

150809

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE  
HUAMANGA

FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS, GEOLOGÍA Y CIVIL

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN

PROGRAMA: INGENIERÍA CIVIL

ÁREA: HIDRÁULICA Y RECURSOS ENERGÉTICOS



INFORME FINAL

VALIDACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN GPM (GLOBAL PRECIPITATION  
MEASUREMENT) MEDIANTE REDES NEURONALES ARTIFICIALES DE  
BASE RADIAL

RESPONSABLE:  
ING. EDMUNDO CANCHARI GUTIÉRREZ

AYACUCHO-PERÚ

2015

## Agradecimientos

- Reconocimiento especial a las instituciones nacionales ANA (Autoridad Nacional del Agua) y SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú), por la disposición gratuita de los registros meteorológicos con fines de investigación.
- A todos los estudiantes de la asignatura Hidrología General (IC441), Escuela Profesional de Ingeniería Civil, por su participación e interés constante en el desarrollo del presente trabajo.

# Índice

Agradecimientos	1
Índice	2
Índice de tablas	3
Índice de figuras	3
Resumen	4
1. Introducción	5
2. Revisión de literatura	6
2.1. Fundamentos biológicos de las RNA	6
2.2. Modelo Artificial de las Redes Neuronales Biológicas	8
2.3. Evolución histórica	9
2.4. Clasificación de las RNA	9
2.5. Arquitectura de RNA de base radial	11
2.6. Elementos de la neurona artificial	11
2.7. Funciones de entrada, activación y de transferencia	12
2.8. Algoritmos y paradigmas de aprendizaje	13
2.9. Método de aprendizaje híbrido	14
2.10. Evaluación del aprendizaje	15
3. Materiales y métodos	17
3.1. Cuenca del Río Cachi	17
3.1.1. Punto de drenaje	17
3.1.2. Ubicación política	18
3.1.3. Ubicación geográfica	19
3.1.4. Localización según ANA	20
3.2. Precipitación en estaciones meteorológicas	21
3.2.1. Estaciones meteorológicas identificadas	21
3.3. Precipitaciones TRMM	22
3.3.1. Selección del producto	23
3.3.2. Estaciones meteorológicas y TRMM	24
3.3.3. Estaciones sintéticas	25
3.4. Análisis de registros anuales	26
3.4.1. Análisis de homogeneidad o consistencia	26
3.4.2. Análisis de promedios móviles	27
3.5. Diseño del modelo	27
4. Resultados	28
4.1. Modelo AN2P24	28
4.2. Modelo AN2PM	30
5. Discusión	31
5.1. Análisis del modelo AN2P24	31

5.1.1. Confiabilidad . . . . .	31
5.1.2. Validez . . . . .	31
5.1.3. Objetividad . . . . .	32
<b>6. Conclusiones</b>	<b>33</b>
<b>Referencia bibliográfica</b>	<b>34</b>

## Índice de tablas

1. Evolución de las RNA 1910-1970 . . . . .	8
2. Evolución de las RNA 1970-2000 . . . . .	9
3. Punto de drenaje cuenca del Río Cachi . . . . .	18
4. Límites geográficos de la cuenca del Río Cachi . . . . .	19
5. Cuadrantes de la Carta Nacional para la cuenca de Río Cachi . . . . .	20
6. Estaciones meteorológicas identificadas en la Cuenca de Río Cachi (Sistema de coordenadas UTM: huso 18, zona L, Datum WGS84) . . . . .	22
7. Arquitectura del modelo AN2P24 . . . . .	28
8. Arquitectura del modelo AN2PM . . . . .	30
9. Coeficientes de confiabilidad . . . . .	31
10. Evidencia relacionada con el contenido . . . . .	32
11. Ciclos de aprendizaje y el error cuadrático medio . . . . .	32

## Índice de figuras

1. Red neuronal biológica . . . . .	6
2. Neurona biológica y elementos a detalle . . . . .	7
3. Neurona biológica y elementos básicos . . . . .	8
4. Clasificación de las RNA de acuerdo al algoritmo de aprendizaje utilizado . . . . .	10
5. Red neuronal artificial de base radial . . . . .	10
6. Neurona artificial . . . . .	11
7. Funciones de activación de base radial . . . . .	13
8. Métodos de aprendizaje de las RNA . . . . .	14
9. Ubicación de la Cuenca Río Cachi . . . . .	17
10. Cuenca del Río Cachi y la Carta Nacional -cuadrantes contenidos . . . . .	18
11. ANA Unidades Hidrográficas y la cuenca de Río Cachi . . . . .	19
12. ANA Autoridad Administrativa del agua y la cuenca de Río Cachi . . . . .	20
13. Estaciones meteorológicas identificadas en la cuenca del Río Cachi . . . . .	21
14. Registros disponibles en las estaciones meteorológicas identificadas . . . . .	23
15. Precipitación TRMM y la cuenca del Río Cachi . . . . .	24
16. Precipitación TRMM, cuenca del Río Cachi y estaciones meteorológicas . . . . .	25
17. Estaciones sintéticas TRMM en la cuenca del río Cachi . . . . .	26
18. Registro estación sintética A, producto 3B43 . . . . .	28
19. Registro estación sintética B, producto 3B43 . . . . .	29
21. Error cuadrático medio . . . . .	29
20. Registro estación sintética C, producto 3B43 . . . . .	30

## Resumen

El propósito del trabajo <sup>he</sup> es validar las precipitaciones obtenidas mediante el proyecto TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) para una cuenca hidrográfica local, en base a las precipitaciones registradas en las estaciones meteorológicas disponibles se contrastan los productos 3B42 y 3B43, que expresan las precipitaciones diarias y mensuales respectivamente, para cuyo fin se diseñan modelos basados en redes neuronales artificiales de base radial, un modelo para cada producto, se buscó relacionar las precipitaciones con las condiciones geográficas (altitud, latitud, longitud), disponiendo de variadas alternativas en cuanto a la arquitectura del modelo y datos de ingreso, se presentan como resultado dos modelos para la validación de la precipitación diaria máxima anual y las precipitaciones mensuales, los modelos obtenidos son de vital importancia para la generación de estaciones sintéticas en zonas donde no se dispone de estaciones meteorológicas, estos modelos contribuyen directamente al planeamiento eficaz para el aprovechamiento hídrico.

Palabras clave: precipitación, TRMM, GPM, PMM, redes neuronales artificiales.

## Abstract

The purpose of this work <sup>was</sup> is to validate precipitation obtained by the TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) project for a local watershed, based on the rainfall in the weather stations available the 3B42 and 3B43 contrast products, expressing the daily and monthly rainfall respectively, para cuyo fin se diseñan modelos basados en redes neuronales artificiales de base radial, a model for each product, It seeks to relate precipitation to geographical conditions (altitude, latitude, longitude), providing several alternatives as to the architecture model and input data, occurs as a result two models for validation of the annual maximum daily rainfall and monthly rainfall, the models obtained are of vital importance for the generation of synthetic stations in areas where there are no weather stations, these models directly contribute to effective planning for water use. <sup>?</sup>

keywords: precipitation, TRMM, GPM, PMM, artificial neural networks

# 1. Introducción

El trabajo desarrollado es importante porque regionaliza las precipitaciones obtenidas mediante percepción remota, registro de precipitaciones disponibles desde el proyecto TRMM, los productos validados para la Cuenca del Río Cachi son 3B42 y 3B43, registros de precipitaciones diarias y mensuales; el registro de la precipitación diaria máxima anual es fundamental en Ingeniería Civil, para el dimensionamiento de todas estructuras hidráulicas, mientras las precipitaciones mensuales se utilizan en procesos de balance hídrico, dimensionamiento de embalses, etc. El proyecto GPM (Global Precipitation Measurement) es una extensión del TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission), que extiende el registro de las precipitaciones a todo el mundo, mediante este proyecto se extiende los registros disponibles hasta los trópicos obtenidos por TRMM; GPM utiliza la base de datos disponible desde el año 2008 de las precipitaciones acumuladas en tres horas, diarias y mensuales registrada hasta los trópicos por TRMM, en la presente investigación se utiliza el producto 3B42 (V7) -daily precipitation- cuyo propósito es la validación en base a registros disponibles en las estaciones climatológicas de la cuenca del Río Cachi, con ésta finalidad de diseñar un modelo metaheurístico basado en las redes neuronales artificiales (RNA), específicamente las RNA de base radial. El uso de las precipitaciones medidas mediante la percepción remota, desde su origen, se extendió en todos los países, debido a la poca densidad en la distribución de las estaciones climatológicas -lo mismo que sucede en el Perú, de los inconvenientes frecuentes por falta de los registros de precipitación o la nula existencia de registros de variables hidrológicas en el punto donde se fundará una estructura hidráulica, en todo los proyectos de aprovechamiento hídrico.

## 2. Revisión de literatura

Las redes de neuronas artificiales son un paradigma de aprendizaje y procesamiento automático inspirado en la forma que funciona el sistema nervioso del hombre, son modelos que se clasifican dentro de la Inteligencia Artificial (IA) y su aplicación está extendida prácticamente en todos los campos de la investigación, y más específicamente, en áreas donde no se dispone de modelos determinísticos que representen el comportamiento del fenómeno analizado. La estrategia de las Redes Neuronales Artificiales (RNA) consiste en imitar (emular) el proceso de aprendizaje del hombre, de allí su aplicación universal, para diseñar un modelo específico basta con disponer de un registro de datos y sus resultados respectivos.

Figura 1: Red neuronal biológica

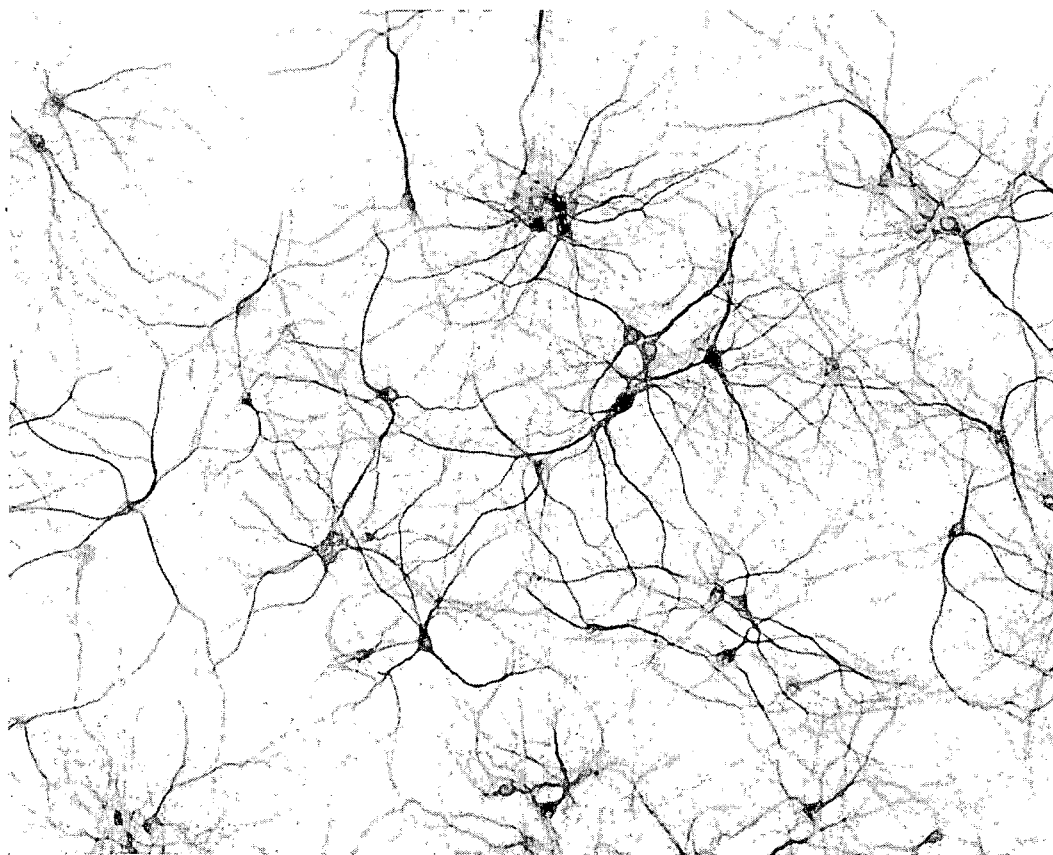


Fig 1: \_\_\_\_\_

Fuente: Figura tomada desde [13]

### 2.1. Fundamentos biológicos de las RNA

El hombre está dotado de forma natural de la capacidad para tomar decisiones a voluntad, aprender (asimilar) nuevas actividades y retenerlas estas experiencias si es de su interés, todo es posible gracias al aparato de comunicación neural, formado [11] por el Sistema Nervioso y Hormonal, en conexión con los órganos de los sentidos y órganos efectores (músculos, glándulas).

Figura 2: Neurona biológica y elementos a detalle

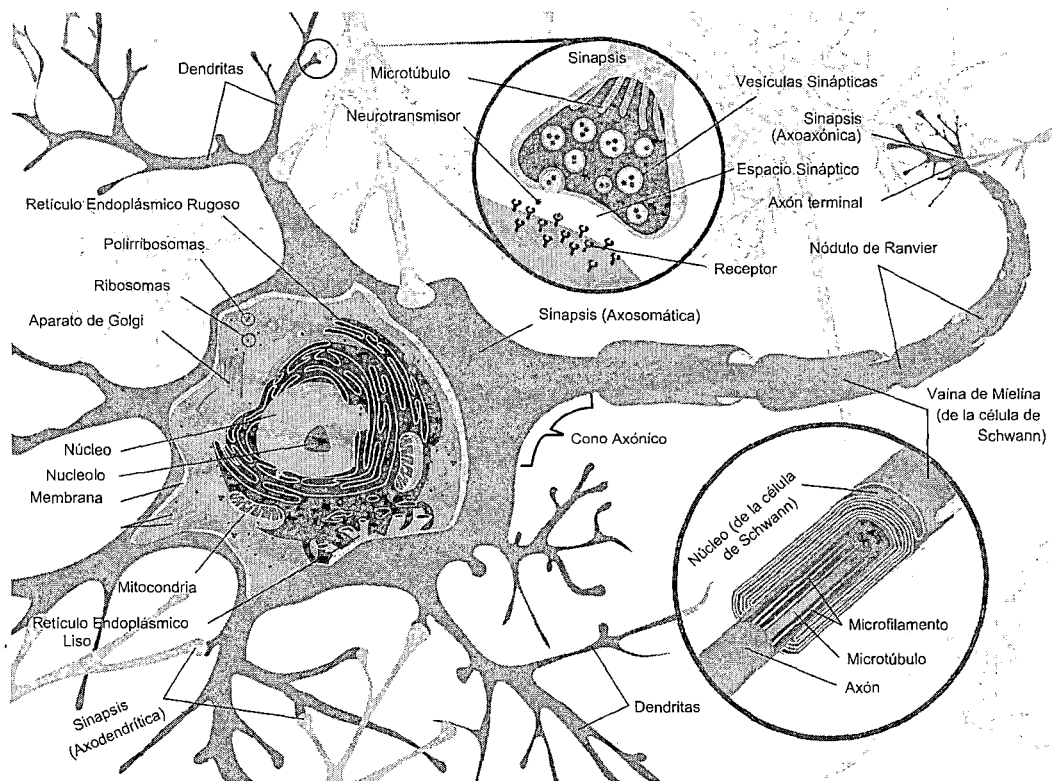


Fig 2: \_\_\_\_\_

Fuente: Figura tomada desde [4]

El sistema de comunicación neural, figura 3, se compone de tres partes:

1. Los receptores: formado por las células sensoriales, especializado en recoger la información en forma de estímulos (estos estímulos provienen del ambiente donde interactúa el hombre o desde el propio organismo).
2. El sistema nervioso: encarga de recibir la información registrada por los receptores, las elabora y transforma en señales electroquímicas y parte de la información lo almacena, luego envía dicha información elaborada a los órganos efectores y otras zonas del sistema nervioso.
3. Órganos efectores: que reciben la información elaborada por el sistema nervioso y la interpretan en forma de acciones motoras, hormonales, etc. Los sistemas en esta categoría son los músculos y glándulas.

Las células encargadas de almacenar el aprendizaje o la experiencia, son las neuronales [4], células que conforman el sistema nervioso y actúan en conjunto, Figura 3, y en comunicación entre miles de ellos. La Figura 2 muestra la célula primordial del sistema nervioso indicando todas sus componentes.

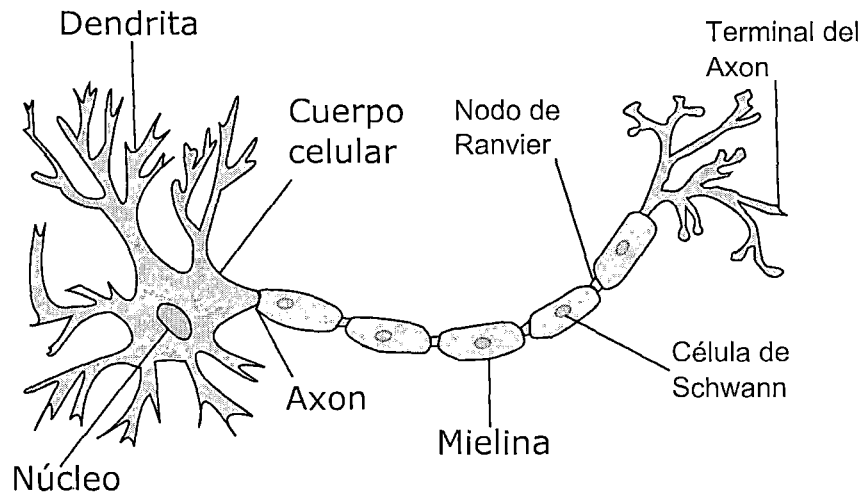
Los componentes de interés [15] de la célula del sistema nervioso y el cerebro son: las dendritas, el cuerpo de la célula o soma, el axón y la sinapsis (terminal de axón). Las sinapsis son elementos [10] terminales de axón que se conectan con otras neuronas; las dendritas son elementos que llevan la información al cuerpo celular o núcleo [5] y el axón es el elemento por el cual la información es propagada a otras células, de la forma establecida en la Figura 2.



## 2.2. Modelo Artificial de las Redes Neuronales Biológicas

Las *Redes Neuronales Artificiales* son modelos simplificados de las *Redes Neuronales Naturales* [18] cuya finalidad es imitar el proceso de aprendizaje humano. La Figura 3 muestra los elementos básicos de una neurona biológica (el núcleo, cuerpo celular, dendrita, axón, terminal del axón, la sinapsis) que son necesarias para generar una neurona artificial.

Figura 3: Neurona biológica y elementos básicos



Fuente: Figura tomada desde [16]

Los modelos artificiales de las neuronas biológicas utilizan elementos fundamentales para su representación, Figura 6 se consideran los datos de entrada, los pesos sinápticos, el núcleo de la neurona es representado generalmente mediante un círculo y es optativo considerar el valor de la umbral, la información fluye de acuerdo a la orientación del grafo dirigido; para su funcionamiento, las neuronas artificiales, imitando a las biológicas, se agrupan entre ellos formando un sistema de redes neuronales artificiales, donde el elemento fundamental es la neurona artificial.

Tabla 1: Evolución de las RNA 1910-1970

Modelo	Autor - Año
Red neuronal	Ramón y Cajal (1911)
Modelo	McCulloch-Pitts (1943)
Filtros no lineales adaptables	Gabor (1954)
Perceptrón	Rosenblatt (1958)
Adaline	Widrow-Hopf (1960)
Limitaciones Perceptrón	Minsky-Papert (1969)

Fuente: Adaptado desde [17]

## 2.3. Evolución histórica

La historia de las redes neuronales artificiales [17] inicia desde a principios del siglo XIX, en la Tabla 1 se muestra los diferentes modelos que se crearon desde el año 1910 hasta el año de 1970.

Entre los años de 1970 y 1980 existe poca actividad, centrándose en los modelos de aprendizaje competitivo de las redes neuronales artificiales y la auto-organización. La Tabla 2 contiene la evolución de los modelos de redes neuronales progresivamente tomando en cuenta el año de su creación, desde el año 1970 hasta el año 2000.

**Tabla 2:** Evolución de las RNA 1970-2000

Modelo	Autor - Año
Resonancia adaptable	Grossberg (1980)
Redes dinámicas	Hopfield (1982)
Mapas auto organizados	kohonen (1982)
Aprendizaje por reforzamiento	Barto (1983)
Aprendizaje por retropropagación	Werbos (1986)
Redes de base radial	1988
Control neuronal con redes estáticas	Narendra (1991)
Control neuronal con redes recurrentes	1994
Caos en redes	1995
Máquinas en vector soporte	a
Redes pulsadas o impulsadas	1999

Fuente: Adaptado desde [17]

## 2.4. Clasificación de las RNA

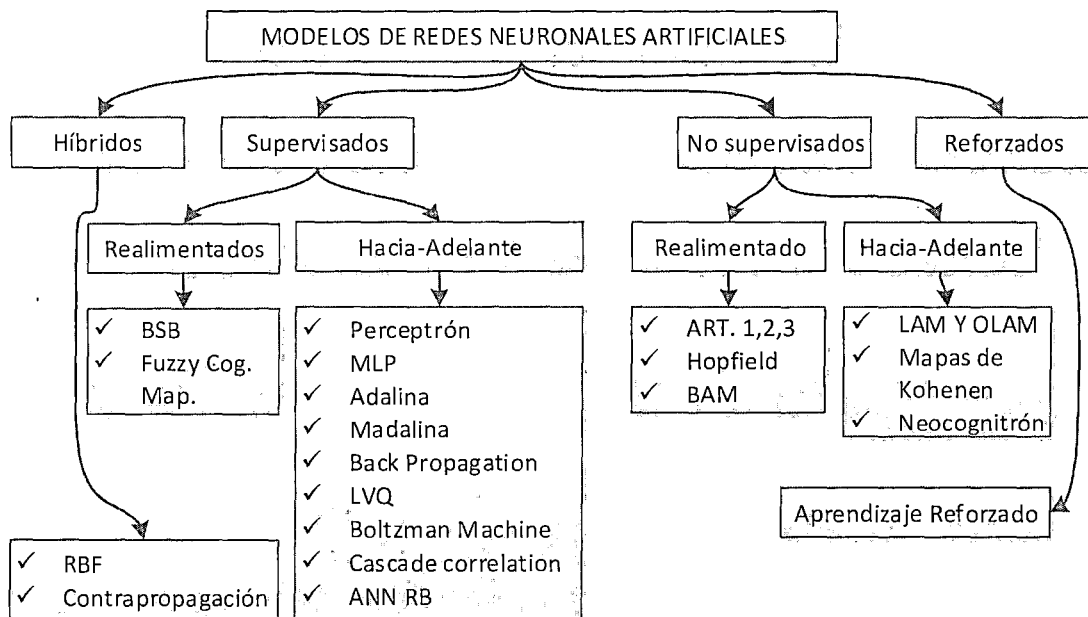
Para su clasificación de los distintos tipos de redes neuronales, se realiza en función de sus características más notables:

La clasificación según su topología o estructura de la red, se considera el número de capas, el tipo de las capas (que pueden ser ocultas o visibles, de entrada o de salida) y la direccionalidad de las conexiones de las neuronas (modelos de redes neuronales conectadas todas hacia<sup>1</sup> adelante o las redes que consideran sus conexiones con neuronas de capas anteriores).

La clasificación más extendida considera el tipo de aprendizaje o como la red aprende los patrones, se distinguen los siguientes algoritmos: aprendizaje supervisada, no supervisada, competitiva o por refuerzo. La Figura 4 muestra los modelos de redes neuronales artificiales clasificadas teniendo en cuenta el tipo de aprendizaje.

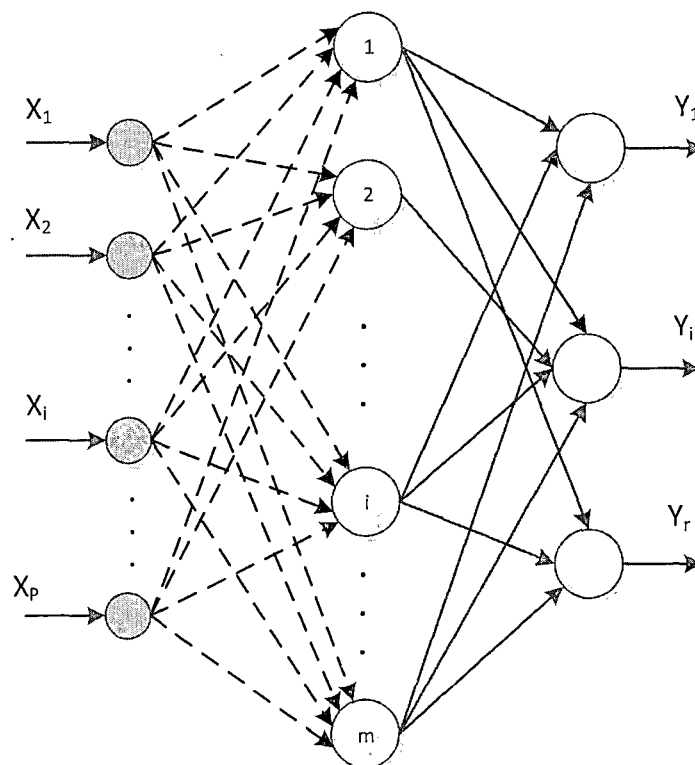
<sup>1</sup> Indica la dirección del movimiento con respecto a su punto de destino

Figura 4: Clasificación de las RNA de acuerdo al algoritmo de aprendizaje utilizado



Fuente: Adaptado desde [18] y [20]

Figura 5: Red neuronal artificial de base radial



Fuente: Adaptado desde [17] y [9]

## 2.5. Arquitectura de RNA de base radial

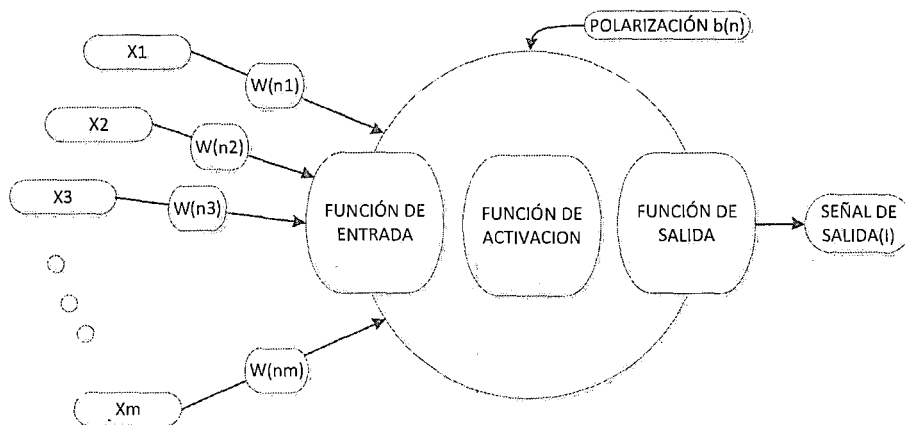
Es un modelo de redes neuronales artificiales que se caracteriza por su arquitectura simple [7], las conexiones entre sus neuronas son todos hacia adelante y utilizan las funciones de activación del tipo radial. Los enlaces entre la capa de entrada y la capa oculta no disponen de pesos de ponderación, sólo los enlaces entre la capa oculta y la capa de salida, las funciones de activación afecta solamente a las neuronas de la capa oculta y el umbral de las neuronas artificiales solamente los dispone la capa de salida; ésta son las características principales de las redes neuronales de base radial y éste modelo se utilizará para la obtención de la contaminación acústica por tránsito vehicular.

Las redes neuronales artificiales de base radial solamente poseen tres niveles de neuronas, la capa de entrada, la capa oculta que está conformada solamente por una sola capa de neuronas y finalmente la capa de salida. El número de neuronas de la capa de entrada está determinado por el número de datos considerados en cada muestra, ejemplo o patrón de entrenamiento y el número de neuronas de la capa de salida se corresponde con el número de resultados esperados para el mismo patrón de aprendizaje, los únicos elementos neuronales que permite variar son las neuronas de la capa oculta, desde la Figura 5, se define  $p$  neuronas en la capa de entrada,  $m$  neuronas en la capa oculta y  $r$  neuronas en la capa de salida.

## 2.6. Elementos de la neurona artificial

Para mostrar los elementos básicos de una neurona artificial se aísla una neurona de toda la red. En correspondencia a los componentes principales de una neurona biológica, Figura 3, en el modelo de una neurona artificial, Figura 6, se establece los siguientes componentes:

Figura 6: Neurona artificial



Fuente: Figura tomada desde [2]

- Las señales (impulsos) electroquímicos que son transportados al núcleo de la neurona por medio de las dendritas en una neurona biológica, son representadas por las variables  $x_1, x_2 \dots x_n$  para una neurona artificial, es su expresión simplificada.

- Las expresiones  $w_{n1}, w_{n2} \dots w_{nm}$  representa el grado de conexión existente entre las neuronas artificiales (llamado enlaces de conexión), los  $w_{nm}$  representan la memoria, donde se almacena lo aprendido, característica fundamental de una neurona natural.
- En una red neuronal natural [10], todas las señales transmitidas a una determinada neurona es procesado en su núcleo y la señal resultante es transmitido a otras neuronas de la red mediante las terminales del axón, en un modelo equivalente para una neurona artificial el núcleo es representado generalmente por un círculo, al cual ingresan las entrada  $x_n$  ponderados por los pesos  $w_{nm}$ . La información es procesado en una neurona artificial según las funciones de entrada, las funciones de activación y genera un resultado de acuerdo a las funciones de salida.
- El valor de la umbral o entrada ponderada constante, representa el grado de excitación de la neurona, medido tomando como referencia para el cual la neurona se encuentra en su estado de equilibrio.

## 2.7. Funciones de entrada, activación y de transferencia

El flujo de datos sobre la red en un modelo de redes neuronales artificiales de base radial difiere comparado con un modelo perceptrón multicapa de múltiples capas, la red se caracteriza porque las conexiones de la capa de entrada a la capa oculta no llevan asociada ningún peso [9], pero las conexiones de la capa oculta a la capa de salida si disponen de pesos asociados y los umbrales de las neuronas únicamente está disponible para las neuronas de la capa de salida [14], en consecuencia las funciones de activación de base radial están asociadas a la capa oculta y son las que se muestran en las ecuaciones 1 a la Ecuación 3, asociado a la función gaussiana, función inversa cuadrática y función inversa multicuadrática; respectivamente, la la Figura 7 muestra la representación gráfica de las funciones de activación radial.

$$\phi(r) = e^{\left(-\frac{r^2}{2}\right)} \quad (1)$$

$$\phi(r) = \frac{1}{1 + r^2} \quad (2)$$

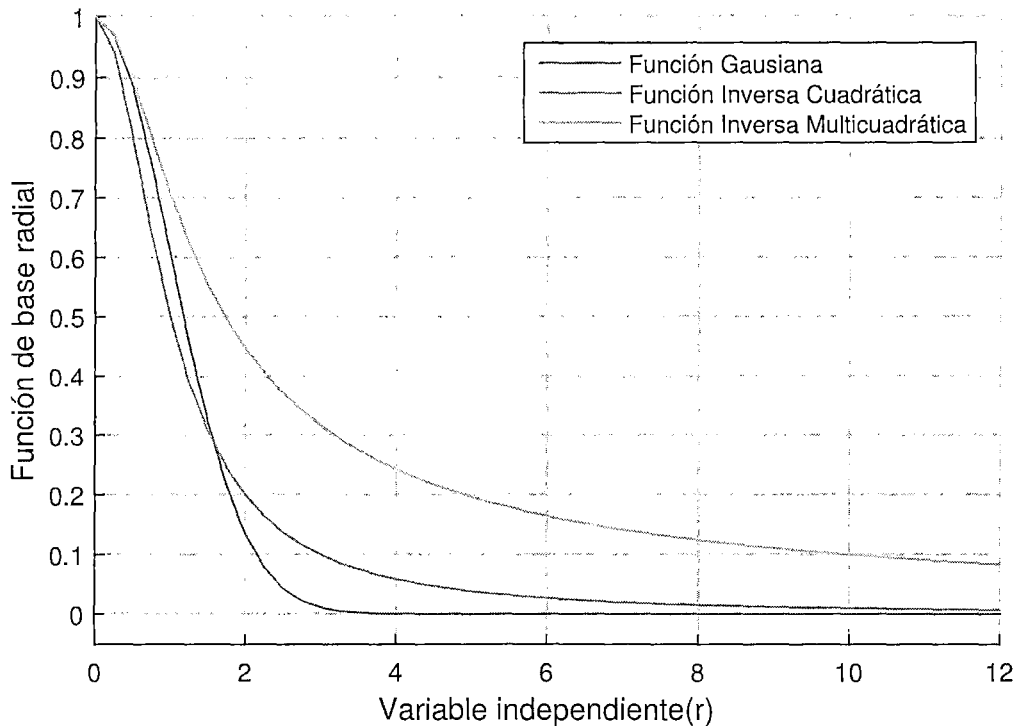
$$\phi(r) = \frac{1}{\sqrt{1 + r^2}} \quad (3)$$

Las funciones de entrada [7] para las neuronas de la capa de salida están dadas por la Ecuación 4, es la suma de todos los valores de entrada desde la capa oculta a la capa de salida, multiplicados por sus correspondientes pesos.

$$u_n = \sum_{j=1}^{j=m} (w_{nj}x_j) \quad (4)$$

Las funciones de salida [14] toman como argumento el valor generado por las funcio-

Figura 7: Funciones de activación de base radial



Fuente: Adaptado desde la referencia [15] y [1]

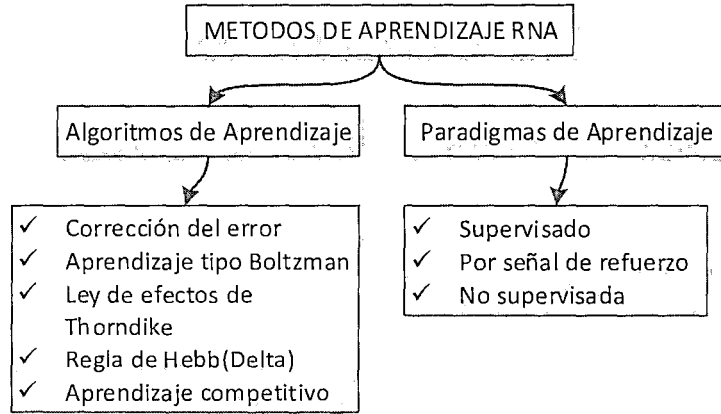
nes de activación, procesan dicha información de acuerdo a una función de activación elegida cuyo resultado representa la señal de salida de la neurona. Las neuronas de la capa de salida [10] generan los resultados mediante la función  $f(x) = x$ , éste es el tipo de función más sencillo, tal que la salida es la misma que la entrada.

## 2.8. Algoritmos y paradigmas de aprendizaje

La red neuronal artificial aprende variando sus pesos asociadas a cada conexión entre neuronas y el umbral de polarización (los parámetros de las redes neuronales artificiales). Existen diferentes algoritmos y paradigmas mediante los cuales la red neuronal artificial modifica sus parámetros para cada patrón de los ejemplos suministrados, la Figura 8 muestra la clasificación de los algoritmos y paradigmas de aprendizaje.

- **Algoritmos de aprendizaje:** conjunto de reglas [12] para resolver el problema de aprendizaje, se diferencian [14] en como determinan la variación de los pesos de las conexiones para cada patrón de aprendizaje.
- **Paradigmas de aprendizaje:** es la forma como la red neuronal interactúa con el medio ambiente.

Figura 8: Métodos de aprendizaje de las RNA



Fuente: Adaptado desde [15] y [6]

## 2.9. Método de aprendizaje híbrido

Uno de los métodos de aprendizaje utilizado por las redes neuronales artificiales de base radial [11] es el *método híbrido*, que dispone en el aprendizaje de las redes de dos fases: una fase no supervisada (determina los centros y las distancias euclídeas - centros y amplitudes) y otra fase supervisada (determina pesos y umbrales).

### Fase no supervisada:

Para la determinación de los centros se utiliza el *Algoritmo de K-medias*, es un algoritmo de clasificación no supervisada que permite dividir los datos de entrada en clases, el número de clases será equivalente al número de neuronas de la capa oculta de la red. El algoritmo de K-medias, clasifica el espacio de las muestras en  $K$  clases o regiones con centro  $C_i$ , correspondiente a la neurona oculta  $i$ , los centros se obtienen para minimizar las distancias euclídeas entre los argumentos de entrada y el centro más cerca, según la Ecuación 5.

$$J = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^N M_{in} \|X(n) - C_i\| \quad (5)$$

Donde  $N$ ,  $X(n)$  es el patrón de entrada  $n$  y  $M_{in}$  es la función de pertenencia y su valor es uno si en centro  $C_i$  es el más cercano a la entrada  $X(n)$  y cero en otro caso.  $\| \quad \|$  es la distancia euclídea.

La determinación de las amplitudes o desviaciones  $d_i$ , el espacio que gobierna cada centro  $C_i$  correspondiente a cada neurona de la capa oculta, para su obtención se utiliza la media uniforme de las distancias euclídeas del centro  $C_i$  a los  $p$  centros más cercanos, mediante la Ecuación 6.

$$d_i = \frac{1}{p} \sum_p \|C_i - C_p\| \quad (6)$$

Otra alternativa para obtener la amplitud de la función de base radial es mediante la relación mostrada en la Ecuación 7, donde  $C_i$  y  $C_s$  los dos centros más cercanos al centro  $C_i$ .

$$d_i = \sqrt{\|C_i - C_t\| \|C_i - C_s\|} \quad (7)$$

### Fase supervisada:

Se obtienen los pesos  $W_{i,k}$  de las conexiones de la capa oculta y la capa de salida y los umbrales  $U_k$  de las neuronas de la capa de salida, se obtiene minimizando el error  $E$  cometido a la salida de la red neuronal para la totalidad de los patrones de entrenamiento o ejemplos, mediante la Ecuación 8.

$$E = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N e(n) \quad (8)$$

$N$  es el número de patrones o muestras y  $e(n)$  es el error cometido por la red para el patrón  $X(n)$ , representado por la Ecuación 9.

$$e(n) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^r (s_k(n) - y_k(n))^2 \quad (9)$$

Donde  $S(n)$  son los vectores de salida de la red y  $Y(n)$  son las salidas esperadas provenientes de los registros de datos, para cada patrón de entrada  $X(n)$ . Para resolver el problema de optimización se utiliza la técnica basada en la corrección del error (mínimos cuadrados), las relaciones para adaptar los pesos y umbrales de una red neuronal de base radial están representadas mediante las Ecuaciones 10 y 11.

$$w_{ik}(n) = w_{ik}(n-1) + \alpha (s_k(n) - y_k(n)) \phi_i(n) \quad (10)$$

$$u_k(n) = u_k(n-1) + \alpha (s_k(n) - y_k(n)) \phi_i(n) \quad (11)$$

para:  $k = 1, 2, 3, \dots, r$  y para  $i = 1, 2, 3, \dots, m$ ,

## 2.10. Evaluación del aprendizaje

Existe múltiples alternativas para evaluar el aprendizaje de un modelo [8] de red neuronal artificial: el más extendido, cuando se trata de paradigmas de aprendizaje supervisado, es la evaluación del error cuadrático medio ( $E_m$ ), para considerar que la red aprendió es necesario evaluar el valor ( $E_m$ ) menor que un error de aproximación considerado; otra alternativa [3] es considerar en no evaluar ningún tipo de aproximación en cuanto al error para los registros de aprendizaje y se establece un número máximo de iteraciones, la aproximación alcanzada se evalúa con los datos de validación y prueba del modelo; otra alternativa es evaluar la variación de los parámetros de la red neuronal, se considera que la red neuronal artificial aprende al modificar sus parámetros



(pesos y umbrales) para cada patrón de entrenamiento, cuando el modelo aprendió los pesos y umbrales se modifican cada vez con valores muy pequeños, alcanza un valor de equilibrio, en este caso se puede considerar que la red neuronal aprendió.

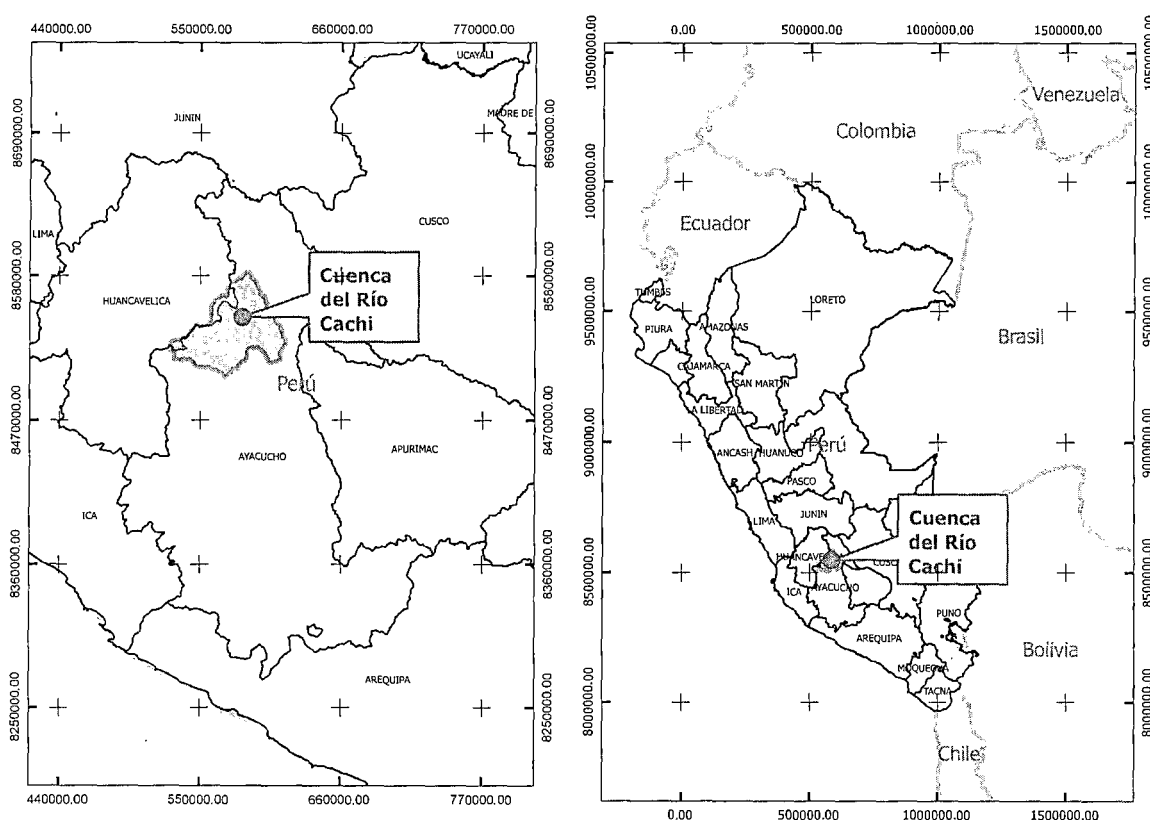
En ocasiones estas consideraciones no son suficientes [19], pueda que el error al que se quiera llegar ( $E_m$ ), no sea en ningún momento obtenido por la red, en consecuencia, tampoco obtendrán un valor de equilibrio los parámetros de la red, la aplicación entraría en un proceso infinito; para evitar este inconveniente es necesario siempre considerar en combinación con las otras alternativas un máximo número de iteraciones, y la evaluación posterior [21] de la red entrena con los registros de la validación y prueba del modelo.

### 3. Materiales y métodos

#### 3.1. Cuenca del Río Cachi

La importancia del estudio de la cuenca del Río Cachi, teniendo en cuenta el potencial hídrico en todos sus aspectos, radica porque es determinante para el desarrollo de la Región Ayacucho. Desde esta cuenca se aprovecha el recurso hídrico para abastecer de agua para consumo humano a la actual Ciudad de Ayacucho, generación de energía eléctrica y proyectos mayores de irrigación, desarrollado integralmente por el proyecto Especial Río Cachi, en la actualidad gestionado por el PRIDER (Programa Regional de Irrigación y Desarrollo Rural integrado).

Figura 9: Ubicación de la Cuenca Río Cachi



Fuente: Elaboración propia

##### 3.1.1. Punto de drenaje

El punto de drenaje considerado para la delimitación de la cuenca, superficie de interés, está determinado justo antes de la unión del río Urubamba<sup>2</sup> y el río Cahimayu (palabra proveniente del idioma quechua, traducido al español es -río salado); las coordenadas del punto de drenaje quedan establecidas en la Tabla 3.

<sup>2</sup>El nombre de los ríos Urubamba y Cahimayu se encuentran establecidos tal como se reproduce, desde la Carta Nacional (Perú)

**Tabla 3:** Punto de drenaje cuenca del Río Cachi

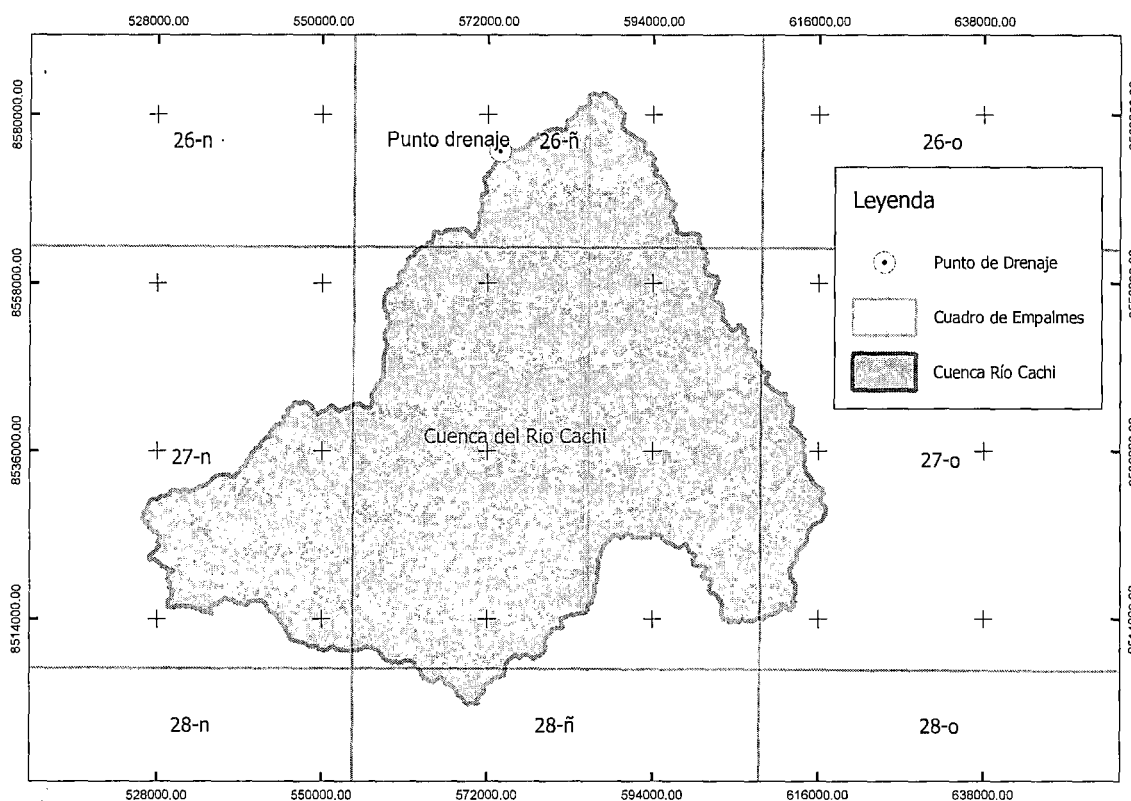
Descripción	Valor	Unidad
Este(X)	573,656.00	m
sur(Y)	8,574,492.00	m
Huso	18	
Zona	L	
Datum	WGS84	

Fuente: Elaboración propia

### 3.1.2. Ubicación política

Teniendo en cuenta la organización política del Perú, la Cuenca del Río Cachi se encuentra entre el límite de las regiones Ayacucho y Huancavelica, el punto de drenaje se encuentra ubicado al norte de la Ciudad de Ayacucho y ésta ciudad forma parte integral de la cuenca en estudio, la Figura 9 muestra la ubicación política del área de interés.

**Figura 10:** Cuenca del Río Cachi y la Carta Nacional -cuadrantes contenidos



Fuente: Elaboración propia

### 3.1.3. Ubicación geográfica

Geográficamente la cuenca del Río Cachi se encuentra entre los límites establecida en la Tabla 4.

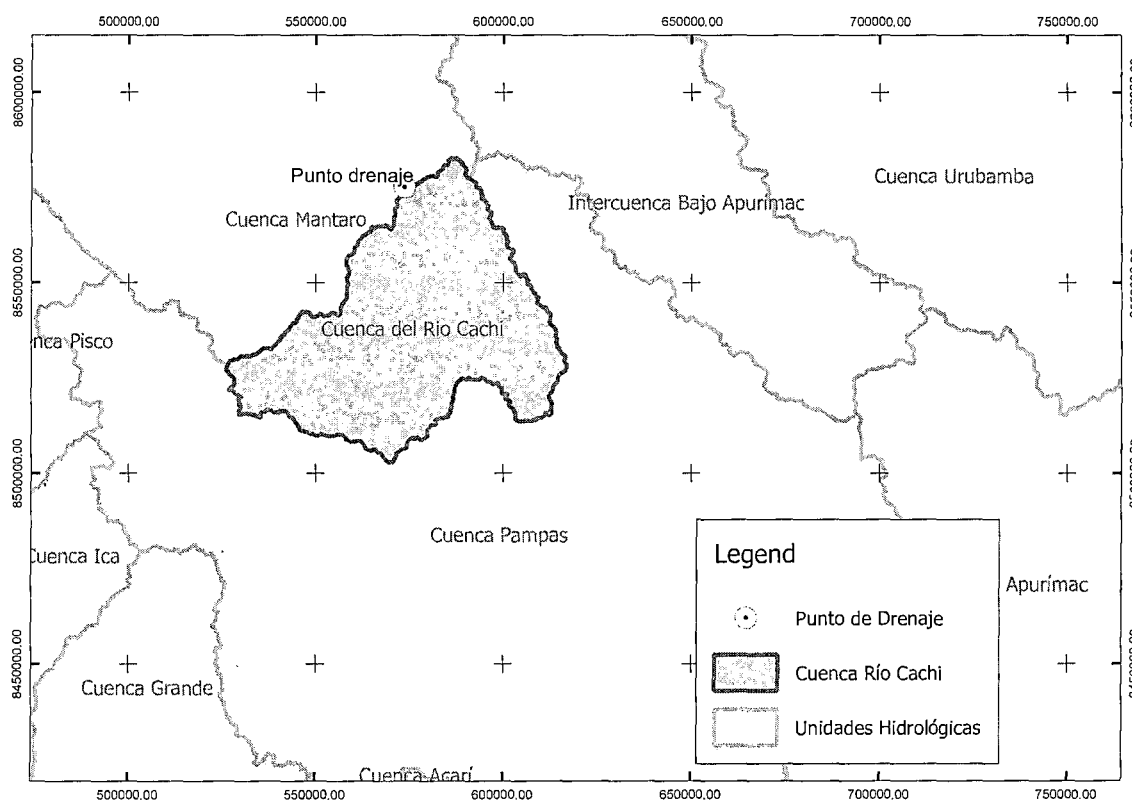
Tabla 4: Límites geográficos de la cuenca del Río Cachi

Descripción	Valor	Unidad
Este(Xmin)	526,065.69	m
Sur(Ymin)	8,502,771.92	m
Este(Xmax)	616,969.58	m
sur(Ymax)	8,582,825.07	m
Huso	18	
Zona	L	
Datum	WGS84	

Fuente: Elaboración propia

La Figura 10 muestra los cuadrantes de la Carta Nacional en su extensión para la cuenca en estudio, los mismos que se encuentran detallados en la Tabla 5.

Figura 11: ANA Unidades Hidrográficas y la cuenca de Río Cachi



Fuente: Elaboración propia

Tabla 5: Cuadrantes de la Carta Nacional para la cuenca de Río Cachi

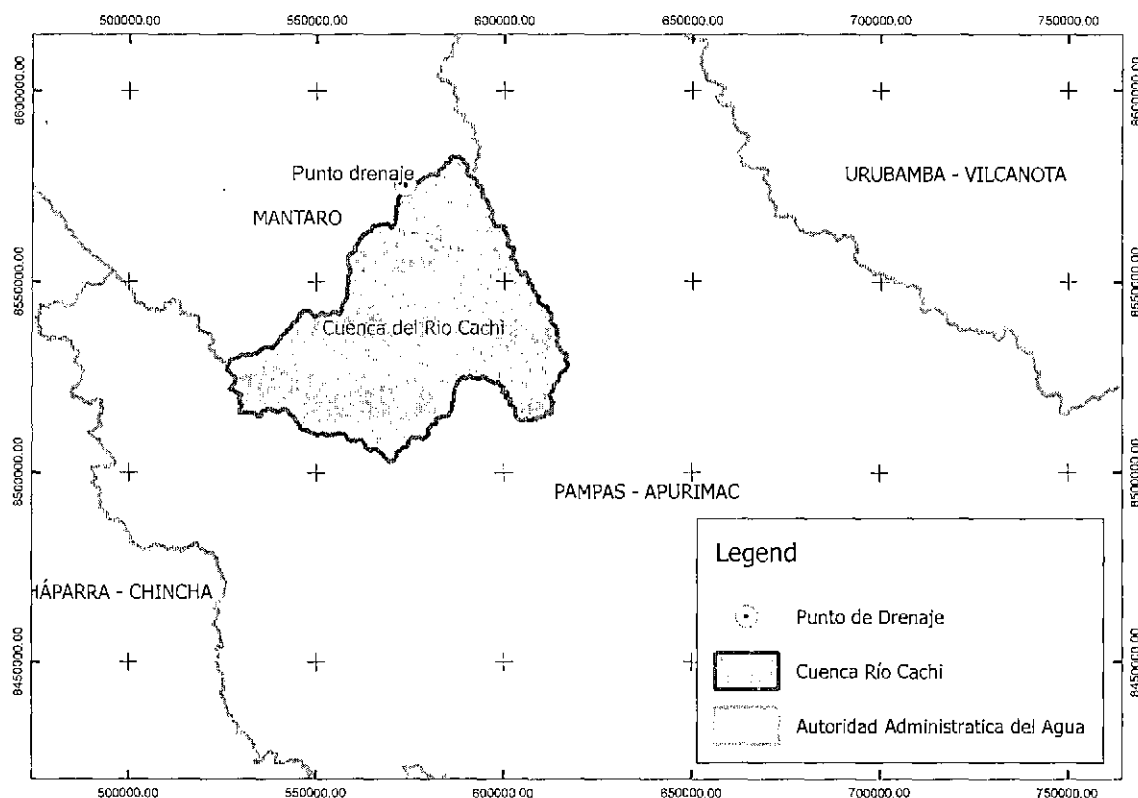
Código	Nombre
27-n	Huachocolpa
26-ñ	Huanta
27-ñ	Ayacucho
28-ñ	Huancapi
27-o	San miguel

Fuente: elaboración propia

### 3.1.4. Localización según ANA

Teniendo en cuenta la organización en Unidades hidrográficas y delimitación de AAA(Autoridad Administrativa del Agua) establecida por ANA(Autoridad Nacional del Agua), la cuenca de Río Cachi se encuentra localizada, según:

Figura 12: ANA Autoridad Administrativa del agua y la cuenca de Río Cachi



Fuente: Elaboración propia

- La Figura 11 muestra la localización de la cuenca de Río Cachi teniendo en cuenta la organización de la Unidades hidrográficas establecida por la Autoridad Nacional del Agua, la cuenca en estudio se encuentra localizada en el límite de las unidades hidrográficas de la Cuenca Mantaro y la Cuenca Pampas -aportando todo el recurso hídrico a la unidad hidrográfica Cuenca Mantaro.

*Ubicacion en la revisión de literatura.*

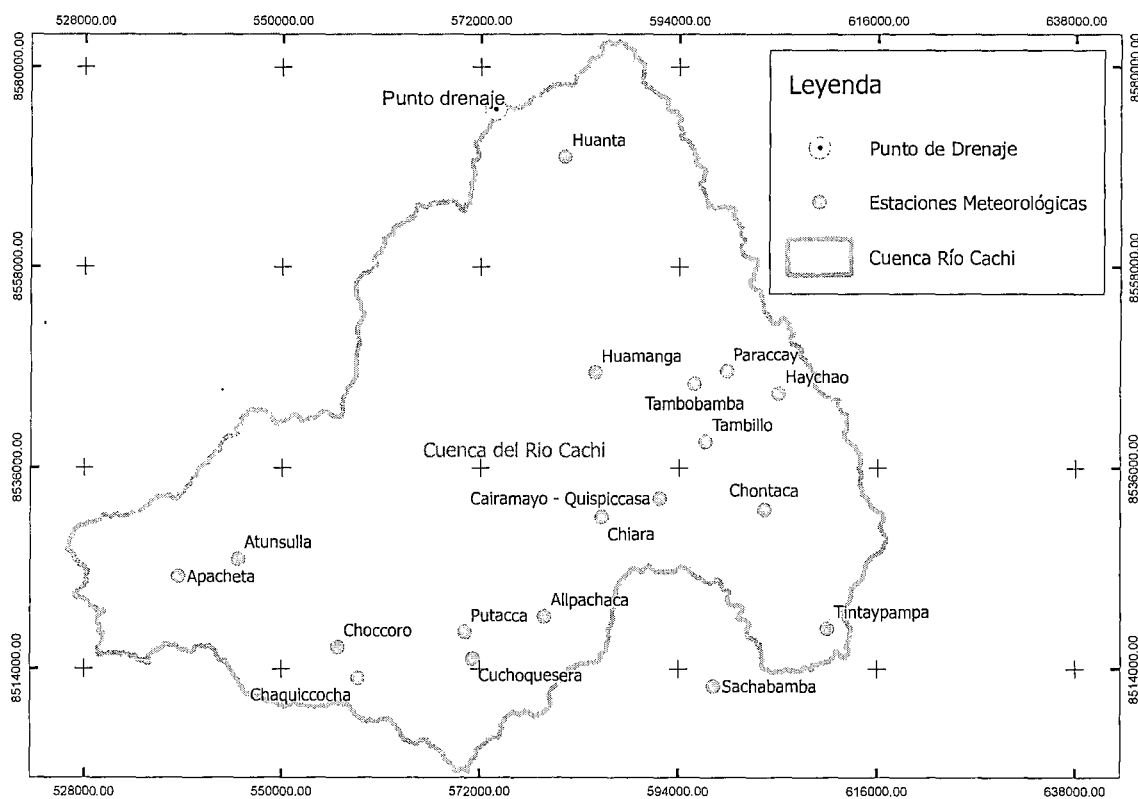


- Según la organización de la Autoridad Administrativa del Agua(AAA), la cuenca del Río Cachi se encuentra localizado en el límite de la AAA Mantaro y Pampas-Apurimac y se encuentra gestionado por la AAA Mantaro.

### 3.2. Precipitación en estaciones meteorológicas

Se dispone del registro de las precipitaciones en las estaciones meteorológicas con registros en el sitio y las obtenidas en base a la percepción remota desde los proyectos GPM(Global Precipitation Measurement) y TRMM(Tropical Rainfall Measuring Mission).

Figura 13: Estaciones meteorológicas identificadas en la cuenca del Río Cachi



Fuente: Elaboración propia

#### 3.2.1. Estaciones meteorológicas identificadas

Las estaciones meteorológicas disponibles, con registros en el sitio, se muestran en la Figura 13, la ubicación de cada uno de ellos se encuentra especificada en la Tabla 6 y la extensión de los registros disponibles se muestra en la Figura 14. La selección de las estaciones meteorológicas se efectuaron tomando en cuenta el área de influencia de la cuenca de Río Cachi y cuencas contiguas, los registros disponibles provienen del desaparecido Proyecto Especial Río Cachi.

**Tabla 6:** Estaciones meteorológicas identificadas en la Cuenca de Río Cachi (Sistema de coordenadas UTM: huso 18, zona L, Datum WGS84)

Estaciones	X(m)	Y(m)	Altura(msnm)
Putacca	570,338.05	8,518,037.15	3,589.00
Tambillo	596,944.25	8,538,914.99	3,250.00
Sachabamba	597,870.00	8,512,090.45	3,566.00
Pampa Cangallo	587,244.93	8,499,776.83	3,350.00
Huamanga	584,717.03	8,546,421.27	2,772.00
Atunsulla	545,153.43	8,526,056.00	3,900.00
Cuchoquesera	571,194.11	8,515,148.30	3,740.00
Allpachaca	579,163.58	8,519,746.44	3,550.00
Chiara	585,463.92	8,530,619.92	3,599.00
Chontaca	603,447.43	8,531,425.24	3,525.00
Tintaypampa	610,465.81	8,518,431.87	4,125.00
Choccoro	556,198.28	8,516,374.80	4,061.00
Apacheta	538,492.76	8,524,116.26	3,550.00
Cairamayo - Quispiccasa	591,896.36	8,532,665.18	3,585.00
Chilicruz - Tranka	581,018.44	8,459,518.99	2,620.00
Tambobamba	595,732.20	8,545,186.68	3,050.00
Huaychao	605,001.24	8,544,138.71	3,225.00
Huanta	581,354.78	8,570,117.50	2,620.00
Paraccay	599,289.94	8,546,587.21	2,900.00
Chaquiccocha	558,481.75	8,512,974.03	4,114.00

Fuente: Elaboración propia

### 3.3. Precipitaciones TRMM

El proyecto TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) se encuentra en operación registrando las precipitaciones desde el año 1997 hasta la actualidad, el campo de acción queda restringida hasta los trópicos, 50° latitud norte y sur (sistema de referencia WGS84), con una resolución espacial de 0.25° (aproximadamente 27km en la línea acuatorial) y disponiendo de una resolución temporal dependiendo de los registros requeridos: registros de tres horas, diaria, mensual, etc. Mientras el proyecto GMP (Global Precipitation Measurement) extiende las capacidades del TRMM para el registro de las precipitaciones en toda la tierra, lanzado el 27 de febrero de 2014. Ambos proyectos son un esfuerzo conjunto de la NASA (National Aeronautics and Space Administration) y JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency). Gpm y TRMM, ambos forman el proyecto PMM (Precipitation Measurement Mission).

Los registros para el usuario final se encuentran en distintos formatos HDF (Hierarchical Data Format), NetCDF (Network Common Data Form), ASCII (American Standard Code for Information Interchange) y KMZ (Google Earth formats). Estos archivos se encuentran georeferenciados para el tratamiento inmediato por una aplicación para sistemas de información geográfica. El producto 3B42 V7 derivado, es un registro de las precipitaciones diarias que es posible obtener libremente desde TRMM, las cuales

Figura 14: Registros disponibles en las estaciones meteorológicas identificadas

Nro	ESTACION	AÑOS																								
		1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
1	Putacca																									
2	Tambillo																									
3	Sachabamba																									
4	Pampa Cangallo																									
5	Huamanga																									
6	Atunsulla																									
7	Cuchoquesera																									
8	Allpachaca																									
9	Chiara																									
10	Chontaca																									
11	Pucaloma																									
12	Tintaypampa																									
13	Choccoro																									
14	Apacheta																									
15	Cairamayo - Quispiccasa																									
16	Chilicruz - Tranka																									
17	Tambobamba																									
18	Haychao																									
19	Jollca																									
20	Huanta																									
21	Paraccay																									
22	Chaquiccocha																									

Fuente: Elaboración propia

se validarán y se generalizarán en base a un modelo de inteligencia artificial, específicamente mediante los redes neuronales artificiales de base radial, aplicado a la cuenca del Río Cachi.

La Figura 15 muestra la precipitación registrada por TRMM para el 01 de enero de 2006, delimitado para la superficie de interés -la cuenca del Río Cachi, en la misma se observa la máxima precipitación obtenida  $28.257mm$ , es importante tener en cuenta que este valor es constante para toda la celda del archivo raster, formada por la resolución espacial de  $0.25^\circ * 0.25^\circ$  ( $27km * 27km = 729km^2$  aproximadamente), conociendo que la cuenca del Río Cachi cuenta con una superficie de  $3,609.86km^2$ , está contenido en aproximadamente 5 celdas, considerando la resolución espacial TRMM. Los datos son obtenidos desde la página oficial de PMM<sup>3</sup>.

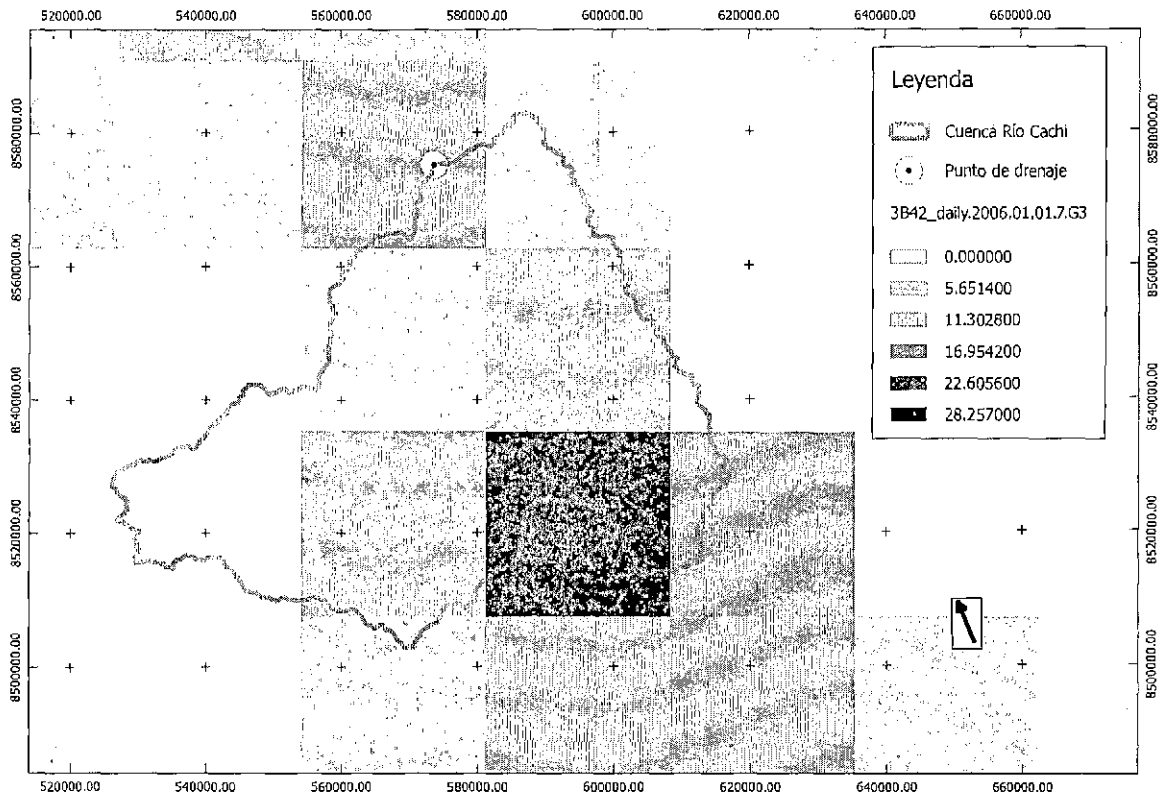
### 3.3.1. Selección del producto

Disponiendo de los registros de las precipitaciones para distintos intervalos de tiempo, la elección del producto está en relación de la obtención del hidrograma para fines específicos: el hidrograma de máximas avenidas y los caudales medios mensuales. las precipitaciones necesarias en distintos intervalos de tiempo son derivados simplemente

<sup>3</sup><http://pmm.nasa.gov/>



Figura 15: Precipitación TRMM y la cuenca del Río Cachi



Fuente: Elaboración propia

de las precipitaciones acumuladas diarias, así disponiendo de este registro la obtención de las precipitaciones mensuales y anuales, es de inmediato. Para la validación se utilizará el producto derivado *3B42v7* -correspondiente al registro de la precipitación diaria de TRMM, cuyos registros serán delimitados para la superficie de la cuenca del Río Cachi.

### 3.3.2. Estaciones meteorológicas y TRMM

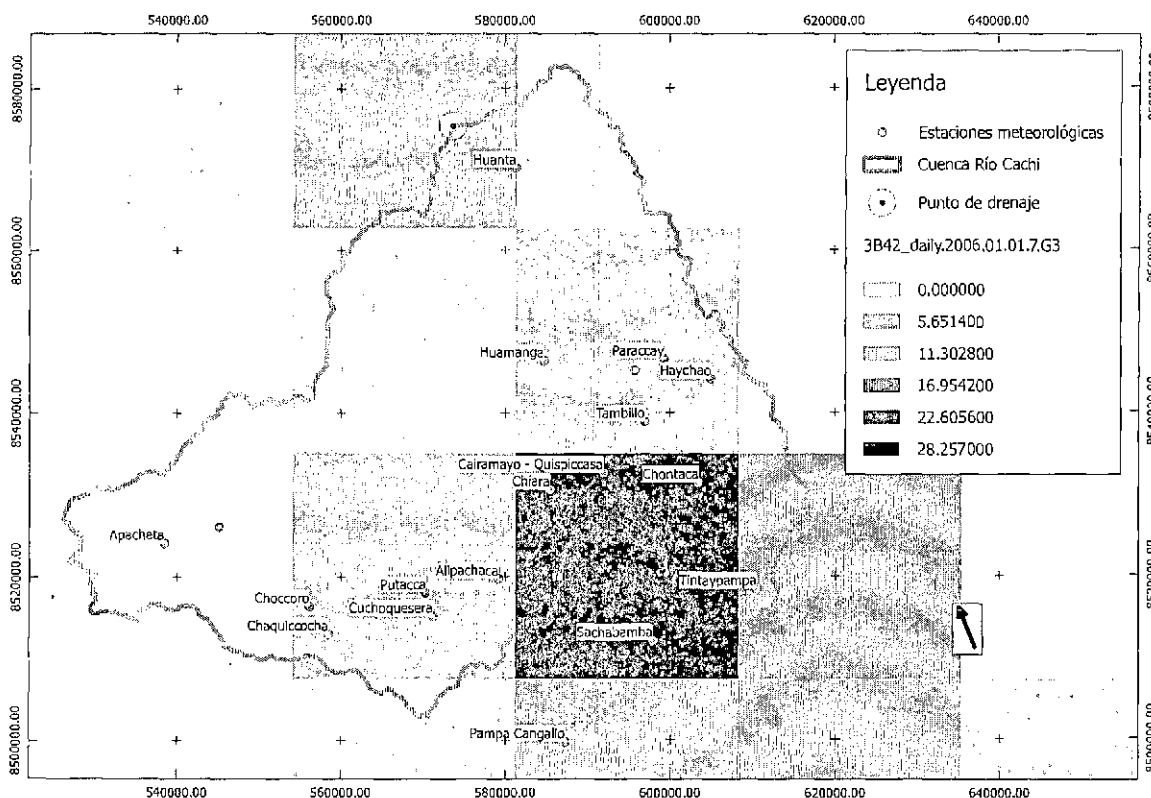
La Figura 16 representa la relación existente entre la resolución espacial considerado para la representación de las precipitaciones por TRMM, la superficie de la Cuenca del Río Cachi y las estaciones meteorológicas, donde se observa:

- Una celda del archivo tipo raster contienen un único valor, en este caso una magnitud que representa la precipitación, para la celda que representa una precipitación de  $28.257\text{mm}/\text{día}$ , en cuya superficie se identifica 5 estaciones meteorológicas: las estaciones Sachabamba, Tintaypampa, Chontaca, Cayramayu y Chiara -cada una de las estaciones con registros distintos para el día considerado, el 01 de enero de 2006, en la Figura 16.
- De igual manera, para una precipitación TRMM de  $16.9542\text{mm}/\text{día}$  se disponen varios registros en las estaciones meteorológicas, específicamente en las estaciones: Choqoro, Cachiucha, Cuchoquesera, Putaqa y Allpachaka.

- Algunas celdas del TRMM se corresponden con una sola estación meteorológica, debido a la poca densidad de las estaciones a nivel del suelo.

Los registros de las precipitaciones obtenidas en las estaciones meteorológicas tienen menor incertidumbre respecto a las precipitaciones obtenidas mediante técnicas de la percepción remota, tal como los registros TRMM; por tanto, las precipitaciones así obtenidas, desde el TRMM, serán corregidas mediante modelos basados en inteligencia artificial.

**Figura 16:** Precipitación TRMM, cuenca del Río Cachi y estaciones meteorológicas

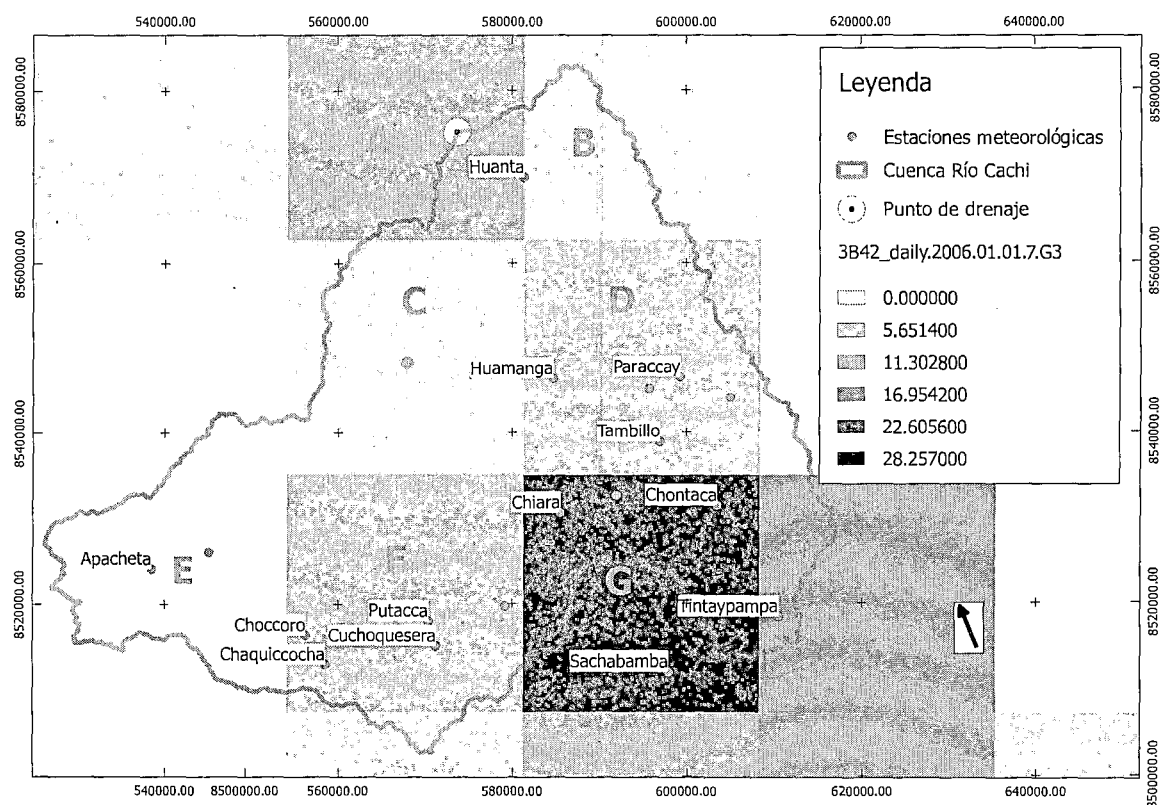


Fuente: Elaboración propia

### 3.3.3. Estaciones sintéticas

Los registros obtenidos por los proyectos GPM y TRMM se encuentran disponibles para el territorio nacional a partir del año 1998, se utilizará el *producto 3B42 v7*, correspondiente al registro de la precipitación diaria, para el cual se crean estaciones sintéticas en la para cada celda que se encuentran contenidos en la superficie de la cuenca Río Cachi, la Figura 17 muestra las celdas seleccionadas y cada una corresponde a una estación sintética, identificadas con los códigos A, B, ..., H.

Figura 17: Estaciones sintéticas TRMM en la cuenca del río Cachi



Fuente: Elaboración propia

### 3.4. Análisis de registros anuales

#### 3.4.1. Análisis de homogeneidad o consistencia

Una serie de datos es llamada homogénea<sup>4</sup> si es una muestra de una única población, si los datos evaluados son no homogéneos se deben realizar correcciones para volverla homogénea, de manera que las estimaciones estadísticas muestrales sean válidas estimaciones de los parámetros poblacionales.

En los análisis climatológicos se utiliza el término de homogeneidad de la serie y en los análisis hidrológicos se emplea el término de consistencia de la serie, ambos términos son sinónimos pues indican un cambio en la cantidad de lluvia medida por una estación. La homogeneidad se analiza comúnmente a través de técnicas estadísticas, y en cambio, la consistencia por lo general se detecta con la técnica de la curva masa doble.

Entre los tipos de pruebas estadísticas de homogeneidad se tiene:

- Prueba estadística de Helmert

<sup>4</sup>Esta sección está transcrito (temporalmente) desde el texto Procesos del Ciclo Hidrológico, autor Carlos Aranda.

- Prueba estadística de las secuencias
- Prueba estadística de la t de student
- Prueba estadística de Cramer
- Prueba estadística de Wald - Wolfowitz
- Técnicas de la curva masa doble

### 3.4.2. Análisis de promedios móviles

Luego de analizar la inconsistencia de las lluvias anuales, es necesario estudiar tal registro como una serie cronológica o series de tiempo; mediante esta técnica se detecta los *años secos* y *años húmedos*, así como la *tendencia* y *estacionalidad* de la serie, si ésta existe.

Una serie cronológica o serie de tiempo es toda secuencia de observaciones tomados en tiempos específicos y generalmente igualmente espaciados. una serie cronológica dispone de cuatro componentes característicos :

- Tendencia: indica hacia donde “tiende” la serie cronológica.
- Componente estacional: indica las variaciones periódicas que ocurren a largo plazo - en periodos mayores a un año.
- Componente irregular: indica las variaciones de los componentes que ocurren al azar (aleatoriedad).

### 3.5. Diseño del modelo

Se diseñan dos modelos para la validación de las precipitaciones máximas en veinticuatro horas y las precipitaciones mensuales:

- El modelo AN2P24, corrige las precipitaciones TRMM, específicamente el producto 3B42 en la cuenca del río Cachi
- El modelo AN2PM, corrige el producto 3B43, precipitaciones mensuales del proyecto TRMM

El diseño se efectúa probando distintas alternativas, considerando las variables climáticas y geográficas, el modelo que devuelve mejores resultados son las que consideran solamente las precipitaciones como variables de ingreso al los modelos diseñados, los Gráficos 18 al 20 representan los registros de entrenamiento, validación y prueba de las precipitaciones a nivel mensual y la Figura 21 muestra el grado de aprendizaje, el error cuadrático medio en la etapa de entrenamiento del modelo AN2PM.

## 4. Resultados

Los resultados del presenta trabajo son dos modelos que se basan en las redes neuronales artificiales para la validación de las precipitaciones máximas en 24 horas y las precipitaciones mensuales obtenidas desde el proyecto TRMM.

### 4.1. Modelo AN2P24

AN2P24 es un acrónimo de redes neuronales artificiales y las precipitaciones a nivel diario, es un modelo diseñado para validar las precipitaciones máximas en 24 horas, obtenidas desde el producto 3B42 derivado registrado pro el proyecto TRMM. La arquitectura del modelo AN2P24 queda establecida en la Tabla 7

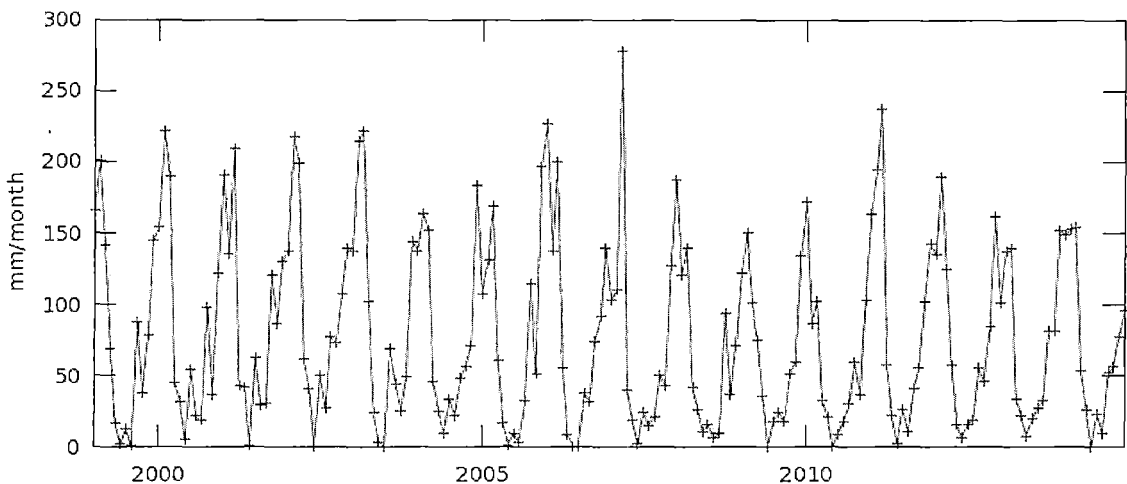
**Tabla 7:** Arquitectura del modelo AN2P24

Componentes de la arquitectura	Número de neuronas
Capa de entrada	4
Capa oculta	18
Capa de salida	1

Los parámetros del modelo: funciones de entrada, activación y de transferencias, centros de las funciones de base radial, amplitud de las funciones de base radial, pesos de las conexiones y umbrales son específicos para el modelo obtenido.

**Figura 18:** Registro estación sintética A, producto 3B43

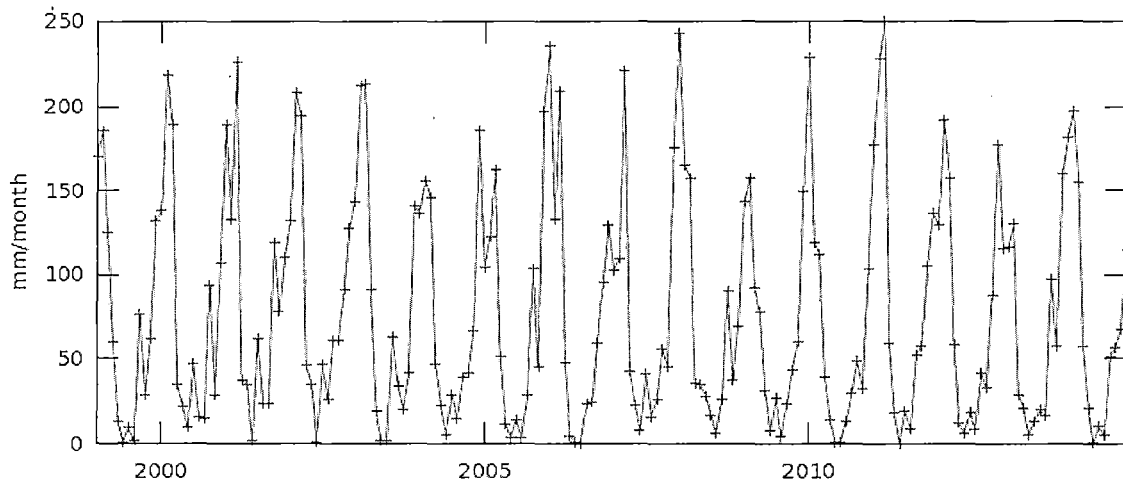
Time Series, Area-Averaged of Precipitation Rate monthly 0.25 deg. [TRMM TRMM\_3B43 v7] mm/month over 1999-Jan - 2014-Dec, Region 74.1594W, 13.1987S, 74.1594W, 13.1987S



Fuente: Plataforma GIOVANNI v4.15

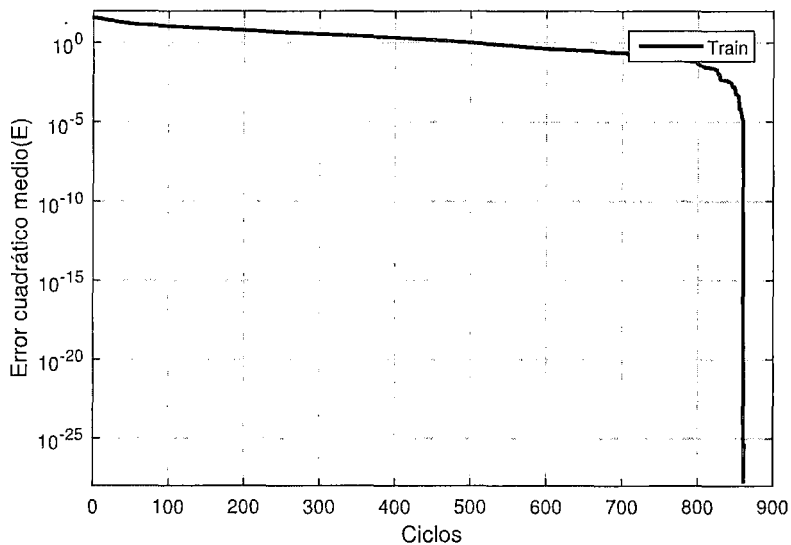
**Figura 19:** Registro estación sintética B, producto 3B43

Time Series, Area-Averaged of Precipitation Rate monthly 0.25 deg. [TRMM TRMM\_3B43 v7] mm/month over 1999-Jan - 2014-Dec, Region 74.1447W, 13.2983S, 74.1447W, 13.2983S



Fuente: Plataforma GIOVANNI v4.15

**Figura 21:** Error cuadrático medio

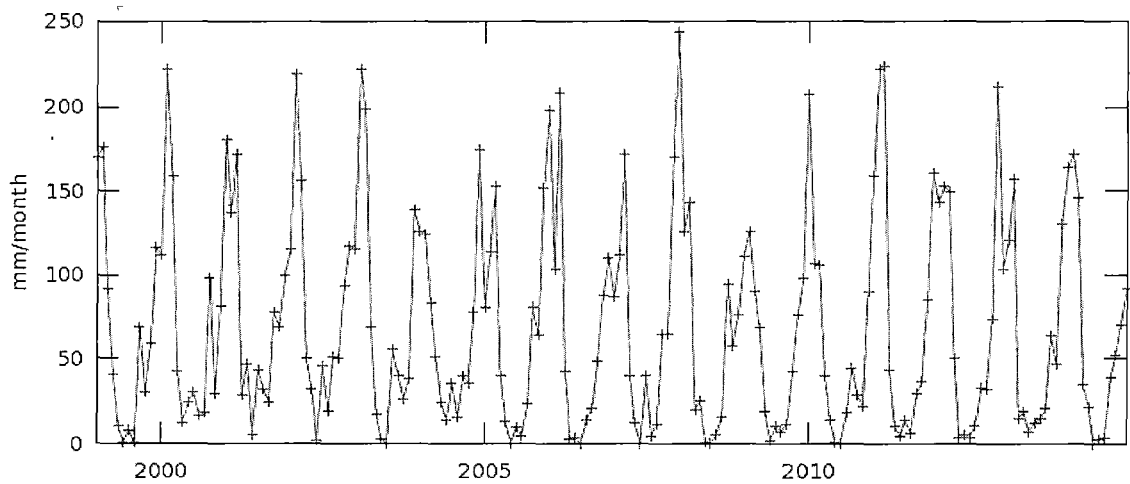


Fuente: Elaboración propia

Loas argumentos de entrada para cada registro en el modelo son: la precipitación en 24 horas obtenidos desde TRMM, la altura sobre el nivel del mar, latitud y longitud, considerando el sistema de referencia UTM. Las Figuras 18 al 20, representan registros de entrenamiento, validación y prueba para el modelo AN2PM.

Figura 20: Registro estación sintética C, producto 3B43

Time Series, Area-Averaged of Precipitation Rate monthly 0.25 deg. [TRMM TRMM\_3B43 v7] mm/month over 1999-Jan - 2014-Dec, Region 73.9738W, 13.3105S, 73.9738W, 13.3105S



Fuente: Plataforma GIOVANNI v4.15

## 4.2. Modelo AN2PM

Modelo específico para la validación del producto 3B43 TRMM en la cuenca del río Cachi, la arquitectura correspondiente al modelo se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8: Arquitectura del modelo AN2PM

Componentes de la arquitectura	Número de neuronas
Capa de entrada	1
Capa oculta	12
Capa de salida	1

Los centros de las funciones de base radial, amplitud de las funciones de base radial, pesos de las conexiones y umbrales son específicos para el modelo obtenido. El modelo AN2P24 requiere de ingreso solamente el registro de la precipitación mensual TRMM y devuelve la precipitación corregida. La Figura 21 muestra el grado de aprendizaje del modelo en su arquitectura seleccionada.

Los registros obtenidos como fuente de información fueron analizados tomando en consideración las pruebas de consistencia y homogeneidad, los métodos utilizados con esta finalidad son las pruebas estadísticas de Helmert y la prueba de las secuencias, estas pruebas se efectúan a nivel anual, por tanto se utilizaron las precipitaciones anuales, para las estaciones sintéticas creadas y las estaciones meteorológicas identificadas.

## 5. Discusión

En esta sección se analiza la confiabilidad, validez y objetividad de los modelos obtenidos en el desarrollo de la investigación.

### 5.1. Análisis del modelo AN2P24

Modelo que valida las precipitaciones TRMM, el producto 3B42, a nivel de las precipitaciones máximas en 24 horas.

#### 5.1.1. Confiabilidad

La confiabilidad<sup>5</sup> de un modelo se refiere al grado que su aplicación repetida al mismo patrón de muestra devolverá siempre los mismos resultados. La evaluación gráfica de la confiabilidad se verifica con muchos patrones de entrada, al evaluar los mismos resultados para el conjunto de argumentos evaluados. Sin embargo, mostrar la confiabilidad gráficamente es poco usual, se utiliza ampliamente los coeficientes de confiabilidad estadísticos y para el modelo se muestran en la Tabla 9.

**Tabla 9:** Coeficientes de confiabilidad

Descripción	Coficiente de correlación
Pearson	0.980847305
Kendall	0.911198579
Spearman	0.977221228

La evaluación se efectúa a nivel de los resultados del modelo obtenido y los registros disponibles en las estaciones meteorológicas identificadas. Desde la Tabla 9 se observan coeficientes de confiabilidad muy adecuados, que garantiza el uso de los modelos basados en la inteligencia artificial en los campos donde no se dispone de modelos determinísticos.

#### 5.1.2. Validez

La validez, en términos generales, se refiere al grado en que un instrumento mide realmente la variable que pretende medir; para su evaluación se considera las alternativas siguientes:

- Evidencia relacionada con el criterio
- Evidencia relacionada con el contenido
- Evidencia relacionada con el constructo

---

<sup>5</sup>Metodología de Investigación, autor: Roberto Hernández Sampieri y otros



Los resultados del modelo se efectuaron tomando en consideración la *evidencia relacionada con el contenido*, que consiste en verificar que los resultados se encuentren dentro de los registros de datos disponibles, la Tabla 10 muestra los valores límites para las precipitaciones máximas en 24 horas y los resultados del modelo se se corresponden con dichos valores límites.

**Tabla 10:** Evidencia relacionada con el contenido

Descripción	Pmax24horas (mm)
máximo	49.80
mínimo	16.00

### 5.1.3. Objetividad

La objetividad se refiere al grado en que el modelo es o no permeable a la influencia de los sesgos y tendencias de los investigadores que lo administran, califican e interpretan. Para el modelo AN2P24, la objetividad se encuentra relacionada con el error de aprendizaje del modelo, el error cuadrático medio, evaluado en  $3.92 * 10^{-8}$  para 900 ciclos de aprendizaje, la Tabla 11 muestra el error cometido para distintos ciclos de aprendizaje del modelo AN2P24.

**Tabla 11:** Ciclos de aprendizaje y el error cuadrático medio

Ciclos	Error C. M.
100	5.26613
200	1.8294
600	0.820247
900	3.92E-8
1200	1.98E-16

## 6. Conclusiones

- El proceso de diseño basado en redes neuronales artificiales, teniendo en cuenta su arquitectura, se dispone de muchas alternativas, la elección depende de mejores parámetros de valuación para las condiciones del modelo. En la selección de la arquitectura del modelo final se tomó en consideración aquella que genera mejores indicadores de confiabilidad, validez y objetividad, así obedeció de igual manera el tiempo de entrenamiento del modelo seleccionado.
- El modelo diseñado AN2P24, genera a partir de las condiciones topográficas asociadas a un punto (latitud, longitud, altitud) y las precipitaciones registradas del proyecto TRMM, producto 3B42, genera las precipitaciones equivalentes a las registradas en las estaciones meteorológicas para la cuenca del Río Cachi, bajo las condiciones de la confiabilidad, validez y objetividad asociado al modelo diseñado.
- Partiendo de las precipitaciones TRMM, producto 3B42, cuya resolución espacial es de  $0.25^\circ$ , se logra particularizar las precipitaciones a un determinado punto.

## Referencia bibliográfica

- [1] Arbib, M., *The handbook of brain theory and neural networks*; MIT Press: Cambridge, Mass, 2003.
- [2] Carchado, M., *Redes Neuronales Artificiales: Un enfoque práctico*; Universidad de Vigo: 2000.
- [3] Cartwright, H., *Artificial neural networks*; Springer: New York, NY, 2015.
- [4] De Robertis D. P., E.; Hib, J. y Ponzio, R., *Biología celular y molecular - Cellular and Molecular Biology (Spanish Edition)*; El Ateneo: 2006.
- [5] Graupe, D., *Principles of Artificial Neural Networks (Advanced Series in Circuits and Systems)*; World Scientific Publishing Company: 2007.
- [6] Gurney, K., *An Introduction to Neural Networks*; CRC Press: 1997.
- [7] Hagan, M. T.; Demuth, H. B.; Beale, M. H. y col., *Neural network design*; Pws Boston: 1996.
- [8] Harvey, R.; *Neural network principles*; Prentice Hall: Englewood Cliffs, NJ, 1994.
- [9] Hassoun, M., *Fundamentals of Artificial Neural Networks*; A Bradford Book: 2003.
- [10] Hilera Gonzalez, J. R., *Redes neuronales artificiales: Fundamentos, modelos y aplicaciones (Serie Paradigma) (Spanish Edition)*; RA-MA: 1995.
- [11] Isasi Viñuela, P. y Galván León, I. M., *Redes de Neuronas Artificiales - Un Enfoque Practico (Spanish Edition)*; Hall, P. P., ed.; Pearson Educación: 2005.
- [12] Jain, L. C., *Recent advances in artificial neural networks : design and applications*; CRC Press: Boca Raton, 2000.
- [13] Karp, G., *Biología Celular y Molecular*; Mc Graw-Hill: 2010.
- [14] López, R. F. y Fernández, J. M. F., *Las Redes Neuronales Artificiales (Spanish Edition)*; NetBiblo S.L.: 2008.
- [15] Mukensh, K. y Shire Nagendra, S. M., *Artificial Neural Network in Vehicular Pollution Modeling*; Springer: 2007.
- [16] Rubin G., M. y Safdieh E., J., *Netter. Neuroanatomía esencial (Spanish Edition)*; Elsevier Masson: 2008.
- [17] Sánchez Camperos, E. y Alanís García, A. Y., *Redes Neuronales: Conceptos Fundamentales y Aplicaciones a Control Automatico*; PEARSON: 2010.
- [18] Suzuki, K., *Artificial Neural Networks: Architectures and Applications*; Intech: 2014.
- [19] Tadeusiewicz, R., *Exploring neural networks with C*; CRC Press: Boca Raton, FL, 2015.
- [20] Yegnanarayana, B., *Artificial Neural Networks*; Prentice-Hall of India Pvt.Ltd: 2004.
- [21] Yeung, D., *Sensitivity analysis for neural networks*; Springer: Heidelberg New York, 2010.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE  
SAN CRISTOBAL DE HUAMANGA  
Oficina de Gestión de la Investigación

## RECOMENDACIONES GENERALES PARA LA REDACCIÓN DEL INFORME FINAL 2015

1. **Carátula:** Considerar la información correspondiente, incluyendo "Informe Final" y fecha actualizada. No olvidar que la modificación del título necesita autorización previa del Coordinador de la Unidad de Investigación e Innovación, aprobada por el Consejo de Facultad.
2. **Agradecimiento:** Es opcional y se trata de reconocer a personas y/o instituciones que han hecho posible la investigación, incluyendo el apoyo financiero o logístico.
3. **Resumen:** Debe escribirse en español y en inglés, debiendo contener 250 palabras como máximo, expresando el propósito del trabajo, procedimiento, resultados, impacto y aporte científico. Concluye con las palabras clave.
4. **Introducción:** Describir la importancia del tema abordado, el fundamento científico y el contenido del propio informe final.
5. **Revisión de literatura:** Comenzar con antecedentes y desarrollar los temas considerados específicamente en torno al título del Informe. No deberá exceder de 15 páginas.
6. **Materiales y Métodos:** Describir la metodología utilizada.
7. **Resultados:** Presentar los resultados ya sea en tablas, figuras, fotografías, flujogramas y otras formas, debiendo colocar en cada caso la numeración correlativa y el título correspondiente.
8. **Discusión:** Desarrollar la discusión en base a la revisión de la literatura presentada y tomando en cuenta información actualizada de artículos, libros, capítulos de libro, resúmenes de congresos, etc.
9. **Conclusiones:** Deben reflejar la síntesis de los resultados y el logro de los objetivos.
10. **Referencias bibliográficas:** Redactar esta sección tomando en cuenta las recomendaciones del Estilo Harvard (para las áreas de ciencias y letras en general) y el Estilo Vancouver (para el área de ciencias de la salud).
11. El artículo científico no lleva Revisión de literatura ni conclusiones, máximo 15 páginas.

**NOTA:** Presentar 03 ejemplares impresos y una copia en formato digital (CD) del Informe Final 2015 a la Coordinación de su Unidad de Investigación e Innovación.

Ayacucho, 10 de diciembre de 2015

OFICINA DE GESTION DE LA INVESTIGACION

# VALIDACION DE LA PRECIPITACION GPM (GLOBAL PRECIPITATION MEASUREMENT) MEDIANTE REDES NEURONALES ARTIFICIALES DE BASE RADIAL

Programa: Ingeniería Civil - Área: Hidráulica y Recursos Energéticos  
Canchari Gutiérrez, Edmundo  
edmundo.canchari@unsch.edu.pe

## Resumen

El propósito del trabajo es validar las precipitaciones obtenidas mediante el proyecto TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) para una cuenca hidrográfica local, en base a las precipitaciones registradas en las estaciones meteorológicas disponibles se contrastan los productos 3B42 y 3B43, que expresan las precipitaciones diarias y mensuales respectivamente, para cuyo fin se diseñan modelos basados en redes neuronales artificiales de base radial, un modelo para cada producto, se buscó relacionar las precipitaciones con las condiciones geográficas (altitud, latitud, longitud), disponiendo de variadas alternativas en cuanto a la arquitectura del modelo y datos de ingreso, se presentan como resultado dos modelos para la validación de la precipitación diaria máxima anual y las precipitaciones mensuales, los modelos obtenidos son de vital importancia para la generación de estaciones sintéticas en zonas donde no se dispone de estaciones meteorológicas, estos modelos contribuyen directamente al planeamiento eficaz para el aprovechamiento hídrico.

**Palabras clave:** precipitación, TRMM, GPM, PMM, redes neuronales artificiales.

## Abstract

VALIDATION OF PRECIPITATION GPM (GLOBAL PRECIPITATION MEASUREMENT) BY ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS RADIAL BASIS

The purpose of this work is to validate precipitation obtained by the TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) project for a local watershed, based on the rainfall in the weather stations available the 3B42 and 3B43 contrast products, expressing the daily and monthly rainfall respectively, para cuyo fin se diseñan modelos basados en redes neuronales artificiales de base radial, a model for each product, It seeks to relate precipitation to geographical conditions (altitude, latitude, longitude), providing several alternatives as to the architecture model and input data, occurs as a result of two models for validation of the annual maximum daily rainfall and monthly rainfall, the models obtained are of vital importance for the generation of synthetic stations in areas where there are no weather stations, these models directly contribute to effective planning for water use.

**Key words:** precipitation, TRMM, GPM, PMM, artificial neural networks.

## 1. INTRODUCCIÓN

El trabajo desarrollado es importante porque regionaliza las precipitaciones obtenidas mediante percepción remota, registro de precipitaciones disponibles desde el proyecto TRMM, los productos validados para la Cuenca del Río Cachi son 3B42 y 3B43, registros de precipitaciones diarias y mensuales; el registro de la precipitación diaria máxima anual es fundamental en Ingeniería Civil, para el dimensionamiento de todas estructuras hidráulicas, mientras las precipitaciones mensuales se utilizan en procesos de balance hídrico, dimensionamiento de embalses, etc. El proyecto GPM (Global Precipitation Measurement) es una extensión del TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission), que extiende el registro de las precipitaciones a todo el mundo, mediante este proyecto se extiende los registros disponibles hasta los trópicos obtenidos por TRMM; GPM utiliza la base de datos disponible desde el año 2008 de las precipitaciones acumuladas en tres horas, diarias y mensuales registrada hasta los trópicos por TRMM, en la presente investigación se utiliza el producto 3B42 (V7) -daily precipitation- cuyo propósito es la validación en base a registros disponibles en las estaciones climatológicas de la cuenca del Río Cachi, con ésta finalidad de diseñar un modelo metaheurístico basado en las redes neuronales artificiales (RNA), específicamente las RNA de base radial. El uso de las precipitaciones medidas mediante la percepción remota, desde su origen, se extendió en todos los países, debido a la poca densidad en la distribución de las estaciones climatológicas -lo mismo que sucede en el Perú, de los inconvenientes frecuentes por falta de los registros de precipitación o la nula existencia de registros de variables hidrológicas en el punto donde se fundará una estructura hidráulica, en todo los proyectos de aprovechamiento hídrico.

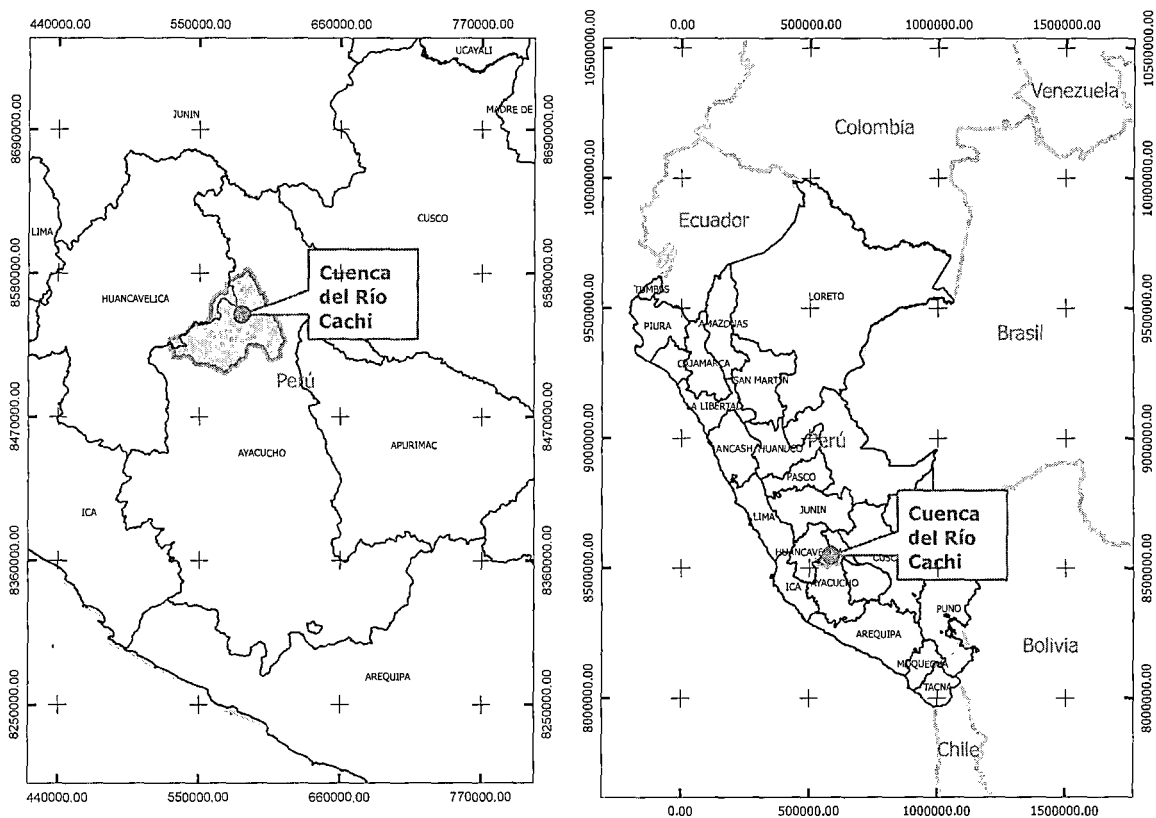
Las *Redes Neuronales Artificiales* son modelos simplificados de las *Redes Neuronales Naturales* [2, 4, 3, 1] cuya finalidad es imitar el proceso de aprendizaje humano. Los elementos básicos de una neurona biológica (el núcleo, cuerpo celular, dendrita, axón, terminal del axón, la sinapsis) que conforman como elementos básicos y necesarias para generar una neurona artificial. Los modelos artificiales de las neuronas biológicas

utilizan elementos fundamentales para su representación, se consideran los datos de entrada, los pesos sinápticos, el núcleo de la neurona es representado generalmente mediante un círculo y es optativo considerar el valor de la umbral, la información fluye de acuerdo a la orientación del grafo dirigido; para su funcionamiento, las neuronas artificiales, imitando a las biológicas, se agrupan entre ellos formando un sistema de redes neuronales artificiales, donde el elemento fundamental es la neurona artificial.

## 2. MATERIAL Y MÉTODOS

### 2.1. Delimitación espacial

Figura 1: Ubicación de la Cuenca Río Cachi



Fuente: Elaboración propia

La importancia del estudio de la cuenca del Río Cachi, teniendo en cuenta el potencial hídrico en todos sus aspectos, radica porque es determinante para el desarrollo de la Región Ayacucho. Desde esta cuenca se aprovecha el recurso hídrico para abastecer de

agua para consumo humano a la actual Ciudad de Ayacucho, generación de energía eléctrica y proyectos mayores de irrigación, desarrollado integralmente por el proyecto Especial Río Cachi, en la actualidad gestionado por el PRIDER (Programa Regional de Irrigación y Desarrollo Rural integrado).

Teniendo en cuenta la organización política del Perú, la Cuenca del Río Cachi se encuentra entre el límite de las regiones Ayacucho y Huancavelica, el punto de drenaje se encuentra ubicado al norte de la Ciudad de Ayacucho y ésta ciudad forma parte integral de la cuenca en estudio, la Figura 1 muestra la ubicación política del área de interés.

## **2.2. Precipitación en estaciones meteorológicas**

Se dispone del registro de las precipitaciones en las estaciones meteorológicas con registros en el sitio y las obtenidas en base a la percepción remota desde los proyectos GPM (Global Precipitation Measurement) y TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission).

### **2.2.1. Estaciones meteorológicas identificadas**

Las estaciones meteorológicas disponibles, con registros en el sitio y sus registros disponibles se muestran en la Figura 2. La selección de las estaciones meteorológicas se efectuaron tomando en cuenta el área de influencia de la cuenca de Río Cachi y cuencas contiguas, los registros disponibles provienen del desaparecido Proyecto Especial Río Cachi.

## **2.3. Precipitaciones TRMM**

El proyecto TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) se encuentra en operación registrando las precipitaciones desde el año 1997 hasta la actualidad, el campo de acción queda restringida hasta los trópicos, 50° latitud norte y sur (sistema de referencia WGS84), con una resolución espacial de 0.25° (aproximadamente 27km en la



Figura 2: Registros disponibles en las estaciones meteorológicas identificadas

Nro	ESTACION	AÑOS																									
		1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	
1	Putacca																										
2	Tambillo																										
3	Sachabamba																										
4	Pampa Cangallo																										
5	Huamanga																										
6	Atunsulla																										
7	Cuchoquesera																										
8	Allpachaca																										
9	Chiara																										
10	Chontaca																										
11	Pucaloma																										
12	Tintaypampa																										
13	Choccoro																										
14	Apacheta																										
15	Cairamayo - Quispiccasa																										
16	Chilicruz - Tranka																										
17	Tambobamba																										
18	Haychao																										
19	Jollca																										
20	Huanta																										
21	Paraccay																										
22	Chaquiccocha																										

Fuente: Elaboración propia

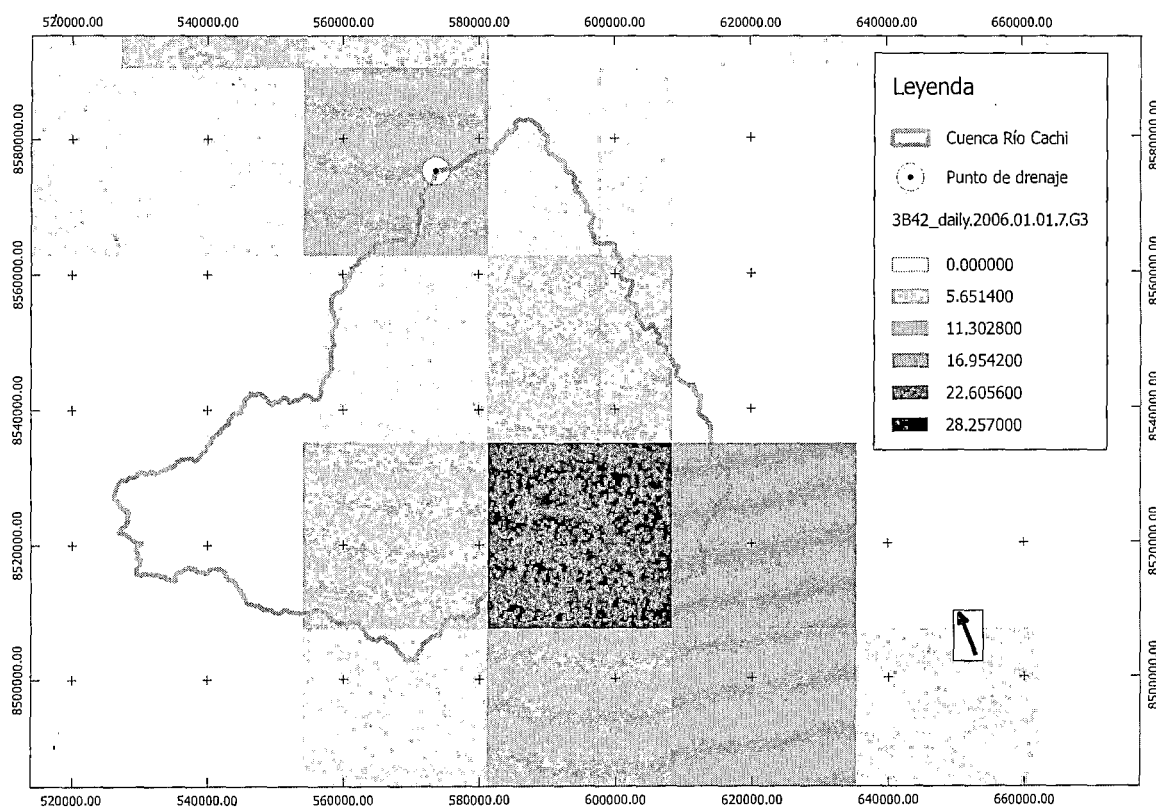
línea acuatorial) y disponiendo de una resolución temporal dependiendo de los registros requeridos: registros de tres horas, diaria, mensual, etc. Mientras el proyecto GMP (Global Precipitation Measurement) extiende las capacidades del TRMM para el registro de las precipitaciones en toda la tierra, lanzado el 27 de febrero de 2014. Ambos proyectos son un esfuerzo conjunto de la NASA (National Aeronautics and Space Administration) y JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency). Gpm y TRMM, ambos forman el proyecto PMM (Precipitation Measurement Mission).

Los registros para el usuario final se encuentran en distintos formatos HDF (Hierarchical Data Format), NetCDF (Network Common Data Form), ASCII (American Standard Code for Information Interchange) y KMZ (Google Earth formats). Estos archivos se encuentran georeferenciados para el tratamiento inmediato por una aplicación para sistemas de información geográfica. El producto 3B42 V7 derivado, es un registro de

las precipitaciones diarias que es posible obtener libremente desde TRMM, las cuales se validarán y se generalizarán en base a un modelo de inteligencia artificial, específicamente mediante las redes neuronales artificiales de base radial, aplicado a la cuenca del Río Cachi.

La Figura 3 muestra la precipitación registrada por TRMM para el 01 de enero de 2006, delimitado para la superficie de interés -la cuenca del Río Cachi, en la misma se observa la máxima precipitación obtenida  $28.257mm$ , es importante tener en cuenta que este valor es constante para toda la celda del archivo raster, formada por la resolución espacial de  $0.25^\circ * 0.25^\circ$  ( $27km * 27km = 729km^2$  aproximadamente), conociendo que la cuenca del Río Cachi cuenta con una superficie de  $3,609.86km^2$ , está contenido en aproximadamente 5 celdas, considerando la resolución espacial TRMM. Los datos son obtenidos desde la página oficial de PMM<sup>1</sup>.

**Figura 3:** Precipitación TRMM y la cuenca del Río Cachi



Fuente: Elaboración propia

<sup>1</sup><http://pmm.nasa.gov/>

### 2.3.1. Selección del producto

Disponiendo de los registros de las precipitaciones para distintos intervalos de tiempo, la elección del producto está en relación de la obtención del hidrograma para fines específicos: el hidrograma de máximas avenidas y los caudales medios mensuales. las precipitaciones necesarias en distintos intervalos de tiempo son derivados simplemente de las precipitaciones acumuladas diarias, así disponiendo de este registro la obtención de las precipitaciones mensuales y anuales, es de inmediato. Para la validación se utilizará el producto derivado *3B42v7* -correspondiente al registro de la precipitación diaria de TRMM, cuyos registros serán delimitados para la superficie de la cuenca del Río Cachi.

### 2.3.2. Estaciones meteorológicas y TRMM

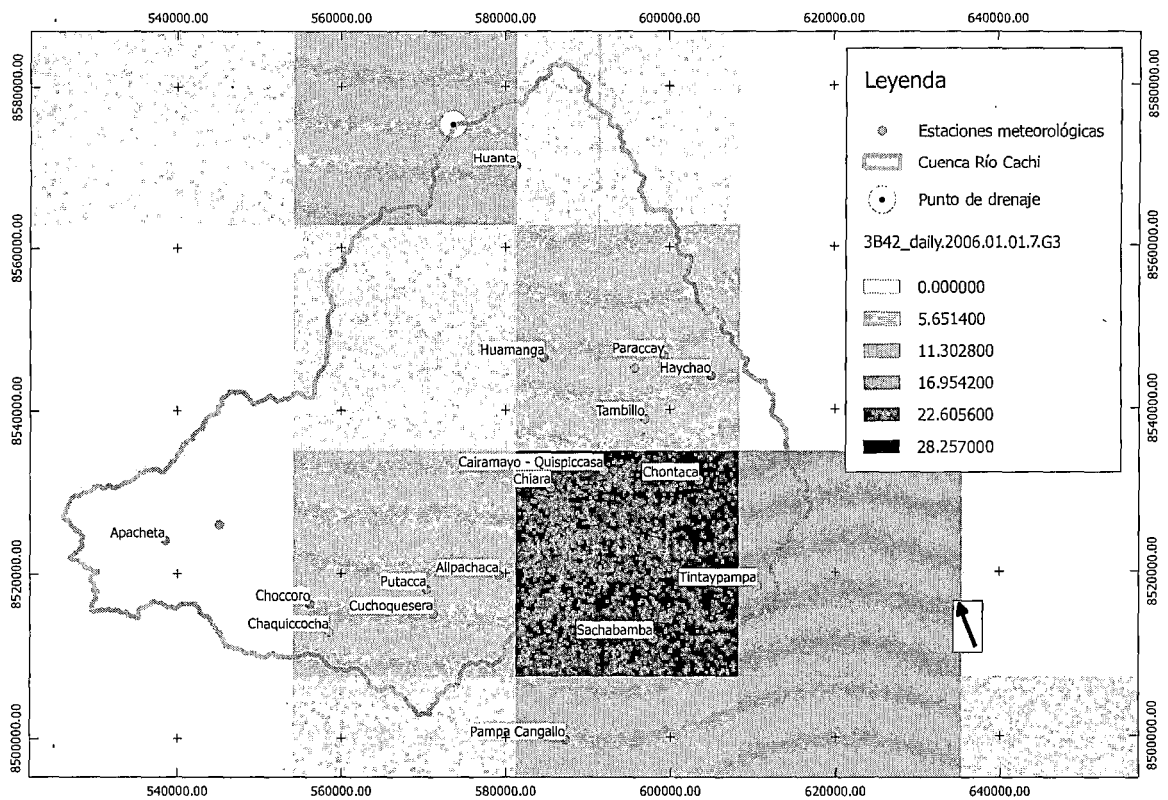
La Figura 4 representa la relación existente entre la resolución espacial considerado para la representación de las precipitaciones por TRMM, la superficie de la Cuenca del Río Cachi y las estaciones meteorológicas, donde se observa:

- Una celda del archivo tipo raster contienen un único valor, en este caso una magnitud que representa la precipitación, para la celda que representa una precipitación de  $28.257mm/día$ , en cuya superficie se identifica 5 estaciones meteorológicas: las estaciones Sachabamba, Tintaypampa, Chontaca, Cayramayu y Chiara -cada una de las estaciones con registros distintos para el día considerado, el 01 de enero de 2006, en la Figura 4.
- De igual manera, para una precipitación TRMM de  $16.9542mm/día$  se disponen varios registros en las estaciones meteorológicas, específicamente en las estaciones: Choqoro, Cachiqucha, Cuchoquesera, Putaqa y Allpachaka.
- Algunas celdas del TRMM se corresponden con una sola estación meteorológica, debido a la poca densidad de las estaciones a nivel del suelo.

Los registros de las precipitaciones obtenidas en las estaciones meteorológicas tienen

menor insertidumbre respecto a las precipitaciones obtenidas mediante técnicas de la percepción remota, tal como los registros TRMM; por tanto, las precipitaciones así obtenidas, desde el TRMM, serán corregidas mediante modelos basados en inteligencia artificial.

**Figura 4:** Precipitación TRMM, cuenca del Río Cachi y estaciones meteorológicas

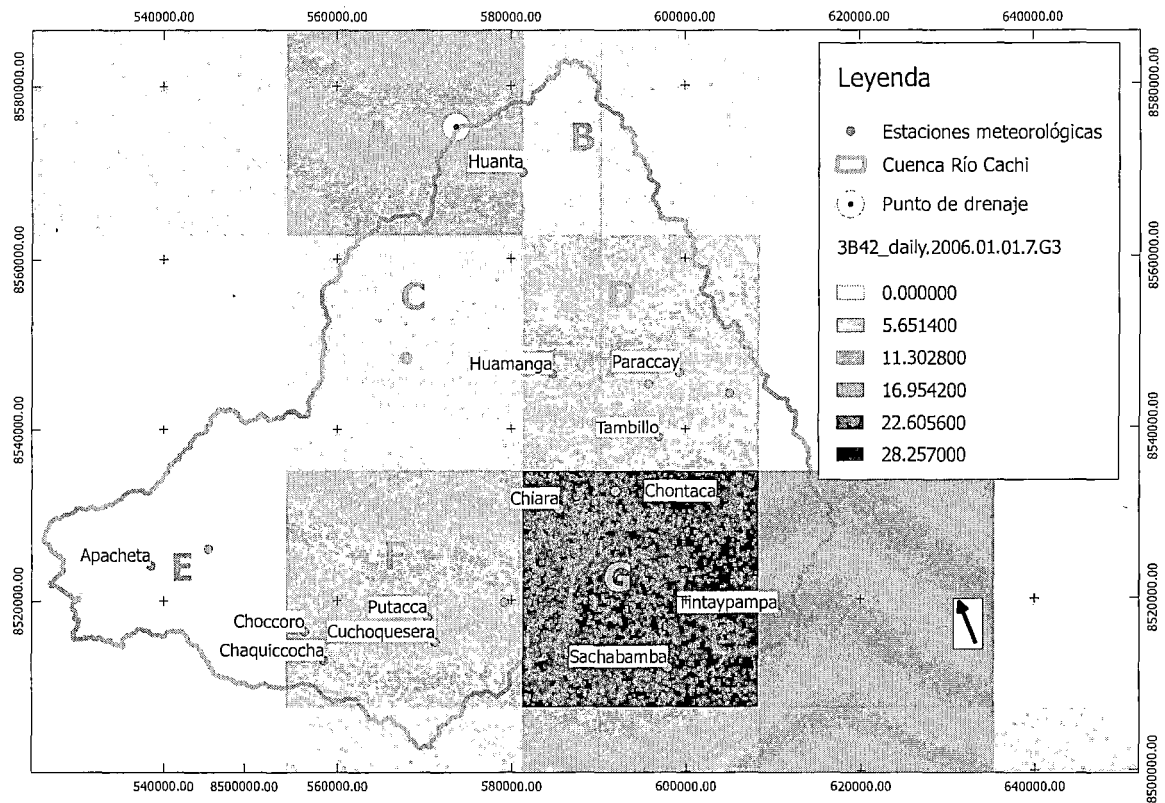


Fuente: Elaboración propia

### 2.3.3. Estaciones sintéticas

Los registros obtenidos por los proyectos GPM y TRMM se encuentran disponibles para el territorio nacional a partir del año 1998, se utilizará el *producto 3B42 v7*, correspondiente al registro de la precipitación diaria, para el cual se crean estaciones sintéticas en la para cada celda que se encuentran contenidos en la superficie de la cuenca Río Cachi, la Figura 5 muestra las celdas seleccionadas y cada una corresponde a una estación sintética, identificadas con los códigos A, B, ..., H.

Figura 5: Estaciones sintéticas TRMM en la cuenca del río Cachi



Fuente: Elaboración propia

## 2.4. Análisis de registros anuales

### 2.4.1. Análisis de homogeneidad o consistencia

Una serie de datos es llamada homogénea<sup>2</sup> si es una muestra de una única población, si los datos evaluados son no homogéneos se deben realizar correcciones para volverla homogénea, de manera que las estimaciones estadísticas muestrales sean válidas estimaciones de los parámetros poblacionales.

En los análisis climatológicos se utiliza el término de homogeneidad de la serie y en los análisis hidrológicos se emplea el término de consistencia de la serie, ambos términos son sinónimos pues indican un cambio en la cantidad de lluvia medida por una estación. La homogeneidad se analiza comúnmente a través de técnicas estadísticas, y

<sup>2</sup>Esta sección está transcrito (temporalmente) desde el texto Procesos del Ciclo Hidrológico, autor Carlos Aranda.

en cambio, la consistencia por lo general se detecta con la técnica de la curva masa doble.

Entre los tipos de pruebas estadísticas de homogeneidad se tiene:

- Prueba estadística de Helmer
- Prueba estadística de las secuencias
- Prueba estadística de la t de student
- Prueba estadística de Cramer
- Prueba estadística de Wald - Wolfowitz
- Técnicas de la curva masa doble

#### 2.4.2. Análisis de promedios móviles

Luego de analizar la inconsistencia de las lluvias anuales, es necesario estudiar tal registro como una serie cronológica o series de tiempo; mediante esta técnica se detecta los *años secos* y *años húmedos*, así como la *tendencia* y *estacionalidad* de la serie, si ésta existe.

Una serie cronológica o serie de tiempo es toda secuencia de observaciones tomados en tiempos específicos y generalmente igualmente espaciados. una serie cronológica dispone de cuatro componentes característicos :

- Tendencia: indica hacia donde “tiende” la serie cronológica.
- Componente estacional: indica las variaciones periódicas que ocurren a largo plazo - en periodos mayores a un año.
- Componente irregular: indica las variaciones de los componentes que ocurren al azar (aleatoriedad).

## 2.5. Diseño del modelo

Se diseñan dos modelos para la validación de las precipitaciones máximas en veinticuatro horas y las precipitaciones mensuales:

- El modelo AN2P24, corrige las precipitaciones TRMM, específicamente el producto 3B42 en la cuenca del río Cachi
- El modelo AN2PM, corrige el producto 3B43, precipitaciones mensuales del proyecto TRMM

El diseño se efectúa probando distintas alternativas, considerando las variables climáticas y geográficas, el modelo que devuelve mejores resultados son las que consideran solamente las precipitaciones como variables de ingreso a los modelos diseñados.

## 3. RESULTADOS

Los resultados del presenta trabajo son dos modelos que se basan en las redes neuronales artificiales para la validación de las precipitaciones máximas en 24 horas y las precipitaciones mensuales obtenidas desde el proyecto TRMM.

### 3.1. Modelo AN2P24

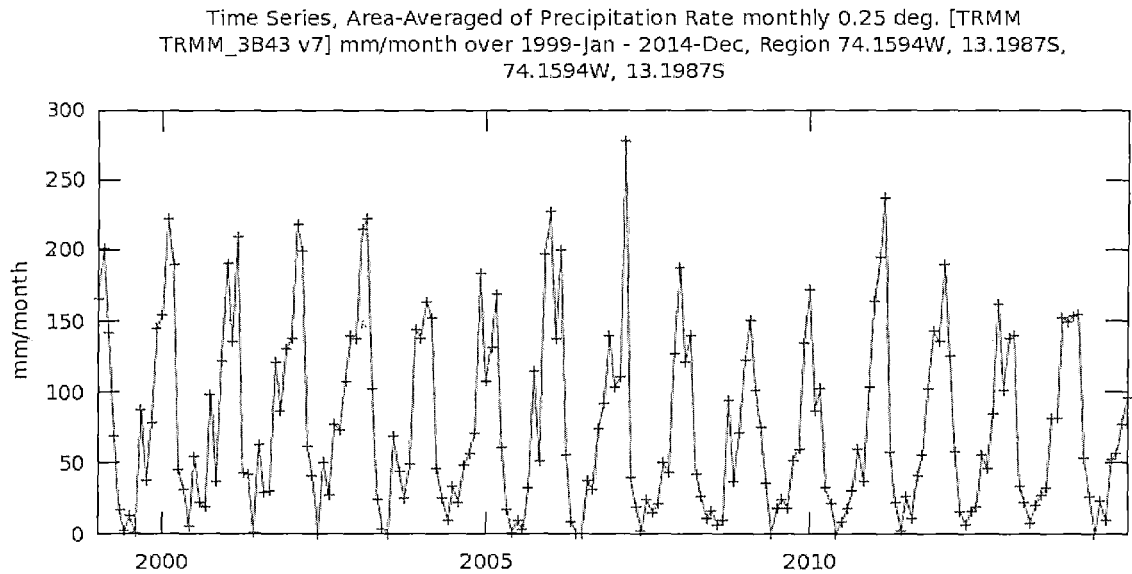
AN2P24 es un acrónimo de redes neuronales artificiales y las precipitaciones a nivel diario, es un modelo diseñado para validar las precipitaciones máximas en 24 horas, obtenidas desde el producto 3B42 derivado registrado pro el proyecto TRMM. La arquitectura del modelo AN2P24 queda establecida en la Tabla 1

**Tabla 1:** Arquitectura del modelo AN2P24

Componentes de la arquitectura	Número de neuronas
Capa de entrada	4
Capa oculta	18
Capa de salida	1

Los parámetros del modelo: funciones de entrada, activación y de transferencias, centros de las funciones de base radial, amplitud de las funciones de base radial, pesos de las conexiones y umbrales son específicos para el modelo obtenido.

**Figura 6:** Registro estación sintética A, producto 3B43



Fuente: Plataforma GIOVANNI v4.15

Los argumentos de entrada para cada registro en el modelo son: la precipitación en 24 horas obtenidos desde TRMM, la altura sobre el nivel del mar, latitud y longitud, considerando el sistema de referencia UTM. La Figura 6, representan uno de los registros de entrenamiento, validación y prueba para el modelo AN2PM.

### 3.2. Modelo AN2PM

Modelo específico para la validación del producto 3B43 TRMM en la cuenca del río Cachi, la arquitectura correspondiente al modelo se muestra en la Tabla 2.

Los centros de las funciones de base radial, amplitud de las funciones de base radial, pesos de las conexiones y umbrales son específicos para el modelo obtenido. El modelo AN2P24 requiere de ingreso solamente el registro de la precipitación mensual TRMM y devuelve la precipitación corregida.



**Tabla 2:** Arquitectura del modelo AN2PM

Componentes de la arquitectura	Número de neuronas
Capa de entrada	1
Capa oculta	12
Capa de salida	1

Los registros obtenidos como fuente de información fueron analizados tomando en consideración las pruebas de consistencia y homogeneidad, los métodos utilizados con esta finalidad son las pruebas estadísticas de Helmert y la prueba de las secuencias, estas pruebas se efectúan a nivel anual, por tanto se utilizaron las precipitaciones anuales, para las estaciones sintéticas creadas y las estaciones meteorológicas identificadas.

## 4. DISCUSIÓN

En esta sección se analiza la confiabilidad, validez y objetividad de los modelos obtenidos en el desarrollo de la investigación.

### 4.1. Análisis del modelo AN2P24

#### 4.1.1. Confiabilidad

La confiabilidad<sup>3</sup> de un modelo se refiere al grado que su aplicación repetida al mismo patrón de muestra devolverá siempre los mismos resultados. La evaluación gráfica de la confiabilidad se verifica con muchos patrones de entrada, al evaluar los mismos resultados para el conjunto de argumentos evaluados. Sin embargo, mostrar la confiabilidad gráficamente es poco usual, se utiliza ampliamente los coeficientes de confiabilidad estadísticos y para el modelo se muestran en la Tabla 3.

La evaluación se efectúa a nivel de los resultados del modelo obtenido y los registros disponibles en las estaciones meteorológicas identificadas. Desde la Tabla 3 se obser-

<sup>3</sup>Metodología de Investigación, autor: Roberto Hernández Sampieri y otros

**Tabla 3:** Coeficientes de confiabilidad

Descripción	Coeficiente de correlación
Pearson	0.980847305
Kendall	0.911198579
Spearman	0.977221228

van coeficientes de confiabilidad muy adecuados, que garantiza el uso de los modelos basados en la inteligencia artificial en los campos donde no se dispone de modelos determinísticos.

#### 4.1.2. Validez

La validez, en términos generales, se refiere al grado en que un instrumento mide realmente la variable que pretende medir. Los resultados del modelo se efectuaron tomando en consideración la *evidencia relacionada con el contenido*, que consiste en verificar que los resultados se encuentren dentro de los registros de datos disponibles, la Tabla 4 muestra los valores límites para las precipitaciones máximas en 24 horas y los resultados del modelo se se corresponden con dichos valores límites.

**Tabla 4:** Evidencia relacionada con el contenido

Descripción	Pmax24horas (mm)
máximo	49.80
mínimo	16.00

#### 4.1.3. Objetividad

La objetividad se refiere al grado en que el modelo es o no permeable a la influencia de los sesgos y tendencias de los investigadores que lo administran, califican e interpretan. Para el modelo AN2P24, la objetividad se encuentra relacionada con el error de aprendizaje del modelo, el error cuadrático medio, evaluado en  $3.92 * 10^{-8}$  para 900 ciclos de aprendizaje, la Tabla 5 muestra el error cometido para distintos ciclos de aprendizaje del modelo AN2P24.

**Tabla 5:** Ciclos de aprendizaje y el error cuadrático medio

Ciclos	Error C. M.
100	5.26613
200	1.8294
600	0.820247
900	3.92E-8
1200	1.98E-16

El proceso de diseño basado en redes neuronales artificiales, teniendo en cuenta su arquitectura, se dispone de muchas alternativas, la elección depende de mejores parámetros de valuación para las condiciones del modelo. En la selección de la arquitectura del modelo final se tomó en consideración aquella que genera mejores indicadores de confiabilidad, validez y objetividad, así obedeció de igual manera el tiempo de entrenamiento del modelo seleccionado. El modelo diseñado AN2P24, genera a partir de las condiciones topográficas asociadas a un punto (latitud, longitud, altitud) y las precipitaciones registradas del proyecto TRMM, producto 3B42, genera las precipitaciones equivalentes a las registradas en las estaciones meteorológicas para la cuenca del Río Cachi, bajo las condiciones de la confiabilidad, validez y objetividad asociado al modelo diseñado. Partiendo de las precipitaciones TRMM, producto 3B42, cuya resolución espacial es de  $0.25^\circ$ , se logra particularizar las precipitaciones a un determinado punto.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] B. Collischonn. "Daily hydrological modeling in the amazon basin using TRMM rainfall estimates". En: *Journal of Hydrology* 360 (2008).
- [2] V. M. Mantas y C. Caro. "Validation of TRMM multi-satellite precipitation analysis (TMPA) pproduct in the Peruvian Andes". En: *Atmosfere Research* 163 (2015). Ed. por ELSEVIER, págs. 132-145.
- [3] R. Shrivastava y S. K. Dash. "Validation of the TRMM Multi Satellite Rainfall Product 3B42 and estimation of scavenging coefficients for 131 I and 137 Cs using TRMM 3B42 Rainfall Data". En: *Journal of Evironmental Radioactivity* 138 (2014). Ed. por Elseiver Ltd., págs. 132-136.
- [4] C. Zhuoqi. "Estimation product of monthly-mean daily global solar radiation based on MODIS an TRMM products". En: *Applied Energy* 88 (2011), págs. 2480-2489.