

**MODELACIÓN DE LLUVIAS ANUALES UTILIZANDO INTELIGENCIA  
ARTIFICIAL EN EL NORTE DE BOGOTÁ**

1

**Modelación de lluvias anuales utilizando inteligencia artificial en el norte de Bogotá**

**Camilo Javier Rosas Ríos**

**Trabajo de grado**

**Para optar al título Ingeniero Civil**

**Dirigido por:**

**Jorge Humberto Benavides Santamaria**

**Ingeniero Civil**

**Universidad Santo Tomás**

**Facultad de ingeniería civil**

**Bogotá D.C.**

**2022**

## Resumen

El fenómeno del niño y la niña son eventos que siempre se han manifestado a lo largo de la historia climatológica de Colombia, presentando afectaciones catástrofes y emergencias en el país. Estos eventos climáticos generan aumentos o disminuciones en la precipitación del territorio colombiano, por tal razón el IDEAM en el año 2012 realizó un estudio llamado “Alteraciones De La Precipitación Y La Temperatura Ante Variabilidad Y Cambio Climático Para La Ciudad De Bogotá” (Ruiz & Escobar, 2012). Con el fin de realizar un diagnóstico de los efectos del cambio climático en la ciudad de Bogotá.

Dentro del estudio realizado por el IDEAM se encontraron alteraciones en los niveles de precipitación actuales en comparación con los registros históricos, estableciendo que Bogotá es un escenario de cambio climático, por tal razón cada localidad de la ciudad será una zona de estudio para así poder determinar qué zonas se verían más afectadas por el aumento o disminución de las precipitaciones.

La distribución espacial de las precipitaciones en la ciudad de Bogotá expone valores mínimos de precipitación en la localidad de Suba con respecto a las demás localidades, evidenciando variación en las lluvias en las últimas décadas. Dadas estas situaciones se toma la localidad de Suba como zona de estudio realizando una delimitación que no abarca toda la localidad.

La zona de estudio y afectaciones en eventos como el niño, dan lugar a realizar un modelo que pueda calibrar el comportamiento de las precipitaciones, para así poder establecer un análisis del comportamiento actual y poder generar una base de datos que ayude a definir un comportamiento más acorde de las lluvias en futuros estudios en esta zona de la ciudad de Bogotá.

## **MODELACIÓN DE LLUVIAS ANUALES UTILIZANDO INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN EL NORTE DE BOGOTÁ**

3

Por lo anterior, se optó por desarrollar el estudio en el campus de la Universidad Santo Tomás, en el cual se localiza una estación meteorológica de la CAR y conforme con el estudio realizado por el IDEAM, se encuentra en una localidad con los registros de precipitación más bajos de la ciudad.

# MODELACIÓN DE LLUVIAS ANUALES UTILIZANDO INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN EL NORTE DE BOGOTÁ

4

## Contenido

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| Resumen                     | 2  |
| Lista de figuras            | 6  |
| Lista de tablas             | 7  |
| Introducción                | 9  |
| Objetivos                   | 10 |
| Objetivo general            | 10 |
| Objetivos específicos       | 10 |
| Justificación               | 11 |
| Marco de referencia         | 12 |
| Marco Teórico               | 12 |
| Definición redes neuronales | 13 |
| Función de activación       | 15 |
| Mecanismo de aprendizaje    | 15 |
| Algoritmo de entrenamiento: | 16 |
| El criterio del perceptrón. | 16 |
| Hidrología                  | 17 |
| Precipitación               | 17 |
| Modelo de lluvias           | 17 |
| Hidrograma                  | 17 |

# MODELACIÓN DE LLUVIAS ANUALES UTILIZANDO INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN EL NORTE DE BOGOTÁ

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
|                                      | 5  |
| Tormentas de diseño                  | 18 |
| Temperatura                          | 18 |
| Días con lluvia                      | 18 |
| Humedad                              | 18 |
| Evaporación                          | 19 |
| Brillo solar                         | 19 |
| Estado del arte                      | 20 |
| Metodología                          | 24 |
| Resultados                           | 26 |
| Localización                         | 26 |
| Zona de estudio .....                | 26 |
| Recolección                          | 27 |
| Datos de las estaciones              | 27 |
| Estaciones CAR .....                 | 27 |
| Estaciones EAAB.....                 | 27 |
| Verificación                         | 28 |
| Método De La Razón – Normal          | 28 |
| Análisis de tendencia y homogeneidad | 29 |
| Gráfica    masa simple .....         | 30 |

# MODELACIÓN DE LLUVIAS ANUALES UTILIZANDO INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN EL NORTE DE BOGOTÁ

6

|                                              |    |
|----------------------------------------------|----|
| Gráfica serie de tiempo combinada.....       | 33 |
| Gráfica S-S .....                            | 34 |
| Parámetros de influencia en la precipitación | 35 |
| Modelos de inteligencia artificial           | 36 |
| Modelo de Regresiones .....                  | 38 |
| Modelo de Red neuronal .....                 | 43 |
| Error entre conjuntos                        | 46 |
| Modelo de red neuronal .....                 | 46 |
| Conclusiones                                 | 59 |
| Referencias                                  | 60 |
| Anexos                                       | 62 |

## Lista de figuras

|                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 Ejemplo de una red neuronal totalmente conectada .....                      | 13 |
| Figura 2 Modelo de red neuronal funcionamiento básico.....                           | 14 |
| Figura 3 Localización de zona de estudio con estaciones .....                        | 26 |
| Figura 4 Esquema Árbol de decisiones Potenciado .....                                | 39 |
| Figura 5 Resultado primer entrenamiento de regresiones .....                         | 40 |
| Figura 6 Respuestas VS predicciones. Primer entrenamiento .....                      | 41 |
| Figura 7 Resultado de entrenamiento con modelo Árbol de regresiones Potenciado ..... | 42 |

# MODELACIÓN DE LLUVIAS ANUALES UTILIZANDO INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN EL NORTE DE BOGOTÁ

7

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 8 Respuestas VS Predicciones modelo Árbol de regresiones Potenciado ..... | 43 |
| Figura 9 <i>Resultado entrenamiento Red Neuronal</i> .....                       | 45 |
| Figura 10 Serie de Tiempo Combinada .....                                        | 56 |
| Figura 11 Hietograma .....                                                       | 58 |

## Lista de tablas

|                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1 Datos de las estaciones con cálculo de promedios acumulados.....    | 30 |
| Tabla 2 Datos De Las Estaciones Con Cálculo De Promedios Acumulados.....    | 31 |
| Tabla 3 Base de datos modelo de Regresiones de Enero a Junio.....           | 48 |
| Tabla 4 Base de datos modelo de Regresiones de Julio a diciembre .....      | 49 |
| Tabla 5 Base de datos modelo de Red Neuronal de Enero a junio. ....         | 50 |
| Tabla 6 Base de datos modelo de Red Neuronal de Julio a diciembre. ....     | 50 |
| Tabla 7 Estación Apto-Guaymaral complementada Modelo de Regresiones.....    | 51 |
| Tabla 8 Estación Apto-Guaymaral complementada Modelo de Regresiones.....    | 52 |
| Tabla 9 Estación Apto-Guaymaral complementada Modelo de Red Neuronal .....  | 53 |
| Tabla 10 Estación Apto-Guaymaral complementada Modelo de Red Neuronal ..... | 54 |
| Tabla 11 Serie de Tiempo Combinada.....                                     | 55 |
| Tabla 12 Hietograma de Apto-Guaymaral VS Regresiones VS Red Neuronal.....   | 57 |

### **Glosario**

**Adaline:** Sigla en inglés para un modelo de elementos lineales adaptativos.

**Algoritmo:** Conjunto ordenado y finito de operaciones que permite hallar la solución de un problema mediante el método y la notación en las distintas formas de cálculo.

**CAR:** Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca.

**EAAB:** Empresa de acueducto y alcantarillado de Bogotá.

**Estocástico:** Teoría estadística de los procesos cuya evolución en el tiempo es aleatoria.

**Hidrometeorológica:** Tipo de estación que permite la obtención de los parámetros de cobertura y control son la información de precipitación, evaporación, dirección y velocidad del viento, horas sol, radiación solar, temperatura y humedad del ambiente.

**IDEAM:** Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales.

**PDAR:** Modelo periódico discreto adaptativo propuesto en España en 2004.

**Perceptrón:** Criterio de función continua y lineal a trozos para minimizar el error.

**Periodicidad:** Cualidad de periódico, es decir que se produce con frecuencia o es repetitivo.

**Precipitación:** Agua procedente de la atmósfera, y que en forma sólida o líquida se deposita sobre la superficie de la tierra.

**RNA:** Red neuronal artificial.

**RMSE:** error cuadrático medio es la diferencia cuadrática promedio entre los resultados y los objetivos

### **Introducción**

Se estudian las precipitaciones y su comportamiento a lo largo del tiempo. Colombia tiene muchas unidades que cuentan con un sistema de redes meteorológicas. Para la ciudad de Bogotá, la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá y parte del territorio de la ciudad, la Corporación Autónoma de Cundinamarca, brindan información meteorológica a través de sus estaciones. Algunas estaciones pueden haber estado en funcionamiento durante más de 60 años, por lo que estas estaciones pueden haber sufrido cambios al momento de la recolección de datos, incluso debido a daños por el clima, Subversión u Obsolescencia. En la zona norte de la ciudad de Bogotá en el municipio de Suba, para el sistema meteorológico CAR, se encontraron datos faltantes dentro de las estaciones y discrepancias en las tendencias de comportamiento de la precipitación mensual histórica entre estaciones. En estas circunstancias, se supone que el Municipio de Suba es un área de estudio, creando una demarcación que no incluye todo el centro habitado. El área de estudio se generará un modelo capaz de brindar valores calibrados del comportamiento de la precipitación y las posibles expectativas que podrían derivarse de estos fenómenos, y así poder integrar información de los registros actuales para futuros estudios en esta zona de la ciudad de Bogotá.

Además, este modelo generará insumos básicos para la definición de Comportamiento de la precipitación de valores históricos mensuales en otras regiones.

## **Objetivos**

### **Objetivo general**

- Configurar dos modelos de inteligencia artificial por medio de regresiones y redes neuronales artificiales para la calibración de la metodología convencional en hidrología de precipitaciones anuales.

### **Objetivos específicos**

- Desarrollar dos modelos de inteligencia artificial con el fin de establecer nuevos valores de precipitación.
- Evaluar la validez de los modelos de inteligencia artificial propuestos dentro del estudio al momento de calibrar la metodología actual.
- Verificar por medio de diagramas para detección y cambio de tendencias, el comportamiento hidrológico de los nuevos valores.
- Establecer una base de datos con valores calibrados para completar información faltante en las estaciones, obtenidos de los modelos de inteligencia artificial.

### **Justificación**

La lluvia es un fenómeno natural difícil de pronosticar debido a su variabilidad que se presenta en el momento, las estaciones meteorológicas en Colombia no cuentan con registros completos de precipitación, especialmente de los últimos años. Por lo tanto, es necesario crear un modelo que analice el comportamiento actual de la precipitación y sea posible calibrar los nuevos valores para determinar el comportamiento en el área de estudio.

Mediante la creación de dos modelos de inteligencia artificial, es posible crear una base de datos, proporcionando valores corregidos para completar la información faltante en los registros históricos de precipitación.

### **Marco de referencia**

#### **Marco Teórico**

Las redes neuronales son más que otra forma de emular ciertas características propias de los humanos, como la capacidad de memorizar y de asociar hechos. Si se examinan con atención aquellos problemas que no pueden expresarse a través de un algoritmo, se observará que todos ellos tienen una característica en común: la experiencia. El hombre es capaz de resolver estas situaciones acudiendo a la experiencia acumulada. Así, parece claro que una forma de aproximarse al problema consiste, en la construcción de sistemas que sean capaces de reproducir esta característica humana. En definitiva, las redes neuronales no son más que un modelo artificial y simplificado del cerebro humano, que es el ejemplo más perfecto del que disponemos para un sistema que es capaz de adquirir conocimiento a través de la experiencia. Una red neuronal es “un nuevo sistema para el tratamiento de la información, cuya unidad básica de procesamiento está inspirada en la célula fundamental del sistema nervioso humano: la neurona”. (Matich, 2001)

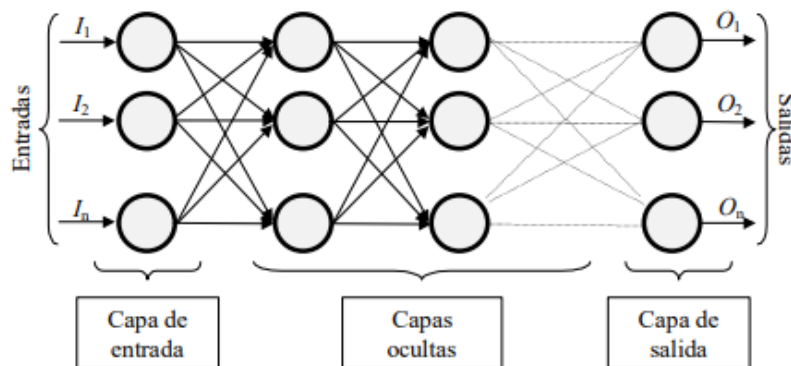
Todos los procesos del cuerpo humano se relacionan en alguna u otra forma con la actividad e inactividad de estas neuronas. Las mismas son un componente relativamente simple del ser humano, pero cuando millares de ellas se conectan en forma conjunta se hacen muy poderosas.

Lo que básicamente ocurre en una neurona biológica es lo siguiente: la neurona es estimulada o excitada a través de sus entradas (inputs) y cuando se alcanza un cierto umbral, la neurona se dispara o activa, pasando una señal hacia el axón. Posteriores investigaciones condujeron al descubrimiento de que estos procesos son el resultado de eventos electroquímicos. (Matich, 2001)

## Definición redes neuronales

Redes neuronales artificiales son redes interconectadas masivamente en paralelo de elementos simples (usualmente adaptativos) y con organización jerárquica, las cuales intentan interactuar con los objetos del mundo real del mismo modo que lo hace el sistema nervioso biológico. (Matich, 2001)

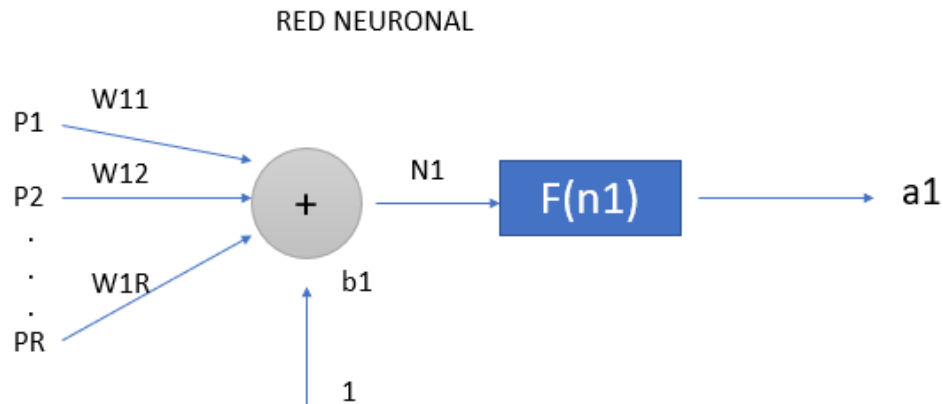
Figura 1  
*Ejemplo de una red neuronal totalmente conectada*



Nota. Descripción. Referencia

Las redes neuronales cuentan con distintas partes, y cada una de ellas cumple un papel fundamental dentro del funcionamiento de las redes neuronales.

Figura 2  
*Modelo de red neuronal funcionamiento básico*



*Nota.* Modelo funcionamiento red neuronal. Elaboración propia Rosas, C, 2019, Partes RNA

**P**-Las entradas o patrones: es donde la red neuronal recibe toda la información y la transmite hacia el resto del cuerpo de la red neuronal

**W**-Pesos sinápticos: son los valores asignados a la red para generar influencias en el desarrollo de la red estos valores pueden ser modificados durante el entrenamiento de la red neuronal

**b**-Polarización: En este proceso la red neuronal puede tomar la decisión de tomar los valores negativos o los valores positivos según como se le determine

**n**-Entrada neta: es la reunión de la información de los patrones de entrada multiplicados por los pesos sinápticos y definidos por la polarización

**f**-Función activación: existen diferentes funciones de activación la finalidad de esto es definir el comportamiento interno de la información mediante funciones lineales , logarítmicas entre otras

**a**-Salida o axón: es la información procesada que ya pasó por funciones que le permitieron interpretar la información y con esto obtener valores deseados. (Regueiro et al., 1995)

### **Función de activación**

Una neurona artificial debe ser activada o excitada al igual que una neurona biológica para que comience su operación dentro del sistema. Las neuronas artificiales pueden tomar cualquier valor según se le determine. Para esto se necesita de una función de activación la cual transforma la entrada a la neurona en un valor de activación, que por lo general va de (0 a 1) o en otros casos de (-1 a 1) además de esto es que una neurona artificial puede estar completamente inactiva.

Algunas funciones son:

- Función lineal
- Función sigmoidea
- Función tangente hiperbólica

Además de las funciones de activación están las funciones de salida las cuales permiten establecer el valor que se transfiere a las neuronas vinculadas. En este proceso de la neurona es donde se determina si se activa o no la siguiente neurona.

### **Mecanismo de aprendizaje**

Para que una red neuronal procese la información y de salida de una neurona a otra es necesario que la red neuronal pase por un proceso de aprendizaje, donde se producirán una serie de cambios en la estructura sin afectar las entradas, función de activación y la salida. Los cambios se producirán en entre las neuronas creando, modificando e incluso destruyendo conexiones existentes.

Existen dos métodos para el aprendizaje de las redes neuronales:

- Aprendizaje supervisado
- Aprendizaje no supervisado

**Algoritmo de entrenamiento:**

El algoritmo de entrenamiento se basa en una red neuronal con diversas afectaciones ya que se pueden modificar con el fin de minimizar el error entre la salida y la obtenida, la red neuronal de entrenamiento tiene varios factores como la dependencia de los valores iniciales que consiste en llevar grandes diferencias en el tiempo de convergencia y el otro factor es la dificultad para converger a un óptimo global. (Sarraute, 2007).

**El criterio del perceptrón.**

Para entrenar la red, se necesita una función de error que se pueda minimizar fácilmente. Se considera aquí una función continua y lineal a trozos llamada el criterio del perceptrón. Cuando un vector de activaciones  $f^n$  en la primera capa de elementos fijos. A cada vector de entrada  $x$   $n$  se asocia un valor esperado  $t^n$  que vale  $t^n = +1$  si la entrada pertenece a la clase C1. Para hacer cumplir  $W^T f^n > 0$  para los vectores de la clase C1 y  $W^T f^n < 0$  para los vectores de la clase C2. Se puede simplificar estas condiciones, pidiendo que para todos los vectores de entrada.

$$W^T(f^n t^n) > 0 \quad (1)$$

Esto sugiere minimizar la función de error siguiente, conocida como criterio del Perceptrón

$$E^{perc}(W) = \sum_{f^n \in M} -W^T(f^n t^n)$$

(2) donde  $M$  es el conjunto de todos los vectores  $f^n$  que fueron mal clasificados con el

vector de pesos actual  $w$ . Para los vectores clasificados erróneamente  $W^T(f^n t^n) > 0$  luego  $E^{perc}$  es una suma de términos positivos y vale 0 si todos los vectores están correctamente clasificados.

### **Hidrología**

La hidrología es la ciencia que estudia el agua, como se comporta en la superficie terrestre, sus propiedades químicas y físicas, la distribución espacial y cantidad que se presenta en la tierra. Para el estudio de la hidrología en la ingeniería se basa en generar proyectos y supervisar el comportamiento de montajes hidrológicos, además de esto también se emplea para el estudio de eventos climatológicos. (Aparicio Mijares, 1993)

### **Precipitación**

En la atmósfera de la tierra siempre hay presencia de humedad, cuando algún mecanismo enfría el aire lo suficientemente para que llegue a la saturación y se enfríen grandes masas de aire las cuales ascienden, este fenómeno se da cuando las radiaciones producen calentamiento o enfriamiento en la superficie de la tierra lo cual genera las precipitaciones. (Linsley et al., 1977)

### **Modelo de lluvias**

Son métodos por los cuales se puede obtener la precipitación máxima de una zona de estudio en específico, analizando factores del ambiente y con una serie de suposiciones del comportamiento de las precipitaciones. (Aparicio Mijares, 1993)

### **Hidrograma**

Es la representación gráfica del caudal generado por las precipitaciones durante un periodo de tiempo el cual puede ser en años, meses y hasta horas. Para así poder calcular datos de escorrentías y niveles de creciente. (Linsley et al., 1977)

### **Tormentas de diseño**

Una tormenta de diseño incluye patrones de tiempo-intensidad, una distribución espacial y una precipitación total, lo cual permite trabajar en áreas extensas y especificar una distribución espacial de la lluvia. Ya que existen zonas con registros cortos y datos incompletos.(Linsley et al., 1977)

### **Temperatura**

Medida del estado térmico del aire con respecto a su habilidad de comunicar calor a su alrededor. El calentamiento del aire se realiza por medio de la absorción de la radiación-onda larga-procedente del suelo y su enfriamiento se produce por emisión, con un gradiente térmico bastante elevado en los primeros centímetros sobre la superficie del suelo, el cual disminuye con la altura hasta hacerse prácticamente nulo alrededor de los 1.50 metros.(IDEAM - Instituto de Hidrología, 2007)

### **Días con lluvia**

Es la medida de la cantidad de días por cada mes del año, en los que registraron valores de precipitaciones en una estación meteorológica.(IDEAM - Instituto de Hidrología, 2007)

### **Humedad**

La humedad relativa es el vapor de agua que existe en una masa de aire, expresado como un porcentaje de la cantidad total que existiría si el aire estuviese saturado a esta temperatura. La humedad relativa se expresa en porcentaje y unidades enteras que van desde cero (0%) hasta cien (100 %), donde cero (0) significa sequedad absoluta y cien (100) estado de saturación.(IDEAM - Instituto de Hidrología, 2007)

**Evaporación**

Emisión de vapor desde una superficie líquida de agua libre, a temperatura inferior al punto de ebullición.(IDEAM - Instituto de Hidrología, 2007)

**Brillo solar**

Es la medición de las horas de sol efectivo en el día (brillo solar o insolación), que se asocia a la cantidad de tiempo durante el cual la superficie del suelo es irradiada por la radiación solar directa El Brillo Solar Mensual está dado por la sumatoria de Brillo Solar Diario, sumando todos los días del mes.(IDEAM - Instituto de Hidrología, 2007)

### **Estado del arte**

A través del tiempo la humanidad ha tratado de mejorar su entorno para tener una mejor calidad de vida, estudiando los fenómenos naturales, enfatizando en resolver problemas mediante el uso de las matemáticas, creando modelos que le permitan ahorrar tiempo, obtener mejores resultados, mejorar la precisión y hasta poder predecir algunos fenómenos.

En 1957 el psicólogo Frank Rosenblatt conocido por sus estudios en la inteligencia artificial, desarrolló la primera red neuronal llamada Perceptrón, la cual era entrenada con unos métodos de aprendizaje para la toma de decisiones. Este tipo de red neuronal es utilizada en la actualidad para identificar patrones.

Para el año de 1960 los ingenieros eléctricos Bernard Widroff y Marcian Hoff establecieron el primer modelo de redes neuronales aplicado a un problema de la vida real mediante un modelo de elementos lineales adaptativos y le llamaron “Adaline” por sus siglas en inglés .

David Rumelhart psicólogo estadounidense y Geoffrey Hinton informático británico explicaron en 1986 un algoritmo de aprendizaje de programación hacia atrás (backpropagation). Luego de esto el desarrollo y la investigación de las redes neuronales fue avanzando, trabajos y publicaciones se realizan anualmente. (Matich, 2001)

Las aplicaciones y usos que se le empezaron a dar a las redes neuronales a partir de ese año fueron en mercados de simulación de todas las áreas teniendo auge en la ingeniería.

El profesor de la facultad de Matemática, Astronomía y Física de la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, en 1990 realizó un trabajo de fundamentos para el aprendizaje de las redes neuronales, explicando los tipos de redes, partes, funciones de operación y métodos de aprendizaje para la red. (Pury, 1990)

Para el año 1995 los investigadores Senén Barro, Eduardo Sánchez y Manuel Fernández de la universidad de Santiago de Compostela España, definieron unos modelos básicos para las redes neuronales los cuales enfatizaron en las diferentes funciones matemáticas con las cuales puedan desarrollarse las redes neuronales y qué algoritmos se le pueden incorporar.(Regueiro et al., 1995)

En la universidad politécnica de Cataluña en el año 2004 se publicó el artículo Modelación Estocástica De Lluvias Horarias, los investigadores Ana Martínez y José D. Salas. Desarrollaron un modelo estocástico el cual permite analizar y simular las precipitaciones en periodos horarios, el cual denominaron PDAR (periódico discreto autorregresivo de orden 1). Para el desarrollo de la investigación y el modelo trabajaron con la información pluvial de la ciudad Denver, Colorado , Estados Unidos del periodo de 1949 a 1990 con datos a las 4, 6, 12 y 24 horas. Con este modelo se logró obtener buenas estimaciones estadísticas históricas de las lluvias con diferentes escalas de tiempo.(Martínez & Salas, 2004)

En el XVII congreso chileno de ingeniería hidráulica de 2005 los ingenieros Juan Pablo Toro, Oscar Raúl Dölling y Eduardo Varas C. Presentaron el artículo de Evaporación Con El Método De Penman Usando Redes Neuronales Artificiales. El cual es un modelo para calcular la evaporación con la ecuación de Penman, adecuando las redes neuronales para que permitan las compensaciones de los efectos del día y la noche mediante un factor de ajuste. En el desarrollo del trabajo se enfocaron en realizar una interpolación no lineal ya que las redes neuronales cuentan con esta ventaja.

Las redes neuronales son una herramienta de interpolación no lineal en tablas con múltiples entradas, además de la complementación de datos e información cuando se es escasa

especialmente en Latinoamérica donde se presenta este fenómeno y una herramienta primordial en el estudio de la hidrología. (Toro et al., 2005)

También para el año 2005 el doctor e ingeniero Oscar Raúl Dölling presentó un seminario de método y aplicaciones de Redes Neuronales Artificiales en la predicción de variables hidrológicas no lineales en la Pontificia Universidad Católica de Chile, en este seminario explico de que se componía una red neuronal, la recopilación y el tratamiento de la información meteorológica, análisis de los datos de entrada, selección de las unidades de salida, el entrenamiento de las redes neuronales, validación de datos de salida con su diagnóstico, capacidad predictiva, selección del modelo óptimo y el análisis de resultados. (O. Dölling, 2005)

En 2006, nuevamente, los ingenieros Oscar Raúl Dölling y Eduardo Varas se reunieron para realizar un trabajo llamado Tormentas De Diseño Usando Redes Neuronales Artificiales. Plantearon una formulación matemática donde intervinieran las redes neuronales artificiales para poder clasificar las tormentas y generar hietogramas de diseño para cualquier sitio del que se desee conocer esta información y así poder establecer la probabilidad y delimitar las zonas con más frecuencia de lluvias, por eso el algoritmo planteado en este modelo de tormentas permite comprobar si las tormentas modeladas por las redes neuronales son representativas del lugar de estudio. El uso de las redes neuronales artificiales justifica el uso de representar un espacio definido por tres variables para realizar una interpolación no lineal del porcentaje de lluvias acumuladas. La primera variable es el identificador del grupo de tormentas a la que pueda pertenecer, la segunda variable es el porcentaje de duración acumulada de lluvias en el lugar de estudio y la última variable a tener en cuenta es la probabilidad de excedencia asociada con la tormenta de diseño.(R. Dölling & Varas, 2006)

En Venezuela para el año del 2017 los investigadores Misael Darío Rosales Ramírez, Cesar Augusto Mora Benavídes y Carlos Eduardo Guada Barráez, desarrollaron una red neuronal artificial con la facultad para realizar calibraciones climáticas a un corto plazo en intervalos de 15 minutos durante aproximadamente un año, teniendo en cuenta variables como la radiación y temperatura de una zona en específico, en este caso en el municipio La Hechicera, estado Mérida, Venezuela. Trabajaron con tres funciones para realizar las pruebas de la red neuronal artificial; seno, coseno y los polinomios de Legendre. Encontrando porcentajes de error menores del 5 por ciento, siendo las redes neuronales artificiales una alternativa viable para la predicción de microclimas a corto plazo. Donde su uso puede ser empleado en diferentes lugares y utilizado en planes de prevención de desastres.(Rosales et al., 2018)

Para predecir el fenómeno del niño en Perú, un grupo de investigadores en Piura mediante el uso de redes neuronales artificiales modelaron los datos climáticos de precipitación de la zona, temperatura superficial del mar y la velocidad del viento para así poder generar calibraciones del fenómeno del niño. Trabajaron el modelo en dos fases, en la primera fase las redes neuronales modelaron las variables como series temporales para la segunda fase diseñaron una red neuronal mediante el uso Matlab para reproducir el comportamiento de las precipitaciones de la zona de estudio. Obtuvieron resultados altamente confiables para el comportamiento de las precipitaciones y con estos resultados se pudo predecir el fenómeno del niño en Piura Perú.(Jiménez Carrión et al., 2018)

### **Metodología**

La investigación se desarrolló mediante la definición de un procedimiento cualitativo para la recolección de la información de todas las estaciones que se encuentren en la periferia de la zona de estudio. Por medio de las entidades CAR y EAAB, con esto se realizó la verificación de existencia completa de datos en cada una de las estaciones y la propensión entre estos.

Para realizar este procedimiento fue necesario la solicitud de la información de volumen de precipitaciones de tres estaciones más, las cuales se encuentran equidistantes de la estación de estudio Apto Guaymaral – USTA que hacen parte de la red de estaciones.(Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, 2016)

Las tres estaciones meteorológicas que también se solicitó su información de volumen de precipitaciones fueron:

- Torca – Rio Bogotá
- Santa Inés – Rio Chicú
- Santa Teresa – Rio Teusaquillo

Para tener confiabilidad en los datos de la estación de estudio Apto – Guaymaral, se realizó la solicitud de los datos de volumen de precipitación de tres estaciones de la EAAB, debido a que esta red cuenta con estaciones en óptimo estado de funcionamiento que permite proporcionar información actualizada y de manera virtual. (Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, 2019)

Las tres estaciones hidrometeorológicas que también se solicitó su información de volumen de precipitaciones fueron:

- Serrezuela – Quebrada Aguas Claras
- La Caro Seminario – Rio Bogotá
- La Conejera – Humedal La Conejera

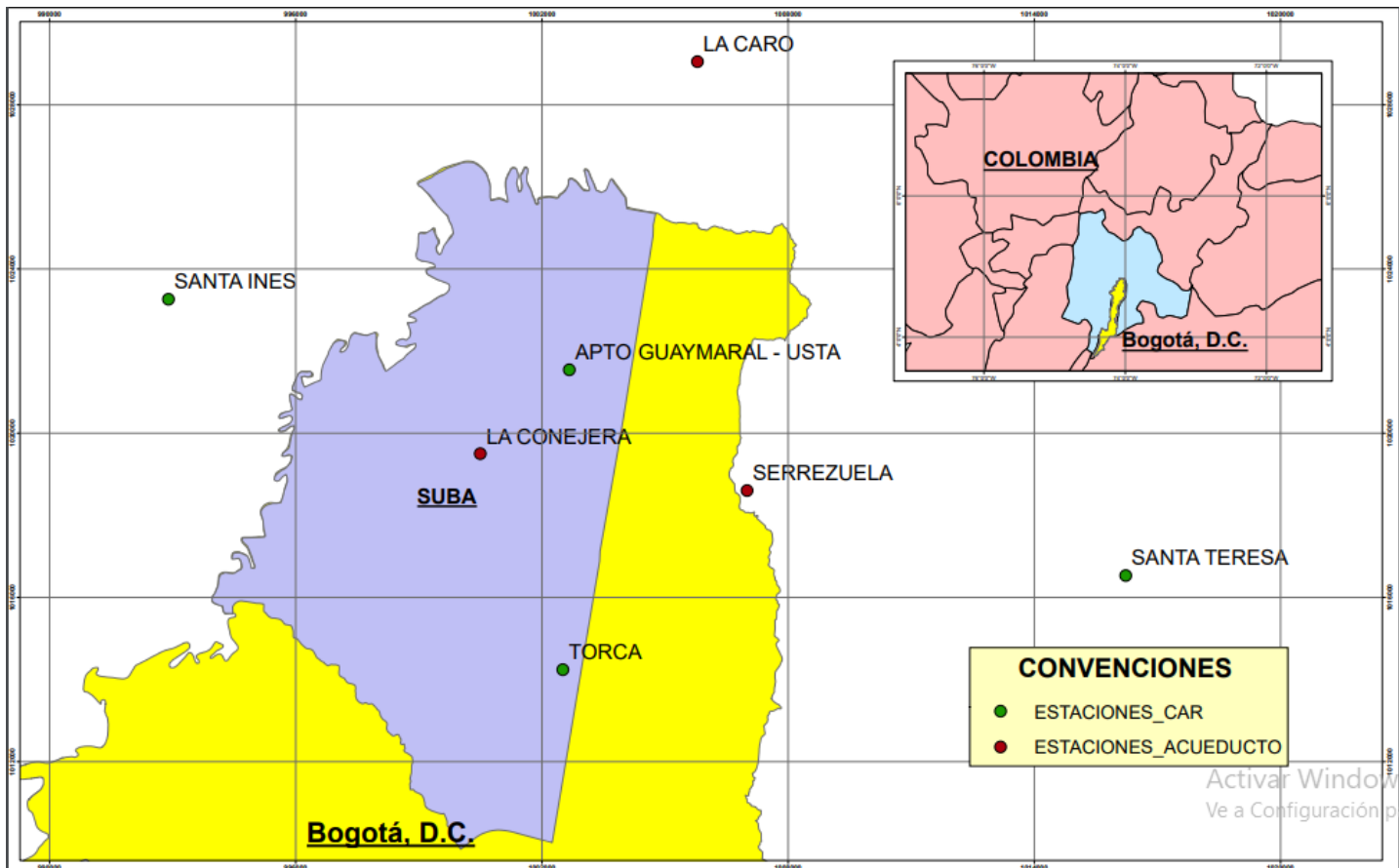
A continuación, se establecieron los parámetros que tienen influencia en las precipitaciones y mediante la configuración de dos modelos de inteligencia artificial, funcionamiento de cada modelo y descripción rápida, se describieron sus procesos de creación paso a paso. Por medio de indicadores como el error medio cuadrático y comparaciones de gráficos en las tendencias se trabajó una fase de valoración.

Por último, se estableció una comparación entre las metodologías actuales para complementar datos contra una base de datos con valores de precipitación calibrados.

## Resultados

### Localización

Figura 3  
*Localización de zona de estudio con estaciones*



Nota. Plano de elaboración propia, localización de zona de estudio con estaciones de recolección, calibración y validación

### Zona de estudio

Los datos de precipitación para el desarrollo del estudio se encuentran en la estación hidrometeorológica “Apto Guaymaral – USTA”, ubicada en Colombia, en la zona norte del distrito capital, Bogotá. Se ubica en la localidad de Suba.

La estación de estudio colinda con tres estaciones hidrometeorológicas de la misma entidad, CAR, y con otras tres estaciones hidrometeorológicas de la empresa de acueducto y alcantarillado

de Bogotá. Cada estación está próxima de la otra, con distancias entre 12 Km y hasta 21 Km entre estaciones como se evidencia en el plano de la Figura 3. “La distancia racional entre estas estaciones es de 25 a 30 Km en terreno plano y de la mitad de esta distancia en áreas montañosas” (López, 2013, p. 60)

### **Recolección**

Las estaciones hidrometeorológicas de la CAR cuentan con datos de volumen de precipitaciones desde el año 1965 hasta el año 2018, aunque en algunos meses y años existen vacíos de información, debido a que la información no se encuentra completa es primordial realizar un proceso de complementación de datos, ya que sin algunos de los datos se producirán errores y resultados no deseados.

### **Datos de las estaciones**

#### **Estaciones CAR**

El histórico de series hidrometeorológicas, proporcionado por la CAR se encuentra la información referente a la ubicación de las estaciones de monitoreo y los datos de registros históricos de cada estación a escala mensual. Las tablas con los valores de precipitación de la estación Apto – Guaymaral se encuentran en el anexo A, las tablas de las estaciones Torca, Santa Inés y Santa Teresa, se pueden ver en los anexos B, C, D. Respectivamente.

#### **Estaciones EAAB**

En el sistema de estaciones hidrometeorológicas de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá se encuentra información sobre los registros históricos de estaciones a escala mensual de la precipitación. Las tablas de precipitación de la estación Serrezuela, la estación Caro Seminario y la estación La conejera se presentan en los anexos E, F, G. Respectivamente.

### **Verificación**

Para la estación de estudio Apto – Guaymaral y las tres estaciones meteorológicas de la CAR se realizó el procedimiento para complementar los datos. Estudiando una por una el año del primer registro hasta el último año de registro y la totalidad de sus datos, para que no existan vacíos de información. Realizando este procedimiento se halló que en las estaciones se encuentra información a partir del mes de enero del año 1980 en adelante, por tal razón se determinó que se trabajaran con los datos de un periodo de análisis para la estación meteorológica Apto Guaymaral – USTA, desde enero del año 1980 hasta diciembre del año 2018. Además de esto se obtuvo las precipitaciones promedio anuales de las 4 estaciones.

Con la información de todas las estaciones hidrometeorológicas se procede a realizar la complementación de datos por el método de la Razón – Normal ya que este método es consistente con la variable registrada en las otras estaciones y con la relación proporcional entre ellas, y la presencia de tres estaciones reduce el efecto de una de ellas sobre el error, este método considera promedios de precipitación anuales en periodos iguales. Aplicado a tres estaciones cercanas y que se encuentren equidistantes a la estación sobre la cual se quiere completar los datos.

### **Método De La Razón – Normal**

$$P_X = 0.5 \left( N_X * \frac{P_A}{N_A} + N_X * \frac{P_B}{N_B} \right) \quad (3)$$

*Donde:*

$P_X$ : Precipitación anual de una estación X

$N_X$ : Precipitación promedio de la estación X

$P_A$  y  $P_B$ : Precipitación anual de las estaciones A y B

$N_A$  y  $N_B$ : *Precipitación promedio de las estaciones A y B* (Cavero, 2013)

En cada estación se realizó la obtención del promedio aritmético de la precipitación por cada año, luego se efectuó el método de la razón normal siendo la estación “X” Apto – Guaymaral la mencionada en el método, y “A” y “B” las estaciones auxiliares. Este procedimiento se ejecutó desde el año 1998 hasta el año 2018 de la estación de estudio, en este periodo no todos los años no tienen vacíos de información, pero fue de gran importancia realizar la verificación.

Las estaciones de la EAAB cuentan con información desde enero del año 1990 hasta diciembre del año 2018, teniendo en cuenta que los datos obtenidos de la complementación de datos de la estación Apto – Guaymaral, se delimitó el estudio para trabajar con los datos desde enero del año 1992 hasta diciembre del año 2018, por tal razón se precisó un periodo de estudio de 26 años. Consultar anexo H, donde se encuentran los resultados.

### **Análisis de tendencia y homogeneidad**

Para poder realizar la validación de los datos de estudio es importante llevar a cabo un análisis de homogeneidad de series hidrológicas en la periferia de la zona de estudio por medio de los datos de otras estaciones. El objetivo de este análisis es determinar la calidad de la información hidrológica que se está utilizando y la información base sea la adecuada.

“Las gráficas de series de tiempo de los datos observados muestra su variabilidad temporal y usualmente provee una información rápida y valiosa para investigar la existencia de un cambio o una tendencia en la serie del tiempo. También las gráficas de datos espaciales (es decir, datos medidos o estimados en diferentes puntos en el espacio) puede proveer información valiosa sobre la variabilidad de los datos y cambios o tendencias en el espacio.” (Smith & Campuzano, 2010)

En el informe se tomaron tres métodos gráficos para realizar la validación de los datos de la estación de estudio:

- Gráfica masa simple
- Serie de tiempo combinada
- S – S (Serie sobre serie)

**Gráfica masa simple**

Gráfica de la serie acumulada del promedio anual de precipitación contra el tiempo.

$$S_t = \sum_{i=1}^t X_t \quad (4)$$

$$S_t = \text{Serie acumulada}$$

$$X_t = \text{Promedio anual de precipitación}$$

En las tablas 15 y 16 se muestran las series acumuladas de precipitación. Donde se calcularon los promedios de registro por estaciones para cada año y posteriormente se halló el promedio acumulado a través de los años. Estos valores se utilizaron para realizar las gráficas de Masa simple, Serie de tiempo combinada y Serie sobre Serie (S-S).

Tabla 1  
Datos de las estaciones con cálculo de promedios acumulados

| Año  | Apto - Guaymaral   |                        | Serrezuela         |                        |
|------|--------------------|------------------------|--------------------|------------------------|
|      | Promedio.<br>Anual | Promedio.<br>Acumulado | Promedio.<br>Anual | Promedio.<br>Acumulado |
| 1992 | 60,62              | 60,62                  | 72,09              | 72,09                  |
| 1993 | 71,53              | 132,15                 | 66,83              | 138,93                 |

|      |        |         |        |         |
|------|--------|---------|--------|---------|
| 1994 | 66,59  | 198,74  | 78,25  | 217,18  |
| 1995 | 89,38  | 288,13  | 85,68  | 302,85  |
| 1996 | 76,37  | 364,49  | 78,63  | 381,48  |
| 1997 | 42,68  | 407,17  | 71,96  | 453,44  |
| 1998 | 71,91  | 479,08  | 85,18  | 538,63  |
| 1999 | 76,79  | 555,87  | 91,73  | 630,36  |
| 2000 | 72,53  | 628,40  | 96,05  | 726,41  |
| 2001 | 56,61  | 685,00  | 62,88  | 789,28  |
| 2003 | 73,38  | 818,87  | 81,48  | 937,70  |
| 2004 | 74,14  | 893,01  | 109,66 | 1047,36 |
| 2005 | 55,92  | 948,94  | 106,32 | 1153,68 |
| 2006 | 57,34  | 1006,28 | 95,98  | 1249,65 |
| 2007 | 74,74  | 1081,02 | 79,91  | 1329,56 |
| 2008 | 80,65  | 1161,67 | 109,35 | 1438,91 |
| 2009 | 63,57  | 1225,23 | 76,24  | 1515,15 |
| 2010 | 102,31 | 1327,54 | 107,58 | 1622,73 |
| 2011 | 124,17 | 1451,71 | 129,57 | 1752,30 |
| 2012 | 73,82  | 1525,53 | 94,03  | 1846,32 |
| 2013 | 66,73  | 1592,26 | 82,43  | 1928,75 |
| 2014 | 64,87  | 1657,13 | 83,33  | 2012,08 |
| 2015 | 47,32  | 1704,44 | 52,75  | 2064,83 |
| 2016 | 72,56  | 1777,00 | 103,08 | 2167,90 |
| 2017 | 85,48  | 1862,48 | 98,12  | 2266,02 |
| 2018 | 79,40  | 1941,88 | 86,78  | 2352,80 |

*Nota.* Promedios de precipitación anuales de las estaciones APTO – GUAYMARAL y SERREZUELA, elaboración propia, valores en milímetros.

Tabla 2

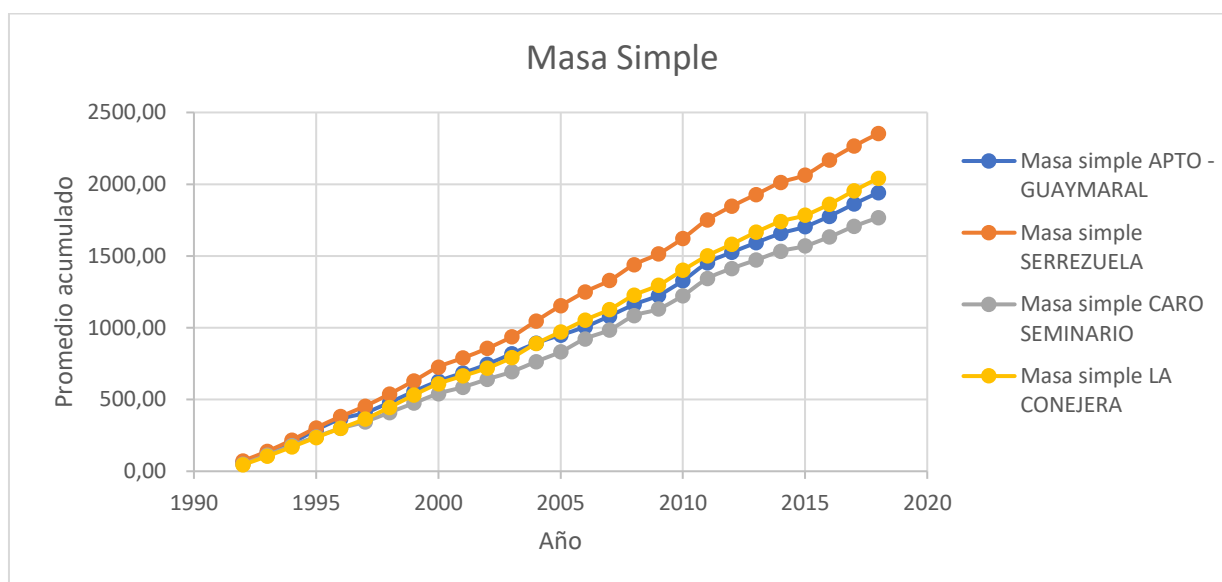
*Datos De Las Estaciones Con Cálculo De Promedios Acumulados*

| <b>Año</b> | <b>Caro Seminario</b>      |                                | <b>La Conejera</b>         |                                |
|------------|----------------------------|--------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
|            | <b>Promedio.<br/>Anual</b> | <b>Promedio.<br/>Acumulado</b> | <b>Promedio.<br/>Anual</b> | <b>Promedio.<br/>Acumulado</b> |
| 1992       | 50,50                      | 50,50                          | 44,28                      | 44,28                          |
| 1993       | 61,05                      | 111,55                         | 60,80                      | 105,08                         |
| 1994       | 68,53                      | 180,08                         | 64,07                      | 169,15                         |
| 1995       | 59,77                      | 239,85                         | 66,23                      | 235,38                         |
| 1996       | 58,92                      | 298,77                         | 64,53                      | 299,91                         |
| 1997       | 46,23                      | 345,00                         | 63,98                      | 363,89                         |
| 1998       | 64,91                      | 409,91                         | 80,94                      | 444,83                         |
| 1999       | 64,99                      | 474,90                         | 86,67                      | 531,50                         |

|      |        |         |        |         |
|------|--------|---------|--------|---------|
| 2000 | 66,58  | 541,48  | 78,28  | 609,78  |
| 2001 | 44,59  | 586,07  | 54,84  | 664,62  |
| 2002 | 55,16  | 641,23  | 54,35  | 718,97  |
| 2003 | 52,31  | 693,53  | 73,04  | 792,01  |
| 2004 | 70,85  | 764,38  | 97,70  | 889,71  |
| 2005 | 67,79  | 832,18  | 80,90  | 970,61  |
| 2006 | 90,74  | 922,92  | 83,28  | 1053,88 |
| 2007 | 61,87  | 984,78  | 73,95  | 1127,83 |
| 2008 | 98,89  | 1083,68 | 98,48  | 1226,31 |
| 2009 | 46,97  | 1130,64 | 70,22  | 1296,53 |
| 2010 | 93,18  | 1223,82 | 104,28 | 1400,81 |
| 2011 | 118,53 | 1342,35 | 100,77 | 1501,58 |
| 2012 | 71,09  | 1413,44 | 80,12  | 1581,69 |
| 2013 | 58,27  | 1471,71 | 84,55  | 1666,24 |
| 2014 | 61,78  | 1533,48 | 73,94  | 1740,18 |
| 2015 | 36,43  | 1569,91 | 43,82  | 1784,00 |
| 2016 | 63,07  | 1632,98 | 77,19  | 1861,19 |
| 2017 | 73,23  | 1706,20 | 93,20  | 1954,39 |
| 2018 | 61,02  | 1767,22 | 87,52  | 2041,91 |

*Nota.* Promedios de precipitación anuales de las estaciones CARO SEMINARIO y LA CONEJERA, elaboración propia, valores en milímetros.

Figura 4  
Gráfica De Masa Simple Estaciones CAR.

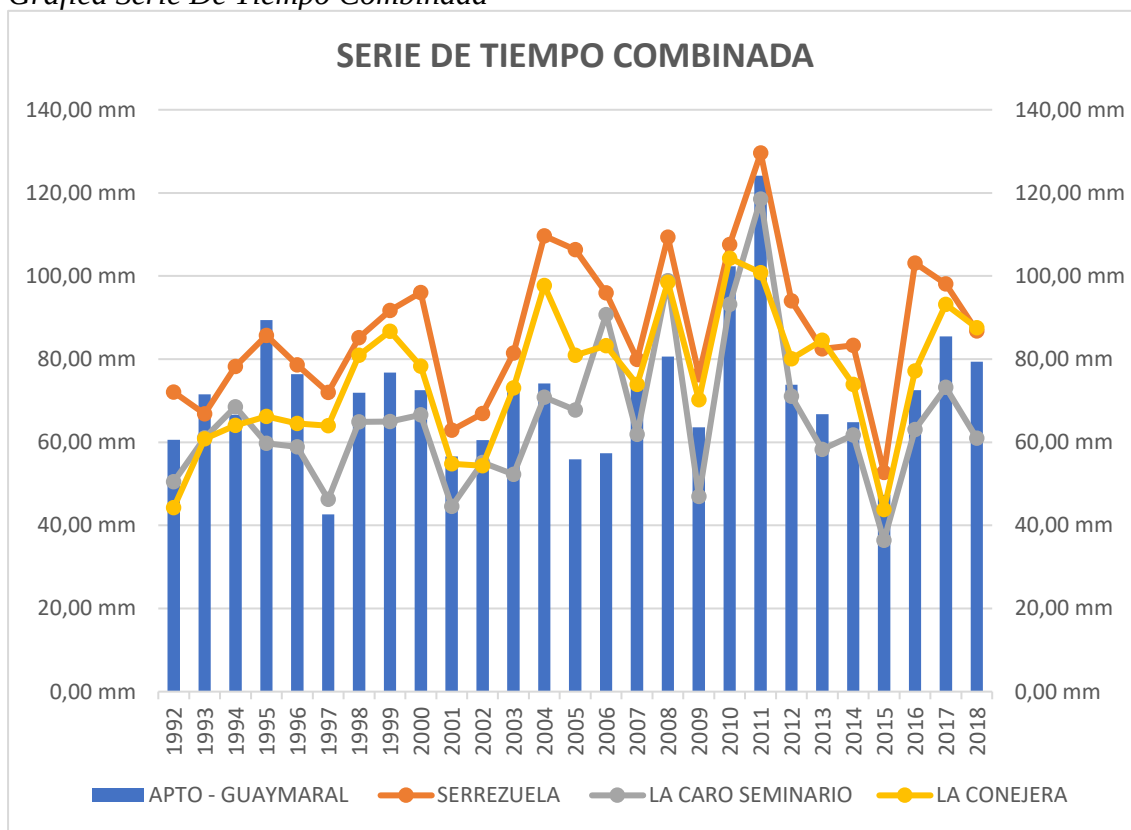


*Nota.* Obtención de masa simple de las estaciones de la CAR, elaboración propia.

La gráfica de masa simple muestra que el comportamiento lineal de las estaciones tiende a aumentar en el caso de estudio y las tres estaciones de validación, es decir, tienen un comportamiento similar y tienen regularidad entre estaciones. Es por ello que la zona es hidrológicamente homogénea.

### Gráfica serie de tiempo combinada

Figura 8  
*Gráfica Serie De Tiempo Combinada*



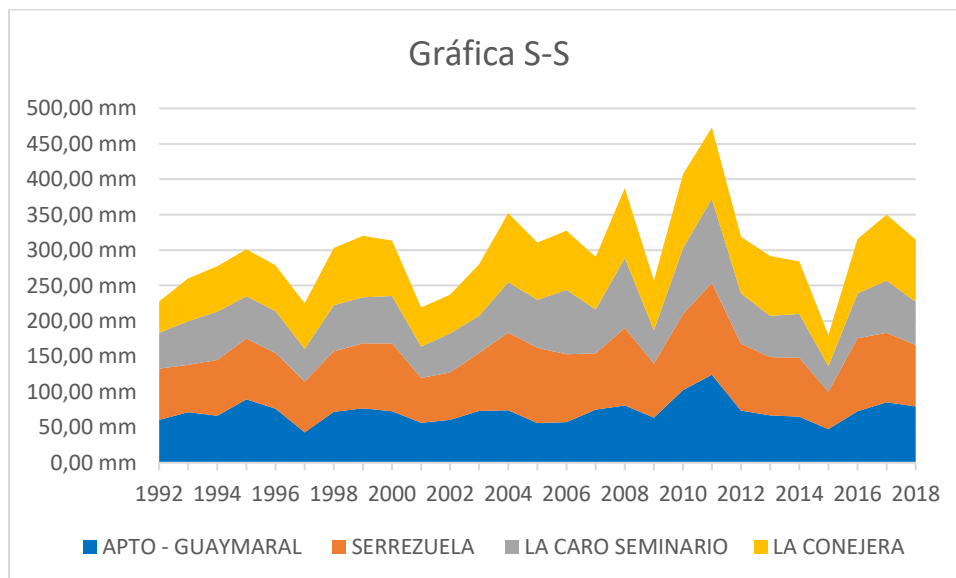
Nota. Obtención de serie de tiempo combinada de las estaciones, elaboración propia.

Gráfica de la serie del promedio anual de precipitación contra el tiempo, graficando la serie de estudio como diagrama de barras combinada con las series de validación como líneas de dispersión.

En la gráfica de tiempo combinada a pesar de que se presenten discrepancias en los años 2005 y 2006, los valores se asocian al comportamiento de la serie hidrológica de estudio, presentando una concentración de puntos alrededor del valor de la serie y compartiendo similitudes en la periodicidad.

### Gráfica S-S

Figura 9  
Gráfica S-S



Nota. Obtención de la gráfica S-S de las estaciones, elaboración propia.

Gráfica de serie de precipitación media anual versus tiempo en la serie de verificación, en este caso se ajustan las gráficas una sobre otra, para ver la tendencia anual de cada estación y resaltar los picos máximos y mínimos.

Dentro de la gráfica S – S existe gran consistencia en valores de picos máximos y mínimos, donde se puede justificar que es un conjunto que tiende a ser de series apareadas, para casos puntuales en los años 2001, 2009 y 2015, donde se presenta una disminución de la precipitación

promedio con respecto al año inmediatamente anterior. Caso contrario para el año 2007 donde en algunas estaciones su valor disminuye y en otras tiende a ser constante.

En la validación que se hizo con los tres métodos gráficos es importante que a la hora de realizar el estudio se tenga un claro análisis acerca del comportamiento esperado de la serie de estudio con respecto a la serie hidrológica de verificación en cada uno de los gráficos utilizados, de tal manera que se pueda conocer en qué ocasiones el gráfico está reportando problemas.

La información se recopiló y se analizó para verificar la temporalidad de la serie de precipitaciones registradas, así como su complementación de datos faltantes en los diferentes meses y años observados.

### **Parámetros de influencia en la precipitación**

En la atmósfera existen algunas cualidades físicas o elementos del tiempo que tienen influencia en la formación de las lluvias, estos son parámetros que se pueden medir y establecer indicios de cómo será el comportamiento de la precipitación. Los registros de los parámetros de influencia fueron obtenidos en el histórico de series hidrometeorológicas de la CAR, estos valores se revisan en los anexos I, J, K, L, M

Para el desarrollo de los modelos de inteligencia artificial entre más se consideró a los parámetros como constantes, para trabajar los dos modelos propuestos se planteó trabajar con cuatro de los parámetros que tienen influencia en la precipitación y los valores de días con lluvia para apoyar los modelos.

Para poder incorporar las constantes al modelo se trabajó con los valores históricos anuales mensuales de Temperatura, Días con lluvia, Humedad, Evaporación, Brillo solar.

### **Modelos de inteligencia artificial**

Para el desarrollo de los modelos de regresiones y redes neuronales, los cuales se trabajaron con el software Matlab, el software permite el ingreso de datos, la validación, análisis y entrega de resultados para la calibración del comportamiento de las precipitaciones en la zona de estudio. Se describe el paso a paso de cómo se ingresaron los datos al software Matlab y como se llevó a cabo el procesamiento de datos.

A fin de realizar una selección precisa de los datos para ingresarlos en los modelos de regresiones y redes neuronales, se recomienda trabajar con una muestra del 80% del total de datos, es decir que solo se añadirán los primeros 22 años por cada parámetro de influencia. Desde 1992 hasta 2018, 27 años

Datos para trabajar dentro de los modelos de inteligencia artificial: desde 1992 hasta 2013. Internamente de la tabla de los valores de las constantes para incluirlos en el modelo de inteligencia, se encuentra un total de 2112 datos.

Para poder incorporar los valores de las constantes dentro de los modelos, se organizaron los datos en una columna por parámetro, cada columna comenzando desde el mes enero desde 1992 hasta 2013, luego repitiendo el mismo procedimiento con los valores de febrero y así sucesivamente con cada mes hasta llegar a diciembre. Como se muestra en la Figura 10 de la matriz general y en la figura 11 el desglose de una columna.

Figura 10

Ejemplo estructura de la tabla de valores para incorporar en el modelo

**Ejemplo estructura de la tabla de valores para incorporar en el modelo**

|                                    | PRECIPITACIÓN | TEMPERATURA | DÍAS LLUVIA | HUMEDAD | EVAPORACIÓN | BRILLO SOLAR |
|------------------------------------|---------------|-------------|-------------|---------|-------------|--------------|
| Valores precipitación mes de enero | 22,9          | 13,3        | 13          | 61      | 100,5       | 168,3        |
|                                    | 42,5          | 13,1        | 31          | 62      | 91,7        | 139,1        |
|                                    | •             | •           | •           | •       | •           | •            |
|                                    | •             | •           | •           | •       | •           | •            |
| Valores evaporación mes de febrero | 23,4          | 13,9        | 4           | 66      | 113,3       | 150,7        |
|                                    | 37,5          | 13,8        | 10          | 64      | 101,8       | 159,6        |
|                                    | •             | •           | •           | •       | •           | •            |
|                                    | •             | •           | •           | •       | •           | •            |
| Valores humedad mes de diciembre   | 118,8         | 13,9        | 14          | 68      | 69,5        | 111,3        |
|                                    | •             | •           | •           | •       | •           | •            |
|                                    | •             | •           | •           | •       | •           | •            |
|                                    | •             | •           | •           | •       | •           | •            |
| Valores brillo solar mes de marzo  | 97,1          | 13,3        | 13          | 66      | 83,8        | 165,2        |
|                                    | •             | •           | •           | •       | •           | •            |
|                                    | •             | •           | •           | •       | •           | •            |
|                                    | •             | •           | •           | •       | •           | •            |
| Valores brillo solar mes de abril  | 53,8          | 13,1        | 10          | 73      | 71,7        | 114,6        |
|                                    | •             | •           | •           | •       | •           | •            |
|                                    | •             | •           | •           | •       | •           | •            |
|                                    | •             | •           | •           | •       | •           | •            |

Nota: Ejemplo de la estructura y elementos para realizar tabla de valores a ingresar en el modelo. Realización propia.

Figura 11

Estructura de valores incorporados al modelo.

|                                                           |                |  |
|-----------------------------------------------------------|----------------|--|
| Valor del parámetro para el mes de enero del año 1992     | PARÁMETRO      |  |
|                                                           | Enero 1992     |  |
|                                                           | Enero 1993     |  |
|                                                           | •              |  |
|                                                           | •              |  |
|                                                           | •              |  |
|                                                           | Enero 2013     |  |
| Valor del parámetro para el mes de febrero del año 1992   | Febrero 1992   |  |
|                                                           | •              |  |
|                                                           | •              |  |
|                                                           | •              |  |
|                                                           | Febrero 2013   |  |
|                                                           | •              |  |
|                                                           | •              |  |
|                                                           | •              |  |
|                                                           | Diciembre 1992 |  |
|                                                           | •              |  |
|                                                           | •              |  |
|                                                           | •              |  |
| Valor del parámetro para el mes de diciembre del año 2013 | Diciembre 2013 |  |

Todos los valores del mes de enero desde 1994 hasta 2012

Todos los valores del mes de febrero desde 1993 hasta 2012

Todos los valores de los meses de marzo, abril, mayo, junio, julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre desde 1992 hasta 2013

Todos los valores del mes de diciembre desde 1993 hasta 2012

Nota. Estructura y elementos para realizar tabla de valores a ingresar en el modelo. Realización propia.

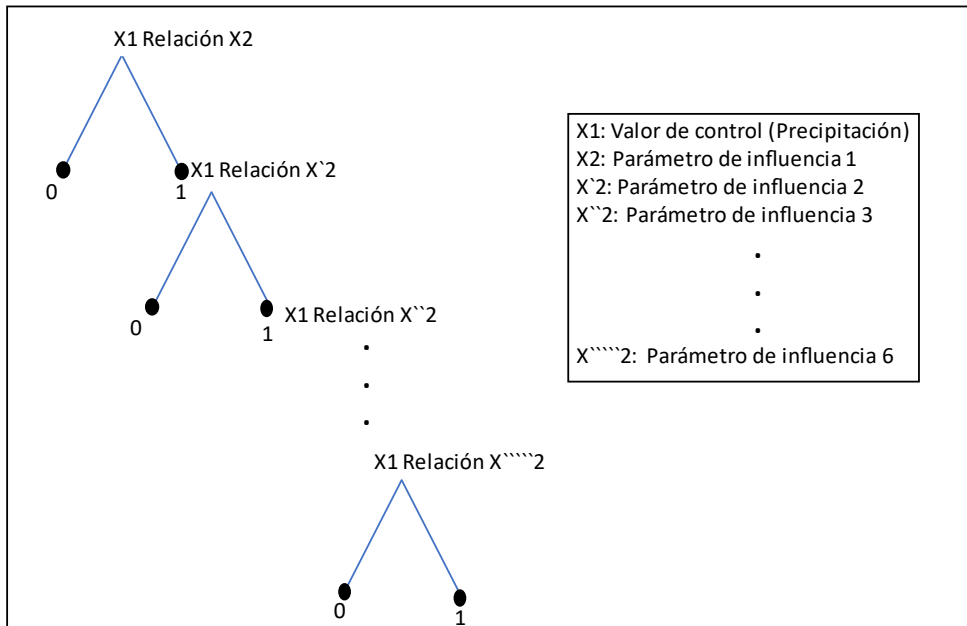
### **Modelo de Regresiones**

Los modelos de entrenamiento pueden explorar datos, seleccionar características, especificar esquemas de validación y evaluar resultados. Para entrenar un modelo de regresión, se trabaja por medio de modelos de regresión lineal, árboles de regresión, modelos de regresión de procesos gaussianos, máquinas de vectores de soporte, conjuntos de árboles de regresión y modelos de regresión de redes neuronales.

En el desarrollo del modelo de regresiones el sistema de conjunto de árboles de decisiones potenciado fue el modelo más óptimo para trabajar, es un modelo predictivo que consta de una combinación ponderada de varios árboles de regresión. En general, la combinación de árboles de regresión múltiples aumenta la calibración.

Con este modelo se pueden clasificar las respuestas de un nodo a otro, denominando las respuestas en sistema binario, tomando falso y verdadero. El árbol predice clasificaciones basadas en dos predictores,  $x_1$  y  $x_2$ , siendo  $x_1$  el valor de control (Precipitación) y  $x_2$  el parámetro de influencia. Para iniciar una predicción, se empieza en el nodo superior. La primera decisión es como  $x_1$  se relaciona con  $x_2$ . Si es no así, sigue a la rama izquierda para que el árbol clasifique los datos como tipo 0. Sin embargo, si  $x_1$  se relaciona con  $x_2$ , entonces sigue la rama derecha hacia el nodo de la parte inferior derecha. Aquí, el árbol pregunta si  $x_1$  se relación con el  $x_2$ , que es el valor del parámetro siguiente. Si no es así, entonces sigue a la rama izquierda para que el árbol clasifique los datos como tipo 0. Si no es así, entonces sigue la rama derecha para que el árbol clasifique los datos como tipo 1. Este proceso se repite con todos los parámetros por cada año crean un árbol, luego va creando arboles hasta encontrar los valores de calibración más acertados.

Figura 4  
*Esquema Árbol de decisiones Potenciado*



*Nota.* Esquema básico de Árbol de decisiones Potenciado con asignación de parámetros, valor de control y mecanismo de respuesta para el acierto. Realización propia.

Para desarrollar el modelo de regresiones se ejecutará la información de los parámetros de influencia previamente presentada en el software Matlab, a continuación, se describe el paso a paso de la elaboración del modelo.

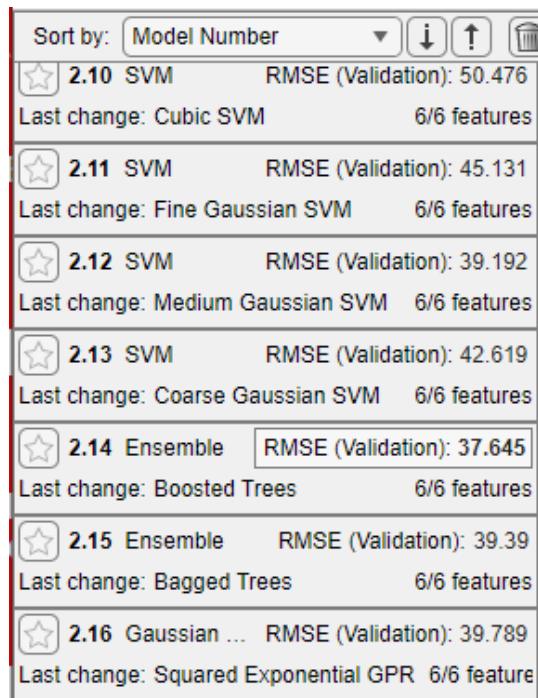
1. Acceder a los datos y prepararlos
2. Crear el sistema de regresiones
3. Evaluar qué modelo de regresiones se ajusta más a las necesidades de la investigación
4. Configurar el valor de control y valores predictores
5. Ajustar los parámetros de influencia por año, para optimizar el rendimiento
6. Entrenar el sistema de Árbol de decisiones potenciado
7. Validar los resultados de calibración

Para iniciar el modelado en el primer entrenamiento se evalúa el sistema por todos los modelos de regresión, cada uno de los cuales devuelve un valor de error y con este valor muestra que el modelo dado (árbol de decisión Potenciado) es el indicado para continuar con el entrenamiento, ya que su RMSE es el más bajo en comparación con los otros modelos.

RMSE: 37,64 y R: 0,22

Figura 5

*Resultado primer entrenamiento de regresiones*

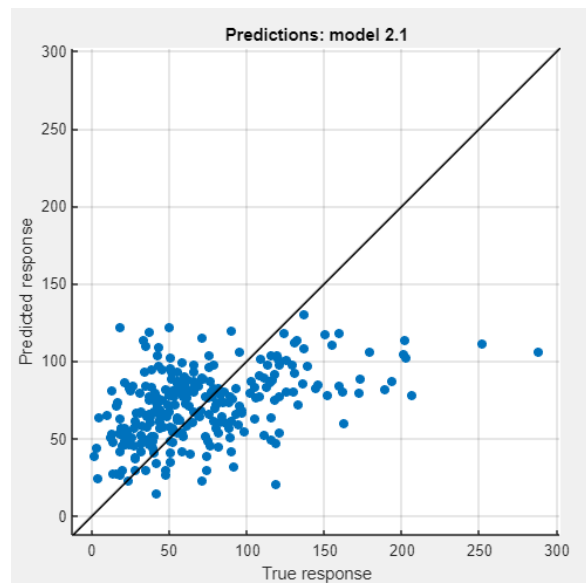


| Sort by:                                         | Model Number |              |                           |  |
|--------------------------------------------------|--------------|--------------|---------------------------|--|
| ☆                                                | 2.10         | SVM          | RMSE (Validation): 50.476 |  |
| Last change: Cubic SVM 6/6 features              |              |              |                           |  |
| ☆                                                | 2.11         | SVM          | RMSE (Validation): 45.131 |  |
| Last change: Fine Gaussian SVM 6/6 features      |              |              |                           |  |
| ☆                                                | 2.12         | SVM          | RMSE (Validation): 39.192 |  |
| Last change: Medium Gaussian SVM 6/6 features    |              |              |                           |  |
| ☆                                                | 2.13         | SVM          | RMSE (Validation): 42.619 |  |
| Last change: Coarse Gaussian SVM 6/6 features    |              |              |                           |  |
| ☆                                                | 2.14         | Ensemble     | RMSE (Validation): 37.645 |  |
| Last change: Boosted Trees 6/6 features          |              |              |                           |  |
| ☆                                                | 2.15         | Ensemble     | RMSE (Validation): 39.39  |  |
| Last change: Bagged Trees 6/6 features           |              |              |                           |  |
| ☆                                                | 2.16         | Gaussian ... | RMSE (Validation): 39.789 |  |
| Last change: Squared Exponential GPR 6/6 feature |              |              |                           |  |

*Nota.* Captura de pantalla software Matlab para realizar modelamiento de regresiones. MATLAB (R2020b) [Matlab] (2020) tomado de <https://la.mathworks.com/products/matlab.html>. Realización propia.

Al realizar el primer entrenamiento se evidencia en la figura 6 como se representan las primeras predicciones en contra de las verdaderas respuestas, Los puntos trazados en el diagrama están dispersos al azar, sin un patrón discernible, significa que los dos conjuntos de mediciones aun no tienen mucha relación entre sí.

Figura 6  
*Respuestas VS predicciones. Primer entrenamiento*



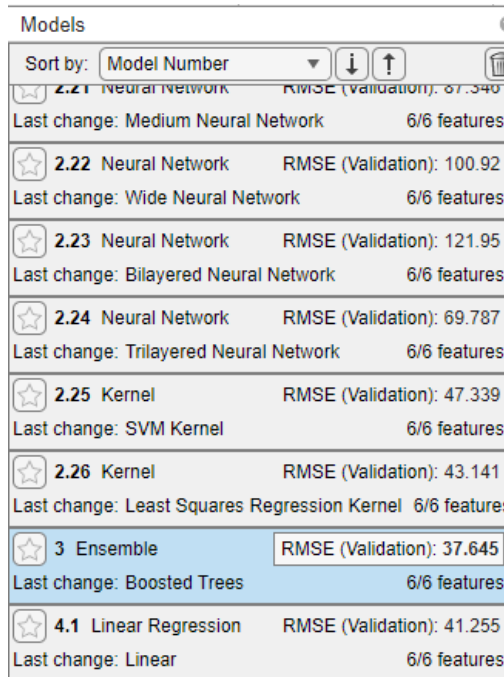
*Nota.* Captura de pantalla software Matlab para realizar modelamiento de regresiones. MATLAB (R2020b) [Matlab] (2020) tomado de <https://la.mathworks.com/products/matlab.html>. Realización propia.

Para continuar con el modelo se realizó un entrenamiento con solo el modelo de Árbol de decisiones Potenciado, obteniendo los mismos valores de RMSE, pero con un valor de R mayor.

RMSE: 37,64 y R: 0,35

Figura 7

*Resultado de entrenamiento con modelo Árbol de regresiones Potenciado*



| Models                                                    |                   |                           |
|-----------------------------------------------------------|-------------------|---------------------------|
| Sort by: Model Number                                     |                   |                           |
| 2.21                                                      | Neural Network    | RMSE (Validation): 87.340 |
| Last change: Medium Neural Network 6/6 features           |                   |                           |
| 2.22                                                      | Neural Network    | RMSE (Validation): 100.92 |
| Last change: Wide Neural Network 6/6 features             |                   |                           |
| 2.23                                                      | Neural Network    | RMSE (Validation): 121.95 |
| Last change: Bilayered Neural Network 6/6 features        |                   |                           |
| 2.24                                                      | Neural Network    | RMSE (Validation): 69.787 |
| Last change: Trilayered Neural Network 6/6 features       |                   |                           |
| 2.25                                                      | Kernel            | RMSE (Validation): 47.339 |
| Last change: SVM Kernel 6/6 features                      |                   |                           |
| 2.26                                                      | Kernel            | RMSE (Validation): 43.141 |
| Last change: Least Squares Regression Kernel 6/6 features |                   |                           |
| 3                                                         | Ensemble          | RMSE (Validation): 37.645 |
| Last change: Boosted Trees 6/6 features                   |                   |                           |
| 4.1                                                       | Linear Regression | RMSE (Validation): 41.255 |
| Last change: Linear 6/6 features                          |                   |                           |

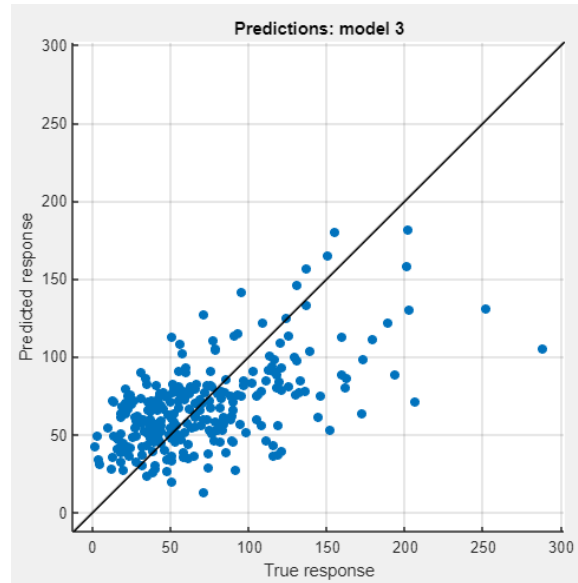
*Nota.* Captura de pantalla software Matlab para realizar modelamiento de regresiones. MATLAB (R2020b) [Matlab] (2020) tomado de <https://la.mathworks.com/products/matlab.html>. Realización propia.

Para la figura 8 se presentan cambios significativos en el comportamiento de los valores de predicción, al estar menos dispersos, formando un patrón, y así los dos conjuntos de mediciones empiezan a tener relación entre sí. A pesar de que algunos valores aún se encuentren muy alejados de la línea de tendencia, ya se cuenta con un valor del error alto y poco aceptable.

Luego de realizar más entrenamientos con el modelo de árbol y otros modelos, se obtienen resultados similares, tanto el valor del error como la tendencia del comportamiento de las predicciones se vuelven constantes y no presenta variaciones considerables.

Figura 8

*Respuestas VS Predicciones modelo Árbol de regresiones Potenciado*



*Nota.* Captura de pantalla software Matlab para realizar modelamiento de regresiones. MATLAB (R2020b) [Matlab] (2020) tomado de <https://la.mathworks.com/products/matlab.html>. Realización propia.

## Modelo de Red neuronal

Una red neuronal es un modelo de computación cuya estructura de capas se asemeja a la estructura interconectada de las neuronas en el cerebro, con capas de nodos conectados. Una red neuronal puede aprender de los datos, de manera que se puede entrenar para que reconozca patrones, clasifique datos y pronostique eventos futuros.(MathWorks, 2020)

Su comportamiento está determinado por cómo se relacionan sus elementos individuales, así como por el peso de esos vínculos. Estos pesos se ajustan automáticamente durante el entrenamiento según una regla de aprendizaje específica para que la red neuronal realice correctamente la operación requerida.

Para la investigación se creó un modelo a partir del aprendizaje supervisado el cual utiliza un conjunto de datos conocido llamado conjunto de datos de entrenamiento, para entrenar un algoritmo con un conjunto conocido de datos de entrada y respuestas, entonces generar la

calibración. Los algoritmos de aprendizaje supervisado intentan construir un modelo estableciendo relaciones entre las características y los datos de salida para hacer predicciones sobre los valores de respuesta para un nuevo conjunto de datos.

Es decir que el algoritmo ya cuenta con la respuesta correcta y este debe calibrar los nuevos datos que más se ajusten.

El algoritmo con el que se desarrolló el modelo fue Levenberg-Marquardt ya que tiene gran velocidad de convergencia del Error Cuadrado Medio, este algoritmo es un proceso iterativo que busca ajustar la curva de mínimos cuadrados en el conjunto de datos de estudio.

El algoritmo se basa en la metodología de retro propagación, está configurado de tal manera que el modelo cambia de parámetros cuando la salida no es la esperada. Por lo tanto, cuando el parámetro cambia, el error también cambia hasta que la red neuronal encuentra la salida deseada, lo que simplifica la estructura de la red, con poco impacto en los pesos de la red. Para crear una conexión entre las neuronas ocultas y la entrada.

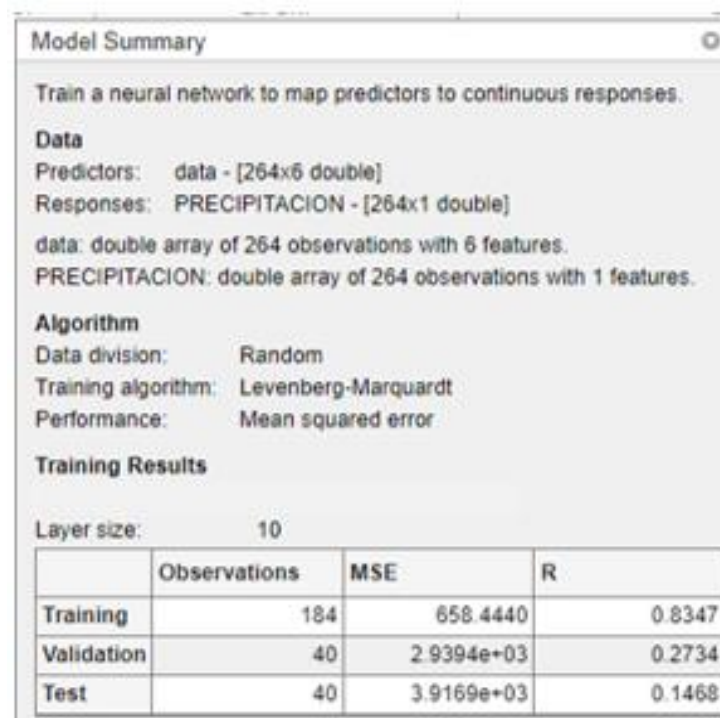
Hacia la elaboración del modelo de redes neuronales se ejecutará la información de las fronteras de predominación antes presentada en el programa Matlab. Se ingresaron los valores en la capa de entrada los parámetros de influencia y en la capa de salida los valores de precipitación, debido a que el sistema como es de aprendizaje supervisado debe tener las soluciones del propio sistema para así validarlas.

Luego se determina el algoritmo que debe funcionar, que es el algoritmo mencionado porque en un principio se asignan los pesos a la red y luego este algoritmo la modifica.

Se realiza el entrenamiento y se observa el valor en la primera prueba, donde el MSE es de 658,44 y R de 0,83 de entrenamiento.

Estos son los valores finales debido a que después de realizar varios entrenamientos y pruebas los valores en el MSE sufrían alteraciones después del 5 decimal y para el valor de R en el cuarto decimal.

Figura 9  
*Resultado entrenamiento Red Neuronal*



The screenshot shows the 'Model Summary' window in MATLAB. It displays the following information:

- Train a neural network to map predictors to continuous responses.**
- Data:**
  - Predictors: data - [264x6 double]
  - Responses: PRECIPITACION - [264x1 double]
  - data: double array of 264 observations with 6 features.
  - PRECIPITACION: double array of 264 observations with 1 features.
- Algorithm:**
  - Data division: Random
  - Training algorithm: Levenberg-Marquardt
  - Performance: Mean squared error
- Training Results:**
  - Layer size: 10

|            | Observations | MSE        | R      |
|------------|--------------|------------|--------|
| Training   | 184          | 658.4440   | 0.8347 |
| Validation | 40           | 2.9394e+03 | 0.2734 |
| Test       | 40           | 3.9169e+03 | 0.1468 |

*Nota.* Captura de pantalla software Matlab para realizar modelamiento de red neuronal. MATLAB (R2020b) [Matlab] (2020) tomado de <https://la.mathworks.com/products/matlab.html>. Realización propia.

**Error entre conjuntos**

**Modelo de red neuronal**

El error cuadrático medio es la diferencia cuadrática promedio entre resultados y objetivos. Los valores más bajos son mejores. Cero significa que no hay error.

Modelo: Regresiones    Red Neuronal

RMSE:        37,64            25,66

Los valores R de regresión miden la correlación entre resultados y objetivos. Un valor r de 1 significa una relación cercana, 0 una relación aleatoria.

Modelo: Regresiones    Red Neuronal

R:            0,35            0,83

Existen diferentes metodologías y procedimientos para realizar la complementación de datos faltantes en un registro histórico de precipitación obtenido por una estación meteorológica. Algunos de los métodos más utilizados son:

- Coeficiente de Correlación. El coeficiente de correlación es un estadístico que proporciona información sobre la relación lineal existente entre dos variables cualesquiera. Básicamente, esta información se refiere a dos características de la relación lineal: la dirección o sentido y la cercanía o fuerza. Es importante notar que el uso del coeficiente de correlación sólo tiene sentido si la relación a analizar es del tipo lineal.
- Combinación Lineal Ponderada (CLP). Este método consiste en sustituir la falta de datos a partir de los datos de series estadísticamente próximas, que son conocidas como

vecinas. De tal manera que cada dato incompleto se obtiene mediante la combinación lineal ponderada de los datos de las series que se van a utilizar para el completado. Dichos datos tienen un peso en el CLP proporcional al coeficiente de correlación de Pearson con la serie incompleta, siempre que éste sea superior a un valor crítico aceptable.

- Distancia Inversa Ponderada (IDW). En el método de interpolación IDW, los puntos de muestreo se ponderan durante la interpolación de tal manera que la influencia de un punto en relación con otros disminuye con la distancia desde el punto desconocido que se desea crear.
- Precipitación Media. Es la altura de la lámina de agua que se formaría sobre el área de la cuenca en estudio a consecuencia de las lluvias en ella registradas, en realidad se trata de un caso ideal, entonces los valores son empíricos. La precipitación media puede ser: anual, diaria, mensual, plurianual precipitación media de una cuenca método de las isoyetas método de los polígonos de Thiessen.(Forero & Rodríguez, 2016)

En el desarrollo de la investigación se realizó la creación de dos modelos de inteligencia artificial para la estación Apto – Guaymaral, con valores calibrados para la complementación de datos faltantes en los registros históricos de precipitación. El presente trabajo presenta una metodología como alternativa para la obtención de valores de precipitación en una serie que carezca de información puntual para diferentes años y/o meses que se requieran, esto con la información que se tiene de las diferentes estaciones.

Luego de la creación y desarrollo de dos modelos de inteligencia artificial, los resultados obtenidos se utilizaron como base de datos, para el análisis de la investigación se utilizaron los valores resaltados, pues durante febrero y marzo de 1997, junio de 2003 y 2005, julio de 2005 y en 2006 de febrero a noviembre, en la estación de estudio Apto-Guaymaral se encuentran los valores históricos faltantes.

Tabla 3

*Base de datos modelo de Regresiones de Enero a Junio*

| <b>Base de datos de modelo de regresiones</b> |            |                     |                     |                     |                     |                      |
|-----------------------------------------------|------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
| <b>AÑO</b>                                    | <b>ENE</b> | <b>FEB</b>          | <b>MAR</b>          | <b>ABR</b>          | <b>MAY</b>          | <b>JUN</b>           |
| 1992                                          | 60,54      | 75,14               | 96,14               | 103,74              | 90,04               | 68,64                |
| 1993                                          | 80,14      | 88,54               | 128,04              | 174,84              | 162,14              | 74,54                |
| 1994                                          | 65,64      | 153,64              | 116,64              | 130,84              | 148,74              | 99,44                |
| 1995                                          | 85,64      | 112,14              | 159,04              | 174,04              | 78,94               | 151,24               |
| 1996                                          | 90,94      | 140,04              | 170,64              | 108,34              | 145,64              | 80,14                |
| 1997                                          | 88,14      | <b><u>63,76</u></b> | <b><u>69,37</u></b> | 102,64              | 81,84               | 120,34               |
| 1998                                          | 69,44      | 60,54               | 127,94              | 74,64               | 163,54              | 97,24                |
| 1999                                          | 57,24      | 100,34              | 114,04              | 142,94              | 73,24               | 163,04               |
| 2000                                          | 56,34      | 127,04              | 148,74              | 87,74               | 98,14               | 90,24                |
| 2001                                          | 78,04      | 76,04               | 106,34              | 47,84               | 168,64              | 119,54               |
| 2002                                          | 59,64      | 65,04               | 122,04              | 170,14              | 157,54              | 113,64               |
| 2003                                          | 41,74      | 99,14               | 95,04               | 183,74              | 78,24               | <b><u>119,75</u></b> |
| 2004                                          | 53,64      | 129,14              | 88,84               | 197,54              | 152,84              | 81,94                |
| 2005                                          | 65,34      | 119,24              | 94,54               | 125,94              | 41,04               | <b><u>80,39</u></b>  |
| 2006                                          | 65,64      | <b><u>59,18</u></b> | <b><u>88,56</u></b> | <b><u>99,63</u></b> | <b><u>83,34</u></b> | <b><u>90,66</u></b>  |
| 2007                                          | 50,94      | 77,34               | 156,04              | 69,84               | 89,14               | 76,04                |
| 2008                                          | 60,64      | 96,24               | 109,94              | 116,14              | 108,94              | 130,64               |
| 2009                                          | 77,24      | 153,14              | 108,94              | 92,74               | 74,64               | 111,24               |
| 2010                                          | 72,44      | 57,34               | 53,74               | 239,44              | 188,14              | 133,44               |
| 2011                                          | 158,94     | 146,04              | 189,94              | 231,44              | 168,74              | 103,44               |
| 2012                                          | 126,64     | 103,64              | 117,24              | 226,74              | 72,14               | 76,44                |
| 2013                                          | 61,04      | 156,44              | 89,74               | 134,34              | 177,24              | 56,24                |

*Nota.* Valores de predicción de las precipitaciones anuales de la estación Apto – Guaymaral para la base de datos de calibración, elaboración propia, valores en milímetros.

Tabla 4

*Base de datos modelo de Regresiones de Julio a diciembre*

| <b>Base de datos de modelo de regresiones</b> |                     |                     |                     |                     |                     |            |
|-----------------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------|
| <b>AÑO</b>                                    | <b>JUL</b>          | <b>AGO</b>          | <b>SEP</b>          | <b>OCT</b>          | <b>NOV</b>          | <b>DIC</b> |
| 1992                                          | 93,14               | 81,94               | 117,74              | 90,04               | 167,24              | 134,74     |
| 1993                                          | 109,14              | 70,74               | 80,94               | 87,34               | 197,54              | 56,14      |
| 1994                                          | 75,44               | 87,74               | 66,54               | 140,84              | 114,14              | 51,14      |
| 1995                                          | 103,24              | 142,64              | 69,84               | 97,14               | 200,24              | 150,14     |
| 1996                                          | 113,04              | 97,04               | 79,24               | 117,94              | 112,24              | 112,84     |
| 1997                                          | 73,64               | 65,44               | 56,04               | 101,14              | 85,14               | 56,34      |
| 1998                                          | 116,74              | 81,54               | 112,44              | 158,14              | 119,94              | 132,44     |
| 1999                                          | 61,64               | 80,34               | 167,94              | 199,84              | 127,24              | 85,34      |
| 2000                                          | 110,94              | 86,24               | 182,44              | 135,94              | 128,04              | 70,14      |
| 2001                                          | 59,24               | 75,94               | 143,64              | 73,44               | 99,34               | 82,94      |
| 2002                                          | 68,44               | 79,44               | 87,14               | 98,74               | 63,04               | 92,74      |
| 2003                                          | 88,64               | 51,64               | 156,54              | 122,64              | 211,14              | 83,94      |
| 2004                                          | 77,74               | 75,24               | 119,14              | 209,84              | 115,84              | 39,64      |
| 2005                                          | <b><u>86,66</u></b> | 79,34               | 128,74              | 123,34              | 103,54              | 74,64      |
| 2006                                          | <b><u>72,44</u></b> | <b><u>54,14</u></b> | <b><u>58,91</u></b> | <b><u>93,82</u></b> | <b><u>96,14</u></b> | 42,14      |
| 2007                                          | 50,14               | 81,44               | 50,54               | 325,54              | 174,94              | 146,64     |
| 2008                                          | 115,14              | 121,94              | 93,04               | 133,24              | 240,64              | 92,94      |
| 2009                                          | 76,14               | 56,54               | 55,74               | 244,44              | 97,74               | 65,94      |
| 2010                                          | 193,14              | 88,94               | 121,04              | 156,04              | 216,84              | 158,84     |
| 2011                                          | 93,04               | 104,34              | 94,14               | 238,64              | 289,74              | 123,24     |
| 2012                                          | 113,44              | 80,84               | 61,74               | 154,34              | 97,24               | 107,04     |
| 2013                                          | 64,14               | 106,74              | 72,64               | 88,74               | 153,74              | 91,44      |

*Nota.* Valores de predicción de las precipitaciones anuales de la estación Apto – Guaymaral para la base de datos de calibración, elaboración propia, valores en milímetros.

Las bases de datos de los modelos proporcionan todos los valores que se deseen usar para cualquier año y mes, a pesar de que cuentan con un valor de error considerable, sirve como base de referencia para complementar datos o compararlos con otros resultados dentro de una metodología de referencia.

# **MODELACIÓN DE LLUVIAS ANUALES UTILIZANDO INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN EL NORTE DE BOGOTÁ**

50

Tabla 5

*Base de datos modelo de Red Neuronal de Enero a junio.*

| <b>Base de datos de modelo de Red Neuronal</b> |            |                     |                     |                     |                     |                      |
|------------------------------------------------|------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
| <b>AÑO</b>                                     | <b>ENE</b> | <b>FEB</b>          | <b>MAR</b>          | <b>ABR</b>          | <b>MAY</b>          | <b>JUN</b>           |
| 1992                                           | 48,56      | 63,16               | 84,16               | 91,76               | 78,06               | 56,66                |
| 1993                                           | 68,16      | 76,56               | 116,06              | 162,86              | 150,16              | 62,56                |
| 1994                                           | 53,66      | 141,66              | 104,66              | 118,86              | 136,76              | 87,46                |
| 1995                                           | 73,66      | 100,16              | 147,06              | 162,06              | 66,96               | 139,26               |
| 1996                                           | 78,96      | 128,06              | 158,66              | 96,36               | 133,66              | 68,16                |
| 1997                                           | 76,16      | <b><u>51,78</u></b> | <b><u>57,39</u></b> | 90,66               | 69,86               | 108,36               |
| 1998                                           | 57,46      | 48,56               | 115,96              | 62,66               | 151,56              | 85,26                |
| 1999                                           | 45,26      | 88,36               | 102,06              | 130,96              | 61,26               | 151,06               |
| 2000                                           | 44,36      | 115,06              | 136,76              | 75,76               | 86,16               | 78,26                |
| 2001                                           | 66,06      | 64,06               | 94,36               | 35,86               | 156,66              | 107,56               |
| 2002                                           | 47,66      | 53,06               | 110,06              | 158,16              | 145,56              | 101,66               |
| 2003                                           | 29,76      | 87,16               | 83,06               | 171,76              | 66,26               | <b><u>107,77</u></b> |
| 2004                                           | 41,66      | 117,16              | 76,86               | 185,56              | 140,86              | 69,96                |
| 2005                                           | 53,36      | 107,26              | 82,56               | 113,96              | 29,06               | <b><u>68,41</u></b>  |
| 2006                                           | 53,66      | <b><u>47,20</u></b> | <b><u>76,58</u></b> | <b><u>87,65</u></b> | <b><u>71,36</u></b> | <b><u>78,68</u></b>  |
| 2007                                           | 38,96      | 65,36               | 144,06              | 57,86               | 77,16               | 64,06                |
| 2008                                           | 48,66      | 84,26               | 97,96               | 104,16              | 96,96               | 118,66               |
| 2009                                           | 65,26      | 141,16              | 96,96               | 80,76               | 62,66               | 99,26                |
| 2010                                           | 60,46      | 45,36               | 41,76               | 227,46              | 176,16              | 121,46               |
| 2011                                           | 146,96     | 134,06              | 177,96              | 219,46              | 156,76              | 91,46                |
| 2012                                           | 114,66     | 91,66               | 105,26              | 214,76              | 60,16               | 64,46                |
| 2013                                           | 49,06      | 144,46              | 77,76               | 122,36              | 165,26              | 44,26                |

*Nota.* Valores de predicción de las precipitaciones anuales de la estación Apto – Guaymaral para la base de datos de calibración, elaboración propia, valores en milímetros.

Tabla 6

*Base de datos modelo de Red Neuronal de Julio a diciembre.*

| <b>Base de datos de modelo de Red Neuronal</b> |            |            |            |            |            |            |
|------------------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>AÑO</b>                                     | <b>JUL</b> | <b>AGO</b> | <b>SEP</b> | <b>OCT</b> | <b>NOV</b> | <b>DIC</b> |
| 1992                                           | 81,16      | 69,96      | 105,76     | 78,06      | 155,26     | 122,76     |
| 1993                                           | 97,16      | 58,76      | 68,96      | 75,36      | 185,56     | 44,16      |
| 1994                                           | 63,46      | 75,76      | 54,56      | 128,86     | 102,16     | 39,16      |
| 1995                                           | 91,26      | 130,66     | 57,86      | 85,16      | 188,26     | 138,16     |
| 1996                                           | 101,06     | 85,06      | 67,26      | 105,96     | 100,26     | 100,86     |
| 1997                                           | 61,66      | 53,46      | 44,06      | 89,16      | 73,16      | 44,36      |
| 1998                                           | 104,76     | 69,56      | 100,46     | 146,16     | 107,96     | 120,46     |
| 1999                                           | 49,66      | 68,36      | 155,96     | 187,86     | 115,26     | 73,36      |

|      |                     |                     |                     |                     |                     |        |
|------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------|
| 2000 | 98,96               | 74,26               | 170,46              | 123,96              | 116,06              | 58,16  |
| 2001 | 47,26               | 63,96               | 131,66              | 61,46               | 87,36               | 70,96  |
| 2002 | 56,46               | 67,46               | 75,16               | 86,76               | 51,06               | 80,76  |
| 2003 | 76,66               | 39,66               | 93,24               | 110,66              | 199,16              | 71,96  |
| 2004 | 65,76               | 63,26               | 107,16              | 197,86              | 103,86              | 27,66  |
| 2005 | <b><u>74,68</u></b> | 67,36               | 116,76              | 111,36              | 91,56               | 62,66  |
| 2006 | <b><u>60,46</u></b> | <b><u>42,16</u></b> | <b><u>46,93</u></b> | <b><u>81,84</u></b> | <b><u>84,16</u></b> | 30,16  |
| 2007 | 38,16               | 69,46               | 38,56               | 313,56              | 162,96              | 134,66 |
| 2008 | 103,16              | 109,96              | 81,06               | 121,26              | 228,66              | 80,96  |
| 2009 | 64,16               | 44,56               | 43,76               | 232,46              | 85,76               | 53,96  |
| 2010 | 181,16              | 76,96               | 109,06              | 144,06              | 204,86              | 146,86 |
| 2011 | 81,06               | 92,36               | 82,16               | 226,66              | 277,76              | 111,26 |
| 2012 | 101,46              | 68,86               | 49,76               | 142,36              | 85,26               | 95,06  |
| 2013 | 52,16               | 94,76               | 60,66               | 76,76               | 141,76              | 79,46  |

*Nota.* Valores de predicción de las precipitaciones anuales de la estación Apto – Guaymaral para la base de datos de calibración, elaboración propia, valores en milímetros.

La estación Apto-Guaymaral se complementó con los valores proporcionados por la base de datos del modelo de regresiones, que a diferencia de otras metodologías en este método se ubican todos los valores faltantes debido a que se cuenta con toda la información para complementar

Tabla 7

*Estación Apto-Guaymaral complementada Modelo de Regresiones*

| <b>Estación Apto - Guaymaral complementada Modelo de Regresiones</b> |            |                     |                     |            |            |                     |
|----------------------------------------------------------------------|------------|---------------------|---------------------|------------|------------|---------------------|
| <b>AÑO</b>                                                           | <b>ENE</b> | <b>FEB</b>          | <b>MAR</b>          | <b>ABR</b> | <b>MAY</b> | <b>JUN</b>          |
| 1992                                                                 | 22,9       | 37,5                | 58,5                | 66,1       | 52,4       | 31                  |
| 1993                                                                 | 42,5       | 50,9                | 90,4                | 137,2      | 124,5      | 36,9                |
| 1994                                                                 | 28         | 116                 | 79                  | 93,2       | 111,1      | 61,8                |
| 1995                                                                 | 48         | 74,5                | 121,4               | 136,4      | 41,3       | 113,6               |
| 1996                                                                 | 53,3       | 102,4               | 133                 | 70,7       | 108        | 42,5                |
| 1997                                                                 | 50,5       | <b><u>63,76</u></b> | <b><u>69,37</u></b> | 65         | 44,2       | 82,7                |
| 1998                                                                 | 31,8       | 22,9                | 90,3                | 37         | 125,9      | 59,6                |
| 1999                                                                 | 19,6       | 62,7                | 76,4                | 105,3      | 35,6       | 125,4               |
| 2000                                                                 | 18,7       | 89,4                | 111,1               | 50,1       | 60,5       | 52,6                |
| 2001                                                                 | 40,4       | 38,4                | 68,7                | 10,2       | 131        | 81,9                |
| 2002                                                                 | 22         | 27,4                | 84,4                | 132,5      | 119,9      | 76                  |
| 2003                                                                 | 4,1        | 61,5                | 57,4                | 146,1      | 40,6       | <b><u>119,8</u></b> |
| 2004                                                                 | 16         | 91,5                | 51,2                | 159,9      | 115,2      | 44,3                |
| 2005                                                                 | 27,7       | 81,6                | 56,9                | 88,3       | 3,4        | <b><u>80,39</u></b> |

# **MODELACIÓN DE LLUVIAS ANUALES UTILIZANDO INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN EL NORTE DE BOGOTÁ**

52

|      |       |                     |                     |                     |                     |                     |
|------|-------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 2006 | 28    | <b><u>59,18</u></b> | <b><u>88,56</u></b> | <b><u>99,63</u></b> | <b><u>83,34</u></b> | <b><u>90,66</u></b> |
| 2007 | 13,3  | 39,7                | 118,4               | 32,2                | 51,5                | 38,4                |
| 2008 | 23    | 58,6                | 72,3                | 78,5                | 71,3                | 93                  |
| 2009 | 39,6  | 115,5               | 71,3                | 55,1                | 37                  | 73,6                |
| 2010 | 34,8  | 19,7                | 16,1                | 201,8               | 150,5               | 95,8                |
| 2011 | 121,3 | 108,4               | 152,3               | 193,8               | 131,1               | 65,8                |
| 2012 | 89    | 66                  | 79,6                | 189,1               | 34,5                | 38,8                |
| 2013 | 23,4  | 118,8               | 52,1                | 96,7                | 139,6               | 18,6                |

*Nota.* Valores de las precipitaciones anuales de la estación Apto – Guaymaral complementada, elaboración propia, valores en milímetros.

Tabla 8

*Estación Apto-Guaymaral complementada Modelo de Regresiones*

| <b>Estación Apto - Guaymaral complementada Modelo de Regresiones</b> |                     |                     |                     |                     |                     |            |
|----------------------------------------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------|
| <b>AÑO</b>                                                           | <b>JUL</b>          | <b>AGO</b>          | <b>SEP</b>          | <b>OCT</b>          | <b>NOV</b>          | <b>DIC</b> |
| 1992                                                                 | 55,5                | 44,3                | 80,1                | 52,4                | 129,6               | 97,1       |
| 1993                                                                 | 71,5                | 33,1                | 43,3                | 49,7                | 159,9               | 18,5       |
| 1994                                                                 | 37,8                | 50,1                | 28,9                | 103,2               | 76,5                | 13,5       |
| 1995                                                                 | 65,6                | 105                 | 32,2                | 59,5                | 162,6               | 112,5      |
| 1996                                                                 | 75,4                | 59,4                | 41,6                | 80,3                | 74,6                | 75,2       |
| 1997                                                                 | 36                  | 27,8                | 18,4                | 63,5                | 47,5                | 18,7       |
| 1998                                                                 | 79,1                | 43,9                | 74,8                | 120,5               | 82,3                | 94,8       |
| 1999                                                                 | 24                  | 42,7                | 130,3               | 162,2               | 89,6                | 47,7       |
| 2000                                                                 | 73,3                | 48,6                | 144,8               | 98,3                | 90,4                | 32,5       |
| 2001                                                                 | 21,6                | 38,3                | 106                 | 35,8                | 61,7                | 45,3       |
| 2002                                                                 | 30,8                | 41,8                | 49,5                | 61,1                | 25,4                | 55,1       |
| 2003                                                                 | 51                  | 14                  | 118,9               | 85                  | 173,5               | 46,3       |
| 2004                                                                 | 40,1                | 37,6                | 81,5                | 172,2               | 78,2                | 2          |
| 2005                                                                 | <b><u>86,66</u></b> | 41,7                | 91,1                | 85,7                | 65,9                | 37         |
| 2006                                                                 | <b><u>72,44</u></b> | <b><u>54,14</u></b> | <b><u>58,91</u></b> | <b><u>93,82</u></b> | <b><u>96,14</u></b> | 4,5        |
| 2007                                                                 | 12,5                | 43,8                | 12,9                | 287,9               | 137,3               | 109        |
| 2008                                                                 | 77,5                | 84,3                | 55,4                | 95,6                | 203                 | 55,3       |
| 2009                                                                 | 38,5                | 18,9                | 18,1                | 206,8               | 60,1                | 28,3       |
| 2010                                                                 | 155,5               | 51,3                | 83,4                | 118,4               | 179,2               | 121,2      |
| 2011                                                                 | 55,4                | 66,7                | 56,5                | 201                 | 252,1               | 85,6       |
| 2012                                                                 | 75,8                | 43,2                | 24,1                | 116,7               | 59,6                | 69,4       |
| 2013                                                                 | 26,5                | 69,1                | 35                  | 51,1                | 116,1               | 53,8       |

*Nota.* Valores de las precipitaciones anuales de la estación Apto – Guaymaral complementada, elaboración propia, valores en milímetros.

A diferencia de otras metodologías, en este método se encuentran todos los valores faltantes ya que contiene toda la información a completar. La estación de Apto-Guaymaral se complementó con los valores proporcionados por la base de datos del modelo de red neuronal.

Tabla 9

*Estación Apto-Guaymaral complementada Modelo de Red Neuronal*

| <b>Estación Apto - Guaymaral complementada Modelo de Red Neuronal</b> |            |              |              |              |              |               |
|-----------------------------------------------------------------------|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| <b>AÑO</b>                                                            | <b>ENE</b> | <b>FEB</b>   | <b>MAR</b>   | <b>ABR</b>   | <b>MAY</b>   | <b>JUN</b>    |
| 1992                                                                  | 22,9       | 37,5         | 58,5         | 66,1         | 52,4         | 31            |
| 1993                                                                  | 42,5       | 50,9         | 90,4         | 137,2        | 124,5        | 36,9          |
| 1994                                                                  | 28         | 116          | 79           | 93,2         | 111,1        | 61,8          |
| 1995                                                                  | 48         | 74,5         | 121,4        | 136,4        | 41,3         | 113,6         |
| 1996                                                                  | 53,3       | 102,4        | 133          | 70,7         | 108          | 42,5          |
| 1997                                                                  | 50,5       | <b>51,78</b> | <b>57,39</b> | 65           | 44,2         | 82,7          |
| 1998                                                                  | 31,8       | 22,9         | 90,3         | 37           | 125,9        | 59,6          |
| 1999                                                                  | 19,6       | 62,7         | 76,4         | 105,3        | 35,6         | 125,4         |
| 2000                                                                  | 18,7       | 89,4         | 111,1        | 50,1         | 60,5         | 52,6          |
| 2001                                                                  | 40,4       | 38,4         | 68,7         | 10,2         | 131          | 81,9          |
| 2002                                                                  | 22         | 27,4         | 84,4         | 132,5        | 119,9        | 76            |
| 2003                                                                  | 4,1        | 61,5         | 57,4         | 146,1        | 40,6         | <b>107,77</b> |
| 2004                                                                  | 16         | 91,5         | 51,2         | 159,9        | 115,2        | 44,3          |
| 2005                                                                  | 27,7       | 81,6         | 56,9         | 88,3         | 3,4          | <b>68,41</b>  |
| 2006                                                                  | 28         | <b>47,20</b> | <b>76,58</b> | <b>87,65</b> | <b>71,36</b> | <b>78,68</b>  |
| 2007                                                                  | 13,3       | 39,7         | 118,4        | 32,2         | 51,5         | 38,4          |
| 2008                                                                  | 23         | 58,6         | 72,3         | 78,5         | 71,3         | 93            |
| 2009                                                                  | 39,6       | 115,5        | 71,3         | 55,1         | 37           | 73,6          |
| 2010                                                                  | 34,8       | 19,7         | 16,1         | 201,8        | 150,5        | 95,8          |
| 2011                                                                  | 121,3      | 108,4        | 152,3        | 193,8        | 131,1        | 65,8          |
| 2012                                                                  | 89         | 66           | 79,6         | 189,1        | 34,5         | 38,8          |
| 2013                                                                  | 23,4       | 118,8        | 52,1         | 96,7         | 139,6        | 18,6          |

*Nota.* Valores de las precipitaciones anuales de la estación Apto – Guaymaral complementada, elaboración propia, valores en milímetros.

Tabla 10

*Estación Apto-Guaymaral complementada Modelo de Red Neuronal*

| <b>Estación Apto - Guaymaral complementada Modelo de Red Neuronal</b> |                     |                     |                     |                     |                     |            |
|-----------------------------------------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------|
| <b>AÑO</b>                                                            | <b>JUL</b>          | <b>AGO</b>          | <b>SEP</b>          | <b>OCT</b>          | <b>NOV</b>          | <b>DIC</b> |
| 1992                                                                  | 55,5                | 44,3                | 80,1                | 52,4                | 129,6               | 97,1       |
| 1993                                                                  | 71,5                | 33,1                | 43,3                | 49,7                | 159,9               | 18,5       |
| 1994                                                                  | 37,8                | 50,1                | 28,9                | 103,2               | 76,5                | 13,5       |
| 1995                                                                  | 65,6                | 105                 | 32,2                | 59,5                | 162,6               | 112,5      |
| 1996                                                                  | 75,4                | 59,4                | 41,6                | 80,3                | 74,6                | 75,2       |
| 1997                                                                  | 36                  | 27,8                | 18,4                | 63,5                | 47,5                | 18,7       |
| 1998                                                                  | 79,1                | 43,9                | 74,8                | 120,5               | 82,3                | 94,8       |
| 1999                                                                  | 24                  | 42,7                | 130,3               | 162,2               | 89,6                | 47,7       |
| 2000                                                                  | 73,3                | 48,6                | 144,8               | 98,3                | 90,4                | 32,5       |
| 2001                                                                  | 21,6                | 38,3                | 106                 | 35,8                | 61,7                | 45,3       |
| 2002                                                                  | 30,8                | 41,8                | 49,5                | 61,1                | 25,4                | 55,1       |
| 2003                                                                  | 51                  | 14                  | 118,9               | 85                  | 173,5               | 46,3       |
| 2004                                                                  | 40,1                | 37,6                | 81,5                | 172,2               | 78,2                | 2          |
| 2005                                                                  | <b><u>74,68</u></b> | 41,7                | 91,1                | 85,7                | 65,9                | 37         |
| 2006                                                                  | <b><u>60,46</u></b> | <b><u>42,16</u></b> | <b><u>46,93</u></b> | <b><u>81,84</u></b> | <b><u>84,16</u></b> | 4,5        |
| 2007                                                                  | 12,5                | 43,8                | 12,9                | 287,9               | 137,3               | 109        |
| 2008                                                                  | 77,5                | 84,3                | 55,4                | 95,6                | 203                 | 55,3       |
| 2009                                                                  | 38,5                | 18,9                | 18,1                | 206,8               | 60,1                | 28,3       |
| 2010                                                                  | 155,5               | 51,3                | 83,4                | 118,4               | 179,2               | 121,2      |
| 2011                                                                  | 55,4                | 66,7                | 56,5                | 201                 | 252,1               | 85,6       |
| 2012                                                                  | 75,8                | 43,2                | 24,1                | 116,7               | 59,6                | 69,4       |
| 2013                                                                  | 26,5                | 69,1                | 35                  | 51,1                | 116,1               | 53,8       |

*Nota.* Valores de las precipitaciones anuales de la estación Apto – Guaymaral complementada, elaboración propia, valores en milímetros

Con los dos registros de precipitaciones complementados por los métodos de inteligencia artificial, se verificaron las tendencias y el nivel de comportamiento de las precipitaciones con los valores faltantes.

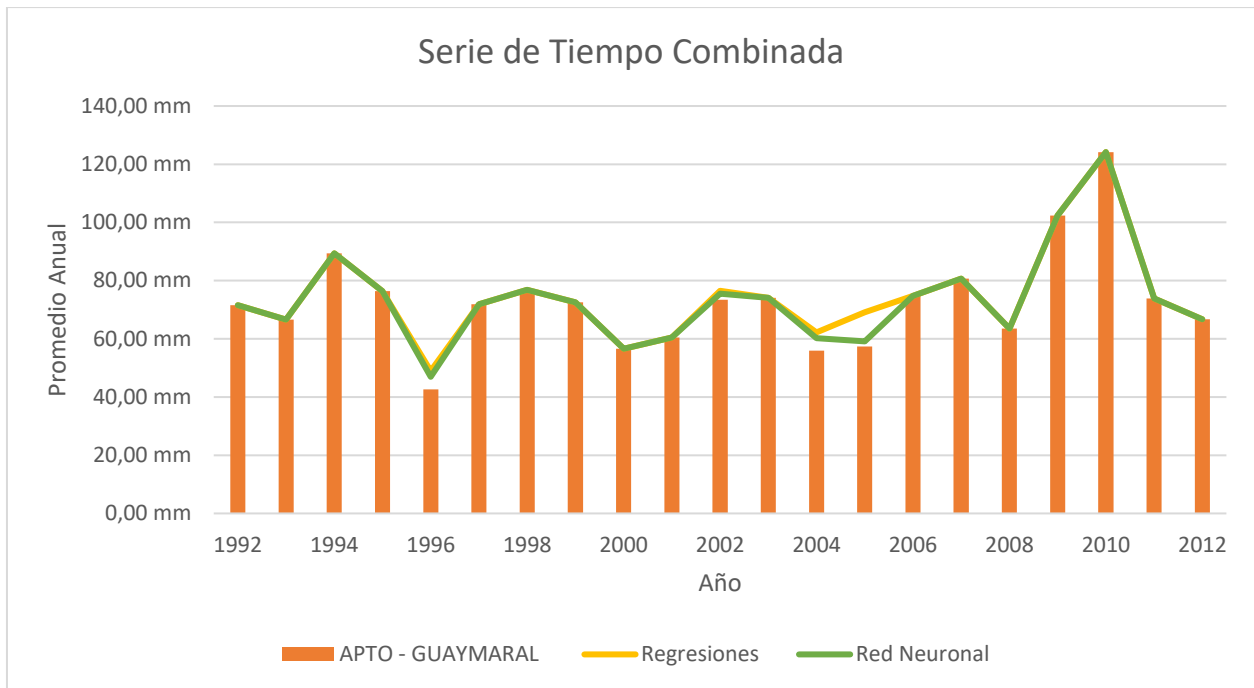
Para realizar la gráfica de Serie de Tiempo Combinada, se calcularon los promedios anuales de las estaciones complementadas, por el método de la razón normal, por Regresiones y por la Red Neuronal. Este proceso se lleva a cabo sumando los valores de precipitación de cada mes en el mismo año y luego dividiéndolo en 12 que son la cantidad de meses, solo se evidencia diferencias en los años donde la información faltaba.

Tabla 11  
*Serie de Tiempo Combinada*

| <b>Serie de Tiempo Combinada</b> |                         |                    |                     |
|----------------------------------|-------------------------|--------------------|---------------------|
| <b>Año</b>                       | <b>Apto - Guaymaral</b> | <b>Regresiones</b> | <b>Red Neuronal</b> |
| 1992                             | 60,62 mm                | 60,62 mm           | 60,62 mm            |
| 1993                             | 71,53 mm                | 71,53 mm           | 71,53 mm            |
| 1994                             | 66,59 mm                | 66,59 mm           | 66,59 mm            |
| 1995                             | 89,38 mm                | 89,38 mm           | 89,38 mm            |
| 1996                             | 76,37 mm                | 76,37 mm           | 76,37 mm            |
| 1997                             | 42,68 mm                | 48,95 mm           | 46,96 mm            |
| 1998                             | 71,91 mm                | 71,91 mm           | 71,91 mm            |
| 1999                             | 76,79 mm                | 76,79 mm           | 76,79 mm            |
| 2000                             | 72,53 mm                | 72,53 mm           | 72,53 mm            |
| 2001                             | 56,61 mm                | 56,61 mm           | 56,61 mm            |
| 2002                             | 60,49 mm                | 60,49 mm           | 60,49 mm            |
| 2003                             | 73,38 mm                | 76,51 mm           | 75,51 mm            |
| 2004                             | 74,14 mm                | 74,14 mm           | 74,14 mm            |
| 2005                             | 55,92 mm                | 62,20 mm           | 60,20 mm            |
| 2006                             | 57,34 mm                | 69,11 mm           | 59,13 mm            |
| 2007                             | 74,74 mm                | 74,74 mm           | 74,74 mm            |
| 2008                             | 80,65 mm                | 80,65 mm           | 80,65 mm            |
| 2009                             | 63,57 mm                | 63,57 mm           | 63,57 mm            |
| 2010                             | 102,31 mm               | 102,31 mm          | 102,31 mm           |
| 2011                             | 124,17 mm               | 124,17 mm          | 124,17 mm           |
| 2012                             | 73,82 mm                | 73,82 mm           | 73,82 mm            |
| 2013                             | 66,73 mm                | 66,73 mm           | 66,73 mm            |

*Nota. Promedios de precipitación anuales de la estación APTO – GUAYMARAL con complementación de regresión y red neuronal, elaboración propia*

Figura 10  
*Serie de Tiempo Combinada*



Nota. Obtención de serie de tiempo combinada de las estaciones, elaboración propia.

Los resultados de promedios pueden presentar algún tipo de error o variación, sin embargo, la calibración de los modelos muestra un comportamiento uniforme en el año 1996, lo cual detalla cual puede ser la tendencia y así tener confianza sobre los modelos a lo largo del paso de los años, representados en la gráfica de barras, la cual describe los promedios anuales de la estación Apto – Guaymaral. En la Serie de Tiempo Combinada, en el año 1997 el promedio anual en los dos modelos representa el comportamiento de la metodología de la razón normal como se evidencia en la gráfica, al no superar en más de 6 unidades su valor. Para el valor de calibración en el año 2005 no coincide con respecto al promedio anual de precipitaciones de ese mismo año, esto puede resultar por valores superiores correspondientes a este año para el caso de las regresiones y un comportamiento más similar para la Red neuronal.

El hietograma se hizo con el fin de comparar los modelos en la medición de la intensidad de la precipitación a través de los años. Se sumaron los valores de cada mes por año para obtener la precipitación anual.

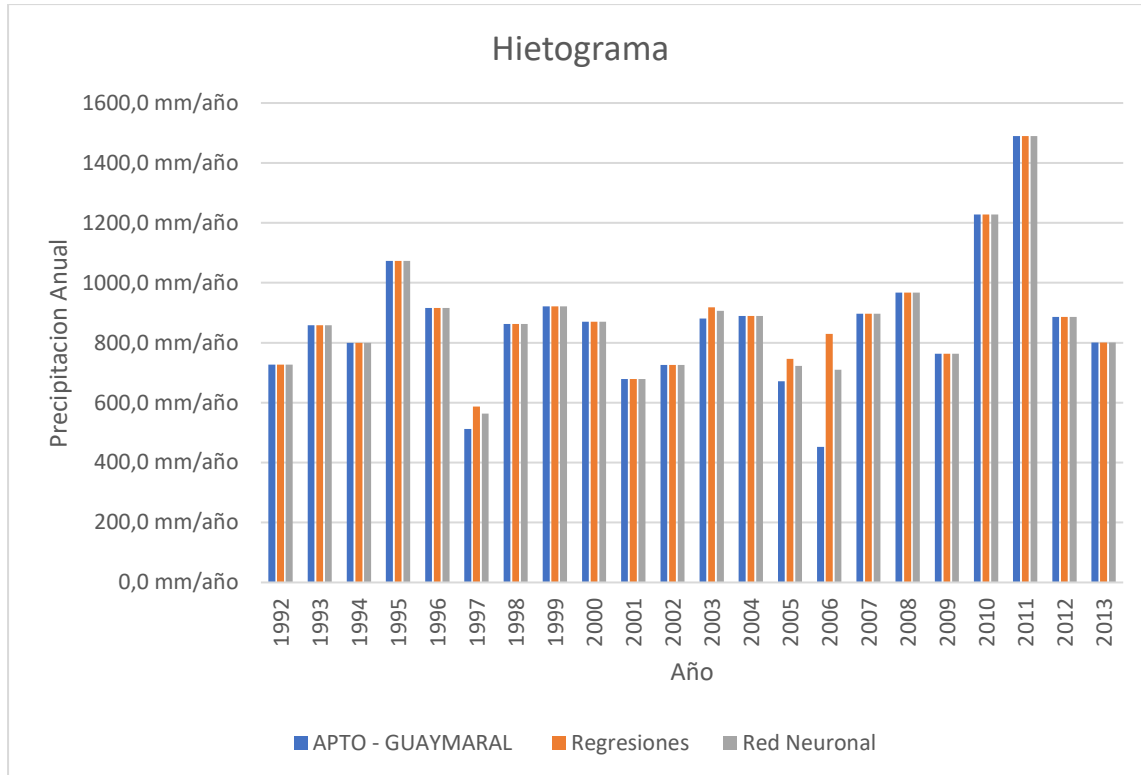
Tabla 12

*Hietograma de Apto-Guaymaral VS Regresiones VS Red Neuronal*

| <b>Hietograma</b> |                             |                    |                     |
|-------------------|-----------------------------|--------------------|---------------------|
| <b>Año</b>        | <b>Apto -<br/>Guaymaral</b> | <b>Regresiones</b> | <b>Red Neuronal</b> |
| 1992              | 727,4 mm/año                | 727,4 mm/año       | 727,4 mm/año        |
| 1993              | 858,4 mm/año                | 858,4 mm/año       | 858,4 mm/año        |
| 1994              | 799,1 mm/año                | 799,1 mm/año       | 799,1 mm/año        |
| 1995              | 1072,6 mm/año               | 1072,6 mm/año      | 1072,6 mm/año       |
| 1996              | 916,4 mm/año                | 916,4 mm/año       | 916,4 mm/año        |
| 1997              | 512,2 mm/año                | 587,4 mm/año       | 563,5 mm/año        |
| 1998              | 862,9 mm/año                | 862,9 mm/año       | 862,9 mm/año        |
| 1999              | 921,5 mm/año                | 921,5 mm/año       | 921,5 mm/año        |
| 2000              | 870,3 mm/año                | 870,3 mm/año       | 870,3 mm/año        |
| 2001              | 679,3 mm/año                | 679,3 mm/año       | 679,3 mm/año        |
| 2002              | 725,9 mm/año                | 725,9 mm/año       | 725,9 mm/año        |
| 2003              | 880,5 mm/año                | 918,2 mm/año       | 906,2 mm/año        |
| 2004              | 889,7 mm/año                | 889,7 mm/año       | 889,7 mm/año        |
| 2005              | 671,1 mm/año                | 746,4 mm/año       | 722,4 mm/año        |
| 2006              | 452,9 mm/año                | 829,3 mm/año       | 709,5 mm/año        |
| 2007              | 896,9 mm/año                | 896,9 mm/año       | 896,9 mm/año        |
| 2008              | 967,8 mm/año                | 967,8 mm/año       | 967,8 mm/año        |
| 2009              | 762,8 mm/año                | 762,8 mm/año       | 762,8 mm/año        |
| 2010              | 1227,7 mm/año               | 1227,7 mm/año      | 1227,7 mm/año       |
| 2011              | 1490,0 mm/año               | 1490,0 mm/año      | 1490,0 mm/año       |
| 2012              | 885,8 mm/año                | 885,8 mm/año       | 885,8 mm/año        |
| 2013              | 800,8 mm/año                | 800,8 mm/año       | 800,8 mm/año        |

*Nota.* Totales de precipitación anuales de la estación Apto – Guaymaral y calibración de red neuronal y Regresiones, elaboración propia.

Figura 11  
Hietograma



Nota. Obtención de hietograma de la estación Apto – Guaymaral, hietograma de la calibración red neuronal y Red Neuronal, elaboración propia.

El comportamiento del hietograma de calibración de los modelos se asemeja al del hietograma real, evidenciando que a través de los años el valor de calibración es acertado y el modelo de predicción sirve para retratar la simulación del comportamiento de una zona de cambio climatológico. Sin embargo, el año 2006 es el que más discrepancias arroja, ya que este año tenía ausencia de información en 10 de sus 12 meses.

**Conclusiones**

- Se implementaron los dos modelos de inteligencia artificial, por medio de regresiones y redes neuronales artificiales, realizando la simulación hidrológica de precipitaciones anuales para un escenario de cambio climático con base en las series de precipitaciones de las estaciones pluviométricas de la zona de estudio obteniendo resultados coherentes conforme al comportamiento de las lluvias en la zona norte de la ciudad de Bogotá, Colombia.
- Se desarrollaron los modelos de inteligencia artificial mediante la inmersión de los datos por separado a cada uno de los modelos, estableciendo los nuevos valores de precipitación resultantes para la calibración del modelo con coincidencias entre la información obtenida del modelo y la información registrada en las series anuales de las estaciones.
- En comparación con las metodologías empleadas comúnmente y los modelos de inteligencia artificial, estos últimos, generan para los valores faltantes resultados importantes ya que permiten conocer un valor de precipitación muy aproximado completando así las series de precipitaciones para una zona de estudio y con base en esto poder desarrollar los respectivos estudios hidrológicos a partir de esta información.
- Para el modelo de regresiones los resultados del error evidencian que aún es un prototipo y se requiere implementar o combinar otras metodologías para así generar más precisión en los pronósticos de calibración.
- Los métodos se pueden sugerir para futuras aplicaciones debido a que tienen aproximaciones en las predicciones y el error con entrenamiento se puede corregir.

**Referencias**

- Aparicio Mijares, F. Javier. (1993). *Fundamentos de Hidrología de superficie* (Editorial Limusa S.A., Ed.; Vol. 2). Limsa.
- Dölling, O. (2005). *Método y Aplicaciones de Redes Neuronales Artificiales en la Predicción de Variables Hidrológicas no Lineales*.
- Dölling, R., & Varas, E. (2006). *Tormentas de diseño usando redes neuronales artificiales: Vol. XXI* (Issue 4).
- Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. (2019). *Sistema de información hidrológica*.  
<http://172.19.3.243:90/SIHWeb/Reporte?elemento=20202&parametro=520&fechaini=1/1...>
- Forero, J., & Rodríguez, M. (2016). *Evaluación de métodos convencionales para estimación de datos faltantes de precipitación de las estaciones hidrometeorológicas de influencia en la microcuenca El Cune en Villeta Cundinamarca*. [https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_civil](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_civil)
- IDEAM - Instituto de Hidrología, M. y E. A. (2007). *Indicadores Ambientales Nacionales del IDEAM*.
- Jiménez Carrión, M., Gutiérrez Segura, F., & Celi Pinzón, J. (2018). Modelado y Predicción del Fenómeno El Niño en Piura, Perú mediante Redes Neuronales Artificiales usando Matlab. In *Información Tecnológica* (Vol. 29, Issue 4). Publicado Ago.
- Linsley, R. K., Kohler, M. A., & Paulus, J. (1977). *Hidrología para ingenieros* (Segunda). McGraw-Hill Latinoamericana, S.A.
- López, V. (2013). *Propuesta Metodológica Para el rediseño de una red Meteorológica en un sector de la región andina colombiana*.

Martínez, A., & Salas, J. D. (2004). *Modelación estocástica de lluvias horarias* (vol.11).

MathWorks. (2020). *MathLab*. Que Es Una Red Neuronal.

Matich, D. (2001). Informática Aplicada a la Ingeniería de Procesos-Orientación I. En *Redes Neuronales: Conceptos Básicos y Aplicaciones*.

Pury, P. (1990). *Redes Neuronales Artificiales*.

Regueiro, C., Barro, S., Sánchez, E., & Fernández, M. (1995). Modelos Básicos De Redes Neuronales Artificiales. En *Computación neuronal*.

Rosales, M., Mora, C., & Guada, C. (2018). *Redes neuronales en la predicción de microclima Zona de estudio La Hechicera, Mérida-Venezuela*.

Ruiz, J. F., & Escobar, O. F. (2012). *Alteraciones De La Precipitación Y La Temperatura Ante Variabilidad Y Cambio Climático Para La Ciudad De Bogotá*.  
<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/>;

Sarraute, C. (2007). *Aplicación de las Redes Neuronales al Reconocimiento de Sistemas Operativos*.

Smith, R. A., & Campuzano, C. (2010). *Análisis Exploratorio Para La Detección De Cambios Y Tendencias En Series Hidrológicas*.

Toro, J. P., Dölling, O. R., & Varas, E. (2005). *Evaporación Con El Método De Penman Usando Redes Neuronales Artificiales*.

# **MODELACIÓN DE LLUVIAS ANUALES UTILIZANDO INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN EL NORTE DE BOGOTÁ**

62

## **Anexos**

### **Anexo A. Estación Apto - Guaymaral, volumen de precipitaciones mensuales en milímetros desde 1980 a 2018.**

| AÑO  | ENERO | FEBRE | MARZO | ABRIL | MAYO  | JUNIO | JULIO | AGOST | SEPTI | OCTUB | NOVIE | DICIE |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1980 | 3,8   | 84,6  | 4,6   | 53,4  | 29,9  | 67,3  | 0     | 31,5  | 20    | 44,4  | 28,9  | 64,6  |
| 1981 | 9,7   | 19,1  | 17,5  | 154,7 | 214,6 | 72,9  | 20,3  | 27,3  | 43,3  | 33,1  | 88,8  | 20,2  |
| 1982 | 49,1  | 25,9  | 62,9  | 196,9 | 78,4  | 16,7  | 26,3  | 25    | 25,4  | 108   | 43,6  | 39,4  |
| 1983 | 13,1  | 32,7  | 106   | 195,4 | 72,7  | 31,5  | 37,5  | 25,9  | 25,1  | 73,5  | 17,9  | 54,2  |
| 1984 | 55,5  | 62,5  | 42,8  | 43,1  | 98,6  | 87,9  | 28,1  | 65,7  | 56,5  | 100   | 76    | 15,3  |
| 1985 | 11,4  | 0     | 36,3  | 25,5  | 88,2  | 16,5  | 53,5  | 52,8  | 104,8 | 75,1  | 43,6  | 31,8  |
| 1986 | 35,7  | 136,7 | 80,2  | 59,8  | 92,3  | 77,1  | 32,9  | 29    | 63    | 258,4 | 75,9  | 12,4  |
| 1987 | 19,4  | 35,3  | 53,5  | 54,2  | 85,5  | 25,4  | 67,7  | 41,4  | 74,1  | 121,4 | 56,1  | 16,9  |
| 1988 | 34,6  | 57,7  | 34,6  | 75,5  | 44,2  | 84,5  | 54,6  | 44,9  | 96,9  | 154,2 | 180,6 | 96,6  |
| 1989 | 3     | 60,2  | 70,1  | 40,6  | 97,8  | 47    | 26    | 35,8  | 77,7  | 55,8  | 59,9  | 50,7  |
| 1990 | 52    | 50,1  | 83,2  | 27,1  | 112,5 | 43,5  | 61,9  | 34,7  | 74,7  | 250,1 | 33,9  | 41,1  |
| 1991 | 26,2  | 24,8  | 40,2  | 55,5  | 63,9  | 31    | 80    | 60,7  | 39,8  | 41,5  | 132,9 | 38,9  |
| 1992 | 22,9  | 37,5  | 58,5  | 66,1  | 52,4  | 31    | 55,5  | 44,3  | 80,1  | 52,4  | 129,6 | 97,1  |
| 1993 | 42,5  | 50,9  | 90,4  | 137,2 | 124,5 | 36,9  | 71,5  | 33,1  | 43,3  | 49,7  | 159,9 | 18,5  |
| 1994 | 28    | 116   | 79    | 93,2  | 111,1 | 61,8  | 37,8  | 50,1  | 28,9  | 103,2 | 76,5  | 13,5  |
| 1995 | 48    | 74,5  | 121,4 | 136,4 | 41,3  | 113,6 | 65,6  | 105   | 32,2  | 59,5  | 162,6 | 112,5 |
| 1996 | 53,3  | 102,4 | 133   | 70,7  | 108   | 42,5  | 75,4  | 59,4  | 41,6  | 80,3  | 74,6  | 75,2  |
| 1997 | 50,5  | 0     | 0     | 65    | 44,2  | 82,7  | 36    | 27,8  | 18,4  | 63,5  | 47,5  | 18,7  |
| 1998 | 31,8  | 22,9  | 90,3  | 37    | 125,9 | 59,6  | 79,1  | 43,9  | 74,8  | 120,5 | 82,3  | 94,8  |
| 1999 | 19,6  | 62,7  | 76,4  | 105,3 | 35,6  | 125,4 | 24    | 42,7  | 130,3 | 162,2 | 89,6  | 47,7  |
| 2000 | 18,7  | 89,4  | 111,1 | 50,1  | 60,5  | 52,6  | 73,3  | 48,6  | 144,8 | 98,3  | 90,4  | 32,5  |
| 2001 | 40,4  | 38,4  | 68,7  | 10,2  | 131   | 81,9  | 21,6  | 38,3  | 106   | 35,8  | 61,7  | 45,3  |
| 2002 | 22    | 27,4  | 84,4  | 132,5 | 119,9 | 76    | 30,8  | 41,8  | 49,5  | 61,1  | 25,4  | 55,1  |
| 2003 | 4,1   | 61,5  | 57,4  | 146,1 | 40,6  | 0     | 51    | 14    | 118,9 | 85    | 173,5 | 46,3  |
| 2004 | 16    | 91,5  | 51,2  | 159,9 | 115,2 | 44,3  | 40,1  | 37,6  | 81,5  | 172,2 | 78,2  | 2     |
| 2005 | 27,7  | 81,6  | 56,9  | 88,3  | 3,4   | 0     | 0     | 41,7  | 91,1  | 85,7  | 65,9  | 37    |
| 2006 | 28    | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 4,5   |
| 2007 | 13,3  | 39,7  | 118,4 | 32,2  | 51,5  | 38,4  | 12,5  | 43,8  | 12,9  | 287,9 | 137,3 | 109   |
| 2008 | 23    | 58,6  | 72,3  | 78,5  | 71,3  | 93    | 77,5  | 84,3  | 55,4  | 95,6  | 203   | 55,3  |
| 2009 | 39,6  | 115,5 | 71,3  | 55,1  | 37    | 73,6  | 38,5  | 18,9  | 18,1  | 206,8 | 60,1  | 28,3  |
| 2010 | 34,8  | 19,7  | 16,1  | 201,8 | 150,5 | 95,8  | 155,5 | 51,3  | 83,4  | 118,4 | 179,2 | 121,2 |
| 2011 | 121,3 | 108,4 | 152,3 | 193,8 | 131,1 | 65,8  | 55,4  | 66,7  | 56,5  | 201   | 252,1 | 85,6  |
| 2012 | 89    | 66    | 79,6  | 189,1 | 34,5  | 38,8  | 75,8  | 43,2  | 24,1  | 116,7 | 59,6  | 69,4  |
| 2013 | 23,4  | 118,8 | 52,1  | 96,7  | 139,6 | 18,6  | 26,5  | 69,1  | 35    | 51,1  | 116,1 | 53,8  |

# **MODELACIÓN DE LLUVIAS ANUALES UTILIZANDO INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN EL NORTE DE BOGOTÁ**

63

|      |      |      |       |       |       |      |      |      |      |       |       |      |
|------|------|------|-------|-------|-------|------|------|------|------|-------|-------|------|
| 2014 | 74,9 | 89,2 | 74,8  | 29,6  | 49,3  | 44,6 | 39,5 | 24,5 | 44,9 | 103,2 | 104,8 | 99,1 |
| 2015 | 53,7 | 32   | 70,7  | 53,8  | 17,3  | 49,7 | 52,8 | 30,8 | 36,7 | 14,6  | 153,7 | 2    |
| 2016 | 21,8 | 19,1 | 117,3 | 100,6 | 144,6 | 45,5 | 38,2 | 68   | 70,5 | 79,5  | 134,7 | 30,9 |
| 2017 | 44,5 | 45,4 | 174,5 | 99,5  | 123,8 | 89,8 | 23,8 | 67,3 | 50,5 | 77,1  | 157,8 | 101  |
| 2018 | 52,9 | 45,8 | 57,9  | 141,1 | 170   | 61,7 | 34,6 | 45,8 | 52   | 41,8  | 77    | 9,4  |

*Nota.* Datos proporcionados por la CAR, Volumen de precipitación Estación APTO – GUAYMARAL, Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. (2016). Precipitaciones Totales Mensuales.

## **Anexo B. Estación Torca, volumen de precipitaciones mensuales en milímetros desde 1980 a 2018**

| AÑO  | ENERO | FEBRE | MARZO | ABRIL | MAYO  | JUNIO | JULIO | AGOST | SEPTI | OCTUB | NOVIE | DICIE |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1980 | 59    | 256   | 69    | 157,5 | 82    | 223   | 16    | 160,5 | 110,5 | 113,5 | 110,5 | 196,5 |
| 1981 | 21    | 79,5  | 57    | 243   | 377,5 | 118,5 | 67    | 136   | 140   | 179,5 | 275   | 127   |
| 1982 | 99    | 59    | 129   | 227,1 | 29    | 35    | 48    | 29    | 37    | 69    | 58    | 45    |
| 1983 | 40    | 68    | 125   | 158   | 66    | 70    | 92    | 83    | 37    | 90    | 39    | 102   |
| 1984 | 83    | 84    | 38    | 46    | 94    | 69    | 64    | 79    | 77    | 87    | 98    | 44    |
| 1985 | 43    | 9     | 27    | 50    | 104   | 54    | 84    | 50    | 134   | 113   | 56    | 83    |
| 1986 | 24    | 157   | 168   | 106   | 184   | 132   | 74    | 82    | 59    | 87    | 198   | 84,4  |
| 1987 | 35,8  | 59,2  | 83,7  | 263,5 | 34,4  | 96,3  | 100,7 | 72    | 117,1 | 212   | 187,6 | 76,1  |
| 1988 | 28,4  | 41,9  | 176,1 | 22    | 71    | 38,1  | 77,8  | 24    | 76,9  | 73,7  | 147,1 | 65,5  |
| 1989 | 102,4 | 53,5  | 52    | 128   | 141   | 60,6  | 78,9  | 37,8  | 44,1  | 131,2 | 133   | 88,6  |
| 1990 | 93,4  | 26,5  | 105,3 | 54,5  | 70,6  | 29,7  | 106,5 | 40,4  | 49,6  | 51,8  | 151,7 | 165   |
| 1991 | 31,2  | 36    | 48,5  | 83,4  | 50,7  | 28,6  | 43,6  | 33,5  | 101,7 | 32,6  | 131,2 | 173,7 |
| 1992 | 110,6 | 38,3  | 55,8  | 104,6 | 145,2 | 48,3  | 74,5  | 30    | 49,7  | 53    | 112,7 | 3     |
| 1993 | 113,7 | 100,9 | 70,4  | 52,6  | 89    | 63,9  | 47    | 32,7  | 16,4  | 81,6  | 93,6  | 15,6  |
| 1994 | 26,3  | 81,9  | 153,2 | 150,5 | 40,7  | 41,2  | 52,7  | 84,4  | 7,8   | 34,3  | 35    | 66,6  |
| 1995 | 39,7  | 92,9  | 179,3 | 119,1 | 85,5  | 37,8  | 52    | 40,4  | 36,1  | 112   | 53,2  | 49    |
| 1996 | 215,6 | 58    | 49,5  | 50,4  | 61,8  | 67,1  | 44,4  | 27,5  | 38,6  | 74,2  | 50    | 21    |
| 1997 | 23,8  | 20,4  | 95,4  | 55,7  | 125,3 | 59,8  | 306   | 44    | 315,1 | 116,7 | 122,1 | 84,7  |
| 1998 | 70,7  | 76,7  | 136,9 | 116   | 89,9  | 130   | 18,1  | 40,2  | 128,2 | 128,6 | 85,3  | 29,7  |
| 1999 | 46,4  | 121,6 | 89,3  | 76,5  | 65,2  | 51,1  | 61,3  | 52,5  | 102,4 | 128,9 | 37,9  | 22,3  |
| 2000 | 20,4  | 53,9  | 30,7  | 45,1  | 58,2  | 44,1  | 26,4  | 57    | 75,9  | 47    | 80,6  | 34    |
| 2001 | 41    | 20    | 54,1  | 127,5 | 127,7 | 132,7 | 56,6  | 41,5  | 0     | 0     | 0     | 43,9  |
| 2002 | 43,9  | 86,7  | 69,7  | 208   | 50,6  | 91,4  | 27,5  | 46,5  | 118,5 | 330   | 195,1 | 40,7  |
| 2003 | 26,8  | 75,1  | 50,8  | 157,9 | 78,1  | 78,8  | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 2004 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 2005 | 162   | 124,6 | 128,1 | 139,9 | 131,9 | 44,2  | 9,7   | 24,7  | 34,2  | 154,5 |       | 82,7  |
| 2006 | 25    | 22,2  | 15,6  | 38,2  | 51,6  | 21,6  | 34,5  | 94,5  | 70,5  | 222,6 | 151,5 | 191,4 |
| 2007 | 52,7  | 66    | 112,5 | 108,4 | 219,7 | 110   | 114,4 | 97,4  | 66    | 123   | 0     | 0     |
| 2008 | 59,5  | 87,1  | 110,5 | 90,1  | 71,7  | 82,7  | 46,7  | 17,4  | 8     | 281,8 | 68,2  | 30    |
| 2009 | 1,2   | 30,6  | 26,6  | 234,9 | 210,2 | 125,1 | 161,6 | 66,2  | 124,9 | 168,4 | 192,4 | 96,7  |

# **MODELACIÓN DE LLUVIAS ANUALES UTILIZANDO INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN EL NORTE DE BOGOTÁ**

64

|      |       |       |       |       |       |      |       |      |       |       |       |       |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| 2010 | 118,5 | 161,5 | 185,4 | 184   | 175   | 59,8 | 33,9  | 40,8 | 134,3 | 193,9 | 473,5 | 143,5 |
| 2011 | 204,8 | 68,8  | 133,1 | 242,1 | 82,8  | 85,8 | 116,9 | 68,5 | 43,6  | 171,6 | 110   | 101,7 |
| 2012 | 13,2  | 165   | 78,2  | 147,7 | 133,8 | 20,3 | 46,4  | 53,2 | 20,2  | 107,8 | 205,9 | 75,5  |
| 2013 | 101,2 | 62,2  | 115,1 | 39,6  | 53,9  | 48,2 | 31,6  | 31,7 | 83,3  | 76,5  | 135,5 | 102,9 |
| 2014 | 66,3  | 76,5  | 50,7  | 37,7  | 61    | 97,4 | 68,3  | 52   | 32,9  | 21,3  | 31,8  | 4,9   |
| 2015 | 33,3  | 31,8  | 165,2 | 90,9  | 168,4 | 30,1 | 71,6  | 75,5 | 73,6  | 91,8  | 154,2 | 64,8  |
| 2016 | 47,2  | 33,4  | 205   | 75,6  | 58,6  | 38,7 | 12,1  | 61,8 | 30,7  | 56,9  | 187   | 51,6  |
| 2017 | 88,2  | 83    | 137,4 | 87,8  | 144   | 88,6 | 93,9  | 74   | 43    | 35,4  | 139   | 5,7   |
| 2018 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0    | 0     | 0    | 0     | 0     | 0     | 0     |

*Nota.* Datos proporcionados por la CAR, Volumen de precipitación Estación TORCA, Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. (2016). Precipitaciones Totales Mensuales, valores en milímetros.

## **Anexo C. Estación Santa Inés, volumen de precipitaciones mensuales en milímetros desde 1980 a 2018.**

| AÑO  | ENERO | FEBRE | MARZO | ABRIL | MAYO  | JUNIO | JULIO | AGOST | SEPTI | OCTUB | NOVIE | DICIE |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1980 | 0     | 0     | 7,5   | 35,5  | 83    | 77    | 6,5   | 52    | 80    | 72    | 41,5  | 123,5 |
| 1981 | 8     | 59    | 35    | 132   | 226   | 87,5  | 26    | 44    | 30    | 150   | 106   | 42    |
| 1982 | 36    | 117   | 98    | 185   | 114   | 31    | 4     | 13    | 37    | 48    | 29    | 25    |
| 1983 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 1984 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 1985 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 1986 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 1987 | 22    | 15    | 20,5  | 98    | 103   | 3     | 72    | 38    | 31    | 105   | 21    | 3     |
| 1988 | 26    | 19    | 21    | 119   | 103   | 64    | 100   | 39    | 121   | 133   | 135   | 110   |
| 1989 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 1990 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 1991 | 17,5  | 13,5  | 150,8 | 77,7  | 62,3  | 12    | 60,5  | 43    | 56,2  | 51,9  | 157,7 | 14    |
| 1992 | 27,6  | 26,1  | 14,5  | 37,2  | 34    | 4     | 17,2  | 40,4  | 51,2  | 27    | 64,5  | 57,1  |
| 1993 | 13    | 39    | 61,5  | 136,7 | 137,2 | 36    | 52,6  | 27,5  | 115,6 | 62,1  | 165   | 52,5  |
| 1994 | 44    | 85,5  | 117,5 | 71    | 103,3 | 29,2  | 32,5  | 38,5  | 46,8  | 207,2 | 133,5 | 0     |
| 1995 | 0     | 28    | 97,3  | 76,9  | 81,5  | 38,4  | 41,5  | 110,9 | 33    | 27    | 55,6  | 84,5  |
| 1996 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 77,7  | 64,1  | 23    | 65    | 155   | 57,5  | 43    |
| 1997 | 60,7  | 21,8  | 42    | 41    | 43,2  | 26    | 30    | 20,2  | 23    | 46    | 117   | 0     |
| 1998 | 43,5  | 40    | 19    | 52,9  | 155,1 | 38    | 66,8  | 29,5  | 81,5  | 167,7 | 78    | 96,8  |
| 1999 | 73    | 130   | 90,7  | 83,5  | 58    | 114,2 | 21    | 86,1  | 106,3 | 148,8 | 56    | 43    |
| 2000 | 17    | 98,2  | 70    | 38    | 21,5  | 52,5  | 65,5  | 39,5  | 167,5 | 56,1  | 37    | 16,3  |
| 2001 | 72,5  | 23,5  | 97,5  | 0     | 75,5  | 6     | 25    | 24,8  | 54    | 21    | 47,3  | 85,6  |
| 2002 | 4,5   | 10,8  | 67,8  | 144,2 | 87,5  | 69,6  | 73,8  | 13    | 49,2  | 84,7  | 25,2  | 76,4  |
| 2003 | 0     | 92,7  | 37    | 105,6 | 41,2  | 0     | 0     | 9,5   | 115,7 | 76,5  | 88    | 32,4  |
| 2004 | 34,8  | 45,3  | 71,2  | 208,5 | 136,7 | 52,1  | 15,6  | 40,9  | 77,2  | 181,6 | 0     | 37,5  |
| 2005 | 4     | 34,5  | 32,7  | 34    | 0     | 50,9  | 0     | 28,4  | 111,6 | 324,2 | 25,7  | 84,1  |

# **MODELACIÓN DE LLUVIAS ANUALES UTILIZANDO INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN EL NORTE DE BOGOTÁ**

65

|      |      |      |       |       |       |       |       |      |       |       |       |       |
|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| 2006 | 9,6  | 47,6 | 90,3  | 165,1 | 75    | 68,7  | 0     | 0    | 24,6  | 99    | 122,5 | 20    |
| 2007 | 18,4 | 15,8 | 59    | 132,3 | 71,4  | 52,1  | 12,3  | 79,7 | 3,2   | 148,8 | 87,4  | 74    |
| 2008 | 27,1 | 50   | 85,8  | 146,4 | 171,8 | 73    | 79,1  | 98,2 | 85,2  | 97,9  | 55    | 0     |
| 2009 | 0    | 54,3 | 123,9 | 46,6  | 14,1  | 100,1 | 20,9  | 40   | 32    | 100,4 | 70,1  | 28    |
| 2010 | 27,4 | 45,5 | 19,3  | 215,9 | 194,4 | 73,9  | 214,7 | 94,2 | 55,6  | 110,7 | 162,6 | 99,8  |
| 2011 | 42,8 | 36,5 | 116,8 | 153,9 | 130,3 | 63,2  | 46,7  | 15,8 | 129,6 | 107,4 | 180,7 | 87    |
| 2012 | 83,8 | 39,1 | 136,4 | 141,5 | 47    | 6,5   | 73,1  | 44,4 | 36,7  | 69,2  | 30,2  | 47,2  |
| 2013 | 0    | 72   | 44,3  | 98    | 62,5  | 44,5  | 24    | 89,6 | 15,6  | 52,4  | 116   | 126,8 |
| 2014 | 73,7 | 120  | 57,9  | 85,7  | 67    | 50,9  | 24,3  | 13,8 | 10,9  | 188,7 | 129,9 | 93,8  |
| 2015 | 31,2 | 13,4 | 22,6  | 67,7  | 2,2   | 25,2  | 45,8  | 18,5 | 26,5  | 23,6  | 99,7  | 0,3   |
| 2016 | 0,2  | 25,9 | 39,3  | 173   | 134,8 | 38,5  | 31,4  | 48,7 | 42,1  | 118,8 | 152,3 | 42,1  |
| 2017 | 30,8 | 41,1 | 183,9 | 84    | 117,6 | 79,4  | 39,5  | 75,5 | 22,6  | 77,3  | 151,3 | 109,3 |
| 2018 | 18,8 | 22   | 115,8 | 125,3 | 155,1 | 58,2  | 17,7  | 45,2 | 87,6  | 51,2  | 97,7  | 25,5  |

*Nota.* Datos proporcionados por la CAR, Volumen de precipitación Estación SANTA INÉS, Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. (2016). Precipitaciones Totales Mensuales, valores en milímetros.

## **Anexo D. Estación Santa Teresa, volumen de precipitaciones mensuales en milímetros desde 1980 a 2018.**

| AÑO  | ENERO | FEBRE | MARZO | ABRIL | MAYO  | JUNIO | JULIO | AGOST | SEPTI | OCTUB | NOVIE | DICIE |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1980 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 39,4  | 59,2  | 61,3  | 56,3  | 45,7  | 33,1  | 57,7  |
| 1981 | 16,5  | 35,5  | 127,5 | 60,2  | 0     | 26,3  | 52,4  | 30,1  | 0     | 0     | 66,3  | 31,3  |
| 1982 | 39    | 39,2  | 92,2  | 190,8 | 44,6  | 17,4  | 73,9  | 73,8  | 44    | 92,2  | 63,9  | 33,5  |
| 1983 | 7,2   | 57,5  | 71,7  | 133,1 | 41,6  | 46    | 111,8 | 78,1  | 54,5  | 81,1  | 27,9  | 15,1  |
| 1984 | 12,8  | 22,3  | 1     | 0,6   | 3,6   | 0,9   | 35,8  | 56,5  | 114,1 | 51,8  | 132,4 | 2,8   |
| 1985 | 29,4  | 5,9   | 24,3  | 30,4  | 23,1  | 52,3  | 7     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 1986 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 124,4 | 135,1 | 59,9  | 49,5  | 117,6 | 55,6  | 17,6  |
| 1987 | 30,9  | 35,6  | 27    | 68,7  | 105,7 | 73,5  | 133,9 | 93,8  | 79,7  | 126,8 | 53    | 41,3  |
| 1988 | 6     | 25,4  | 64,7  | 76,5  | 82    | 84,6  | 122,5 | 98,6  | 90,1  | 297,6 | 140,1 | 74,4  |
| 1989 | 20,6  | 44,4  | 151,9 | 26,3  | 126   | 99,2  | 70,5  | 69,2  | 152,8 | 123,3 | 134,5 | 69,9  |
| 1990 | 123   | 40    | 113,8 | 125,5 | 161,6 | 187,8 | 206,9 | 352,5 | 264,6 | 161,7 | 262,1 | 51,4  |
| 1991 | 29,6  | 25,6  | 25,8  | 53,7  | 66,6  | 61,1  | 133,2 | 83,2  | 49,9  | 54,3  | 153,7 | 43,1  |
| 1992 | 45,9  | 38,6  | 63,1  | 73,1  | 201,8 | 77,7  | 138,6 | 32,7  | 25,4  | 41,6  | 70,5  | 2,5   |
| 1993 | 46,3  | 93,9  | 0     | 68,5  | 130,8 | 104,5 | 139,9 | 144,6 | 62,2  | 153,4 | 76,4  | 31,9  |
| 1994 | 19,7  | 21,6  | 37,6  | 119,6 | 92,6  | 130,9 | 56,1  | 138,7 | 45,1  | 86,1  | 53,2  | 111,6 |
| 1995 | 61,5  | 89,8  | 122,6 | 74,1  | 162,1 | 95,5  | 139,7 | 76,8  | 52,9  | 83,9  | 97,8  | 61    |
| 1996 | 59,1  | 37,8  | 27,8  | 39    | 85,6  | 49,4  | 96,6  | 76    | 31,1  | 57,1  | 42    | 18,7  |
| 1997 | 0     | 49,5  | 29,2  | 39,8  | 177   | 115   | 74,9  | 7,8   | 44,8  | 65,2  | 46,8  | 107,2 |
| 1998 | 35,8  | 27,5  | 51,5  | 84,6  | 0,8   | 73,1  | 75,7  | 82,1  | 89,5  | 129,8 | 91,7  | 72,4  |
| 1999 | 107,8 | 84,1  | 62    | 38,3  | 124,1 | 88,4  | 96,6  | 94,5  | 111,2 | 71,6  | 86,8  | 83,4  |
| 2000 | 0     | 69,5  | 83,4  | 51    | 98,8  | 119,1 | 18,7  | 58,4  | 82,7  | 111,6 | 81,2  | 46,9  |
| 2001 | 25,7  | 13,8  | 61,4  | 111,8 | 151,6 | 164,1 | 67,5  | 79,8  | 56,8  | 26,2  | 57,2  | 33,2  |

# **MODELACIÓN DE LLUVIAS ANUALES UTILIZANDO INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN EL NORTE DE BOGOTÁ**

66

|      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |
|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| 2002 | 3,8  | 34,9  | 81,1  | 121   | 94,8  | 0     | 49,7  | 60,7  | 72,4  | 95    | 85    | 39   |
| 2003 | 30,2 | 67,3  | 92,1  | 92,7  | 144,3 | 203,3 | 151,5 | 116,2 | 72    | 137,3 | 0     | 0    |
| 2004 | 0    | 21,2  | 31    | 138,2 | 149,1 | 71,9  | 87,7  | 80    | 100,6 | 155,8 | 134,8 | 24,5 |
| 2005 | 58,1 | 42,3  | 130,3 | 83,4  | 125,2 | 170,2 | 100,9 | 12,5  | 72,3  | 144,6 | 124,1 | 63,3 |
| 2006 | 0    | 89,4  | 164,4 | 164   | 115,3 | 194,9 | 73,8  | 152   | 72,6  | 175,5 | 86,6  | 56,1 |
| 2007 | 36,3 | 17,8  | 86,8  | 59,3  | 121,2 | 125,6 | 163,9 | 125,1 | 79,3  | 100,1 | 126,6 | 66,6 |
| 2008 | 68,5 | 73,7  | 95,3  | 72    | 83,6  | 108,4 | 96,5  | 75,8  | 39,4  | 87,4  | 46,9  | 2,4  |
| 2009 | 4    | 20,1  | 34,6  | 170,6 | 141,7 | 104,5 | 161   | 75,3  | 75,2  | 105,2 | 161,6 | 62,4 |
| 2010 | 45,7 | 124,3 | 135,6 | 250,7 | 150,6 | 74,7  | 82,3  | 36,2  | 65    | 176,7 | 208,5 | 73,7 |
| 2011 | 59,4 | 51,7  | 99,1  | 227,8 | 67,1  | 81,3  | 130,3 | 69,7  | 56,1  | 92,8  | 57,8  | 45,1 |
| 2012 | 4,2  | 59,1  | 42,3  | 105,2 | 142,5 | 57,6  | 75,6  | 55,4  | 29,4  | 75    | 133,8 | 55,1 |
| 2013 | 14,4 | 22,3  | 82,3  | 48    | 60,1  | 132,7 | 103,1 | 68,8  | 40,9  | 65,6  | 77,3  | 25,3 |
| 2014 | 10,8 | 28,2  | 28,5  | 0     | 59,4  | 172,5 | 102,6 | 135,3 | 46,4  | 24,7  | 90,6  | 25,2 |
| 2015 | 48,7 | 9,4   | 97,9  | 136,1 | 118,8 | 98,5  | 105,8 | 117,2 | 98,4  | 91,2  | 146,4 | 61,5 |
| 2016 | 88,7 | 71,7  | 162,1 | 63,9  | 170,2 | 172,9 | 142   | 84,6  | 59,8  | 61    | 97,8  | 60,5 |
| 2017 | 38,9 | 32,5  | 111,4 | 173,2 | 173,9 | 153,4 | 139,4 | 110,4 | 53,2  | 86,2  | 130,8 | 3,2  |
| 2018 | 0    | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0    |

*Nota.* Datos proporcionados por la CAR, Volumen de precipitación Estación SANTA TERESA, Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. (2016). Precipitaciones Totales Mensuales, valores en milímetros.

## **Anexo E. Estación Serrezuela, volumen de precipitaciones mensuales en milímetros desde 1980 a 2018.**

| AÑO  | ENE   | FEB  | MAR   | ABR   | MAY   | JUN   | JUL  | AGO  | SEP   | OCT   | NOV   | DIC   |
|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| 1990 | 63,6  | 41,8 | 76,3  | 163,9 | 145,9 | 47,0  | 37,3 | 28,7 | 21,0  | 216,7 | 63,0  | 75,0  |
| 1991 | 46,9  | 45,8 | 97,7  | 41,1  | 50,3  | 32,6  | 0,6  | 57,8 | 40,0  | 66,4  | 214,9 | 129,9 |
| 1992 | 85,4  | 31,1 | 70,9  | 103,2 | 48,5  | 22,5  | 47,2 | 48,9 | 67,6  | 24,8  | 154,7 | 160,3 |
| 1993 | 127,9 | 86,3 | 62,5  | 65,5  | 78,1  | 43,7  | 46,4 | 40,7 | 48,7  | 70,9  | 104,3 | 27,0  |
| 1994 | 178,1 | 86,1 | 86,1  | 72,1  | 117,5 | 41,8  | 29,9 | 48,0 | 25,4  | 137,8 | 101,6 | 14,6  |
| 1995 | 19,0  | 62,3 | 166,8 | 168,9 | 58,0  | 109,3 | 53,8 | 92,6 | 16,4  | 54,4  | 65,9  | 160,7 |
| 1996 | 54,1  | 122  | 131,5 | 84,5  | 103   | 45,9  | 70,2 | 54,1 | 66,1  | 95,5  | 57,2  | 59,9  |
| 1997 | 242,9 | 41,3 | 53,6  | 73    | 74,1  | 47,5  | 72,9 | 25,4 | 36,9  | 86,3  | 90,2  | 19,4  |
| 1998 | 17,6  | 21,3 | 115,3 | 75,4  | 142   | 77,3  | 62,5 | 64,2 | 66,4  | 147   | 164   | 69,3  |
| 1999 | 119,4 | 83,9 | 77,3  | 151   | 85,3  | 100   | 32   | 87   | 91,9  | 33,6  | 178   | 61    |
| 2000 | 148,7 | 170  | 100,7 | 95,5  | 90,3  | 88,9  | 56,4 | 63,5 | 128   | 97,9  | 77,3  | 36    |
| 2001 | 50,6  | 50,1 | 87,8  | 58,7  | 117   | 55,6  | 51,6 | 27,1 | 64,5  | 59,8  | 64,6  | 66,7  |
| 2002 | 29,4  | 24,5 | 72,8  | 140   | 121   | 77,9  | 52,1 | 46,6 | 67,6d | 60    | 23    | 88,4  |
| 2003 | 11,8  | 36,1 | 100,8 | 137,2 | 82,1  | 68,6  | 49,7 | 37,5 | 82,7  | 187,3 | 74,4  | 109,5 |
| 2004 | 50,9  | 137  | 141,5 | 96,9  | 134   | 78,4  | 83,8 | 82,1 | 83,6  | 227,5 | 134   | 66,4  |
| 2005 | 55,6  | 80,2 | 49,2  | 160   | 225   | 47,7  | 69,5 | 45,3 | 97,9  | 226,9 | 139   | 80,1  |
| 2006 | 153,7 | 74,4 | 118,4 | 209   | 105   | 122   | 30,8 | 24,3 | 30,7  | 100,2 | 141   | 42,7  |
| 2007 | 6,6   | 32,6 | 103,8 | 129   | 59,2  | 71    | 39,5 | 63,8 | 21,2  | 134,2 | 127   | 171,9 |

## MODELACIÓN DE LLUVIAS ANUALES UTILIZANDO INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN EL NORTE DE BOGOTÁ

67

|      |       |       |       |       |       |       |       |      |      |       |       |       |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|-------|-------|
| 2008 | 48,5  | 76,2  | 104,7 | 55,2  | 191   | 99,5  | 132   | 142  | 92,6 | 97,4  | 228   | 44,5  |
| 2009 | 92,1  | 89,7  | 66,4  | 123   | 67    | 55,2  | 65,7  | 44,6 | 13,8 | 231,4 | 36,3  | 29,7  |
| 2010 | 3,5   | 7,9   | 29,4  | 230,5 | 140,5 | 84,7  | 168,4 | 9,3  | 77,2 | 155,9 | 257,6 | 126,0 |
| 2011 | 94,0  | 149,6 | 135,2 | 151,5 | 181,4 | 65,2  | 50,2  | 45,6 | 64,8 | 199,7 | 315,6 | 102,0 |
| 2012 | 117,4 | 69,0  | 131,8 | 205,7 | 40,8  | 49,8  | 86,1  | 52,9 | 23,8 | 175,6 | 93,6  | 81,8  |
| 2013 | 19,3  | 60,6  | 51,5  | 142,7 | 168,4 | 23,5  | 60,5  | 47,1 | 29,6 | 110,7 | 216,6 | 58,7  |
| 2014 | 63,2  | 51,2  | 100,3 | 55,4  | 66,9  | 91,5  | 64,6  | 36,2 | 83,7 | 159,6 | 98,5  | 128,8 |
| 2015 | 60,8  | 62,5  | 115,3 | 36,1  | 46,7  | 62,5  | 54,2  | 56,6 | 41,2 | 22,6  | 66,7  | 7,8   |
| 2016 | 50,1  | 44,2  | 170,3 | 150,6 | 175,8 | 41,5  | 58,5  | 70,3 | 71,5 | 118,9 | 217,5 | 67,7  |
| 2017 | 50,2  | 52,0  | 202,4 | 88,8  | 152,5 | 123,1 | 36,1  | 82,5 | 42,0 | 52,3  | 241   | 54,3  |
| 2018 | 162,5 | 73,3  | 162,4 | 137,4 | 144,2 | 115,9 | 70,7  | 40,6 | 25,5 | 40,9  | 66,8  | 1,2   |

*Nota.* Volumen de precipitación Estación SERREZUELA, Empresa de acueducto y alcantarillado de Bogotá. Precipitación total mensual de la estación Serrezuela, valores en milímetros.

### Anexo F. Estación La Caro Seminario, volumen de precipitaciones mensuales en milímetros desde 1980 a 2018.

| AÑO  | ENE  | FEB   | MAR   | ABR   | MAY   | JUN  | JUL   | AGO  | SEP   | OCT   | NOV   | DIC   |
|------|------|-------|-------|-------|-------|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| 1990 | 58,5 | 54,1  | 78,3  | 151,4 | 137,8 | 32,2 | 33,1  | 32,0 | 24,9  | 134,3 | 44,3  | 47,5  |
| 1991 | 35,1 | 49,8  | 41,5  | 30,1  | 60,4  | 39,5 | 46,7  | 83,5 | 37,3  | 43,5  | 190,6 | 46,9  |
| 1992 | 37,5 | 45,1  | 36,3  | 110,3 | 35,6  | 18,3 | 46,3  | 30,1 | 49,1  | 28,9  | 99,4  | 69,1  |
| 1993 | 53,3 | 50,4  | 46,1  | 86,3  | 118,2 | 53,8 | 97,1  | 28,9 | 41,3  | 46,1  | 108,9 | 2,2   |
| 1994 | 52,8 | 53,2  | 50,9  | 102,7 | 92,9  | 45,7 | 47,9  | 63,5 | 58,0  | 102,1 | 144,8 | 7,9   |
| 1995 | 2,5  | 20,1  | 59,7  | 136,4 | 51,4  | 66,1 | 67,8  | 93,3 | 29,7  | 75,2  | 37,5  | 77,5  |
| 1996 | 37,6 | 99,4  | 124,2 | 36,9  | 71,4  | 38,0 | 120,4 | 43,1 | 30,7  | 63,4  | 11,2  | 30,7  |
| 1997 | 40,1 | 58,5  | 92,65 | 56,2  | 94,6  | 27,0 | 49,9  | 14,1 | 22,3  | 33,2  | 61,5  | 4,8   |
| 1998 | 50,9 | 17,5  | 61,1  | 63,7  | 94,8  | 87,3 | 81,4  | 61,8 | 49,4  | 80,7  | 77,1  | 53,2  |
| 1999 | 48,1 | 70,1  | 87,1  | 58,4  | 64,7  | 55,6 | 32,0  | 67,3 | 92,3  | 109,8 | 73,1  | 21,4  |
| 2000 | 44,6 | 105,9 | 71,2  | 73,5  | 69,0  | 47,5 | 68,5  | 62,6 | 111,5 | 67,6  | 38,2  | 38,8  |
| 2001 | 31,9 | 34,5  | 44,9  | 5,3   | 81,1  | 52,4 | 36,6  | 33,1 | 61,1  | 42,5  | 64,2  | 47,5  |
| 2002 | 31,0 | 17,9  | 52,0  | 111,9 | 76,9  | 67,7 | 38,2  | 48,3 | 38,8  | 65,1  | 22,6  | 91,5  |
| 2003 | 8,0  | 35,8  | 43,4  | 114,0 | 39,7  | 53,7 | 69,9  | 34,7 | 30,9  | 95,0  | 62,8  | 39,8  |
| 2004 | 37,7 | 49,9  | 41,9  | 126,2 | 114,7 | 58,8 | 56,8  | 39,1 | 85,7  | 135,6 | 83,3  | 20,5  |
| 2005 | 12,5 | 67,6  | 33,9  | 66    | 128,1 | 38,9 | 46,3  | 57,2 | 71,2  | 185,1 | 67,3  | 39,4  |
| 2006 | 83   | 77,3  | 127,4 | 140,9 | 135   | 127  | 55,8  | 37   | 26,7  | 119,6 | 146,5 | 13,2  |
| 2007 | 7,9  | 15,6  | 74,4  | 115,4 | 46    | 77,5 | 24,6  | 61,3 | 29    | 125,1 | 90,3  | 75,3  |
| 2008 | 79,7 | 27,9  | 102,7 | 48,4  | 152,4 | 93,7 | 142   | 51,2 | 64,6  | 106,3 | 237,4 | 80,4  |
| 2009 | 35,5 | 53,1  | 65,8  | 41,8  | 55,4  | 40,4 | 41,5  | 33,8 | 22,7  | 136   | 29,7  | 7,9   |
| 2010 | 3,8  | 37,5  | 11,5  | 140,6 | 128,8 | 75,0 | 165,9 | 62,2 | 48,6  | 145,5 | 213,1 | 85,6  |
| 2011 | 52,4 | 121,5 | 151,2 | 169,8 | 128,3 | 61,6 | 59,3  | 36,2 | 49,1  | 176,0 | 313,2 | 103,8 |

## MODELACIÓN DE LLUVIAS ANUALES UTILIZANDO INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN EL NORTE DE BOGOTÁ

68

|      |      |      |       |       |       |       |       |      |      |      |       |       |
|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|-------|
| 2012 | 92,0 | 45,6 | 86,0  | 162,9 | 52,0  | 43,3  | 132,5 | 60,8 | 23,2 | 87,3 | 20,4  | 47,1  |
| 2013 | 12,1 | 57,2 | 40,8  | 57,1  | 84,5  | 15,8  | 52,7  | 41,3 | 19,3 | 57,2 | 173,9 | 87,3  |
| 2014 | 25,5 | 27,9 | 115,4 | 59,1  | 55,4  | 54,7  | 42,2  | 39,6 | 30,8 | 95,6 | 86,9  | 108,2 |
| 2015 | 38,4 | 74,8 | 44,2  | 37,6  | 22,3  | 87,2  | 47,0  | 22,3 | 11,0 | 11,2 | 37,6  | 3,5   |
| 2016 | 7,7  | 23,0 | 30,0  | 73,2  | 114,5 | 35,3  | 32,4  | 74,7 | 67,7 | 71,9 | 168,9 | 57,5  |
| 2017 | 35,6 | 33,6 | 120,1 | 64,8  | 98,6  | 107,8 | 37,9  | 72,9 | 42,4 | 47,3 | 183,3 | 34,4  |
| 2018 | 65,4 | 39,0 | 114   | 114,6 | 86,9  | 74,6  | 67,1  | 64,0 | 27,9 | 41,7 | 35,4  | 1,6   |

*Nota.* Volumen de precipitación Estación CARO SEMINARIO, Empresa de acueducto y alcantarillado de Bogotá. Precipitación total mensual de la estación La Caro Seminario, valores en milímetros.

### Anexo G. Estación La Conejera, volumen de precipitaciones mensuales en milímetros desde 1980 a 2018.

| AÑO  | ENE   | FEB   | MAR   | ABR   | MAY   | JUN   | JUL   | AGO   | SEP   | OCT   | NOV   | DIC   |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1990 | 15,3  | 51,5  | 99,4  | 79,8  | 68,7  | 10,0  | 21,9  | 26,7  | 29,5  | 183,0 | 46,8  | 88,0  |
| 1991 | 29,2  | 31,6  | 136,0 | 85,1  | 93,3  | 30,2  | 23,2  | 40,4  | 12,7  | 25,0  | 45,1  | 9,0   |
| 1992 | 1,3   | 71,4  | 62,8  | 74,4  | 44,1  | 18,1  | 9,2   | 19,9  | 44,6  | 20,1  | 86,9  | 78,6  |
| 1993 | 45,8  | 35,2  | 41,4  | 79,2  | 154,8 | 32,1  | 55,6  | 19,1  | 44,4  | 60,5  | 145,7 | 15,8  |
| 1994 | 77,5  | 92,5  | 113,6 | 93,0  | 72,7  | 39,9  | 29,4  | 35,0  | 29,8  | 89,7  | 85,7  | 10,0  |
| 1995 | 27,5  | 20,4  | 78,1  | 153,1 | 70,9  | 75,7  | 44,0  | 108,8 | 9,4   | 72,3  | 107   | 27,5  |
| 1996 | 18,9  | 58,5  | 162,7 | 80,7  | 80,8  | 41,2  | 66,1  | 28    | 51,2  | 107,3 | 34,0  | 45,0  |
| 1997 | 146,4 | 26,4  | 63,0  | 105,3 | 73,7  | 84,7  | 4,2   | 12,0  | 61,7  | 91,0  | 92,7  | 6,7   |
| 1998 | 24,6  | 30,3  | 61,2  | 73,5  | 135   | 56,3  | 46,5  | 68,7  | 104,5 | 149,7 | 77,0  | 144,3 |
| 1999 | 51,6  | 112,7 | 98,2  | 81,0  | 49,4  | 114,6 | 25,5  | 56,4  | 85,7  | 205,8 | 97,2  | 61,9  |
| 2000 | 32,2  | 152,9 | 124,1 | 28,3  | 67,2  | 64,9  | 54,5  | 50,8  | 147,2 | 98,4  | 75,9  | 42,9  |
| 2001 | 52,4  | 34,4  | 105,6 | 18,5  | 103,0 | 50,7  | 30,5  | 20,5  | 84,8  | 30,5  | 66,4  | 60,8  |
| 2002 | 12,7  | 10,6  | 97,5  | 98,7  | 107,6 | 53,1  | 20,3  | 31,8  | 37,0  | 87,3  | 18,1  | 77,5  |
| 2003 | 13,1  | 104,4 | 73,8  | 115,2 | 48,1  | 47,7  | 36,8  | 37,1  | 69,3  | 132,6 | 156,1 | 42,3  |
| 2004 | 64,4  | 78    | 61,8  | 177   | 123   | 51,3  | 91,1  | 23,7  | 64,9  | 185   | 190   | 63    |
| 2005 | 43    | 68,9  | 63,8  | 91,1  | 158   | 27,1  | 40,6  | 54,5  | 85,7  | 169   | 97,1  | 71,7  |
| 2006 | 55,2  | 41,1  | 93    | 218   | 172   | 83,3  | 26,0  | 17    | 28,1  | 112   | 123,7 | 29,6  |
| 2007 | 12,5  | 30,3  | 140   | 94,9  | 82,1  | 44,6  | 26,5  | 46,6  | 20,3  | 173   | 132   | 83,8  |
| 2008 | 27,6  | 46    | 109   | 131   | 193   | 82,4  | 61,7  | 87,8  | 63,4  | 116   | 193   | 70,7  |
| 2009 | 32,8  | 104   | 138   | 36,6  | 21,8  | 95,1  | 52,3  | 52,6  | 34,1  | 164   | 82,3  | 28,5  |
| 2010 | 17,9  | 78,7  | 11,7  | 106,5 | 124,5 | 60,1  | 179,4 | 91,3  | 117,8 | 158,6 | 200,3 | 105   |
| 2011 | 78,8  | 100,3 | 116,4 | 204,0 | 111,3 | 40,8  | 32,6  | 37,7  | 52,0  | 172   | 182   | 81,2  |
| 2012 | 92,7  | 106,0 | 135,9 | 186,1 | 13,9  | 31,7  | 86,9  | 39,6  | 11,7  | 163,0 | 47,3  | 46,6  |
| 2013 | 14,5  | 160,2 | 59,4  | 158,2 | 96,5  | 16,5  | 10,0  | 108,5 | 36,0  | 98,7  | 195,2 | 60,9  |
| 2014 | 43,4  | 92,6  | 59,2  | 66,0  | 93,6  | 32,2  | 43,4  | 20,3  | 52,9  | 134,6 | 141,5 | 107,6 |
| 2015 | 26,2  | 59,7  | 62,9  | 59,7  | 18,4  | 19,3  | 52,9  | 25,2  | 36,7  | 62,0  | 99,7  | 3,1   |
| 2016 | 6,1   | 27,3  | 93,5  | 109,6 | 152,7 | 33,4  | 30,9  | 60,4  | 37,3  | 57,3  | 275,3 | 42,5  |
| 2017 | 34,0  | 49,9  | 196,3 | 142,1 | 131,2 | 59,5  | 28,2  | 74,6  | 41,1  | 125   | 140   | 96,8  |

## MODELACIÓN DE LLUVIAS ANUALES UTILIZANDO INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN EL NORTE DE BOGOTÁ

69

|      |      |      |       |       |     |      |      |      |      |       |       |      |
|------|------|------|-------|-------|-----|------|------|------|------|-------|-------|------|
| 2018 | 84,3 | 54,1 | 130,8 | 128,2 | 172 | 29,3 | 42,5 | 45,9 | 39,2 | 142,3 | 160,2 | 21,1 |
|------|------|------|-------|-------|-----|------|------|------|------|-------|-------|------|

*Nota.* Datos proporcionados por la EAAB, Volumen de precipitación Estación LA CONEJERA, Empresa de acueducto y alcantarillado de Bogotá. Precipitación total mensual de la estación La Conejera, valores en milímetros.

# **MODELACIÓN DE LLUVIAS ANUALES UTILIZANDO INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN EL NORTE DE BOGOTÁ**

70

## **Anexo H. Resultados de la complementación de datos de la estación APTO - GUAYMARAL, volumen de precipitaciones mensuales desde 1992 a 2018.**

| AÑO  | ENERO | FEBRERO | MARZO | ABRIL | MAYO  | JUNIO | JULIO | AGOSTO | SEPTIEMBRE | OCTUBRE | NOVIEMBRE | DICIEMBRE | PROMEDIO. ANUAL |
|------|-------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|------------|---------|-----------|-----------|-----------------|
| 1992 | 22,9  | 37,5    | 58,5  | 66,1  | 52,4  | 31    | 55,5  | 44,3   | 80,1       | 52,4    | 129,6     | 97,1      | 350,1           |
| 1993 | 42,5  | 50,9    | 90,4  | 137,2 | 124,5 | 36,9  | 71,5  | 33,1   | 43,3       | 49,7    | 159,9     | 18,5      | 338,4           |
| 1994 | 28    | 116     | 79    | 93,2  | 111,1 | 61,8  | 37,8  | 50,1   | 28,9       | 103,2   | 76,5      | 13,5      | 329,1           |
| 1995 | 48    | 74,5    | 121,4 | 136,4 | 41,3  | 113,6 | 65,6  | 105    | 32,2       | 59,5    | 162,6     | 112,5     | 361,8           |
| 1996 | 53,3  | 102,4   | 133   | 70,7  | 108   | 42,5  | 75,4  | 59,4   | 41,6       | 80,3    | 74,6      | 75,2      | 343,2           |
| 1997 | 50,5  | 26,1    | 31,7  | 65    | 44,2  | 82,7  | 36    | 27,8   | 18,4       | 63,5    | 47,5      | 18,7      | 315,6           |
| 1998 | 31,8  | 22,9    | 90,3  | 37    | 125,9 | 59,6  | 79,1  | 43,9   | 74,8       | 120,5   | 82,3      | 94,8      | 356,2           |
| 1999 | 19,6  | 62,7    | 76,4  | 105,3 | 35,6  | 125,4 | 24    | 42,7   | 130,3      | 162,2   | 89,6      | 47,7      | 356,5           |
| 2000 | 18,7  | 89,4    | 111,1 | 50,1  | 60,5  | 52,6  | 73,3  | 48,6   | 144,8      | 98,3    | 90,4      | 32,5      | 355,4           |
| 2001 | 40,4  | 38,4    | 68,7  | 10,2  | 131   | 81,9  | 21,6  | 38,3   | 106        | 35,8    | 61,7      | 45,3      | 330             |
| 2002 | 22    | 27,4    | 84,4  | 132,5 | 119,9 | 76    | 30,8  | 41,8   | 49,5       | 61,1    | 25,4      | 55,1      | 323,7           |
| 2003 | 4,1   | 61,5    | 57,4  | 146,1 | 40,6  | 82,1  | 51    | 14     | 118,9      | 85      | 173,5     | 46,3      | 356             |
| 2004 | 16    | 91,5    | 51,2  | 159,9 | 115,2 | 44,3  | 40,1  | 37,6   | 81,5       | 172,2   | 78,2      | 2         | 345,1           |
| 2005 | 27,7  | 81,6    | 56,9  | 88,3  | 3,4   | 42,7  | 49    | 41,7   | 91,1       | 85,7    | 65,9      | 37        | 55,9            |
| 2006 | 28    | 21,5    | 50,9  | 62    | 45,7  | 53    | 34,8  | 16,5   | 21,3       | 56,2    | 58,5      | 14,5      | 57,3            |
| 2007 | 13,3  | 39,7    | 118,4 | 32,2  | 51,5  | 38,4  | 12,5  | 43,8   | 12,9       | 287,9   | 137,3     | 109       | 372,9           |
| 2008 | 23    | 58,6    | 72,3  | 78,5  | 71,3  | 93    | 77,5  | 84,3   | 55,4       | 95,6    | 203       | 55,3      | 368,4           |
| 2009 | 39,6  | 115,5   | 71,3  | 55,1  | 37    | 73,6  | 38,5  | 18,9   | 18,1       | 206,8   | 60,1      | 28,3      | 340             |
| 2010 | 34,8  | 19,7    | 16,1  | 201,8 | 150,5 | 95,8  | 155,5 | 51,3   | 83,4       | 118,4   | 179,2     | 121,2     | 388,4           |
| 2011 | 121,3 | 108,4   | 152,3 | 193,8 | 131,1 | 65,8  | 55,4  | 66,7   | 56,5       | 201     | 252,1     | 85,6      | 389,8           |
| 2012 | 89    | 66      | 79,6  | 189,1 | 34,5  | 38,8  | 75,8  | 43,2   | 24,1       | 116,7   | 59,6      | 69,4      | 343             |
| 2013 | 23,4  | 118,8   | 52,1  | 96,7  | 139,6 | 18,6  | 26,5  | 69,1   | 35         | 51,1    | 116,1     | 53,8      | 337,8           |
| 2014 | 74,9  | 89,2    | 74,8  | 29,6  | 49,3  | 44,6  | 39,5  | 24,5   | 44,9       | 103,2   | 104,8     | 99,1      | 347,1           |
| 2015 | 53,7  | 32      | 70,7  | 53,8  | 17,3  | 49,7  | 52,8  | 30,8   | 36,7       | 14,6    | 153,7     | 2         | 329,4           |
| 2016 | 21,8  | 19,1    | 117,3 | 100,6 | 144,6 | 45,5  | 38,2  | 68     | 70,5       | 79,5    | 134,7     | 30,9      | 348,3           |
| 2017 | 34,8  | 45,4    | 188,1 | 99,5  | 123,8 | 57,9  | 23    | 67,3   | 50         | 77,1    | 157,8     | 101       | 356,2           |
| 2018 | 52,9  | 45,8    | 57,9  | 137,3 | 99,9  | 91,1  | 91,1  | 80     | 68,4       | 96,6    | 87,9      | 43,9      | 79,4            |

*Nota:* Datos completos de la estación APTO – GUAYMARAL, datos en milímetros, elaboración propia

# **MODELACIÓN DE LLUVIAS ANUALES UTILIZANDO INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN EL NORTE DE BOGOTÁ**

71

## **Anexo I. Estación APTO - GUAYMARAL, valores medios de temperatura mensuales desde 1992 a 2013.**

| AÑO  | ENERO | FEBRERO | MARZO | ABRIL | MAYO | JUNIO | JULIO | AGOSTO | SEPTIEMBRE | OCTUBRE | NOVIEMBRE | DICIEMBRE |
|------|-------|---------|-------|-------|------|-------|-------|--------|------------|---------|-----------|-----------|
| 1992 | 13,3  | 13,8    | 14,5  | 14,5  | 14,2 | 13,4  | 12,6  | 13,3   | 13,3       | 13,5    | 13,3      | 13,3      |
| 1993 | 13,1  | 13,4    | 13,5  | 13,8  | 12,4 | 11,5  | 11,2  | 11,1   | 11,2       | 11,6    | 11,5      | 11,1      |
| 1994 | 10,9  | 11,2    | 11,4  | 12    | 12,2 | 11,3  | 11,1  | 12,2   | 12,4       | 12,5    | 12,5      | 12,2      |
| 1995 | 12,9  | 13,3    | 14    | 14,5  | 13,8 | 12,7  | 12,3  | 12     | 12,5       | 12,4    | 13,3      | 13,3      |
| 1996 | 13,9  | 13,3    | 14,4  | 14,8  | 14,6 | 15,3  | 14,8  | 15     | 15         | 15      | 16        | 14        |
| 1997 | 13,3  | 13      | 12,6  | 13    | 13   | 12,7  | 12,2  | 12,7   | 12,6       | 13,3    | 12,9      | 13,3      |
| 1998 | 13,7  | 15,3    | 13,8  | 14,2  | 13,1 | 12,2  | 11,9  | 11,6   | 11,6       | 11,7    | 11,7      | 13,5      |
| 1999 | 13    | 13,3    | 13,5  | 13,8  | 13,3 | 12,9  | 11,4  | 11,8   | 13,1       | 13,9    | 16,5      | 15,8      |
| 2000 | 15,2  | 12,5    | 18,2  | 18,4  | 15,2 | 11,4  | 15,4  | 18,4   | 18,6       | 13      | 13,5      | 13,3      |
| 2001 | 11,5  | 12,4    | 13,9  | 12,9  | 12,2 | 12    | 12,5  | 11,5   | 12,7       | 13,7    | 14,5      | 16,2      |
| 2002 | 16    | 17,5    | 18,3  | 14,5  | 14   | 13,6  | 13,1  | 13     | 13         | 13,9    | 14,3      | 12,8      |
| 2003 | 13,1  | 13,5    | 14,6  | 14,8  | 15,3 | 9,7   | 7,2   | 7,7    | 7,3        | 7,4     | 7,4       | 7,7       |
| 2004 | 8,5   | 9,3     | 11,3  | 11,2  | 10,8 | 9     | 9,6   | 10,5   | 10,5       | 9,4     | 8,8       | 8,3       |
| 2005 | 8,5   | 9,3     | 11,3  | 11,2  | 10,8 | 9     | 7,2   | 7,3    | 10,9       | 11,1    | 11,3      | 11,3      |
| 2006 | 11,5  | 12,4    | 13,9  | 12,9  | 12,6 | 10,7  | 14,2  | 14,3   | 14         | 14,3    | 14,1      | 13,8      |
| 2007 | 14,8  | 11,3    | 13,6  | 14,5  | 13,1 | 11,1  | 10,9  | 13,8   | 13,9       | 13,9    | 14,1      | 14        |
| 2008 | 13,7  | 13,8    | 13,9  | 14,3  | 14,1 | 14,4  | 14,2  | 14,4   | 14,3       | 14,7    | 14,8      | 14,2      |
| 2009 | 14    | 14,1    | 14,5  | 14,2  | 14,2 | 13,8  | 14,1  | 14,5   | 14,3       | 14,4    | 14,7      | 13,5      |
| 2010 | 14,5  | 15,1    | 15,7  | 15,1  | 14,9 | 14    | 14,6  | 14,4   | 14         | 13,9    | 13,8      | 13,5      |
| 2011 | 14    | 13,8    | 14    | 14,2  | 14,2 | 14,2  | 13,8  | 13,9   | 13,7       | 14,4    | 14,4      | 14,3      |
| 2012 | 14,4  | 13,6    | 14,3  | 14,1  | 14,1 | 14    | 13,9  | 13,7   | 13,9       | 13,7    | 14        | 14        |
| 2013 | 13,9  | 13,9    | 14,5  | 14,4  | 14,3 | 14,1  | 14,4  | 14,6   | 14         | 14,8    | 12,6      | 13,1      |

*Nota: Datos proporcionados por la CAR, Valores medios de temperatura Estación APTO – GUAYMARAL, Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. (2016). Valores medios Mensuales de temperatura. Valores dados en grados centígrados.*

# **MODELACIÓN DE LLUVIAS ANUALES UTILIZANDO INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN EL NORTE DE BOGOTÁ**

72

## **Anexo J. Estación APTO - GUAYMARAL, número de días mensuales con precipitación desde 1992 a 2013.**

| AÑO  | ENERO | FEBRERO | MARZO | ABRIL | MAYO | JUNIO | JULIO | AGOSTO | SEPTIEMBRE | OCTUBRE | NOVIEMBRE | DICIEMBRE |
|------|-------|---------|-------|-------|------|-------|-------|--------|------------|---------|-----------|-----------|
| 1992 | 13    | 10      | 8     | 19    | 17   | 13    | 24    | 19     | 11         | 12      | 21        | 13        |
| 1993 | 31    | 28      | 31    | 30    | 31   | 30    | 31    | 31     | 30         | 31      | 30        | 31        |
| 1994 | 4     | 7       | 10    | 13    | 17   | 17    | 19    | 20     | 15         | 20      | 17        | 6         |
| 1995 | 3     | 6       | 13    | 17    | 14   | 21    | 23    | 23     | 13         | 16      | 13        | 17        |
| 1996 | 11    | 14      | 13    | 13    | 22   | 17    | 23    | 17     | 11         | 19      | 8         | 10        |
| 1997 | 4     | 13      | 0     | 10    | 12   | 14    | 14    | 9      | 6          | 10      | 17        | 4         |
| 1998 | 7     | 12      | 13    | 16    | 22   | 23    | 22    | 16     | 18         | 23      | 14        | 11        |
| 1999 | 2     | 11      | 8     | 12    | 9    | 16    | 6     | 12     | 15         | 16      | 16        | 4         |
| 2000 | 5     | 10      | 10    | 9     | 16   | 12    | 11    | 12     | 14         | 12      | 13        | 13        |
| 2001 | 6     | 11      | 13    | 10    | 23   | 16    | 10    | 15     | 16         | 10      | 16        | 13        |
| 2002 | 4     | 7       | 12    | 19    | 18   | 21    | 14    | 13     | 10         | 9       | 10        | 8         |
| 2003 | 2     | 11      | 13    | 14    | 10   | 18    | 13    | 7      | 9          | 15      | 15        | 5         |
| 2004 | 1     | 5       | 6     | 15    | 19   | 14    | 11    | 13     | 12         | 15      | 10        | 1         |
| 2005 | 3     | 7       | 9     | 13    | 2    | 17    | 20    | 7      | 22         | 11      | 18        | 15        |
| 2006 | 8     | 13      | 16    | 17    | 18   | 16    | 19    | 19     | 17         | 19      | 20        | 6         |
| 2007 | 8     | 7       | 14    | 6     | 18   | 4     | 7     | 17     | 19         | 26      | 22        | 22        |
| 2008 | 11    | 9       | 19    | 20    | 4    | 22    | 26    | 18     | 18         | 15      | 23        | 14        |
| 2009 | 10    | 13      | 20    | 15    | 15   | 20    | 21    | 15     | 11         | 16      | 16        | 7         |
| 2010 | 4     | 9       | 10    | 25    | 24   | 22    | 26    | 20     | 19         | 19      | 22        | 18        |
| 2011 | 14    | 21      | 20    | 15    | 21   | 16    | 16    | 21     | 16         | 22      | 24        | 14        |
| 2012 | 17    | 17      | 20    | 23    | 21   | 21    | 20    | 21     | 16         | 18      | 15        | 9         |
| 2013 | 4     | 14      | 10    | 15    | 23   | 9     | 19    | 18     | 18         | 18      | 17        | 10        |

*Nota: Datos proporcionados por la CAR, Número de días mensuales con precipitación Estación APTO – GUAYMARAL, Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. (2016). Número de días mensuales con precipitación.*

# **MODELACIÓN DE LLUVIAS ANUALES UTILIZANDO INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN EL NORTE DE BOGOTÁ**

73

## **Anexo K. Estación APTO - GUAYMARAL, Valores medios humedad relativa desde 1992 a 2013.**

| AÑO  | ENERO | FEBRERO | MARZO | ABRIL | MAYO | JUNIO | JULIO | AGOSTO | SEPTIEMBRE | OCTUBRE | NOVIEMBRE | DICIEMBRE |
|------|-------|---------|-------|-------|------|-------|-------|--------|------------|---------|-----------|-----------|
| 1992 | 61    | 64      | 62    | 67    | 68   | 65    | 64    | 61     | 62         | 61      | 70        | 66        |
| 1993 | 62    | 65      | 68    | 71    | 73   | 68    | 69    | 65     | 68         | 67      | 75        | 66        |
| 1994 | 66    | 67      | 72    | 73    | 71   | 64    | 66    | 62     | 63         | 69      | 72        | 66        |
| 1995 | 60    | 59      | 62    | 66    | 62   | 67    | 66    | 70     | 61         | 66      | 67        | 67        |
| 1996 | 62    | 61      | 67    | 62    | 63   | 61    | 61    | 57     | 57         | 63      | 58        | 57        |
| 1997 | 65    | 63      | 79    | 80    | 77   | 75    | 78    | 74     | 72         | 73      | 77        | 70        |
| 1998 | 69    | 72      | 76    | 77    | 79   | 76    | 75    | 77     | 77         | 78      | 77        | 74        |
| 1999 | 64    | 64      | 69    | 71    | 70   | 79    | 80    | 82     | 78         | 76      | 71        | 71        |
| 2000 | 67    | 64      | 69    | 64    | 65   | 57    | 63    | 66     | 67         | 69      | 71        | 67        |
| 2001 | 62    | 63      | 66    | 68    | 81   | 79    | 72    | 68     | 67         | 75      | 78        | 79        |
| 2002 | 79    | 64      | 69    | 89    | 86   | 93    | 69    | 68     | 67         | 69      | 71        | 62        |
| 2003 | 60    | 80      | 81    | 81    | 77   | 46    | 79    | 78     | 67         | 77      | 79        | 79        |
| 2004 | 77    | 76      | 77    | 83    | 85   | 82    | 81    | 80     | 71         | 82      | 80        | 79        |
| 2005 | 74    | 76      | 77    | 83    | 85   | 82    | 82    | 82     | 77         | 79      | 81        | 78        |
| 2006 | 76    | 79      | 80    | 84    | 83   | 80    | 81    | 80     | 79         | 81      | 83        | 80        |
| 2007 | 72    | 70      | 77    | 79    | 82   | 81    | 81    | 80     | 76         | 81      | 79        | 80        |
| 2008 | 77    | 79      | 81    | 83    | 82   | 82    | 81    | 80     | 81         | 80      | 85        | 80        |
| 2009 | 80    | 79      | 84    | 81    | 79   | 82    | 79    | 73     | 70         | 80      | 80        | 75        |
| 2010 | 71    | 76      | 77    | 84    | 85   | 81    | 84    | 82     | 84         | 82      | 86        | 82        |
| 2011 | 78    | 83      | 82    | 84    | 85   | 82    | 81    | 80     | 79         | 83      | 86        | 81        |
| 2012 | 79    | 77      | 81    | 83    | 80   | 77    | 78    | 79     | 75         | 77      | 77        | 76        |
| 2013 | 73    | 83      | 81    | 83    | 82   | 81    | 74    | 77     | 76         | 68      | 72        | 70        |

*Nota.* Datos proporcionados por la CAR, Valores medios humedad relativa Estación APTO – GUAYMARAL, Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. (2016). Valores medios humedad relativa. Valores dados en porcentaje

# **MODELACIÓN DE LLUVIAS ANUALES UTILIZANDO INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN EL NORTE DE BOGOTÁ**

74

## **Anexo L . Estación APTO - GUAYMARAL, Valores totales de evaporación desde 1992 a 2013**

| AÑO  | ENERO | FEBRERO | MARZO | ABRIL | MAYO  | JUNIO | JULIO | AGOSTO | SEPTIEMBRE | OCTUBRE | NOVIEMBRE | DICIEMBRE |
|------|-------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|------------|---------|-----------|-----------|
| 1992 | 100,5 | 101,8   | 94,1  | 73,2  | 87,1  | 71,9  | 78,6  | 89,3   | 85,2       | 65,1    | 72,4      | 83,8      |
| 1993 | 91,7  | 87,9    | 73,3  | 62,5  | 112,2 | 55,3  | 69,4  | 66,3   | 69,7       | 72,1    | 64,6      | 91,9      |
| 1994 | 85,6  | 67,4    | 67,5  | 87,8  | 81,9  | 54,1  | 68,2  | 64,2   | 73,5       | 66,8    | 66,7      | 74,8      |
| 1995 | 105,1 | 102,1   | 73,8  | 49,4  | 50,8  | 69,2  | 61,3  | 70,7   | 77,7       | 78,4    | 68,7      | 81,3      |
| 1996 | 97,7  | 71      | 83,6  | 84,8  | 66,9  | 56,7  | 79,1  | 80,8   | 77,3       | 79,8    | 86,6      | 68,8      |
| 1997 | 22,2  | 86      | 4,5   | 78,5  | 73,4  | 76,8  | 68,4  | 11,2   | 18,6       | 104     | 71,4      | 105,9     |
| 1998 | 104,3 | 86,7    | 99,9  | 77,5  | 49,7  | 74,7  | 61,4  | 77,9   | 82,7       | 79      | 71,5      | 78        |
| 1999 | 86,7  | 40,3    | 69    | 86,2  | 72,7  | 69,1  | 68,1  | 71,1   | 82,5       | 66,3    | 86,9      | 101,5     |
| 2000 | 95,2  | 71,7    | 81,4  | 76,9  | 61,4  | 74,5  | 72,5  | 77     | 59,8       | 64,9    | 94        | 66        |
| 2001 | 114,5 | 93,6    | 88,9  | 80,4  | 75,8  | 52,7  | 54,9  | 63,2   | 75,5       | 78,4    | 71,5      | 70,4      |
| 2002 | 106,2 | 98,2    | 80,9  | 58,3  | 52    | 63,7  | 54,3  | 60,6   | 67,6       | 88,2    | 68        | 84,5      |
| 2003 | 103,4 | 100,5   | 84,3  | 70,7  | 71,6  | 7,2   | 59,4  | 68,1   | 68,1       | 57,7    | 38,4      | 73,5      |
| 2004 | 90    | 71,9    | 103,8 | 72    | 66,7  | 45,2  | 60,7  | 63,3   | 79,8       | 54,2    | 52,5      | 67        |
| 2005 | 63,9  | 69,3    | 81,4  | 47,6  | 11,2  | 59,3  | 65,9  | 10,2   | 47,5       | 35,3    | 49,1      | 68,5      |
| 2006 | 71,8  | 79      | 86,2  | 71,2  | 57,6  | 55,8  | 66    | 66,4   | 70,6       | 73,5    | 70,2      | 80,6      |
| 2007 | 99,8  | 87      | 72,6  | 61,7  | 69,6  | 67,4  | 73    | 64     | 93,4       | 97,8    | 88,8      | 80,3      |
| 2008 | 89,7  | 88,2    | 99,7  | 71,2  | 69,6  | 47,5  | 77,2  | 80,2   | 80,6       | 83,4    | 66,6      | 93,1      |
| 2009 | 74,7  | 89,1    | 62    | 58,7  | 77,6  | 69,2  | 92,1  | 97,1   | 105,2      | 86,2    | 83,1      | 114,1     |
| 2010 | 116,8 | 102,6   | 94,1  | 69,6  | 76,3  | 83,8  | 75,7  | 84     | 83         | 83,8    | 71,7      | 37,7      |
| 2011 | 107,1 | 78,1    | 82,7  | 25,7  | 43,1  | 57,7  | 74,3  | 76,2   | 80,5       | 73,9    | 71,3      | 68,7      |
| 2012 | 87    | 95,5    | 73,4  | 71,2  | 76,6  | 48,2  | 30,4  | 72,9   | 88,5       | 17,8    | 90,5      | 81,1      |
| 2013 | 113,3 | 69,5    | 50,8  | 83,2  | 74,3  | 78,1  | 88    | 63,9   | 58,9       | 44,3    | 56,8      | 71,7      |

*Nota.* Datos proporcionados por la CAR, Valores totales mensuales de evaporación. Estación APTO – GUAYMARAL, Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. (2016). Valores totales mensuales de evaporación. Valores dados en milímetros.

# **MODELACIÓN DE LLUVIAS ANUALES UTILIZANDO INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN EL NORTE DE BOGOTÁ**

75

## **Anexo M. Estación APTO - GUAYMARAL, Valores totales mensuales de brillo solar desde 1992 a 2013.**

| AÑO  | ENERO | FEBRERO | MARZO | ABRIL | MAYO  | JUNIO | JULIO | AGOSTO | SEPTIEMBRE | OCTUBRE | NOVIEMBRE | DICIEMBRE |
|------|-------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|------------|---------|-----------|-----------|
| 1992 | 168,3 | 159,6   | 155,5 | 84,1  | 97,2  | 88,5  | 89,9  | 115,6  | 113,2      | 113,4   | 114,8     | 165,2     |
| 1993 | 139,1 | 117,7   | 113,5 | 75,9  | 75,5  | 64,5  | 93,1  | 73,8   | 73,6       | 82,4    | 81,6      | 140,6     |
| 1994 | 148   | 60      | 79    | 44,9  | 38,2  | 63,5  | 33,4  | 35,5   | 94,9       | 138,8   | 103,3     | 47,6      |
| 1995 | 161,3 | 187,4   | 119,5 | 94,3  | 63,8  | 95    | 79,6  | 99,1   | 113,1      | 101,9   | 148,2     | 124,6     |
| 1996 | 171,8 | 105,6   | 106,1 | 113,7 | 69,7  | 78,3  | 103,1 | 116,2  | 98,1       | 108,8   | 149,1     | 117,8     |
| 1997 | 66,6  | 117,7   | 20,3  | 115,4 | 87,9  | 124,5 | 87    | 117,3  | 122,2      | 82,2    | 53,7      | 161,7     |
| 1998 | 202   | 131     | 24,9  | 88,1  | 75,3  | 118,1 | 105,9 | 116,1  | 122,1      | 133,1   | 116,9     | 126,3     |
| 1999 | 151   | 70,9    | 75,3  | 88,1  | 140,4 | 104,4 | 123,8 | 106,9  | 80,7       | 105,1   | 132,4     | 54,6      |
| 2000 | 82,6  | 118,4   | 102,3 | 77    | 55,7  | 85,1  | 77,9  | 90,7   | 67,3       | 70      | 137,4     | 39,6      |
| 2001 | 153,7 | 116,1   | 81,6  | 90,7  | 69,7  | 76,3  | 115,4 | 106    | 111,4      | 121,1   | 114,7     | 61,4      |
| 2002 | 168,1 | 171,2   | 125,3 | 59,3  | 84,4  | 70,2  | 66,6  | 97,7   | 43,8       | 93,9    | 67,4      | 49,5      |
| 2003 | 162,5 | 136,4   | 130,7 | 85,4  | 81,5  | 62,7  | 93,4  | 97,5   | 89,6       | 92,1    | 102,9     | 46,6      |
| 2004 | 141,9 | 161,2   | 133,7 | 85,7  | 64,7  | 90,3  | 95,5  | 85     | 83,9       | 43,2    | 101,1     | 59,7      |
| 2005 | 43,5  | 40,2    | 141,7 | 74,5  | 34    | 64,5  | 99,5  | 3,6    | 94,3       | 94      | 103,1     | 33,2      |
| 2006 | 96,5  | 125     | 122,6 | 79,1  | 66,9  | 72,8  | 94,1  | 78     | 84,6       | 88,9    | 97,8      | 50,1      |
| 2007 | 165,7 | 190,8   | 95,5  | 41,6  | 68,1  | 103,5 | 101,2 | 92,8   | 122        | 86,6    | 140       | 112,9     |
| 2008 | 139,2 | 147,5   | 139,1 | 101,4 | 78    | 96,9  | 107,8 | 123,7  | 106,9      | 88,7    | 111,8     | 172,6     |
| 2009 | 155,3 | 136,6   | 103,8 | 90,1  | 93,8  | 113,5 | 125,6 | 137,2  | 142,2      | 125,9   | 117,5     | 131,7     |
| 2010 | 172,5 | 124,6   | 141,4 | 86    | 76,5  | 94,9  | 82,5  | 103,1  | 90,2       | 114,1   | 94,3      | 76,7      |
| 2011 | 176,5 | 109,9   | 89,6  | 87,3  | 74,3  | 103,2 | 99,7  | 133,7  | 124        | 90,7    | 92,9      | 114,5     |
| 2012 | 108,4 | 152,7   | 94,9  | 55,3  | 66,6  | 98,6  | 75,8  | 76,6   | 130,2      | 113,3   | 121,4     | 109       |
| 2013 | 150,7 | 111,3   | 92    | 119,5 | 79    | 114   | 131,9 | 130,3  | 100        | 120,3   | 113,8     | 114,6     |

*Nota.* Datos proporcionados por la CAR, Valores totales mensuales de brillo solar. Estación APTO – GUAYMARAL, Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. (2016). Valores totales mensuales de brillo solar. Valores dados en horas.