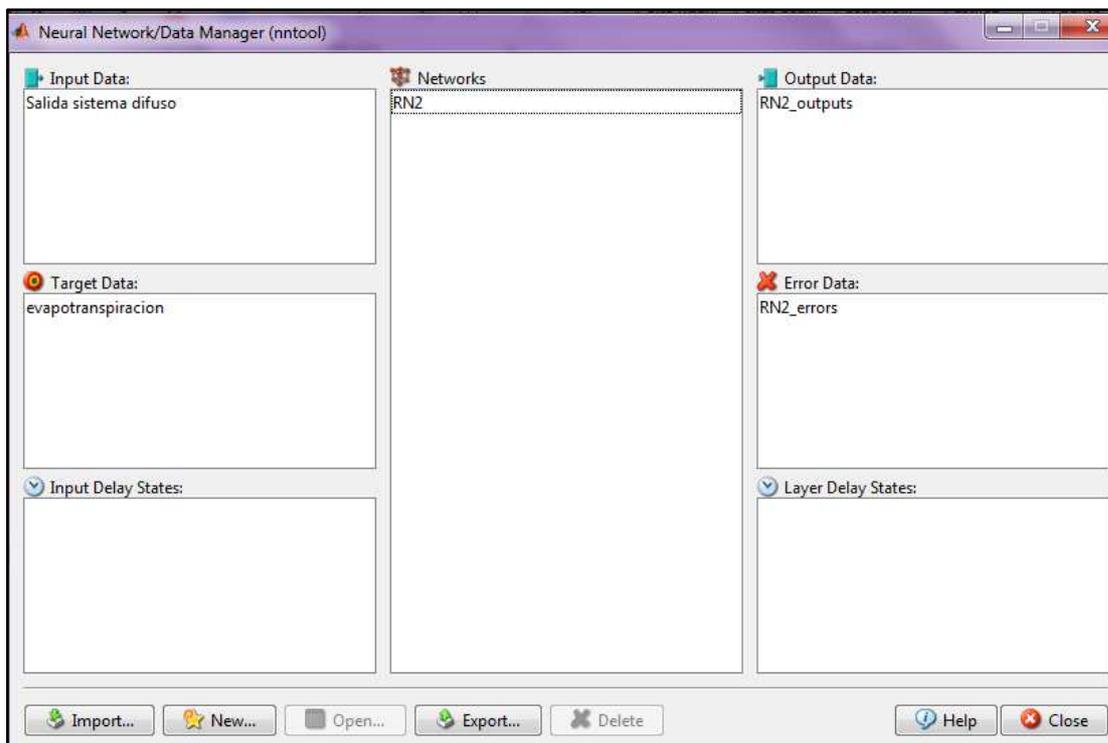
4.2 RED NEURONAL

Debido a que el modelo de la red neuronal resulta después de un largo proceso de pruebas, en donde se analiza cuáles son los mejores atributos para la red, se mostrarán a continuación dos de los mejores resultados utilizando variaciones en el número de neuronas utilizadas y las épocas de entrenamiento. Para la red neuronal se utilizó la herramienta nnTool de Matlab.

4.2.1 INPUT Y TARGET

Como se definió previamente, el input y target son la salida del sistema difuso y la evapotranspiración respectivamente.

Figura 4-8: Herramienta nnTool de Matlab



4.2.2 REDES NEURONALES GENERADAS

La primera red consta de dos capas y seis neuronas en la primera capa (Figura 4-9), la segunda red cuenta también con 2 capas, pero en la primera capa tiene 7 neuronas (Figura 4-10), finalmente la tercera red neuronal (Figura 4-11) cuenta con 8 neuronas en la capa oculta. En los 3 casos se aplicó la función de entrenamiento *TrainLm*, que es a menudo el algoritmo de propagación hacia atrás más rápido de Matlab, y es muy recomendable como primera opción supervisado algoritmo, aunque requiere más memoria que otros algoritmos.

Figura 4-9: Primera red neuronal generada

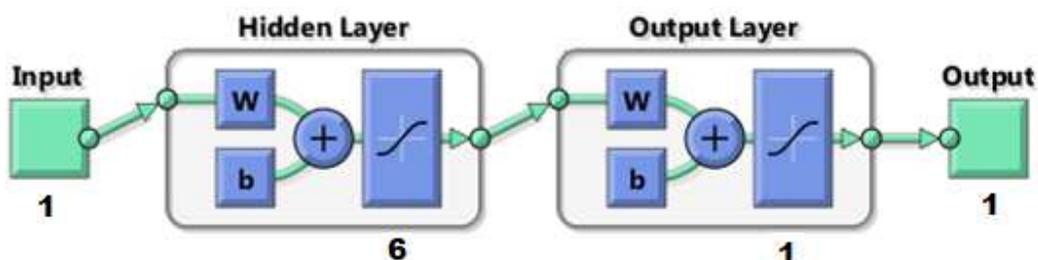


Figura 4-10: Segunda red neuronal generada

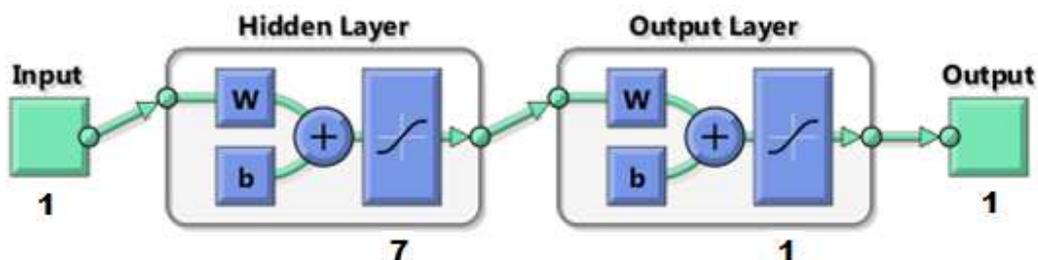
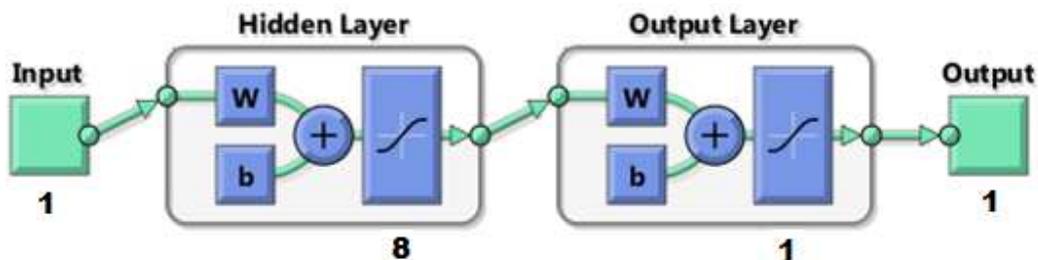


Figura 4-11: Tercera red neuronal generada

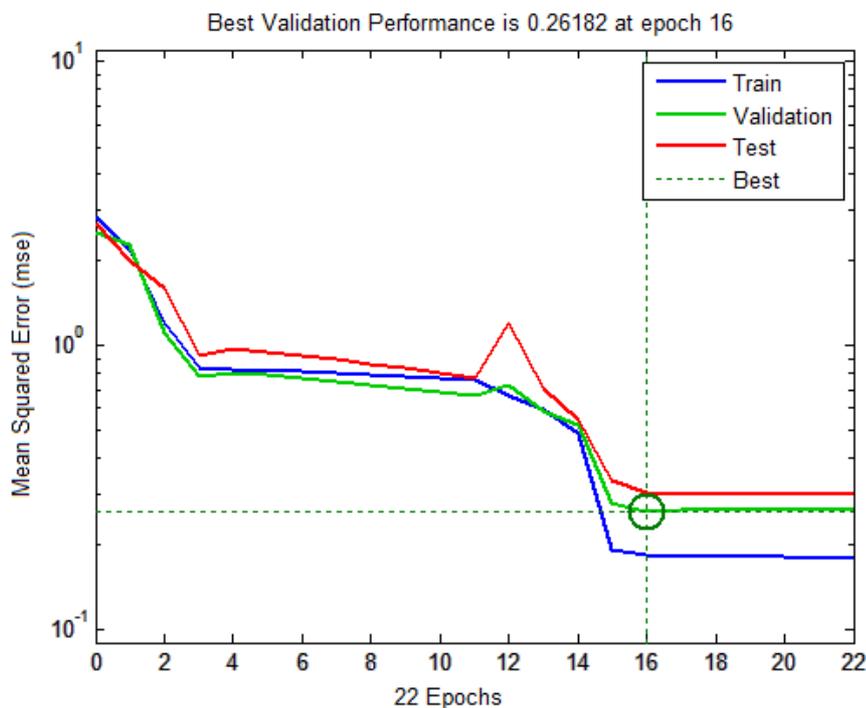


Después de entrenar las 3 redes, el margen de error fue muy bajo, y se obtuvo un resultado adecuado al esperado. Para simular el modelo con las diferentes redes, se realiza primero una simulación usando la primera red, y luego se simula implementando el mismo modelo pero con la segunda y finalmente con la tercera para ver con cuál se obtienen resultados más aproximados al valor de la evapotranspiración del siguiente día. El valor de regresión con la primera red fue de 0.4690, con la segunda red fue de 0.5126 y con la última red fue de 0.7727, por lo tanto se toma la tercera red con 8 neuronas en capa oculta, porque presenta el valor más alto.

4.2.3 DESEMPEÑO

El desempeño de la red neuronal se ve en la Figura 4-13, dónde la convergencia se encuentra en la época 16, es decir que tuvo 16 generaciones.

Figura 4-12: Desempeño del la primera red neuronal



4.2.4 ENTRENAMIENTO

El entrenamiento de la red neuronal es supervisado, sometiéndola a un conjunto de entrenamiento del que se conoce de antemano la respuesta correcta (criterio real). A continuación se explica cuál es el conjunto de entrenamiento de la red y como esta modifica sus sinapsis interna en la búsqueda de ofrecer un mejor pronóstico: Conjunto de patrones para el entrenamiento: Para el entrenamiento se toma un segmento de 104 periodos tomado de la serie temporal original. El segmento comienza desde la semana límite seleccionada por el usuario contando 104 días hacia atrás. Dado que la entrada de la red toma un conjunto de 26 días el conjunto de entrenamiento está conformado por todos los grupos de 26 días consecutivas que se pueden formar a lo largo de 104 días, en total son 78 patrones de entrenamiento. Este número de patrones es fácil de deducir si se observa que $26 \times 78 = 104$.

Figura 4-13: Conjunto de Patrones para el entrenamiento. Fuente: elaboración propia

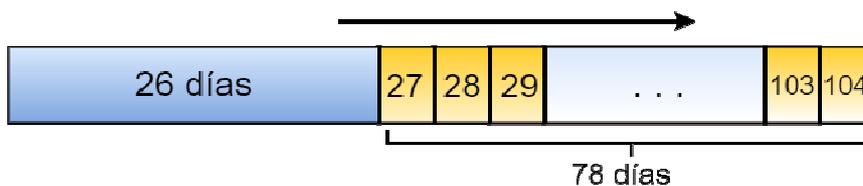
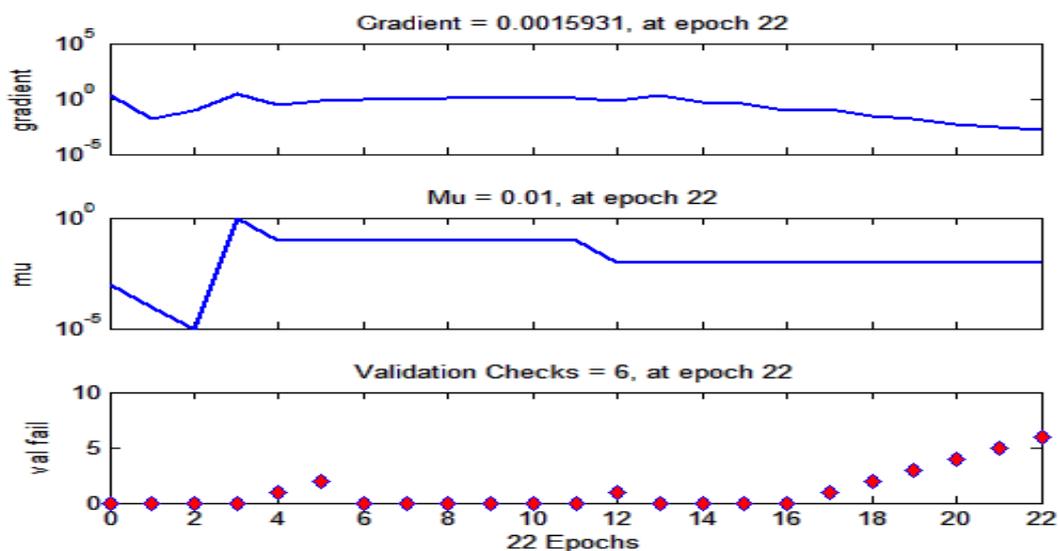


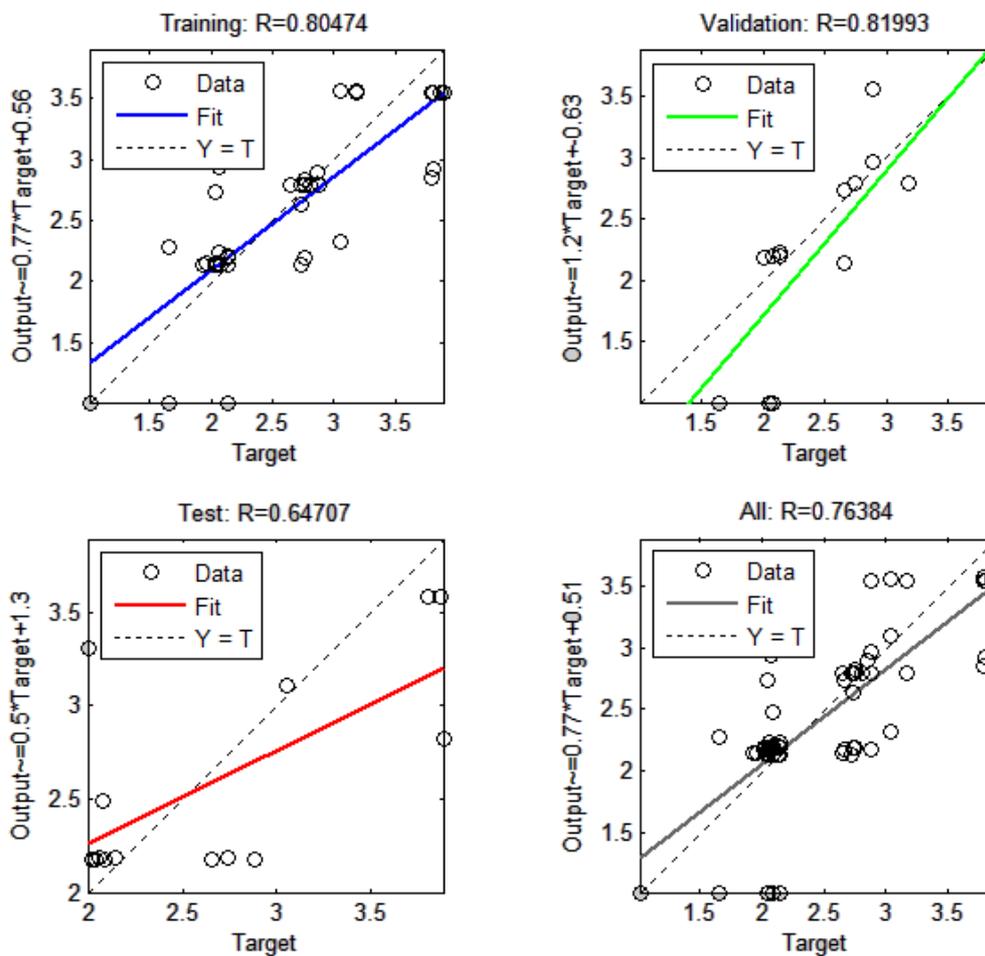
Figura 4-14: Resultados del entrenamiento de la primera red neuronal



4.2.5 REGRESIÓN

En la Figura 2-1, se aprecia la regresión de la RN, donde se muestran las salidas de la red con respecto a los objetivos para los conjuntos de entrenamiento, validación y pruebas. Para un ajuste perfecto, los datos deben caer a lo largo de una línea de 45 grados, donde las salidas de la red son iguales a los objetivos. Para este problema, el ajuste es razonablemente bueno para todos los conjuntos de datos, con valores de R (regresión) en cada caso de 0.763 o superior.

Figura 4-15: Resultados de regresión para la primera red neuronal



4.3 SIMULACIÓN DEL MODELO GENERADO

Para la simulación del modelo generado se van a tomar 4 series de 10 datos no continuos, para validar el modelo en diferentes momentos del cultivo. El objetivo de la simulación es validar si ingresado la series de datos, el resultado obtenido por el modelo predice la evapotranspiración del día $n+1$, y se cuentan con los valores reales obtenidos en el histórico para poder validar el error del modelo, el resultado de la simulación se encuentra en el Anexo C

4.3.1 COEFICIENTE DE CORRELACIÓN PARA EL RESULTADO DE LA SIMULACIÓN

El coeficiente de correlación es una medida que indica la situación relativa de un suceso respecto a una variable, que calcula como se muestra en la Ecuación 4-1. Para este caso se implementó para mostrar la relación existente entre los resultados obtenidos por la simulación de modelo de predicción, y el valor real obtenido para el día pronosticado. Este valor varía entre los límites +1 y -1, el valor $r = 0$ indica que no existe relación entre las variables; si el valor de la correlación es 1, quiere decir que es una correlación perfecta positiva, al crecer o decrecer el valor de la evapotranspiración real, crece o decrece el valor de evapotranspiración arrojado por el modelo, también puede ser negativa; al crecer o decrecer la evapotranspiración, decrece o crece el valor de evapotranspiración arrojados por el modelo.

Ecuación 4-1

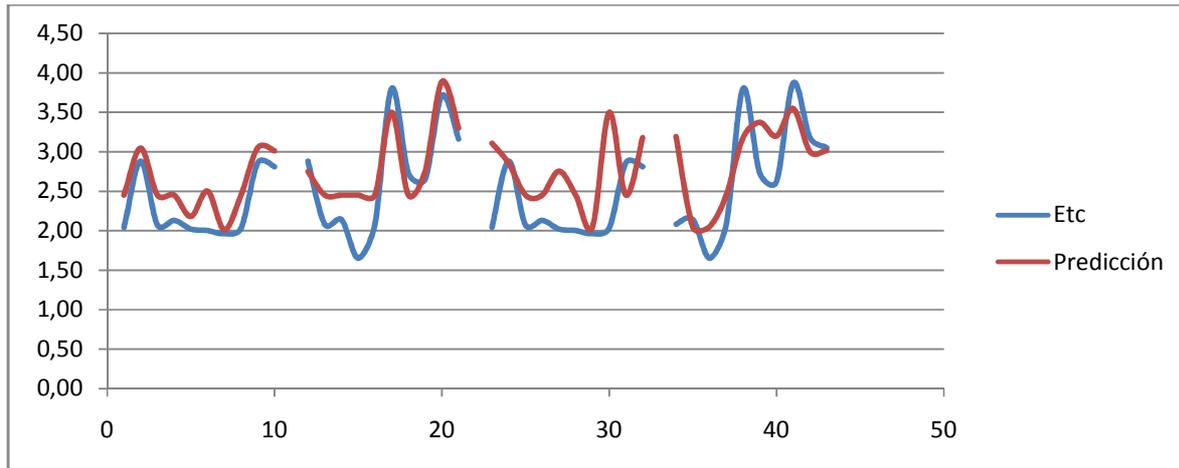
$$r = \frac{\sum xy}{\sqrt{\sum x^2 \sum y^2}}$$

Por medio del coeficiente de correlación se va a validar el comportamiento que tiene los valores obtenidos por la simulación respecto a los valores reales de ET obtenidos por los lisímetros de pesada, el compendio de estos datos se encuentra en el Anexo C.

El coeficiente de correlación que se obtuvo con el modelo generado, en cual la Red Neuronal tenía 6 neuronas fue de 0,4690, es un valor positivo de correlación positivo sin embargo no es lo suficientemente alto para dejar el modelo final con dicha red. Por otro lado el coeficiente de correlación obtenido con el modelo en el que se utilizó la segunda red, compuesta por 8 neuronas

en su primera capa fue de 0,7277, éste es un valor de correlación mucho más alto y por tanto es la red neuronal que se toma para el modelo final.

Figura 4-16: Comportamiento del Valor de Predicción obtenido por el Modelo Generado y el Valor Real



4.3.2 ERROR DEL MODELO

El error del modelo se calcula por medio de la Ecuación 4-2.

Ecuación 4-2

$$E_M = Valor Real - Valor Pronosticado$$

El error obtenido con el modelo generado es del -0.27; que el error del modelo para este caso sea negativo resulta conveniente, porque quiere decir que el valor pronosticado es mayor al valor real evapotranspirado. Para este problema de aplicación es necesario que la cantidad de agua sea un poco mayor teniendo en cuenta que la Evapotranspiración es la cantidad justa de agua que la planta va a consumir, sin embargo, es necesario tener una cantidad de lixiviado que haga visible que la planta no se está quedando sin agua y como consecuencia muera, pero que tampoco la cantidad de agua en el lixiviado sea mucha porque es donde se evidencia un desperdicio de agua, y el error del -0.27 permite visualizar lo anterior descrito de manera favorable.

En la Figura 4-16, se observa que el valor de predicción obtenido por el modelo generado, fue en general mayor al valor real de la evapotranspiración, sin embargo el margen es corto por lo cual el modelo es confiable.

4.4 COMPARACIÓN RESPECTO A LOS MODELOS TEÓRICOSEXISTENTES

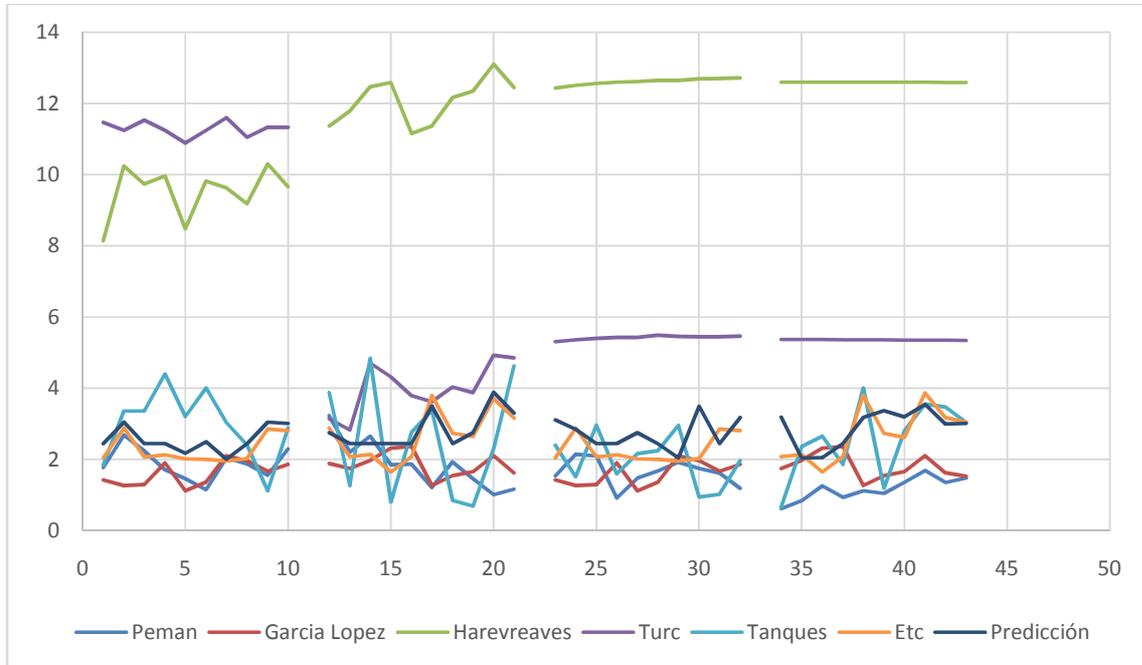
En el capítulo 2.10 se exponen los distintos modelos teóricos que están basados en las variables climáticas, se va a analizar el valor de predicción por el modelo generado, y los valores arrojados por los modelos teóricos basados en variables climáticas, en el Anexo A se encuentran las variables climáticas que son evaluadas en dichos modelos teóricos, y los valores de Evapotranspiración para cada modelo Teórico, los valores del Modelo Generado se encuentra en el Anexo C.

Tabla 4-2: Coeficiente de Correlación del Modelo Generado y los Modelos Teóricos existentes

	Peman	GarciaLopez	Hargreaves	Turc	Tanques
Modelo Generado	-0,2565	-0,1644	0,071526419	-0,0355	-0,2211

De la Tabla 4-2 se observa que el coeficiente de correlación del modelo generado, respecto a los valores teóricos es en la mayoría de casos negativo o tiende al cero, por lo cual la correlación es casi nula, y no existen comportamientos similares dentro de los diferentes modelos. Lo anterior se puede comprobar con la Figura 4-17, donde se observan comportamientos muy distintos de evapotranspiración, esto no implica que el modelo generado esté erróneo debido a que la validación de éste se hace es respecto al valor real de evapotranspiración (ETc), realmente lo que muestra es que a pesar de que los diferentes modelos teóricos están basados en variables climáticas, en algunos casos similares o las mismas, dichos valores son muy distintos entre ellos. Los valores que más se acercaron fueron los obtenido por la predicción delo modelo generado y el método de Turc.

Figura 4-17: Comparación de los valores de evapotranspiración obtenidos por los modelos teóricos y el modelo generado.



5. OBJETIVOS vs RESULTADOS

Los factores climáticos afectan directamente el comportamiento de la planta con resultados positivos o negativos, sin embargo, como se mencionó anteriormente éstos no pueden predecirse con exactitud y sus acciones sobre la planta no son precisos. Por esta razón se concluye, que los factores climáticos no se tomarán como criterio de predicción en esta investigación.

Se realizó una comparación profunda de las técnicas de Inteligencia Artificial, evaluando cada una de sus características y clasificándolas en ventajas y desventajas para el presente proyecto. Es así como se llega a la conclusión de que las técnicas que mejor se adecuan al presente problema de investigación son los Sistemas Difusos y las Redes Neuronales en conjunto.

Después de generar el presente modelo, se hicieron una serie de pruebas de entrenamiento para encontrar así mejores resultados con cada iteración. Este proceso se realizó teniendo en cuenta la base de conocimiento adquirida directamente de los floricultores dedicados al mini-clavel y la información arrojada por los lisímetros. Finalmente después de la aplicación de modelos matemáticos especializados para la evaluación de este tipo de datos, se encontró que dichos métodos no ofrecen resultados favorables, ya que en la mayoría de los casos tienen coeficientes de correlación negativo o muy cercanos al cero, lo cual quiere decir que no tienen comportamientos ni valores similares (ver Tabla 4-2)

Por último, el modelo fue generado con un error de -0.27, lo cual asegura que la planta no muere por falta de agua. Se entrenó y simuló el modelo obteniendo un coeficiente de correlación de 0.7277, es decir que la relación del comportamiento respecto a los valores arrojados por el modelo y los reales son muy parecidos. Es así como resulta una forma confiable para mejorar los criterios de riego de cultivo de mini-clavel, que actualmente se utilizan en la Sabana de Bogotá, que tiene en cuenta el histórico de ET entregando una herramienta más acertada que ayude en el riegos y evitando el desperdicio del recurso hídrico.

6. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

6.1 CONCLUSIONES

Por medio de un modelo que obtiene como resultado la predicción del valor de la evapotranspiración para el día siguiente, se puede mejorar el criterio de riego para un cultivo de mini clavel, teniendo en cuenta que la evapotranspiración es la cantidad de agua que satisface las necesidades hídricas del cultivo.

El error de modelo generado luego de la simulación con la serie de datos reales del cultivo de miniclavel es del: -0.27, que el valor del modelo sea negativo, implica que el valor de predicción es mayor al valor real, para esta aplicación es algo favorable porque asegura que la plata no muera por falta de agua, y permite hacer seguimiento por medio del lixiviado que no va a ser mucho porque el margen de error es poco lo cual hace al modelo confiable para la predicción de valores futuros.

El coeficientes de correlación de los valores de evapotranspiración arrojados por la simulación, y el valor real de evapotranspiración para las series de datos analizados es del: 0,7277, lo cual indica una correlación alta, y un comportamiento parecido entre la serie de datos simulada y los valores reales de evapotranspiración.

Los valores de evapotranspiración obtenidos por los modelos teóricos son muy distintos entre ellos, a pesar de que en varios casos usen las mismas variables como lo son la temperatura y la humedad relativa, no muestran comportamientos similares ni tampoco valores similares. Hay que tener en cuenta que lo modelos teóricos no fueron necesariamente creados para condiciones climáticas especiales como las que se presentan en la sabana de Bogotá, lo valores del modelo teóricos más cercanos a los valores de predicción se presentan con el método de tanque, pero aun así la correlación es del -0.2211 y no se evidencia un patrón de comportamiento similar.

La relación de los factores climáticos con el cultivo de mini clavel se analizó de acuerdo a la variable de la evapotranspiración, que es la variable que determina el requerimiento hídrico del cultivo. Se encontró que respecto a la humedad hay una relación inversa, debido a que menor

humedad más evapotranspiración se obtiene, mientras que con las variables temperatura, radiación y la velocidad del viento existe un relación directamente proporcional, ya que un aumento de alguna de éstas, supone un incremento en la evapotranspiración.

Por medio de un sistema experto basado en reglas se puede obtener el conocimiento del floricultor sobre cultivos específicos, como lo es el de miniclavel, y así poder evaluar de acuerdo a los resultados de evapotranspiración y lixiviado la eficiencia de un criterio de riego aplicado. Del sistema difuso elaborado se pudo observar que la evaluación del criterio de riego aplicado depende más del lixiviado que de la evapotranspiración.

El proceso de modelación utilizando las redes neuronales es eficiente para la predicción de la evapotranspiración y permite la utilización de un bajo número de variables, como para éste caso fueron la evapotranspiración y el resultado del sistema difuso.

6.2 TRABAJO FUTURO

El presente trabajo se puede mejorar por medio de la inclusión del pH como variable de entrada en el sistema difuso, que mide la acidez de la planta y se puede determinar la calidad, características y capacidad de absorción de la planta, mejorando la producción del cultivo de clavel al saber si la planta realmente está absorbiendo agua.

Se puede mejorar el entrenamiento de la red neuronal al implementarlo para 2 picos de producción en los cultivos miniclavel de la sábana de Bogotá, porque se tendrían los escenarios del proceso de evapotranspiración de crecimiento en el primer pico, y el proceso de evapotranspiración para los siguientes ciclos adultos.

En el desarrollo de este trabajo se observó que la predicción de la red neuronal mejoraba al aumentar el número de neuronas en la primera capa, por lo cual una mejora se podría dar al aumentar el número de neuronas y cambiando la función de entrenamiento, para luego validar los resultado con los valores reales obtenidos por los lisímetros de pesada.

BIBLIOGRAFÍA

- Aamodt, A. (1991). A knowledge-intensive, integrated approach to problem solving and sustained learning. Ph.D. diss., Knowledge Engineering and Image Processing Group, University of Trondheim, Norway.
- Allen, G. R., Pereira, L. S., Raes, D., y Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. FAO:Estudios FAO Riego y Drenaje 56.
- Bagnall, A.J &Zatuchna, ZV. (2005). "OntheClassification ofMazeProblems," Applications ofLearningClassifierSystems, Studies in, Bull, Springer, pp. 307-316
- Bargiela, Roberto Alejandro. (2013). Monografía sobre Sistemas Expertos
- Bengio, Y., Frasconi, P., and Simard, P. (1993). The problem of learning long-term dependencies in recurrent networks. San Francisco. IEEE Press.
- Business Wire. (2013). Artificial Intelligence in Big Data, Commercial Apps, Mobility and Search
- Bustos M, José Ricardo. (2005). Inteligencia Artificial en el Sector Agropecuario.Recuperado el 30 de Marzo de 2015 a partir de: <http://www.docentes.unal.edu.co/jrbustosm/docs/estado2.pdf>
- Casanova, M., Messing, I., Joel, A., y Cañete, A. (2009). Métodos de estimación de la evapotranspiración de un cultivo de lechuga en condiciones de invernadero, zona central de Chile
- Cauchy, A.(1847). Méthodegénérale pour la résolution des systémesd'équationssimultanées.
- Davie, T. (2003). Fundamentals of hydrology. En *Routledge fundamentals of physical geography* (pág. 198).
- Esmeral, Y., González, C., & Flórez, V. (2011). Evapotranspiración en plantas de rosa cv. Charlotte en condiciones de invernadero en la sabana de Bogotá. I. En V. Flórez, *Sustratos, manejo del clima, automatización y control en sistemas de cultivo sin suelo* (págs. 109-26). Universidad Nacional de Colombia.

-
- FAO. (2002.). El cultivo protegido en clima mediterráneo. En *Manual preparado por el grupo de Cultivos hortícolas* (pág. 318). Roma: Dirección de Protección y Producción Vegetal.
- Feddes , R. A., & Lenselink, K. J. (1994). Evotranspiration. *Drainage principles and applications.*, pp. 145–173.
- Fernández, M., Bonachela, S., Orgaz, F., Thompson, R., López, J., M, G., y otros. (2010). Measurement and estimation of plastic greenhouse reference evapotranspiration in a Mediterranean climate. *Irrig Sci.* DOI 10.1007/s00271-0120-0210-z.
- Flórez, R. , & Fernandez, J. (2008.) *Las Redes Neuronales Artificiales, Fundamentos Teóricos y Aplicaciones prácticas*
- Galloway , J., Alan, R., & Erisman, J. W. (2008). Transformation of the Nitrogen Cycle: Recent Trends, Questions, and Potential Solutions. *Science* , 320: 889-892.
- García, J., & López, J. (1970). Fórmula para el Cálculo de la Evapotranspiración Potencial Adaptada al Trópico (15°N - 15°S). *VIII Reunión latinoamericana de Fitotécnia*. Bogotá.
- Gerard, P & Siguad, O. (2001). “YACS: Combining Dynamic Programming with Generalization in Classifier Systems,” *Advances in Learning Classifier Systems*. Springer, pp. 52–69.
- Gleick, P.(2013). Una gota en el océano. *Finanzas y desarrollo*, 50(3), 12-15. Obtenido de <https://www.imf.org/external/Pubs/FT/fandd/spa/2013/09/pdf/gleick.pdf>
- Giarratano, J. C. & Riley, G. D. (2005). *Expert systems: Principles and programming*. Boston, MA: Thompson/Cengage.
- González, C., Quintero , Q., Flórez, V., & Tafur, H. (2015a). Lisímetros de Pesada. En V. Flórez, *Avances en nutrición y manejo de flores de corte* (págs. 85-104). Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- González, C., Quintero, M., & Meneses, V. (2011c). Determinación de algunas propiedades hidrofísicas de los sustratos utilizados en cultivos de flores en la sabana de Bogotá. En V. Floréz, *Avances sobre fertirriego en la floricultura Colombiana* (págs. 13-40). Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

- González, C., Quintero, Q., Flórez, V., & Quintero, M. F. (2015b). Lisímetros volumétricos. En V. Flórez , *Avances en nutrición de flores de corte* (págs. 140-165.). Bogotá: Editorial Universidad Nacional de Colombia.
- González, C., Tafur, H., Flórez, V., & Burbano, R. (2011). Modelación del movimiento de agua en el suelo. En V. Flórez, *Avances sobre fertirriego en la floricultura Colombiana* (págs. 40-63). Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Goss, M. J., & Ehlers, W. (2009). The role of lysimeters in the development of our understanding of soil water and nutrient dynamics in ecosystems. *Soil Use and Management*, 25(3), 213–223.
- Grassi, C. (1988). Fundamentos de Riego (CIDIAT - M.). CIDIAT.
- Hargreaves, G. H. & Samani, Z. A. (1982). Estimation of Potential Evapotranspiration, Journal of Irrigation and Drainage Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers.
- Hancock, Monte F. (2011), Practical Data Mining Jr. CRC Press.
- Holland, J. (1992). Adaptation in natural and artificial systems. Ann Arbor, MI: University of Michigan Press.
- [ITC] Centro Internacional de Comercio. (2015). Recuperado el 15 de Marzo de 2015 a partir de <http://www.intracen.org/itc/sectors/floriculture/.ITC>
- Jones, T. M. (2005). AI application programming (2nd ed.). Hingham, MA: Charles River Media.
- Kashyap, P., y Panda, R. (2001). Evaluation of evapotranspiration estimation methods and development of crop-coefficients for potato crop in a sub-humid region.
- Koza, J. R. (1992). Genetic programming: On the programming of computers by means of natural selection. Cambridge, MA: MIT Press.
- Lavao, Sergio. (2016). Medición Y Modelamiento De La Evapotranspiración Real Del Cultivo De Clavel En Invernadero En La Sabana De Bogotá, Usando Lisímetros Electrónicos De Pesada
- Lucci, Stephen & Kopec, Danny. (2013). Artificial Intelligence in the 21st Century: A Living Introduction

-
- Luger, G. (2005). Artificial intelligence 5th edition: Structures and strategies. Reading, MA: Addison-Wesley.
- Matich, Damian. (2001). Redes Neuronales: conceptos básicos y aplicaciones.
- Maxim, B. (n.d.). Genetic algorithms. University of Michigan. Retrieved on Dec. 25, 2013 from <http://www.engin.umd.umich.edu/CIS/course.des/cis579/ppt/lec19a.ppt>
- Mitsuo, G., & Runwei, C. (2000). Genetic algorithms & engineering optimization. New York, NY: John Wiley & Sons.
- Riko, S., & Andreja, R. (2006). Intelligent Control Techniques in Mechatronics-Genetic Algorithm. Retrieved on 3 Oct 2013 from http://www.ro.feri.uni-mb.si/predmeti/int_reg/Predavanja/Eng/3.Genetic%20algorithm/_18.html
- Rojas, Raül. (1996). Neural Networks: A Systematic Introduction
- Rudolph, G. (1996). Convergence of evolutionary algorithms in general search spaces. In Proceedings of the Third IEEE Conference on Evolutionary Computation.
- Serrano, C. y Gallizo, J. (1996). Las redes neuronales artificiales en el tratamiento de la información financiera.
- Stefano, C., y Ferro, V. (1997). Estimation of evapotranspiration by Hargreaves formula and remotely sensed data in semi-arid mediterranean areas.
- Turc, L (1961), Estimation of Irrigation Water Requirements, Potential Evapotranspiration: A Simple Climatic Formula Evolved Up to Date
- Tzenova, L. (1978). Los lisímetros y su utilización (Informe de recapitulación). CIEN. TEC.AGRIC, Riego y drenaje Vol.1 enero.
- Vasant, Pandian. (2007). Handbook of Research on Artificial Intelligence Techniques and Algorithms.

A. Anexos: Mediciones de Variables climáticas y de los Lisímetros

A continuación se muestra los registros de las variables climáticas, para un determinado mes y el valor de ET evaluado para cada modelo teórico. Estos datos son tomados del trabajo realizado por (Lavao, 2016)

Tabla 6-1: Mediciones registradas para el mes de Octubre de 2013 en la finca de Marengo.

Día	Temperatura (°C)	HumedadRelativa (%)	Radiación
1	10,98	78	10,92
2	14	79	2,31
3	13,9	77	4,40
4	13,1	79	2,88
5	15,02	75	6,00
6	14,84	68	7,12
7	16,58	85	6,09
8	16,04	75	10,28
9	17	73	9,19
10	13,46	40	8,97
11	14,22	82	8,38
12	16,06	87	8,82
13	16,86	89	8,27
14	17,88	84	10,21
15	15,78	83	10,69
16	16,96	93	9,86
17	17,68	76	8,31
18	17,56	79	12,58
19	16,1	78	17,46

20	17,9	81	15,32
21	18,02	79	15,45
22	16,38	81	14,71
23	17,7	88	15,50
24	14,54	82	18,94
25	14,06	77	17,21
26	17,2	81	18,05
27	16,6	81	19,23
28	16,2	84	20,87
29	15,66	83	19,10
30	14,64	82	23,00
31	16,26	83	15,67
Media	17,2	79	12,12

Tabla 6-2: Calculo de coeficiente de cultivo al utilizar la ETo obtenida por el método de Garcia-Lopez, Hargreaves, Turc y Penman para Octubre de 2013

Día	Penman	García-López	Hargreaves	Turc	Tanques Evaporímetros	Etc
1	2,404	0,579	10,299	4,243772	0,784	2,13
2	2,228	1,307	10,100	0,989997	3,200	2,05
3	1,912	1,345	10,465	1,88298	0,720	2,76
4	1,717	1,08	9,860	1,201392	2,480	-
5	3,002	1,703	11,207	2,65842	4,016	-
6	3,229	1,89	11,3627	3,137357	3,872	2,88
7	2,195	1,745	11,77856	2,825036	1,264	2,08
8	2,652	1,975	12,4604046	4,697346	4,832	2,14
9	1,848	2,311	12,5780966	4,317952	0,800	1,65
10	1,863	2,367	11,1554836	3,784692	2,768	2,08
11	1,212	1,266	11,3635655	3,620746	3,376	3,8
12	1,926	1,545	12,1647752	4,030162	0,848	2,73
13	1,459	1,661	12,3338992	3,868585	0,688	2,65

14	1,011	2,107	13,0962525	4,916799	2,304	3,87
15	1,163	1,62	12,4465333	4,848182	4,624	3,18
16	1,252	1,531	12,7059555	4,626357	2,368	3,05
17	2,309	2,379	12,6177507	3,978954	3,744	-
18	2,247	2,226	13,5010814	6,007451	2,848	3,81
19	2,108	1,882	13,968217	7,988377	4,880	-
20	1,543	2,234	14,2162062	7,384954	1,520	-
21	2,350	2,348	14,2878909	7,47267	2,416	2,74
22	1,872	1,844	13,5113648	6,788108	1,904	-
23	1,576	1,901	14,1813238	7,42765	0,560	-
24	2,209	1,346	13,5726761	8,267649	3,632	-
25	2,866	1,386	13,006986	7,401732	3,248	-
26	2,137	2,054	14,5396017	8,528019	2,560	2,66
27	1,830	1,9	14,548067	8,93263	1,280	-
28	2,076	1,688	14,719367	9,579801	2,560	3,89
29	1,894	1,59	14,1174951	8,627661	2,928	-
30	2,330	1,371	14,4232469	10,07389	3,712	-
31	2,545	1,74	13,6631997	7,204794	1,008	-

Tabla 6-3: Mediciones registradas para el mes de Noviembre de 2013 en la finca de Marengo

Día	Temperatura (°C)	HumedadRelativa (%)	Radiación
1	17,64	74	19,80
2	16,1	86	17,81
3	14,46	81	16,78
4	15,74	88	9,78
5	16,6	92	9,97
6	15,76	88	9,83
7	15,9	86	15,13
8	14,3	90	19,87

9	13,8	89	8,80
10	11,4	89	7,60
11	12,3	84	3,49
12	11	77	9,92
13	12,48	81	9,73
14	13,2	77	11,38
15	14,34	82	12,28
16	14,78	82	8,28
17	13,7	86	15,38
18	12,3	83	13,71
19	14,4	80	12,65
20	15,1	85	10,90
21	13,9	84	16,97
22	14,8	77	13,29
23	16,5	82	13,50
24	17,7	84	12,32
25	18,36	91	9,22
26	19,98	83	12,89
27	18,98	88	14,65
28	17,16	88	11,50
29	17,32	88	8,78
30	16,9	84	9,78
Media	17,03	84	12,20

Tabla 6-4: Calculo de coeficiente de cultivo por método de Garcia-Lopez, Hargreaves y Turc para Noviembre

Día	Penman	García-López	Hargreaves	Turc	Tanques Evapori-metros	Etc
1	2,487	0,579	15,088	9,471	0,512	2,13
2	2,013	1,307	14,042	8,152	2,480	2,05
3	2,144	1,345	13,112	7,310	3,568	2,76

4	0,964	1,08	12,243	4,427	0,592	-
5	1,108	1,703	12,602	4,631	2,880	-
6	1,342	1,89	12,261	4,453	0,608	2,88
7	2,046	1,745	13,406	6,884	3,120	2,08
8	1,669	1,975	13,639	8,609	5,040	2,14
9	1,539	2,311	11,270	3,754	3,040	1,65
10	0,874	2,367	9,949	2,996	1,120	2,08
11	1,490	1,266	9,640	1,418	1,840	3,8
12	1,341	1,545	10,140	3,857	0,800	2,73
13	0,946	1,661	10,851	3,978	1,984	2,65
14	1,874	2,107	11,492	4,762	1,760	3,87
15	1,232	1,62	12,176	5,328	1,072	3,18
16	1,032	1,531	11,570	3,643	0,624	3,05
17	1,935	2,379	12,484	6,541	3,760	-
18	1,769	2,226	11,482	5,571	1,840	3,81
19	1,745	1,882	12,275	5,500	3,520	-
20	1,435	2,234	12,221	4,841	0,880	-
21	2,030	2,348	12,885	7,264	3,120	2,74
22	1,488	1,844	12,574	5,851	3,840	-
23	1,999	1,901	13,305	6,252	2,000	-
24	1,340	1,346	13,493	5,904	2,160	-
25	0,864	1,386	13,037	4,500	1,088	-
26	1,911	2,054	14,369	6,575	3,984	2,66
27	1,882	1,9	14,445	7,275	2,384	-
28	1,306	1,688	13,126	5,426	2,528	3,89
29	1,134	1,59	12,599	4,161	1,056	-
30	1,035	1,371	12,668	4,582	2,320	-

Tabla 6-5: Mediciones registradas para el mes de Diciembre de 2013 en la Finca de Marengo.

Día	Temperatura °C	HumedadRelativa (%)	Radiación
1	16,2	88	8,88
2	15,36	59	8,18
3	16,26	85	8,27
4	16,96	82	8,35
5	17,26	84	10,20
6	17,12	79	12,35
7	16,8	82	9,34
8	15,9	83	11,34
9	13	82	8,57
10	14,9	79	9,45
11	13,7	80	10,32
12	12	85	7,41
13	12,7	79	7,85
14	15,8	82	9,76
15	16,7	80	10,47
16	17,18	74	11,16
17	18,28	84	9,77
18	17,46	87	10,13
19	15,38	77	16,22
20	13,36	80	11,53
21	14,3	83	14,79
22	17,04	83	11,77
23	18,3	89	6,20
24	17,7	89	9,12
25	17,06	83	13,59
26	17,88	84	11,42
27	16,96	78	9,92
28	15,24	70	16,34
29	15,8	67	11,72
30	16	68	15,42

Media	16,58	80	10,66
--------------	--------------	-----------	-------

Tabla 6-6: Calculo de coeficiente de cultivo al utilizar la Eto obtenida por método de Garcia-Lopez, Turc, Hargreaves y Penman para Diciembre

Día	Penman	Garcí- López	Hargreaves	Turc	Tanques Evapori- metros	Etc
1	1,875	1,233	12,314	5,167	0,960	2,06
2	0,903	1,074	12,316	5,192	1,888	
3	0,969	0,26	12,307	5,211	2,608	2,14
4	1,508	0,23	12,308	5,236	0,768	2,04
5	1,592	0,586	12,272	5,181	1,808	-
6	1,991	0,988	12,226	5,067	3,296	-
7	1,361	1,004	12,258	5,110	2,240	2,01
8	1,586	1,912	12,335	5,181	0,720	1,93
9	1,534	1,419	12,425	5,306	2,400	2,04
10	2,144	1,262	12,501	5,355	1,520	2,88
11	2,090	1,294	12,556	5,400	2,960	2,07
12	0,918	1,901	12,591	5,422	1,600	2,13
13	1,473	1,117	12,605	5,425	2,160	2,02
14	1,672	1,359	12,640	5,484	2,240	2
15	1,916	2,103	12,645	5,449	2,960	1,96
16	1,748	1,964	12,684	5,445	0,944	2,03
17	1,616	1,67	12,697	5,443	1,024	2,86
18	1,186	1,862	12,713	5,463	1,968	2,81
19	2,923	1,907	12,707	5,403	4,304	-
20	1,629	1,63	12,712	5,388	2,688	-
21	2,298	1,384	12,692	5,359	3,440	2,74
22	2,108	2,246	12,665	5,341	1,632	-
23	1,022	2,027	12,653	5,369	1,040	-
24	1,084	1,725	12,596	5,329	2,960	-

25	2,344	2,384	12,534	5,264	3,248	-
26	1,904	2,382	12,515	5,259	2,304	2,06
27	2,356	2,896	12,512	5,295	2,368	-
28	3,364	2,248	12,507	5,319	3,392	2,09
29	2,452	2,531	12,507	5,314	2,240	-
30	3,583	2,36	12,511	5,314	3,200	-

Tabla 6-7: Mediciones registradas para el mes de Enero de 2014 por la finca de Marengo.

Día	Temperatura (°C)	HumedadRelativa (%)	Radiación
1	14,16	72	15,88
2	15,34	81	16,42
3	15,54	83	12,39
4	14,52	86	10,23
5	16,88	77	14,20
6	16,7	83	6,07
7	17,82	85	7,66
8	17,96	88	10,98
9	16,32	81	13,16
10	17,32	77	12,09
11	18	77	13,88
12	18,5	84	12,01
13	17,5	86	15,07
14	17,44	83	13,90
15	17,34	79	12,23
16	16,8	78	13,13
17	18,48	74	14,21
18	17,6	81	6,224
19	18,3	73	10,105
Media	17,37	81	12,10

Tabla 6-8: Calculo de coeficiente de cultivo al utilizar la Eto obtenida por método de Garcia-Lopez, Hargreaves, Turc y Penman para Enero de 2014

Día	Penman	García-López	Hargreaves	Turc	Tanques Evapori-metros	Etc
1	1,583	0,579	12,538	5,330	3,328	2,13
2	1,725	1,307	12,546	5,333	2,672	2,05
3	1,308	1,345	12,555	5,338	4,432	2,76
4	0,969	1,08	12,566	5,347	3,616	-
5	1,848	1,703	12,576	5,355	2,304	-
6	0,393	1,89	12,584	5,360	0,560	2,88
7	0,618	1,745	12,589	5,362	0,656	2,08
8	0,840	1,975	12,592	5,362	2,368	2,14
9	1,257	2,311	12,593	5,361	2,656	1,65
10	0,933	2,367	12,594	5,359	1,856	2,08
11	1,117	1,266	12,593	5,357	4,000	3,8
12	1,049	1,545	12,592	5,353	1,200	2,73
13	1,352	1,661	12,590	5,350	2,800	2,65
14	1,679	2,107	12,587	5,346	3,552	3,87
15	1,351	1,62	12,583	5,343	3,472	3,18
16	1,471	1,531	12,579	5,339	3,040	3,05
17	1,538	2,379	12,574	5,337	1,984	-
18	0,808	2,226	12,570	5,335	2,880	3,81
19	1,268	1,882	12,566	5,335	2,640	-

B. Anexo: Reglas de Sistema Difuso

A continuación se muestra las reglas definidas para el sistema difuso:

- Si (Lixiviado es Entre_0.1_y_0.2) y (Evapotranspiración es Entre_1_y_2) entonces (Criterio es Criterio_bueno) (1)
- Si (Lixiviado es Entre_0.1_y_0.2) y (Evapotranspiración es Entre_2_y_3) entonces (Criterio es Criterio_bueno) (1)
- Si (Lixiviado es Entre_0.1_y_0.2) y (Evapotranspiración es Entre_3_y_4) entonces (Criterio es Criterio_bueno) (1)
- Si (Lixiviado es Entre_0.2_y_0.3) y (Evapotranspiración es Entre_1_y_2) entonces (Criterio es Criterio_bueno) (1)
- Si (Lixiviado es Entre_0.2_y_0.3) y (Evapotranspiración es Entre_2_y_3) entonces (Criterio es Criterio_bueno) (1)
- Si (Lixiviado es Entre_0.2_y_0.3) y (Evapotranspiración es Entre_3_y_4) entonces (Criterio es Criterio_bueno) (1)
- Si (Lixiviado es Entre_0.3_y_0.4) y (Evapotranspiración es Entre_1_y_2) entonces (Criterio es Criterio_regular) (1)
- Si (Lixiviado es Entre_0.3_y_0.4) y (Evapotranspiración es Entre_2_y_3) entonces (Criterio es Criterio_regular) (1)
- Si (Lixiviado es Entre_0.3_y_0.4) y (Evapotranspiración es Entre_3_y_4) entonces (Criterio es Criterio_regular) (1)
- Si (Lixiviado es Entre_0.4_y_0.5) y (Evapotranspiración es Entre_1_y_2) entonces (Criterio es Criterio_regular) (1)
- Si (Lixiviado es Entre_0.4_y_0.5) y (Evapotranspiración es Entre_2_y_3) entonces (Criterio es Criterio_regular) (1)
- Si (Lixiviado es Entre_0.4_y_0.5) y (Evapotranspiración es Entre_3_y_4) entonces (Criterio es Criterio_regular) (1)
- Si (Lixiviado es Entre_0.5_y_0.6) y (Evapotranspiración es Entre_1_y_2) entonces (Criterio es Criterio_regular) (1)

- Si (Lixiviado es Entre_0.5_y_0.6) y (Evapotranspiración es Entre_2_y_3) entonces (Criterio es Criterio_regular) (1)
- Si (Lixiviado es Entre_0.5_y_0.6) y (Evapotranspiración es Entre_3_y_4) entonces (Criterio es Criterio_regular) (1)
- Si (Lixiviado es Entre_0.6_y_0.7) y (Evapotranspiración es Entre_1_y_2) entonces (Criterio es Criterio_malo) (1)
- Si (Lixiviado es Entre_0.6_y_0.7) y (Evapotranspiración es Entre_2_y_3) entonces (Criterio es Criterio_malo) (1)
- Si (Lixiviado es Entre_0.6_y_0.7) y (Evapotranspiración es Entre_3_y_4) entonces (Criterio es Criterio_malo) (1)
- Si (Lixiviado es Entre_0.7_y_0.8) y (Evapotranspiración es Entre_1_y_2) entonces (Criterio es Criterio_malo) (1)
- Si (Lixiviado es Entre_0.7_y_0.8) y (Evapotranspiración es Entre_2_y_3) entonces (Criterio es Criterio_malo) (1)
- Si (Lixiviado es Entre_0.7_y_0.8) y (Evapotranspiración es Entre_3_y_4) entonces (Criterio es Criterio_malo) (1)
- Si (Lixiviado es Entre_0.1_y_0.2) entonces (Criterio es Criterio_bueno) (1)
- Si (Lixiviado es Entre_0.2_y_0.3) entonces (Criterio es Criterio_bueno) (1)
- Si (Lixiviado es Entre_0.3_y_0.4) entonces (Criterio es Criterio_bueno) (1)
- Si (Lixiviado es Entre_0.4_y_0.5) entonces (Criterio es Criterio_regular) (1)
- Si (Lixiviado es Entre_0.5_y_0.6) entonces (Criterio es Criterio_regular) (1)
- Si (Lixiviado es Entre_0.6_y_0.7) entonces (Criterio es Criterio_malo) (1)
- Si (Lixiviado es Entre_0.7_y_0.8) entonces (Criterio es Criterio_malo) (1)
- Si (Lixiviado es Menos_de_0.1) entonces (Criterio es Criterio_malo) (1)
- Si (Lixiviado es Mas_de_0.8) entonces (Criterio es Criterio_malo) (1)
- Si (Lixiviado es Mas_de_0.8) y (Evapotranspiración es Entre_1_y_2) entonces (Criterio es Criterio_malo) (1)
- Si (Lixiviado es Mas_de_0.8) y (Evapotranspiración es Entre_2_y_3) entonces (Criterio es Criterio_malo) (1)

- Si (Lixiviado es Mas_de_0.8) y (Evapotranspiración es Entre_3_y_4) entonces (Criterio es Criterio_malo) (1)
- Si (Lixiviado es Menos_de_0.1) y (Evapotranspiración es Entre_1_y_2) entonces (Criterio es Criterio_malo) (1)
- Si (Lixiviado es Menos_de_0.1) y (Evapotranspiración es Entre_2_y_3) entonces (Criterio es Criterio_malo) (1)
- Si (Lixiviado es Menos_de_0.1) y (Evapotranspiración es Entre_3_y_4) entonces (Criterio es Criterio_malo) (1)

C. Anexo: Resultados de Simulación

Las entradas del modelo se muestran en la segunda columna (Etc) que tiene el valor de la evapotranspiración, y en la tercera columna que tiene el valor de la evapotranspiración.

Los resultados de la simulación se muestran en las columnas de Primer Modelo y Segundo Modelo, con el Segundo Modelo fue que se obtuvo el valor de correlación más altos y fue el que se dejó para la validación del modelo. La diferencia entre cada Modelo fue el número de neuronas, para el primero fue de 6 en la primera capa mientras que para el segundo fue de 8 en la segunda capa.

Días	Etc	Lixiviado	Evaluación Sistema Difuso	Primero Modelo	Segundo Modelo	Tercer Modelo
1	2,04	0,4741	0,45331877	2,1765881	2,44914688	2,21341754
2	2,88	0,3712	0,68909822	2,88452335	3,04459037	2,90087959
3	2,07	0,4123	0,45247537	2,18099976	2,44914414	2,5757611
4	2,13	0,4132	0,45250821	2,18080066	2,44914425	1,7252015
5	2,02	0,3821	0,73334278	3,10237899	2,17758777	1,73842996
6	2	0,213	0,79935647	3,57744364	2,49973926	2,13822815
7	1,96	0,5021	0,45153781	2,18768057	2,00914106	1,59210944
8	2,03	0,4167	0,45273455	2,17949003	2,44914498	2,14004442
9	2,86	0,3451	0,69137173	2,89333262	3,05052447	2,83504442
10	2,81	0,3571	0,67927984	2,84910306	3,01079594	2,58783665
12	2,88	0,3968	0,65026938	2,76627804	2,74763503	2,84901154
13	2,08	0,4513	0,45392093	2,17428547	2,44914881	2,1692816
14	2,14	0,4094	0,45230249	2,18208565	2,44914357	2,34713115
15	1,65	0,6031	0,17806769	1,008	2,44922629	2,14512931
16	2,08	0,5791	0,45293348	2,17842527	2,44914563	2,16328385
17	3,8	0,2912	0,79929223	3,57698388	3,4995517	3,73823401
18	2,73	0,4238	0,45306114	2,17778406	2,44914604	3,34830043
19	2,65	0,3124	0,65028736	2,76632059	2,74787738	2,83770097
20	3,71	0,2986	0,79501241	3,545927	3,88747002	3,57411054
21	3,16	0,3713	0,67706674	2,84168263	3,30057931	3,08619322
23	2,04	0,341	0,73587044	3,11793395	3,10645272	2,18141465

24	2,88	0,3321	0,68813569	2,88086436	2,8501143	2,85024163
25	2,07	0,4521	0,45392276	2,1742795	2,4491464	2,08619322
26	2,13	0,4123	0,45247537	2,18099976	2,44914527	2,8385986
27	2,02	0,3823	0,73304318	3,10055753	2,75279897	3,02402506
28	2	0,3532	0,76367977	3,30906449	2,4491456	2,14803956
29	1,96	0,3792	0,7367592	3,12348268	2,04531078	2,02162251
30	2,03	0,3243	0,7288055	3,07530544	3,49724626	3,25818266
31	2,86	0,2931	0,79950876	3,57853268	2,44914882	2,16138963
32	2,81	0,3523	0,67994853	2,85138474	3,17707471	2,14510184
34	2,08	0,3421	0,71573633	3,0034922	3,19176822	2,20962199
35	2,14	0,3854	0,65832467	2,78634752	2,04191506	2,84474961
36	1,65	0,5234	0,45317091	2,1772586	2,04914882	2,79885547
37	2,08	0,4832	0,45282118	2,17901642	2,44914414	2,23831705
38	3,8	0,3032	0,65065282	2,76718774	3,17597356	1,72520085
39	2,73	0,4213	0,45292413	2,17847352	3,37218085	3,54581826
40	2,62	0,3743	0,65009706	2,76587063	3,19698483	2,13825049
41	3,87	0,2789	0,79849624	3,57127054	3,54708338	2,83149783
42	3,18	0,4523	0,45392276	2,1742795	3,00018479	3,59034909
43	3,05	0,3456	0,73324785	3,1018013	3,01365652	3,06348969