

SISTEMA INTELIGENTE PARA TOMA DE DECISIONES DE ALERTA TEMPRANA
PARA INUNDACIONES DEL RÍO ARAUCA

ING. SORÁNGELA CÁRDENAS RODRÍGUEZ

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA

MAESTRÍA EN CONTROLES INDUSTRIALES

PAMPLONA

2022

SISTEMA INTELIGENTE PARA TOMA DE DECISIONES DE ALERTA TEMPRANA
PARA INUNDACIONES DEL RÍO ARAUCA

ING. SORÁNGELA CÁRDENAS RODRIGUEZ

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE MAGÍSTER EN
CONTROLES INDUSTRIALES

DIRECTOR: M.SC. CARLOS ARTURO VIDES HERRERA

CO DIRECTOR PhD. ALDO PARDO GARCIA

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA

MAESTRÍA EN CONTROLES INDUSTRIALES

PAMPLONA

2022

Nota de Aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Pamplona, __ Junio del 2022

AGRADECIMIENTOS

Doy gracias a Dios quien me direcciono en mi crecimiento profesional, por darme la oportunidad de llegar a esta etapa, y colocar mi vida profesional en la ruta de la universidad, que me ha visto crecer como lo es la universidad de pamplona, a los docentes que me han acompañado.

A mis familia e mis hijos Andrés Eduardo y Danna Sofia quienes son mi motivación constante para seguir adelante; ser una mejor persona y profesional, este logro es de ustedes y para ustedes, los amo, doy gracias a Dios por permitirme tenerlos junto a mí.

Al director de tesis M.Sc. Carlos Arturo Vides gracias por los consejo, enseñanzas y apoyo brindado, durante todo el proceso y a todos aquellos profesores que aportaron a la construcción de este proyecto.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
JUSTIFICACIÓN.....	4
OBJETIVOS	7
METODOLOGÍA.....	7
CAPÍTULO I.....	10
GENERALIDADES	10
1.1. Marco Teórico	10
1.1.1. Encuesta Poblacional en Alertas Tempranas	10
1.1.2. Concepto Meteorológico	10
1.1.3. Tipos de estaciones meteorológicas	12
1.1.4. Modelos conceptuales de funcionamiento de ríos y vertientes	15
1.1.5. Eventos extremos	15
1.1.6. Frecuencia y probabilidad.....	16
1.1.7. Periodo de retorno	16
1.1.8. Riesgo y confiabilidad	17
1.1.9. Crecidas.....	17
1.1.10. Componentes básicos del riesgo	18
1.1.11. Amenazas	18
1.1.12. Vulnerabilidad.....	19
1.1.13. Desastres.....	19
1.1.14. Inundaciones.....	19
1.1.15. Sistemas de alerta temprana	20
1.1.16. Caracterización de la cuenca del río Arauca	21
1.1.17. Ubicación y características de geográficas del departamento de Arauca	22
1.1.18. Zona hidrográfica del río Arauca.....	24
1.1.19. Aspectos económicos	25
1.1.20. Clima y vegetación	26
1.1.21. Suelo	28

1.1.22.	Humedales	28
1.1.23.	Hidrografía del río Arauca.....	29
1.1.24.	Amenazas naturales.....	30
1.1.25.	Sistemas inteligentes	33
1.1.26.	Sistema Neuronales Artificiales	33
1.1.27.	Sistemas Neuro Difusos	36
1.2	Estado del Arte	39
1.2.1.	Contextualización de alertas tempranas	40
1.2.2.	Información para diseñar un sistema de alerta temprana	43
1.2.3.	Modelos matemáticos del cauce del río	45
1.2.4.	Modelos observadores con técnicas inteligentes.....	47
1.2.5.	Administración del SAT	49
1.3.	Marco legal.....	50
CAPÍTULO II.....		55
ADQUISICIÓN Y HOMOGENIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN		55
INTRODUCCIÓN		55
1.4.	Estaciones hidrológicas del IDEAM	56
1.5.	Estación caso de estudio.....	58
1.5.1.	Presentación de la información del IDEAM de las estaciones automáticas y tradicionales del objeto de estudio.....	59
1.6.	Selección de puntos críticos.....	64
1.6.1.	Puntos críticos según CORPORINOQUIA.....	67
1.6.2.	Normalización de la información proporcionada por las estaciones hidrometereológicas	68
CAPÍTULO III.....		74
MODELOS MATEMÁTICOS DEL RÍO		74
INTRODUCCIÓN		74
3.1.	Obtención del modelo matemático	75
3.1.1.	Modelo matemático lineal.....	77
3.1.2.	Modelo matemático de potencia	80

3.1.3. Modelo matemático de relaciones potenciales.....	84
CAPÍTULO IV	88
PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN CON TÉCNICAS INTELIGENTES	88
INTRODUCCIÓN	88
4.1. Aplicación de la metodología.....	90
4.2. Implementación de la red neuronal	91
4.3. Implantación con red ANFIS	96
4.4. Algoritmo red neuronal en Matlab	98
4.5. Selección del modelo inteligente	101
DISEÑO DE LA ALERTA TEMPRANA DE INUNDACIÓN	104
INTRODUCCIÓN	104
5.1. Diseño alertas tempranas del río corregimiento San Bernardo.....	105
5.1.1. Modelo información sistema alerta temprana del río de corregimiento San Bernardo ...	105
5.2. Diseño de las alertas tempranas del río en el municipio de Arauca.....	108
5.2.1. Modelo de la información del sistema de alerta temprana para el río Arauca	108
5.2.2. Modelo matemático del cauce del río Arauca	111
5.2.3. Modelo del observador con técnicas inteligentes caso estudio río Arauca	112
5.2.4. Comparación errores IAE e ISE modelos RN, Neurodifuso y algoritmo RN.....	114
5.2.3. Generación de residuos para el sistema de alerta temprana	114
5.3. Tiempo de predicción de inundación	116
5.4. Implementación del sistema alerta temprana.....	119
5.5. Visualización de las variables de la alerta temprana	124
5.5.1. Diseño del sistema de visualización de las variables en la ribera del río Arauca	124
CONCLUSIONES	130
RECOMENDACIONES.....	133
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	134

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Perímetro de estación meteorológica	13
Figura 2. Estación meteorológica automática	13
Figura 3. Mapa de ubicación de Arauca	22
Figura 4. Mapa de inundaciones de Arauca.....	23
Figura 5. Variación mensual de la precipitación promedio	26
Figura 6. Mapa de zonas de vida	27
Figura 7. Humedal de Lipa	29
Figura 8. Sistemas tradicionales de reglas difusas.....	38
Figura 9. Sistema neuro difuso	39
Figura 10. Mapa de estaciones hidrograficas IDEAM	56
Figura 11. Ubicación de las estaciones meteorológicas del río Arauca.....	57
Figura 12. Estación hidrométrica convencional Puente Internacional Arauca	59
Figura 13. Estación automática de Peña de los Micos en Norte de Santander	60
Figura 14. Estacion hidrométrica Alcaraván de Arauquita.....	61
Figura 15. Estación hidrométrica Alcaraván de Arauca	62
Figura 16. Homogenización informacion estación hidrométrica Peña Micos.....	62
Figura 17. Homogenización de la información hidrométrica Alcaraván.....	63
Figura 18. Homogenización información hidrométrica Puente Internacional.....	63
Figura 19. Mapa de identificación puntos críticos en municipio de Arauca	67
Figura 20. Estación meteorológica e hidrométrica Arauca según Visor Fews.....	69
Figura 21. Estación meteorológica de San Bernardo según Visor Fews	69

Figura 22.	Estación meteorológica e hidrológica de Arauquita según Visor Fews....	70
Figura 23.	Curva de regresión ajustada de nivel.....	72
Figura 24.	Modelo implantado en Simulink de nivel vs. tiempo.....	72
Figura 25.	Modelo matemático lineal caudal vs. tiempo.....	79
Figura 26.	Representación del modelo matemático lineal en Simulink	79
Figura 27.	Representación precipitación y nivel del modelo matemático potencia	81
Figura 28.	Modelo matemático de potencia caudal vs. tiempo	82
Figura 29.	Representación del modelo matemático de potencia en Simulink	82
Figura 30.	Representación de ecuación del modelo de potencia en Simulink.....	83
Figura 31.	Representación de precipitación modelo de potencia en Simulink.....	83
Figura 32.	Modelo matemático de relaciones potenciales	85
Figura 33.	Implantación del modelo de relaciones potenciales en Simulink.....	85
Figura 34.	Comparación de modelos matemáticos respecto al modelo real.....	87
Figura 35.	Implantación en Simulink de normalización de la información.....	91
Figura 36.	Ambiente de la herramienta del Toolbox nftool	92
Figura 37.	Selección de entrada de datos del Toolbox nftool.....	92
Figura 38.	Configuración del entrenamiento	93
Figura 39.	Arquitectura de la red neuronal	93
Figura 40.	Entrenamiento de la red neuronal.....	94
Figura 41.	Resultados de la red neuronal entrenada	94
Figura 42.	Resultados de valores de regresión de la red entrenada	95
Figura 43.	Solución de desarrollo de la herramienta conversor al módulo Simulink.	95
Figura 44.	Módulo convertidor en Simulink de una red neuronal.....	96

Figura 45.	Modelo de la estructura ANFIS.....	97
Figura 46.	Ventana del módulo neuro-difuso	98
Figura 47.	Modelo del módulo ANFIS del río Arauca	98
Figura 48.	Residuo del error de las técnicas inteligentes.....	103
Figura 49.	Representación del modelo de caudal del río municipio de Toledo.....	106
Figura 50.	Modelo de información de nivel del río municipio de Toledo.....	107
Figura 51.	Modelo de información de precipitación municipio de Toledo	108
Figura 52.	Representación del modelo tendencia de caudal del río Arauca	109
Figura 53.	Modelo de información del nivel del río Arauca	110
Figura 54.	Modelo de información puente internacional de Arauca precipitación ..	110
Figura 55.	Comparación de los modelos matemáticos	111
Figura 56.	Comparación de las técnicas inteligentes RN, ANFIS y Algoritmo RN.	113
Figura 57.	Comparación del error técnicas inteligentes RN, NF y ALG.....	114
Figura 58.	Residuo de la alerta temprana del municipio de Arauca	115
Figura 59.	Características modelo simulación de los residuos de las alertas	115
Figura 60.	Esquema de alertas tempranas para el municipio de Arauca	116
Figura 61.	Hidrograma triangular	117
Figura 62.	Flujograma de implementación del sistema de alerta	120
Figura 63.	Diagrama de bloques equivalente al procesamiento de la información ..	122
Figura 64.	Formato del mensaje de texto de alerta	123
Figura 65.	Presentación general de la interfaz del usuario	125
Figura 66.	Presentación panel de ayuda.....	125
Figura 67.	Presentación panel créditos	126

Figura 68.	Presentación panel menú de simulación.....	127
Figura 69.	Panel del tiempo de simulación e información de precipitación.....	127
Figura 70.	Panel de las variables de nivel y precipitación.....	128
Figura 71.	Panel de visualización de caudal por técnicas inteligentes y residuo.....	128
Figura 72.	Panel de visualización de alertas de inundación	129

TABLAS

Tabla 1. Instrumentos y variables de las estaciones meteorológicas	11
Tabla 2. Área y longitud del río Arauca.....	25
Tabla 3. Vertientes del río Arauca	30
Tabla 4. Histórico relevante de las inundaciones del río en el municipio de Arauca ..	32
Tabla 5. Comparación técnicas inteligentes lógica difusa y redes neuronales	37
Tabla 6. Características estaciones meteorológicas e hidrométricas del río Arauca ..	58
Tabla 7. Criterios para selección de puntos críticos.....	65
Tabla 8. Zonas de los puntos críticos en el municipio de Arauca.....	65
Tabla 9. Puntos críticos de acuerdo al informe de CORPORINOQUIA	67
Tabla 10. Presentación de la información descargada de la página del IDEAM.....	68
Tabla 11. Variables independientes de la información real	71
Tabla 12. Presentación datos históricos 2018 de la estación Peña de los Micos	76
Tabla 13. Análisis coeficientes modelo lineal por la técnica de regresión	78
Tabla 14. Análisis de coeficientes modelo de potencia por la técnica de regresión ...	80
Tabla 15. Comparación modelos lineales respecto al error R^2 MSE y RMSE	86
Tabla 16. Comparación del algoritmo de entrenamiento con diferentes parámetros.	100
Tabla 17. Comparación errores técnicas inteligentes para seleccionar modelo río ...	102
Tabla 18. Modelos del tiempo de escorrentía estimados	118

INTRODUCCIÓN

Arauca es un departamento con gran cantidad de ríos, en época de invierno, entre los meses de mayo y agosto, es usual que estos se desborden, lo que genera emergencias para los habitantes de las riberas que ven como sus cultivos de yuca, plátano, cacao, maíz, frutales, entre otros, se echan a perder de igual manera, las inundaciones afectan al sector ganadero, es por ello que para los habitantes de Arauca es importante conocer el nivel de agua de los ríos, especialmente en temporadas de invierno, para prevenir pérdidas humanas y económicas (Basher et al., 2006).

La tendencia mundial es implementar sistemas que sean medios para conocer directamente el nivel de los ríos, para salvar vidas y prevenir desastres. De lo anterior se puede establecer un diseño de un sistema inteligente de alerta temprana para el municipio de Arauca, que a su vez brinde la información necesaria en tiempo real con el propósito de prevenir desastres, dar mayor tiempo a desalojos y poner a salvo la vida de la población riverense del río en estudio (Ramírez y Rojas, 2019).

En el año 2015 las inundaciones del río Arauca dejaron más de 9000 familias afectadas en el estado Apure –Venezuela (EL TIEMPO, 2015), en el departamento de Arauca fueron más de 6000 damnificados para el mismo año de acuerdo con el reporte realizado por la voz del Cinaruco en junio del 2015 (LA VOZ DEL CINARUCO, 2015). Para el 2016 las inundaciones dejaron nuevamente 3000 damnificados en todo departamento de Arauca (RADIO CARACOL, 2016).

Según el banco mundial y la ONU (CEPAL y BID, 2007) Colombia está en el tercer país con mayor riesgo climático en el mundo, y durante los últimos 30 años son aproximadamente 10 millones de personas afectas por las inundaciones (EM-DAT, 2022). De acuerdo con Velásquez (2006) la diversidad del espacio geográfico como la presencia de volcanes, los nevados y la elevada pluviosidad, hacen que sea uno de los lugares más propensos a desastres.

En el siglo XXI en Colombia, los cambios climáticos han causado desastres socio naturales dentro de los más relevantes se tienen el 15% de sismos, el 25% de deslizamientos, el 4% de tormentas y las inundaciones con un 42%, este último es debido en especial al fenómeno de la niña (EM-DAT, 2011). Para prevenir estos desastres se requiere que los entes gubernamentales asuman retos tecnológicos, entre estos está el de mejorar los procedimientos de medición de nivel y precipitación de los ríos, que hasta el momento se realizan de forma manual, lo que genera demora en entrega de la información a la población aledaña a los ríos.

Una solución a la problemática descrita es el diseño de un sistema de alerta temprana, con el fin de tener la información precisa y continua de parámetros hidrológicos; como variación del nivel, caudal del agua, pluviosidad, a través de las estaciones hidrométricas y meteorológicas automáticas, que envían la información en tiempo real y se activan de forma visual mediante un aplicativo interactivo, siendo flexible y de fácil acceso desde cualquier lugar del mundo, para tener un constante monitoreo del nivel del río Arauca en temporada de invierno.

Ahora, para cumplir con los objetivos de este trabajo de investigación, se procede a utilizar una metodología que permita la adquisición de la información de las estaciones hidro-

meteorológicas a cargo del IDEAM, que son las encargadas de proporcionar en una página web la información de la precipitación, nivel y caudal, en estructuras de archivos “csv y json”. Seguidamente, se procesa esta información que se exporta a un sistema de predicción a través de la herramienta computacional “Matlab-Simulink”.

También se procede en este trabajo con el estudio y análisis de la información pertinente para obtener los riesgos en la ribera del río Arauca, seguidamente se diseña e implementa en “Matlab Simulink” los modelos matemáticos del río representados con las tendencias lineales, potenciales y relaciones potenciales. Continuando con el diseño del sistema observador bajo técnicas inteligentes basadas en toolbox de “Matlab” en redes neuronales y neuro-difusas, también se desarrolla un algoritmo estructurado en código de Matlab bajo la metodología de las redes neuronales. Por último, se obtiene una estructura que aporta el proceso de generación de residuos, equivalente a la diferencia entre el modelo matemático real y su observador, proporcionando así la alerta o estado actual del río, que es remitida a los entes competentes de gestión del riesgo departamental por medio de una herramienta que hace referencia a un mensaje de texto y que es informado al operador de la alerta temprana a través de una interfaz diseñada en ambiente “Guide de Matlab”.

Planteamiento del Problema

En la región del municipio de Arauca, en el año debido al invierno y al verano, el nivel de los ríos varía; en temporada de invierno, a raíz de las incesantes lluvias, el caudal de los ríos crece, lo que genera inundaciones que afectan a las comunidades que viven cerca de las riberas, sus cultivos y enseres; y en el verano, por la escasez de lluvia, los niveles de los ríos disminuyen (en algunos casos hasta llegar a secarse), lo que afectan los afluentes que

abastecen de agua dulce al ser humano y sirve como bebida a los animales y como riego a los cultivos (Camolloni et al., 2020).

¿De lo anterior será indispensable diseñar y desarrollar un prototipo que monitoree el nivel del río, específicamente la implementación de un sistema de alerta temprana que este basado en técnicas inteligentes y que a su vez, sea fiable, preciso y de bajo costo, con el propósito de brindar la información en tiempo real, para prevenir, dar mayor tiempo a desalojos y poner a salvo la vida de las personas en las riberas del río?

Justificación

En el departamento de Arauca, en época de invierno (entre los meses de mayo y agosto), es usual que los ríos se desborden e inunden las sabanas y las poblaciones ribereñas. Las inundaciones generan pérdidas, donde se pierden los cultivos de yuca, plátano, cacao, maíz, frutales, y los pastos, también se presentan pérdidas por muerte (ahogamiento) de semovientes y otros animales. El alto riesgo por desbordamiento de los ríos y las consecuentes inundaciones afecta a los pobladores de las riberas, debido a que estos pierden sus enseres y, a veces, hasta su propia vida (Camolloni et al., 2020).

De acuerdo a las características fisiográficas del departamento de Arauca, según el documento de los mapas de situación nutricional en Colombia 2015, estos visualizan que el 58 % del departamento es susceptible a inundaciones (FUPAD, 2013).

Para prevenir pérdidas humanas y económicas es fundamental tener un sistema de alertas tempranas de inundación que esté bajo la metodología de diseño según la gestión del riesgo en Colombia 2021 (Mendoza et al., 2016), que establece que el fin es el de propiciar

la evacuación oportuna de los habitantes en el área que pueden ser afectados por la crecida en un tiempo inmediato y que debe estar conformado por las diferentes fases comprendidas en:

1. Diagnostico social, económico y ambiental.
2. Determinación de los puntos críticos.
3. Coordinación y colaboración.
4. Preparación y respuesta temprana.
5. Comunicación y divulgación.

Ahora, en el caso del departamento de Arauca no cuenta con sistemas de monitoreo de ríos, ni de alertas tempranas por inundación; en la actualidad, las alertas tempranas son emitidas a través de boletines proporcionados por Corporinoquia, que es la autoridad ambiental de la región. Esta información es tomada a través de un monitoreo que se hace de forma visual, por los bomberos, utilizando una escala hidrométrica que se encuentra en el puente internacional José Antonio Páez.

De lo anterior, se hace necesario tener un sistema inteligente de alerta temprana automatizado, que permita realizar el monitoreo del río Arauca en todo momento, con el objeto de advertir inundaciones.

Para el desarrollo eficiente y predecible de una alerta temprana es fundamental el uso de tecnologías avanzadas, como un sistema inteligente para prevención de inundaciones, que permita facilitar los procesos que conforman estos sistemas de alertas tempranas de inundación.

Con el sistema de alertas tempranas diseñado para el río en el municipio de Arauca, se obtiene una metodología que puede ser aplicada a la ribera de la trayectoria del río Arauca, en los puntos de riesgo medio y alto para evitar desastres futuros. También este sistema proporciona un análisis más específico sobre la obtención de los modelos matemáticos del cauce de ríos, apropiados para las diferentes vertientes hídricas del país.

Objetivos

Objetivo General

Diseñar un sistema inteligente de alerta temprana predictivo de inundaciones del río Arauca

Objetivos Específicos

- Identificar los afluentes y puntos críticos de inundación del río Arauca
- Crear el algoritmo inteligente utilizando redes neuronales para la predicción de inundaciones en Matlab
- Implementar el sistema de alerta temprana

Metodología

La investigación tiene un alcance exploratorio. Debido al poco conocimiento de la caracterización de nivel de los ríos, el enfoque de la investigación es de tipo cuantitativa (Sampieri et al., 2019). El proyecto de investigación no requirió de tamaño poblacional ni tamaño de muestra puesto que se trata del diseño del sistema de alerta temprana, que se desarrolló durante un año.

Fases para el desarrollo del proyecto

Se plantea el problema de construir un sistema de alerta temprana.

El procedimiento constará de cuatro fases. La primera fase tiene como objetivo desarrollar el modelo matemático de la información proporcionada por las estaciones hidrometereológicas; la segunda, el modelo matemático de la dinámica del río Arauca; la

tercera, son los modelos matemáticos implementados en técnicas inteligentes, y la cuarta fase, es el sistema de alertas y su presentación al contexto universal.

Primera fase. Se obtendrá, estudiará y analizará la información proporcionada por la estación del Puente Internacional José Antonio Páez, ubicada en el municipio de Arauca; que proporcionará el nivel, precipitación, evaporación, temperatura, humedad, como variables independientes.

Esta información será normalizada y se le aplicará la metodología de regresión con el fin de obtener un modelo lineal y así proceder a identificar la tendencia a través de su dinámica en el tiempo.

Cabe indicar que las variables que se van a modelar son: nivel, precipitación y caudal.

Segunda fase. Después de la fase anterior se procede a retomar las variables independientes de nivel y precipitación con el fin de que sirvan como base fundamental al modelo que represente la tendencia del río Arauca. Este modelo está fundamentado en el concepto de un sistema lineal y un sistema de potencia, del cual hay estudios e investigaciones tanto nacionales como internacionales (Nuñez, 2005).

Tercera fase. Se utilizarán las técnicas de redes neuronales y neuro difusas con el propósito de obtener un sistema observador que establezca las tendencias proporcionadas por los modelos lineales o de potencia del río Arauca. La salida de este sistema inteligente se lleva a un comparador del sistema real de los modelos matemáticos aquí mencionados con el propósito de obtener información específica y detallada del evento en el que el nivel del cauce

del río Arauca aumenta o disminuye, esto se puede definir a través del concepto denominado residuo, el cual proporcionará elementos fundamentales para detectar los sistemas de alerta.

Cuarta fase. Para desarrollar esta fase se retoma la información procedente del residuo. Haciendo una comparación y una conversión de señales, se puede visualizar el comportamiento de las alertas amarilla, naranja y roja (*Guía Para La Implementación de Sistemas de Alerta Temprana*, n.d.). A su vez, se visualizarán las dinámicas correspondientes a las variables predominantes como caudal, nivel, precipitación y residuo; los cuales darán en consecuencia las alertas tempranas.

Capítulo I

Generalidades

1.1. Marco Teórico

1.1.1. Encuesta Poblacional en Alertas Tempranas

Una encuesta, según lo citado por Sampieri et al. (2019), es un método de recolección de información a partir de un muestreo organizado de personas, con el propósito de generalizar resultados de los diferentes enfoques de variables independientes directas involucradas en el caso de estudio.

La agencia de Medio Ambiente (AMA) y las Delegaciones del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (CITMA) de Sancti Spíritus y Villa Clara, a través del proyecto de Fortalecimiento del Sistema de Alerta Temprana Hidrometeorológico (FORSAT), están realizando un estudio para evaluar el nivel de percepción de la población ante la inundación por intensas lluvias y sus impactos, con el objetivo de perfeccionar la estrategia de prevención y respuesta. Razón por la cual este documento realizado por PNUD (PNUD, 2017) hace referencia a un formato de encuesta relacionada con alertas tempranas de inundaciones de río.

1.1.2. Concepto Meteorológico

El elemento meteorológico hace alusión a aquella variable atmosférica o fenómeno (temperatura del aire, presión, viento, humedad, tormentas, neblina, ciclones, entre otros) que caracteriza el estado del tiempo en un lugar específico en un tiempo determinado (Sánchez, 2015).

Una estación meteorológica es un conjunto de componentes destinados a medir y registrar diversas variables meteorológicas.

Principales instrumentos y variables en una estación meteorológica

En la Tabla 1 se observan los instrumentos usados para medir algunas variables meteorológicas.

Tabla 1. Instrumentos y variables de las estaciones meteorológicas

INSTRUMENTOS	VARIABLES
Termómetro	Temperatura
Termómetro de máxima	Temperatura máxima
Termómetro de mínima	Temperatura mínima
Termómetros de subsuelo	Temperaturas del suelo (a diferentes profundidades)
Barómetro	Presión de la atmósfera en la superficie
Pluviómetro	Cantidad de precipitación
Psicrómetro o Higrómetro	Humedad relativa del aire y temperatura de punto de rocío
Piranómetro	Insolación solar
Heliógrafo	Horas de sol
Anemómetro (cazoletas)	Velocidad (cazoletas) y dirección (veleta) de viento
Ciclómetro	Altura de las nubes (solo en el punto donde se encuentra ubicado)

Fuente (Acuña & Robles, 2015)

Las estaciones meteorológicas se clasifican en:

1. **Estación pluviométrica.** Es aquella que tiene un recipiente o un pluviómetro que mide la cantidad de precipitación en el tiempo.

2. **Estación pluviográfica.** Es la estación meteorológica que realiza en forma continua y mecánica un registro de las precipitaciones, gracias a ella se conocen la cantidad, intensidad, duración y periodo en que ha ocurrido la lluvia.
3. **Estación climatológica ordinaria.** Estación meteorológica que está provista de un psicrómetro, un pluviómetro y un pluviógrafo, con el propósito de medir la precipitación y la temperatura de manera instantánea.
4. **Estación climatológica principal.** Esta estación meteorológica es la encargada de hacer observaciones de elementos meteorológicos en horas convenidas internacionalmente. Los datos se toman horariamente y corresponden a nubosidad, dirección, velocidad del viento, presión atmosférica, temperatura del aire, altura de las nubes, visibilidad, precipitaciones y temperaturas extremas, esta una información que se codifica y se intercambia a través del mundo.
5. **Estación agrometeorológica.** Es una estación meteorológica donde se realizan mediciones y observaciones meteorológicas y biológicas, incluyendo fenológicas y otros tipos de observaciones que pueden ayudar a determinar las relaciones entre el tiempo y el clima.

1.1.3. Tipos de estaciones meteorológicas

Las estaciones meteorológicas pueden ser de los siguientes tipos:

- a. **Estaciones meteorológicas convencionales.** Son estaciones de superficie que poseen un cerco perimétrico dentro del cual se encuentran ubicados diversos instrumentos que registran variables meteorológicas (como se observa en la Figura 1).



Figura 1. Perímetro de estación meteorológica

Fuente: Sánchez (2015)

b. **Estaciones meteorológicas automáticas.** Son estaciones que registran la información ambiental mediante el uso de instrumentación tecnológica especializada; esta información se registra de acuerdo con su tiempo y necesidades de sus variables ambientales, como se observa en la Figura 2, estación meteorológica automática. Esta información posee un sistema de almacenamiento de datos que permite guardar los registros de la instrumentación que conforman estas estaciones., también almacenan información que es transferida satelitalmente.



Figura 2. Estación meteorológica automática

Fuente: Sánchez (2015)

Las estaciones meteorológicas son empleadas para diversos fines, entre ellos se citan los siguientes:

- Investigaciones meteorológicas
- Monitorización meteorológica
- Previsiones
- Alarmas locales
- Modelización climática
- Sistemas de control de inundaciones
- Aplicaciones meteorológicas

Cabe señalar que un conjunto de estaciones se conoce como ‘red de estaciones’, y consiste en varias estaciones del mismo tipo. Puede haber red de estaciones pluviométricas, de medición de radiación y climatológicas, las cuales se administran como un grupo.

Conceptos hidrológicos

Como concepto hidrológico se define la ciencia que estudia el agua y sus manifestaciones en la atmósfera sobre y debajo de la superficie terrestre, donde se relacionan las propiedades y los elementos de la naturaleza (Hernández, 2000).

La hidrometría es la ciencia que trata de las mediciones y análisis del agua, incluyendo métodos, técnicas e instrumentos utilizados en hidrología.

El concepto ‘estiaje’ significa el nivel más bajo que tienen las aguas del río. El ‘caudal’ es la corriente que define el volumen del agua que pasa por la sección transversal del cauce.

Una estación hidrométrica es un lugar fijo y específico del río, donde se toman y se realizan diversas operaciones con el propósito de determinar el caudal circulante en un momento y tiempo determinado. Estas estaciones deben ser ubicadas en lugares estables y que no sean amenazadas por las crecientes del río.

Clasificación de las estaciones hidrométricas:

1. **Estaciones simples o limnimétricas.** Son las que cuentan con un instrumento de medición llamado limnómetro, que registra el nivel del río respecto a una referencia fija.
2. **Estación limnigráfica.** Es fija y además cuenta con un limnómetro o regla y con un limnógrafo, el cual registra la variación de nivel del agua en la sección de control en forma continua y mantiene coincidencia con el nivel del limnómetro.

1.1.4. Modelos conceptuales de funcionamiento de ríos y vertientes

Cuando se habla de modelos matemáticos se hace alusión del concepto teórico sobre funcionamiento de ríos “the river continuum concept RCC”. Este concepto lo define Vannote et al. (1980), donde direcciona que este modelo conceptual describe el gradiente de condiciones físicas y químicas a través de las características de aporte de energía y sus resultantes respuestas bióticas en los sistemas fluviales desde la cabecera hasta la desembocadura (Gómez, 2003).

1.1.5. Eventos extremos

Machuca (2010) establece que existen diversos eventos de valores máximos o extremos de un gran interés para la hidrología en lo que respecta a la crecida y las múltiples

lluvias extremas que se presentan en la región, estableciendo que estas son precipitaciones intensas o extremas en el tiempo, aunque cabe indicar que existen eventos como sequías y temperaturas extremas máximas o mínimas en el entorno.

1.1.6. Frecuencia y probabilidad

La frecuencia es un evento en el tiempo que es clasificado de acuerdo con su eventualidad, en este caso, a la caída de precipitación o crecidas del río en el año.

Según Machuca (2010), el concepto de probabilidad se fundamenta a través de la matemática orientada a la predicción, donde se indica que es un conjunto exhaustivo que relaciona el número de resultados que produce un evento particular con el número posible de resultados; o, también se define como la frecuencia de su ocurrencia durante la repetición de un número de observaciones posibles.

1.1.7. Periodo de retorno

Matemáticamente, el periodo de retorno se puede definir como lo inverso a la probabilidad (Machuca, 2010). Desde la óptica de la estadística, se referencia en este caso de estudio a mayor magnitud de una crecida mayor es el periodo de retorno y menor es la probabilidad a que ese evento ocurra en cualquier año.

El periodo de retorno en este caso de estudio se expresa en lo equivalente a un caudal máximo que se repita en un tiempo establecido en meses, y también se promedia en datos históricos a través de una ventana de tres a cuatro años según las medidas de las estaciones meteorológicas correspondientes. En el caso particular, el periodo de retorno de lluvia sería de 400 mm de agua, en una estación pluviométrica ubicada en el municipio de Arauca.

1.1.8. Riesgo y confiabilidad

El riesgo se define, según Sáenz (1999), como una probabilidad de exceder los niveles de tolerancia del cauce y está establecida por la siguiente ecuación:

$$R = 1 - \left(1 - \frac{1}{Tr}\right)^n \quad \text{Ecu. 1}$$

n, lo permitido por la tolerancia del cauce y Tr, tiempo de retorno.

Por tanto, la confiabilidad “C” se define como la constante del riesgo:

$$C = 1 - R \quad \text{Ecu. 2}$$

Para Sáenz (1999), en sus estudios, el tiempo de concentración es el tiempo en que la lluvia que cae en un lugar equidistante de la cuenca en estudio toma para llegar a una ventana determinada de dicho cauce. Desde otro punto de vista, se puede decir que el tiempo de concentración es el referenciado que se necesita para que toda la cuenca contribuya en escorrentía superficial en una sección considerada.

Este tiempo de concentración está conformado por la diversidad de las características geográficas y topográficas de la cuenca, donde se incluyen los escurrimientos sobre el terreno, vertientes, evaporización, humedales y otros del área de estudio.

1.1.9. Crecidas

Las ‘crecidas’ se definen como el fenómeno de ocurrencia de caudales relativamente grandes, también se puede decir que es un efecto de lluvias muy intensas en pequeñas cuencas que se agregan a su entorno y se compactan en bloques que alimentan a los cauces principales haciendo que estos aumenten su energía a través de su nivel. Cabe mencionar que existen dos

tipos de crecidas. una dinámica, que es rápida, y otra estática, que es lenta en el tiempo según lo propuesto por Dávila (2016).

Por lo anterior, se define que una crecida es una elevación normal del nivel del agua dentro del lecho principal.

1.1.10. Componentes básicos del riesgo

El riesgo, según Machuca (2010), son las pérdidas que se ocasionan por efecto de una amenaza específica en un elemento en riesgo durante un periodo específico en el futuro.

Para definir el elemento en riesgo, se puede medir según la pérdida económica predecible o según el número de vidas perdidas o la extensión de daños físicos ocurrida.

Ahora, desde el punto de vista conceptual, el riesgo se puede dividir en tres componentes, estos están referenciados en los estudios propuestos por Villagrán (2001), en los que establece:

- a. Amenazas
- b. Vulnerabilidades
- c. Deficiencias en las medidas.

1.1.11. Amenazas

Según Machuca (2010), las amenazas se clasifican en naturales y antroponaturales, la primera, hace referencia a los fenómenos de origen natural como desbordamiento de ríos, huracanes, terremotos y otros. La segunda, es aquella situación inducida por el ser humano en el medio geológico, por ejemplo, socavones de aperturas en las minas y desplazamiento de volúmenes de tierra.

1.1.12. Vulnerabilidad

Este concepto hace referencia a la incapacidad o debilidad intrínseca de un elemento para absorber, mediante el autoajuste, los efectos de un determinado cambio en el ambiente; o, en otras palabras, en la no percepción de adaptarse en el cambio, según el documento (OEA. Irlanda., 2001).

También se define como el concepto de múltiples características de una persona de tener la capacidad para anticipar, sobrevivir, resistir y recuperarse del impacto de una amenaza natural. Cabe señalar que existen diferentes tipos de vulnerabilidades: físicas, económicas, sociales, políticas, ideológicas, culturales, educativas, ecológicas e institucionales.

1.1.13. Desastres

Dávila (2016) propone que el propósito y la estructura de los Sistemas de Alerta Temprana (SAT) está definida con base a la prevención de desastres y conformada como se presenta en el marco de acción de Hyogo 2005-2015, en el que se establece como prioridad la necesidad de identificar, evaluar y monitorear los riesgos, además de la importancia de mejorar los sistemas de alerta temprana que existen actualmente.

1.1.14. Inundaciones

Una inundación es la elevación no usual del nivel de agua, que genera desbordamientos y desastres en los ambientes poblados. Por otro lado, aun no habiendo un aumento grande de escorrentía superficial, podrá suceder una inundación dado el caso que exista algún represamiento en el canal natural del río, Saenz (1999).

1.1.15. Sistemas de alerta temprana

Alerta

Según Clavijo y Castro (2018), una alerta es el estado que se declara previo a la ocurrencia de un fenómeno de magnitudes muy peligrosas con el propósito de que organismos operativos de la región, en capacidad de activarse, puedan ejecutar procedimientos de acciones preestablecidas y logren minimizar esos eventos.

Sistema de alerta temprana

Según la Unidad de Gestión del Riesgo en Colombia (UNGRD, 2020), los conceptos ‘sistema’ y ‘temprano’ están sujetos a la idea de un fin, un objetivo, y por consiguiente a una idea general de alerta temprana en función de sus objetivos, es decir, el de propiciar la evacuación oportuna de los habitantes en el área que pueden ser afectados por la crecida o inundación en un tiempo inmediato (*Guía Para La Implementación de Sistemas de Alerta Temprana*, n.d.). El propósito de la alerta temprana se basa en la evaluación a la que se llega a través de toma de decisiones, que requieren de un flujo de información pertinente y anticipada al paso de la crecida y/o ocurrencia de la inundación.

La Resolución 58/2141 de 2004 de la Asamblea General de la Organización de Naciones Unidas (ONU), establece la importancia de la alerta temprana para la reducción de desastres (Dávila, 2016).

Para diseñar un sistema de alerta temprana se acude al trabajo realizado por Amaguy (2018), donde propone las siguientes fases:

- a. Diagnóstico social, económico y ambiental

- b. Determinación de los puntos críticos
- c. Comunicación y divulgación
- d. Preparación y respuesta temprana
- e. Coordinación y colaboración

1.1.16. Caracterización de la cuenca del río Arauca

Para Bernal (2014) el propósito de establecer los niveles de alerta se ha configurado en la plataforma para el pronóstico hidrológico FEWS del Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), los diferentes umbrales para las alertas Amarilla, Naranja y Roja de las estaciones que cuentan con esta información, para que el usuario pueda identificar los puntos donde se sobrepasa dicho umbral, ya sea por un evento ocurrido o pronosticado. Teniendo en cuenta este panorama nacional de las cinco grandes regiones hidrológicas: Andina, Ori-noquia, Amazonia, Atlántica y Pacífica, se establecieron siete criterios para la selección de las cuencas piloto para la implementación de este proyecto, establecidos conjuntamente entre el IDEAM, el departamento nacional de planeación (DNP) y el instituto de investigación aplicada en los campos de agua y subsuelo DELTARES. Las cuencas priorizadas conjuntamente fueron las siguientes:

- Cuenca alta del río Cauca hasta La Virginia
- Cuenca alta del río Bogotá hasta Puente La Virgen
- Cuenca media del río Magdalena entre Puerto Salgar y Barrancabermeja.

1.1.17. Ubicación y características de geográficas del departamento de Arauca

El departamento de Arauca se localiza en el sector norte de la Orinoquía colombiana en el límite con Venezuela. Está compuesto por siete municipios: Arauca (ciudad capital), Arauquita, Cravo Norte, Fortul, Puerto Rondón, Saravena y Tame. Su superficie es de 23.818 km², que corresponde al 2,1% del total nacional. El departamento limita por el norte con el río Arauca, que lo separa de la República de Venezuela; por el este, con la República de Venezuela; por el sur, con los ríos Meta y Casanare, que lo separan de los departamentos del Vichada y Casanare; y por el oeste, con el departamento de Boyacá (FUPAD, 2013).

El municipio de Arauca se encuentra dividido político-administrativamente en cinco comunas que agrupan 31 barrios y 27 urbanizaciones. El sector rural está conformado por cinco corregimientos que albergan 65 veredas (Trujillo, 2014). En la Figura 3 se observa el mapa de Arauca.

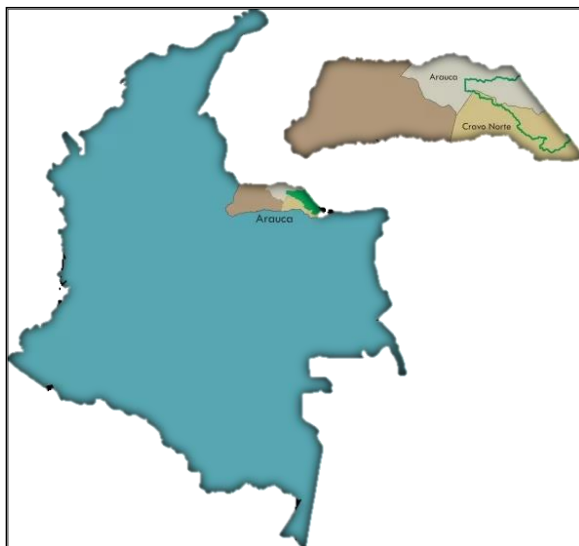


Figura 3. Mapa de ubicación de Arauca

Fuente: Sociedad Geográfica de Colombia (2002)

Las características fisiográficas del departamento, según el documento de los mapas de situación nutricional en Colombia 2010, son:

El 58,0% es susceptible a inundaciones (Figura 4)

Un 42,0% es vulnerable a sequías

El 19,5% del territorio presenta bosques naturales

Un 11,5% corresponde a reservas forestales

Un poco más del 7,0% pertenece a parques nacionales naturales

De otra parte, los suelos tienden a ser viejos con tendencia a la acidez y son de baja fertilidad natural, lo que es desfavorable para el desarrollo de proyectos agrícolas y permiten que la ganadería se haga de forma extensiva (FUPAD, 2013). En la Figura 4 se observa el mapa de inundaciones de Arauca.

Caracterización del territorio del departamento de Arauca

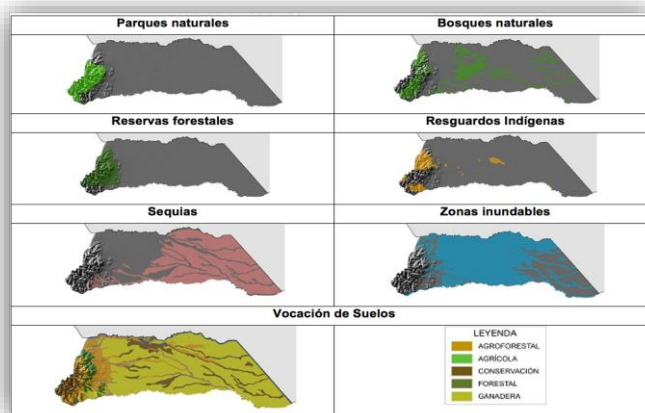


Figura 4. Mapa de inundaciones de AraucaFuente: Mapas de situación nutricional en Colombia (2010)

1.1.18. Zona hidrográfica del río Arauca

El río Arauca se encuentra ubicado en el límite de la frontera con Venezuela, se forma en el páramo del Almorzadero en Santander, en su recorrido pasa por los departamentos de Arauca, Boyacá, Santander, Norte de Santander, Sus aguas caen al río Orinoco en Venezuela, mide de longitud aproximadamente 1000 km.

En el río Arauca desembocan los ríos de la cordillera oriental con una extensión de área de 900 km² y una extensión de 80 km el río el Cubujón, Bojabá, con una extensión de 85 km y área de 410 km² el río Banadía, Covaría, entre otros con menos extensión el río Oirá, Valegrá, y los caños Chitagá, Caranal, Jujú, Salibón y en Venezuela el río Cutufí. Arauca es conocida por sus sabanas inundables en temporadas de invierno, que resalta la fauna de la zona y aves migratorias. Por las grandes cantidades de humedales y lagunas se destacan el lipa, la Barrialosa, Grimonero, la Erica, Venero, la Rodriguera y la Madre Vieja. son de suma importancia para la fauna de la zona y aves migratorias.

En el municipio de Arauca, la hidrográfica del río Arauca presenta las subzonas hidrográficas como caños entre los que se destacan Caño Jesús, Caño Picure, Caño Chaparrito (el Ruano), los afluentes directos a Caño Jesús (Caño los Arrecifes, Caño el Martinero, Caño Curitero, Caño Caballero, Caño Aguaita, Caño Santo Domingo), afluentes directos al Caño Picure (Caño Materrosa) y caños menores afluentes del río Arauca; Caño Bartoleto, Caño Villanueva y Caño Matapalo, información obtenida de la Asociación de Profesionales Nueva Opción (ASONOP, 2014).

A continuación, se presenta, en la Tabla 2, la distribución poblacional de la ribera del río Arauca, teniendo como referencia el área y la longitud.

Distribución poblacional de la ribera del río Arauca

Tabla 2. Área y longitud del río Arauca

Minicipio	Área en la cuenca (Km²)	Población total
Arauca	150	92.107
Arauquita	98	48318
Saravena	105	54198
Corregimiento San Bernardo Toledo, N. de S.	130	18250

Fuente: DANE

1.1.19. Aspectos económicos

Según el documento de Unillanos (2016), los componentes más importantes para la generación de ingresos para esta región, son los sectores agrícola , agropecuario y el sector petrolero. Con respecto al sector agrícola, se puede establecer que se cultivan productos básicos como arroz, cacao, plátano y yuca; y con respecto al sector agropecuario, se comercializa carne, lácteos y huevos; en lo alusivo al sector petrolero, la materia prima (el petróleo) se extrae y se envía así, crudo, a través de un oleoducto. Las hortalizas y frutas son producidas a una escala menor; esta actividad se considera secundaria a pequeña escala.

Tambien existe la crianza de cerdos, aves de corral y conejo, aclarando que esta actividad es secundaria y de baja escala, pero es importante para la alimentacion de la comunidad y consumo familiar.

Además, otras actividades económicas que generan ingresos a la población son: tiendas menores, panaderías, ferreterías, librerías, carpinterías, salas de belleza, servicios de banca económica y transporte público.

1.1.20. Clima y vegetación

En documento editado por INGEOMINAS (2010) se alude a la diversidad de pisos térmicos, en Arauca la temperatura promedio es de 26.4°C, determinado como término cálido, en una ventana a lo largo del año y también con un régimen pluviométrico monomodal, que abarca el verano en un periodo de enero hasta el mes de marzo; de abril hasta octubre aparece la temporada de invierno. La estación pluviométrica de Arauquita reporta en su promedio multianual de lluvias un valor oscilando entre 2.22 mm, tal y como se representa en la Figura 5.

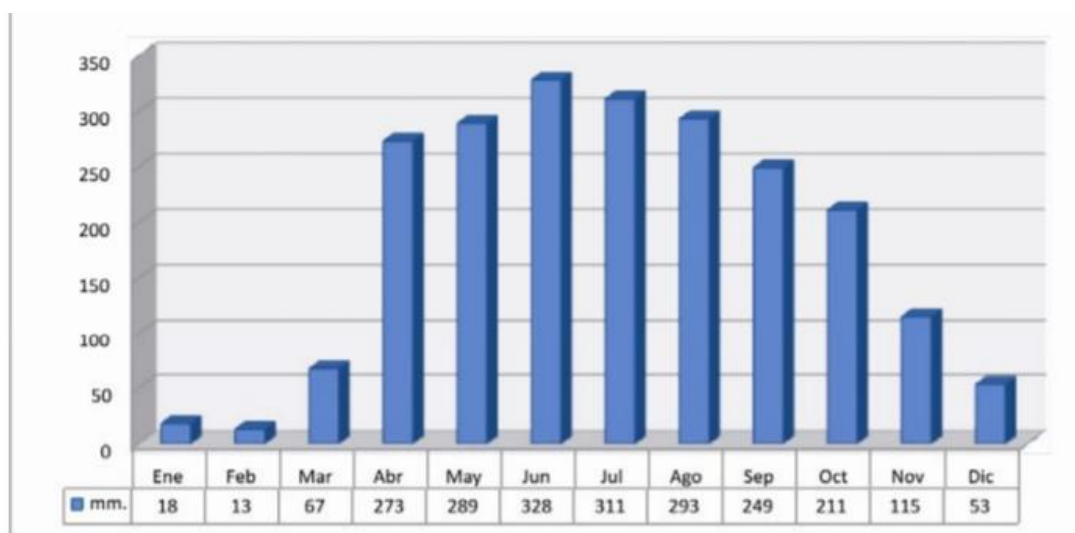


Figura 5. Variación mensual de la precipitación promedio

Fuente: INGEOMINAS (2010)

En el territorio araucano se tiene como evento fundamental la clasificación de las zonas de vida, en ellas se establece la información de la variable independiente como temperatura, pluviosidad y evapotranspiración potencial, en estas zonas se tiene un concepto global que es determinado por la vegetación natural.

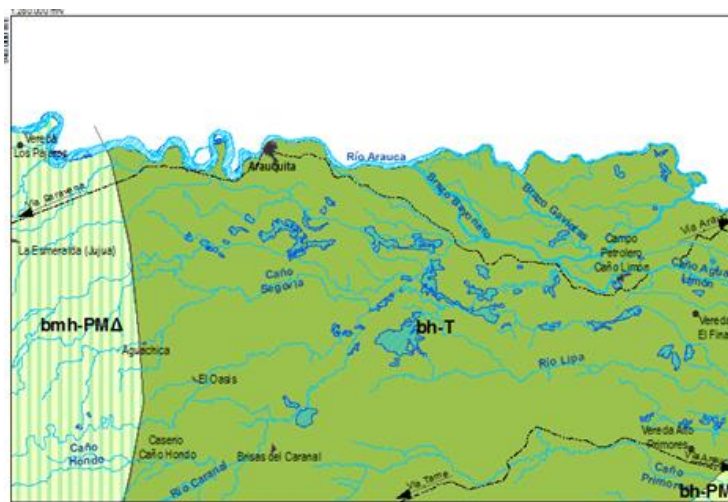


Figura 6. Mapa de zonas de vida

Fuente: INGEOMINAS (2010)

Las zonas de vida se clasifican en un bosque muy húmedo premontado transición, bosque húmedo premontado, o bosque húmedo tropical, como se ilustra en la Figura 6.

Bosque muy húmedo premontano (Bmh-PM)

En este apartado INGEOMINAS (2010) hace referencia a que el bosque húmedo premontano se haya en el pie de monte de la cordillera oriental y en la zona del extremo occidental de la plancha. Su posición geográfica genera continuamente precipitaciones, por lo que es de gran importancia para el fortalecimiento de las vertientes y ríos ahí nacientes.

Los niveles climáticos están establecidos entre una ventana de 22 – 24 °C y con una precipitación promedio en un tiempo de 12 meses de 2 a 4 metros.

En ese territorio se cultivan productos tales como el plátano, cítricos; se siembre pasto, y se hace ganadería, entre otros.

1.1.21. Suelo

El punto geográfico de los Llanos Orientales se encuentra demarcado por sedimentos arcillosos de origen aluvial que están conformados en sus estructuras por un alto porcentaje de hierro, aluminio y minerales básicos, hay que tener en cuenta que estos suelos tienen un porcentaje alto de acides debido al estancamiento de agua y desecación del suelo. Este suelo es de gran importancia porque en él se hace ganadería y se cultivan productos agrícolas como el cacao, la yuca, el plátano y el INGEOMINAS (2010).

1.1.22. Humedales

Los humedales son sectores que se estudian en forma diferencial en las aerofotografías, en las que se aprecian volúmenes de agua que proporcionan el crecimiento de vegetación hidrófila y en sus bordes se encuentra esparcido un porcentaje importante de sales minerales, también estas áreas, de forma continúan están separadas entre ellas por zonas verdes, que son las que hacen el aislamiento de las planchas aledañas.

Otro aspecto para tener en cuenta es el criterio fotogeológico, que está conformado por la asociación de composiciones como tonalidad oscura asociada a cuerpos de agua, bordes blanquecinos y vegetación hidrófila.

Teniendo como referencia el río Arauca, se puede establecer que en razón a la plancha 124, en Arauquita se encuentran localizados una variedad de humedales de Lipa (ver Figura 7), que corresponde a un tercio de la zona central oriental y también otros cuerpos menores, que conforman el Caño Rico y el Caño Mata Palito.



Figura 7. Humedal de Lipa

Fuente: INGEOMINAS (2010)

1.1.23. Hidrografía del río Arauca

El río Arauca está conformado por una red de vertientes que se estructuran a través de su nacimiento en el páramo de Santurbán en la Sierra Nevada del Cocuy, y desemboca en el río Orinoco.

Tabla 3. Vertientes del río Arauca

Arauca	3701	Río Chitagá	2489
	3702	Río Margua	746
	3703	Río Cubujón – Río Cobaría	1979
	3704	Río Bojabá	1133
	3705	Río Banadía y otros directos al río Arauca	2103
	3706	Directos río Arauca	2929

El río Arauca comprende una longitud aproximada de 1100 km, de los cuales son navegables 510 a partir de Arauca, capital del departamento del mismo nombre, marca límites con Venezuela con 280 km y recorre en Colombia 400 km.

1.1.24. Amenazas naturales

En el documento editado por INGEOMINAS (2010) se describe el área que comprende la plancha en la que se hace referencia a los tres fenómenos naturales que comprende las amenazas para la población e infraestructura por inundaciones y socavamiento lateral de los ríos.

Amenaza por inundación

Las inundaciones son fenómenos hidrológicos destructivos que hacen parte de la dinámica de evolución de una corriente en el cual se producen a través de una precipitación continua, persistente y generalizada cuyo efecto es un aumento progresivo del nivel de agua que conforma un cauce de un río o vertiente del cual se ocasiona constantemente

desbordamiento de sus aguas a través de una geografía de pie de monte y llanuras que perjudica notablemente a los componentes económicos, sociales y humanos Trujillo (2014).

Ahora bien, referenciando las inundaciones que se presentan en un territorio exclusivamente llano como lo es la geografía de Arauca, donde se presentan alturas mayores a 5 m de sus niveles de cauce y donde las planicies de sus trayectorias son aluvialmente inundables, se concluye que aquí se presentan amenazas continuas por inundación.

Por otra parte, la problemática de la situación social del país genera que un grupo de población vulnerable se desplace a sitios cercanos a las riberas de los ríos donde construyen sus ranchos y se radican, estas zonas son vulnerables a inundaciones permanentes.

En el informe de nuevos escenarios del cambio climático para Colombia 2011-2100, tomado de la tercera comunicación del cambio climático (IDEAM, 2017), los estudios mostraron que el departamento de Arauca tendrá relevantes cambios; entre 2011 – 2040 la temperatura crecerá en un 0,9 °C, entre 2041 – 2070 aumentará en 1,8°C y entre 2071 - 2100 abra un incremento de 2,6°C (Ruíz , y otros, 2015), con lo anterior se hace necesario buscar que se tomen medidas de las cuales permitan la adaptación al cambio climático para el departamento de Arauca.

La tabla 4, presenta el registro histórico desde el 2004 hasta el 2021 de las inundaciones que demarca el tipo de alerta, los damnificados, puntos críticos y factores económicos que fueron trascendentales en los factores sociales, políticos y económicos de la región.

Tabla 4. Histórico relevante de las inundaciones del río en el municipio de Arauca

HISTORICO DE INUNDACIONES DEL RIO EN EL MUNICIPIO DE ARAUCA					
Año	Tipo alerta	Damnificados	Calamidad pública	Puntos críticos	Factores Económicos
2004	Roja	1800 familias en el departamento, 100 familias del municipio de Arauca.	Si	Vereda Los Angelitos hasta el corregimiento El Caracol, barrios libertadores.	70.000 hectáreas de cultivos de pancoger inundadas, infraestructuras como colegio Simón Bolívar y escuela los libertadores
2008	Roja	61 familias	Si	Barrios libertadores (7 manzanas)	61 viviendas averiadas
2010	Roja	65 familias 344 personas			59 viviendas averiadas y 6 destruidas, perdidas de alimentos perecederos y animales
2018	Roja	2.285 familias (11.425 personas) damnificadas y más 165 familias (621 personas) de comunidades indígenas Hitnu, Sikuaní y Makaguán	Si	Barrio Bello horizonte, Gabanes, San Vicente, vereda Barrancones, los sectores de El Torno, La Payara y Corocito.	Animales, aves de corral, como cultivos de maíz, yuca, plátano, entre otros, infraestructura de puente de comunicación en el sector de Villa Luz
2021	Roja	213 mujeres y hombres, 370 niños, niñas, jóvenes y adolescentes (NNAJ), campesinos, más de 300000 personas sin energía eléctrica	Si	vereda la Nube, En la vereda Sinaí	2330 familias, Viviendas afectadas 20, Viviendas averiadas 131, Viviendas destruidas 13, 600 hectáreas de Cultivos afectados, Pérdidas de 20.000 cachamas.

Amenaza por socavación de cauces

Para entender el concepto de área dinámica equivalente al cauce del río en una zona determinada, se debe recurrir a un principio cuya senoide o trayectoria del cauce es descrita en forma de onda; puede aplicarse a una vertiente o una afluencia dinámica o flujo de agua, cuyo nombre es un criterio meandro.

Otra representación de este sistema meándrico es su determinación a través de un plano en el cual atraviesa un eje donde se unen las aristas externas de este criterio y así se determina la zona correspondiente al cauce en estudio INGEOMINAS(2010).

1.1.25. Sistemas inteligentes

Inteligencia Artificial

La Inteligencia Artificial (IA) se establece como una ciencia de los sistemas computacionales que basa sus conceptos teóricos y prácticos en los diseños de técnicas inteligentes aplicadas a las áreas de predicción y diagnóstico, Vilca (2017).

La Inteligencia Artificial se define como un conjunto de reglas generales que se rigen dentro del campo de la lógica y métodos representativos del conocimiento a través de algoritmos computacionales cuyo objetivo es el de emular un proceso humano, Banda (2014).

.

1.1.26. Sistema Neuronales Artificiales

Las redes neuronales tratan de emular el comportamiento humano, usando el aprendizaje a través de la experiencia a partir de un conjunto de datos (Fernandez & Florez, 2008). Los componentes que conforman las redes neuronales están implementadas a través de estructuras físicas como hardware avanzado y sus acciones a través de software donde se idealizan las rutas que conforman una red neuronal biológica, Salas (2004) . La estructura interna de las redes neuronales está basada en interconexiones a través de capas, de tal forma que emulan una red neuronal, cada modelo de la estructura de una red neuronal tiene la capacidad de ejecutar algún tipo de procesamiento a partir de variaciones de entrada y una

accion en la salida a través de su respuesta, esto es un sistema paralelo o distribuido (Antoniuo & Lu, 2007).

Elementos de una red neuronal artificial

Las redes neuronales están estructuradas mediante modelos que están conformados por dispositivos elementales de procesos, Salas (2004) las redes neuronales pueden ser de tres tipos:

1. Redes neuronales que se alimentan de estímulos del medio externo y están relacionadas con el sistema sensorial del cual toma la información.
2. Las redes neuronales interactuan con ciertos componentes internos debicados a su procesaminto, esto es referente a un concepto de interacción entre ellas, llamado sipnasis.
3. La red neuronal al procesar su información transmite internamente a sus puertos de salida donde estructura la respuesta del sistema, cada red neuronal interactua con valores numéricos denominados estados de activacion, dicha señal de salida es enviada a través de canales de comunicación unidireccional a otras redes y así se consigue modular en forma eficiente los cambios dinámicos interactivos de esta red neuronal.

Estructura de una red neuronal

La conformación de una red reuonal está estructurada por niveles o capas de un número determinado de neuronas.

A partir de un concepto de conocimiento de la red se pueden distinguir tres tipo de capas:

1. Entrada: Es la capa que se alimenta de la información del sistema externo.
2. Ocultas: Es una estructura interna que no tiene contacto con el sistema externo y sus niveles ocultos oscilan entre cero a un número infinito, estas pueden estar interconectadas de diferentes formas o distintas tipologías de redes neuronales.
3. De salida: Transfieren información de la red hacia el exterior, en el cual se dice que una red es totalmente conectada si todas las salidas desde un nivel llegan a todos y cada uno de los nodos del nivel siguiente.

Clasificación de una red neuronal

Segun Varela y Campbells (2011), las redes neuronales se clasifican a partir de dos de sus características primordiales, que son:

1. Topología: Está conformado por cuatro estructuras: red feedforward y backforward; monocapa como perceptrón o adeline; multicapa como perceptrón, y red recurrente como elman y hopfield.
2. Algoritmo de aprendizaje: Se clasifica en cuatro módulos: aprendizaje supervisado perceptrón simple y multicapa; aprendizaje auto organizado hopfield, máquina de cauchy, kohonen; redes híbridas, y redes de base radial y aprendizaje reforzado, supervisado y auto-organizado.

1.1.27. Sistemas Neuro Difusos

La integración entre las técnicas de lógica difusa y redes neuronales hace que se obtenga una herramienta potente del cual recoge los atributos más determinantes para cálculos de sistemas de regresión, esta tiene como nombre ‘sistema neuro difuso’, Valbuena (2021).

Al utilizar técnicas de sistema difusos, siempre se tendrá información imprecisa por sus mecanismos de inferencia bajo incertidumbre lingüística, pero estos son eficientes explicando sus decisiones en forma automática a través de reglas. También se dice que las redes neuronales son eficientes pero tienen desventajas como su entrenamiento y corridas para que converjan en un punto determinado.

Para conocer detalladamente las bondades de una red neurodifusa respecto a la red neuronal tradicional y sistemas difusos se presenta la Tabla 4 con ventajas y desventajas:

Ahora, en lo alusivo a los sistemas neurodifusos que integran la capacidad de aprendizaje de las redes neuronales con la fortaleza de interpretacion lingüística de los sistemas de inferencia difusos, se pueden presentar los siguientes resultados:

1. Adaptabilidad y utilización de los algoritmos de aprendizaje desarrollados por redes neuronales.
2. Ampliabilidad de la integración de conocimiento en forma eficiente.
3. La extracción del conocimiento a través de la utilización de una base de datos conformada por reglas difusas.

Clasificación de los sistemas neurodifusos

Cuando se determina una técnica de alto rendimiento y grandes prestaciones para objetivos de regresión, se puede hacer mención a la técnica neurodifusa, la cual está representada en el campo de investigación e industrial a través de las siguientes familias:

Tabla 5. Comparación entre las técnicas inteligentes de lógica difusa y redes neuronales

Lógica Difusa	Redes Neuronales
Utiliza el conocimiento disponible con el propósito de optimizar el sistema directamente.	En estas no se encuentra una forma sencilla en la cual se pueda optimizar la red, debido a que se utilizan sistemas de toolbox de Matlab.
Describe el comportamiento de un proceso utilizando estructuras como “si - entonces”.	Estas técnicas se vuelven complejas cuando se seleccionan desde su estructura y algoritmo de entrenamiento, por tal razón, se hace necesario un experto con mucha experiencia.
Utiliza el conocimiento de un agente experto.	Permite hallar soluciones a partir de un conjunto de datos.
El sistema de conocimientos se considera estático.	Estas técnicas son capaces de aprender y auto-adaptarse en forma eficiente.
Estas se aplican en múltiples procesos tanto industriales como de investigación	La aplicación en la investigación académica es amplia en este campo, pero existen algunas aplicaciones directamente en la industria.
En estas se encuentran soluciones que hacen que el procedimiento de ensayo sea muy simple y con tiempos reducidos que hacen que el sistema sea eficiente	Otro aspecto fundamental es que estas redes neuronales necesitan, para su resolución, recursos de alta complejidad en hardware.

Sistemas Adaptativos de Inferencia Neuro-difusa (ANFIS). Es un método integra la capacidad adaptativa de aprendizaje de las redes neuronales con la capacidad de inferencia difusa para razonamiento FIS (Marín & Pineda, 2019). Con el uso del algoritmo de entrenamiento de retropropagación, se crea un conjunto de reglas de un sistema difuso a partir de la recopilación de datos de un proceso, la arquitectura y el funcionamiento es equivalente a una base de reglas tipo sugeno (Valbuena, 2021).

FSOM (Fuzzy Self-Organizing Maps). Es un sistema difuso optimizado utilizando la técnica de los mapas auto-organizados de Coñeen.

Algoritmo **NEFCLASS** se basa en la estructura del perceptrón multicapa, que modela los pesos por conjuntos difusos, como se visualiza en la figura 8.

Aprendizaje de un Sistema Neuro-difuso

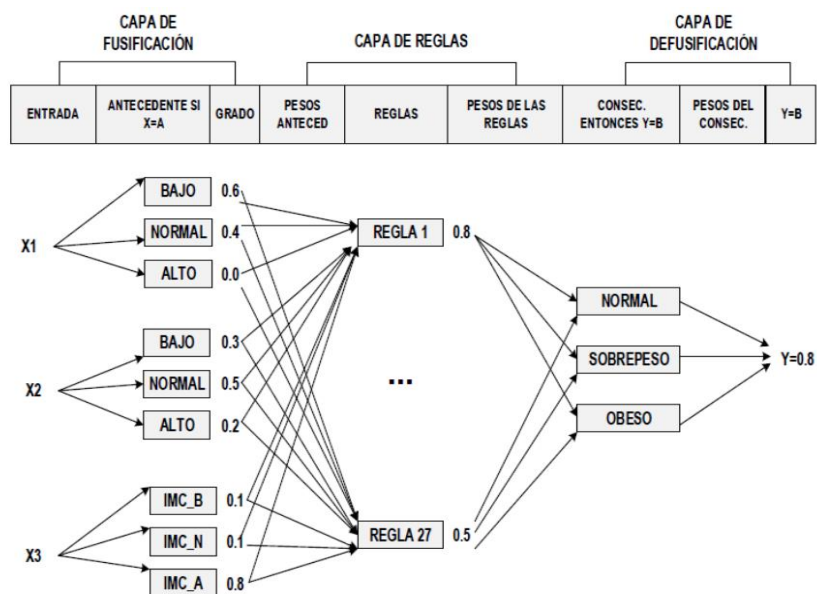


Figura 8. Sistemas tradicionales de reglas difusas

Fuente: (Vilca, 2017)

Un sistema neuro difuso puede ser representado por una capa de neuronas que se atribuye altos recursos que convergen en conocimiento y aprendizaje, que hacen que las redes neuronales puedan obtener el propósito de optimizar el conocimiento del sistema en estudio, como se visualiza en la Figura 9.

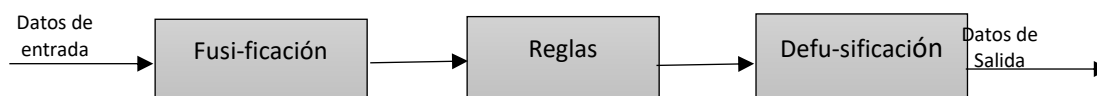


Figura 9. Sistema neuro difuso

Fuente: Vilca (2017)

La Figura 9 representa en la capa de fusificación, cada función de pertenencia de entrada del antecedente de una regla difusa que representa un conjunto de neuronas. Los parámetros que estructuran estas neuronas, como sus funciones pertenencia, hacen que se puedan retomar óptimamente los volúmenes de información a ser entrenados y así, obtener una señal de salida de iguales características a la entrada, donde su ubicación precede a las funciones de pertenencia según lo estipulado por (Vilca, 2017).

1.2 Estado del Arte

En estos tiempos, el auge del desarrollo tecnológico genera consecuencias directas al medio ambiente haciendo que la temperatura y las diversas precipitaciones sean variables y generen efectos colaterales en los factores naturales y cambios abruptos de las actividades humanas en el planeta (IDEAM y PNUD, 2015).

El planeta se encuentra en un momento neurálgico en el que se debe afrontar, de una forma muy estratégica, el desafío del cambio climático. Cada momento, en diferentes puntos del marco geográfico mundial, el planeta, a través de sus reacciones, emite efectos sobre los cambios que se producen, desde cambios meteorológicos donde producen efectos colaterales en la obtención de alimentos en el país, hasta el aumento vertiginoso del nivel del mar, que incrementa los riesgos de grandes catástrofes generadas por las precipitaciones, que hacen que ocurran inundaciones que perjudican de una forma directa a la economía de los países.

Por lo anterior se hace de gran importancia el desarrollar una metodología en la que se tenga como tema fundamental la mitigación a un nivel mínimo de las inundaciones a través una implementación de un sistema de alertas tempranas (SAT) (OEA. Irlanda., 2001).

En el presente documento se realizará una metodología que contribuya en forma eficiente al desarrollo de este sistema de alerta temprana. A razón de esta necesidad inmediata se procede a presentar un marco teórico fundamentado en referencias bibliográficas que involucren un procedimiento para desarrollar este sistema como lo describe (Domínguez-Calle y Lozano, 2014).

1.2.1. Contextualización de alertas tempranas

Un artículo de Álvarez y Grayeb (2005) hace referencia a los riesgos del cambio climático, y además sirve como concepto fundamental para fortalecer el sistema de alertas tempranas.

El concepto referente a las alertas tempranas se orienta, según Basher et al. (2006), cuando se generan, debido a desastres ambientales, pérdidas económicas, políticas e industriales.

Una alerta temprana integra un modelo hidrológico puede predecir el caudal, que relaciona la lluvia y escorrentía (Maza, 2018). Cuando se presentan lluvias toda el agua que precipita penetra en el suelo, se infiltra, cuando inicia la lluvia la velocidad de infiltración es elevada, esta disminuye hasta quedar constante y se le llama tasa de infiltración. Para el evento de una precipitación mayor que una tasa de infiltración se le conoce como escorrentía (Pujol, 2009).

La investigación hecha por Lopera y Ramírez (2012) consistió en diseñar un sistema de alertas tempranas cuyo fundamento se orientaba en la población ante inundaciones y deslizamientos mediante un diagnóstico de la vulnerabilidad y las amenazas, que dio como elemento fundamental el monitoreo del riesgo, también se identificaron autores de la comunidad y se propuso una estructura administrativa para la administración del SAT.

En relación a este tema existe un estudio realizado por Dávila (2016), en el que se especifican estos desastres con el conocimiento de los riesgos, y en el que se hace un análisis de amenazas y vulnerabilidades.

De manera similar, en un estudio hecho por Franco (2016), se establece una comparación de sistemas de alertas tempranas en el que se identifican los problemas, consecuencias y lecciones aprendidas, a partir de ello se hacen las recomendaciones. En ese estudio se analiza los indicadores relacionados a las inundaciones y a los SAT, también se

analiza la diferencia entre un fenómeno natural y un desastre, y se aclara que un desastre puede ser un sistema de alerta temprana que tome como eje central la participación de las comunidades.

En el Instituto Dominicano de Desarrollo Integral (IDDI), Lalanne et al. (2017) ha elaborado la implementación de nuevas tecnologías con el propósito de hacer eficiente el acceso a las alertas tempranas ante fenómenos hidrometeorológicos para la población en área del riesgo de la ciudad de Santo Domingo. El proceso implementado consta de seis fases, conocimiento del riesgo, análisis de los roles y responsabilidades, análisis de los procesos del SAT, análisis de las potencialidades y requerimientos técnicos, planeación de las acciones y conferencias internacionales.

En el documento de García y Mendiavelso (2017) se establecen directrices respecto a conceptos como sistemas de alerta temprana, cuencas hidrográficas, estudios básicos de amenazas de inundaciones, fenómenos hidrometeorológicos, análisis detallado de la amenaza de inundación y una serie de elementos matemáticos estructurales que definen el diseño de un sistema de alerta temprana para medición de caudales.

La investigación realizada por García (2017) tiene como propósito implementar una herramienta hidrológica que aporte a la construcción de un sistema de alerta temprana ante inundaciones mediante el acoplamiento y automatización de paquetes informáticos de aplicación hidrológica, hidráulica y sistemas de información geográfica.

La investigación hecha por Amaguy (2018) tiene como finalidad crear un sistema de alerta temprana en el Cantón Tena, de la provincia de Napo. Ese estudio se estructuró de la

siguiente manera: se desarrolló un diagnóstico ambiental socioeconómico; se determinó el riesgo de inundaciones de la población; se establecieron actividades de comunicación y divulgación, y se coordinó el plan de simulación adecuado para la toma de decisiones.

El estudio elaborado por Gutierrez y Castaño (2020) alude a las características más evidentes, en la que se encuentran la constante exposición de los pobladores a los eventos hidro-climáticos o desastres naturales que aparecen en las épocas invernales y que ocasionan pérdidas agropecuarias y de infraestructura. En este aspecto es donde el sistema de alertas tempranas se presenta como una solución que propone varias formas de medida con las que se mitigan problemas que se generan por las inundaciones.

La tendencia mundial es implementar sistemas que sean medios para conocer directamente el nivel de los ríos, para salvar vidas y prevenir desastres. Las alertas tempranas y precisas para inundaciones son un desafío constante para dar aviso del peligro natural en espacio y tiempo cortos (Teixeira & Balda, 2021). En la actualidad se encuentra muy difundido el uso de la escala de los colores para transmitir las alertas de todo tipo, como esta descrito en el documento de (Elía et al., 2021) que hace una revisión del uso de escalas de colores en un grupo de servicio meteorológico. El concepto de alerta está asociado a tres conceptos fundamentales: la urgencia, el impacto y la probabilidad de ocurrencia del evento.

1.2.2. Información para diseñar un sistema de alerta temprana

Cuando se habla de información se debe tener presente que existen dos clases, una dinámica, correspondiente a la tomada por los instrumentos tecnológicos, y otra estática, en relación a técnicas e instrumentos estadísticos como entrevistas y encuestas de acuerdo al documento (Mariaca et al., 2013).

Para un sistema de alertas tempranas se hace necesario obtener información dinámica e información estática. En el estudio hecho por Elizabeth y Miguel (2020) hace referencia al sistema de información estático a través de técnicas como la observación, entrevista, encuestas y medición de población y muestra.

El estudio realizado por Ramírez y Rojas (2019) se basa en la utilización de las dos técnicas de recolección de datos, tanto dinámicas como estática, en la que la dinámica está constituida por las estaciones meteorológicas que están en el cauce del río y afluentes, y las estáticas a través de instrumentos como las encuestas.

El documento del IDEAM (2019) hace referencia a la metodología con la que se obtiene la información de las variables independientes de nivel, precipitación, viento, humedad y evaporización de las diversas regiones que rodean los cauces de los ríos en Colombia, en especial el río Arauca. En este documento se realizan consultas sobre las estaciones meteorológicas que permiten descargar la información asociada a las variables hidrometeorológicas señaladas anteriormente, que proporcionan información especial sobre catálogos de recursos específicos de estaciones. Esta información es presentada en archivos en el ambiente Excel y Shape, cabe señalar que se puede descargar la información en un periodo determinado.

En el estudio del IDEAM y PNUD (2015) se presenta la toma de información mediante las estaciones meteorológicas de nivel, precipitación y también se hace mención, en forma específica, sobre la metodología para toma de información desde el punto de vista de la observación que hacen en forma manual los pobladores de la región en estudio.

De acuerdo al documento de Corpoguajira (2011), en la Sierra Nevada de Santa Marta existe una población de desplazados hacia los centros urbanos que han representado un problema social porque las personas ocupan las áreas de la laderas, cerros y rondas hidráulicas de la ciudad de Santa Marta, por esta razón se generan altas presiones que causan deterioro en las construcciones antitécnicas de las vivienda sumado todo ello al mal manejo de las aguas residuales. En ese contexto, la Corporación Autónoma de Barranquilla ha implementado un proyecto para el diseño y operación de un SAT para inundaciones; este proyecto acarrea instalar redes de estaciones hidrometereológicas para conocer de primera mano el comportamiento de las precipitaciones y los niveles de las superficies de agua en los drenajes en tiempo real, y así evitar pérdidas de vidas humanas o el desmejoramiento de actividades económicas, como la agricultura.

La información hidrológica básica es usada para mejorar la comprensión de los procesos de monitoreo realizados a los ríos. La garantía de la calidad de información es un componente muy importante, por eso hay que tener en cuenta la recolección de datos y el mantenimiento continuo de los instrumentos hasta la difusión de los datos e información, del cual son preparados los dispositivos automáticos para la captura de los datos codificados, reducidos y normalizados de datos de entrada presentados por (Vallejo, 2013).

1.2.3. Modelos matemáticos del cauce del río

Según la investigación de Reynoso (2014), se estudia en detalle la precipitación que varía aleatoriamente en el tiempo y el espacio, y que acarrea complicaciones al no ser posible describir algunos procesos hidrológicos mediante leyes físicas exactas. Sin embargo, toma como concepto de sistema la construcción de modelos que pueden ser conceptuales y

matemáticos en los que se relacionan las entradas y salidas que determina el caso de estudio. En el estudio se trabaja como caso base el modelo matemático en el que aparecen estructuras a través de ecuaciones lineales y de potencia que hacen posible la equivalencia de la abstracción del fenómeno real a componentes de predicciones correspondientes.

En el estudio de Callejas (2009) se implementó un modelo matemático del río Cauca, sus humedales y la planicie de inundación comprendida entre las estaciones hidrométricas. Este modelo matemático está basado en el modelo construido en desarrollo del proyecto de caracterización y modelación matemático del río Cauca, en el periodo 1999-2007. Este modelo se estructuró con la batimetría detallada efectuada en el año 2000, después se utilizó la información topobatimetría levantada en el año 2005 y se incluyeron en el modelo nueve de los humedales.

La investigación desarrollada por Sandobal et al. (2017) realizó un modelo matemático que estima el caudal en vertederos. En estos estudios se obtuvieron prototipos con los que se demostró que los coeficientes de descargas no son constantes y que varían entre unos valores característicos. Se propuso un modelo potencial para la corrección del coeficiente de descarga que mejora la precisión de la ecuación de Sotelo, también se encontró un modelo matemático que relaciona la velocidad media y la constante básica con un coeficiente de correlación.

En el estudio de Stenta et al. (2014) se presenta la implementación y calibración de un modelo distribuido, hidrológico-hidráulico físicamente basado en la cuenca del río Tercero-Carcaraña, también se contó con información de cartas topográficas del IGN, imágenes de Google Earth, recorridas de campos y proyectos existentes. Este modelo se

conformó por celdas y una red conformada por información hidrológica e hidráulica en tres eventos históricos muy extraordinarios.

En el documento de Nuñez, (2005) se plasma la mejor estimación de los caudales recesivos para la cuenca del río Lontue, utilizando la creación de nuevos modelos con base en ecuaciones diferenciales, del cual se probaron múltiples modelos, de los cuales se utilizaron los tres que obtuvieron la mejor respuesta en el ajuste: modelos exponenciales basados en su coeficiente de agotamiento y la variación del tiempo en sus tendencias cuadráticas y de potencia.

1.2.4. Modelos observadores con técnicas inteligentes

Una de las técnicas más aplicadas en este campo de las alertas tempranas son las redes neuronales, que simulan el funcionamiento de un cerebro humano para resolver diversos problemas del mundo real (Ortiz, 2017).

El documento realizado por Gómez et al. (2012) presenta resultados a través de una implantación y simulación de los modelos conformados por Redes Neuronales y por el sistema híbrido neuro-difuso, que obtiene la predicción de caudales medios mensuales. También, se evaluaron tendencias de seis modelos teniendo muy presente los cambios de sus entradas y reglas difusas. Otro aspecto es el uso que se le dio en la configuración del algoritmo de las redes neuronales y su configuración de perceptrón multicapa.

Para mitigar los efectos destructivos de las inundaciones que se presenta anualmente en las inmediaciones del río Huaura, Paredes (2011) ha hecho un estudio en el que hace una comparación para escoger cuál es el mejor modelo, si el Arima o las Redes Neuronales. El

resultado arrojó que, para pronósticos, las Redes Neuronales ofrecieron mejores prestaciones y eficiencias que el modelo Arima.

Para anticipar un caudal que tendría repercusiones catastróficas cada año en las inmediaciones del río Tomebamba, se desarrolló una investigación hecho por Maza (2018), que se basó en la integración de un sistema de alerta temprana que logró pronosticar caudales diarios y su evaluación de vulnerabilidad a inundaciones. En su conformación se utilizó una red neuronal perceptrón multicapa de retro-propagación a través del uso del Toolbox de Matlab y sus variables independientes de precipitación y dependiente como es el caudal. El modelo se optó teniendo presente la evaluación cualitativa y cuantitativa.

Para obtener predicciones de caudales medio diarios en la cuenca del río Amazonas, se tuvo en cuenta lo dicho en el estudio de Béjar et al. (2016), en el que se diseñó, implementó y simuló, a través de técnicas de predicción inteligente como son las Redes Neuronales y Neuro Difusas, un modelo de alertas tempranas. La simulación se obtuvo por medio de la herramienta de los Toolbox de Matlab, que evaluó el comportamiento del río usando las dos técnicas aludidas, donde se logró obtener coeficientes de correlación superiores al 97 % y un error medio porcentual absoluto por debajo del 10 %. En conclusión, cualquier modelo que aplique estas técnicas es viable para predecir y por lo tanto puede ser utilizado con confiabilidad.

Cuando se habla de predicciones en el campo de las inundaciones, que se relacionan a través de la toma de información de variables como precipitación y flujo, existen una gran variedad de métodos, en la investigación realizada por Agustín et al. (2019) se hace referencia

al uso hidrológico del modelo de tanques, que utiliza un sistema de redes neuronales que ajustan y optimizan sus parámetros por medio de algoritmos genéticos en tiempo real.

En el proyecto realizado por Bartual y Gimenez (2009), sus investigadores dan una solución a la necesidad de conocer con suficiente tiempo de antelación de los caudales futuros en ríos que son amenazas potenciales de ciudades e industrias. Para lograr este fin se propuso una metodología de un modelo híbrido que permite identificar automáticamente el estado hidrológico de una cuenca determinada, y que permitir modelar por separado cada estado mediante una Red Neuronal simple. También, se ha introducido el concepto físico en la elección de las variables de entrada al modelo, proponiendo análisis geomorfológicos de la cuenca y de tiempos de respuesta que ayuden a identificar las variables más influyentes.

La inteligencia artificial ha sido de gran apoyo mediante la interpretación de imágenes satelitales, monitoreo de variables hidrométricas, para la gestión de recursos hídricos, como se muestra en el trabajo de machine learning como herramienta para determinar la variación de los recursos hídricos realizado en Perú, donde se concluye que es método eficiente para el modelado e interpretación de datos hidrometereológicos (Vargas et al., 2021).

1.2.5. Administración del SAT

Para poder dar una solución que minimice los riesgos de catástrofes, en Colombia existen entidades que han implementado acciones en sitios que monitorean algunos fenómenos hidrológicos que afectan de una u otra forma la población ribereña. En este contexto, el proyecto realizado por Vallejo (2013) propone una alternativa a los sistemas actuales que utilizan comunicación satelital y sensores de alta gama, con el fin de reducir los

costos de instalación e implementación, teniendo muy presente mejorar la prestación del servicio.

Otro aspecto de interés es que este estudio se centra en un prototipo integrado con módulos que se alimentan con energía alternativa o solar y con comunicación por radiofrecuencia, transmitida por vía inalámbrica a un receptor ubicado cerca de la comunidad, para que se pueda actuar después del servicio de alerta. La estación compuesta por el prototipo incluye un sistema de visualización de la alerta por medio de un indicador estilo semáforo, que actúa dependiendo del grado del nivel del cauce del río.

El artículo propuesto por Garrido et al. (2013) se basa en un análisis de los conceptos, herramientas y metodologías que se consideran importantes en el estudio de las inundaciones, en este documento se propone un recurso que involucra la adquisición y supervisión de los datos en tiempo real y diferido, integrando herramientas en el sistema como son: HEC-HMS y HEC-RAS.

El trabajo realizado por Clavijo y Castro (2018) tiene como propósito hacer una evaluación de las diferentes metodologías con las que se obtienen los parámetros o umbrales de inundación y estiaje a nivel de las estaciones hidro climatológicas a seleccionar en las márgenes del río Cauca y sus principales afluentes, adicionalmente, se procede a establecer protocolos que activen alternativas de la administración de los sistemas de alerta temprana.

1.3. Marco legal

Basado en la ley 2169 de acción climática aprobada por el Congreso de la República de Colombia (2021), cuyo propósito es el de impulsar el desarrollo bajo en carbono del país mediante el establecimiento de metas y medidas mínimas en materia de carbono neutralidad

y resiliencia climática. El artículo 6 de esta ley, se basa en las metas de adaptación al cambio climático, y en el ítem sector ambiental y desarrollo sostenible que diseña e implementa al 2030 un sistema integrador de información sobre vulnerabilidad, riesgo y adaptación al cambio climático (SIIVRA), que permite monitorear y evaluar la adaptación al cambio climático en Colombia.

Según el documento de CONPES 4058 del año (DNP, 2021), se desarrolla la política pública para reducir las condiciones de riesgo de desastres y adaptarse a los fenómenos de variabilidad climática, donde se establece que esta política aborda tres líneas causales de la insuficiente capacidad para conocer y reducir las condiciones de riesgo de desastres por fenómenos de variabilidad climática, que impactan negativamente al desarrollo del país. La primera está relacionada con el limitado y desigual conocimiento del fenómeno climático, la segunda se refiere a la baja corresponsabilidad sectorial para la gestión integral de los efectos de la variabilidad climática y la tercera, a la baja capacidad territorial para reducir el riesgo de desastres ante la ocurrencia del fenómeno de variabilidad climática. Cabe destacar que el objetivo de esta política es el desarrollo de acciones que permitan la generación, análisis, articulación y apropiación social del conocimiento ante fenómenos de variabilidad climática.

La contribución determinada a nivel nacional de Colombia (NDC) para el periodo 2020-2030, se centra en incorporar tres componentes: i) mitigación de Gases Efecto Invernadero (GEI), ii) adaptación al cambio climático, y iii) medios de implementación como componente instrumental de las políticas y acciones para el desarrollo bajo en carbono, adaptado y resiliente al clima.

De acuerdo con la ley 1931 del 2018, por el cual el estado colombiano establece directrices para la gestión del cambio climático (Ley N° 1931, 2018), se establecieron y desarrollaron principios, aspectos institucionales, instrumentos de planificación, sistemas de información, así como instrumentos económicos y financieros, en el artículo 18, se propuso la generación de planes integrales de gestión del cambio climático sectoriales (PIGCCS).

En el informe de nuevos escenarios del cambio climático para Colombia 2011-2100, tomado de la tercera comunicación del cambio climático (IDEAM, 2017), los estudios mostraron que el departamento de Arauca tendrá relevantes cambios; entre 2011 – 2040 la temperatura aumentará en un 0,9 °C, entre 2041 – 2070 crecerá en 1,8°C y entre 2071 - 2100 abra un incremento de 2,6°C (Ruíz , y otros, 2015), con lo anterior se hace necesario buscar que se tomen medidas las cuales permitan la adaptación al cambio climático para el departamento de Arauca y estar preparados al impacto que generara el cambio climático en los suelos, (IDEAM, PNUD, MADS, DNP, & CANCELLERIA, 2017) buscando alternativas que permitan una mejor calidad de vida y un departamento competitivo.

En este contexto se estableció en el plan de desarrollo departamental de Arauca 2016 - 2019, en el objetivo cuatro del eje estratégico crecimiento verde que busca una adecuada gestión ambiental, y la adaptación al cambio climático; visión estratégica territorial departamental de Arauca 2032: Implantar en el territorio araucano las premisas de avanzar hacia un crecimiento sostenible y bajo carbono; proteger y asegurar el uso sostenible del capital natural y mejorar la calidad ambiental; y lograr un crecimiento resiliente y reducir la vulnerabilidad frente a los riesgos de desastres y al cambio climático de manera que el

desarrollo del territorio sea un verdadero desarrollo sostenible (Gobernacion de Arauca, 2016).

Teniendo en cuenta que el departamento tiene una gran necesidad de que existan datos los históricos de las variables climáticas, las cuales contribuirán a la toma de decisiones para las estrategias de adaptabilidad y mitigación del cambio climático en los próximos años. Además, sirve como herramientas de planificación ambiental, para los diferentes planes ordenamiento territorial (POT), Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCAS), plan de gestión integral de los residuos sólidos (PGIRS), para los diferentes municipios en el departamento de Arauca. Con ello se apunta al crecimiento en ciencia, tecnología e innovación (CTeI), de acuerdo a la visión del PEDCTI Arauca 2022 se visiona como un referente en el desarrollo tecnológico, apropiación y transferencia científica logrando integrarse de manera efectiva a las dinámicas de desarrollo regional y nacional, enmarcados en la competitividad y la sostenibilidad ambiental (Gobernacion Arauca, 2013).

El municipio de Arauca, en su plan de desarrollo municipal, 2020-2023 Fomenta las acciones para mitigar la exposición al riesgo de desastres generados por los fenómenos naturales y antrópicos no intencionados, logrando un municipio resiliente al clima. En su meta de producto tiene Implementar un (1) sistema de alertas tempranas (inundaciones, incendios, sequias o demás fenómenos naturales) (Arauca, 2020).

En el 2012 la ley 1523, adoptó la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, y en su artículo 1, la gestión del riesgo se constituyó en una política pública indispensable para asegurar la sostenibilidad, la seguridad territorial, los derechos e intereses colectivos, en su artículo 4

establece que la prevención del riesgo son medidas de mitigación y prevención que se adoptan con antelación para reducir la amenaza, la exposición y disminuir la vulnerabilidad de las personas. Con el fin de mejorar la calidad de vida de las poblaciones y las comunidades en riesgo y, por lo tanto, permite una planificación del desarrollo seguro, con la gestión ambiental territorial sostenible (Congreso de la República de Colombia, 2012).

El informe del Banco Mundial: Shock Waves: Managing the Impacts of Climate Change on Poverty, muestra que el cambio climático es una grave amenaza para las personas más pobres de todo el mundo, los desastres naturales amenazan los cultivos, y medios de sustento, afectando a los pobres (Hallegatte, 2016) (BANCO MUNDIAL, 2019).

Capítulo II

Adquisición y homogenización de la información

INTRODUCCIÓN

En este capítulo tiene como elemento fundamental la información adquirida a través de herramientas tecnológicas y herramientas informales, entre estas se menciona la información generada por las estaciones meteorológicas e hidrológicas que están bajo la supervisión y control del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM (Vargas y Giraldo, 2018), y la información hidrológica de la variable nivel del río, que se obtiene a través de un protocolo de observación por el cuerpo de bomberos de los municipios respectivos.

La información que se procesa en este trabajo de investigación es medida por herramientas tecnológicas o estaciones convencionales hidrométricas que se basan en los principios de nivel, caudal y las meteorológicas que miden precipitación, humedad, temperatura y evaporización. Estas estaciones proporcionan una base de datos a través de días, meses y años, la cual es descargada en un archivo de Excel por medio de la página del IDEAM (IDEAM, 2019).

Seguidamente, existe en la actualidad la medida de observación con la que se adquiere información directamente del nivel del río por medio de un instrumento denominado limnógrafo (Clavijo y Castro, 2018).

Ahora, con esta información presentada anteriormente, se procede a la caracterización o normalización con el fin de obtener la tendencia y así poder alimentar al modelo

matemático que se desarrolla para representar los parámetros que caracterizan el caso de estudio del río Arauca.

1.4. Estaciones hidrológicas del IDEAM

El IDEAM tiene 1735 estaciones hidrológicas en todo el país, las cuales se pueden visualizar en la aplicación web, como se observa en la Figura 10.

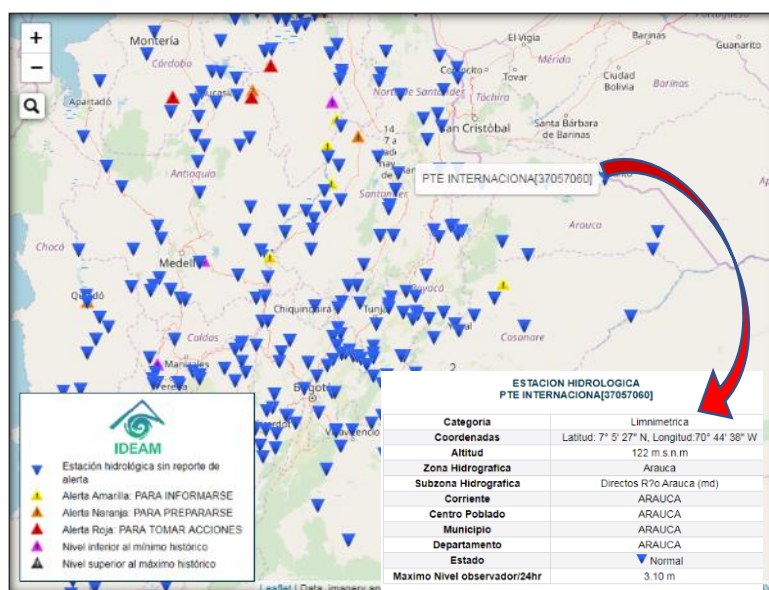


Figura 10. Mapa de estaciones hidrográficas IDEAM

Fuente: <http://fews.ideam.gov.co/colombia/MapaEstacionesColombiaEstado.html>

Para la zona oriente se tiene en cuenta cinco estaciones que conforman el caso de estudio, y son: Río Chitagá (Cácuta, Norte Santander), Río Margua (Toledo, Norte de Santander), Río Arauca (Araucanía y Arauca), Río Arauca (Arauca, Arauca) y Río Cubujón (Cubará).

De las cuales se tomaron tres estaciones representativas porque generan más información y están activas en tiempo real.

En la Figura 11.a se visualizan las tres estaciones localizadas en el mapa colombiano: Peña de los Micos, Alcaraván y Puente Internacional. Cabe señalar que la Figura 11.b indica el recorrido del río en el territorio araucano, y visualiza la ubicación y distancia concluyente (la estación Peña de los Micos está a una distancia de 147 km de la estación Alcaraván de Araucuta, y a una distancia de 247 km de la estación Puente Internacional de Arauca, Arauca). La estación Peña de Micos está situada en la parte superior; la intermedia es la estación el Alcaraván y al fondo se ubica la estación Puente Internacional.

La Figura 11.c representa la estación Puente Internacional de Arauca, Arauca del caso de estudio para el sistema alerta temprana en este proyecto.

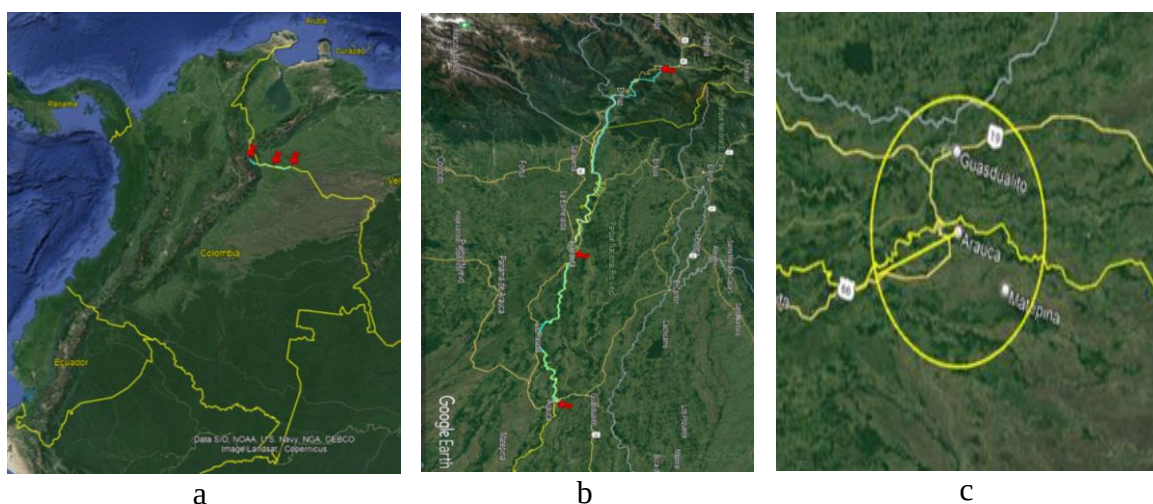


Figura 11. Ubicación de las estaciones meteorológicas del río Arauca

Fuente: Google Earth Pro

Las estaciones meteorológicas e hidrológicas están ubicadas en lugares estratégicos de la vertiente del río Arauca según el catálogo de estaciones que se encuentran en la página del IDEAM, según la Tabla 6.

Tabla 6. Características de las estaciones meteorológicas e hidrométricas significativas del río Arauca

Estación	Ubicación			Tipo de estación	Tecnología	Dpto. Municipio	Instalación estación
	Longitud	Latitud	Altitud				
San Bernardo	72.44	7.23	145.00	Meteorológica pluviométrica	Convencional	Norte de Santander. Toledo	15/10/1973
Peña de los Micos	72.42	7.20	870	Hidrométrica Limnigráfica	Automática telemetría		14/10/1972
Alcaraván	71.42	7.035	162				
Arauquita	71.42	7.04	100	Meteorológica pluviométrica	Convencional	Arauca Arauquita	15/06/1972
Puente Internacional	70.74	7.09	122	Hidrométrica Limnigráfica		Arauca Arauca	15/11/1997
Arauca	70.85	6.97	150	Meteorológica pluviométrica			15/05/1983

1.5. Estación caso de estudio

En el Puente Internacional del río Arauca (Figura 12) existe una estación limnimétrica que toma el aforo de caudales aguas abajo del cauce mediante observación. El cauce se registra desde 1999 hasta la actualidad, los datos reposan en la base de datos del IDEAM, según como lo presenta Ramírez y Rojas (2019).

Información de lluvias y crecidas del caso de estudio

En este ítem se obtiene la información homogenizada y estructurada del IDEAM de las estaciones hidrológicas de Peña de los Micos (Norte de Santander), Alcaraván (Arauca) y Puente Internacional (Arauca), donde se obtienen los niveles medios a través de una ventana de tiempo de cinco meses.



Figura 12. Estación hidrométrica convencional Puente Internacional Arauca

1.5.1. Presentación de la información del IDEAM de las estaciones automáticas y tradicionales del objeto de estudio

De la estación automática (hidrométrica y metereológica) de Peña los micos (Figura 13) se obtiene la tendencia e información de nivel promedio, el cual se observa un punto máximo de 7.5 m en el mes de julio, con una duración de día y medio de crecida, y existen tres picos de una frecuencia de un mes; también se puede interpretar que el comportamiento del nivel medio fue de 4 m en la ventana de estudio, y un nivel mínimo de 2.8 m en el mes de mayo al mes de octubre de 2.9 m.

Ahora, la precipitación media está en un valor de 10 mm en la ventana de los 5 meses de análisis, cabe destacar que la información presentada en la figura 13 no tiene valores incoherentes.

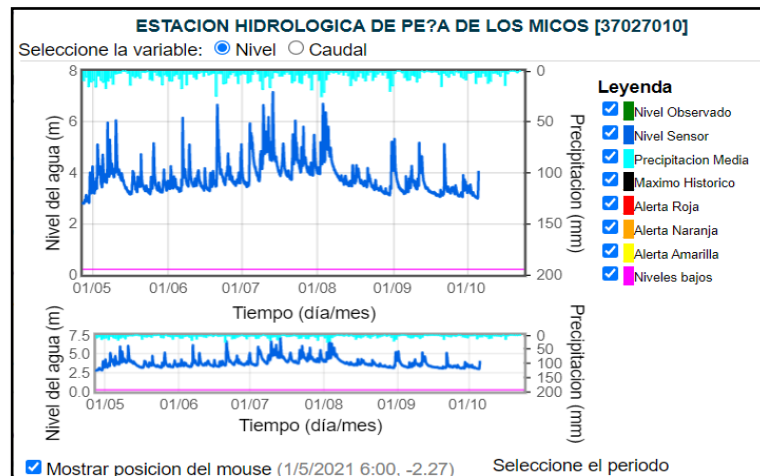


Figura 13. Estación automática de Peña de los Micos en Norte de Santander

Fuente: <http://fews.ideam.gov.co>

De la estación tradicional (hidrométrica) de Arauca (Figura 14) se obtiene la siguiente tendencia e información de nivel promedio, donde se observa un punto máximo de 8 m en julio y agosto, con una duración de dos días de crecida, y existen 3 picos de una frecuencia de un mes, lo que se puede interpretar como el comportamiento del nivel medio de 6.5 m en la ventana de estudio, y un nivel mínimo de 5.6 m. En los meses de mayo a octubre no hay información confiable y no se encuentran los datos de precipitación en la estación del IDEAM.

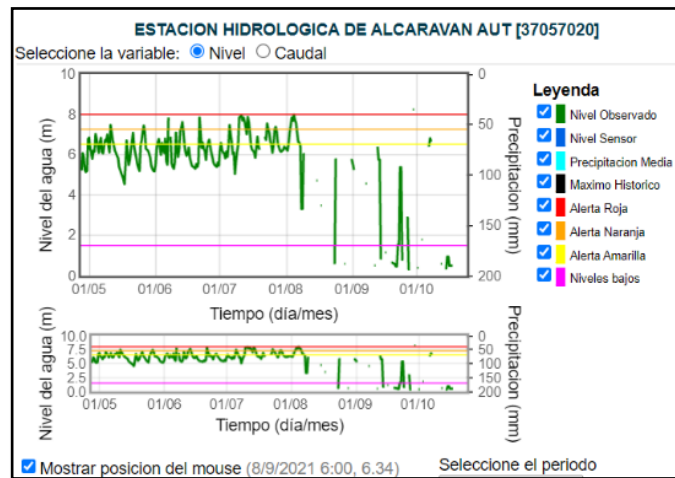


Figura 14. Estacion hidrométrica Alcaraván de Arauquita

Fuente: <http://fews.ideam.gov.co>

De la estación tradicional (hidrométrica) Puente Internacional (Figura 15) se obtuvo la siguiente tendencia e información de nivel promedio, se observa que existe un punto máximo de 7.4 m en el mes de junio, con una duración de día y medio de crecida, y no existen picos de frecuencia continua en el mes, se interpreta que el comportamiento del nivel medio fue de 5.8 m en la ventana de estudio, y un nivel mínimo de 4 m. En esta estación del IDEAM no se encuentran los datos de precipitación y no existen valores incoherentes.

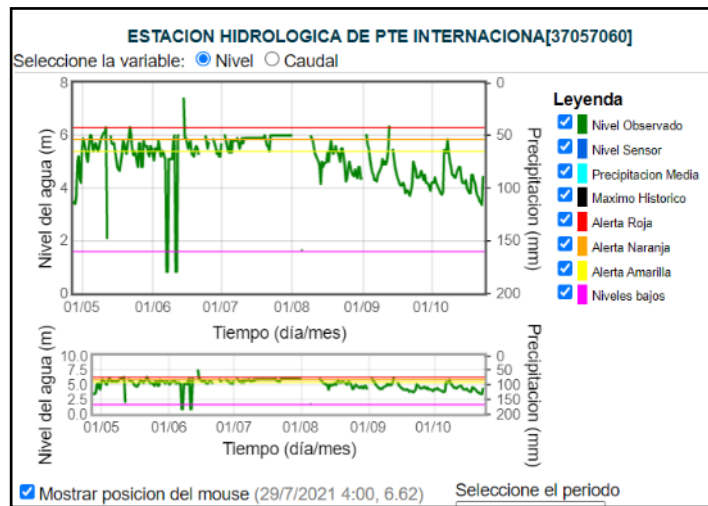


Figura 15. Estación hidrométrica Alcaraván de Arauca

Fuente: <http://fews.ideam.gov.co>

1.5.2. Información homogenizada de las estaciones del IDEAM objeto de estudio

Se presentan los datos proporcionados por IDEAM, los cuales se procesan aplicando técnicas de homogenización como es el ajuste de los datos según los índices normales y continuos de las variables independientes de nivel y precipitación en tiempo real, y seguidamente, son representados en las Figuras 16, 17 y 18, que se describen a continuación.

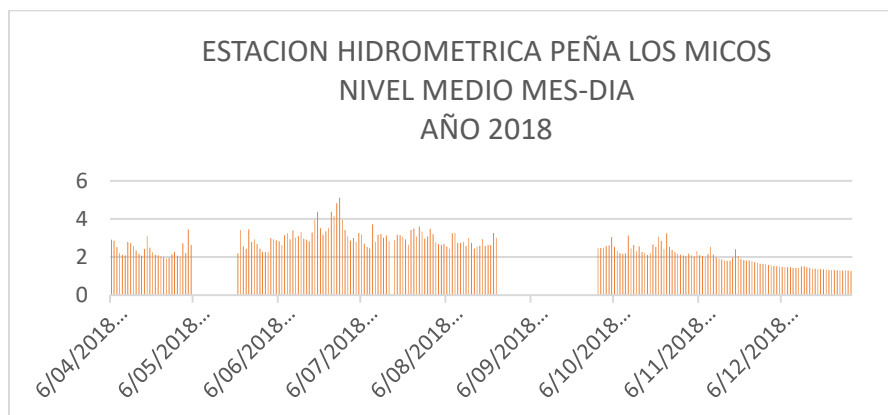


Figura 16. Homogenización de la información de la estación hidrométrica Peña de los Micos

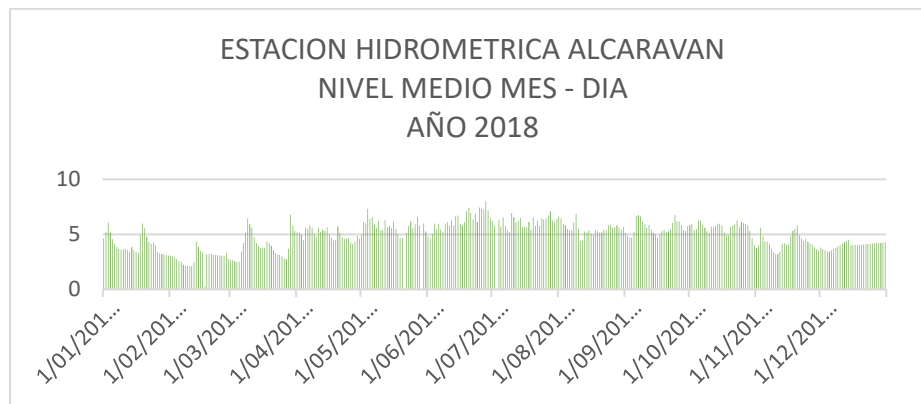


Figura 17. Homogenización de la información de la estación hidrométrica Alcaraván

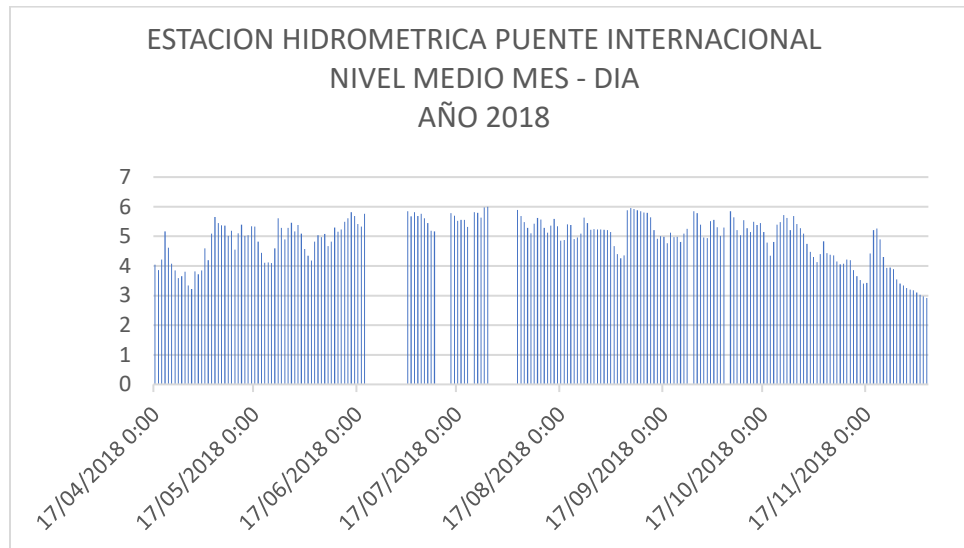


Figura 18. Homogenización información de la estación hidrométrica Puente Internacional

En las Figuras del anexo 1, se describe las relaciones de caudales, niveles y precipitación de las diferentes estaciones que conforman el cauce del río Arauca en una ventana de tiempo del 2000 al 2005.

1.6. Selección de puntos críticos

Se entiende como punto crítico, según lo presentado en el contexto anterior sobre las amenazas de inundación del río Arauca, el lugar geográfico donde es más vulnerable la población al momento de desbordarse el cauce del río, los riesgos se presentan como físicos, económicos, políticos y ambientales.

En esa dirección se puede establecer una metodología para ubicar los puntos críticos en la ribera del río Arauca:

1. Data histórica de la población, habitantes en el tiempo en la ribera del río Arauca respecto al desbordamiento del río y su poder destructor del componente humano y económico (identificado por la comunidad).
2. Información de la data histórica recolectada a través de estaciones metereológicas e hidrométricas en las que se evidencian niveles del cauce del río atípicas y condicionadas a sus inundaciones (medios tecnológicos).
3. El estudio y análisis de la priorización de las microcuencas o vertientes que desembocan al río principal.
4. Tener en cuenta los criterios geológicos, hidráulicos y antrópicos que caracterizan las zonas inundables del río principal y sus vertientes, según lo observado en la Tabla 7 elaborada con datos de Carvajal et al. (2005).

Tabla 7. Criterios para selección de puntos críticos

Geológico	Hidraulico	Antrópico
Inestabilidad geológica	Represamiento de la estructura hidráulica	Acumulación de basuras en el cauce
Afloramiento de aguas naturales	Incapacidad de la estructura hidráulica	Acumulación de escombros en el cauce
Filtración de aguas	Socavación de la estructura hidráulica	Contaminación de material particulado del cauce
Undimientto del terreno por aguas subterráneas	Colmatación de la estructura hidráulica	Contaminación hídrica por descargas de agua residuales
	Fallas en la estructura hidráulica	Invasión de zonas de retiro
	Cobertura obstruida por rocas	Presencia de banqueros o excavaciones inadecuadas.

- Ubicación geográfica de los puntos más determinantes del rompimiento del cauce de las laderas del río, evento que afecta continuamente a la población ribereña en lo económico, político y social.

Con la metodología anterior se obtuvieron los siguientes puntos críticos del río Arauca en el municipio de Arauca, caso de estudio para esta investigación (ver Tabla 8).

Tabla 8. Zonas de los puntos críticos en el municipio de Arauca

ZONIFICACIÓN	ÁREAS EXPUESTAS
Zonas de susceptibilidad baja	Son las áreas que pueden ser potencialmente inundables. Se ubican en el casco urbano, en los barrios las Corocoras, la avenida Rondón, avenida Leoni Valencia, urbanización El Trompillo y el Centro Administrativo Municipal.

	Este punto crítico se vuelve neurálgico al tener un sistema de alcantarillado deficiente.
Zonas de susceptibilidad media	Se abarcan las áreas de inundación de los caños menores y los cuerpos lénticos en todas sus clasificaciones. En el casco urbano corresponde a un sector del barrio Los Libertadores, debido a que allí llegan las aguas máximas del río Arauca, y este se ubica por debajo de su cota y permea la construcción hidráulica construida en la ribera del río, unido a que el humedal La Madre Vieja recibe las aguas de escorrentía de sectores que la circundan y que provocan que esta sobrepase su cota de embalse. Otro aspecto que debe tenerse en cuenta en el registro histórico de inundaciones es lo acaece con el Caño Cpordoba, que incrementa sus niveles por el taponamiento debido a las basuras que depositan los pobladores.
Zonas de susceptibilidad alta	Comprende las planicies aluviales del desborde actual de las corrientes que atraviesan el área. En ese rango caen grandes zonas rurales como las veredas de los corregimientos de Todos los Santos, Cañas Bravas, Santa Aarbara y Caracol. Estos corregimientos producen y son una dispensa de productos agrícolas y ganaderos. El segundo sector se localiza al nororiente del puente Jose Antonio Páez, sobre el río Arauca, y es la vereda Monserrate que, aunque cuenta con una defensa hidráulica, es vulnerable. También, dentro de esta categoría, se reconoce la unidad fisiográfica de humedales, la cual cubre un área extensa del municipio. Cabe señalar que estos humedales desembocan en los afluentes del río Capanaparo, y al sur del municipio en los afluentes del río Meta. Esta zona debe mantenerse ajena a cualquier tipo de uso urbano o industrial debido a que se usa solamente para la ganadería en los tiempo de verano.

A continuación, en la Figura 19, tomada de documentos de INGEOMINAS, se visualiza el mapa de amenaza de inundación con susceptibilidad baja, media y alta en el municipio de Arauca.

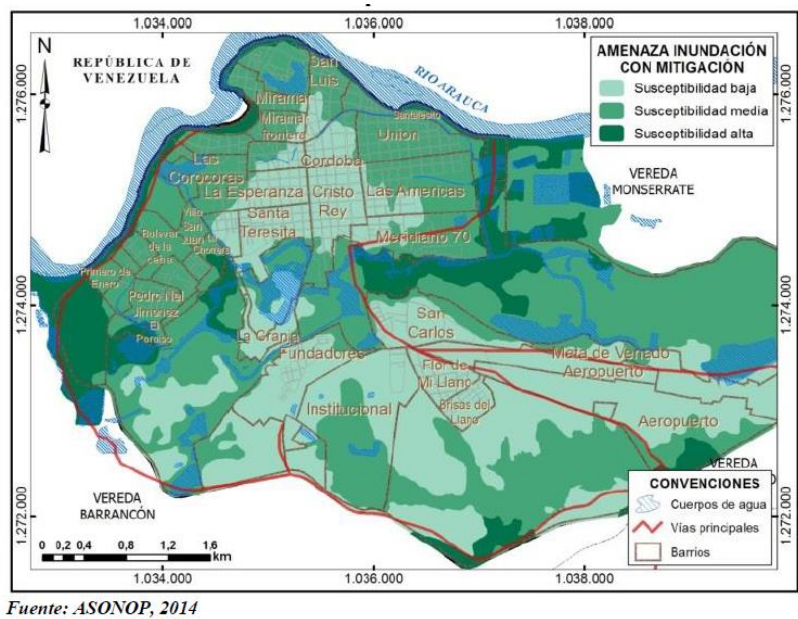


Figura 19. Mapa de identificación de las zonas de puntos críticos en municipio de Arauca

Fuente: INGEOMINAS (2010)

1.6.1. Puntos críticos según CORPORINOQUIA

En el 2018 CORPORINOQUIA publicó un informe en el que identificó diez zonas vulnerables a inundaciones y los puntos críticos en las zonas rurales y urbana del municipio de Arauca. (Tabla 9)

Tabla 9. Puntos críticos de acuerdo al informe de CORPORINOQUIA

Lugar	Puntos críticos
El Torno	2
Barrancones	2
Monserate	1

Brisas del Puente	2
Clarinetero	3

Fuente: <https://www.corporinoquia.gov.co/index.php/blog/84-noticias/854-atencion-en-gestion-del-riesgo-en-el-departamento-de-arauca.html>

El riesgo inminente por inundación del río Arauca en el año 2018 dejó a 2000 familias damnificadas, más de 600 viviendas afectadas y dos instituciones educativas incomunicadas, así como un área aproximada de 500 hectáreas para la ganadería desalojadas. En esta zona de riesgo se han planteado estrategias para la prevención como la construcción de diques de protección con presupuesto de la alcaldía de la capital y la Gobernación de Arauca (ELTIEMPO, 2018).

1.6.2. Normalización de la información proporcionada por las estaciones

hidrometereológicas

Para caracterizar y normalizar esta información para esta investigación, se procede a adquirir la información generada por el IDEAM en forma física y a través de Internet (IDEAM, 2019).

Esta información, adquirida de la página web del IDEAM, está estructurada en un formato basado en la herramienta informática Excel, ordenada en columnas que representan la fecha de la toma de data, nivel y ubicación de la estación (ver Tabla 10).

Tabla 10. Presentación de la información descargada de la página del IDEAM

CódigoEstacion	NombreEstac	Latitud	Longitud	Altitud	Categoría	Entidad	AreaOperativ	Departament	Municipio	FechaInstalacion	FechaSu	IdParametro	Etiqueta	DescripcionSe	Frecuencia	Fecha	Valor	Grado
37027010	PEÑA DE LOS	71.969.722.220	-7.242.477.778	870	Limnig/Africa	INSTITUTO DI Area Operativ	Norte De Sani Toledo			15/10/1972 0:00		CAUDAL	Q, MEDIA, D	Caudal medio Diaria		6/04/2018 0:00	28.701.095	5
37027010	PEÑA DE LOS	71.969.722.220	-7.242.477.778	870	Limnig/Africa	INSTITUTO DI Area Operativ	Norte De Sani Toledo			15/10/1972 0:00		CAUDAL	Q, MEDIA, D	Caudal medio Diaria		7/04/2018 0:00	277.401.583.333.333	5
37027010	PEÑA DE LOS	71.969.722.220	-7.242.477.778	870	Limnig/Africa	INSTITUTO DI Area Operativ	Norte De Sani Toledo			15/10/1972 0:00		CAUDAL	Q, MEDIA, D	Caudal medio Diaria		8/04/2018 0:00	204.330.922.619.048	5
37027010	PEÑA DE LOS	71.969.722.220	-7.242.477.778	870	Limnig/Africa	INSTITUTO DI Area Operativ	Norte De Sani Toledo			15/10/1972 0:00		CAUDAL	Q, MEDIA, D	Caudal medio Diaria		9/04/2018 0:00	141.433.791.666.667	5
37027010	PEÑA DE LOS	71.969.722.220	-7.242.477.778	870	Limnig/Africa	INSTITUTO DI Area Operativ	Norte De Sani Toledo			15/10/1972 0:00		CAUDAL	Q, MEDIA, D	Caudal medio Diaria		10/04/2018 0:00	126.770.416.666.667	5
37027010	PEÑA DE LOS	71.969.722.220	-7.242.477.778	870	Limnig/Africa	INSTITUTO DI Area Operativ	Norte De Sani Toledo			15/10/1972 0:00		CAUDAL	Q, MEDIA, D	Caudal medio Diaria		11/04/2018 0:00	119.708.104.166.667	5
37027010	PEÑA DE LOS	71.969.722.220	-7.242.477.778	870	Limnig/Africa	INSTITUTO DI Area Operativ	Norte De Sani Toledo			15/10/1972 0:00		CAUDAL	Q, MEDIA, D	Caudal medio Diaria		12/04/2018 0:00	264.883.104.166.667	5
37027010	PEÑA DE LOS	71.969.722.220	-7.242.477.778	870	Limnig/Africa	INSTITUTO DI Area Operativ	Norte De Sani Toledo			15/10/1972 0:00		CAUDAL	Q, MEDIA, D	Caudal medio Diaria		13/04/2018 0:00	249.614.291.666.667	5
37027010	PEÑA DE LOS	71.969.722.220	-7.242.477.778	870	Limnig/Africa	INSTITUTO DI Area Operativ	Norte De Sani Toledo			15/10/1972 0:00		CAUDAL	Q, MEDIA, D	Caudal medio Diaria		14/04/2018 0:00	21.040.375	5
37027010	PEÑA DE LOS	71.969.722.220	-7.242.477.778	870	Limnig/Africa	INSTITUTO DI Area Operativ	Norte De Sani Toledo			15/10/1972 0:00		CAUDAL	Q, MEDIA, D	Caudal medio Diaria		15/04/2018 0:00	162.995.166.666.667	5
37027010	PEÑA DE LOS	71.969.722.220	-7.242.477.778	870	Limnig/Africa	INSTITUTO DI Area Operativ	Norte De Sani Toledo			15/10/1972 0:00		CAUDAL	Q, MEDIA, D	Caudal medio Diaria		16/04/2018 0:00	134.360.583.333.333	5
37027010	PEÑA DE LOS	71.969.722.220	-7.242.477.778	870	Limnig/Africa	INSTITUTO DI Area Operativ	Norte De Sani Toledo			15/10/1972 0:00		CAUDAL	Q, MEDIA, D	Caudal medio Diaria		17/04/2018 0:00	118.007.833.333.333	5
37027010	PEÑA DE LOS	71.969.722.220	-7.242.477.778	870	Limnig/Africa	INSTITUTO DI Area Operativ	Norte De Sani Toledo			15/10/1972 0:00		CAUDAL	Q, MEDIA, D	Caudal medio Diaria		18/04/2018 0:00	179.562.479.166.667	5
37027010	PEÑA DE LOS	71.969.722.220	-7.242.477.778	870	Limnig/Africa	INSTITUTO DI Area Operativ	Norte De Sani Toledo			15/10/1972 0:00		CAUDAL	Q, MEDIA, D	Caudal medio Diaria		19/04/2018 0:00	34.552.103.125	5
37027010	PEÑA DE LOS	71.969.722.220	-7.242.477.778	870	Limnig/Africa	INSTITUTO DI Area Operativ	Norte De Sani Toledo			15/10/1972 0:00		CAUDAL	Q, MEDIA, D	Caudal medio Diaria		20/04/2018 0:00	191.574.677.083.333	5
37027010	PEÑA DE LOS	71.969.722.220	-7.242.477.778	870	Limnig/Africa	INSTITUTO DI Area Operativ	Norte De Sani Toledo			15/10/1972 0:00		CAUDAL	Q, MEDIA, D	Caudal medio Diaria		21/04/2018 0:00	147.468.979.166.667	5

Las estaciones meteorológicas e hidrológicas mencionadas anteriormente están parametrizadas y caracterizadas en el cauce del río Arauca, según la información que proporciona el IDEAM a través de la herramienta VISOR FEWS, que presenta su ubicación y la información específica correspondiente a su ubicación, estado de funcionamiento, código y fecha de instalación (ver Figuras 20, 21, 22: estaciones que conforman la red de estudio del río Arauca).

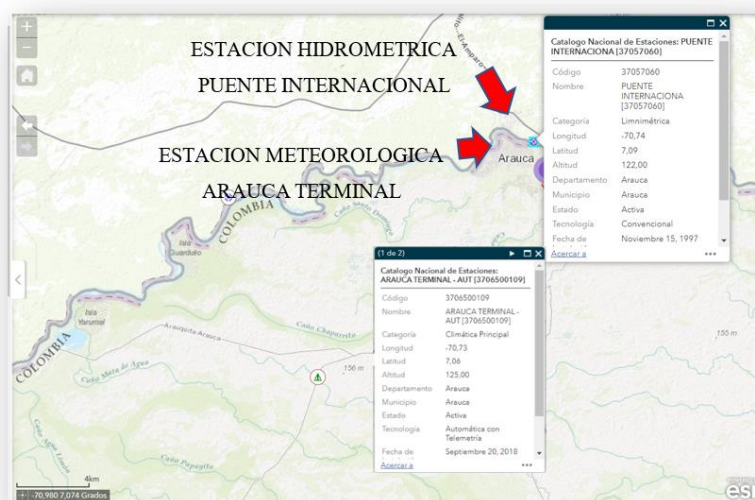


Figura 20. Estación meteorológica e hidrométrica Arauca según Visor Fewes

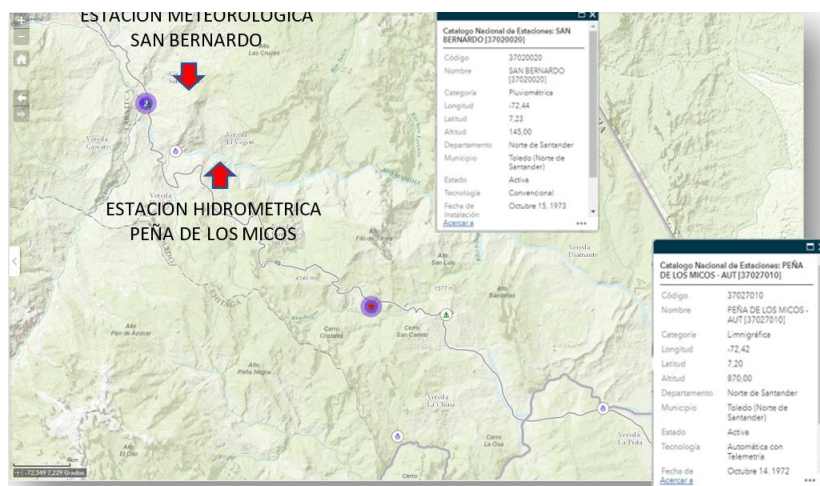


Figura 21. Estación meteorológica de San Bernardo según Visor Fewes

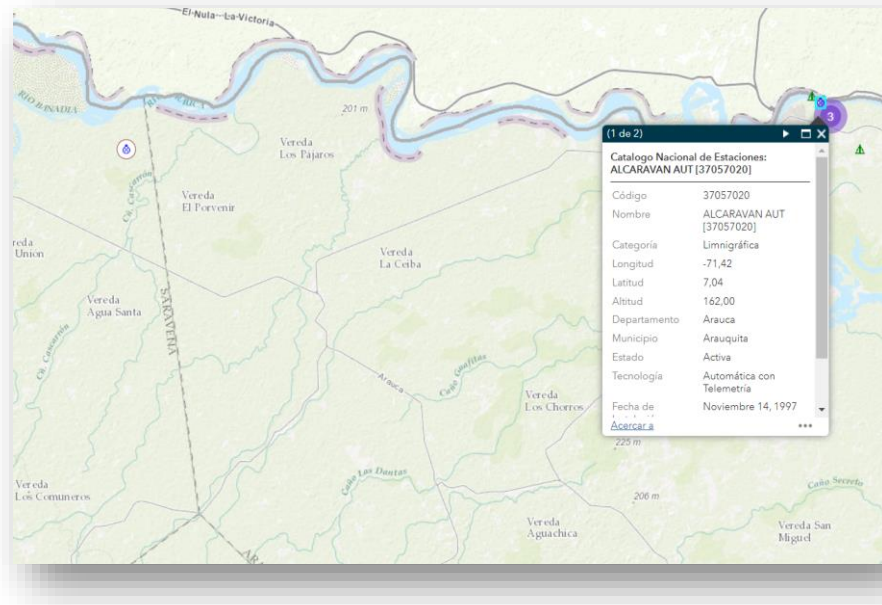


Figura 22. Estación meteorológica e hidrológica de Araucita según Visor FewS

Se toma la información y se caracteriza a través de la técnica de regresión, con el propósito de obtener las tendencias referidas de cada variable como nivel, precipitación y caudal.

Para obtener lo referido anteriormente se procede según la siguiente metodología:

1. Obtención de los valores de nivel, caudal y precipitación en los respectivos formatos de Excel de las estaciones anteriormente citadas.
2. Ajuste de la información obtenida referenciada en el tiempo.
3. Realizar el procedimiento de regresión con el fin de obtener la tendencia óptima de cada variable.
4. Implantar la tendencia obtenida a través de la herramienta Matlab Simulink.

Aplicación de la metodología para la normalización de la información:

Paso 1.

La información de la Tabla 10 referida fue descargada de la página del IDEAM, en formato .cvs y se convirtió a .xls. Esta tabla referida representa los datos de caudal de la estación, y está conformada en orden: ubicación, nombre, código, entidad, departamento, municipio y fecha.

Paso 2.

Se ordenan las variables y se adiciona una columna de tiempo que será la base para desarrollar su tendencia, tal cual como se visualiza en la Tabla 11.

Tabla 11. Variables independientes de la información real

PRECIPITACION (mm/día)	NIVEL (cm)	TIEMPO (días)
10,2	535	1
9,2	380	2
14,1	376	3
2,4	420	4
47,4	469	5

Paso 3.

De la Tabla 11 se seleccionan las columnas nivel y precipitación, que son variables en el tiempo, a la cuales se les aplica la técnica de la regresión, obteniendo un modelo matemático polinómico como se observa en la Figura 23.

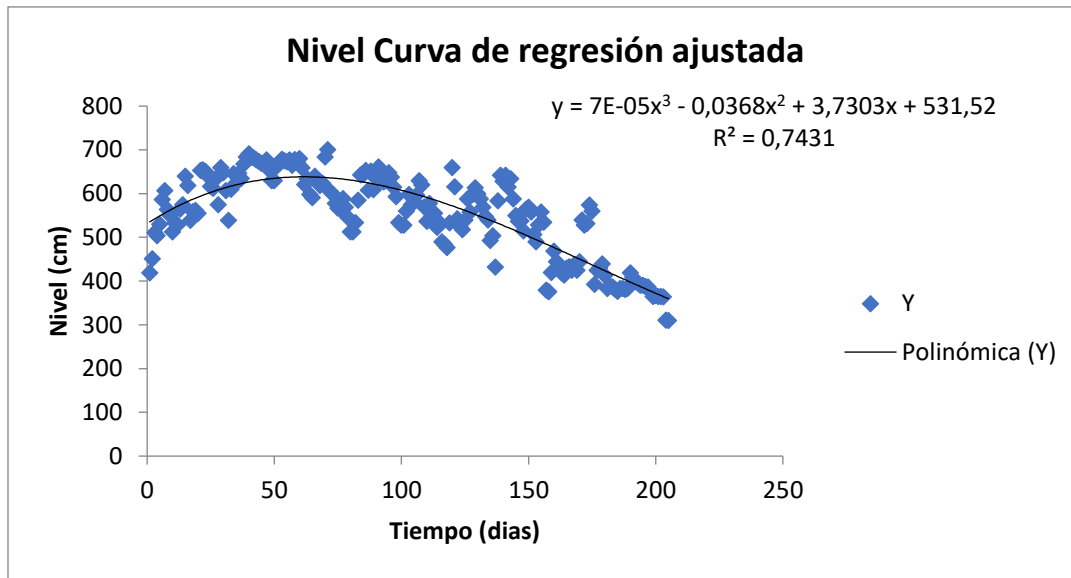


Figura 23. Curva de regresión ajustada de nivel

Paso 4.

Al obtener el modelo óptimo de la tendencia de información se procede a la respectiva implantación a través de la herramienta Matlab Simulink, como se presenta en la Figura 24.

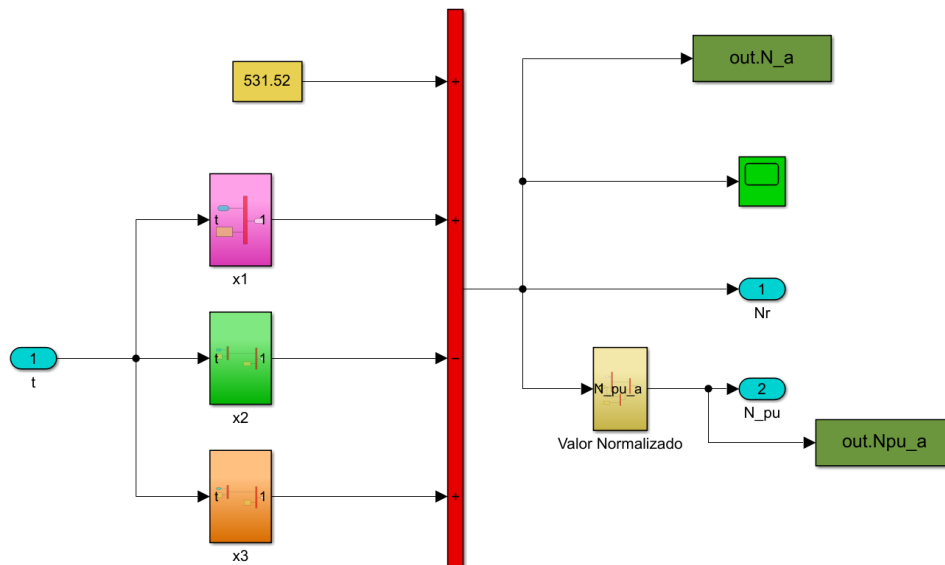


Figura 24. Modelo implantado en Simulink de nivel vs. tiempo

La Figura 24 representa la ecuación $Y = 7E-05x^3 - 0,0368x^2 + 3,7303x + 531,52$; con $R^2 = 0,7431$, en la cual muestra cada bloque un valor representativo de la ecuación, donde sus coeficientes x_1 , x_2 , x_3 y b , son los datos equivalentes de la ecuación, también se puede decir que “ x ” representa el tiempo y “ Y ” el nivel. Cabe aclarar que existe un bloque denominado normalización, el cual ajusta la curva a valores entre 0 a 1, con el propósito de alimentar al observador diseñado con técnicas inteligentes, según lo representado en la Figura 54, donde se observa los resultados proporcionados por la simulación, este bloque de información se realiza para emular el comportamiento del río de forma off line.

Capítulo III

Modelos matemáticos del río

INTRODUCCIÓN

En este capítulo se centra la atención al desarrollo de los modelos matemáticos que se abstraen del comportamiento del río Arauca.

Al presentar los modelos matemáticos se hace alusión directamente a sus tendencias equivalentes y estados de linealidad, en estos modelos se toman aproximaciones que reflejan comportamientos muy similares con el proceso real.

Según Reynoso (2014), los modelos matemáticos son el comportamiento de un sistema en el cual están representados por una ecuación o un conjunto de ecuaciones, expresadas en forma integro-diferencial. Otro aspecto que define un modelo matemático son las técnicas de regresión, cuyo valor principal consiste en la predicción más allá de las relaciones causales entre las variables dependiente e independientes. Aquí se recoge la información normalizada y caracterizada de precipitación, nivel, caudal y se establece los diversos modelos que la matemática abarca, estos modelos se pueden clasificar en:

1. Modelos lineales
2. Modelos de potencia
3. Modelo de relaciones potenciales

Los modelos lineales describen comportamientos relacionados a sus ajustes de restas con sus pendiente respectiva y valores de constante.

Los modelos de potencia son aproximados porque abarcan índices de segundo y tercer orden que hacen que se ajusten a los valores reales del elemento a modelar.

Los modelos de relaciones potenciales son los que dan el comportamiento de índices de potencia y sus variables independientes están representadas por las características del río como nivel y precipitación y ajustada a través de constantes multiplicativas.

Por último, se relaciona y se escoge el mejor modelo que se adapte a las tendencias del comportamiento del caso de estudio (río Arauca), aplicando técnicas de errores RMSE y R^2 .

3.1. Obtención del modelo matemático

Para generar el modelo matemático del río Arauca se procede a aplicar la siguiente metodología:

1. Se toman los datos de las estaciones meteorológicas e hidrológicas que contienen las variables de nivel, caudal y precipitación; también se recolecta la información histórica, teniendo muy presente ventanas de tiempo en lo referente a días y meses en los que ocurrieron las respectivas crecientes del río Arauca.
2. Se reorganiza y normaliza la data obtenida de las estaciones meteorológicas e hidrológicas, utilizando la herramienta Excel.
3. Al tener organizada esta información, se procede aplicar la técnica de regresión para obtener los modelos lineales, de potencia y para el modelo de relaciones potenciales se basa en el método de convergencia con el propósito de obtener las constantes multiplicativas del mismo, estos modelos se comparan entre ellos y se selecciona el que presente menor error o el mejor índice de R^2 .

4. Al obtener el mejor modelo matemático, se procede a implantarlo utilizando la herramienta Matlab Simulink.
5. Se realiza la comparación entre los modelos.

Aplicación de la metodología en el caso de estudio

Paso 1.

Se procede a descargar los datos de la página web del IDEAM como archivo “*.cvs” y se organiza en columnas en “*.xls”, correspondiente a las estaciones hidrológicas y meteorológicas, de las variables independientes como precipitación, nivel y la variable dependiente caudal. Estas variables se encuentran registradas en los datos históricos organizados por años, meses y días, de las que se hace referencia a los años en los que existe más información en meses de invierno y registro de crecientes, como se observa en la (Tabla 12).

Tabla 12. Presentación de los datos históricos del 2018 de la estación Peña de los Micos

FECHA	CAUDAL	NIVEL	PRECIPITACION
17/04/2018 0:00	118,0078333	206,583333	0,1
18/04/2018 0:00	179,5624792	241,875	22,8
19/04/2018 0:00	345,5210313	309,895833	1
20/04/2018 0:00	191,5746771	248,895833	1,3
21/04/2018 0:00	147,4689792	224,979167	2,3
22/04/2018 0:00	126,6022917	212,291667	0,1

En la Tabla 12 se observa los datos de la estación hidrométrica Peña de los Micos y estación meteorológica San Bernardo, en las cuales están referenciados la variable de precipitación, nivel y caudal del año 2018.

Paso 2.

Se reorganiza la información, se ubican las columnas de las variables independientes que se encuentran en el mismo espacio con respecto a la variable dependiente de caudal, y se procede a homogenizar la data, con el propósito de trabajar de forma más eficiente.

Paso 3.

Al homogenizar la información obtenida de las estaciones hidrometereológicas, se procede a obtener el modelo de tendencia lineal, y de potencia, a través del uso de la herramienta Excel, utilizando el módulo de datos estadísticos de regresión y el de relaciones potenciales se realiza por el método de convergencia.

A continuación, se procede a presentar los modelos representativos lineales, de potencia y de relaciones potenciales.

3.1.1. Modelo matemático lineal

El modelo lineal se referencia según la siguiente ecuación:

$$Q(t) = B_0 + B_1 * N + B_2 * P \quad \text{Ecu. 3}$$

N = nivel del río

P = Precipitación

$B_0, B_1, B_2 = \text{Parámetros resultantes del modelo matemático}$

A continuación, se procede hallar la tendencia lineal utilizando la herramienta Excel con la técnica de regresión, del cual se obtiene la siguiente información:

Tabla 13. Análisis de coeficientes del modelo lineal por la técnica de regresión

Resumen								
Estadísticas de la regresión								
Coeficiente de correlación	0,96093906							
Coeficiente de determinación	0,92340388							
R^2 ajustado	0,92226912							
Error típico	29,2055995							
Observaciones	138							
ANÁLISIS DE VARIANZA								
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico F			
Regresión	2	1388196,426	694098,213	813,745644	4,83E-76			
Residuos	135	115150,5504	852,9670401					
Total	137	1503346,976						
	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	-323,297673	14,04551491	-23,01785834	1,41E-48	-351,075379	-295,519966	-351,075379	-295,5199662
Variable X 1	2,12923376	0,053008033	40,16813368	5,90E-77	2,02440018	2,23406733	2,024400178	2,234067333
Variable X 2	-0,31485504	0,338328401	-0,930619587	0,35371156	-0,9839645	0,35425443	-0,9839645	0,354254429

De los resultados de la Tabla 13 se tomaron los valores de variable X1 correspondiente a precipitación, X2 variable nivel y se realiza la suma de la metodología de superposición de dos variables más el equivalente a la intercepción, como resultado se visualiza esta estructura en la ecuación 4.

$$Q(t) = 2,129 * N - 0,315 * P - 323,289 \quad \text{Ecu. 4}$$

Ahora, se presenta el caudal respecto al tiempo de la estación meteorológica Peña de los Micos (Figura 25).

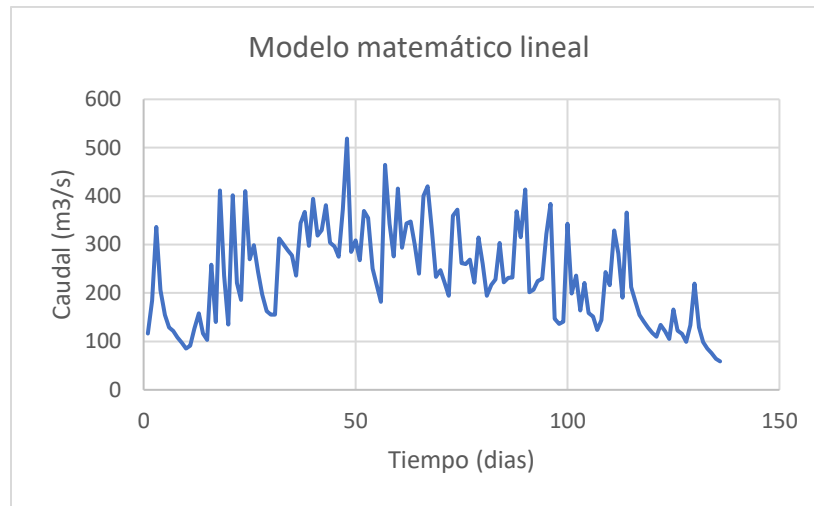


Figura 25. Modelo matemático lineal caudal vs. tiempo

Implantación de la ecuación en Matlab Simulink

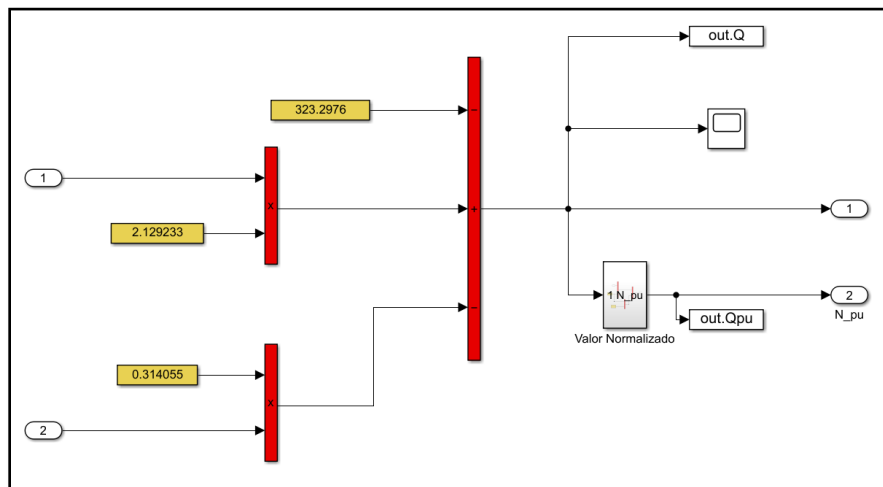


Figura 26. Representación del modelo matemático lineal en Simulink

En la Figura 26 se observa la representación de la ecuación del modelo matemático lineal con los coeficientes y la función del sistema.

3.1.2. Modelo matemático de potencia

El modelo de potencia se referencia según la siguiente ecuación:

$$Q(t) = B_2 * N^{B_3} + B_1 * P^{B_4} - B_0 \quad \text{Ecu. 5}$$

$B_0, B_1, B_2, B_3, B_4 = \text{Parámetros resultantes del modelo matemático}$

Para el modelo de estudio, los datos obtenidos de la regresión son los siguientes:

Tabla 14. Resumen del análisis de coeficientes del modelo de potencia por la técnica de regresión

Resumen								
<i>Estadísticas de la regresión</i>								
Coeficiente de determinación	0,95408553							
Coeficiente de correlación	0,91027919							
R ² ajustado	0,90882032							
Error típico	25,9548512							
Observaciones	126							
ANÁLISIS DE VARIANZA								
	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Media de cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>			
Regresión	2	840666,313	420333,156	623,959733	4,008E-65			
Residuos	123	82859,4788	673,654299					
Total	125	923525,792						
	<i>Coeficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Intercepción	-295,460567	14,638194	-20,1842227	7,5554E-41	-324,435975	-266,48516	-324,435975	-266,48516
Variable X 1	2,00848109	0,05692024	35,2858833	3,4219E-66	1,89581096	2,12115122	1,89581096	2,12115122
Variable X 2	-0,27880385	0,30610613	-0,9108078	0,36417815	-0,88472216	0,32711446	-0,88472216	0,32711446

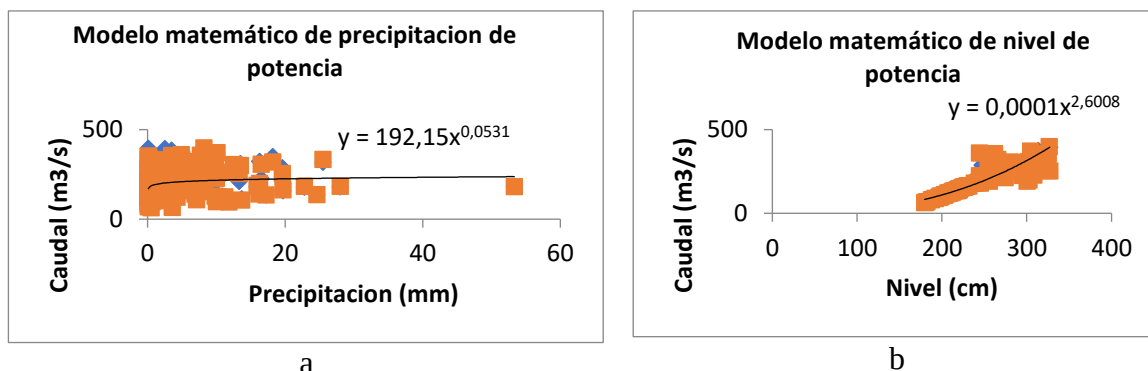


Figura 27. Representación de la línea base precipitación y nivel del modelo matemático potencia

La Figura 27, representa los valores obtenidos de caudal del cual se ajustaron a su línea base (se eliminaron los datos que estaban arriba y debajo de la línea base, quedaron 124 datos de los 318, teniendo en cuenta que $Q(t)$ es el resultado de la variable calculada por N y P a través de la fórmula para caudales aproximados).

De los resultados de la Tabla 14 se tomaron los valores de variable $X1$ correspondiente a precipitación, $X2$ variable nivel y luego se realizó la superposición de dos variables, más el equivalente a la intercepción. Como resultado, se visualiza esta estructura, en la ecuación 6:

$$Q(t) = 6 * 10^{-5} * N^{2,7183} + 209,81 * P^{0,0166} - 206 \quad \text{Ecu. 6}$$

Ahora, se presenta el caudal respecto al tiempo de la estación meteorológica Peña de los Micos (Figura 28).

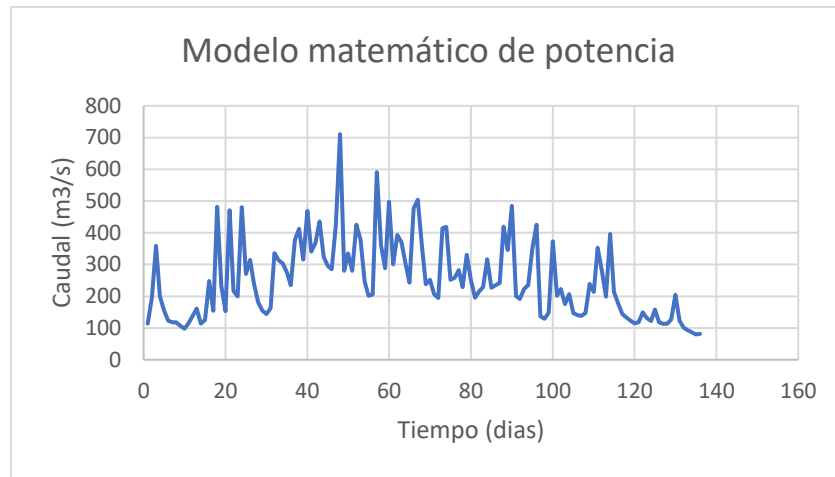


Figura 28. Modelo matemático de potencia caudal vs. tiempo

Implantación de la ecuación en Matlab Simulink

La implantación a que se hace referencia es determinada por la ecuación 6, conformada por dos componentes de índice de potencia que a su vez está constituida de tres términos, uno precedido por nivel, otro por precipitación y el tercero a través de un elemento constante. En las Figuras 29, 30, 31 se observan las representaciones de los modelos matemáticos.

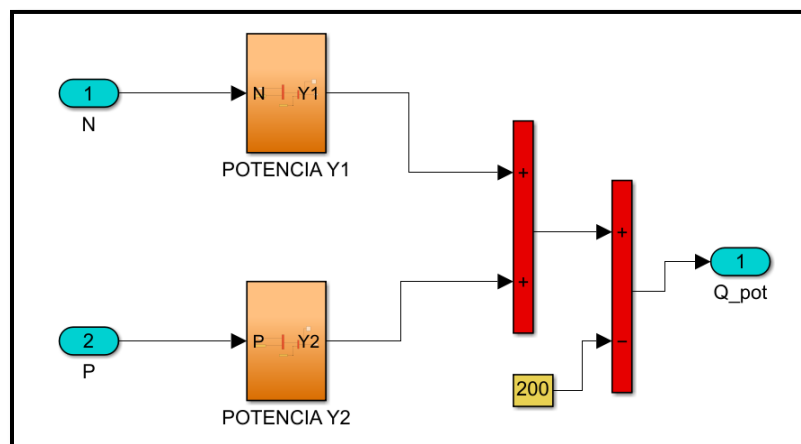


Figura 29. Representación de la ecuación del modelo matemático de potencia en Simulink

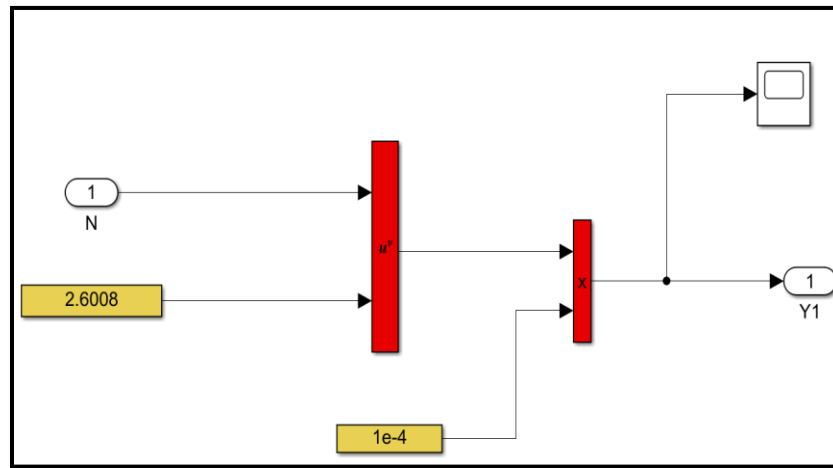


Figura 30. Representación de nivel a través de la ecuación del modelo matemático de potencia en Simulink

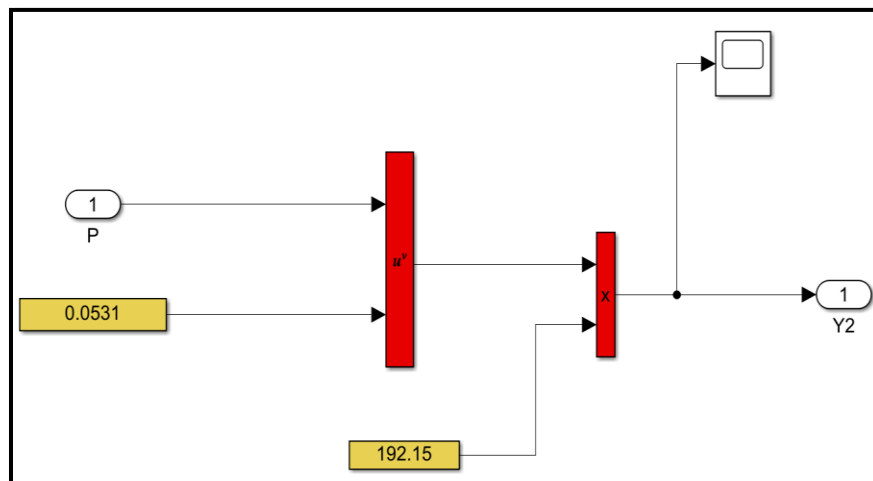


Figura 31. Representación de precipitación a través de la ecuación del modelo matemático de potencia en Simulink

3.1.3. Modelo matemático de relaciones potenciales

Otro de los modelos a utilizar en este trabajo, es el conformado en base a relaciones potenciales del cual permite, obtener el caudal relacionando las variables independientes como nivel, precipitación y ajustados a sus coeficientes de potencia.

A continuación, se presenta el modelo matemático de relaciones potenciales para el caso de estudio:

$$Q = B_0 * N^{B_1} * P^{B_2} \quad Ecu. 7$$

$$Q = \text{Caudal del río } \frac{m^3}{s}$$

$$N = \text{Nivel del río } cm$$

$$P = \text{Precipitación } mm$$

$$B_0 B_1 B_2 = \text{Coeficientes de calibración del modelo}$$

Para el caso de estudio y aplicando estrategias de correlación se obtiene los siguientes coeficientes de calibración:

$$Q = 4.8029 * N^{3.012} * P^{0.001} \quad Ecu. 8$$

En la Figura 32, se establece la característica de caudal según el modelo de la ecuación (8) y el caudal real de la información tomada del IDEAM.

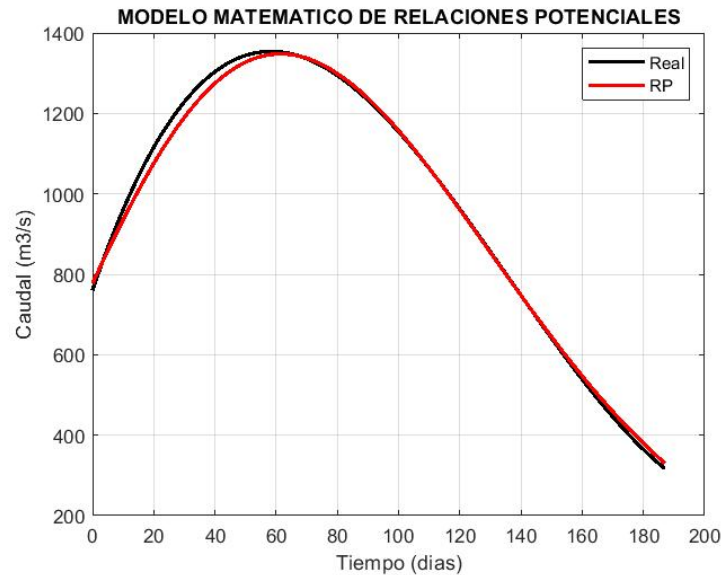


Figura 32. Modelo matemático de relaciones potenciales

Implantación de la ecuación matemática de relaciones potenciales en Matlab Simulink

La Figura 33 presenta la implantación de la ecuación (8) que establece los valores de los coeficientes de calibración respecto a la entrada de nivel y precipitación. Paralelamente se muestra el modulo de la respectiva normalización (0-1).

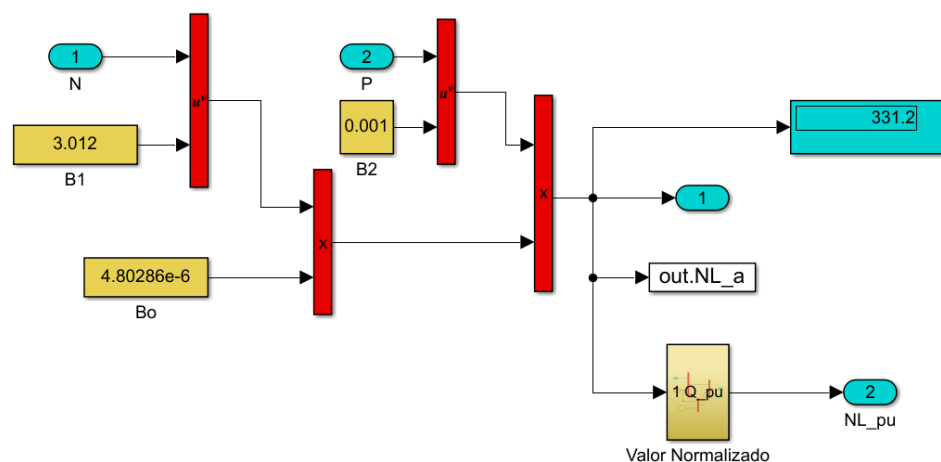


Figura 33. Implantación del modelo matemático de relaciones potenciales en Simulink

3.1.4. Selección del mejor modelo matemático

Para seleccionar el mejor modelo de este estudio se recurre a la comparación entre los errores, cuadrático medio (MSE), R^2 y raíz del error cuadrático medio RMSE, respecto a los modelos de potencia, lineal y el de relaciones potenciales (RP, relaciones potenciales).

Tabla 15. Comparación de los modelos lineales respecto al error R^2 MSE y RMSE

MODELO	R^2	MSE	RMSE
POTENCIA	0.9901	7.8355e+03	88.52
LINEAL	0.9917	7.6513e+03	87.47
RELACIONES POTENCIALES	0.9989	265.2628	16.3

El mejor modelo referenciado con el caudal real del río Arauca según la Tabla 15, es el modelo de relaciones potenciales donde se obtiene un valor de R^2 de 0.9989, MSE de 265.26 y de RMSE equivalente a 16.3. La Figura 34, muestra la comparación de los modelos matemáticos en estudio para este trabajo de investigación.

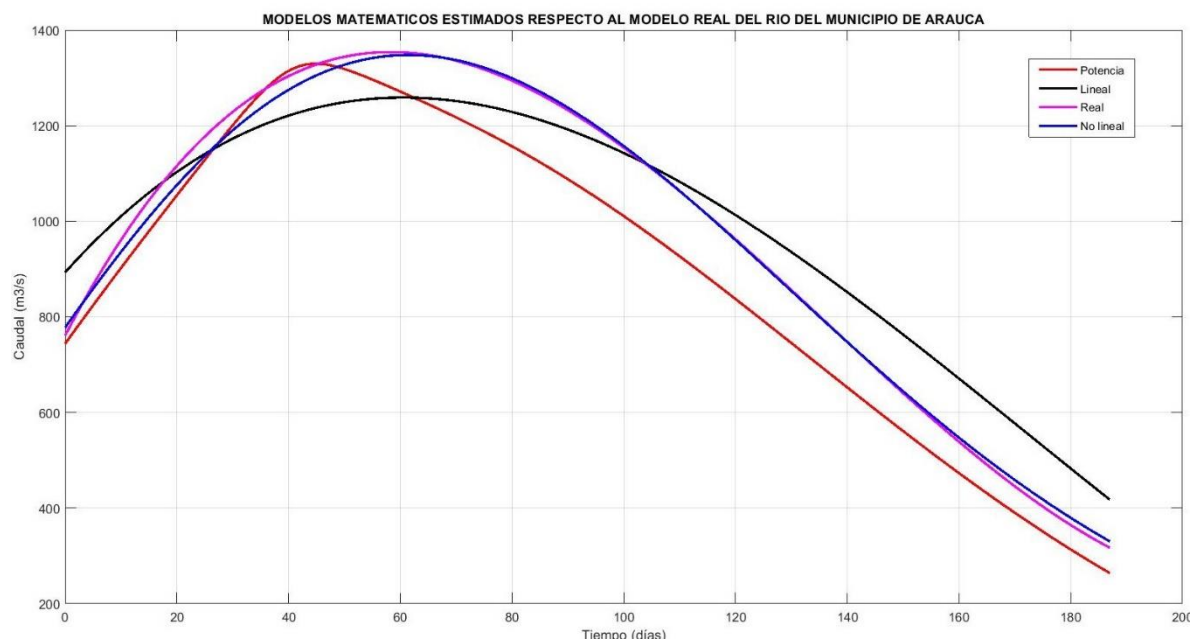


Figura 34. Comparación de modelos matemáticos respecto al modelo real

Capítulo IV

Procesamiento de la información con técnicas inteligentes

INTRODUCCIÓN

En este capítulo se aborda el tratamiento de la información histórica equivalente a las crecidas del río Arauca. Cabe anotar que el tratamiento de esta información lleva consigo la aplicación de métodos de pronóstico hidrológicos, generalmente regresiones lineales; estos métodos establecen relaciones entre variables dependientes e independientes del representativo fenómeno, con el que se obtienen variables de entrada como precipitación, nivel y variables de salida como el caudal (Nuñez, 2005).

Se entiende como procedimiento la estructura del tratamiento de información que impulsa a que exista en sus tendencias un valor no lineal de estos fenómenos, llegando incluso a establecer valores no precisos, lo que hace que estos modelos obtenidos no sean apropiados y por lo tanto deba considerarse la posibilidad de acudir a otros métodos.

En la actualidad, para dar solución a esta problemática de alertas tempranas, existen diversos estudios de modelos de predicción que relacionan o integran técnicas de inteligencia artificial (Gómez Vargas et al., 2012), cuya estructura matemática es capaz de realizar relaciones complejas no lineales entre la data de entrada y la data de salida y también, describir procesos en forma sencilla de ecuaciones matemáticas.

Una de las técnicas más aplicadas en este campo de las alertas tempranas son las redes neuronales, que simulan el funcionamiento de un cerebro humano para resolver diversos problemas del mundo real. Dentro de las más utilizadas es la red basada en varias capas de neuronas de tipo perceptrón, entrenadas mediante la técnica de retropropagación (backpropagation) (Sáenz & Ballesteros, 2002). También existen en este campo técnicas como lógica difusa e híbrida, como la neuro-difusa o ANFIS (Béjar et al., 2016).

El fin de utilizar esta técnica inteligente en este trabajo es la de obtener un observador que permita conocer detalladamente la información directa de una creciente y sus condiciones, con el propósito de generar la alerta temprana. A partir de los módulos estructurados con técnicas inteligentes, como las redes neuronales, neuro difusas y la creación de un algoritmo de redes neuronales, variando parámetros como numero de neuronas, numero de capas, funciones de activación, distribución de datos en el entrenamiento, validación y prueba (Abasov et al., 2022).

Para cumplir con lo anteriormente propuesto, se deberá seguir la siguiente metodología que permite implantar el observador para este caso de estudio:

1. Análisis de la información obtenida
2. Selección de datos
3. Normalización
4. Modelo de predicción

4.1. Aplicación de la metodología

Paso 1. Análisis de la información

Este análisis se realiza a través de la búsqueda de fuentes de datos hidrológicos según lo que arroja el IDEAM, donde se obtiene la información de nivel, precipitación y caudal a través de las estaciones meteorológicas e hidrológicas del río Arauca, tal como se presenta en la Tabla 10.

Paso 2. Selección de datos

En este trabajo de investigación se optó por obtener los datos del año 2018 de los meses de mayo a agosto, que arrojan los datos de las crecientes más relevantes. Esta información la procesa las estaciones San Bernardo, Arauquita y Arauca.

Paso 3. Normalización

Para este ítem se toma como elemento fundamental la normalización de los datos que consiste en re-escalar los valores dentro de un rango específico entre 0 a 1, comúnmente llamado información por unidad, que está descrita por la ecuación 9.

$$Valor\ por\ unidad = \frac{V_{medido} - V_{minimo}}{V_{maximo} - V_{minimo}} \quad Ecu. 9$$

De la ecuación 9 se realiza el siguiente algoritmo y a su vez se implementa en la herramienta Matlab Simulink como se observa en la Figura 35.

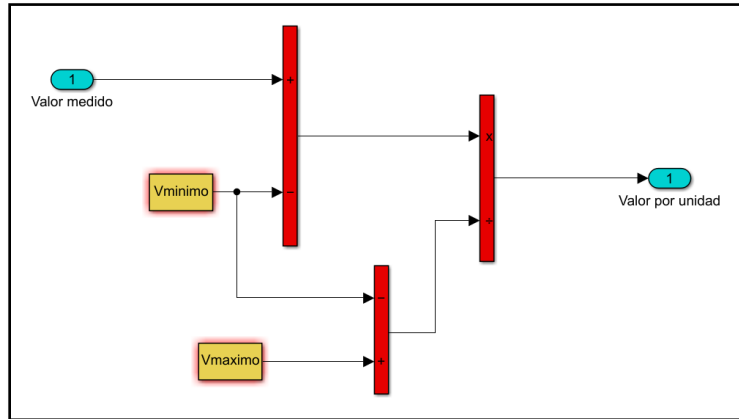


Figura 35. Implantación en Simulink de la ecuación de normalización de la información

Paso 4. Modelo de predicción

A continuación, se describen las diferentes herramientas de ajustes y la metodología de predicción que se usan en esta investigación, donde se utilizan dos técnicas inteligentes, las redes neuronales “RN” y neuro difusa “ANFIS”.

4.2. Implementación de la red neuronal

Al generar los valores por unidad de la data de nivel, precipitación y caudal, se procede a almacenar a través de un espacio de trabajo organizado mediante una estructura por filas, obtenido esta información organizada, se procede a cargarla en la herramienta de Matlab NFTOOL, compatible con el módulo del modelo de predicción basado en redes neuronales del ambiente Simulink.

A continuación, se describe cómo se debe tratar esta información implantada en esta herramienta inteligente:

1. Se carga el Toolbox “nftool” en ambiente Matlab, como se visualiza en la Figura 36.

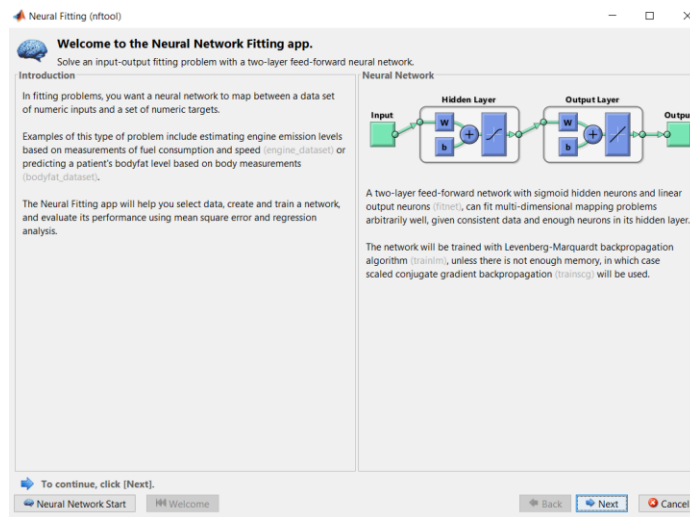


Figura 36. Ambiente de la herramienta del Toolbox nftool

2. Se selecciona la data de entrada y salida como se presenta en la Figura 37. Cabe señalar, que la información de entrada depende del agrupamiento de las variables de nivel y predicción, y la salida corresponde al caudal.

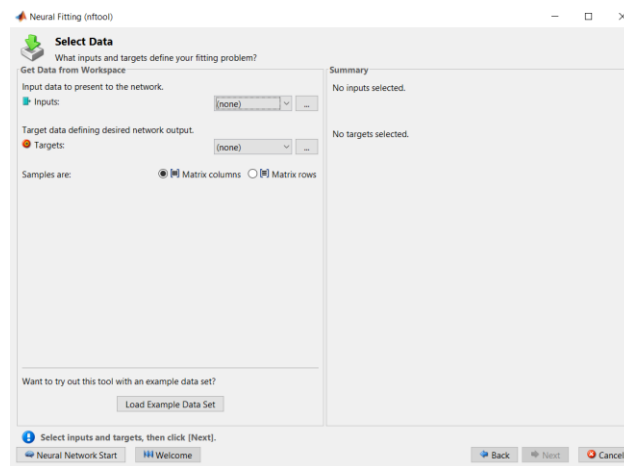


Figura 37. Selección de entrada de datos del Toolbox nftool

3. En la Figura 38 se muestra la validación y la prueba de información: entrenamiento, 70%; validación, 15%, y de prueba, 15%.

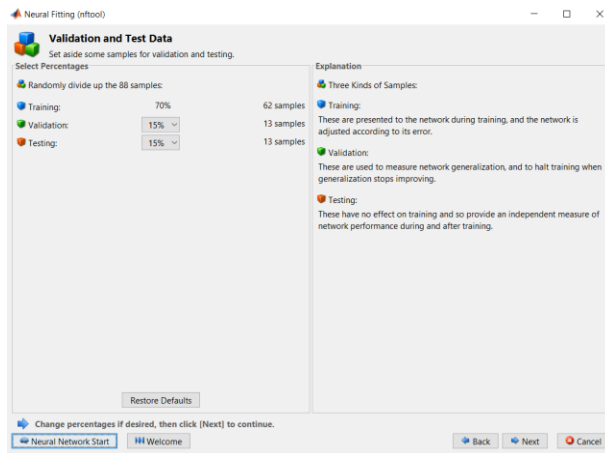


Figura 38. Configuración del entrenamiento

4. Se estructura la arquitectura de la red neuronal, en este caso posicionando 10 neuronas, como se muestra en la Figura 39.

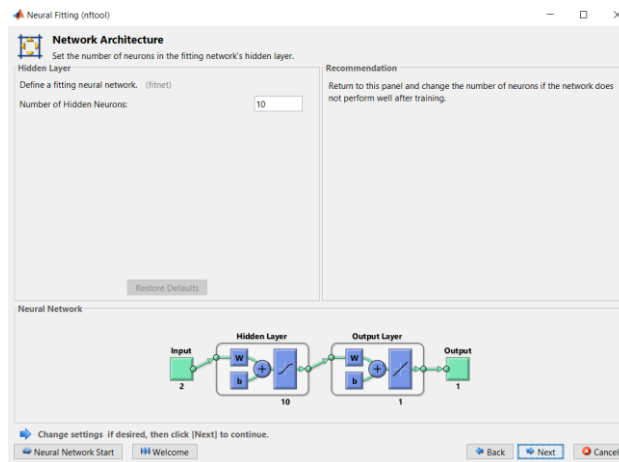


Figura 39. Arquitectura de la red neuronal

5. Se configura el algoritmo de entrenamiento como se visualiza en la Figura 40, en este caso se selecciona el método de Leverberg-Marquardt, y se procede a su entrenamiento.

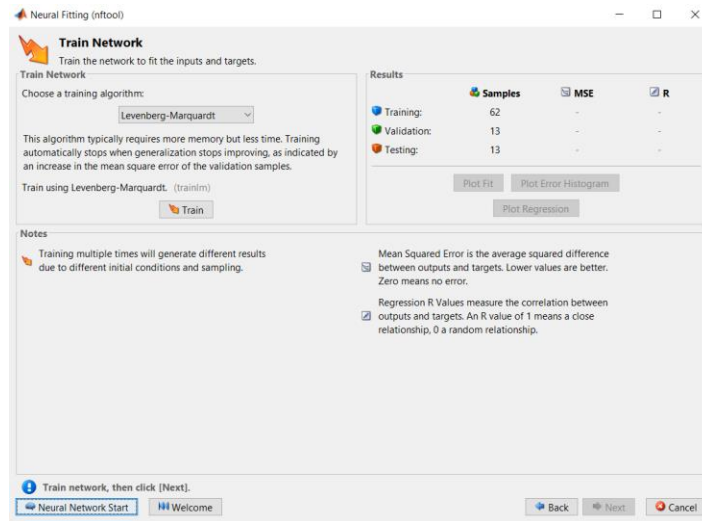


Figura 40. Entrenamiento de la red neuronal

Los resultados que se obtienen se referencian a través del error de MSE, y la razón R en los porcentajes de entrenamiento, validación y prueba, como se presentan en la Figura 41. También, se obtuvo la referencia de su regresión con valores de 1, como se ve en la Figura 42.

Results			
	Samples	MSE	R
Training:	62	1.67275e-8	9.99999e-1
Validation:	13	8.70510e-9	9.99999e-1
Testing:	13	4.04764e-7	9.99995e-1

Figura 41. Resultados de la red neuronal entrenada

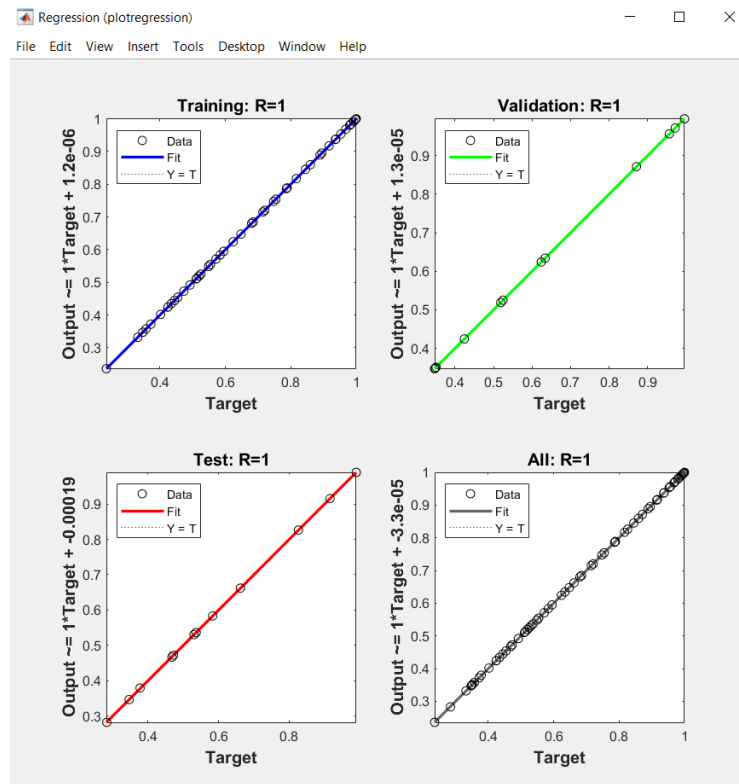


Figura 42. Resultados de valores de regresión de la red entrenada

6. Generar el módulo compatible con Matlab Simulink del modelo de predicción de la red neuronal, como se presenta en la Figura 43.

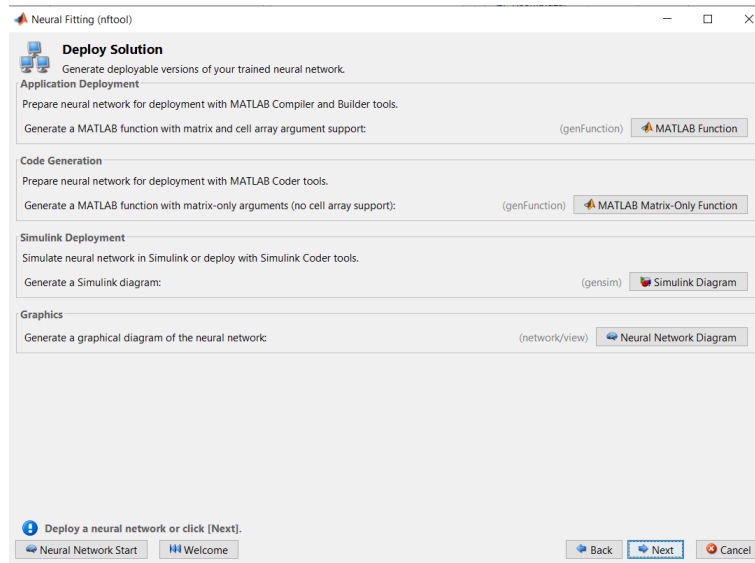


Figura 43. Solución de desarrollo de la herramienta conversor al módulo Simulink

El resultado del modelo predictivo de la red neuronal es la que se presenta en la Figura 44.

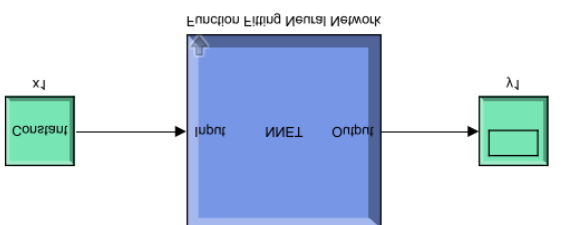


Figura 44. Módulo convertidor en Simulink de una red neuronal

4.3. Implantación con red ANFIS

Para hacer la implantación de esta red ANFIS, utilizando la herramienta Matlab, a través de Toolbox, se procede primero a realizar la normalización de los datos y seguidamente se agrupa los datos en una matriz en la que las dos primeras columnas son las variables independientes de nivel y precipitación como entradas, y la tercera variable, dependiente caudal como salida.

Al obtener la información ya organizada, se procede a cargarla a través de Toolbox “ANFIS”, que se encarga de generar en su fase final un módulo del modelo de predicción basado en redes neuronales y lógica difusa compatible con el ambiente Simulink.

Para realizar la predicción del modelo a través de una red ANFIS, se efectúan los siguientes pasos.

1. Se cargan los datos de la matriz normalizada y agrupada descrita inicialmente, en el módulo Toolbox neuro-difuso.
2. Se genera el FIS con la arquitectura correspondiente al MF en la entrada y en la salida de tendencia lineal, con un algoritmo de ajuste “trimf”.

3. Se entrena la red teniendo en cuenta el algoritmo de convergencia blackpropagation con un tiempo de épocas de 100, para obtener el menor error.
4. Se obtiene la trayectoria de los valores validados del módulo en estudio.
5. Estructura del módulo ANFIS, como se observa en la Figura 45.

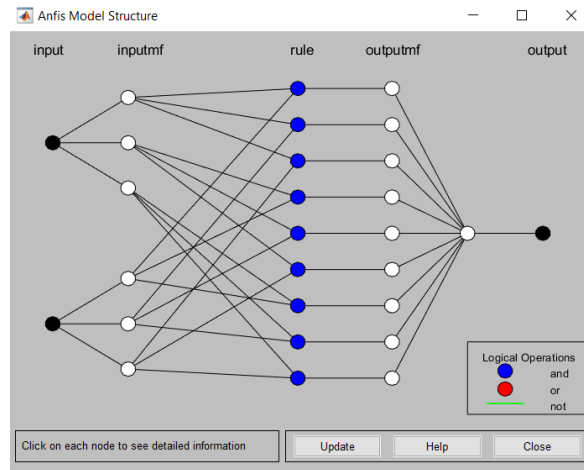


Figura 45. Modelo de la estructura ANFIS

6. Se exporta al ambiente Simulink a través de un workspace en la pestaña “file”.
7. Se implanta el modelo obtenido del Toolbox de ANFIS en el módulo activo de Simulink FUZZY, como se ve en la Figura 47.

Los pasos del 1 al 5 se ven reflejados en la Figura 46, del módulo de ANFIS.

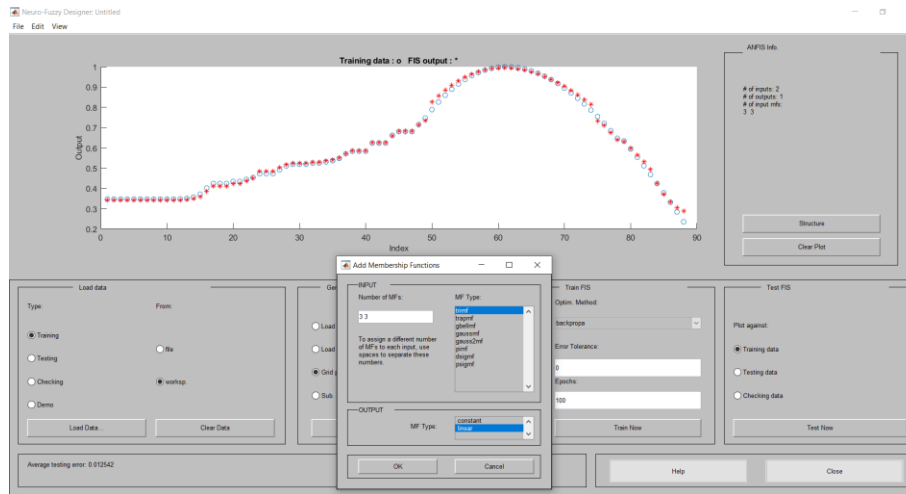


Figura 46. Ventana del módulo neuro-difuso

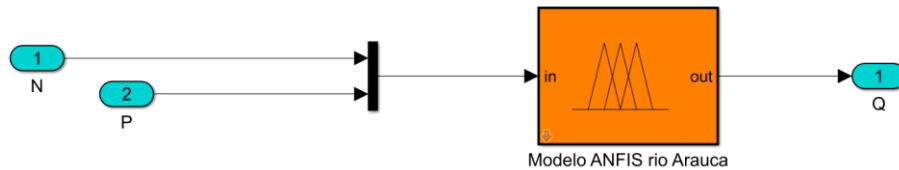


Figura 47. Modelo del módulo ANFIS del río Arauca

4.4. Algoritmo red neuronal en Matlab

Para el desarrollo del algoritmo creado en Matlab de la red neuronal, se usa como referencia la información procedente del modelo matemático de relaciones potenciales, donde actúa como observador, con el propósito de obtener la diferencia con el caudal real mediante el residuo que posteriormente se compara y genera las alertas del comportamiento del río.

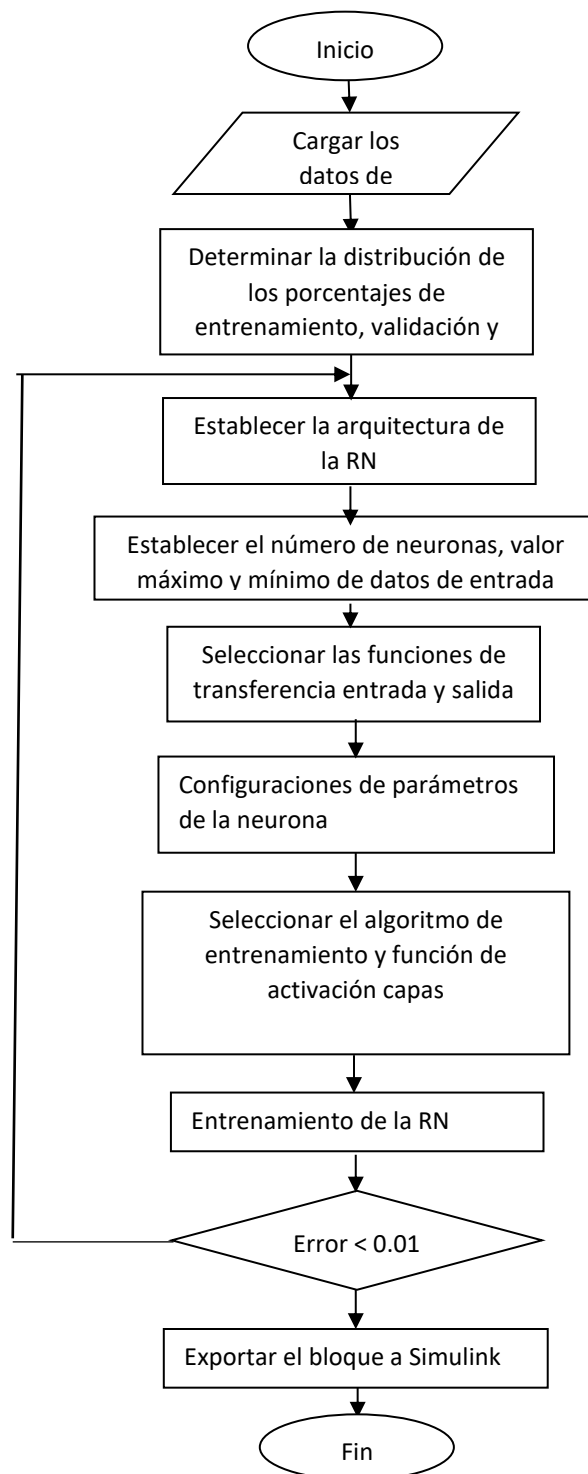


Figura 48. Algoritmo de red neuronal

En la creación del algoritmo se debe tener presente las funciones de transferencia que intervienen en las capas ocultas, y la función de transferencia de la red en general cuando se entrena.

A continuación, se presenta las pruebas realizadas en el entrenamiento de la red neuronal, donde identifica las características del mejor algoritmo de entrenamiento y sus funciones de transferencia equivalentes a la utilización de una red neuronal con el algoritmo de entrenamiento de Backpropagation que es la indicada para utilizarla como predicción, debido que las otras que existen son orientadas a la clasificación.

La tabla 16 presenta la selección del algoritmo de entrenamiento con tres funciones representativas de las redes neuronales y a su vez se utiliza tres funciones de transferencia internas, con el objetivo de evaluar su eficiencia a través de los errores medios cuadráticos y el equivalente a R.

Tabla 16. Comparación del algoritmo de entrenamiento con diferentes parámetros

Algoritmo Entrenamiento BP	Neuronas	Epocas (1000)	Funcion Transferencia	Tiempo (s)	Error (MSE)	R
Trainlm	14	1000	Traingdm	6	3.68e-05	0.99953
			Traingdx	6	4.60e-5	0.99942
			Traingd	6	5.54e-5	0.99928
	10	1000	Traingdm	5	3.34e-5	0.99953
			Traingdx	5	9.60e-5	0.99874
			Traingd	5	6.90e-5	0.99911
	6	751	Traingdm	4	4.92e-5	0.99937
		898	Traingdx	4	0.000118	0.99846
		1000	Traingd	5	0.000117	0.99846
Trainrp	14	1000	Traingdm	3	0.000118	0.99849
			Traingdx	3	0.000103	0.99865
			Traingd	3	0.000203	0.99731
	10	1000	Traingdm	3	0.000165	0.9978
			Traingdx	3	0.000459	0.99377
			Traingd	3	0.000182	0.99767

Trainbr	6	1000	Traingdm	3	5.81e-5	0.99924
			Traingdx	3	0.000147	0.9981
			Traingd	3	0.000556	0.99238
	14	1000	Traingdm	8	0.000142	0.9988
			Traingdx	8	4.70e-5	0.9994
			Traingd	9	4.85e-5	0.99936
	10	1000	Traingdm	7	4.51e-5	0.99941
			Traingdx	7	9.03e-5	0.9988
			Traingd	7	7.21e-5	0.99909
	6	1000	Traingdm	5	5.64e-5	0.99924
			Traingdx	6	0.000204	0.99731
			Traingd	7	0.000114	0.99853

Como resultado de la Tabla 16, donde la obtención del algoritmo de la red neuronal del cual se utiliza la solución por medio del algoritmo Backpropagation, y estando conformado por el método de Levenbert Maquart a través de la función trainlm y la función de transferencia del proceso de capas ocultas Traingdm, se obtiene una comparación general con la variación de diferentes parámetros donde relaciona las neuronas, para este caso se usaron 10 y funciones de transferencia respectivas, proporcionando como resultado un error MSE de 3.34e-5, e indicador R equivalente a 0.999953.

4.5. Selección del modelo inteligente

Para seleccionar el mejor modelo inteligente para el estudio, de esta investigación, se recurre a la comparación a través de la obtención de los errores que proporciona el criterio integral tanto valor absoluto como el error cuadrático, representados por las ecuaciones 10 y 11:

$$IAE = \int_0^t |res(t)| * dt \quad \text{Ecu. 10}$$

$$ISE = \int_0^t res(t)^2 * dt \quad \text{Ecu. 81}$$

Al aplicar la relación de los modelos con respecto al valor real del caudal por unidad, respecto a los datos que genera el modelo inteligente, se obtiene la Tabla 17, que contiene los errores que sirven para seleccionar la mejor técnica inteligente para este trabajo de investigación.

Tabla 17. Comparación de los errores de las técnicas inteligentes para seleccionar el modelo del río en estudio

Modelo	IAE	ISE
NF	0.1603	0.0001644
ND	1.866	0.0282
ALG	2.417	0.05977

La Tabla 17 muestra que el mejor modelo inteligente es el proporcionado por las redes neuronales a través del algoritmo alternativo “NFTOOL”, con un valor de IAE de 0.1603 y de ISE 0.0001644.

A continuación, se presenta en la Figura 49 los errores que se obtuvieron mediante la diferencia del caudal real por unidad y sus respectivas técnicas inteligentes, observando como mejor tendencia NF o redes neuronales.

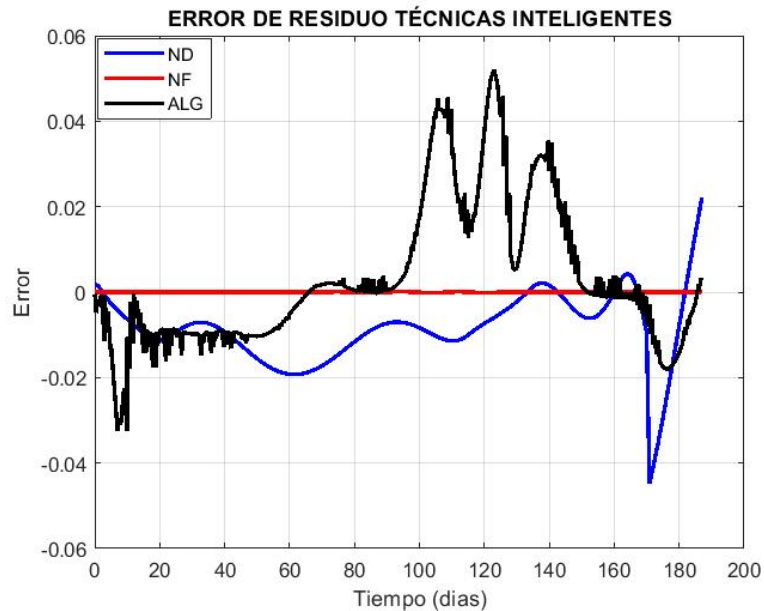


Figura 48. Residuo del error de las técnicas inteligentes

Una de las ventajas de las redes neuronales es que en el entrenamiento es la etapa donde únicamente se requiere de una mayor carga computacional, después su operación es rápida (Rubio et al., 2016). Otra ventaja de las RN en aplicaciones de predicción, en el monitoreo y estimación de pronósticos de caudal y temperatura en el lago Baikal en Rusia, dio como resultado estimaciones más fiables (Abasov et al., 2022).

Capítulo V

Diseño de la alerta temprana de inundación

INTRODUCCIÓN

En Colombia las inundaciones producen acciones que afectan las condiciones del ser humano. Estos efectos acarrearán situaciones de pérdidas económicas y humanas, por tal razón, este proyecto se orienta al diseño de un sistema de alertas tempranas que sea capaz de aportar en forma directa la toma de decisiones ante la ocurrencia de estos eventos, esta herramienta es fundamental para las entidades de gestión del riesgo responsables de la toma de decisiones y las evacuaciones (Corpoguajira, 2011).

Por tal razón, en este capítulo se presenta un diseño en el que se compara los valores del modelo seleccionado del río, para este caso el de relaciones potenciales, con el observador de técnicas inteligentes, que hará las veces de los ambientes reales de este fenómeno. De esta manera se obtiene una diferencia o el comúnmente llamado ‘residuo’, que proporciona las características reales o información de este evento natural, entregando en forma directa una información que ubica el estado del nivel del río en tiempo real para poder tomar así, acciones debidas por medio de alertas o condiciones de bajo, media o alta seguridad.

También en este capítulo, se presenta la interpretación y análisis de las metodologías utilizadas para la obtención del modelo de información, modelo del río en estudio, el modelo resultante del observador del río en estudio, el residuo que se obtiene a partir de la diferencia entre

el modelo real respecto al observador con el cual se procede a determinar los niveles que indican las alertas tempranas (García y Mendivelso, 2017).

5.1. Diseño de las alertas tempranas del río Arauca en el municipio de Toledo, corregimiento San Bernardo

Las alertas tempranas dan a conocer el riesgo en el que se encuentran los ribereños debido al aumento del nivel del río y se usan en especial para evitar pérdidas humanas e impactos políticos, sociales, económicos y ambientales. Estas alertas de inundación se pueden representar en tres grupos: leve, media y altas, que a su vez son codificadas según el color: amarillo, naranja y roja.

Este sistema de alerta se desarrolla en esta investigación de la siguiente forma:

1. Al comparar el residuo producto del modelo observador con el modelo real obtenido del río, se procede a establecer criterios que proporcionan estados de criticidad de alertas verde, amarilla, naranja y roja. La alerta verde representa el nivel en estado normal del río; la alerta roja, un estado de alto riesgo, por lo que se deben realizar desalojos y activar los protocolos de emergencia para evitar pérdidas humanas y económicas.
2. Para obtener el modelo se utiliza la herramienta Simulink y se compara los respectivos niveles del crecimiento del río.

5.1.1. Modelo de la información del sistema de alerta temprana para el río en el municipio de Toledo corregimiento San Bernardo

Este ítem se basa en la información proporcionada por las estaciones meteorológicas e hidrométricas que indican el comportamiento del nivel de agua en el cauce del río apartir de un parámetro fundamental como la precipitación, puede estar ocurriendo aguas arriba o en el sitio de medida; por tal razón, se tiene como referencia para abordar la trayectoria del río tres estaciones,

una ubicada en Norte de Santander, denominada Peña de los Micos, una en el centro de la trayectoria denominada Alcaraván, y una al final, aguas abajo, denominada Puente Internacional.

Estas estaciones proporcionan información por medio de base de datos entregadas por el IDEAM, y se hacen la respectivas adaptaciones para después proceder a un análisis para direccionar al objetivo propuesto: obtener un modelo de información.

Al reorganizar esta información se procede a aplicar una metodología de regresión con el propósito de generar un modelo matemático lineal que permita alimentar al modelo matemático del río.

A raíz de lo anterior, se obtuvieron los siguientes comportamientos del modelo de información (Figuras 50, 51 y 52).

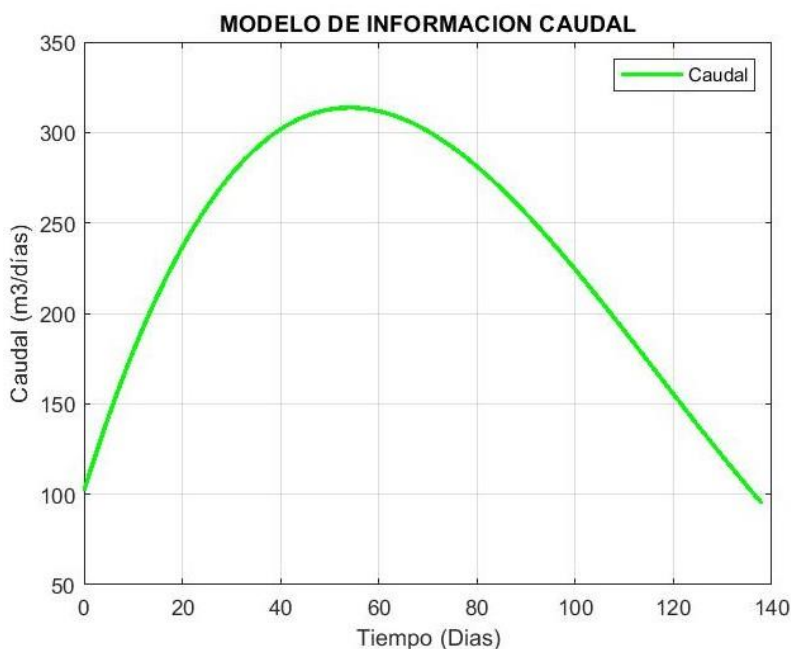


Figura 49. Representación del modelo de caudal del río en el municipio de Toledo

En la Figura 50 se presenta el caudal del agua del río, con un comportamiento equivalente entre 0 a 138 días, en $104\text{m}^3/\text{días}$ como inicio y un punto máximo de $314\text{m}^3/\text{días}$ ocurrido en 58 días. Esta trayectoria representa la creciente del cauce del río en su punto máximo, y el agotamiento, que ocurre entre 50 y 138 días transcurridos, para llegar a $96\text{m}^3/\text{días}$.

En la Figura 51 se presenta el nivel del agua del río, con un comportamiento equivalente entre 0 a 138 días, en $204\text{cm}/\text{días}$ como inicio y un punto máximo de $290\text{cm}/\text{días}$ ocurrido en 58 días. Esta trayectoria representa la creciente del cauce del río en su punto máximo, y el agotamiento, que ocurre entre 50 y 138 días transcurridos, para llegar a $152\text{cm}/\text{días}$.

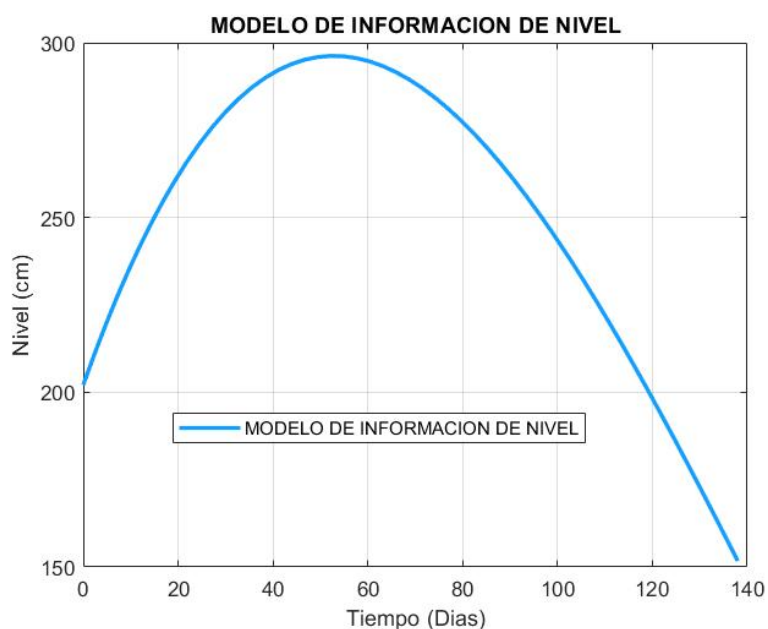


Figura 50. Modelo de información de nivel del río en el corregimiento de San Bernardo, municipio de Toledo.

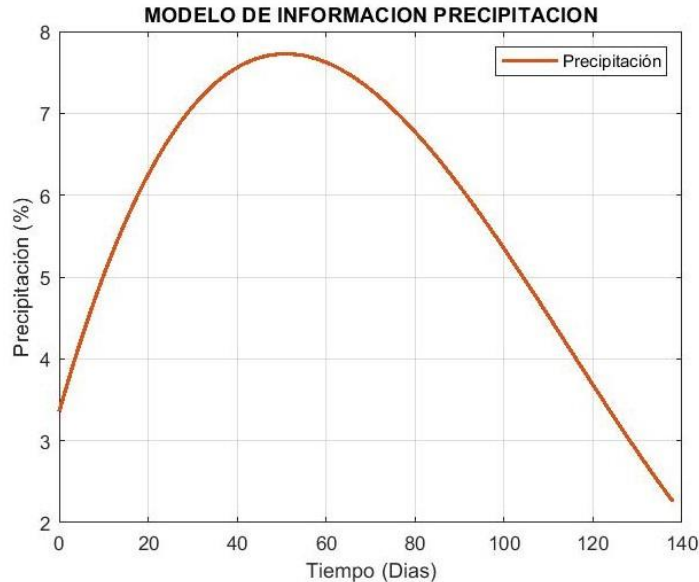


Figura 51. Modelo de información de precipitación en el corregimiento de San Bernardo, municipio de Toledo

En la Figura 52, se presenta la precipitación en el corregimiento de San Bernardo, municipio de Toledo, con un comportamiento equivalente entre los 0 a 138 días, en 3.4% como inicio, y un punto máximo de 7.7%, ocurrido en 58 días. Esta trayectoria representa la precipitación en su punto máximo, y el agotamiento, que ocurre entre 50 y 138 días transcurridos, para llegar a 2.3%.

5.2.Diseño de las alertas tempranas del río en el municipio de Arauca

5.2.1. Modelo de la información del sistema de alerta temprana para el río Arauca

Este ítem se basa en la información proporcionada por las estaciones del IDEAM meteorológicas e hidrométricas y la medida directa se ubica en el municipio de Arauca, en la estación puente internacional de las variables de precipitación, nivel y caudal.

Al reorganizar la información, se procede a aplicar una metodología de regresión con el propósito de generar un modelo matemático polinómico que trendra la tendencia del río objeto de estudio.

De lo anterior, se obtuvo los siguientes comportamientos, expuestos en las Figuras 53, 54 y 55.

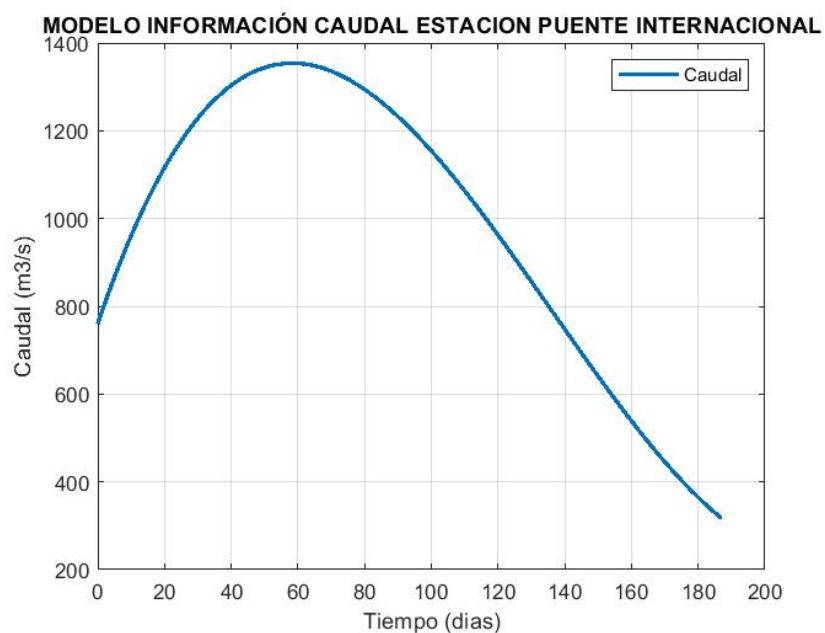


Figura 52. Representación del modelo tendencia de caudal del río Arauca

En la Figura 53 se presenta el caudal del agua del río Arauca, con un comportamiento equivalente entre 0 a 187 días, en $780 \text{ m}^3/\text{días}$ como inicio y un punto máximo de $1360 \text{ m}^3/\text{días}$ ocurrido en 58 días. Esta trayectoria representa la creciente del cauce del río Arauca en su punto máximo, y el agotamiento, que ocurre entre 58 y 187 días transcurridos, para llegar a $320 \text{ m}^3/\text{días}$.

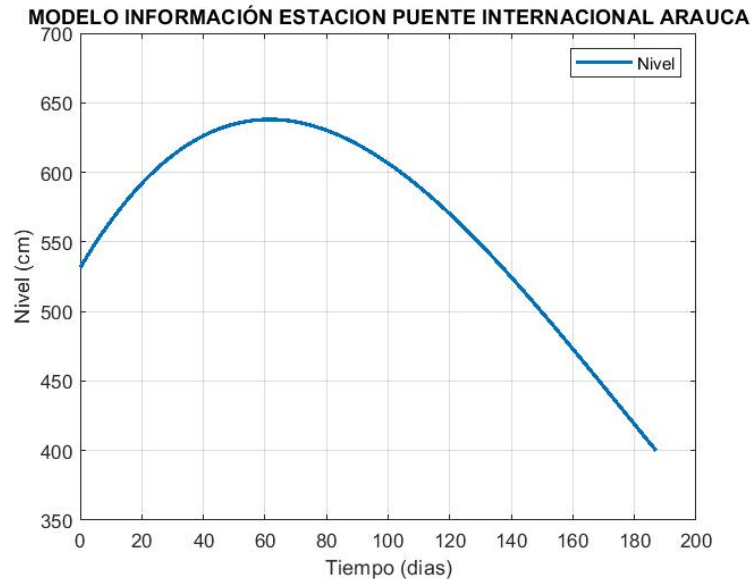


Figura 53. Modelo de información del nivel del río Arauca

En la Figura 54 se presenta el nivel del agua del río Arauca, con un comportamiento equivalente entre 0 a 187 días, en 540 cm como inicio y un punto máximo de 640 cm ocurrido en 58 días. Esta trayectoria representa la creciente del cauce del río Arauca en su punto máximo, y el agotamiento, que ocurre entre 58 y 187 días transcurridos para llegar a 400 cm.

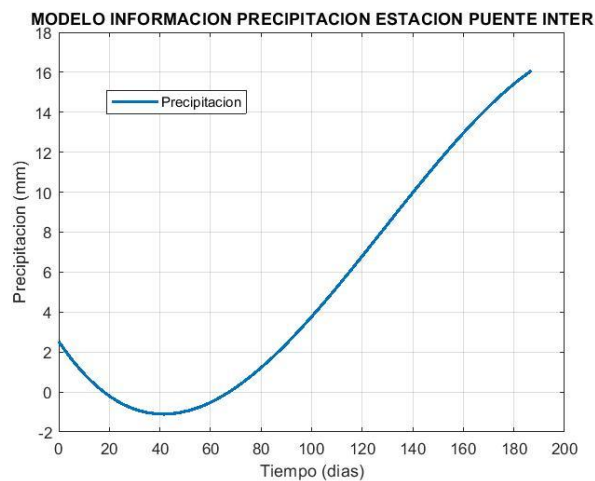


Figura 54. Modelo de información estación puente internacional de Arauca precipitación

En la Figura 55, se presenta la precipitación en la estación Puente Internacional del municipio de Arauca, con un comportamiento equivalente entre 0 a 187 días en 2.3% como inicio, y un punto máximo de 16%, ocurrido en 187 días.

5.2.2. Modelo matemático del cauce del río Arauca

Para obtener el modelo matemático del río en el municipio de Arauca, se procede a utilizar la información proporcionada por el modelo de información y teniendo en cuenta como parámetro fundamental el caudal entregado por las estaciones meteorológicas e hidrométricas se procede a obtener los modelos con características lineales y potencia, utilizando técnicas de regresión y en adición a estos se crea un modelo donde se utiliza la tendencia de relaciones potenciales o no lineal.

De lo anteriormente mencionado, se procede a implantar el modelo matemático obtenido tanto lineal como de potencia y de relaciones potenciales en la herramienta Matlab Simulink.

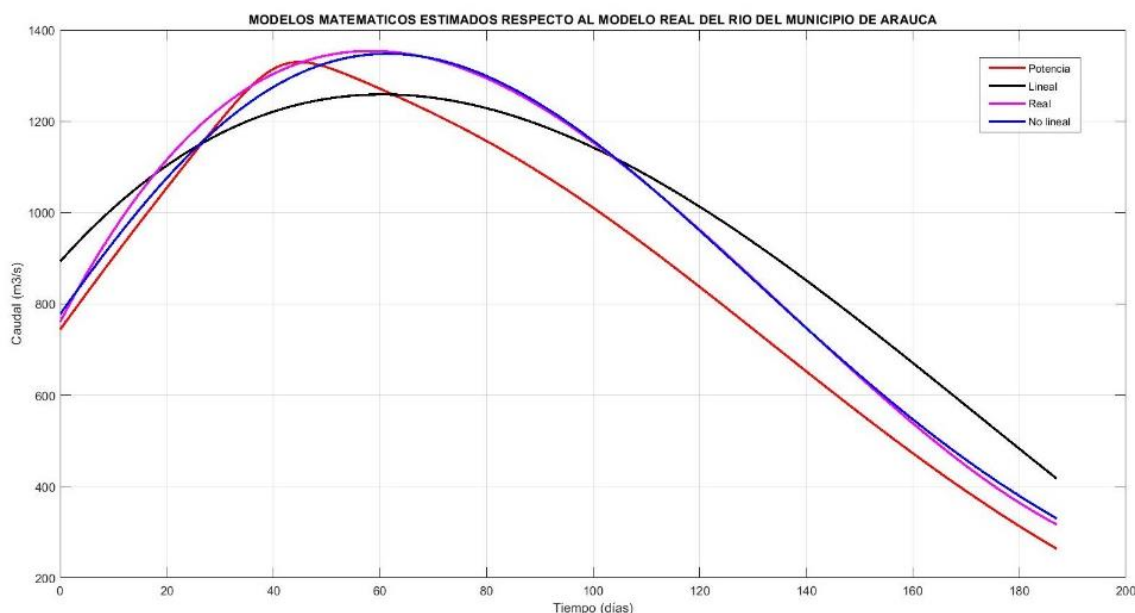


Figura 55. Comparación de los modelos matemáticos

La Figura 56, indica la tendencia que tienen los modelos lineales, de potencia y relaciones potenciales, el modelo de relaciones potenciales tiene mayor pendiente y altura de caudal en el transcurso de los 187 días, mientras que el modelo de lineal y de potencia se ajusta en su tendencia en la caída mas suave.

También se da como referencia la comparación del modelo de información proporcionada por las estaciones hidro-metereológicas respecto a estos modelos lineal, potencia, y relaciones potenciales, dando como más aproximado el modelo de relaciones potenciales, por tal razón se selecciona el modelo para utilizarlo en este caso estudio.

5.2.3. Modelo del observador con técnicas inteligentes caso estudio río Arauca

En este ítem se tiene como propósito emular y obtener una tendencia similar al modelo seleccionado. Para cumplir con lo anterior se procede a relacionar los valores de entrada; como precipitación y nivel, con el caudal equivalente a la información real y seguidamente se procede a realizar el tratamiento de normalización y a partir de los módulos estructurados con técnicas inteligentes, como las redes neuronales, neurodifusas y la creación de un algoritmo de redes neuronales.

En la Figura 57 se obtiene la comparación de los modelos diseñados que definen la tendencia del modelo matemático de caudal del río en el municipio de Arauca.

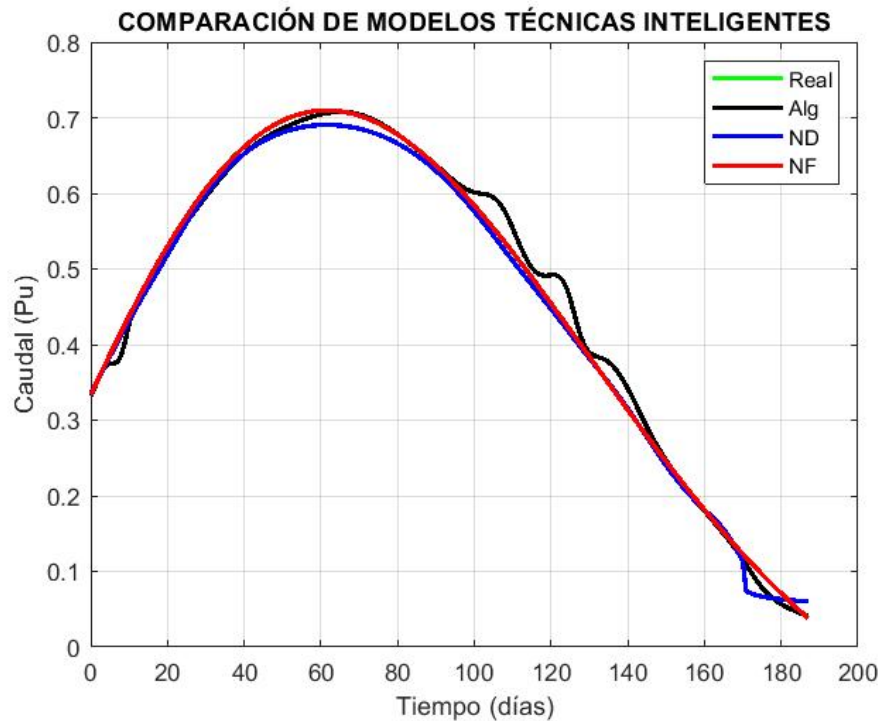


Figura 56. Comparación de las técnicas inteligentes RN, ANFIS y Algoritmo RN

La Figura 57 esta enmarcada en una ventana de 0 a 187 dias, donde se presentan las respectivas crecientes equivalentes al caudal por unidad de 0.35 Pu como inicial hasta un valor máximo de 0.71 Pu y tiende el valor final de agotamiento de 0.04 Pu.

Esta comparación se realiza utilizando el caudal real generado por las estaciones hidrometereológicas, llevadas al campo normalizado y a su vez comparados con los modelos equivalentes de las respuestas de predicción de las redes neuronales, neurodifusas y el algoritmo RN, y el resultado obtenido evidencia que la tendencia real del río se asemeja más con el modelo NF. Cabe señalar, que en la Figura 57 se presenta asolapamiento entre el modelo NF respecto al modelo real.

5.2.4. Comparación de los errores IAE e ISE entre los modelos inteligentes RN, Neurodifuso y algoritmo de la red neuronal

En este ítem se tiene como propósito seleccionar el mejor modelo de técnicas inteligentes, a través de la aplicación de los errores de integración absolutos y cuadráticos.

A continuación se presenta en la Figura 58 a y b, de los errores generados por cada modelo y se comparan con el objetivo de obtener el mejor entre ellos.

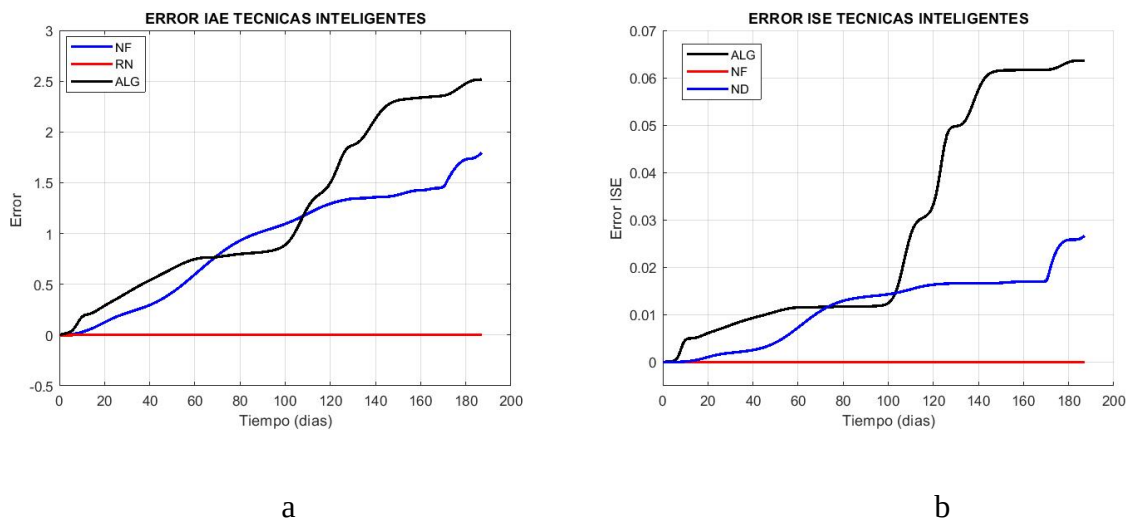


Figura 57. Comparación del error IAE e ISE de las técnicas inteligentes RN, NF y ALG

De la Figura 58a y 58b se visualiza los errores correspondientes de IAE e ISE, se deduce que el mejor modelo inteligente para aplicar a este trabajo de investigación es el modelo NF.

5.2.3. Generación de residuos para el sistema de alerta temprana

Para la obtención del resultado de este ítem, se relacionó el mejor modelo obtenido del cauce del río en tiempo real normalizado, respecto al mejor modelo generado por técnicas inteligentes de redes neuronales del cauce del río Arauca, dando como resultado el equivalente al

residuo, (ver Figura 59), que representa la tendencia en el tiempo de alerta en una ventana determinada.

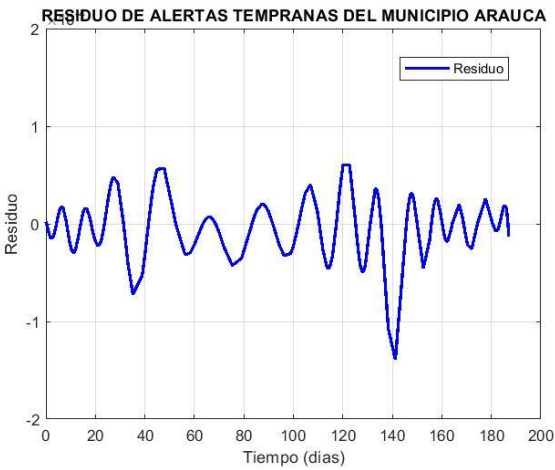
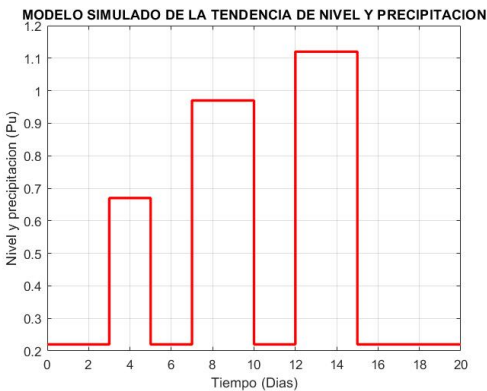
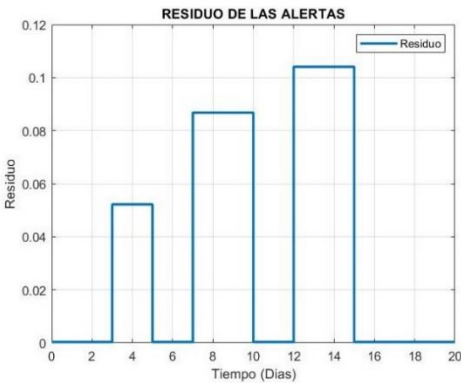


Figura 58. Residuo de la alerta temprana del municipio de Arauca

A continuación, la Figura 60a demarca la simulación de la entrada de nivel y precipitación en un tiempo determinado de 20 días, y la Figura 60b representa el residuo equivalente de ese comportamiento de inundación.



a



b

Figura 59. Características modelo simulación entrada y salida de los residuos de las alertas

La Figura 61, presenta la implantación en Simulink del esquema de las alertas tempranas del municipio de Arauca, en ella se visualiza las comparaciones de niveles de inundación y la representación de alertas nivel bajo, medio y alto o alerta amarilla, naranja o roja.

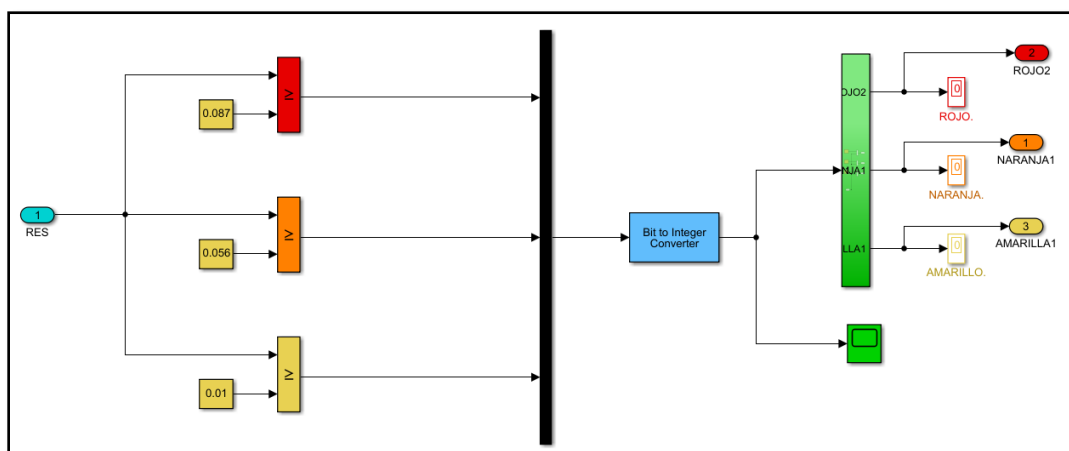


Figura 60. Esquema de alertas tempranas para el municipio de Arauca

5.3. Tiempo de predicción de inundación

En este trabajo se establece la posibilidad de expresar el tiempo de concentración, que es el tiempo entre el inicio de la lluvia efectiva y el caudal máximo de inundación Jiménez (2014) (Román, s.f.).

Tiempo de punta t_p

$$t_p = 0,5 * D + 0,6 * t_c \quad \text{Ecu. 92}$$

t_c = Tiempo de concentración en horas

D = Duración de precipitación efectiva en horas

Tiempo base t_b (h)

$$t_b = 2.67 * t_p \quad \text{Ecu. 10}$$

Caudal máximo o de punta $\frac{m^3}{s}$

$$Q_p = \frac{0,208 * P * A}{t_p} \quad \text{Ecu. 114}$$

P = Precipitación efectiva en mm

A = Superficie de la cuenca cm^2

A continuación, se muestra en la Figura 62 una forma simple y directa de obtener los tiempos de escorrentía máxima en un evento de precipitaciones continuas. Este diagrama hidrométrico se basa en la estructura de dos triángulos, en la que el primer triángulo en su base, establece el tiempo de la primera gota, denominado tiempo máximo de escorrentía t_p o de inundación, del cual se obtiene también el máximo caudal Q_p ; y el tiempo t_b es la base de los dos triángulos, que representa el tiempo de subida y agotamiento después de la primera gota de lluvia.

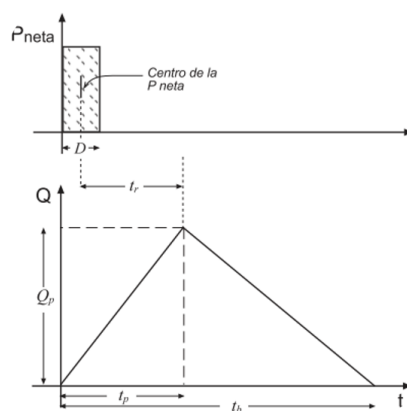


Figura 61. Hidrograma triangular

Fuente: Román (s.f.)

Para obtener el tiempo de concentración t_c , se tienen en cuenta los estudios de Vélez y Botero (2011), Kaufmann et al. (2014) y Kang et al. (2006), como lo expone la Tabla 18.

Tabla 18. Modelos del tiempo de escorrentía estimados

Nombre	Ecuación	Características	Autor
Johnstone	$T_c = 0,4623 * L^{0,5} * S^{0,25}$	Información en las cuencas rurales USA 64,8 – 4206 km^2	Johnstone y Cross (2005)
Corps Engineers	$T_c = 0,191 * L^{0,7} * S^{-0,1}$	Información en las cuencas rurales $A \leq 12.000 \text{ km}^2$	Linsley (1977) Silveira (2005).
Picking	$T_c = 0,108 * A^{0,33} * L^{0,33} * S^{-0,5}$	Información de las cuencas en las zonas rurales Italia	Pasini (1914) Greppi (2005)
Pasini	$T_c = 0,0883 * L^{0,667} * S^{-0,33}$	Información en las cuencas rurales	Mata-Lima et al.(2007); Silveira (2005)

Para hallar el tiempo de escorrentía de una inundación de Arauca a Arauquita, se hace lo siguiente:

1. Se escoge el modelo CORPS ENGINEERS, que establece que el área debe ser menor de 12 000 km^2 .

Para el caso, entre Arauquita y Arauca hay área de 4796.76 km^2 , por lo que cumple con este modelo.

2. Modelo matemático correspondiente a Corps Engieneers

$$T_c = 0.19 * \left(\frac{L^{0.76}}{S^{0.19}} \right) \quad \text{Ecu. 1512}$$

$L = 100 \text{ km}$ longitud del cauce entre Arauquita y Arauca

S = Pendiente de Arauquita 160 m y Arauca 123 m equivalente a 0.019 de pendiente.

$$T_c = 0.19 * \left(\frac{100^{0.76}}{0.019^{0.19}} \right)$$

$$T_c = 13.35 \text{ horas}$$

3. Se halla el tiempo de inundación gota inicial del municipio Arauca.

$$t_p = 0,5 * D + 0,6 * t_c$$

$$t_p = 0,5 * 6 + 0,6 * 13.35$$

$$t_p = 11,01 \text{ horas}$$

La primera gota en Arauquita al empezar la precipitación tarda 11.01 horas en llegar al municipio de Arauca, este tiempo permite dar aviso a la comunidad respecto a la amenaza de inundación del río.

4. Para hallar el caudal del río, en el municipio Arauca:

$$Q_p = \frac{0,208 * 20 * 4796.76}{11.01}$$

$$Q_p = 1812 \text{ metros cúbicos por segundo}$$

5.4. Implementación del sistema alerta temprana

En este ítem se hace referencia al prototipo del sistema de alerta temprana donde se permite explotar diversos conceptos del diseño antes de establecer una implementación definitiva, también permite evaluar desde las primeras fases del desarrollo, facilitando la exploración de ideas sobre

nuevos conceptos o tecnologías, este prototipo es esencial para la documentación, tanto de conceptos funcionales del sistema como tareas concretas del mismo.

El prototipo mejora la calidad y la completitud de las especificaciones funcionales del sistema y es una herramienta de propósitos generales que sirve para comprobar la fiabilidad técnica de una idea, clarificar los requisitos indeterminados o simular la respuesta de los procesos que componen el sistema de alerta temprana.

A continuación, se presenta las fases implementadas en este prototipo del sistema de alerta temprana, estructurado en tres componentes principales:

1. La recolección de datos
2. Análisis y procesamiento de datos
3. La difusión de información.

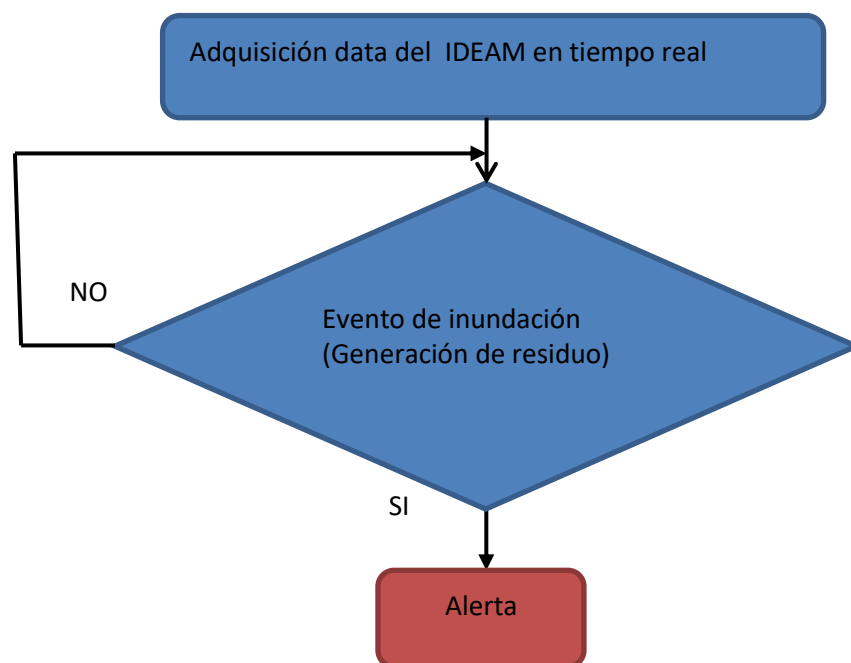


Figura 62. Flujograma de implementación del sistema de alerta

La Figura 63 representa el diagrama de flujo del principio operativo del sistema de alerta temprana en sus diferentes etapas.

Recolección de Datos

La recolección de datos se realiza a través de la información que publica la página web del IDEAM en tiempo real, esta información representa las variables que intervienen en el comportamiento del cauce del río Arauca.

Para obtener la información se realizó un algoritmo en Matlab que se toma a través de los archivos que proporciona la página fews.ideam.gov.co, donde se encuentra las variables independientes de nivel y precipitación en formato “JSON” que usualmente son usados para el intercambio de datos en línea. Este archivo es descargado a través del algoritmo de Matlab en tiempo real, que permite guardar en una matriz la información en columnas de tiempo, nivel y precipitación.

Estructura del algoritmo

1. Extracción de la página web

[http://fews.ideam.gov.co/colombia/SeriesH/0037057060.txt'](http://fews.ideam.gov.co/colombia/SeriesH/0037057060.txt)

2. Se lee la matriz con la estructura de la página web

`Readmatrix`

3. Delimitación de datos y búsqueda del vector de información

`find(datos(:,1))`

4. Generación del valor final a la plataforma de Matlab

`final=[sig',datos];`

Análisis y procesamiento de datos

Se carga el archivo de importación de la data del IDEAM al ambiente Workspace de Matlab, de allí se importa a la plataforma de Simulink, con el propósito de alimentar la información correspondiente a las variables de nivel y precipitación, directamente al modelo matemático real y al sistema de observador inteligente, con el fin de obtener el residuo de las dos estructuras que a su vez proporciona la información del comportamiento de río, donde se procesa y emite el estado correspondiente al nivel del río.

Seguidamente, en la Figura 64 se describe el diagrama de bloques equivalente al procesamiento de la información para obtener las alertas tempranas.

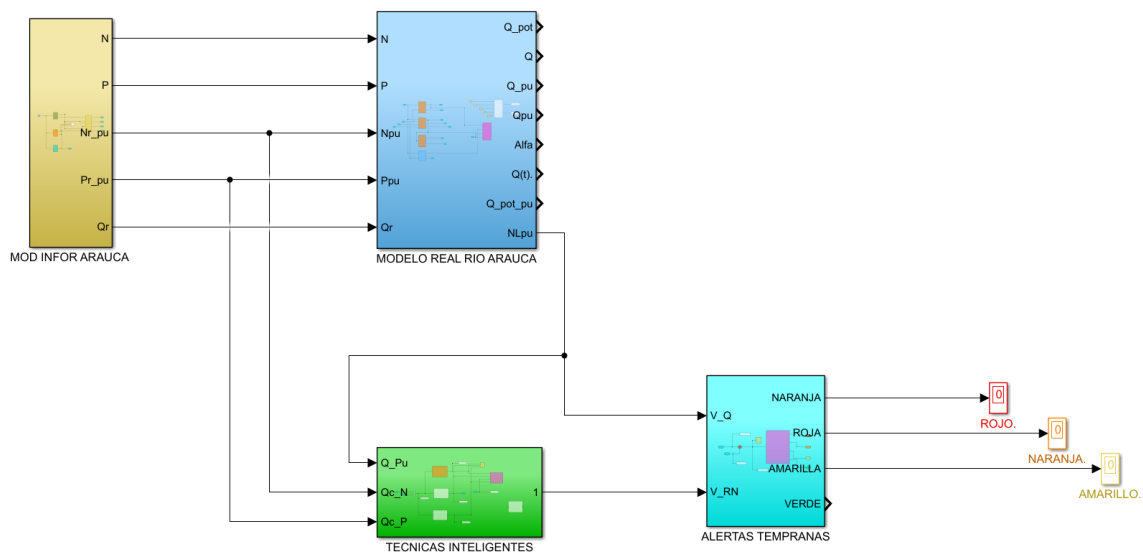


Figura 63. Diagrama de bloques equivalente al procesamiento de la información

Difusión de la información

El sistema fue diseñado para emitir la alerta en caso de que se presente un eventual incremento de nivel del río, mediante un mensaje de texto (SMS) ver la Figura 65, a las entidades competentes encargadas como la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres.

Este sistema de información se realiza a través de un algoritmo implementado en Matlab que permite enviar mensajes de texto a través de la plataforma twilio.com, y a su vez requiere tener una cuenta con membresía.

Estructura del algoritmo:

1. Definición de clases

```
classdef TwilioClient < handle
```

2. Método de desarrollo del algoritmo

- Función del cliente

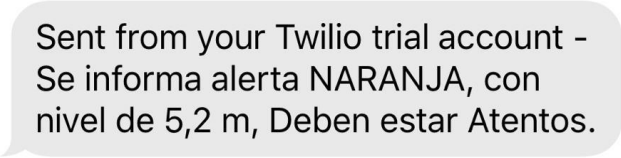
```
function client = TwilioClient()
```

- Función del mensaje a enviar

```
function msg = SendMessage(obj, to, body)
```

- Función del destinatario

```
function num = FormatNumber(~, number, country_code)
```



Sent from your Twilio trial account -
Se informa alerta NARANJA, con
nivel de 5,2 m, Deben estar Atentos.

Figura 64. Formato del mensaje de texto de alerta

5.5. Visualización de las variables de la alerta temprana

En este ítem se realiza la implementación del sistema de alertas tempranas del río Arauca en el municipio de Arauca, teniendo en cuenta las variables de caudal, nivel, precipitación y residuos, y utilizando la herramienta “Guide” de Matlab Simulink que permite visualizar las alertas.

Para la implementación de este sistema se aplica la siguiente metodología:

1. Implementación en Simulink de las variables de caudal, nivel, precipitación y residuo, que esta desarrollado en tiempo real y a través de técnicas inteligentes.
2. Se adquiere la información proporcionada por las variables representativas a través del módulo “to workspace”, almacenada en forma de arreglos.
3. Se manipulan estos arreglos para convertirlos en datos que pueden ser tratados a través de un código en Matlab.
4. Se hace la interfaz del usuario, que da una presentación y visualización a través de gráficas de las variables predominantes en un sistema de alerta temprana del río Arauca.

5.5.1. Diseño del sistema de visualización de las variables que intervienen en la ribera del río Arauca

Guide de Presentación

Este visualizador está conformado por tres botones encargados de presentar la ayuda, los créditos y su respectiva simulación, como se ve en la Figura 66.



Figura 65. Presentación general de la interfaz del usuario

Guide Ayuda

En este guide se establece la metodología específica para utilizar esta herramienta visualizadora, como se presenta en la Figura 67.

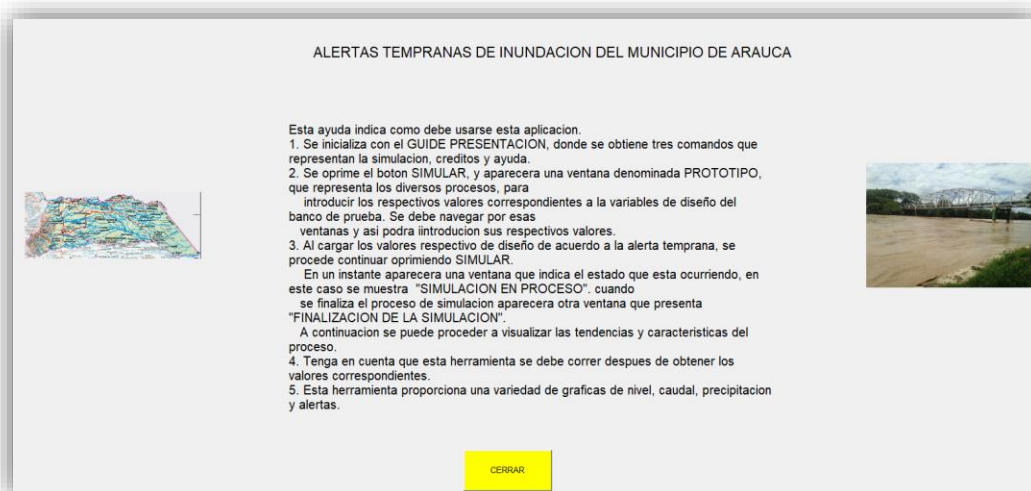


Figura 66. Presentación panel de ayuda

Guide de Créditos

En esta ventana de visualización aparece la información de los autores y entidades que apoyaron la realización de este estudio, como se ve en la Figura 68.

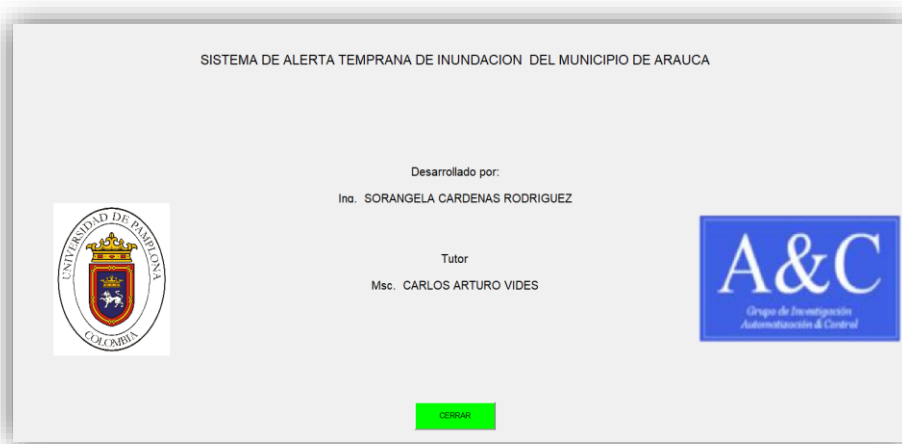


Figura 67. Presentación panel créditos

Guide de Simulación

Esta ventana principal de simulación la conforman tres apartados que representan el tiempo de simulación y la información de las variables predominantes de un sistema de alerta temprana del río para el municipio Arauca, como se muestra en la Figura 69.



Figura 68. Presentación panel menú de simulación

A continuación, se presentan los guides correspondientes a cada una de las ventanas diseñadas (ver Figura 70), tiempo de simulación, nivel, modelo de información y alerta.

Estas ventanas se presentan en las Figuras 70, 71, 72 y 73.

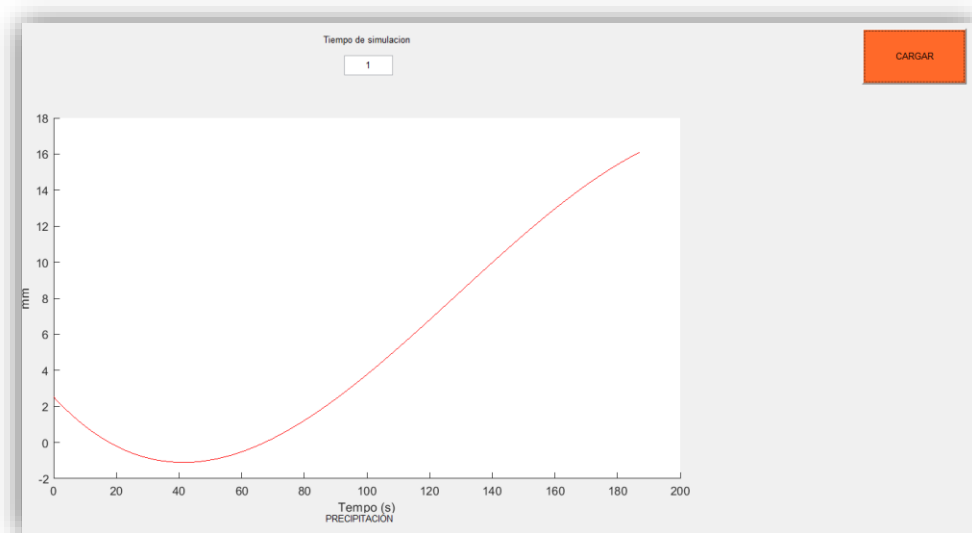


Figura 69. Panel del tiempo de simulación e información de precipitación

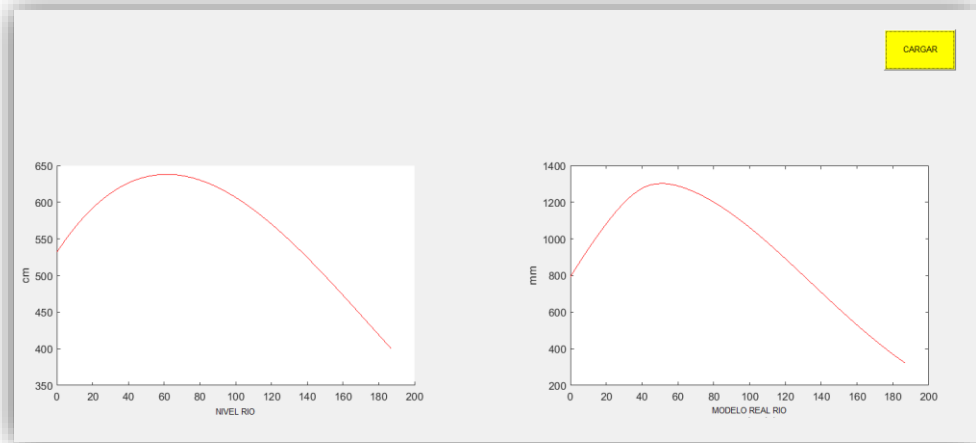


Figura 70. Panel de las variables de nivel y precipitación

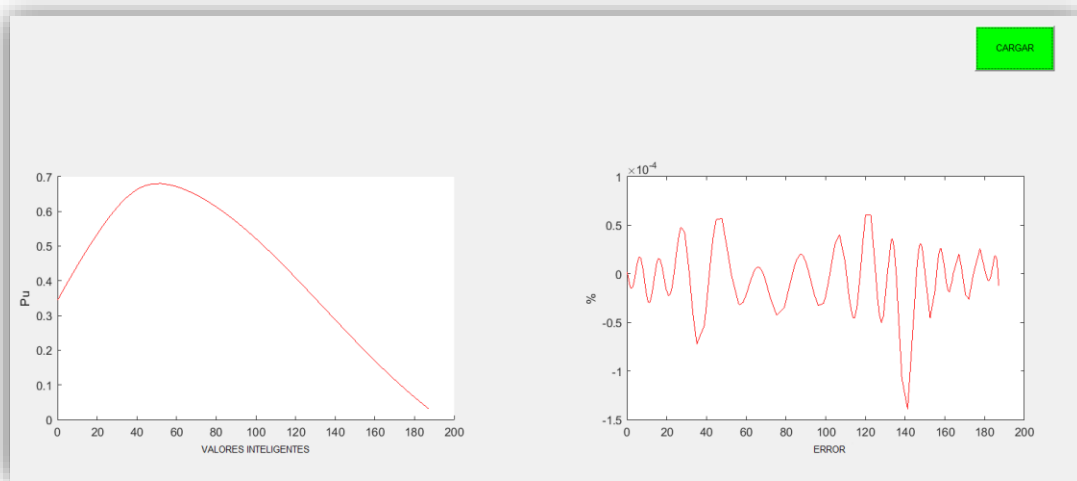


Figura 71. Panel de visualización de caudal por técnicas inteligentes y residuo

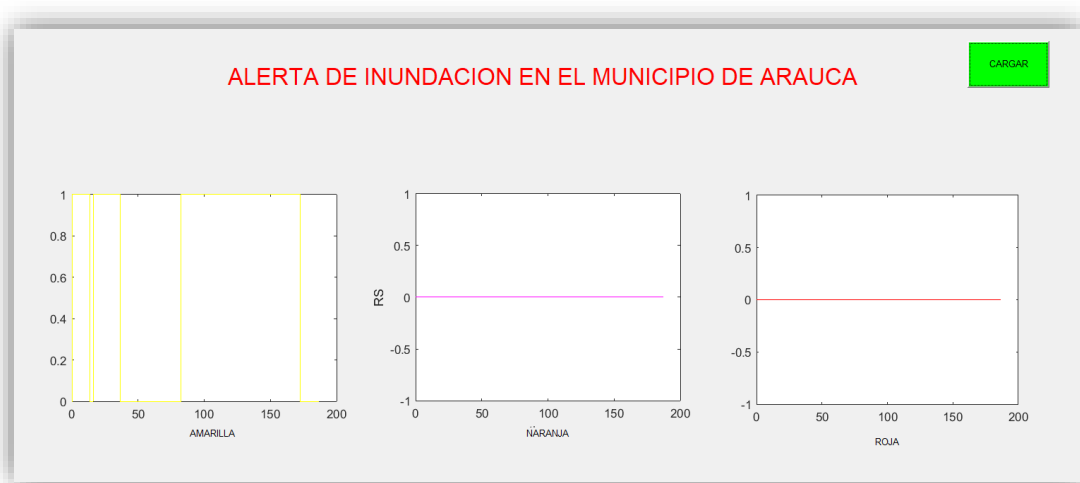


Figura 72. Panel de visualización de alertas de inundación

CONCLUSIONES

Como producto de este trabajo se obtuvo un prototipo que implementa el sistema de alertas tempranas de inundación del río en el municipio de Arauca, que proporciona como resultado la dinámica de adquisición de información del comportamiento del río que se procesa y se presenta a través, de la herramienta Matlab Simulink, permitiendo la interacción entre la máquina y el ser humano, que emite la alerta temprana a los medios competentes de gestión y riesgo.

Las estaciones meteorológicas e hidrológicas del IDEAM, que son las que vigilan el cauce del río Arauca según su ubicación geográfica, no son funcionales, por sus especificaciones técnicas, para generar la toma de datos como nivel, caudal, precipitación, evaporizaciones, temperatura y humedad, por no estar sometidas continuamente a mantenimiento preventivos.

El sistema que se implementa en este proyecto de investigación está sujeto a la toma de datos a través de la página de IDEAM, en el cual es denominado fuera de línea. También, acarrea que la implementación del sistema de alerta temprana de inundación del río Arauca está supeditado a la dinámica de los medios informáticos o tecnológicos que ofrece la página del IDEAM.

El análisis de los puntos de riesgos es el eje primordial para cualquier tipo de gestión en el territorio de Arauca, debido a que es una variable transversal en la planificación y como tal debe darse la importancia requerida. Este trabajo señala la complejidad de obtener información veraz sobre los riesgos y también requiere de un grupo experimentado e interdisciplinario para asignar los criterios establecidos por la metodología propuesta en riesgos y con la realidad de las variables identificadas para obtener la ubicación geográfica de riesgo.

Para conocer la vulnerabilidad de la población del cauce del río en el municipio Arauca, se procede a establecer los puntos críticos del cual se basan en esta investigación a través de criterios geológicos, hidráulicos y antrópicos, con el propósito de caracterizar las zonas inundables del río en el municipio de Arauca.

El presente trabajo realizado para estimar los caudales en la cuenca del Río Arauca, se prueba la eficacia de tres modelos matemáticos; lineal, potencia, y relaciones portenciales, los cuales se escogieron dentro de un marco de posibilidades establecidas por el autor, por ser los que tienen las mejores características reales de la cuenca en estudio. Al obtener el proceso de validación, se concluyo que el mejor modelo matemático fue el de relaciones potenciales y esta expresado por $Q = B_0 * N^{B_1} * P^{B_2}$ con un error de R2 de 0.9989, RMSE de 16.3.

En este trabajo se observa que las técnicas de inteligencia artificial, como los toolbox implementados de las redes neuronales artificiales entregan mejores resultados que los toolbox en ANFIS, los modelos basados en redes neuronales artificiales dan como resultado que pueden ser mejores que los modelos hidrológicos comunes basados en modelos no lineales y que la aplicación de este tipo de soluciones puede ser una buena alternativa para la generación de sistemas de alertas tempranas.

Es este estudio se presenta el algoritmo creado en Matlab en base a las redes neuronales, con una estructura de perceptron multicapa, con un algoritmo de retropropagación de errores BP, con un método de entrenamiento Levenbert Maquard (Trainlm) y con funciones de activación “tansig y purelin” en las capas ocultas, del cual se generó un error alto comparado con las herramientas de toolbox como “nftool y anfis”, equivalente a IAE 0.05977 y ISE 2.417.

La implementación de alertas tempranas de inundación se realiza en un ambiente Matlab Simulink, donde se implementa el modelo que conforma la información de la base de datos proporcionada por el IDEAM, a su vez es importada por un algoritmo de interacción entre la página web y Matlab, donde se extrae a la herramienta Simulink que proporciona información al modelo matemático real y al observador, donde se genera un residuo con el cual se presenta las alertas del comportamiento del río, emitiendo un mensaje de texto, desarrollado en código en el ambiente Matlab, que es direccionado a las entidades competentes de gestión riesgo del departamento de Arauca.

En esta investigación se estudiaron varias ecuaciones que abordan el pico máximo de inundación, del cual abarca su componente geográfico, como lo representa en el hidrograma triangular que establece, el tiempo de escorrentia y predice el tiempo del pico de inundación en el cual aguas arriba puede llegar la inundación. El modelo escogido para esta investigación fue el modelo CORPS ENGINEERS, donde se estable que el área debe ser menor de 12 000 km² y dando como resultado en un area de 4300 km² un tiempo de 11.01 horas.

RECOMENDACIONES

Para que la implementación en tiempo real del sistema alerta temprana de inundación del río en el minicipio de Arauca sea eficiente y óptima, se deberá diseñar y desarrollar un transmisor que genere la información pertinente y segura sobre las variables independientes que involucran este sistema de inundación del río.

Las estaciones hidrometereologicas deben tener un sistema de mantenimiento continuo supervisado directamente por el municipio del cual se encuentra ubicada.

Para la implementación del sistema de alerta se debe tener un servidor donde se instalen los software respectivos usados en esta investigación y utilizar una pantalla que facilite la visualización, es relavante la capacitación de los responsables del manejo de este sistema alerta, para evitar errores en la interpretación de la información.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abasov, N. V., Nikitin, V. M., Berezhnykh, T. V., & Osipchuk, E. N. (2022). Monitoring and Predictive Estimations of Atmospheric Parameters in the Catchment Area of Lake Baikal. *Atmosphere*, 13(1). <https://doi.org/10.3390/atmos13010049>
- Acuña, D., & Robles, D. (2015). Manual de meteorología y gestion de la información climática. *Instituto de Montaña*, 1–168.
- Agustín, M. I. M., Pérez, M., Ortiz, E., Gissel, D., Guzmán, L., & Casas, M. (2019). Predicción de inundaciones usando modelos de tanques y redes neuronales artificiales. *MEMORIAS DEL XXV CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL*, 10.
- Amaguy, E. A. L. (2018). Diseño de un Sistema de Alerta Temprana (SAT) para Prevención de Inundaciones en el Cantón Tena de la Provincia de Napo. In *Tesis pregrado* (Vol. 151, Issue 2). Universida Pontificia Catolica del Ecuador.
- ASONOP. (2014). Diagnostico Físico Biótico 2014. In *Documento* (p. 150).
- Bartual, R. G., & Gimenez, E. C. (2009). Predicción de caudales en tiempo real en grandes cuencas utilizando Redes Neuronales Artificiales. In *Tesis doctoral*. Universidad Politecnica de Valencia.
- Basher, R., Page, J., Woo, J., Davies, M. L., Synolakis, C. E., Farnsworth, A. F., & Steacey, S. (2006). Global early warning systems for natural hazards: Systematic and people-centred. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 364(1845), 2167–2182. <https://doi.org/10.1098/rsta.2006.1819>

Béjar Chacón, W. E., Yonatan ValerianoValdez, K., Ilachoque Umási, J. C., & Sulla Torres, J.

(2016). Predicción de caudales medios diarios en la cuenca del Amazonas aplicando redes neuronales artificiales y el modelo neurodifuso ANFIS. *Research in Computing Science*, 113(1), 23–35. <https://doi.org/10.13053/rscs-113-1-2>

Bernal, F. A. (2014). El Proyecto : Selección de las cuencas piloto RESULTADOS Integración de redes. *Documento*, 10.

Callejas, C. A. R. (2009). Modelacion matemática del distema río Cauca - humedales. *Documento*, 55.

Camolloni, I., Barros, V., Moreira, S., Poveda, G., & Tomasella, J. (2020). Capítulo 10: Inundaciones y Sequías. *Reporte de Adaptación Frente a Los Riesgos Del Cambio Climático En Los Países Iberoamericanos.*, 2(9), 419–458.

Carvajal, L., Jimenez, J., Velez, M., Rendon, G., Caballero, H., & Zuluaga, J. (2005). Priorizacion de puntos criticos y de microcuencas con analisis multiobjetivo en la red hidrica de la cuenca de la quebrada Santa Elena. *Gestion y Ambiente*, 8(2), 15.

Clavijo, L. K. C., & Castro, F. R. R. (2018). Generación de Parámetros y Protocolos para un Sistema de Alerta Temprana en la Cuenca Alta de Río Cauca. In *Trabajo de grado*. Universidad Catolica de Colombia.

Corpoguajira. (2011). Diseño de un Sistema de Alerta Temprana por Inundación y Deslizamiento en el Flanco Nororiental de la Sierra Nevada de Santa Marta – Departamento De La Guajira. In *Proyecto* (p. 13). Corpoguajira.

Dávila, D. (2016). *Sistemas de alerta temprana ante inundaciones en América Latina*.

<http://repo.floodalliance.net/jspui/44111/1793>

- de Almeida, I. K., Almeida, A. K., Anache, J. A. A., Steffen, J. L., & Alves Sobrinho, T. (2014). Estimation on time of concentration of overland flow in watersheds: A review. *Geociencias*, 33(4), 661–671.
- Domínguez-Calle, E., & Lozano-Báez, S. (2014). Estado del arte de los sistemas de alerta temprana en Colombia. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 38(148), 321. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.132>
- Elía, R. De, Lohigorry, P., Guerrieri, J., Saucedo, M., & Cerrudo, C. (2021). El uso de código de colores en alertas meteorológicos. In *Nota Técnica* (pp. 1–37).
- Elizabeth, C. C. K., & Miguel, G. G. L. (2020). Implementación de un sistema de monitoreo de caudal de río San Pablo”. In *Universidad técnica de cotopaxi* (Vol. 1).
- ELTIEMPO. (2018). Las imágenes de los destrozos que dejan las inundaciones en Arauca. *Periodico*, 1.
- Franco, C. (2016). www.econstor.eu.
- FUPAD. (2013). Documento diagnóstico del departamento de Arauca. *Documento*, 60.
- García, A. L. (2017). Diseño de Herramienta Hidrológica como Apoyo a Los Sistemas De Alerta Temprana Ante Inundaciones. *Tesis Doctoral*, 186. <http://hdl.handle.net/20.500.11799/67762>
- García, K. L. P., & Mendivelso, O. A. G. (2017). *Diseño de un sistema de alertas tempranas para medición de caudales instantáneos en la cuenca alta y media del río Ila en el municipio de la vega – cundinamarca* (Vol. 53, Issue 4).

- Garrido Monagas, M., Gómez Crespo, M. R., & León Méndez, A. (2013). Sistema automatizado de alerta temprana ante el peligro de inundaciones TT - Automated system for early warning of potential flooding. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 34(3), 30–43.
- Gómez, R. (2003). *Funcionamiento De Ríos Y Arroyos*. 1–26.
- Gómez Vargas, E., Álvarez Pomar, L., & Obregón Neira, N. (2012). Predicción de caudales de ríos aplicando el modelo neurodifuso ANFIS y redes neuronales. *Sistemas, Cibernética e Informática*, 9(1), 28–35.
- Guía para la Implementación de Sistemas de alerta temprana*. (n.d.).
- Gutierrez, J. C., & Castaño, M. L. C. (2020). Evaluación del Sistema de Monitoreo y Alerta Temprana en la Cuenca Hidrográfica del Río las Ceibas. In *Tesis especializacion*.
- IDEAM. (2019). DHIME - Manual de Usuario Consulta y Descarga de datos hidrometeorológicos - IDEAM. *Manual*, 53.
- IDEAM, & PNUD. (2015). Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático. *3ra Comunicación Nacional de Cambio Climático.*, 15.
- http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022965/documento_nacional_regional.pdf
- INGEOMINAS. (2010). Cartografía geológica de las planchas 124, del departamento de Casanare y Arauca. *Documento*, 82.
- Jiménez, F. A. (2014). *DATOS DE HIDROLOGIA BASICA DEL CAUCE DEL CUERPO RECEPTOR DE DESFOGUES PLUVIALES*.
- Kang, J., Kayhanian, M., Stenstrom, M. K., Angeles, L., Engineering, W. R., & Avenue, O. S.

- (2006). Estimation of Time of Concentration for Three First Flush Highway Runoff Characterization. *Documento*, June 2006, 1–27.
- Lalanne, M., Pérez, E., & Schaaff, K. (2017). “Un servicio de alerta temprana ante desastres portable en cada bolsillo de Santo Domingo” ” Análisis de los Procesos del Sistema de Alerta Temprana ante Fenómenos Hidrometeorológicos en la República Dominicana. *Documento*, 1–33.
- Lopera, C. C. F., & Ramirez, C. A. S. (2012). Sistema de Alerta Temprana Centrado en la Población para la Cuenca Media del Río Otún Early Warning System Population Centered for the Middle Basin of Otún River . *Scientia et Technica*, 17(50), 211–217.
- Machuca, J. A. (2010). Propuesta de un sistema de alerta temprana para inundaciones en la cuenta del río Acahupa de el Salvador. In *Tesis de maestría*. Sancarlos de Guatemala.
- Mariaca, C., Trujillo, F., Rossi, L., & Mendoza, O. (2013). Una innovación informática y metodológica para fortalecer el Sistema Nacional de Alerta Temprana DEWETRA. *Documento*, 76. <http://www.fao.org/3/a-at488s.pdf>
- Marín, D., & Pineda, I. (2019). *Tesis : “ Modelo predictivo Machine Learning aplicado a análisis de datos Hidrometeorológicos para un SAT en Represas ” Ingeniero de Sistemas e Informática*.
- Maza, A. X. (2018). Integración de un sistema de alerta temprana mediante modelación hidrodinámica y predicción de flujos con redes neuronales. Caso de estudio: río Tomebamba. *Tesis Maestría*, 81.
- Núñez, M. E. (2005). Propuesta y Análisis de Modelos Matemáticos para la Estimación de

- Caudales Recesivos en la Cuenca del Río Loizntué, Estación Estero Upeo en Upeo, VII Región del Maule, Chile. *Tesis Pregrado*, 144.
- OEA. Irlanda. (2001). Manual para el Diseño e Implementación de un Sistema de Alerta Temprana de Inundaciones en Cuencas Menores. In *Manual* (p. 55).
- Paredes, N. P. R. (2011). Pronostico del Caudal Maximo del rio Hauara por Modelos Arima y Redes Neuronales. In *Tesis pregrado*. Escuela academico prefesional de ingenieria estadistica.
- PNUD. (2017). Encuesta a la Población sobre riesgo de inundación por intensas lluvias. In *Documento* (p. 28).
- Ramirez, D. P. L., & Rojas, D. fernando G. (2019). Determinación De La Cota De Inundación Del Río Arauca En La Vereda Barrancones, Municipio De Arauca Mediante Un Modelo Hidrodinamico. In *Tesis especializacion*.
- Reynoso, A. B. (2014). Modelos Matemáticos para la Estimación del “Capital Hídrico” en la Cuenca Internacional del Río de la Plata (Parte Boliviana): Enfoque Sistémico y Análisis Multivariado. In *Documento* (Vol. 5, Issue 2, p. 41).
- Román, J. S. S. (n.d.). *Hidrología Superficial (III): Relación Precipitación - Escorrentía* (Issue Iii, pp. 1–23).
- Sáenz Bajo, N., & Álvaro Ballesteros, M. (2002). Redes neuronales: concepto, aplicaciones y utilidad en medicina. *Atención Primaria*, 30(2), 119–120. [https://doi.org/10.1016/s0212-6567\(02\)78981-6](https://doi.org/10.1016/s0212-6567(02)78981-6)
- Saenz, G. M. (1999). Hidrologia en la ingenieria. In *Libro* (2nd ed.). Alfa y Omega.

- Sampieri, R. H., Collado, C. F., & Baptista, P. (2019). Metodología de la investigación. *Metodología de La Investigación*, 1, 105–112.
- Sandobal, L. M., Juarez, M. I., Manrique, O. B., Cervantes, A. M., Rocha, J. D. B., & Balla, Y. G. (2017). Modelos matemáticos para la estimación del caudal en vertederos Sutro utilizados en sistemas de riego. 26(1), 57–65.
- Stenta, H., Riccardi, G., Basile, P., & Trivisonno, F. (2014). Implementación de un modelo matemático distribuido de escurrimiento superficial en la cuenca del Río Tercero - Carcarañá. *Revista de Geología Aplicada a La Ingeniería y Al Ambiente*, 0(33), 33–41.
- Trujillo, V. cuellar. (2014). Zonificación De La Amenaza De Inundación Urbana En El Municipio De Arauca, Arauca En El Marco De La Revisión Y Ajuste De Planes De Ordenamiento Territorial. *Articulo*, 10.
- Unillanos. (2016). Estructura territorial de Arauca y su evolución desde la población. 532, 1–63.
- Vallejo, K. Z. (2013). Sistema Electrónico Inalámbrico De Alerta Temprana Y Monitoreo Del Comportamiento Del Nivel De Los Ríos De Bajo Costo. *Tesis Pregrado*, 117.
- Varela, E., & Campbells, E. (2011). Redes Neuronales Artificiales: Una Revisión del Estado del Arte, Aplicaciones y Tendencias Futuras. *Investigación y Desarrollo En TIC*, 2(1), 18–27.
<http://publicaciones.unisimonbolivar.edu.co/rdigital/innovacioning/index.php/identific/article/viewFile/21/29>
- Vargas, N. O., & Giraldo, M. V. (2018). Protocolo de Modelacion Hidrológica e Hidráulica. In *Minambiente Colombia*.
http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023833/Protocolo_Modelacion_HH.

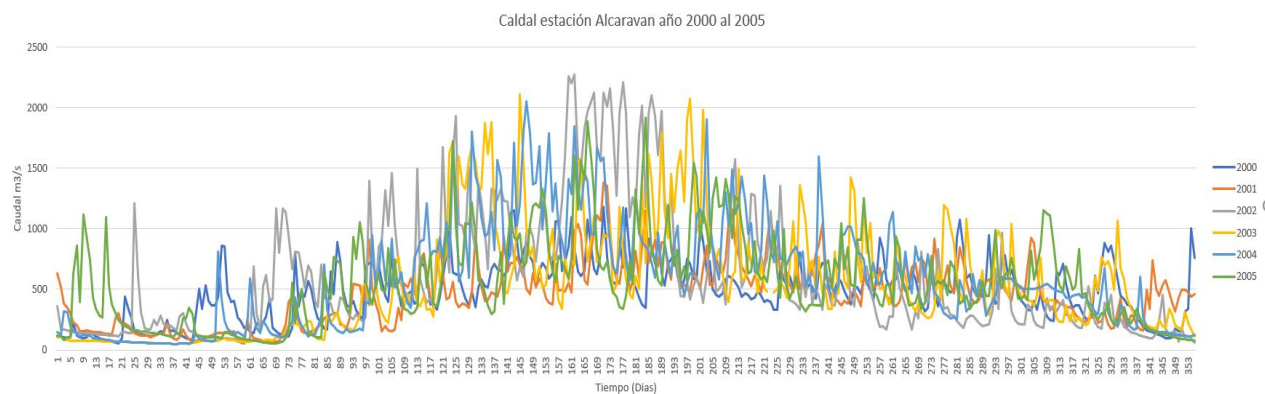
pdfc

Vélez, J. J., & Botero, A. (2011). Estimación del tiempo de concentración y tiempo de rezago en la cuenca experimental urbana de la quebrada San Luis, Manizales (Estimation of the time of concentration and the lag time at San Luis creek basin, Manizales). *Dyna*, 78(165), 58–71.

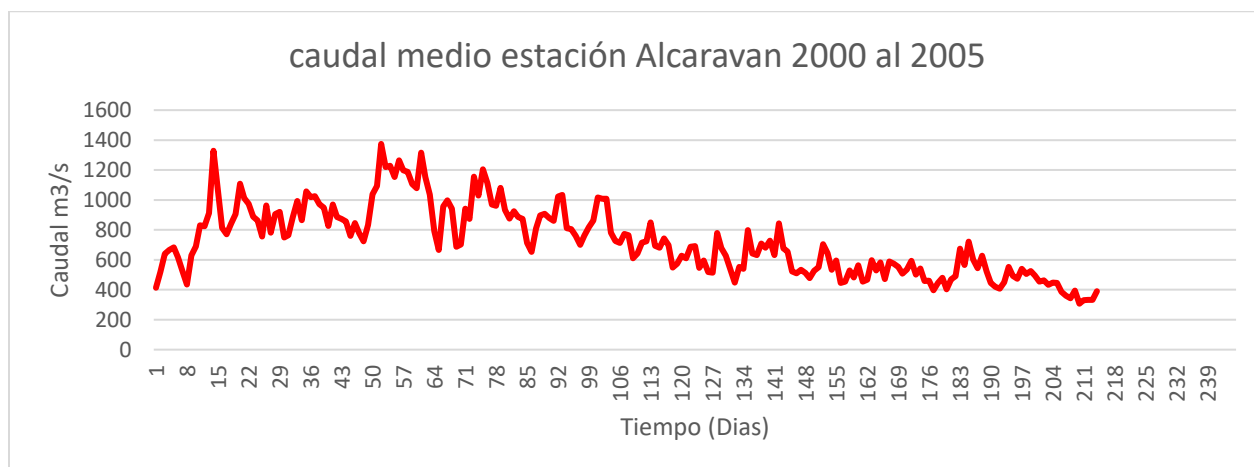
Vilca, R. L. (2017). Redes neuronales y lógica difusa aplicado a un sistema climatológico. *Tesis de Doctorado*, 96.

Villagran, J. C. (2001). Manual estimacion.pdf. In *Documento* (p. 7).

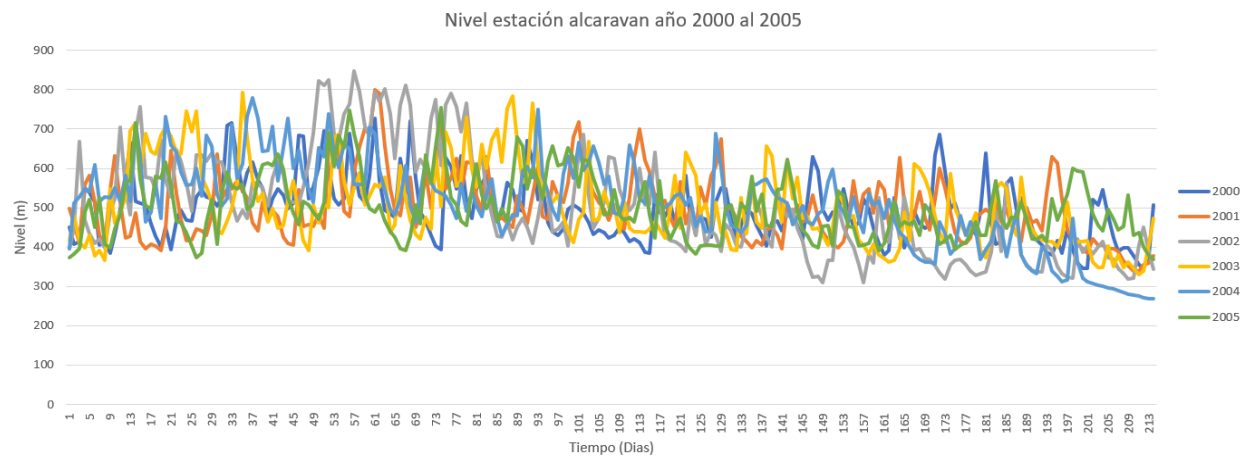
ANEXO 1



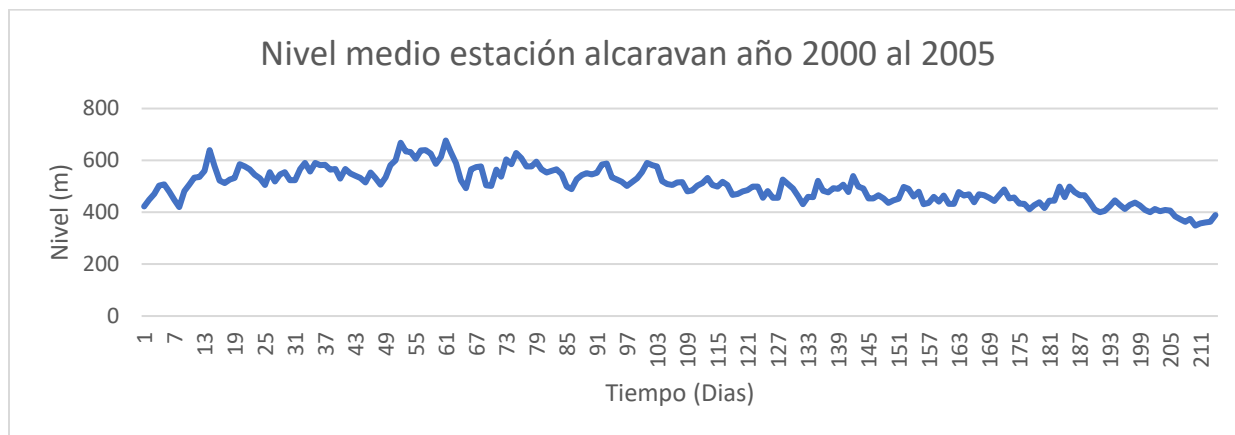
Relación de caudales de la estación Alcaraván en una ventana del tiempo del 2000 al 2005



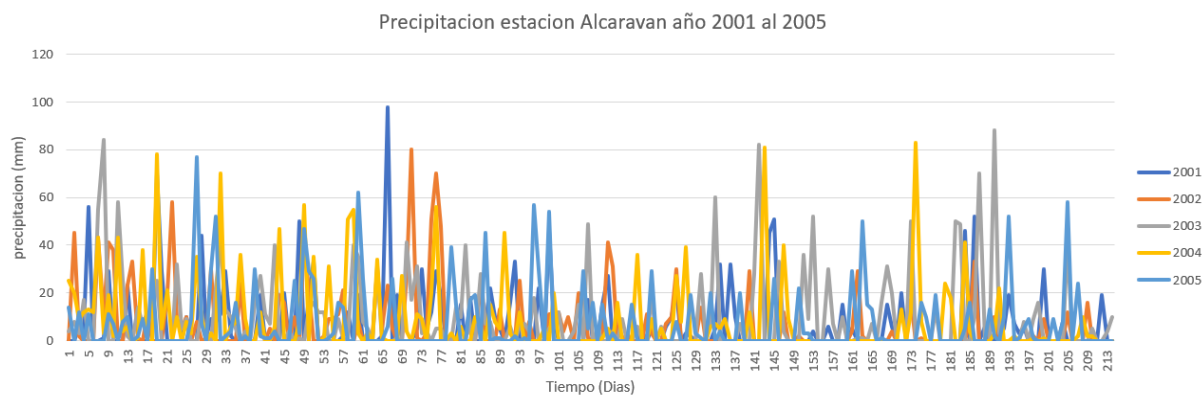
Relación de caudal medio de la estación Alcaraván en una ventana del tiempo del 2000 al 2005



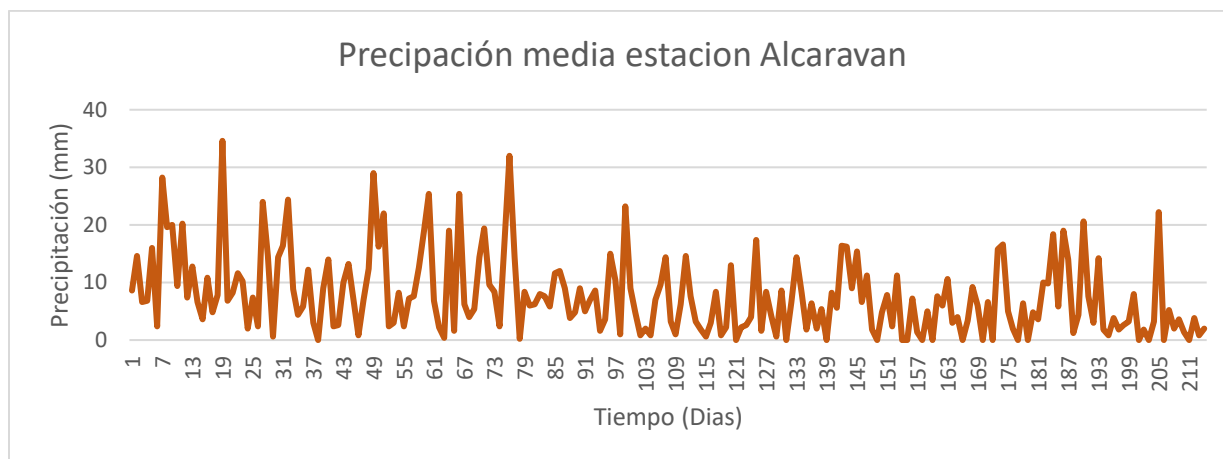
Relación de niveles de la estación Alcaraván en una ventana del tiempo del 2000 al 2005



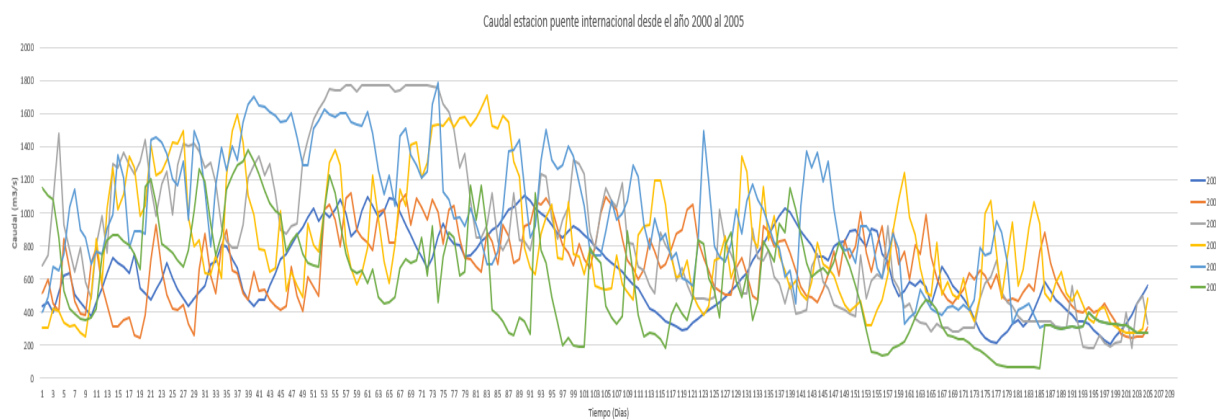
Relación de nivel medio de la estación Alcaraván en una ventana del tiempo del 2000 al 2005



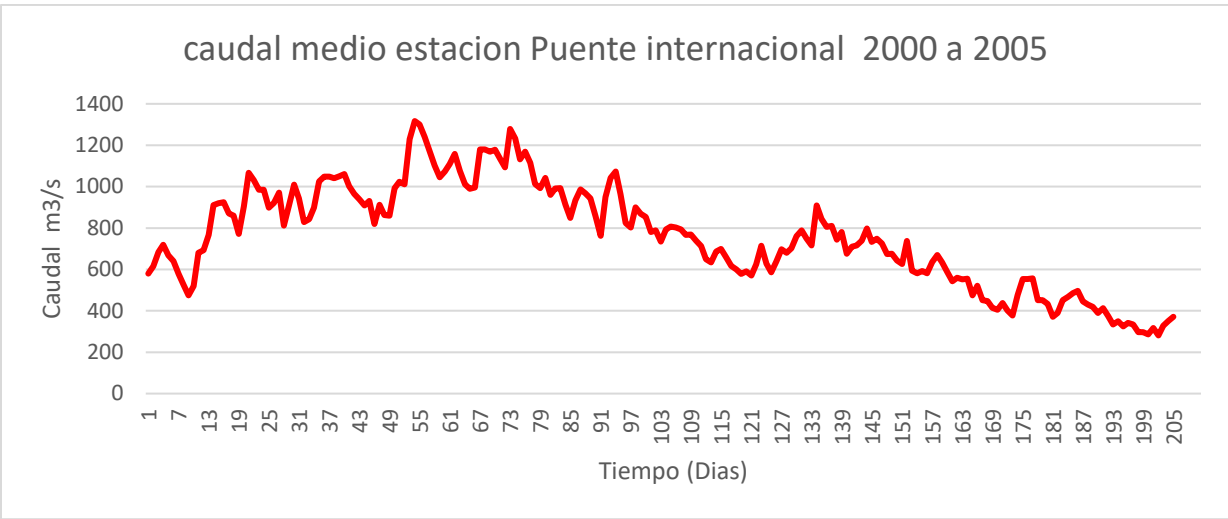
Relación de precipitación de la estación Alcaraván de Arauquita en una ventana del tiempo del 2001 al 2005



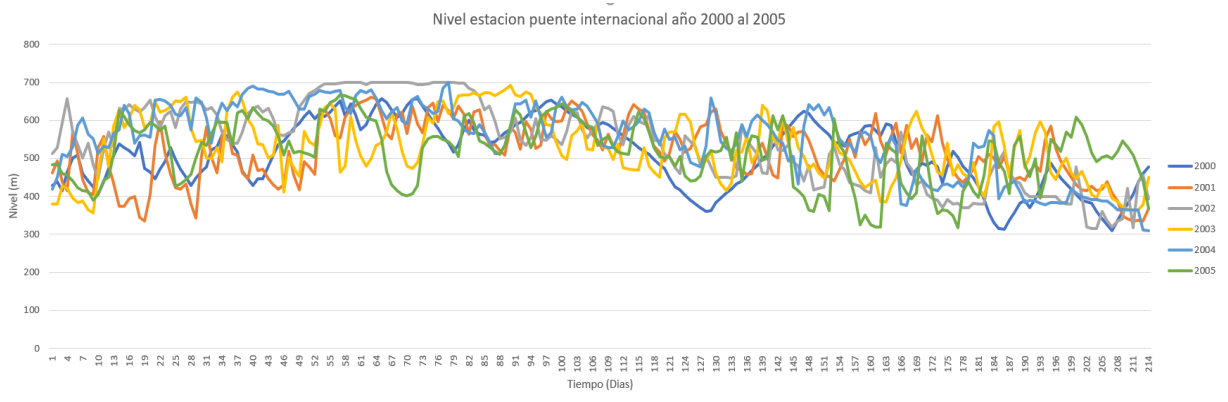
Precipitación media de la estación Alcaraván de Arauquita en una ventana del tiempo del 2001 al 2005



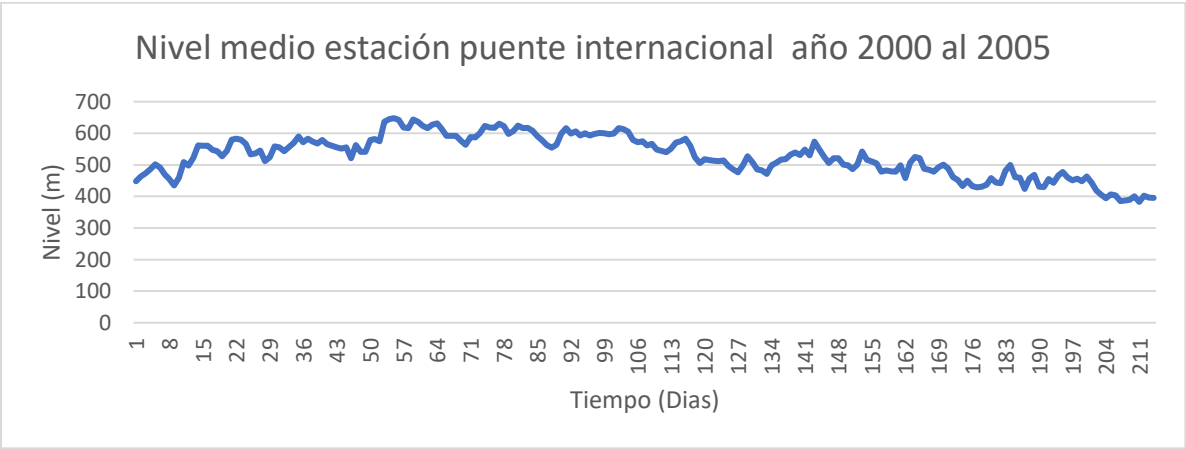
Relación de caudales de la estación Puente Internacional en una ventana del tiempo del 2000 al 2005



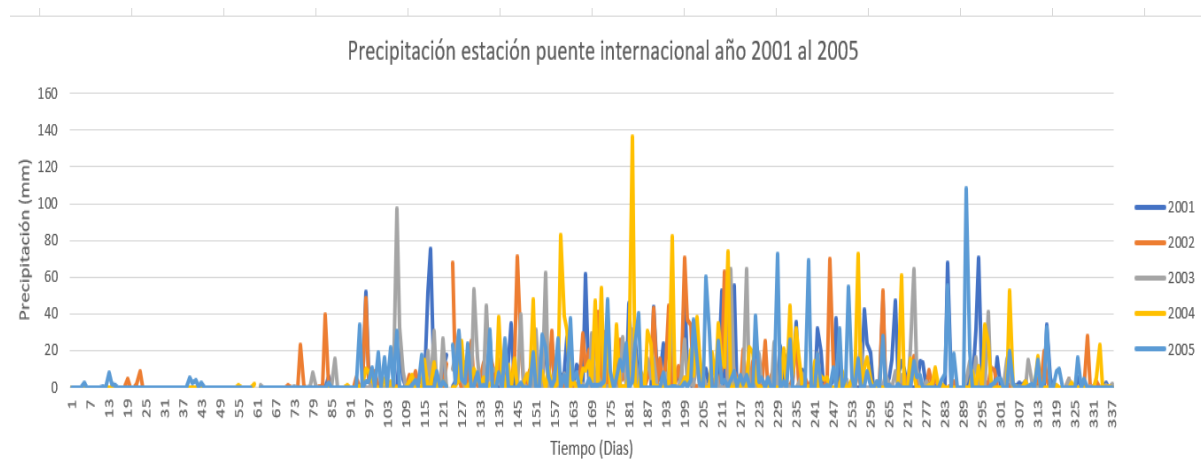
Caudal medio de la estación Puente Internacional en una ventana del tiempo del 2000 al 2005



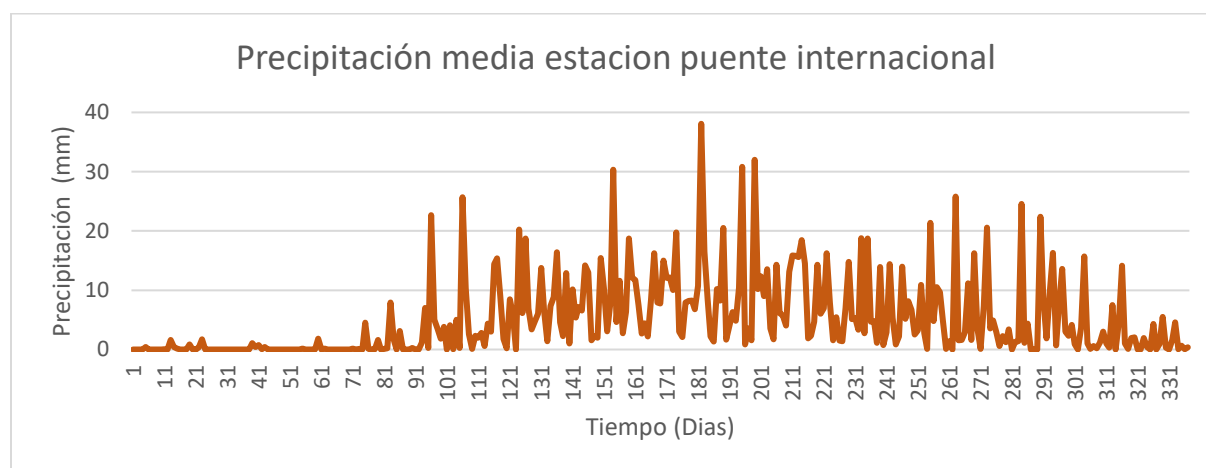
Relación de niveles de la estación Puente Internacional en una ventana del tiempo del 2000 al 2005



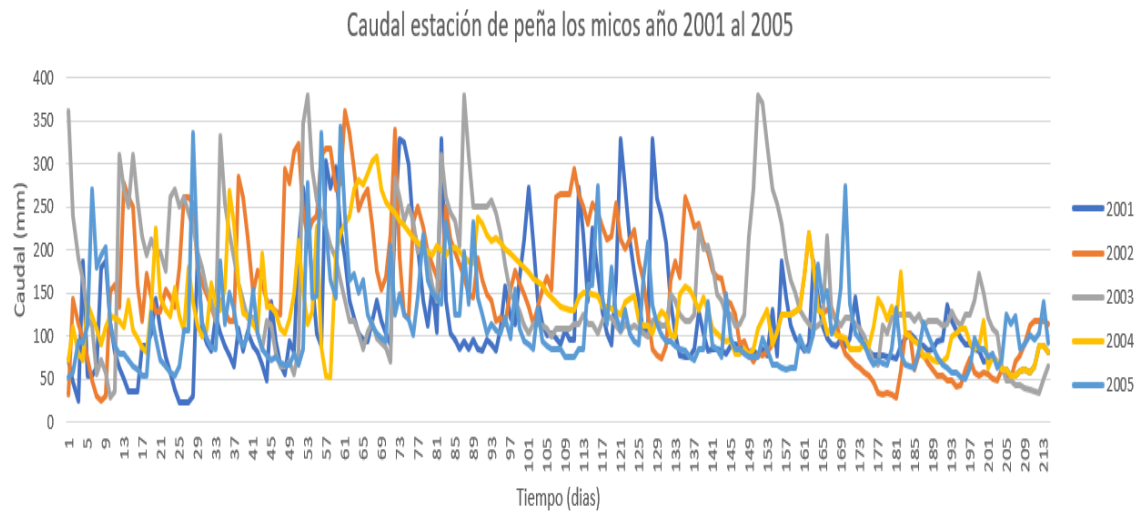
Nivel medio de la estación Puente Internacional en una ventana del tiempo del 2000 al 2005



Relación de precipitación de la estación Puente Internacional de Arauca en una ventana del tiempo del 2001 al 2005



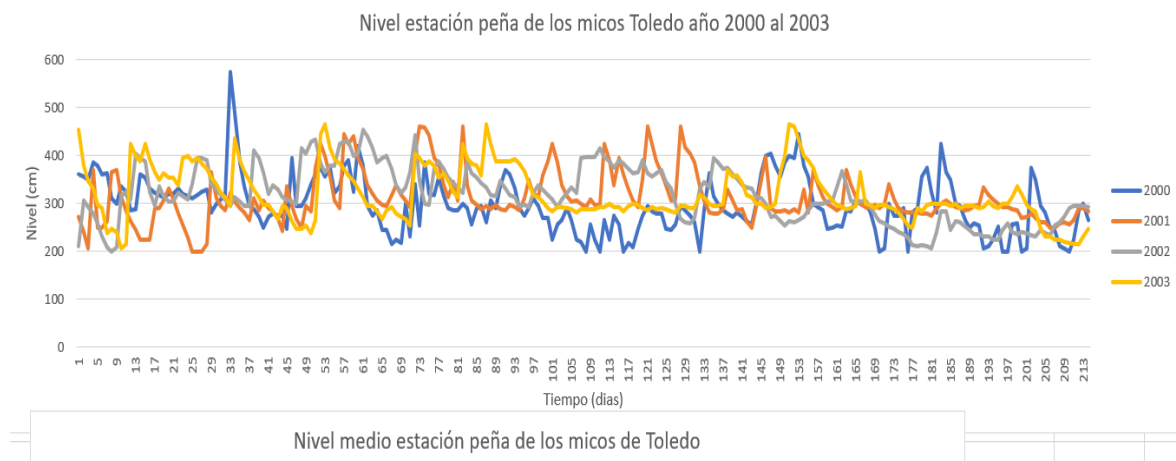
Relación de precipitación media de la estación Puente Internacional de Arauca en una ventana del tiempo del 01 al 2005



Relación caudal de la estación Peña de los Micos de Toledo en una ventana del tiempo del 2001 al 2005



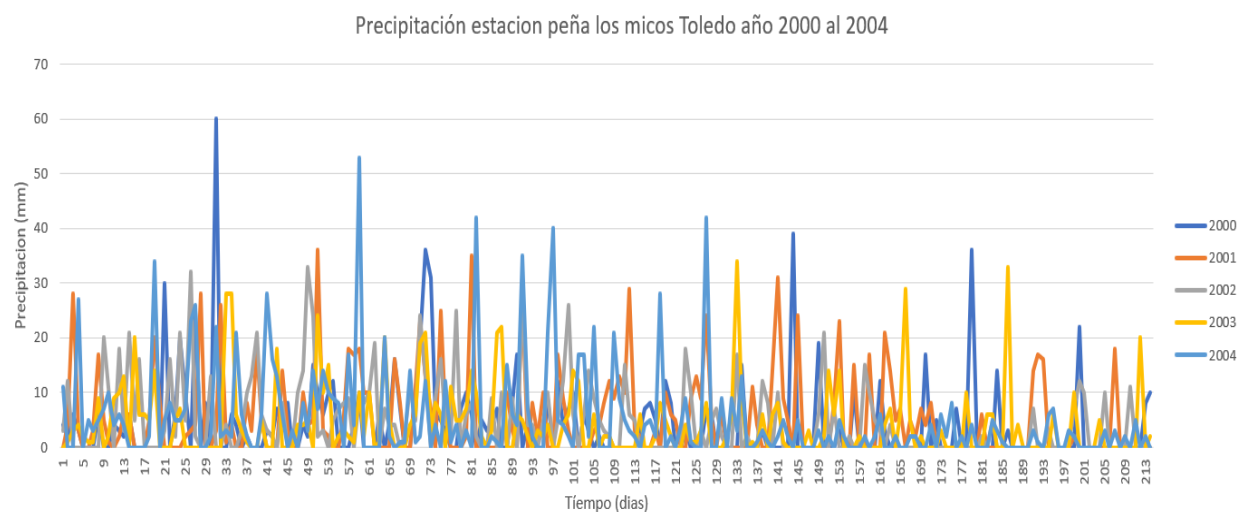
Caudal medio de la estación Peña de los Micos de Toledo en una ventana del tiempo del 2001 al 2005



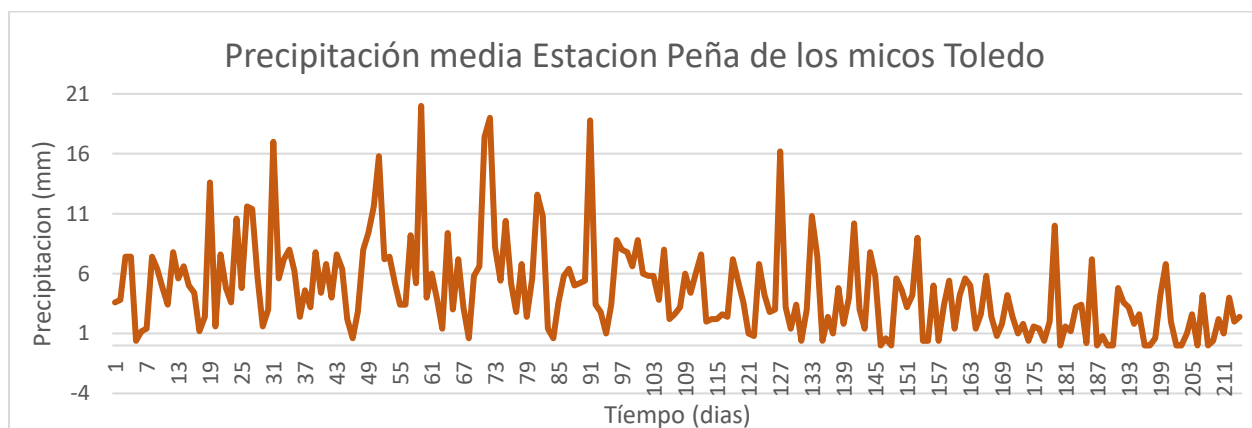
Relación nivel de la estación Peña de los Micos de Toledo en una ventana del tiempo del 2001 al 2005



Relación nivel medio de la estación Peña de los Micos de Toledo en una ventana del tiempo del 2001 al 2005



Relación de precipitación de la estación Peña de los Micos de Toledo en una ventana del tiempo del 2000 al 2003.



Relación precipitación media de la estación Peña de los Micos de Toledo en una ventana del tiempo del 2000 al 2003.

ANEXO 2

% ALGORITMO DE LA RED NEURONAL BACKPROPAGATION

% Carga de entrada de datos

NP = ENTpu_a; % Entrada de datos de nivel y precipitación

Q = NLpu_a; % Objetivo de datos Caudal

% Acomodamiento de filas de la red neuronal

NP=NP'; % Se aplica la transpuesta a la entrada nivel y precipitación

Q=Q'; % Se aplica la transpuesta a la Salida Caudal

% Devuelve el valor naturalizado y, Y los parámetros ps, ps deben llamarse en la desnormalización del resultado

[NP1,NPs] = mapminmax(NP);

[Q1,Qs] = mapminmax(Q);

% Determinar los datos de entrenamiento, datos de prueba, generalmente seleccionados al azar de la muestra 70% De datos como datos de entrenamiento

% 15% de los datos se utilizan como datos de prueba. Generalmente se utiliza la función dividendo. El método de uso general es el siguiente:

[trainSample.NP, valSample.NP, testSample.NP] = dividerand(NP,0.7,0.15,0.15);

[trainSample.Q, valSample.Q, testSample.Q] = dividerand(Q,0.7,0.15,0.15);

% tf es la función de transferencia de la red neuronal, el valor predeterminado es 'tansig' La función es la función de transferencia de la capa oculta,

FT1='tansig'; % La función tansig es la función de transferencia de la capa oculta

FT2='purelin'; % La función purelin es la función de transferencia de la capa de salida

% creación de red neuronal

net = newff(minmax(NP),[10,1],{FT1 FT2},'traingdm');

% De configuración de parámetros de red neuronal

```

net.trainFcn = 'trainlm'; % Algoritmo Levenberg-Marquardt, la convergencia más rápida

[net,tr] = train(net,trainsample.NP,trainsample.Q);

% Simulación de cálculo de normalización

[normtrainoutput, trainPerf] = sim (net, trainsample.NP, [ ], [ ], trainsample.Q); % datos de
entrenamiento, resultados obtenidos por BP

[normvalidateoutput, validatePerf] = sim (net, valsample.NP, [ ], [ ], valsample.Q); % datos
validados, el resultado obtenido por BP

[normtestoutput, testPerf] = sim (net, testsample.NP, [ ], [ ], testsample.Q); % datos de prueba, el
resultado obtenido por BP

% Desnormalizar los resultados obtenidos para obtener los datos ajustados

trainoutput = mapminmax('reverse',normtrainoutput,Qs);

validateoutput = mapminmax('reverse',normvalidateoutput,Qs);

testoutput = mapminmax('reverse',normtestoutput,Qs);

% Desnormalizar los datos de entrada normales para obtener su valor oficial

trainvalue = mapminmax('reverse', trainsample.Q, Qs); % de datos de verificación
normales

validatevalue = mapminmax('reverse', valsample.Q, Qs); %

% cálculo de error absoluto

errors=trainvalue-trainoutput;

% Presentación de la dinámica de ajuste

% figure, plotregression(trainvalue,trainoutput)
%
% % Presentación del error
%
figure, plot(1:length(errors),errors,'-b')

```

```
title('Gráfico de error')
```

```
% Dinámica de normalidad del error
```

```
figure, hist (errors); % histograma de frecuencia
```

```
figure, normplot (errors); % normalización del error
```

```
[muhat, sigmahat, mucu, sigmaci] = normfit (errors); % estimación del error por técnicas estadísticas
```

```
[h1, sig, ci] = ttest (errors, muhat); % prueba de hipótesis
```

```
figure, ploterrcorr (errors); % correlación de error
```

```
figure, parcorr (errors); % correlación parcial
```

```
% %Convertidor de la Red neuronal a Simulink
```

```
gensim(net,1)
```