

**IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO DE THOMAS PARA EL BALANCE HÍDRICO  
EMPLEANDO LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL HIDROSIG-JAVA**

**ALFONSO MIGUEL CORREA PIMIENTA  
CAMILO HERNÁN DÍAZ CASTAÑEDA**

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE CIVIL  
BOGOTÁ D.C.; JUNIO DE 2005**

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE CIVIL**



**TRABAJO DE GRADO**

**Presentado como requisito parcial para optar al título de INGENIERO CIVIL**

**IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO DE THOMAS PARA EL BALANCE HÍDRICO  
EMPLEANDO LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL HIDROSIG-JAVA**

**DIRECTOR. ING. NELSON OBREGÓN NEIRA**

**AUTORES:**

**ALFONSO MIGUEL CORREA PIMIENTA  
CAMILO HERNÁN DÍAZ CASTAÑEDA**

**BOGOTÁ D.C.; JUNIO DE 2005**

**REGLAMENTO DE LA  
PONTIFICIA UNIVERSIDAD  
JAVERIANA. Ar t 23.**

"La Universidad no se hace responsable por los conceptos emitidos por sus alumnos en sus trabajos de tesis. Solo velará por que no se publique nada contrario al dogma y a la moral católica y por que las tesis no contengan ataques personales contra persona alguna, antes bien se vea en ellas el anhelo de buscar la verdad y la justicia".  
Resolución No13 de julio de 1946:

## FORMATO DE DESCRIPCIÓN DE LA TESIS

➤ AUTOR O AUTORES

Apellidos CORREA PIMIENTA Nombres ALFONSO MIGUEL  
Apellidos DÍAZ CASTAÑEDA Nombres CAMILO HERNÁN

➤ TÍTULO: "IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO DE THOMAS PARA EL BALANCE HÍDRICO EMPLEANDO LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL HIDROSIG JAVA",

➤ CIUDAD Bogotá AÑO DE ELABORACIÓN 2005

➤ NÚMERO DE PÁGINAS 175

➤ TIPO DE ILUSTRACIONES: Gráficas, tablas, esquemas.

➤ MATERIAL ANEXO: Gráficas, archivos con memorias de cálculo.

➤ FACULTAD Ingeniería PROGRAMA Civil

➤ TÍTULO OBTENIDO Ingeniero Civil

➤ MENCIÓN (en caso de recibir alguna calificación especial)

➤ DESCRIPTORES (palabras claves que utilizará la Biblioteca para clasificar los temas que trata la Tesis)

Modelo de Thomas

HidroSIG-Java

Balance Hídrico

Cuencas Hidrográficas

Optimización Matemática

Simulación de caudales

Bogotá, Junio 16 2005

Señores

BIBLIOTECA GENERAL

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA

Ciudad

Estimados Señores:

Autorizamos a los usuarios interesados, consultar y reproducir (parcial o totalmente) el contenido del trabajo de grado titulado **“IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO DE THOMAS PARA EL BALANCE HÍDRICO EMPLEANDO LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL HIDROSIG-JAVA”**, presentado por las estudiantes Camilo Hernán Díaz Castañeda y Alfonso Miguel Correa Pimienta, como requisito para optar el título de Ingeniero Civil, en el año 2005, siempre que mediante la correspondiente cita bibliográfica se le dé crédito al trabajo de grado y a su autor.

**ALFONSO MIGUEL CORREA PIMIENTA**  
**CC. 7633306**

**CAMILO HERNÁN DÍAZ CASTAÑEDA**  
**CC. 80244715**

**A nuestros padres  
Álvaro, Paulina,  
José y Rocío  
Y a quienes nos  
Apoyaron en la  
Realización  
De éste trabajo de  
Grado.**

**A Ferney, Álvaro José  
Y Rosa Margarita por  
Ser además de hermanos,  
Amigos.**

## **AGRADECIMIENTOS**

De manera franca un agradecimiento sincero a los ingenieros Nelson Obregón Neira y Wilson Rodríguez, docentes de la Pontificia Universidad Javeriana por su inmensa e incansable colaboración y apoyo durante la realización de este trabajo de grado. Igualmente se agradece a Felipe Quintero Duque ingeniero civil de la Universidad Nacional de Medellín por brindarnos un soporte incondicional.

## TABLA DE CONTENIDO

|  | Pág. |
|--|------|
| INTRODUCCIÓN .....   | 16   |
| CAPÍTULO I .....   | 20   |
| HIDROSIG .....   | 20   |
| 1.1 EVOLUCIÓN DE HIDRSIG-JAVA .....  | 20   |
| 1.2 REQUERIMIENTOS DE INSTALACIÓN.....   | 21   |
| 1.3 MANEJO DE LA BASE DE DATOS .....   | 22   |
| 1.3.1 CONFIGURACIÓN DE LA BASE DE DATOS .....  | 22   |
| 1.4 COMANDOS .....   | 23   |
| 1.4.1 DESPLIEGUE DE MAPAS.....   | 23   |
| 1.4.2 IMPORTACIÓN Y EXPORTACIÓN DE ARCHIVOS .....  | 27   |
| 1.4.3 HERRAMIENTAS GENERALES DE VISUALIZACIÓN DE MAPAS .....   | 29   |
| CAPÍTULO II.....   | 37   |
| MODELO DE THOMAS .....   | 37   |
| 2.1 MODELOS DE BALANCE HÍDRICO .....   | 37   |
| 2.1.1 MODELO T .....   | 38   |
| 2.1.2 MODELO P .....   | 40   |
| 2.2 MODELO DE THOMAS (abcd) .....  | 40   |
| 2.2.1 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO TE THOMAS POR EL PROBLEMA DIRECTO. ....                              | 44   |
| 2.2.2 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO TE THOMAS POR EL PROBLEMA INVERSO. ....                              | 45   |
| 2.3 REQUERIMIENTOS DE INFORMACIÓN PARA EL EMPLEO DEL MODELO DE THOMAS .....                          | 49   |
| 2.3.1 PRECIPITACIÓN.....   | 49   |
| 2.3.2 EVAPORACIÓN Y EVAPOTRANSPIRACIÓN .....   | 49   |
| 2.4 METODOS DE CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL (ETP). ....                                | 50   |
| 2.4.1 MÉTODO DE THORNTHWAITE .....   | 50   |
| 2.4.2 MÉTODO DE PENMAN.....  | 51   |
| 2.4.3 METODO DE TURC.....  | 53   |
| CAPÍTULO III.....  | 55   |
| IDENTIFICACIÓN DE ZONAS EN COLOMBIA PARA IMPLEMENTAR EL MODELO DE THOMAS EN FUNCIÓN DE HIDROSIG..... | 55   |
| 3.1 SELECCIÓN DE LAS CUENCAS A ESTUDIO EN FUNCIÓN DE HIDROSIG .....                                  | 55   |
| 3.2 EXTRACCIÓN DE DATOS DE LAS ESTACIONES .....  | 58   |
| 3.3 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN DE LOS PARÁMETROS PARA LA APLICACIÓN DEL MODELO DE TOMAS .....        | 62   |
| CAPITULO IV .....  | 64   |
| RESULTADOS DE LA CALIBRACION Y VALIDACION DEL MODELO DE THOMAS EN FUNCION DE HIDROSIG .....          | 64   |
| 4.1 ANALISIS ESTADISTICO DE LOS RESULTADOS.....  | 65   |
| 4.2 ANALISIS HIDROLOGICO DE RESULTADOS.....  | 68   |
| 4.2.1 CUENCAS ENTRE 0 Y 10% DE ERROR.....  | 69   |
| 4.2.2 CUENCAS ENTRE 10% – 20% .....  | 70   |
| 4.2.3 CUENCAS ENTRE 20% - 30% .....  | 70   |
| 4.2.4 CUENCAS DE MÁS DE 30% .....  | 71   |
| 4.3 INFLUENCIA DE LA UBICACIÓN GEOGRÁFICA FRENTE AL ERROR OBTENIDO.....                              | 71   |



|  |    |
|--|----|
| 4.4 ANÁLISIS DE LAS VARIABLES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO Y QUE<br>AUMENTAN LA INCERTIDUMBRE Y EL ERROR. .... | 72 |
| CAPITULO V .....   | 76 |
| CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....  | 76 |
| BIBLIOGRAFÍA .....   | 79 |
| ANEXOS .....   | 80 |

## LISTA DE TABLAS

|   | Pág. |
|---|------|
| Tabla No.0. Nace, Encuesta Geológica de los Estados Unidos, 1967 y El Ciclo Hidrológico (Panfleto), U.S. Geological Survey, 1984..... | 16   |
| Tabla No.2.1. Requerimientos de información.....  | 54   |
| Tabla No.3.1. Cuencas en estudio.....   | 58   |
| Tabla 4.1 Resumen resultados obtenidos para el total de cuencas en estudio relacionado con el % de error.....                         | 66   |
| Tabla 4.2 Medidas de localización y dispersión de los resultados.....   | 66   |
| Tabla 4.3 Distribución de frecuencia para los resultados obtenidos.....   | 67   |
| Tabla 4.4. Criterio de validación o rechazo de la implementación del modelo.....  | 68   |
| Tabla 4.5. Cuencas entre el 0 -10% de error.....  | 69   |
| Tabla 4.6. Características cuencas a analizar.....  | 69   |
| Tabla 4.7. Parámetros del modelo de Thomas obtenidos para las analizadas.....   | 70   |
| Tabla 4.8. Cuencas entre el 10 -20% de error.....   | 70   |
| Tabla 4.9 Cuencas entre el 20 -30% de error.....  | 71   |
| Tabla 4.10 Cuencas con mas del 30% de error.....  | 71   |

## LISTA DE FIGURAS O GRÁFICOS

|   | Pág. |
|---|------|
| Figura No.1.1. Configuración de Base de Datos.....  | 23   |
| Figura No.1.2. Componentes de la ventana principal.....   | 23   |
| Figura No.1.3. Menú abrir mapa y acceso directo a abrir un MDT desde Base de Datos.....               | 24   |
| Figura No.1.4. Ventana que permite abrir MDT, VHC y los otros objetos de la Base de Datos..           | 24   |
| Figura No.1.5. Menú abrir mapa y acceso directo a abrir un MDT desde Disco.....                       | 25   |
| Figura No1.6. Mapas asociados a un MDT: (a) Si no ha sido procesado; (b) Si ha sido<br>procesado..... | 26   |
| Figura No.1.7. Sub-ventana de selección de variable hidrológica.....                                  | 26   |
| Figura No.1.8. Visualización de un mapa.....  | 29   |
| Figura No.1.9. Propiedades de un mapa.....  | 30   |
| Figura No.1.10. Visualización en 3D de un MDT.....  | 31   |
| Figura No.1.11. Calculadora de Mapas.....   | 34   |
| Figura No.1.12. Ventana para la ubicación de estaciones.....  | 36   |
| Figura No.2.1. Aproximación conceptual al modelo de Thomas.....                                       | 41   |
| Figura No.2.2. Movimientos de la AMOEBA.....  | 47   |
| Grafico 3.1. Parámetros de selección de cuencas.....  | 56   |
| Gráfico No.4.1. Resultados de calibración e implementación del modelo de Thomas.....                  | 66   |
| Gráfico No.4.2. Distribución de frecuencia para los resultados.....                                   | 68   |

## LISTA DE ANEXOS

|  | Pág. |
|--|------|
| ANEXO 1. Archivo selección de cuencas.....   | 78   |
| ANEXO 2. Archivo validación y resultados de la implementación del modelo de Thomas para las 95 cuencas. .... | 78   |
| ANEXO 3. Comparación gráfica entre Qmedido y Qsimulado para las 95 cuencas. ....                             | 78   |
| .....  | 81   |

## INTRODUCCIÓN

El agua es el elemento fundamental para el desarrollo de la vida. A través de la historia del hombre el agua ha tenido un papel de gran importancia, no solo como elemento vital, sino también como factor determinante en el desarrollo cultural, tecnológico e industrial de los grandes imperios y civilizaciones.

El planeta tierra esta constituido en un 70,8 % por agua. Ésta esta distribuida de la siguiente manera:

| <b>Origen del agua</b>    | <b>Volumen del agua en kilómetros cúbicos</b> | <b>Por ciento de agua total</b> |
|---------------------------|---|---------------------------------|
| Océanos                   | 1,321,000,000                                 | 97.24%                          |
| Capas de hielo, Glaciares | 29,200,000                                    | 2.14%                           |
| Agua subterránea          | 8,340,000                                     | 0.61%                           |
| Lagos de agua dulce       | 125,000                                       | 0.009%                          |
| Mares tierra adentro      | 104,000                                       | 0.008%                          |
| Humedad de la tierra      | 66,700  | 0.005%                          |
| Atmósfera                 | 12,900  | 0.001%                          |
| Ríos                      | 1,250   | 0.0001%                         |
| Volumen total de agua     | 1,360,000,000                                 | 100%                            |

**Tabla No.0. Nace, Encuesta Geológica de los Estados Unidos, 1967 y El Ciclo Hidrológico (Panfleto), U.S. Geological Survey, 1984.**

Teniendo en cuenta la importancia, por su cantidad y utilidad, es necesario dar un manejo adecuado al agua, y estudiar su comportamiento en la naturaleza e influencia de acuerdo a su estado en el desarrollo de la vida.

Aparecen entonces las ciencias hídricas, estudiando la distribución, circulación y participación del agua en las diferentes formas de vida.

La Hidrología se puede definir como la ciencia que estudia la existencia del agua en la tierra, en sus diferentes estados y procesos, es decir, el estudio del ciclo hidrológico.

Los recursos hídricos presentan características que los hacen especiales y que dificultan su estudio, uso y aprovechamiento, y en los cuales la Hidrología juega un papel fundamental para su estudio y análisis. Entre éstos se pueden destacar:

- ✓ Son elementos vitales y escasos, por lo cual son claves que pueden facilitar o restringir el desarrollo de una sociedad.
- ✓ Están sujetos a probabilidad de ocurrencia, su valor no es constante y su predicción es muy complicada e imprecisa. Su valor varía en el espacio y en el tiempo.
- ✓ Se presentan en diferentes formas, se encuentran en diversos estados y lugares y mantienen su unidad a través del ciclo hidrológico.
- ✓ Su valor esta ligado a su ubicación, se encuentran en diversos lugares y estados, en diferentes condiciones ambientales y geográficas que pueden variar su comportamiento.
- ✓ Su utilización es múltiple, el agua es necesaria para diferentes usuarios en el desarrollo de las actividades diarias. Se deben analizar los usos de carácter prioritario a la hora de explotar este recurso.

El uso de este recurso debe ser planificado, racional y debe ser económicamente viable, analizando los beneficios que se obtienen contra los costos que acarrear un proyecto hidráulico. Una correcta planificación del uso de los recursos hídricos incluye un aspecto fundamental, el desarrollo integrado de las cuencas, el cual consiste en el manejo ordenado de los recursos hídricos de cuencas, en aprovechamientos de propósitos múltiples, para promover el bienestar humano.

En este caso la unidad de planeamiento es la cuenca y con el uso múltiple del agua se propone optimizar su aprovechamiento.

Este aprovechamiento múltiple reconoce que el agua posee un gran número de usuarios y consumidores potenciales por lo cual cualquier proyecto de esta naturaleza debe buscar el suministro a diferentes sectores de la economía y facilitar su utilización.

Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado es de vital importancia conocer las variables que intervienen en el comportamiento de los recursos hídricos, para de esta forma implementar modelos que permitan realizar estudios para optimizar el uso del recurso y aumentar la precisión

en las predicciones de comportamiento de las cuencas en los proyectos de aprovechamiento y explotación del recurso hídrico.

En un país como Colombia, donde existen gran cantidad y variedad de recursos hídricos, su estudio necesita de la recolección y procesamiento de un sin número de datos. A la hora de realizar un estudio de factibilidad de un proyecto es necesario realizar un análisis completo de la cuenca y de las diferentes variables que afectan su comportamiento hídrico e hidrológico. El paso a seguir es implementar un modelo que se ajuste a las características de la cuenca y que represente el comportamiento de ésta; sin embargo los modelos existentes no se ajustan en todos los casos con la precisión requerida por lo cual es necesario analizar varios de estos y seleccionar el de mayor ajuste.

Este procedimiento suele ser un trabajo largo y dispendioso, que implica gran inversión de tiempo y trabajo.

Actualmente se desarrolló un paquete computacional en la Universidad Nacional de Medellín por el Postgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, que contiene los datos de las cuencas hidrológicas Colombianas recopilados en las diferentes estaciones de medición a lo largo del país por parte del IDEAM; Sin embargo el uso de esta herramienta es limitado para un cierto grupo de profesionales que la conocen y dominan.

Las fuentes superficiales del recurso hídrico se encuentran todavía en una fase de exploración. Para lograr el aprovechamiento de los acuíferos y aguas superficiales, deben tenerse muchos datos que permitan establecer dónde están las áreas y fases de recarga y cual es su porcentaje con respecto a la precipitación. Lo anterior se ha intentado establecer a través de muchos modelos de simulación continua en los Estados Unidos, sin embargo en Colombia han tenido poco éxito debido en parte a la escasez de estaciones de aforo y calidad de los datos de caudales y a la muy reducida utilización de métodos tradicionales relacionados con la parametrización física de la cuenca.

Para la realización de un estudio hidrológico de balance hídrico se debe conocer todo lo relacionado con el déficit de humedad para tener un buen entendimiento de la factibilidad de irrigación, representado en la cantidad de agua que puede llegar a necesitarse en una

determinada época del año, así como contar con toda la información sobre los posibles excedentes de agua ocasionados en gran parte por las precipitaciones.

Al momento de presentarse precipitaciones ya sea en forma de lluvia, granizo o nieve, estas aguas se recogen en una cuenca y llevan su curso hacia el río. Las cuencas pueden estar separadas una de la otra por zonas más altas que delimitan la cuenca, llamadas divisorias de agua. Además, son zonas muy frágiles que deben tener un especial cuidado para que se conserven sus suelos y el agua de los ríos limpia.

En Colombia la Universidad de Medellín desarrollo un sistema de información geográfica llamado HidroSIG-JAVA el cual permite un análisis de las diferentes variables hidrológicas. Además, cuenta con una gran Base de Datos con información de todas las zonas del territorio Colombiano. Este paquete computacional brinda a los usuarios diversas herramientas para la manipulación de mapas topográficos y de variables hidrológicas como precipitación, evaporación entre otras para facilitar un estudio de balance hídrico. HidroSIG desde su lanzamiento ha sufrido muchas variaciones con el objetivo de mejorar sus aplicaciones y brindar a sus usuarios más facilidades para su uso.

Con el fin de realizar el mejor aprovechamiento de los acuíferos a nivel mundial, se han desarrollado modelos de simulación continua algunos con mucho éxito y otros no tanto. El modelo que se considera más realista para realizar dicha simulación es el modelo e Thomas debido a que aun el suelo no presente su máxima capacidad de almacenamiento en términos de húmedas, permite excedentes hídricos. Este modelo de Thomas no ha sido muy aplicado acá en Colombia pero en los países donde se ha desarrollado de manera importante ha permitido obtener resultados muy precisos que han ayudado al estudio hidrológico.



## CAPÍTULO I

### HIDROSIG<sup>1</sup>

A continuación se presentará una introducción a la herramienta computacional HidroSIG-Java desarrollado por el Postgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos de la Universidad Nacional de Medellín.

Esta herramienta presenta diferentes comandos para la obtención de datos y la realización de diversas operaciones dentro del mismo de una manera bastante clara y que gracias a su manual se hace de fácil entendimiento. Así como desde su distribución al público ha sufrido diversos cambios en busca de una mejora constante para los usuarios y una optimización de los procesos internos.

Además, HidroSIG-Java ofrece diversas aplicaciones para diferentes estudios brindándoles a los usuarios unas herramientas muy fuertes e importantes al momento de realizar un determinado estudio.

#### 1.1 EVOLUCIÓN DE HIDRSIG-JAVA

“Es en general, un Sistema de Información Geográfica con herramientas especiales que permiten realizar estimaciones y análisis de variables hidrológicas, climáticas y geomorfológicos”.<sup>2</sup>

HidroSIG-Java empezó en el año 1997 con una primera versión, la cual fue desarrollada en el lenguaje de programación IDL (Interface Definition Language) por sus siglas en ingles, el cual tiene como objetivo definir las interfaces para acceder y operar sobre objetos. Esta versión presentó un problema y es que para que pudiera funcionar era indispensable tener instalado IDL en el computador, siendo esa licencia muy costosa. Posteriormente, para el año 2000 se consiguió el patrocinio de la UPME (Unidad de Planeación Minero Energética), se comenzó a desarrollar una versión en lenguaje Java, que presenta la facilidad y ventaja que es gratuito y de libre distribución, creando así la versión HidroSIG-JAVA 1.8.

---

<sup>1</sup> HidroSig, Versión 3.0 Beta. Manual de usuario. Páginas 109. Medellín, 2003

<sup>2</sup> <http://cancerbero.unalmed.edu.co>

Para finales del año 2003, en el mes de diciembre se lanzó la versión 3.0 beta la cual contenía algunas mejoras, entre la más importante se incorporo un manejo de base de datos MySQL, que es un motor altamente eficiente de bases de datos que permite acceso vía red a toda la información.

Al año siguiente, para enero de 2004 se libero la última versión HidroSIG-Java 3.1.0 beta a la cual se le implementó una interfaz que permite la modificación del intervalo entre isolineas bajo el menú Configuración. Además, se le arreglaron algunas características con relación a la versión anterior como la opción en multilinguaje a la interfaz de abrir VHC, al menú de vectoriales y a la calculadora de mapas. Así como que la paleta de colores se desconectaba del mapa al pasar de 2D a 3D y viceversa, y las isolineas no se apagaban correctamente dejando el mapa en blanco.

## **1.2 REQUERIMIENTOS DE INSTALACIÓN**

Como todo programa computacional, HidroSIG-Java requiere un mínimo de características del computador para que funcione de manera eficaz al momento de ser ejecutado.

El computador donde va hacer instalado Hidrosig-Java debe contar con un procesador Pentium de 500MHz, 128Mb de memoria RAM, 800Mb de espacio en disco para la base de datos y 70Mb para el programa.

HidroSIG presenta una arquitectura cliente-servidor en el proceso de instalación brindando la opción de instalar solo el software o instalarlo conjuntamente con el servidor de Base de Datos. Lo que se espera es que el programa se utilice en un entorno de red donde se tiene un servidor de Bases de Datos y muchos clientes que poseen solo el software pero acceden a la Base de Datos localizada en el servidor. Pero para aquellos usuarios que decidan instalar HidroSIG conjuntamente con la base de datos no les será necesario trabajar en red ya que contarían internamente en su computador con la Base de Datos para el manejo de la información.

Para instalar HidroSIG ya sea que se obtenga en CD o se baje desde Internet, se debe ejecutar el archivo Instalar.exe, y el programa lo guiará por todo el proceso de instalación.

Se debe leer la licencia del programa y si se está de acuerdo se da la opción de *Acepto los términos del acuerdo de licencia* para luego hacer clic en *Siguiente*. Se debe seleccionar la

carpeta donde se desea instalar HidroSIG, sino por defecto lo instala en el disco local C:\HidroSIG tardando aproximadamente 2 minutos, dependiendo del computador y de la Base de datos que se instale.

En el caso de que se instale la Base de Datos, se debe seleccionar el directorio donde se desea que se realice la instalación. Si es usuario de Windows, le instalará el motor de Bases de Datos y la Base de Datos de HidroSIG. De lo contrario sólo se copiará la Base de Datos de HidroSIG, por lo cual se deberá seleccionar la carpeta donde se encuentran las Bases de Datos de MySQL.

### **1.3 MANEJO DE LA BASE DE DATOS**

En la Base de Datos de HidroSIG la cual está montada en MySQL, se encuentra toda la información relacionada con los datos de las distintas regiones de Colombia y otras zonas que son fruto de proyectos donde se genera mucha información de un tipo más local. HidroSIG cuenta para cada región de Colombia con Modelos Digitales de Terreno (MDT), Mapas de Variables Hidrológicas (VCH), archivos vectoriales, estaciones hidroclimatológicas y sitios del usuario.

Al momento de consultar cualquier tipo de información, se debe tener primeramente configurada la Base de Datos en HidroSIG debido a que si no se realiza el programa solo permitirá funcionar sobre archivos en disco solamente.

#### **1.3.1 CONFIGURACIÓN DE LA BASE DE DATOS**

Cuando se va configurar la Base de Datos a la que HidroSIG accede para realizar su búsqueda de información y luego de tener el servidor MySQL y la Base de Datos instalada se utiliza la opción HidroSIG: Configuración->Configuración de BD, la cual desplegará la ventana de dialogo que permitirá ingresar la información del servidor con la Base de Datos, como se puede apreciar en la Figura No.1.

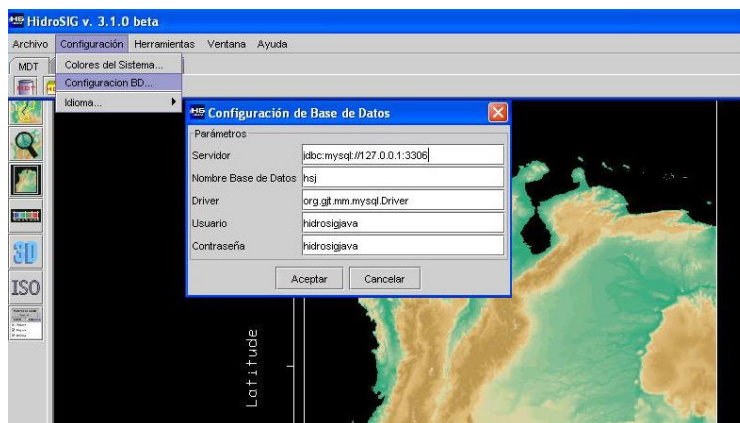


Figura No.1.1. Configuración de Base de Datos.

## 1.4 COMANDOS

HidroSIG-Java cuenta con una ventana principal donde muestra y permite el acceso a las herramientas globales así como vías rápidas a los elementos en la Base de Datos, como se muestra en la Figura No.2.

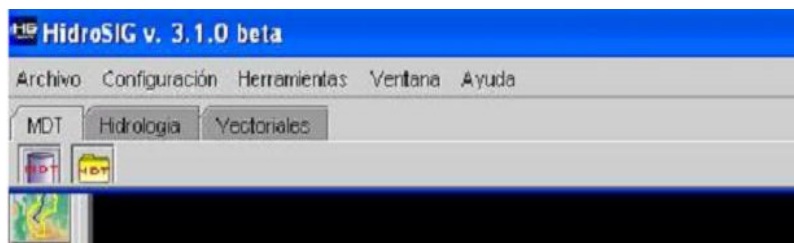


Figura No.1.2. Componentes de la ventana principal.

### 1.4.1 DESPLIEGUE DE MAPAS

HidroSIG presenta dos tipos de mapas, los Modelos Digitales de Terreno (MDT) y las Variables Hidrológicas (VHC) donde los primeros tienen como objetivo describir la variación espacial de la altura sobre el nivel del mar del terreno y los segundos se encargan de mostrar la distribución del resto de las variables de interés en el estudio hidroclimatológico.

Para la visualización de estos tipos de mapas, se puede hacer desde una Base de Datos disponible o a partir de un archivo creado que haya sido guardado o que ya se encuentre en disco.

Si se desea abrir un mapa desde la Base de Datos, hay que acceder al menú Archivo->Abrir HSJ desde BD->Mapa o mediante la utilización de los botones de acceso directo que se presentan en la ventana principal., tal como lo muestra la Figura No.3.



Figura No.1.3. Menú abrir mapa y acceso directo a abrir un MDT desde Base de Datos.

Al momento de abrir un mapa desde la Base De Datos independientemente de la forma en que se haga, una ventana de dialogo se desplegará permitiendo seleccionar objetos tanto MDT y VHC como vectoriales, corrientes, cuencas, sitios de usuarios y estaciones.

Se debe seleccionar la región donde se va hacer el estudio, o de donde se necesiten extraer los datos para luego escoger el mapa a utilizar, así como se ve en la Figura No.4.

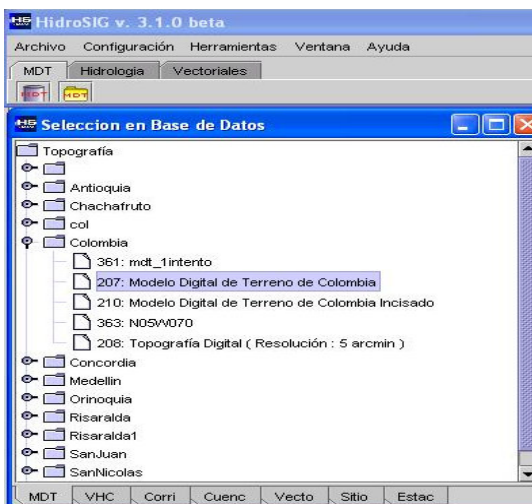


Figura No.1.4. Ventana que permite abrir MDT, VHC y los otros objetos de la Base de Datos.

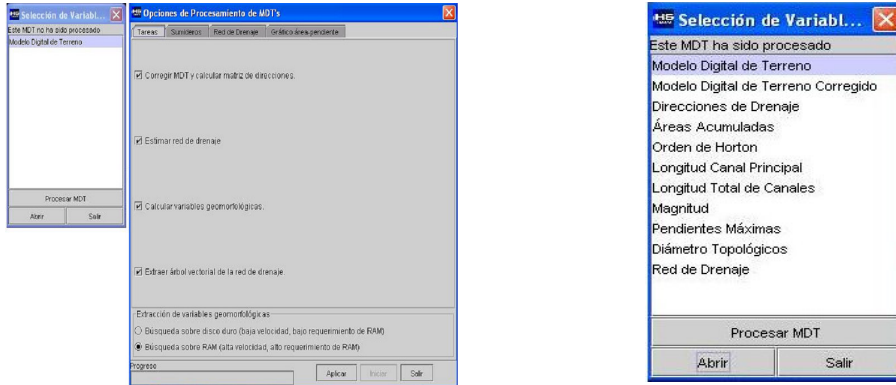
Para abrir un mapa desde disco, se realiza el mismo procedimiento que para abrirlo desde la Base de Datos, solo que en este caso hay que acceder al menú Archivo->Abrir HSJ desde Disco->Mapa o por medio de los botones de acceso rápido que se presentan en la ventana principal, así como se muestra en la Figura No.4.



Figura No.1.5. Menú abrir mapa y acceso directo a abrir un MDT desde Disco.

#### 1.4.1.1 ABRIR UN MODELO DIGITAL DE TERRENO

Al momento de abrir un MDT, el usuario cuenta con la posibilidad de desplegar diez (10) mapas con variables geomorfológicas que estén relacionadas con el terreno, así como su correspondiente red de drenaje. La extracción de estos mapas es posible si se realiza el debido procesamiento del MDT, debido a que si el modelo digital de terreno no ha sido procesado, sólo se podrá visualizar el mapa de elevaciones como se puede apreciar en la Figura No.6. Para calcular las diferentes direcciones de drenaje y los correspondientes mapas asociados, se da la opción Procesar que aparece en la ventana Selección de Variable Geomorfométrica, para luego desplegar la sub-ventana Opciones de Procesamiento de MDT's y tener el usuario la opción de escoger los mapas relacionados que quiera trabajar, así como se ilustra en la Figura 6 (a). Después de que el MDT ha sido procesado, se puede extraer el mapa deseado, mostrado en la Figura 6 (b).



(a) (b)  
 Figura No1.6. Mapas asociados a un MDT: (a) Si no ha sido procesado; (b) Si ha sido procesado.

### 1.4.1.2 ABRIR UNA VARIABLE HIDROLÓGICA

Para poder ver una VHC HidroSIG cuenta con varias opciones, debido a que se puede desplegar en un mapa a la vez, mostrar varios mapas al mismo tiempo o por medio de una animación. Al momento de dar la opción de abrir una VHC, se despliega una sub-ventana donde el usuario podrá seleccionar el o los mapas que desee extraer. Si se tiene más de un mapa seleccionado, es recomendable colocar la opción Desplegar Simultáneamente o Crear animación, que se encuentra en la sub-ventana Selección Variable Geomorfológica, así como se ilustra en la Figura No.7.

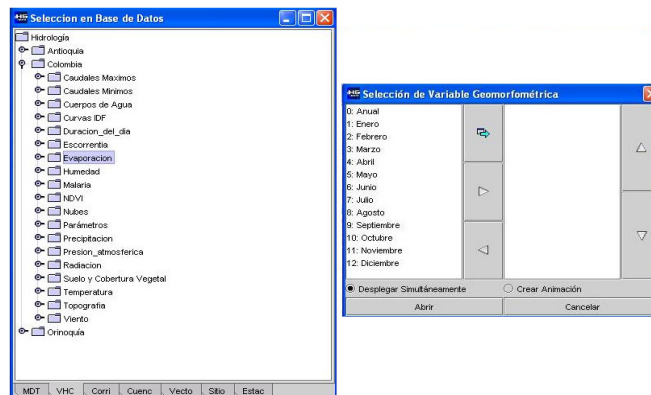


Figura No.1.7. Sub-ventana de selección de variable hidrológica.

## **1.4.2 IMPORTACIÓN Y EXPORTACIÓN DE ARCHIVOS**

Si el usuario de HidroSIG cuenta con mapas en diferentes formatos de software, esta herramienta computacional contiene la opción de importar y exportar estos archivos y así poderlos utilizar y manipular dentro del programa.

### **1.4.2.1 IMPORTAR ASCII**

Si lo que se desea es importar mapas en el formato ASCII de ArcView, en la ventana principal de HidroSIG en el menú de Importar se puede encontrar esa opción. Se debe buscar el archivo del panel de origen para luego especificar el archivo de extensión *.asc* a importar. Después de saber cual es el archivo a importar, se procede a seleccionar el tipo de mapa de HidroSIG al que se desea llevar el mapa importado, es decir, un MDT o una VHC. Luego, se debe escoger el formato de salida de los datos con el que se desea que aparezcan en el mapa de HidroSIG, seleccionando alguna de las opciones del panel del formato.

Para guardar el mapa que se va a importar, se debe seleccionar la opción disco, presentándose la elección de guardar el mapa en el computador como un archivo independiente o en la Base de Datos con la que se cuente.

### **1.4.2.2 IMPORTAR SRTM 90**

Para los proyectos SRTM elaborados con una resolución de tres (3) segundos de arco, HidroSIG los puede importar en el menú de la ventana principal del programa, en la opción SRTM 90m. Al momento de seleccionar el archivo a importar, se debe especificar el archivo de extensión *.hgt* que se va a utilizar. No se debe cambiar la georeferenciación con los que estos mapas fueron elaborados.

Para la especificación de los demás parámetros se siguen las indicaciones explicadas para la importación ASCII.



### **1.4.2.3 IMPORTAR HSJ 1.8**

Garantizando la trabajabilidad con las versiones anteriores, HidroSIG puede importar mapas que hayan sido creados en la versión 1.8.

Como para los formatos anteriores, se puede acceder a esta opción en la interfase principal en el menú Importar HSJ 1.8. Se debe buscar el archivo que se quiera importar, con la herramienta Buscar Archivo, para luego especificar el archivo de extensión *.metaMDT* a importar.

Para la especificación de los demás parámetros se siguen las indicaciones explicadas para la importación ASCII.

### **1.4.2.4 IMPORTAR IDRISI**

Para el manejo de mapas tipo ráster generados por Idrisi 32 (R), HidroSIG cuenta con la posibilidad de trabajarlos directamente.

En la ventana principal en el menú Importar Idrisi, se encuentra la opción para trabajar con este formato, el cual está compuesto por un archivo de Meta datos del mapa, en la mayoría de los casos de extensión *.RDC* o *.DOC* y un archivo que contiene los datos de extensión *.RST*.

HidroSIG presenta una ventaja en que es compatible con el sistema de proyecciones utilizado por Idrisi para la georeferenciación de sus mapas, independientemente que se encuentren en el sistema universal de latitud-longitud o en los sistemas de coordenadas rectangulares como Transversa de Mercator. Es requisito que los datos se encuentren en formato ASCII.

### **1.4.2.5 IMPORTAR DXF**

Aunque solo se puedan importar Polilíneas, HidroSIG presenta un modulo de importación de para este tipo de formato. Si las líneas en el archivo a importar se encuentran cerradas, al momento de trabajarlas en HidroSIG estas aparecerán como polígonos en el vectorial que trabaja el programa.

Se debe buscar el archivo a importar y especificar la extensión con la que trabaja, en este caso *.DXF*.

Para la especificación de los demás parámetros se siguen las indicaciones explicadas para la importación ASCII.

### 1.4.2.6 EXPORTAR A FORMATO ASCII

HidroSIG brinda la opción a sus usuarios de exportar un mapa ráster al formato ASCII, en el menú Exportar que se encuentra en la ventana principal del programa.

Se debe escoger el archivo a exportar y en el selector del panel destino se debe seleccionar la georeferenciación de la salida de este mapa. Posteriormente, se le da una ubicación donde guardar el archivo exportado en formato ASCII.

### 1.4.3 HERRAMIENTAS GENERALES DE VISUALIZACIÓN DE MAPAS

Lo más representativo que HidroSIG brinda a sus usuarios es la visualización y operación sobre un mapa. Al momento de abrir un mapa se pueden realizar diversas operaciones sobre el, así como ver los datos representativos de la región en estudio.

Como se muestra en la Figura No.8, al momento de realizar una operación sobre un mapa la ventana principal de HidroSIG presenta una barra de herramientas que brinda el acceso a todas las funciones disponibles. Además, posee una barra de acceso rápido a algunas funciones como la de sacar una corriente y una cuenca, si se desea realizar una operación con más detalle HidroSIG brinda la posibilidad del zoom, visualización en 3D, manipular la paleta de colores del programa, poder observar las Isolíneas, ver la lista de objetos que se encuentran sobre el mapa a trabajar, entre otros. En esta ventana también se pueden ver los valores del mapa, presionando con el clic derecho sobre el mapa, desplegándose la información de coordenadas y el valor del mapa sobre el que se esta trabajando.

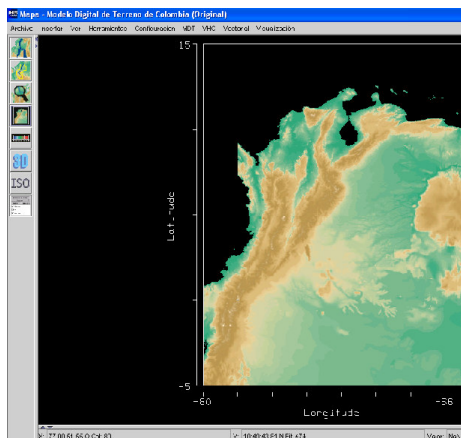


Figura No.1.8. Visualización de un mapa.

### 1.4.3.1 INFORMACIÓN SOBRE LOS MAPAS

Existen dos tipos básicos de información, uno es la información general sobre la construcción del mapa, es decir, la contenida en el archivo *.metaHJS* o en la Base de datos, dependiendo cual sea el caso. Segundo, está la información conformada por el conjunto de valores de la matriz del mapa, es decir, los archivos *.mdtHJS* o *anualHJS*. Esta información está siempre disponible para cuando el usuario desee consultarla.

En el menú Ver de la barra de aplicaciones y en la opción Propiedades, se puede conocer la información global del mapa que se está visualizando, como se puede observar en la Figura No.9.



Figura No.1.9. Propiedades de un mapa.

Si lo que se quiere es conocer el valor de alguna celda en especial del mapa, se debe hacer clic derecho en la celda de interés.

### 1.4.3.2 MOVIMIENTOS Y ZOOM SOBRE UN MAPA

HidroSIG al momento de desplegar el mapa, permite realizar traslaciones del mismo en cualquier dirección y zoom hacia delante y hacia atrás.

Si se quiere mover el mapa que se está visualizando sobre su respectiva área, se debe mantener presionado el botón izquierdo del mouse sobre cualquier punto del área del mapa y moverlo en la dirección deseada. Para hacer zoom, se deben mantener presionados simultáneamente el botón izquierdo del mouse y la tecla Shift, moviendo el mouse hacia delante o atrás, dependiendo la necesidad que se tenga.

Cuando se realizan cualquiera de estas dos operaciones, y se quiere colocar el mapa en su posición y tamaño inicial, en la barra de acceso se encuentra la opción de Restituir.

### 1.4.3.3 MODIFICACIÓN DE LA PALETA DE COLORES

Los mapas que HydroSIG despliega tienen una codificación de colores predeterminado, pero estos pueden ser cambiados a gusto del usuario haciendo uso de la opción Paleta de Colores del menú Ver. Cada una de las diferentes paletas es caracterizada por su nombre y por la asignación de las cantidades de rojo, verde y azul para cada uno de sus colores.

Los cambios de colores se pueden realizar sobre un MDT y sobre una VHC, en el momento que se esté trabajando sobre ellos, es decir, en un mapa activo o desde antes de dar la opción de abrir alguno.

### 1.4.3.4 VISUALIZACIÓN EN 3D

Esta opción que HydroSIG brinda puede ser usada por mapas de modelos digitales de terreno o variables hidrológicas que hayan sido abiertas de manera individual.

En la barra de herramientas de la ventana del mapa a trabajar, en Visualización y en la opción Visualización 3D se puede hacer uso de esta característica, o por medio de la barra de acceso directo. Al momento de desplegarse el mapa, el usuario puede cambiar el aspecto, orientación y posición del mapa como lo desee, así como lo ilustra la Figura No.10.

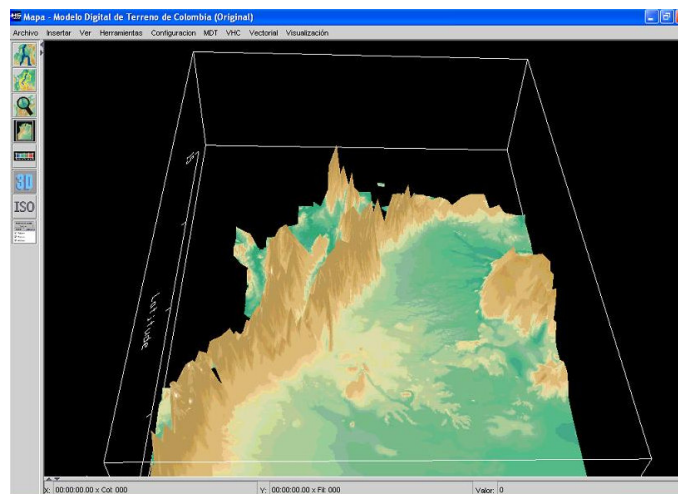


Figura No.1.10. Visualización en 3D de un MDT.

#### **1.4.3.5 VISUALIZACIÓN DE ISOLINEAS**

Las Isolineas que un mapa posee también pueden ser vistas por el usuario por medio de la opción Visualización de Isolineas que se encuentra en Visualización en la barra de herramientas de la ventana del MDT o por medio de la barra de acceso directo.

#### **1.4.3.6 CORRIENTES Y CUENCAS SOBRE UN MDT**

Una vez que un MDT ha sido procesado, HydroSIG crea el mapa de direcciones de drenaje para así estimar la dirección de flujo del agua sobre cada punto de la superficie del terreno. Gracias a este mapa de direcciones HydroSIG brinda dos opciones dentro del estudio hidrológico como lo son trazar gráficamente la trayectoria del agua desde cualquier punto del mapa y estimar la divisoria de la cuenca que presente como salida cualquier punto del mapa.

Para el trazado de corrientes en la ventana del mapa en el cual se está trabajando en el menú MDT se encuentra la opción Trazar Corriente, con la cual se puede visualizar la trayectoria del agua desde cualquier punto del mapa hasta su frontera. Se pueden trazar cuantas cuencas como el usuario desee o necesite.

Si lo que se requiere es trazar la divisoria de la cuenca en el menú MDT se encuentra la opción Trazar Cuenca. Además, se puede conocer cuáles celdas son salidas de alguna cuenca de tamaño relevante mediante la opción mapas relacionados del menú Herramientas mostrando valores del área de drenaje acumulada, la longitud de la canal principal y el orden de Horton asociados a las celdas del MDT.

#### **1.4.3.7 PERFILES Y DISTANCIA ENTRE DOS PUNTOS**

Cuando un río es trazado sobre un modelo digital de terreno, su perfil puede ser extraído mediante la opción Extraer Perfil. Se recomienda extraer estos perfiles sobre el MDT corregido, debido a que este no presenta zonas planas y sumideros.

#### **1.4.3.8 EXTRACCIÓN DE SUB-MAPAS**

Cuando se este trabajando sobre un MDT o una VHC, se pueden crear nuevos mapas a partir de los que se estén trabajando. Esta opción se encuentra en el menú de herramientas con el nombre de Extraer Submapa. Para la ejecución de este comando HidroSIG le pide al usuario que especifique las esquinas que delimitan el nuevo mapa que quiere desplegar.

#### **1.5 VISUALIZACIÓN DE VARIABLES HIDROLÓGICAS**

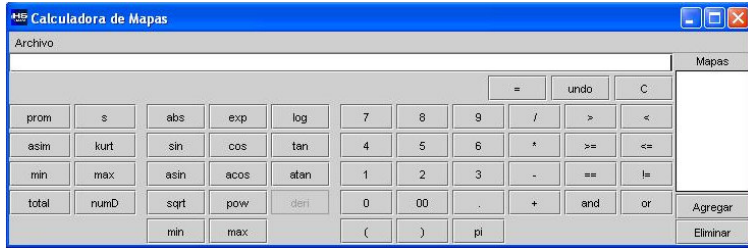
Al momento de trabajar con una VHC, HidroSIG permite la visualización conjunta de estos mapas. Como se dijo anteriormente, una vez se tengan escogidos los mapas a trabajar se puede escoger entre Desplegar Simultáneamente y Crear Animación.

Si el usuario trabaja con Desplegar Simultáneamente, todos los mapas que hayan sido seleccionados serán mostrados dentro de la misma área. Al hacer uso de la opción Mapas Relacionados que se encuentra en la barra de Herramientas el usuario puede averiguar el valor de una celda independientemente del mapa que desee. Además de conocer el valor de una celda, HidroSIG tiene una opción llamada gráfico puntual que brinda la posibilidad de un gráfico x-y mostrando el comportamiento de la variable en el punto que se haya seleccionado. Esta opción se encuentra en Ver de la barra de la ventana con el nombre de Gráfico Puntual. Sobre este gráfico se puede superponer curvas de cuantos puntos se desee.

Si se selecciona Crear Animación, se abrirá una interfaz con un video el cual se puede controlar con los botones reproducir, detener y adelantar. Esta opción también permite el uso del gráfico puntual y de los mapas relacionados así como se explico para Desplegar Animación.

#### **1.6 CALCULADORA DE MAPAS**

Esta herramienta que HidroSIG ofrece a sus usuarios presenta una gran variedad de operaciones como la extracción de información y creación de nuevos mapas a partir cualquier mapa que almacenado en la Base de Datos o en Disco, las operaciones básicas de cualquier calculadora científica, así como operaciones aritméticas, lógicas y estadísticas. Esta opción se puede ver en la Figura No.11.



**Figura No.1.11. Calculadora de Mapas.**

Para que la calculadora de mapas funciones no es necesario que estos sean de la misma resolución, ni del mismo tamaño, sino que tengan algún área en común.

Esta herramienta se encuentra en la ventana principal de HidroSIG en el menú Herramientas.

## **1.7 CALCULADORA DE COORDENADAS**

La utilidad de esta herramienta es que gracias a ella es posible hacer la proyección de un punto desde coordenadas Latitud y Longitud hacia coordenadas planas Norte y Este. Al momento de realizar la conversión, se deberá especificar que tipo de conversión desea aplicarle a las coordenadas del punto.

Esta herramienta se encuentra en la ventana principal de HidroSIG en el menú Herramientas, la opción Coordenadas con el nombre de Calculadora de coordenadas.

## **1.8 VISUALIZACIÓN Y ALMACENAMIENTO DE INFORMACIÓN PUNTUAL**

HidroSIG permite la manipulación y análisis de datos que estén asociados a un punto específico del espacio.

Se pueden almacenar y visualizar tres (3) tipos de información puntual que son primero las estaciones de toma de datos hidrológicos y la información registrada por ellas. Segundo, los puntos que son importantes para el usuario en algún lugar en particular, es decir, la ubicación de estaciones. Tercero, la información referente a ciudades y municipios.

### **1.8.1 ESTACIONES HIDROCLIMATOLÓGICAS**

HidroSIG brinda a sus usuarios dentro de la Base de Datos que maneja un importante y significativo número de estaciones de toma de datos hidroclimatólogicos, las cuales se encuentran distribuidas a lo largo y ancho del territorio Colombiano. Las estaciones son de diversos tipos e HidroSIG brinda acceso a la información que cada una tiene, para el uso de sus usuarios. La herramienta para el manejo de las estaciones se encuentra con el nombre de Abrir desde BD en el menú Archivo, en el ítem Estaciones, de la ventana principal de HidroSIG.

Estas estaciones presentan dos (2) formas para poder acceder a la información que tengan. La primera es que la Base de Datos este disponible en la red o que el usuario la tenga en Disco. La segunda forma es que el usuario seleccione un tipo específico de estación hidroclimatólogica, ya sea limnimétricas o limnigráficas, entre otros.

Si la estación se encuentra en la Base de Datos, se puede acceder como se explicó anteriormente. Para cuando se requiera un tipo específico de estación, se realiza la búsqueda a través de algunos botones de la ficha Estaciones en la parte izquierda de la ventana de algún mapa abierto en Selección en Base de datos.

### **1.8.2 UBICACIÓN DE ESTACIONES EN MAPAS**

Para la ubicación de cualquier estación, en la barra de herramientas de la ventana del mapa sobre el que se esté trabajando en la opción Insertar, se encuentra el ítem Estación donde se desplegará la ventana donde se puede realizar esta operación, así como lo muestra la Figura No.12.

Esta opción le ofrece al usuario varias herramientas como buscar y agregar mas estaciones visualizando su información sin cambiar de ventana, exportar los datos de las diferentes estaciones a un archivo *.txt* y guardar imágenes del gráfico de cualquier estación en un archivo *.jpg*.



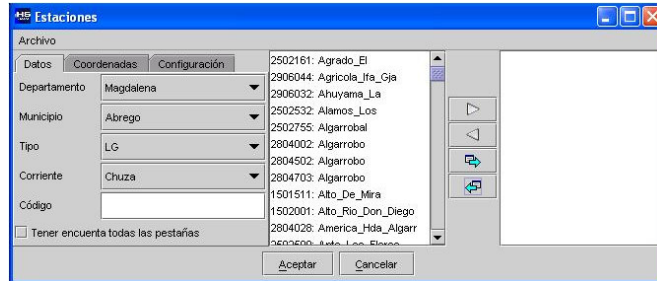


Figura No.1.12. Ventana para la ubicación de estaciones.

### 1.8.3 CAPITALES Y MUNICIPIOS

No solo de estaciones hidrológicas esta conformada la Base de Datos de HidroSIG, además incluye información sobre capitales y municipios de Colombia. Como en las estaciones, el usuario puede ubicar las capitales o los municipios dentro del mapa y tener acceso a la información que estas tengan. Esta opción se encuentra en las herramientas en el menú Archivo, con el nombre de Abrir desde BD en el ítem Sitios o en el mapa, en el botón Insertar del menú principal y se selecciona Sitios. Si el usuario posee información en disco, igualmente podrá usarla.

## **CAPÍTULO II.**

### **MODELO DE THOMAS**

En el presente capítulo se mostrará de manera general la importancia que dentro de la Hidrología presentan los balances hídricos, para luego realizar la explicación del modelo de Thomas, que es el objeto de estudio de este trabajo.

No solo existe el modelo de Thomas dentro de un estudio de balance hídrico, existen otros modelos como los de Thornthwaite, Mather, Dunne, Leopold y Palmer, los cuales fueron analizados desde la segunda mitad del siglo XX. Entre estos modelos existen diferencias muy marcadas, notándose esto de manera clara en la forma como adoptan la porción de suelo que va a ser sometido a estudio, debido a que algunos fraccionan en varias capas el suelo a diferencia de otros que toman el suelo como uno sólo.

En lo relacionado al modelo de Thomas, se explicará de la manera más clara posible especificando la diferencia que al momento de aplicar este modelo existe en hacerlo de manera directa e inversa, que será el método a utilizar en este trabajo.

#### **2.1 MODELOS DE BALANCE HÍDRICO<sup>3</sup>**

“Partiendo del conocimiento de las precipitaciones medias mensuales y de la evapotranspiración mensual estimada, podemos estudiar el balance del agua en el suelo a lo largo del año.

Conocer el balance de humedad en el suelo es importante para evaluar la disponibilidad de agua para los cultivos, estudios hidrológicos, de conservación de suelos, de drenaje, de recuperación de suelos salinos, de repoblación forestal, o el establecimiento del régimen de humedad de los suelos o de criterios de diferenciación climática”<sup>4</sup>.

Existen modelos de balance hídrico de carácter agregado los cuales tienen en cuenta para su aplicación pocos parámetros como lo son los de Thornthwaite, Palmer, Témez, Thomas entre otros, que simplifican el ciclo hidrológico reduciéndolo a unas pocas componentes principales trabajando a una escala mensual. También existen modelos agregados que relacionan muchos

---

<sup>3</sup> William M. Alley, Water Resources Research, Vol. 20, N°8, Pages 1137-1149, Virginia, 1984.

<sup>4</sup> <http://www.eda.etsia.upm.es>

parámetros como los de Stanford, Sacramento, HSPF entre otros, que porque al momento de ser aplicados tienen en cuenta muchos parámetros son más precisos, describen el sistema con mucho más detalle, trabajando a escala horaria o diaria, pero son más difíciles de usar debido a que esa información tan puntual no siempre está disponible por ser tan precisa y por la cantidad de parámetros a analizar.

Estos modelos agregados de balance presentan una limitación y es que al ser aplicados reproducen condiciones de promedio de la cuenca, luego no simulan la variabilidad espacial del sistema. A pesar de esta limitación se ha demostrado que resultan ser una fuerte herramienta de planeación y gestión de los recursos hídricos.

Todos los modelos de balance hídrico mencionados anteriormente que relacionan pocos parámetros se basan en los desarrollados por Thornthwaite a mediados del siglo XX. Éste modelo se denomina “modelo T”.

### 2.1.1 MODELO T

Este modelo fue desarrollado por Thornthwaite y Mather en 1955, y asumen que el suelo presenta una determinada capacidad de almacenamiento en términos de humedad ( $\Phi$ ). El almacenamiento del suelo del mes  $i$  se encuentra representado con  $S_i$ . Dependiendo de la precipitación del mes  $i$ , la humedad que está representada con la variable  $P_i$  y la evapotranspiración potencial ( $ETP_i$ ) varían.

Para cuando se presente el caso de que  $P_i > ETP_i$ , resultará que  $S_i = \min\{(P_i - ETP_i) + S_{i-1}, \Phi\}$ . Para el caso contrario cuando  $P_i < ETP_i$ , la humedad presente en el suelo experimentará un déficit.

En el año de 1957 Thornthwaite y Mather y para 1978 Dunne y Leopold, desarrollaron diversas tablas y gráficas con el objetivo de calcular el déficit de la humedad del suelo y a partir de ahí  $S_i$ . Por medio de estas tablas y gráficas se logró incorporar más fácilmente sus procedimientos

a modelos computacionales permitiendo analizar y manejar situaciones donde la humedad del suelo es menor que el almacenamiento que este presenta.

Para el año de 1955 las tablas que Thornthwaite y Mather realizaron, se apoyaron en un modelo que relaciona la pérdida de humedad del suelo y la evapotranspiración potencial, de la forma

$$\frac{dS}{dt} = \frac{-(ETP_i - P_i)}{\Phi} \times S.$$

Si  $P_i < ETP_i$ , la solución a esto es  $S_i = S_{i-1} \times e^{[-(ETP_i - P_i)/\Phi]}$ . Por medio de esta ecuación se puede observar y concluir que al momento de aumentar la evapotranspiración potencial se disminuye de una manera exponencial el almacenamiento.

Se puede definir el déficit de la humedad del suelo en el mes  $i$ ,  $D_i$  como  $D_i = \Phi - S_i$ .

Si la precipitación de un mes excede la evapotranspiración potencial y ésta capacidad es lograda por el almacenamiento del suelo, un excedo de agua será evidenciado. Luego,  $\Delta Q = (P_i - ETP_i) + S_{i-1} - \Phi$  para  $S_i = \Phi$ , de lo contrario  $\Delta Q = 0$  ( $S_i < \Phi$ ), donde  $\Delta Q$  representa el exceso de agua.

Éste exceso de agua forma parte de las corrientes superficiales que llegan al acuífero, calculada como  $R_i = (1 - \lambda)(Q_{i-1} + \Delta Q)$  donde  $R_i$  es la escorrentía directa y  $\lambda$  representa la fracción de agua infiltrada en el suelo.

La cantidad de agua faltante a razón de humedad en el mes  $i$ ,  $Q_i$  está representada como  $Q_i = \lambda(Q_{i-1} + \Delta Q)$  donde  $\lambda$  varía dependiendo de la profundidad y textura del suelo, del tamaño de la cuenca, entre otros factores. Thornthwaite y Mather recomiendan el uso de  $\lambda = 0,50$  y  $\lambda = 0,75$  respectivamente, este último para cuencas pequeñas con suelo arenoso.

### 2.1.2 MODELO P

Este modelo de balance hídrico fue desarrollado por Palmer en 1965 y es muy similar al modelo T explicado anteriormente. Palmer es su modelo dividió el suelo en dos partes para el almacenamiento de la humedad.

La capa superior presenta capacidad de humedad  $\Phi_a$  y la capa inferior presenta capacidad de humedad  $\Phi_b$ . La humedad que se encuentra en la capa inferior no puede ser modificada hasta que la localizada en la capa superior lo sea. La evapotranspiración que se pierde en la capa superior,  $E_i^a$  tomará lugar en la rata potencial. La pérdida de evapotranspiración en la capa inferior,  $E_i^b$  se presenta cuando  $[(ETP_i - P_i) - E_i^a] > 0$ , es decir, al momento de presentarse la pérdida de evapotranspiración en la capa superior.

En este caso,  $E_i^b = [(ETP_i - P_i) - E_i^a] \times S_{i-1}^b / \Phi$  para  $E_i^b \leq S_{i-1}^b$ , donde  $\Phi = \Phi_a + \Phi_b$  y  $S_{i-1}^b$  representa la humedad en la capa inferior al inicio del  $i$ .

Al momento de que se presente en el límite de las dos capas una capacidad máxima de almacenamiento, es cuando se origina la escorrentía.

### 2.2 MODELO DE THOMAS<sup>5</sup> (abcd)

El modelo de Thomas fue desarrollado como su nombre lo indica por Thomas en 1981, el cual se le conoce también como modelo abcd. Éste modelo de balance hídrico de carácter agregado establece mediante la determinación de cuatro (4) parámetros el caudal afluente en una cuenca.

Para la explicación del modelo de Thomas se debe tener claro que el suelo está dividido en tres (3) zonas. Una primera parte que es donde se presenta todo lo relacionado al almacenamiento superficial y es representado como  $S_c$ . Para la segunda zona que es la no saturada  $S_w$ , se

---

<sup>5</sup> Obregón N, Fragala F, Blanco A, Gómez L. Implementación del modelo de Thomas en la cuenca alta del río Checua para la estimación de la recarga (Sabana de Bogotá, Cundinamarca, Colombia) XV Seminario nacional de Hidráulica e Hidrología. Medellín, Agosto 2002.

Obregón N. Modelo de Balance Hídrico en Cuencas. Notas de clase para la Maestría en Hidrosistemas. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, 5 de Julio de 2004.

puede asimilar la recarga que experimenta el acuífero  $R_g$  a la infiltración  $I$  debido a que el caudal subsuperficial  $Q_s$  es despreciado por el modelo por ser en comparación con la precipitación muy pequeño. La última zona que es la zona saturada presenta un almacenamiento  $S_g$ . Así como se puede observar en la Figura No.13.

La primera zona se puede despreciar debido a que es muy pequeña en comparación con la segunda.

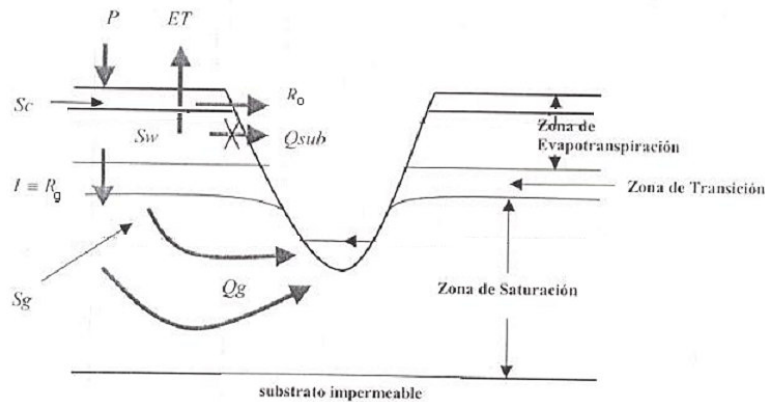


Figura No.2.1. Aproximación conceptual al modelo de Thomas.

Fuente: Obregón N, Fragala F, Blanco A, Gómez L. Implementación del modelo de Thomas en la cuenca alta del río Checua para la estimación de la recarga (Sabana de Bogotá, Cundinamarca, Colombia) XV Seminario nacional de Hidráulica e Hidrología. Medellín, Agosto 2002.

Para el desarrollo del modelo de Thomas, inicialmente es aplicada la ecuación de continuidad a un volumen de control el cual cuenta con un almacenamiento  $S_w + S_c$ , como se puede observar en la Figura No.13 y esta compuesta por la zona de evapotranspiración.

Cuando se aplica la ecuación de continuidad se obtiene que,

$$P_i - ET_i - I_i - R_{o_i} = \Delta S_w = S_{w_i} - S_{w_{i-1}}, \quad (1.1)$$

O,

$$P_i - ET_i - R_{g_i} - R_{o_i} = \frac{\Delta S_w}{\Delta t} = S_{w_i} - S_{w_{i-1}} \quad (1.2)$$

Donde,

$P_i$  = Lluvia al final del periodo  $i$  -ésimo

$ET_i$  = Evapotranspiración real al final del periodo  $i$  –ésimo

$I_i$  = Infiltración al final del periodo  $i$  –ésimo

$Ro_i$  = Escorrentía directa al final del periodo  $i$  –ésimo

$Rg_i$  = Recarga del acuífero al final del periodo  $i$  –ésimo

$\Delta Sw$  = Variación en el almacenamiento del suelo

$Sw_i$  = Humedad del suelo al final del periodo  $i$  –ésimo

$Sw_{i-1}$  = Humedad del suelo al final del periodo  $i$  –ésimo

Si se parte de la ecuación (1.1) y se reagrupan los términos se tiene,

$$(P_i + Sw_{i-1}) - (ET_i + Sw_i) = Ro_i + I_i \quad (1.3)$$

Al igualar y juntar términos,

$$W_i = P_i + Sw_{i-1} \quad (1.4)$$

$$Y_i = ET_i + Sw_i \quad (1.5)$$

Luego,

$$(W_i - Y_i) = Ro_i + I_i \quad (1.6)$$

Asumiendo como humedad inicial al comienzo de cada intervalo  $Y_i$  y por métodos empíricos,

$$Sw_i = Y_i \times e^{-ET_i/b} \quad (1.7)$$

Lo que muestra un decaimiento exponencial en cada intervalo de tiempo.

Se define la variable  $Y_i$  como una función no lineal donde aparecen los parámetros  $a$  y  $b$  en el modelo,

$$Y_i = \frac{(W_i + b)}{2a} - \left\{ \left[ \frac{(W_i + b)}{2a} \right]^2 - \frac{W_i b}{a} \right\}^{0.5} \quad (1.8)$$

Al sustituir (1.4) y (1.5) en (1.3),

$$(W_i - Y_i) = Ro_i + I_i \quad (1.9)$$

Asumiendo un coeficiente de reparto  $c$  al momento de diferenciar la escorrentía directa ( $Ro$ ) de la recarga ( $Rg \equiv I$ ),

$$Ro_i = (1 - c)(W_i - Y_i) \quad (1.10)$$

$$Rg_i = c(W_i - Y_i) \quad (1.11)$$

El modelo de Thomas relaciona la fracción del caudal observado el cual se origina en el almacenamiento subterráneo,

$$Qg_i = d \times Sg_i \quad (1.12)$$

$d$  representa el parámetro de almacenamiento en el acuífero.

Así como se aplicó la ecuación de continuidad al volumen de control con almacenamiento  $S_w + S_c$ , se realiza lo mismo para la zona saturada,

$$Rg_i - Qg_i = \Delta Sg = Sg_i - Sg_{i-1} \quad (1.13)$$

Sustituyendo (1.12) en (1.13) se obtiene.



$$Sg_i = \frac{Rg_i + Sg_{i-1}}{d + 1} \quad (1.14)$$

Finalmente el caudal total simulado al final del periodo  $i$ ,

$$Qs_i = Ro_i + Qg_i \quad (1.15)$$

Con relación a los parámetros abcd que aparecen en las ecuaciones descritas anteriormente, a que varia entre un rango de  $0 \leq 1$  expresa la tendencia ante la presencia de un suelo que se encuentre completamente saturado que la escorrentía ocurra; b representa el límite superior a la suma de la evapotranspiración real y a la humedad; c hace referencia a esa fracción que se encuentra en el almacenamiento subterráneo que se incluye en la escorrentía, aunque no siempre se relaciona a esta fracción debido que no siempre toda la recarga se convierte en escorrentía superficial durante el intervalo de tiempo que se considere; d es el recíproco del tiempo de resistencia del agua subterránea, pero teniendo en cuenta que ese tiempo puede relacionarse con todo el acuífero, con la porción de esto más cercana al río, o simplemente con recorridos superficiales más rápidos. Los valores que se le asignen a estas variables dependerán de la zona en donde se esté realizando el estudio.

### 2.2.1 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO DE THOMAS POR EL PROBLEMA DIRECTO

Cuando el modelo de Thomas es aplicado por la forma directa es porque se conocen al momento de empezar el análisis los parámetros a, b, c, d,  $S_{w_0}$  y  $S_{g_0}$  para así calcular los componentes del balance hídrico directamente como  $W_i$ ,  $Y_i$ ,  $S_{w_i}$  y los otros los cuales fueron mencionados anteriormente. Estos componentes son calculados como se explico en el numeral 2.2

Se considera que este método es valido cuando existe una diferencia mínima entre los diferentes caudales, el obtenido que es simulado por medio de cálculos y el real que es medido.

Se pueden hacer uso de herramientas computacionales para facilitar la realización del balance hídrico, como por ejemplo Matlab. El ingeniero civil Jorge Escobar de la maestría en Hidrosistemas de la Pontificia Universidad Javeriana desarrolló un código en Matlab el cual

realiza el balance hídrico para el estudio de una subcuenca del río Cauca y se muestra a continuación:

```
% MODELOS DE BALANCE HIDRICO EN CUENCAS
% METODO DE THOMAS DIRECTO
% Jorge Escobar
% Hidrosistemas – PUJ
clear all %
S=load('julumito.txt'); %
MES=S(:,1);%
P=S(:,2);%
ETP=S(:,3); %
Q=S(:,4); %
B=zeros(10,12);%
QO=zeros(12,1); %
e=zeros(12,1); %
a=1; b=100; c=0.86; d=0.11;
Sgo=300; Swo=180; %
for i=1:12
    B(1,i)=P(i)+Swo; % Wi
    B(2,i)=((B(1,i)+b)/(2*a))-(((B(1,i)+b)/(2*a))^2) - (B(1,i)*b/a)^0.5; % Yi
    B(3,i)=B(2,i)*exp(-ETP(i)/b); % Swi
    Swo=B(3,i);
    B(4,i)=B(2,i)-B(3,i); % ETi
    B(5,i)=c*(B(1,i)-B(2,i)); % Rgi
    B(6,i)=(1-c)*(B(1,i)-B(2,i)); % Roi
    B(7,i)=(B(5,i)+Sgo)/(1+d); % Sgi
    Sgo=B(7,i);
    B(8,i)=d*B(7,i); % Qgi
    B(9,i)=B(6,i)+B(8,i); % Qfinal
    QO(i)=B(9,i);
    e(i)=(QO(i)-Q(i))^2;
    B(10,i)=abs(B(9,i)-Q(i)); % Diferencia de caudales
end %
B
```

## 2.2.2 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO DE THOMAS POR EL PROBLEMA INVERSO

Por lo general al momento de realizar un estudio de balance hídrico los valores de los parámetros que el modelo de Thomas relaciona no se conocen, pasando entonces a resolver el problema inverso que consiste en tener el caudal observado y a partir de ahí encontrar los

valores de los parámetros los cuales van a generar un caudal simulado que más se ajusten al caudal observado.

En el problema inverso el caudal simulado pasa a estar en función de los cuatro (4) parámetros y de los valores de almacenamiento del suelo y del acuífero, de la forma  $Q_s = f(a, b, c, d, S_{w_o}, S_{g_o})$ .

Se debe realizar una calibración del procedimiento a ser utilizado mediante la elección de la o de las funciones objetivo por medio del ensayo de diferentes normas, a través de una minimización o una maximización de estas funciones objetivo y por último a partir a un procedimiento automático el cual se puede basar en una búsqueda exhaustiva, en ensayo y error, en algoritmos genéticos, colonia de hormigas, entre otros realizar una optimización matemática.

Esta clase de búsqueda exhaustiva requiere de una velocidad de procesamiento y de una capacidad suficiente para un óptimo desempeño. Por este motivo para el desarrollo de este trabajo se utilizó un compilador en FORTRAN setenta y siete (77).

En el caso de optimización matemática para la realización de este estudio se utilizó la subrutina AMOEBA, la cual tiene como objetivo la búsqueda de un mínimo global para así minimizar la función objetivo y hace referencia al "downhill simplex method".

Este método trabaja por medio de un *simplex* que es una figura geométrica que consta de  $N$  dimensiones de  $N+1$  vértices, por ejemplo en dos (2) dimensiones un *simplex* es un triángulo. El "downhill simplex method" no debe iniciarse en un solo punto, sino que  $N+1$  puntos definen el inicio del *simplex*, para los posibles movimientos de la AMOEBA, es decir, del *simplex* así como se muestra en la figura No. 15.

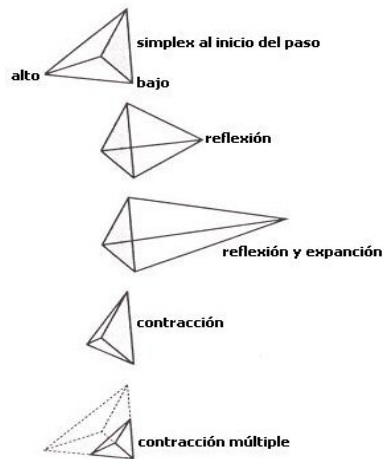


Figura No.2.2. Movimientos de la AMOEBA.

La secuencia apropiada de los pasos mostrados siempre converge hacia un mínimo de la función utilizada.

En Numerical Recipes. The art of Scientific Computing. Cap 10.4 se encuentra de manera completa todo lo relacionado con AMOEBA.

Existen varios tipos de funciones objetivo que pueden ser consideradas al momento de realizar

la calibración del modelo, como por ejemplo  $\sum_{i=1}^n Q_i^2 - Q_{S_i}^2$ ,  $Error = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |Q_i - Q_{S_i}|$ ,

$E_{max} = \max |Q_i - Q_{S_i}|$ ,  $\min \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_i - Q_{S_i})^2}$ , donde  $m$  y  $n$  son el número del mes a

evaluar,  $Q_{S_i}$  es el caudal simulado del mes  $i$  y  $Q_i$  es el caudal observado del mes  $i$  entre otras. Para la realización de este trabajo se utilizó la función objetivo error absoluto, de la forma

$\sum_{i=1}^n \frac{abs(Q_i - Q_{S_i})}{Q_i}$ , al ser la que arrojó mejores resultados después de hacer diferentes pruebas

con diversas funciones objetivo.

El ingeniero civil Jorge Escobar de la maestría en Hidrosistemas de la Pontificia Universidad Javeriana desarrolló un código en Matlab el cual realiza el balance hídrico por el problema inverso del modelo de Thomas mediante una búsqueda exhaustiva determinística y que se muestra a continuación:



```
end
end
end %
A %
Bb %
C %
D %
SW0 %
SG0
```

## **2.3 REQUERIMIENTOS DE INFORMACIÓN PARA EL EMPLEO DEL MODELO DE THOMAS**

Al momento de aplicar el modelo de Thomas a una zona determinada se debe tener en cuenta que el modelo requiere información sobre variables hidroclimáticas como precipitación y evapotranspiración potencial.

### **2.3.1 PRECIPITACIÓN**

La precipitación se puede definir de manera teórica como el proceso de las partículas de agua que forman las nubes al pasar a un estado de condensación alcanzan tamaños mayores a 0,1mm. Estas partículas caen, dando lugar a las precipitaciones, las cuales pueden presentarse en forma de lluvia, granizo o nieve.

La información de este fenómeno se puede encontrar a diferente escala como diaria, mensual o anual y expresada en mm.

### **2.3.2 EVAPORACIÓN Y EVAPOTRANSPIRACIÓN**

El vapor de agua se realiza de manera continua sobre las superficies de los lagos, mares y océanos debido a la radiación solar que estas superficies sufren constantemente. Este vapor al ser menos denso que el aire asciende hacia la atmósfera.

La evapotranspiración es la combinación de dos términos como lo son evaporación y transpiración, para así poder explicar bien este concepto. En muchas formaciones geológicas una parte del agua infiltrada es evaporada ascendiendo a la atmósfera pero una parte de esta agua es consumida en la transpiración de la vida vegetal, este fenómeno es llamado evapotranspiración.

## 2.4 METODOS DE CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL (ETP).

Para el cálculo de la ETP existen diferentes formulas y métodos que se han desarrollado por diversos investigadores como Thornthwaite, Pennam, Hargreaves, Chistiansen, Blaney y Criddle entre otros, o como Turc que fue el método utilizado para el calculo de la evapotranspiración potencial en este trabajo.

### 2.4.1 MÉTODO DE THORNTHWAITE

Este método se desarrollo en 1948 por Thornthwaite en donde derivó una formula la cual correlaciona diferentes datos de evapotranspiración potencial con datos de temperatura media mensual y lo que se estipule que dure el día. Al considerar que un día experimenta una insolación diaria de doce (12) horas y un mes de treinta días (30), Thornthwaite dice:

$$ETP_i = \left( \frac{10 \times T_i}{I} \right)^a \times 0,53$$

Donde,

$ETP_i$  = Evapotranspiración potencial del mes  $i$ , en cm.

$T_i$  = Temperatura del mes  $i$ , en °C.

$I$  = Índice de calor.

$$a = 0,675 \times 10^{-6} * I^{-3} - 0,771 \times 10^{-4} * I^2 + 1,792 \times 10^{-2} * I + 0,49239$$

El índice de calor es el resultado de la sumatoria de los índices de calor que mensualmente se registran,  $I = \sum_{j=1}^{12} J_i$  donde  $J_i$  representa el índice térmico mensual,  $J_i = \left(\frac{t_i}{5}\right)^{1,514}$ .

Una vez se tengan los valores de los resultados se debe realizar un arreglo en relación a la duración del día y mes en estudio. Después de esto se deben multiplicar los valores de  $E_i$  por un factor de corrección el cual depende de la latitud y el mes.

#### 2.4.2 MÉTODO DE PENMAN

Para el año de 1948 Penman relacionó el enfoque aerodinámico y balance de energía con el objetivo de encontrar una manera de calcular la evaporación desde una superficie libre de agua. A la primera conclusión que llegó fue:

$$Ev = \frac{R_n + Y \times E_a}{\Delta + Y}$$

Donde.

$Ev$  = Evaporación de la superficie de agua en mm/día.

$\Delta$  = Pendiente de la gráfica presión de saturación vs. curva de temperatura. (  $d e_a/dt$ ) a la temperatura del aire T en milibares/°C.

$R_n$  = Radiación neta en mm/día.

$Y$  = Constante psicrométrica.

$E_a$  = Poder evaporativo de la atmósfera en mm/día.

Luego de una serie de modificaciones pero basándose en la misma ecuación, Penman llegó a lo siguiente:



$$ETP = \frac{\frac{P_o}{P} \frac{\Delta}{\gamma} \left\{ 0,75RA \left( 0,29 + 0,42 \frac{n}{N} \right) - \sigma T^4 K \left( 0,56 - 0,79 \sqrt{ed} \right) \left( 0,10 + 0,09 \frac{n}{N} \right) \right\} + 0,26(ea - ed)(1 + 0,54u)}{\frac{P_o}{P} \frac{\Delta}{\gamma} + 1,00}$$

Donde,

$ETP$  = Evapotranspiración potencial en mm.

$P_o$  = Presión atmosférica media en milibares a nivel del mar.

$P$  = Presión atmosférica media en milibares la cual está en función de la elevación de la estación donde se realiza la estimación.

$\Delta$  = Gradiente de la presión de vapor de saturación con respecto a la temperatura, en milibares por grado centígrado.

$Y$  = Coeficiente sicrométrico.

$Ra$  = Radiación extraterrestre en mm de agua evaporable (1mm=59cal) y de acuerdo con la escala pirheliométrica internacional (IPS 1956).

$N$  = Duración de la insolación astronómica máxima dentro de un determinado tiempo.

$N$  = Duración de la insolación durante el período que se estudia en horas y décimas de hora.

$\sigma T^4$  = Radiación del cuerpo negro expresada en mm de agua evaporable para la temperatura del aire.

$ea$  = Presión de vapor de saturación en milibares.

$ed$  = Presión de vapor expresada en milibares.

$T^{\circ}C$  = Temperatura del aire medida en la caseta metereológica, expresada en grados Celsius.

$T^{\circ}K$  = Temperatura del aire expresada en grados Kelvin, siendo que  $T^{\circ}K = T^{\circ}C + 273$ .

$u$  = Velocidad media del viento a una altura de dos (2) metros en m/s, dentro del periodo en estudio.

Esta formula es muy confiable debido a que los resultados que resultan al utilizarla son muy cercanos a los reales pero muestra una limitación y es al momento de presentarse condiciones áridas.

### 2.4.3 METODO DE TURC

Turc reunió información alrededor del mundo de doscientas cincuenta y cuatro 254 cuencas para poder desarrollar la formula para el cálculo de la evapotranspiración potencial en el año 1958. Además, Turc considero el poder evaporativo de la atmósfera como una función de la temperatura media o las horas de brillo solar.

Después de esto, Turc llegó a que:

$$ETP = K \left[ \frac{T}{(T + 15)} \right]^{RG+50}$$

Donde,

*ETP* = Evapotranspiración potencial en mm.

*K* = 0,4 Para meses que cuenten con treinta (30) o treinta y un (31) días.

*K* = 0,37 Para el mes de febrero.

*T* = Temperatura media anual en °C.

*RG* = Radiación global en Cal/cm<sup>2</sup>/día.

Todos los métodos utilizados para el cálculo de la evapotranspiración potencial relacionan muchas mucha información y requieren de una serie de variables de entrada para su aplicación. En la siguiente tabla de resume de manera sencilla y clara cada una de las variables de entrada que algunos métodos necesitan.

| <b>MÉTODO</b>       | <b>VARIABLES DE ENTRADA</b>   |
|---------------------|---|
| <i>Thornthwaite</i> | Temperatura media mensual   |
| <i>Turc</i>         | Temperatura media anual<br>Precipitación media anual  |
| <i>Hargreaves</i>   | Temperatura media mensual<br>Humedad relativa promedio mensual<br>Velocidad media del viento<br>Brillo solar actual mensual<br>Brillo solar teórico mensual<br>Elevación promedio mensual   |
| <i>Christiansen</i> | Temperatura media mensual del aire<br>Humedad relativa media mensual<br>Velocidad del viento promedio mensual<br>Brillo solar actual mensual<br>Brillo solar teórico mensual<br>Radiación extraterrestre en la atmósfera<br>Elevación promedio de la zona |
| <i>Penman</i>       | Temperatura del aire<br>Velocidad media del viento<br>Presión atmosférica media al nivel del mar<br>Presión atmosférica media en función de la elevación.<br>La presión de vapor de saturación<br>Radiación extraterrestre<br>La insolación astronómica   |

Tabla No.2.1. Requerimientos de información.

### **CAPÍTULO III.**

## **IDENTIFICACIÓN DE ZONAS EN COLOMBIA PARA IMPLEMENTAR EL MODELO DE THOMAS EN FUNCIÓN DE HIDROSIG**

A lo largo de este capítulo se explicará la selección de cuencas que se realizó para las diferentes zonas del territorio Colombiano para la implementación del modelo de Thomas por medio de la información almacenada en la herramienta computacional HidroSIG-JAVA.

Para esta selección de cuencas se necesitó que cada estación contara con los datos necesarios para la implementación del modelo de Thomas como caudales, precipitación y evaporación potencial.

### **3.1 SELECCIÓN DE LAS CUENCAS A ESTUDIO EN FUNCIÓN DE HIDROSIG**

HidroSIG cuenta con una Base de Datos importante la cual consta con información suficiente para realizar el estudio que se realizó en este trabajo.

Para la selección de las cuencas a estudiar para la realización de este trabajo se analizaron que las estaciones de toma de datos contaran con la información necesaria para la aplicación del modelo de Thomas como caudales, precipitación y evaporación potencial. Esto se realizó con una de las herramientas con las que HidroSIG cuenta, llamada Estaciones explicada en el capítulo I para la verificación de datos de caudal de las estaciones y un código desarrollado en JAVA para la extracción de los valores de los parámetros caudal, precipitación y evaporación potencial.

Además, se observó que estas estaciones no se encontraran aguas abajo de puntos críticos como embalses debido a que hacen cuencas con caudales regulados.

Otro parámetro importante al momento de la selección de las estaciones es que contaran con un área entre cincuenta (50) y cuatrocientos (400). El límite inferior, obedece a que existen diversos métodos como el racional que son válidos hasta este valor, y el límite por arriba es porque conceptualmente el modelo hace suposiciones que experimentalmente han sido comprobadas para cuencas de estos tamaños. Aunque algunas cuencas se encontraban dentro del rango de

área estipulado, éstas fueron desechadas por no contar con un historial de datos necesario para considerarse representativo.

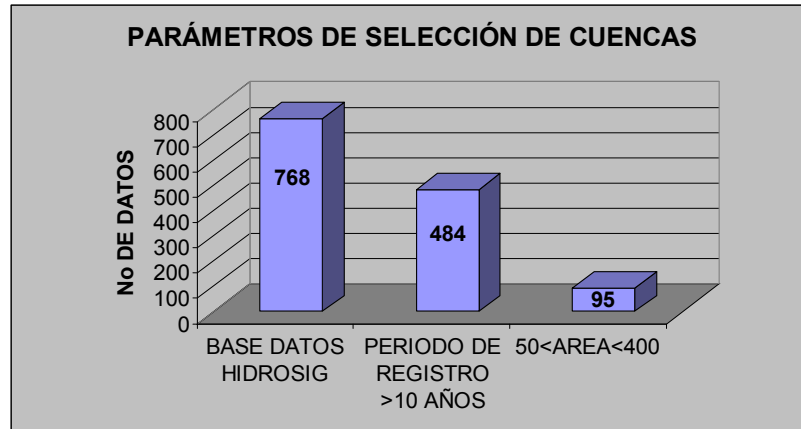


Gráfico 3.1. Parámetros de selección de cuencas.

Teniendo en cuenta lo anterior y después de desechar muchas estaciones se escogieron para este trabajo noventa y cinco (95), mostrando el código que le corresponde a cada una dentro de la Base de Datos de HidroSIG, el nombre de la estación, el tipo de estación, el municipio en donde se encuentra ubicada, la corriente a la cual pertenece, así como el área correspondiente, las cuales se muestran en la tabla No. 2.

| Código  | Nombre             | Tipo | Municipio          | Corriente          | Área (Km2) |
|---------|--------------------|------|--------------------|--------------------|------------|
| 2701727 | Ancon Sur Rms 17   | LG   | La Estrella        | Medellín           | 123,14     |
| 1201706 | Apartado           | LG   | Apartado           | Apartado           | 136,30     |
| 2701706 | Boton El Rg.7      | LG   | Santa Rosa de Osos | Grande (Antioquia) | 328,18     |
| 2308716 | Caramanta          | LG   | San Roque          | Nus                | 300,93     |
| 2702712 | Charcon Pm 1       | LG   | Anorí              | Anorí              | 383,00     |
| 2701757 | Guamito Rms 19     | LG   | Guarne             | Q. Ovejas          | 123,14     |
| 2308707 | Guatape Rn 9       | LG   | San Rafael         | Guatapé            | 150,53     |
| 2702713 | Holanda La Tc 2a   | LG   | Carolina           | Tenche             | 54,69      |
| 2702703 | India La Tc 4      | LG   | Angostura          | Concepción         | 205,05     |
| 2308703 | Mosca La Rn 2      | LG   | Guarne             | La Mosca           | 109,49     |
| 2701713 | Palmichal G 8      | LG   | Carolina           | Guadalupe          | 246,40     |
| 2308738 | Pte Arkansas Rn 16 | LG   | San Carlos         | San Carlos         | 123,21     |
| 2319713 | Pte Sardinias      | LG   | Rionegro           | Santa Cruz         | 300,40     |
| 2701712 | Rionegrto G 6      | LG   | Santa Rosa de Osos | Guadalupe          | 191,42     |
| 2701753 | Suribios Los Pp 5  | LG   | Amalfi             | Riachon            | 54,67      |
| 2702704 | Tabor El Tc 5      | LG   | Angostura          | Concepción         | 68,39      |
| 2701767 | Ye La Rg 10        | LG   | San Pedro          | Chico              | 205,21     |
| 2618707 | Bocatoma Bp 2      | LM   | La Ceja            | Piedras            | 150,64     |

|         |                  |    |                    |              |        |
|---------|------------------|----|--------------------|--------------|--------|
| 1201708 | Carepa           | LM | Chigorodó          | Carepa       | 109,18 |
| 1202704 | Currulao         | LM | Turbo              | Currulao     | 245,33 |
| 2903718 | Campamento       | LG | María La Baja      | Ay. Corral   | 108,53 |
| 2903776 | Esperanza La     | LG | San Jacinto        | Ay. Guamanga | 54,26  |
| 2602731 | Pan De Azucar    | LM | Morales            | Piendamó     | 371,36 |
| 2403708 | Gruta La         | LG | Pesca              | Pesca        | 164,45 |
| 2403704 | Guican           | LG | Guicán             | Nevado       | 205,25 |
| 2401760 | Moniquira        | LG | Moniquirá          | Moniquirá    | 150,76 |
| 2403719 | San Rafael       | LG | Tibasosa           | Chicamocha   | 328,86 |
| 3519702 | Vado Hondo       | LG | Aquitania          | Cusiana      | 191,85 |
| 2403712 | Vega La          | LG | Cuitivá            | Iza          | 178,15 |
| 4403706 | Florencia        | LG | Florencia          | Hacha        | 385,32 |
| 3519703 | Esteros Los      | LG | Aguazul            | Unete        | 219,38 |
| 2602725 | Buenos Aires     | LG | Buenos Aires       | La Teta      | 137,48 |
| 2602709 | Cortijo El       | LG | Silvia             | Piendamó     | 247,57 |
| 2601707 | Lomitas          | LG | Puracé             | Cauca        | 137,58 |
| 4401706 | Papas            | LG | San Sebastián      | Caquetá      | 192,67 |
| 2601706 | Pte Aragon       | LG | Puracé             | Cauca        | 233,89 |
| 2602710 | Pte Carretera    | LG | Piendamó           | Piendamó     | 371,36 |
| 2603701 | Remolino         | LG | El Tambo           | Sucio        | 137,57 |
| 4401707 | Sta Rosa         | LG | Santa Rosa         | Caquetá      | 247,70 |
| 2803706 | Cantaclaro       | LG | Valledupar         | Garupal      | 176,16 |
| 2803704 | Mariangola       | LG | Valledupar         | Mariangola   | 135,50 |
| 2802702 | Matilde La       | LG | Agustín Codazzi    | Jobo         | 297,95 |
| 2804704 | Pte Carretera    | LG | El Copey           | Ariguanicito | 149,53 |
| 3502715 | Animas Las       | LG | Santafé de Bogotá  | Chochal      | 179,53 |
| 3507714 | Barbosa Termales | LG | Tibirita           | Macheta      | 233,14 |
| 3502701 | Boqueron         | LG | Santafé de Bogotá  | Santa Rosa   | 82,40  |
| 3502710 | Caraza           | LG | Cáqueza            | Une          | 178,46 |
| 2401710 | Corralejas       | LG | Carmen de Carupa   | El Hato      | 82,24  |
| 2120701 | Pte Bosa         | LG | Santafé de Bogotá  | Tunjuelo     | 370,60 |
| 2120735 | Pte La Virginia  | LG | Tabio              | Frío         | 82,30  |
| 3506703 | Ubala            | LG | Ubalá              | Chivor       | 96,04  |
| 2120729 | Cabana La        | LM | La Calera          | Teusaca      | 109,75 |
| 2120750 | Cantarrana       | LM | Santafé de Bogotá  | Tunjuelo     | 247,09 |
| 2120726 | Tambor El        | LM | La Calera          | Teusaca      | 68,61  |
| 1508701 | Carraipia        | LG | Maicao             | Carraipia    | 53,99  |
| 1506702 | Cercado El       | LG | San Juan del Cesar | Ranchería    | 392,27 |
| 1506711 | Remedios         | LG | Maicao             | Ay. Tabaco   | 54,04  |
| 2111708 | Guayabo          | LG | Neiva              | Ceibas       | 137,51 |
| 2112701 | Palermo          | LG | Palermo            | Tune         | 329,99 |
| 2112703 | Sta Maria        | LG | Santa María        | Baché        | 96,25  |
| 2906705 | Canal Florida    | LG | Ciénaga            | Sevilla      | 297,53 |
| 1501704 | Guachaca         | LG | Santa Marta        | Guachaca     | 256,71 |
| 2906707 | Rio Frio         | LG | Ciénaga            | Frío         | 297,53 |
| 5205704 | Carlosama        | LG | Cuaspué            | Blanco       | 206,51 |
| 4701702 | Cocha La         | LG | Pasto              | Guamués      | 247,78 |
| 1603704 | Campo Seis       | LG | Tibú               | Tibú         | 353,99 |
| 1605702 | Marcelita        | LG | Abrego             | Oroque       | 54,53  |
| 1604701 | Pte Abrego       | LG | Abrego             | Tarra        | 272,76 |

|         |                   |    |                         |              |        |
|---------|-------------------|----|-------------------------|--------------|--------|
| 4701715 | Joya La           | LG | Villagarzón             | Guineo       | 371,66 |
| 2613711 | Bananera La 6.909 | LG | Pereira                 | Otún         | 137,28 |
| 2613712 | Reina La          | LG | Santa Rosa de Cabal     | San Eugenio  | 192,02 |
| 2621704 | Cangrejo El       | LG | Betulia                 | Q. San Mateo | 260,06 |
| 2405705 | Pte Comuna        | LG | San Vicente del Chucurí | Chucurí      | 341,75 |
| 2319727 | Pte Panega        | LG | Suratá                  | Vetas        | 259,44 |
| 2201703 | Bocas             | LG | Rioblanco               | Blanco       | 329,84 |
| 2201701 | Bocas             | LG | Rioblanco               | Anamichú     | 261,06 |
| 2207703 | Diamante El       | LG | Roncesvalles            | Cucuana      | 357,08 |
| 2203701 | Esperanza La      | LG | Rioblanco               | Mendarco     | 178,64 |
| 2202702 | Gaitania          | LG | Planadas                | Atá          | 247,47 |
| 2207706 | Guamal El         | LG | Rovira                  | Tuamo        | 123,57 |
| 2118702 | Pavo Real         | LG | Valle de San Juan       | Luisa        | 192,22 |
| 2122701 | Piedras           | LG | Piedras                 | Opia         | 329,39 |
| 2116705 | Pte Cunday        | LG | Cunday                  | Prado        | 109,83 |
| 2125707 | Pte San Francisco | LG | Armero (Guayabal)       | Sabandija    | 233,18 |
| 2113702 | Purificacion 1    | LG | Purificación            | Chenche      | 178,54 |
| 2608701 | Bocatoma          | LG | Cali                    | Cali         | 109,96 |
| 2607706 | Buchitolo         | LG | Candelaria              | Fraile       | 274,89 |
| 2608710 | Colegio El        | LG | Cali                    | Aguacatal    | 109,94 |
| 2605702 | Luisa La          | LG | Jamundí                 | Claro        | 82,48  |
| 2605703 | Potrerito         | LG | Jamundi                 | Jamundi      | 96,22  |
| 2610721 | Sorpresa La       | LG | Zarzal                  | Paila        | 315,82 |
| 2609704 | Vergel El         | LG | Buga                    | Guadalajara  | 123,65 |
| 2608714 | Mediacanoa        | LM | Yotoco                  | Mediacanoa   | 54,93  |
| 2606703 | Ortigal           | LM | Florida                 | Desbaratado  | 151,23 |
| 2610720 | Sta Librada       | LM | Tuluá                   | Morales      | 192,32 |

**Tabla No.3.1. Cuencas en estudio.**

### 3.2 EXTRACCIÓN DE DATOS DE LAS ESTACIONES

Para la extracción de los valores de caudal, precipitación y evaporación potencial para cada estación y poder aplicar el código de validación del modelo de Thomas en Linux, como se dijo anteriormente se desarrolló un código en JAVA el cual arrojó dichos valores.

Este código desarrollado en JAVA funciona por medio de unos datos de entrada como topografía, precipitación, evaporación, una ruta de entrada de datos y una de salida de datos, así como se puede observar en la figura No. 15.

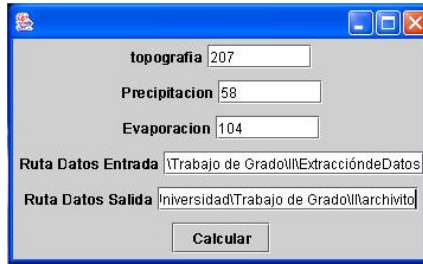


Figura No.3.1. Programa extracción de datos.

Tanto la topografía como la precipitación y la evaporación son datos de ubicación del código para ubicarse dentro de la Base de Datos de HidroSIG, es decir, ubicarse en los mapas seleccionados para realizar el estudio, debido a que HidroSIG cuenta con muchos mapas tanto de modelos digitales de terreno como de variables hidrológicas.

El mapa correspondiente a la topografía es un MDT de Colombia; el mapa de precipitación está relacionado al cálculo que HidroSIG realiza internamente por el método de interpolación de Kriging para esta variable; y el mapa de evaporación potencial incumbe el cálculo de este parámetro por parte de HidroSIG por el método de Turc.

Los datos de las estaciones se anexan (ANEXO A) según el código desarrollado en JAVA.

El código realizado para la extracción de datos de las estaciones se muestra a continuación:

```

/*
 * ValidacionModeloThomas.java
 *
 * Created on 12 de marzo de 2005, 11:09
 */

package hidrosig.modelamiento.objetos;

import hidrosig.raster.objetos.MetaRaster;
import hidrosig.vectorial.objetos.MetaCuenca;
import java.io.File;
import java.io.*;
import java.util.StringTokenizer;
import hidrosig.HidroSIGJava;
import hidrosig.sitio.objetos.MetaDato;
import hidrosig.bd.objetos.ManejadorDeBD;

```



```

import hidrosig.error.HidroSIGException;
import hidrosig.sitio.objetos.*;
/**
 *
 * @author jdgoomez
 */
public class ValidacionModeloThomas {
    private int [] filas;
    private int [] cols;
    private int [] codigosEstacionCaudal;
    /** Creates a new instance of ValidacionModeloThomas */
    public ValidacionModeloThomas(HidroSIGJava padre,MetaRaster mapaTopo,File
archivo,MetaRaster mapaPrecipitacion, MetaRaster mapaEvaporacion, File archivoSalida ) {
        ManejadorDeBD bd = padre.getBaseDeDatos();

        try{
            leerArchivo(archivo);

            BufferedWriter bw = new BufferedWriter(new FileWriter(archivoSalida));

            bw.write("Variable"+'\t'+ "E"+'\t'+ "F"+'\t'+ "M"+'\t'+ "A"+'\t'+ "M"+'\t'+ "J"+'\t'+ "J"+'\t'+ "A"+'\t'+ "S"+'\t'+ "O"
"+'\t'+ "N"+'\t'+ "d"+'\n');
            for(int i=0; i< filas.length;i++){
                System.out.println("Leyendo mapa "+i);
                MetaCuenca cuenca = new MetaCuenca(mapaTopo,cols[i],filas[i]);
                float [] pptCuenca = calcularVariableMensualCuenca(cuenca, mapaPrecipitacion);
                float [] evpCuenca = calcularVariableMensualCuenca(cuenca,mapaEvaporacion);
                MetaEstaciones me = new MetaEstaciones(codigosEstacionCaudal[i],bd);
                DataEstacion de = me.getVariable(0);
                //MetaDato md = new MetaDato(bd, codigosEstacionCaudal[i] );

                //float [] caudales = md.getCicloAnual();
                float [] caudales = de.getCicloAnual();

                bw.write("Precipitacion"+'\t');
                for(int j=0; j< 12; j++)bw.write(Float.toString(pptCuenca[j])+'\t');
                bw.write('\n');

                bw.write("Evaporacion"+'\t');
                for(int j=0; j< 12; j++)bw.write(Float.toString(evpCuenca[j])+'\t');
                bw.write('\n');

                bw.write("Caudales"+'\t');
                for(int j=0; j< 12; j++)bw.write(Float.toString(caudales[j])+'\t');
                bw.write('\n');

            }
            bw.close();

```

```

    }catch(IOException e){e.printStackTrace();}
    catch(HidroSIGException sex){sex.printStackTrace();}
}

private void leerArchivo(File archivo) throws IOException{

    BufferedReader br = new BufferedReader(new FileReader(archivo));
    String cosa = br.readLine();
    java.util.Vector Vfilas, Vcols, Vcodigos;
    Vfilas = new java.util.Vector();
    Vcols = new java.util.Vector();
    Vcodigos =new java.util.Vector();

    do{
        String linea = br.readLine();
        StringTokenizer token = new StringTokenizer(linea);
        Vfilas.add(token.nextToken());
        Vcols.add(token.nextToken());
        Vcodigos.add(token.nextToken());

    }while(br.ready());

    filas = new int[Vfilas.size()];
    cols = new int [Vcols.size()];
    codigosEstacionCaudal = new int[Vcols.size()];

    for(int i=0; i< Vfilas.size();i++){
        String a = (String)Vfilas.elementAt(i);
        filas[i] = Integer.valueOf(a).intValue();
        a = (String)Vcols.elementAt(i);
        cols[i] = Integer.valueOf(a).intValue();
        a = (String)Vcodigos.elementAt(i);
        codigosEstacionCaudal[i] = Integer.valueOf(a).intValue();

    }

}

private float [] calcularVariableMensualCuenca(MetaCuenca mc, MetaRaster mapaVariable)
throws IOException, HidroSIGException{
    float [] valoresPPT = new float[12];

    for(int i=0; i< valoresPPT.length;i++){
        valoresPPT[i] = mc.integreSobre(mapaVariable, i+1);

    }
    return valoresPPT;
}

```

```

/**
 * @param args the command line arguments
 */
public static void main(String[] args) {
    // TODO code application logic here

    try{
        HidroSIGJava hsj = new HidroSIGJava();
        ManejadorDeBD bd = hsj.getBaseDeDatos();
        MetaRaster mapaTopo = new MetaRaster(207,bd);
        File entrada = new File("D:/Usuarios/fquintero/thomas/entrada.txt");
        MetaRaster ppt = new MetaRaster(104,bd);
        MetaRaster evp = new MetaRaster(64,bd);
        File salida = new File("D:/Usuarios/fquintero/thomas/salida.txt");

        ValidacionModeloThomas val = new
        ValidacionModeloThomas(hsj,mapaTopo,entrada,ppt,evp,salida);
        }catch(HidroSIGException e){e.printStackTrace();}
    }
}

```

### 3.3 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN DE LOS PARÁMETROS PARA LA APLICACIÓN DEL MODELO DE TOMAS

La información de las estaciones que se estudiaron al ser proporcionadas por la Base de Datos de HidroSIG se consideran confiables y representativas por todos los métodos utilizados para el cálculo de las variables que se necesitan para realizar un estudio hidrológico.

Cada estación a estudiar presenta una información de caudales de varios años, los cuales son necesarios para el estudio de cada cuenca.

Las noventa y cinco (95) estaciones cuentan con los datos completos en sus registros no siendo necesario completar ningún dato por medio de los diferentes métodos existentes. Pero en caso de ser necesario existen diversos métodos, entre los más utilizados se encuentran el método de la media aritmética, el método del inverso de la distancia, el método del ratio normal, el método del inverso de la distancia modificado, el método de correlación y el método de las isoyetas.

Estos métodos difieren cada uno de la forma de cómo obtener los factores de ponderación y se encuentran citados de acuerdo a su fiabilidad, de menor a mayor, variando esta dependiendo de la escala temporal a utilizar.

Al momento de presentarse falta de información en alguna estación, se puede recurrir a los datos de las estaciones próximas teniendo en cuenta que estas deben tener similar funcionamiento,

mediante  $P_x = \sum_{i=1}^n a_i P_i$  donde  $a_i > 0$  representa el factor de ponderación de la estación  $i$ , para

la estación en estudio  $P_i$  representa el dato observado,  $P_x$  corresponde a la estimación del valor de la estación que se encuentre incompleta y  $n$  es el número de estaciones índice.

Es necesario detectar inconsistencias en los datos que se obtengan y una manera de hacerlo es por el análisis de dobles masas, la cual se fundamenta en la comparación de los datos entre el entorno que rodea la estación y ella misma. Dependiendo de la escala temporal, los valores acumulados de una estación se dibujan enfrentados por medio de la media aritmética o ponderada a los de la estación que se encuentre más cercana. De ahí resulta la curva de doble masas.

Esta teoría muestra la tendencia de seguir una línea recta al momento de representarse unos ejes coordenados con las acumulaciones sucesivas de dos (2) series de valores en el mismo período y con igual régimen meteorológico.

## CAPITULO IV

### RESULTADOS DE LA CALIBRACION Y VALIDACION DEL MODELO DE THOMAS EN FUNCION DE HIDROSIG.

Los resultados que se presentan en este capitulo corresponden a todo el proceso llevado a cabo para la validación del modelo de Thomas.

Para facilidad a la hora de analizar e interpretar los resultados se hará a continuación un breve resumen de los pasos llevados a cabo para obtener los resultados y posteriormente se hará una descripción de la forma en la cual se presentan los mismos.

- *Descripción del proceso.*

El primer paso fue la identificación de las zonas para el estudio. Esta se realizó a partir de criterios de selección como tamaño de la cuenca, periodo de registro de la estación, cantidad y confiabilidad de los datos, entre otros.

A partir de esto se obtuvieron los datos necesarios para aplicar el modelo de Thomas de forma inversa, para tal fin se aplicó el procedimiento de optimización matemática con la rutina AMOEBA, que calibrada con una función objetivo y a partir de las semillas dadas entregaba los seis parámetros que mejor se ajustan a los datos de entrada.

Una vez obtenidos los seis parámetros, se lleva a cabo la aplicación del modelo de Thomas de forma directa, con el fin de comparar los caudales medidos con los caudales simulados a partir del modelo.

- *Presentación de Resultados.*

Los resultados se muestran en el anexo 1, en el cual se presentan en forma de tabla, donde la primera parte corresponde a los 10 mejores resultados obtenidos para cada proceso de iteración, luego para cada una de estos se aplica el modelo de Thomas de forma directa. Cada una de estas lleva el encabezado "Semilla #", donde # varía desde 1 hasta 10 y corresponde a cada uno de los diez resultados presentados en la primera parte. En las

últimas columnas se presenta el valor del caudal real, el valor del caudal simulado, la diferencia numérica en mm/mes y adicionalmente la diferencia porcentual existente entre ellos.

Para ver mejor el comportamiento de los resultados frente a la realidad se presenta una grafica para cada cuenca relacionando los caudales reales contra los simulados para la semilla de mejor ajuste.

#### 4.1 ANALISIS ESTADISTICO DE LOS RESULTADOS.

Para tener un parámetro de referencia sobre la efectividad de la implementación del modelo en cada una de las cuencas se calculó el porcentaje de error mes a mes para cada una de las semillas. Este relaciona el caudal real con el caudal simulado a partir de la implementación del modelo de Thomas. Posteriormente se obtuvo el promedio anual para cada una. En la tabla 4.1 se presentan cada una de las 95 cuencas con el menor porcentaje de error promedio anual para los resultados obtenidos a partir de las 10 diferentes semillas.

| CUENCA No | % ERROR    | CUENCA No | % ERROR    | CUENCA No | % ERROR     |
|-----------|------------|-----------|------------|-----------|-------------|
| 1         | 0,67038559 | 33        | 34,5225399 | 65        | 57,06457742 |
| 2         | 16,0677092 | 34        | 18,6620188 | 66        | 16,50825811 |
| 3         | 15,7747471 | 35        | 33,0979389 | 67        | 8,850646878 |
| 4         | 25,3836714 | 36        | 24,0905419 | 68        | 10,22290648 |
| 5         | 10,6419667 | 37        | 28,9751728 | 69        | 40,74795616 |
| 6         | 7,16386176 | 38        | 11,0394833 | 70        | 9,218110611 |
| 7         | 19,9060532 | 39        | 23,5846373 | 71        | 15,13967102 |
| 8         | 45,339723  | 40        | 34,9725752 | 72        | 9,018322712 |
| 9         | 25,2086545 | 41        | 15,6950694 | 73        | 8,310070223 |
| 10        | 37,5344615 | 42        | 26,2350235 | 74        | 12,79603969 |
| 11        | 16,8579332 | 43        | 28,4310254 | 75        | 19,54293112 |
| 12        | 10,5050584 | 44        | 9,60860443 | 76        | 29,16285014 |
| 13        | 34,9890754 | 45        | 19,9499138 | 77        | 12,81370473 |
| 14        | 26,236947  | 46        | 22,1161781 | 78        | 20,93455261 |
| 15        | 34,9023087 | 47        | 21,2863229 | 79        | 25,51464043 |
| 16        | 22,4732873 | 48        | 3,60120001 | 80        | 22,09022726 |
| 17        | 27,9209224 | 49        | 13,1902579 | 81        | 49,96744354 |
| 18        | 13,5464226 | 50        | 21,8354814 | 82        | 14,84754882 |
| 19        | 37,3494065 | 51        | 21,0548274 | 83        | 23,56162763 |
| 20        | 32,0778887 | 52        | 37,7252501 | 84        | 8,331000341 |
| 21        | 37,2192825 | 53        | 18,6144188 | 85        | 50,2530578  |

|    |            |    |            |    |             |
|----|------------|----|------------|----|-------------|
| 22 | 16,0430359 | 54 | 7,82349798 | 86 | 16,98286226 |
| 23 | 8,90623652 | 55 | 32,2353424 | 87 | 16,15812895 |
| 24 | 70,8257723 | 56 | 17,1122465 | 88 | 16,50326844 |
| 25 | 16,4298951 | 57 | 16,7189432 | 89 | 57,62555693 |
| 26 | 8,74304941 | 58 | 23,3173702 | 90 | 16,26884111 |
| 27 | 46,6084736 | 59 | 16,5040245 | 91 | 26,54530288 |
| 28 | 13,2629111 | 60 | 37,3783402 | 92 | 9,810542374 |
| 29 | 28,3118756 | 61 | 10,4286026 | 93 | 92,01163141 |
| 30 | 22,0521171 | 62 | 12,1500964 | 94 | 9,692508325 |
| 31 | 8,45039503 | 63 | 7,6722911  | 95 | 11,65507914 |
| 32 | 15,9115392 | 64 | 13,1091896 |    |             |

Tabla 4.1 Resumen resultados obtenidos para el total de cuencas en estudio relacionado con el % de error.

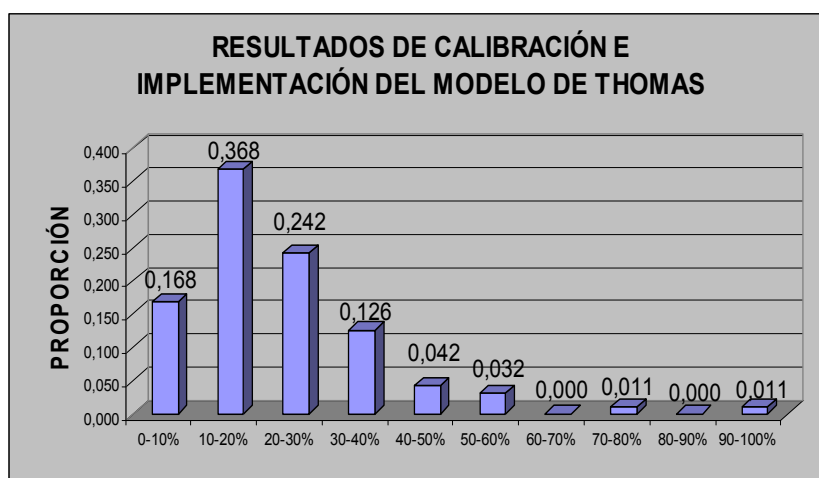


Gráfico No.4.1. Resultados de calibración e implementación del modelo de Thomas.

A partir de los valores presentados en la tabla 4.1 se llevo a cabo un análisis estadístico de los resultados obtenidos. Este consiste en el cálculo de medidas de localización en una muestra, donde la muestra en estudio tiene un tamaño de 95 correspondiente al número de cuencas y esta compuesta por cada una de ellas.

| VALOR MAXIMO | VALOR MINIMO | MEDIA       | DESVIACION ESTANDAR | VARIANZA   |
|--------------|--------------|-------------|---------------------|------------|
| 92,01163141  | 3,601200012  | 23,54109586 | 14,5264337          | 211,017276 |

Tabla 4.2 Medidas de localización y dispersión de los resultados.

La tabla 4.2 presenta datos que permiten identificar el comportamiento de los resultados. Un valor de error máximo de 92% es demasiado alto, y descalifica de forma inmediata la

aplicación del modelo para esta cuenca; Sin embargo encontrar un error mínimo del 3.6% representa diferencias mínimas entre caudales reales y simulados, validando la confiabilidad de la implementación del modelo para esta cuenca.

En el valor de la media se encuentra el promedio de todos los resultados obtenidos, un 23.5% puede considerarse un valor aceptable de acuerdo al tipo de estudio que se esta llevando a cabo y al tamaño de la muestra (en las siguientes secciones se profundizara al respecto).

Adicionalmente para obtener un resumen mas compacto de todo el conjunto de datos se muestra a continuación una distribución de frecuencias para los resultados obtenidos, dando intervalos de 10 % (clases) y agrupando el numero de cuencas que quedaban incluidas en cada uno de estos rangos.

| SERIE | INTERVALO   | FRECUENCIA | FRECUENCIA RELATIVA | FRECUENCIA RELATIVA % |
|-------|-------------|------------|---------------------|-----------------------|
| 1     | 0-10%       | 16         | 0,168               | 16,842                |
| 2     | 10-20%      | 35         | 0,368               | 36,842                |
| 3     | 20-30%      | 23         | 0,242               | 24,211                |
| 4     | 30-40%      | 12         | 0,126               | 12,632                |
| 5     | 40-50%      | 4          | 0,042               | 4,211                 |
| 6     | 50-60%      | 3          | 0,032               | 3,158                 |
| 7     | 60-70%      | 0          | 0,000               | 0,000                 |
| 8     | 70-80%      | 1          | 0,011               | 1,053                 |
| 9     | 80-90%      | 0          | 0,000               | 0,000                 |
| 10    | 90-100%     | 1          | 0,011               | 1,053                 |
|       | <b>SUMA</b> | 95         | 1                   | 100                   |

**Tabla 4.3 Distribución de frecuencia para los resultados obtenidos.**

La distribución de frecuencia presentada en la tabla 4.3 se presenta de forma grafica, para una mejor visualización de los porcentajes de error obtenidos para el total de las cuencas. La serie corresponde al número con el cual se encuentra representado cada intervalo dentro de la grafica.



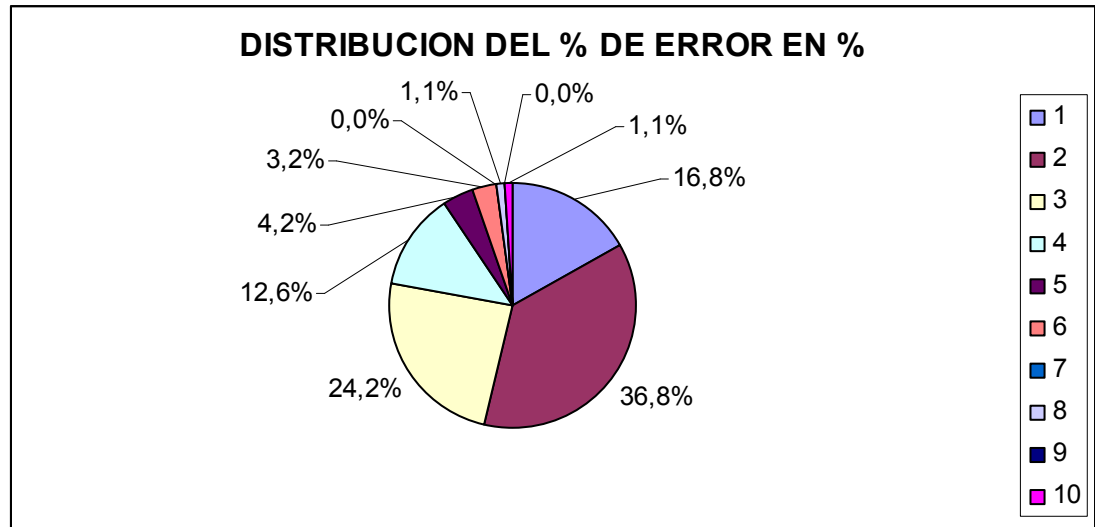


Gráfico No.4.2. Distribución de frecuencia para los resultados.

#### 4.2 ANALISIS HIDROLOGICO DE RESULTADOS.

Dentro de un modelo de balance hídrico son muchos los factores que influyen a la hora de obtener resultados para la calibración un modelo. Variables de tipo físico, matemático, estadístico e incluso el manejo de datos son determinantes en el resultado final.

De acuerdo a las características del presente estudio se adopta el criterio mostrado a continuación para la validación o rechazo de la implementación del modelo de Thomas en las cuencas en estudio.

| RANGO DEL ERROR % | CALIFICACION | OBSEVACIONES                    |
|-------------------|--------------|---------------------------------|
| 0 -10             | BUENO        | Implementación exitosa.         |
| 10 - 20           | ACEPTABLE    | Implementación buena            |
| 20 – 30           | INSUFICIENTE | Error elevado para ser aceptado |
| > 30              | RECHAZO      | No aplica el método utilizado   |

Tabla 4.4. Criterio de validación o rechazo de la implementación del modelo.

#### 4.2.1 CUENCAS ENTRE 0 Y 10% DE ERROR.

El total de cuencas entre el 0 y 10% de error es de 16 y se relacionan a continuación:

| CUENCA No | % ERROR | CUENCA No | % ERROR |
|-----------|---------|-----------|---------|
| 1         | 0,6704  | 26        | 8,7430  |
| 48        | 3,6012  | 67        | 8,8506  |
| 6         | 7,1639  | 23        | 8,9062  |
| 63        | 7,6723  | 72        | 9,0183  |
| 54        | 7,8235  | 70        | 9,2181  |
| 73        | 8,3101  | 44        | 9,6086  |
| 84        | 8,3310  | 94        | 9,6925  |
| 31        | 8,4504  | 92        | 9,8105  |

Tabla 4.5. Cuencas entre el 0 -10% de error.

Para efectos de análisis se tomarán tres de estas cuencas para el estudio de sus características y la relación existente entre ellas, que puedan tomarse como punto de partida para la identificación de las condiciones en las cuales el modelo presenta el comportamiento óptimo deseado. Se tomarán para este caso las cuencas 6, 63 y 54, escogidas a partir de la similitud en el valor del error.

| CUENCA No | % ERROR | AREA (Km <sup>2</sup> ) | RANGO DE PRECIPITACION (mm) | RANGO DE EVAPORACION (mm) | RANGO DE CAUDALES (mm/mes) | ALTURA (msnm) |
|-----------|---------|-------------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------|
| 6         | 7,1639  | 324                     | 82 - 361                    | 91 - 110                  | 99 - 317                   |               |
| 63        | 7,6723  | 263                     | 21 - 321                    | 72 - 91                   | 80 - 270                   |               |
| 54        | 7,8235  | 283                     | 33 - 213                    | 70 - 84                   | 3 - 86                     |               |

Tabla 4.6. Características cuencas a analizar.

De acuerdo a las investigaciones realizadas hasta el momento, aun no se tiene certeza de las limitantes del modelo, por tal razón se hace importante el análisis de las características de las cuencas en las cuales el modelo ajusta.

Las diferencias en cuanto a las áreas no son muy altas, tanto así que podrían estar dentro de un rango común. Los valores de precipitación son altos y muy similares así como los de evaporación.

La altura debe tenerse en cuenta en casos en los cuales aparecen nuevas variables en el ciclo hidrológico, tales como periodos de congelamiento, nieve y factores que no son tenidos en cuenta para estos casos. Aunque Colombia no es un país de estaciones, a mayor altura se hacen más importantes estos fenómenos.

A partir de la aplicación del modelo de Thomas de forma inversa se obtuvieron los 6 parámetros de entrada para su implementación directa. Para las tres cuencas en estudio estos se relacionan a continuación:

| <b>CUENCA No</b> | <b>a</b> | <b>b</b>  | <b>c</b> | <b>d</b> | <b>Sw</b> | <b>Sg</b> |
|------------------|----------|-----------|----------|----------|-----------|-----------|
| 6                | 0,999    | 29,60295  | 1        | 0,8208   | 101,00126 | 100,58295 |
| 63               | 0,99731  | 10        | 0,99385  | 0,17852  | 398,26059 | 184,65604 |
| 54               | 0,99164  | 119,87138 | 0,56481  | 0,01815  | 85,24774  | 97,73124  |

**Tabla 4.7. Parámetros del modelo de Thomas obtenidos para las analizadas.**

Los parámetros obtenidos parecen no tener ninguna relación entre sí. Vale la pena destacar el la igualdad en los almacenamientos para la cuenca 6, esto sucede en casos en los cuales la cuenca se encuentra entre la montaña y la llanura.

#### **4.2.2 CUENCAS ENTRE 10% – 20%**

| <b>CUENCA No</b> | <b>% ERROR</b> | <b>CUENCA No</b> | <b>% ERROR</b> | <b>CUENCA No</b> | <b>% ERROR</b> |
|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|
| 61               | 10,4286026     | 82               | 14,84754882    | 66               | 16,50825811    |
| 12               | 10,5050584     | 71               | 15,13967102    | 57               | 16,7189432     |
| 5                | 10,6419667     | 41               | 15,69506935    | 11               | 16,85793315    |
| 38               | 11,0394833     | 3                | 15,77474713    | 86               | 16,98286226    |
| 95               | 11,6550791     | 32               | 15,91153923    | 56               | 17,11224653    |
| 62               | 12,1500964     | 22               | 16,04303588    | 53               | 18,61441881    |
| 74               | 12,7960397     | 2                | 16,06770917    | 34               | 18,66201877    |
| 77               | 12,8137047     | 87               | 16,15812895    | 75               | 19,54293112    |
| 64               | 13,1091896     | 90               | 16,26884111    | 7                | 19,90605315    |
| 49               | 13,1902579     | 25               | 16,42989507    | 45               | 19,94991377    |
| 28               | 13,2629111     | 88               | 16,50326844    |                  |                |
| 18               | 13,5464226     | 59               | 16,5040245     |                  |                |

**Tabla 4.8. Cuencas entre el 10 -20% de error.**

#### **4.2.3 CUENCAS ENTRE 20% - 30%**

| <b>CUENCA No</b> | <b>% ERROR</b> | <b>CUENCA No</b> | <b>% ERROR</b> |
|------------------|----------------|------------------|----------------|
| 78               | 20,9345526     | 9                | 25,2086545     |
| 51               | 21,0548274     | 4                | 25,3836714     |
| 47               | 21,2863229     | 79               | 25,5146404     |
| 50               | 21,8354814     | 42               | 26,2350235     |
| 30               | 22,0521171     | 14               | 26,236947      |
| 80               | 22,0902273     | 91               | 26,5453029     |

|    |            |    |            |
|----|------------|----|------------|
| 46 | 22,1161781 | 17 | 27,9209224 |
| 16 | 22,4732873 | 29 | 28,3118756 |
| 58 | 23,3173702 | 43 | 28,4310254 |
| 83 | 23,5616276 | 37 | 28,9751728 |
| 39 | 23,5846373 | 76 | 29,1628501 |
| 36 | 24,0905419 |    |            |

Tabla 4.9 Cuencas entre el 20 -30% de error.

#### 4.2.4 CUENCAS DE MÁS DE 30%

| CUENCA No | % ERROR     | CUENCA No | % ERROR     |
|-----------|-------------|-----------|-------------|
| 20        | 32,07788866 | 52        | 37,72525008 |
| 55        | 32,23534239 | 69        | 40,74795616 |
| 35        | 33,09793894 | 8         | 45,33972298 |
| 33        | 34,52253994 | 27        | 46,60847357 |
| 15        | 34,90230865 | 81        | 49,96744354 |
| 40        | 34,97257525 | 85        | 50,2530578  |
| 13        | 34,98907545 | 65        | 57,06457742 |
| 21        | 37,21928245 | 89        | 57,62555693 |
| 19        | 37,34940646 | 24        | 70,82577228 |
| 60        | 37,37834016 | 93        | 92,01163141 |
| 10        | 37,53446151 |           |             |

Tabla 4.10 Cuencas con mas del 30% de error.

#### 4.3 INFLUENCIA DE LA UBICACIÓN GEOGRÁFICA FRENTE AL ERROR OBTENIDO.

Observando la posición de las diferentes cuencas en el territorio Colombiano, y teniendo en cuenta los resultados obtenidos para cada una de ellas se puede observar que no existe un factor de tipo geográfico que sea determinante a la hora de obtener resultados de la implementación del modelo. La distribución de las cuencas permite tener un estudio de las características del territorio Colombiano, aunque no son suficientes para generar mapas o criterios globales.

Sin embargo, se recomienda siempre tener en cuenta este aspecto, ya que puede ser determinante en otras zonas en estudio, ya que los diferentes componentes del ciclo hidrológico pueden variar su comportamiento de acuerdo a la zona.

#### **4.4 ANÁLISIS DE LAS VARIABLES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO Y QUE AUMENTAN LA INCERTIDUMBRE Y EL ERROR.**

Son muchos los elementos que se ven involucrados en el proceso, no solo de tipo físico e hidrológico, sino también en los procedimientos y pasos recorridos hasta el resultado final. A continuación se describen los mas importantes involucrados en el presente estudio con una breve descripción para cada uno.

✓ **Tipo de estudio.**

En este estudio se lleva a cabo un análisis multianual, con periodos de registro superiores a diez años, de los cuales se sacaron promedios para obtener un año representativo de todos los anteriores y dar estos datos como entrada para la calibración del modelo. Estos promedios aunque son lo más cercano a la realidad traen consigo involucrados pequeños porcentajes de variación producidos entre los años por efecto de fenómenos como sequías, crecientes, veranos o inviernos prolongados entre otros.

✓ **Ubicación de la cuenca.**

En algunos casos la mano del hombre ha intervenido el ciclo hidrológico y por consiguiente el comportamiento de la cuenca. En situaciones en las cuales aguas arriba de la cuenca se encuentre una represa o embalse no es posible llevar a cabo el estudio, puesto que esta cumple la función de regular los caudales y por consiguiente ya no son representativos del comportamiento natural del sector.

✓ **Área de drenaje.**

El área de drenaje tiene especial importancia por ser un dato muy utilizado a lo largo del proceso y se deben estudiar dos aspectos fundamentales.

En primer lugar se debe tener en cuenta que el modelo varía su comportamiento de acuerdo al tamaño de la cuenca. En cuencas muy grandes se complica el control y

estimación de variables hidrológicas, caso contrario al de cuencas pequeñas donde los datos obtenidos puedan ser mas representativos por encerrar una menor área de influencia de la estación.

En segundo lugar es de vital importancia la delimitación de la cuenca, para este caso se llevo a cabo utilizando HIDROSIG-JAVA, donde a través de un comando delimita la cuenca y marca la red de drenaje de la misma.

✓ **Calidad de los datos.**

Los datos antes de llegar a su destino final son manejados y manipulados por muchas personas, desde la persona encargada de tomar las lecturas, hasta, en este caso, el equipo de desarrollo de HIDROSIG-JAVA. Esto hace que en algunos casos se pierdan datos o su calidad se vea alterada por errores de digitación, lectura o interpretación.

Los datos constituyen la base con la cual entra en funcionamiento todo modelo de balance hídrico y de estos depende su validación e implementación.

✓ **Usos del suelo.**

El modelo no aplica para zonas urbanas, con suelos impermeables (vías pavimentadas, techos de casas, etc.) y estructuras como alcantarillados y sistemas de drenaje.

✓ **Método de estimación de ETP.**

La ETP se tomo a partir de HIDROSIG-JAVA utilizando mapas generados a partir de varias metodologías de calculo. Para este caso se utilizo el mapa que estima el valor de ETP a partir del método de TURC, y adicionalmente se realizan interpolaciones para los puntos en los cuales no se tiene el valor. La interpolación se realiza utilizando el método de Kriging. La seguridad en la estimación de la ETP y su posterior interpolación no existe, dando un porcentaje de error al estudio.

✓ **Método de estimación de Precipitación.**

La precipitación se estima a través de estaciones de medición. En casos en los cuales sobre el área de estudio no se tengan datos, HIDROSIG-JAVA ofrece un dato interpolado del mapa de precipitación. Al igual que el caso anterior afecta el resultado final.

✓ **Efectividad de la optimización matemática con AMOEBA.**

Cabe la posibilidad de que AMOEBA no cumpla con efectividad el objetivo de encontrar los valores que cumplan con las características necesarias para las cuencas. Es posible que su búsqueda quede atrapada en valores de mínimos locales y no llegue al valor mínimo esperado o que su comportamiento para la función no sea el adecuado dentro de los límites establecidos para los parámetros del modelo de Thomas.

✓ **Efectividad de la función objetivo.**

La función objetivo es muy importante en el proceso. Esta es la encargada de hacer estricta o no la búsqueda de los valores que mejor se comporten con el modelo. En este caso se probaron varias (ya mencionadas en apartados anteriores) y se tuvo en cuenta no solo una rigurosa búsqueda para el proceso, sino también la facilidad para analizar su resultado.

✓ **HIDROSIG-JAVA como herramienta para este tipo de estudios.**

HIDROSIG-JAVA es una herramienta muy útil en estudios de hidrología. Tiene funciones y comandos que optimizan y reducen procesos y además cuenta con una amplia base de datos hidroclimáticos del país. Su facilidad para trabajar modelos digitales de terreno, mapas en dos y tres dimensiones hacen de este un elemento de gran ayuda para la aplicación de modelos de balance hídrico.

Sin embargo este paquete computacional aun se encuentra en desarrollo y las versiones disponibles son de prueba, por lo cual por ahora no es una herramienta cien por ciento confiable y es posible que contenga algunos errores que afecten el resultado final.

✓ **Validez del modelo de Thomas.**

La veracidad y validez del modelo de Thomas no esta comprobada aun. Esta, al igual que todas las que la preceden, hacen parte de una investigación para analizar sus bondades, limitaciones y posibles aplicaciones en la hidrológica. Es posible que el método no aplique para todos los casos en estudio.



## CAPITULO V

### CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

- ✓ La distribución geográfica de las cuencas no es representativa del territorio colombiano, teniendo en cuenta que éstas se encuentran localizadas en la parte central y lo largo de las cordilleras, notándose vacíos en las regiones de la amazonía, orinoquía, pacífica y los santanderes.
- ✓ La base de datos con la que HidroSIG cuenta es significativa en cuanto a cantidad. Evaluando calidad y confiabilidad siempre existe incertidumbre sobre los datos, debido a que los datos son manejados y manipulados por muchas personas y entidades desde su toma en los puntos de aforo hasta el momento de llegar a las manos de los encargados de los estudios hidrológicos.
- ✓ Frente a la simulación del balance hídrico más del 60% de los resultados presentan unos valores de error aceptables para las 95 cuencas en estudio, seleccionadas a partir de los parámetros mencionados y con el procedimiento descrito a lo largo del documento.
- ✓ En los resultados obtenidos la tendencia del modelo es a acertar en la simulación de caudales, lo cual se observa claramente en las graficas anexas para cada cuenca, donde se presenta un resultado mes a mes comparando caudal simulado y caudal medido; sin embargo se observan meses en los cuales se aleja el valor calculado para el caudal medido y el simulado.
- ✓ Teniendo en cuenta los múltiples aspectos que influyen en un proceso de optimización e implementación de modelos de balance hídrico el error medio encontrado está dentro de un rango aceptable.
- ✓ HidroSIG es una herramienta muy útil para estudios de balance hídrico. teniendo en cuenta sus características y múltiples aplicaciones; sin embargo se debe tener en cuenta que HidroSIG es un paquete computacional que aun se encuentra en desarrollo y esta en constante cambio.

- ✓ La implementación del modelo de Thomas es viable con datos confiables y un adecuado proceso de optimización matemática.
- ✓ Se recomienda en futuros estudios y trabajos utilizar diferentes métodos de optimización matemática.
- ✓ Es aconsejable implementar distintas funciones objetivo con el fin de encontrar la que encuentre el mejor resultado para el tipo de estudio a realizar.
- ✓ Obtener una mayor densidad en los datos, no solo de tipo espacial sino también en cantidad y calidad, ofrece un menor rango de incertidumbre a este tipo de estudios.

## **ANEXOS**

**ANEXO 1. Archivo selección de cuencas.**

**ANEXO 2. Archivo validación y resultados de la implementación del modelo de Thomas para las 95 cuencas.**

**ANEXO 3. Comparación gráfica entre  $Q_{medido}$  y  $Q_{simulado}$  para las 95 cuencas.**

## BIBLIOGRAFÍA

- ✓ [www.eda.etsia.upm.es](http://www.eda.etsia.upm.es)
- ✓ [www.unalmed.gov](http://www.unalmed.gov)
- ✓ Flechas P, Caro A. ANÁLISIS DEL BALANCE HÍDRICO DE LA SABANA DE BOGOTÁ, MEDIANTE EL MÉTODO DE THOMAS. Bogotá, diciembre de 2002.
- ✓ WILLIAM M. ALLEY, Water Resources Research, Vol 20, N°8, Virginia, 1984.
- ✓ OBREGÓN N, FRAGALÁ F, BLANCO A, GÓMEZ L. Implementación del modelo de Thomas en la cuenca alta del río Checua para la estimación de la recarga (Sabana de Bogotá, Cundinamarca, Colombia) XV Seminario nacional de Hidráulica e Hidrología. Medellín, Agosto 2002.
- ✓ INSTITUTO COLOMBIANO DE HIDROLOGIA, Estudio comparativo de formulas de evapotranspiración potencial, Bogotá D.C., 1985.
- ✓ CEDEX, Master en Hidrología, Estimación de precipitación. MARCELO RODRÍGUEZ, Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Curso Internacional sobre Ingeniería General y Aplicada.
- ✓ KEELER, K.F. (1944) "Some uses and deficiencies of climatological data" Transactions, American Geophysical Union 25: 420-32.
- ✓ OSCAR J. MESA, Estimación de la evapotranspiración en Colombia, Postgrado en aprovechamiento de recursos hidráulicos, 1998.
- ✓ HIMAT, estudio comparativo de las diferentes fórmulas de la estimación de la evapotranspiración potencial, 1985.
- ✓ EAAB y JICA, El estudio del Desarrollo Sostenible de los Recursos Hídricos Subterráneos en la Sabana de Bogotá en la Republica de Colombia, Informes de Avance e Intermedio, 2001.
- ✓ England C.B. Relative leaching potentials estimated from hydrologic soil groups. Wat Res. Bull. Am. Wat.Res. Ass. 9, 3. pp. 590-597. 1973.
- ✓ Nerdel, J.A., and Mead, R. 1965. Computer Journal, Vol 7, P. 308

# **ANEXO 3**

### CUENCA 1

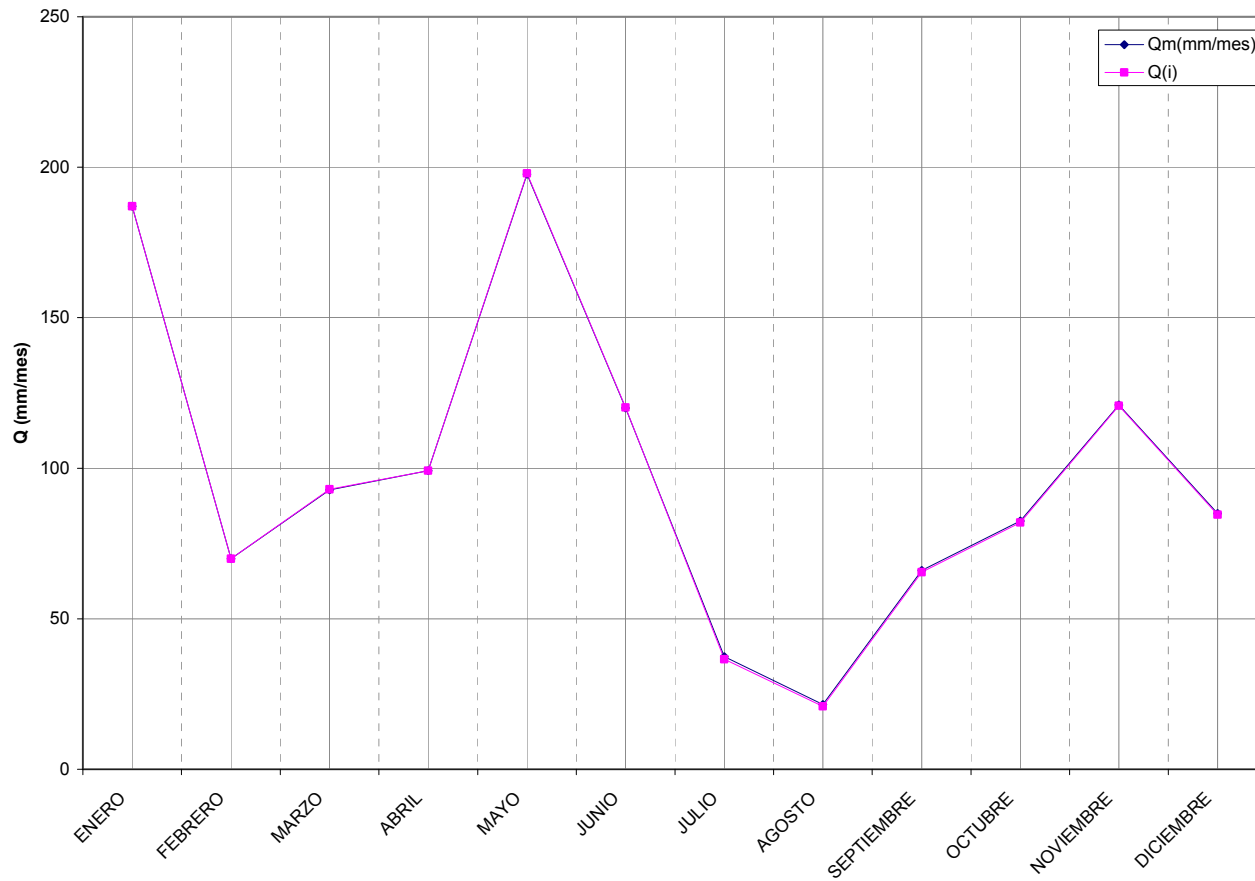


Gráfico No. 1. Comparación Qsimulado Vs Qmedido de la cuenca 1.

### CUENCA 2

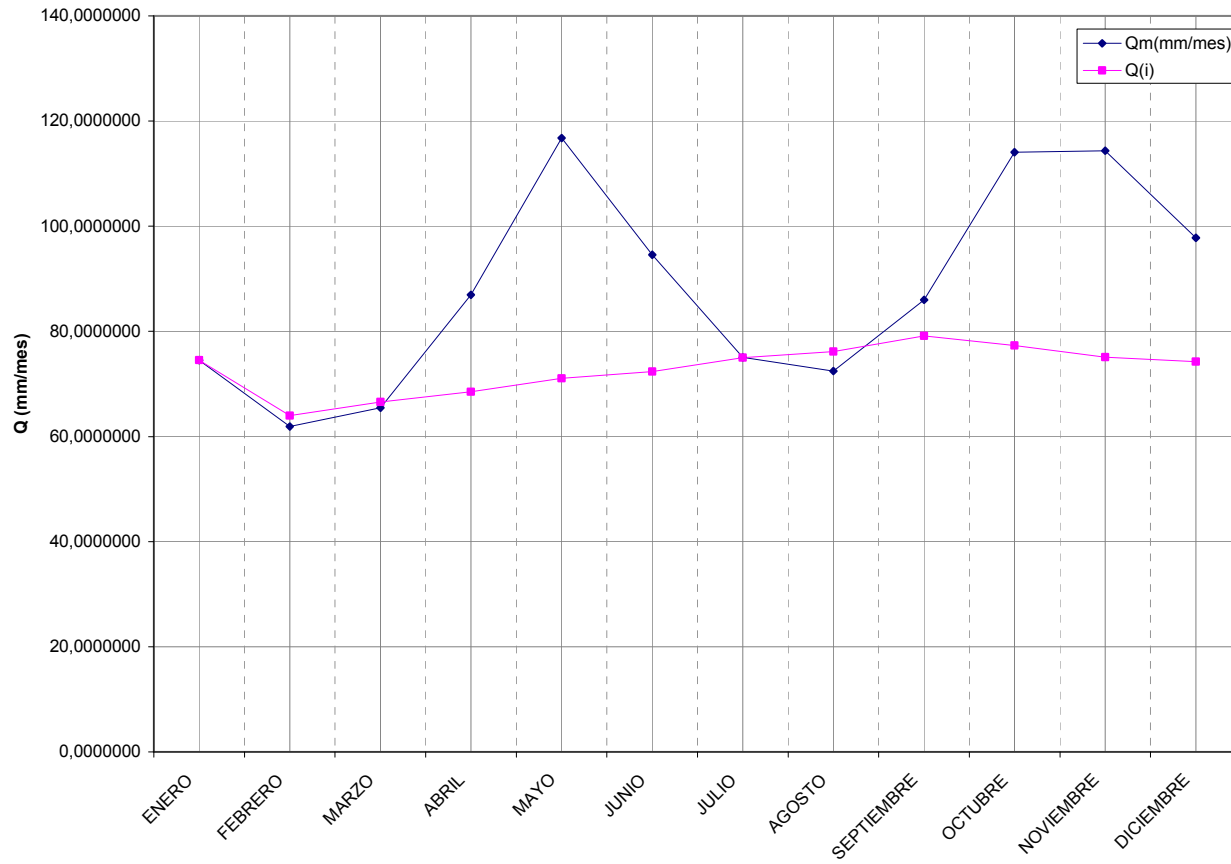


Gráfico No. 2. Comparación  $Q_{simulado}$  Vs  $Q_{medido}$  de la cuenca 2.

### CUENCA 3

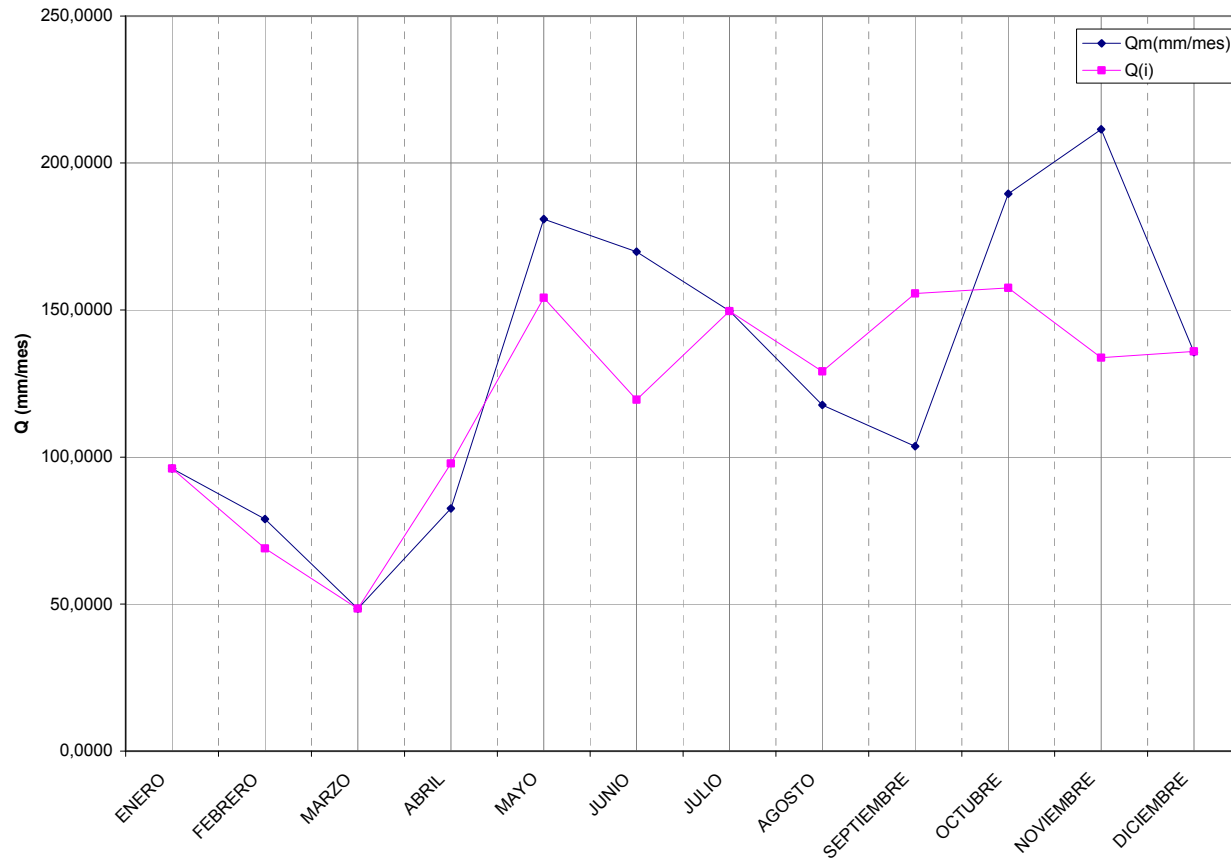


Gráfico No. 3. Comparación Qsimulado Vs Qmedido de la cuenca 3.



### CUENCA 4

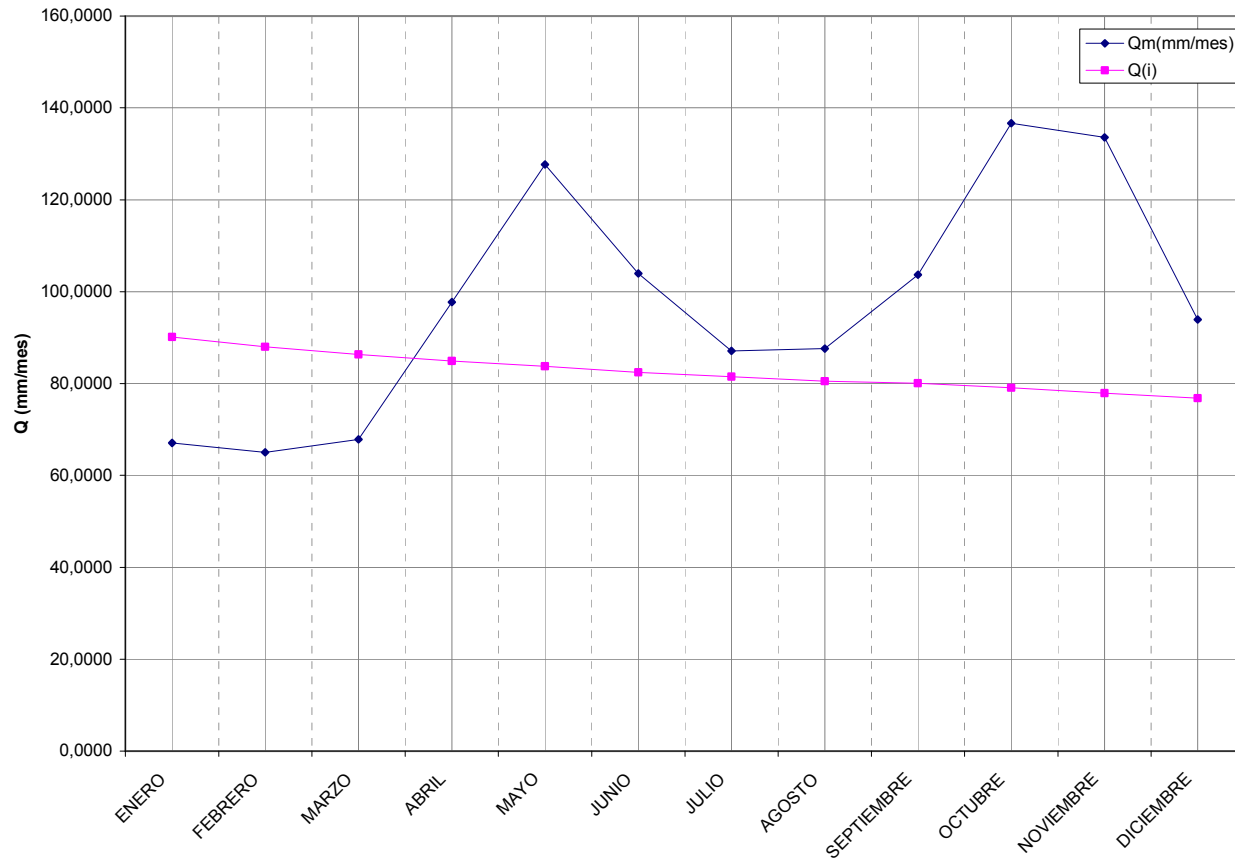


Gráfico No. 4. Comparación  $Q_{simulado}$  Vs  $Q_{medido}$  de la cuenca 4.

### CUENCA 5

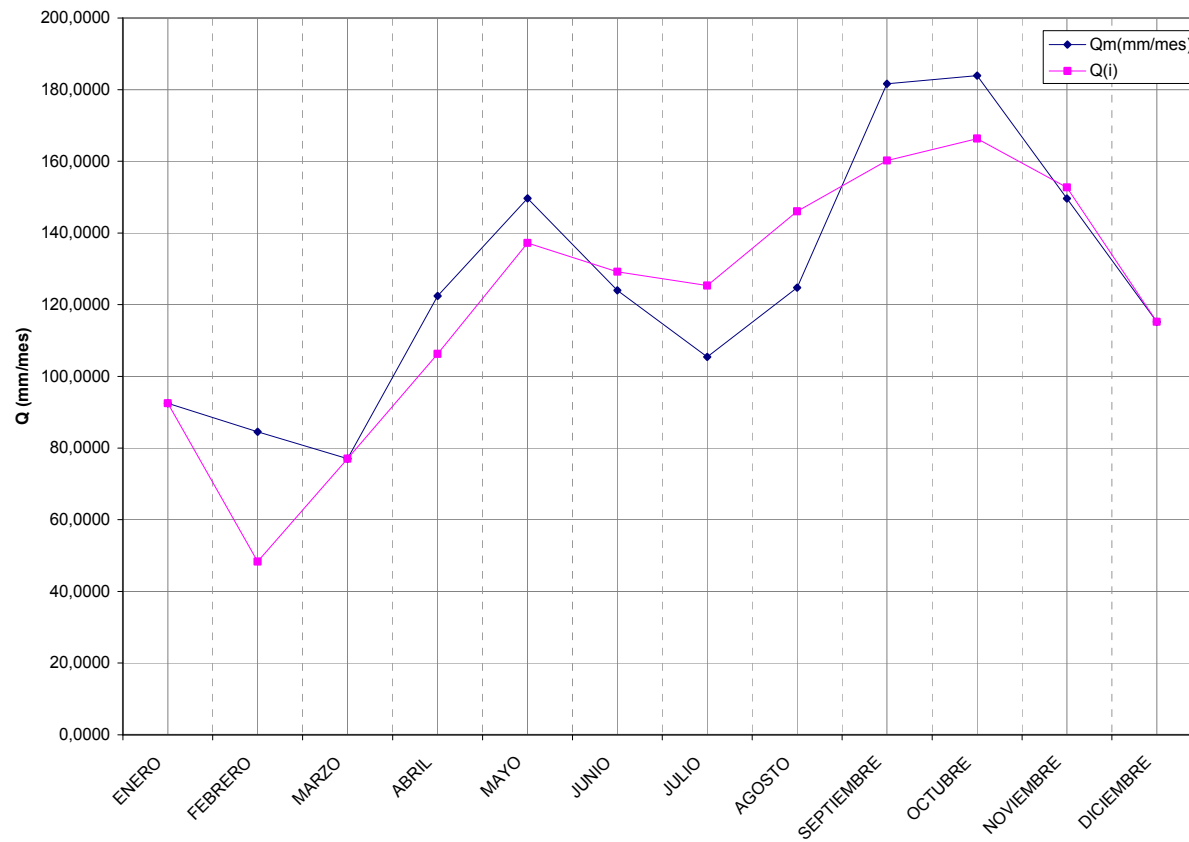


Gráfico No. 5. Comparación  $Q_{simulado}$  Vs  $Q_{medido}$  de la cuenca 5.

CUENCA 6

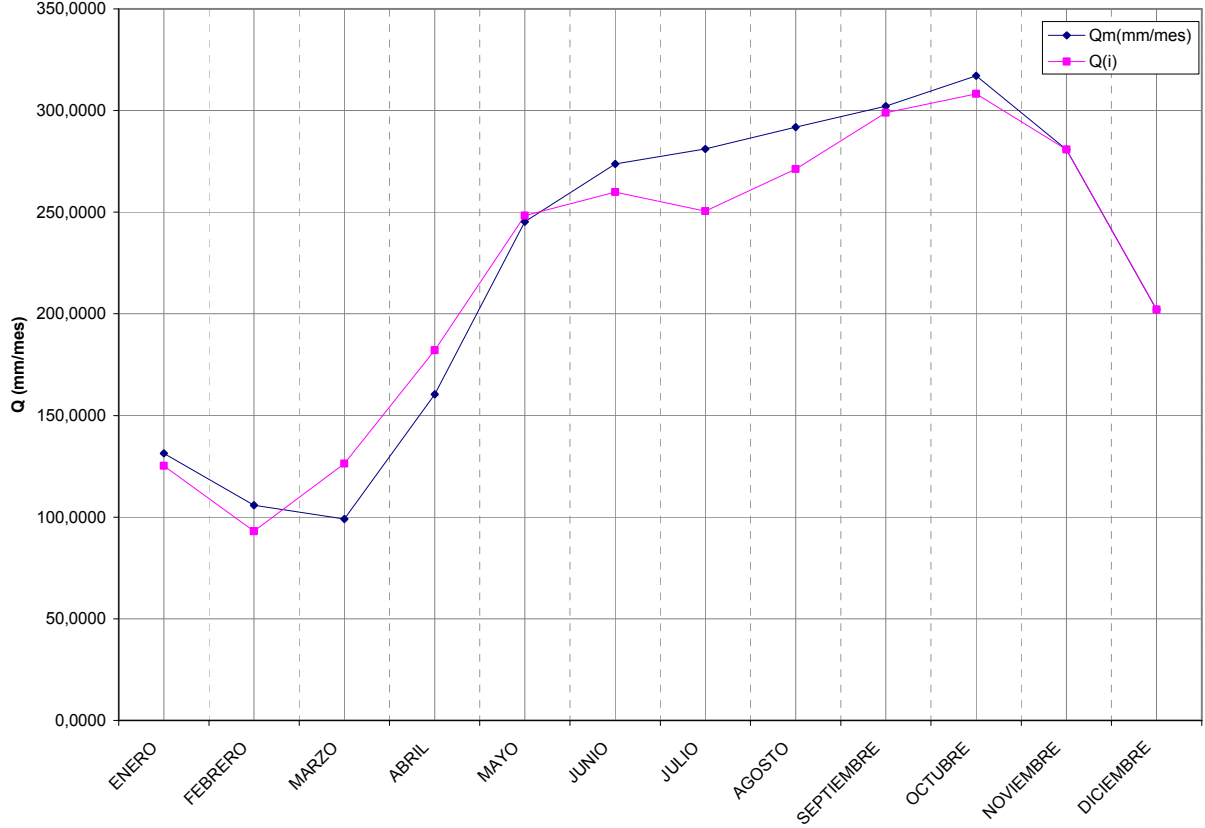


Gráfico No. 6. Comparación Qsimulado Vs Qmedido de la cuenca 6.

### CUENCA 7

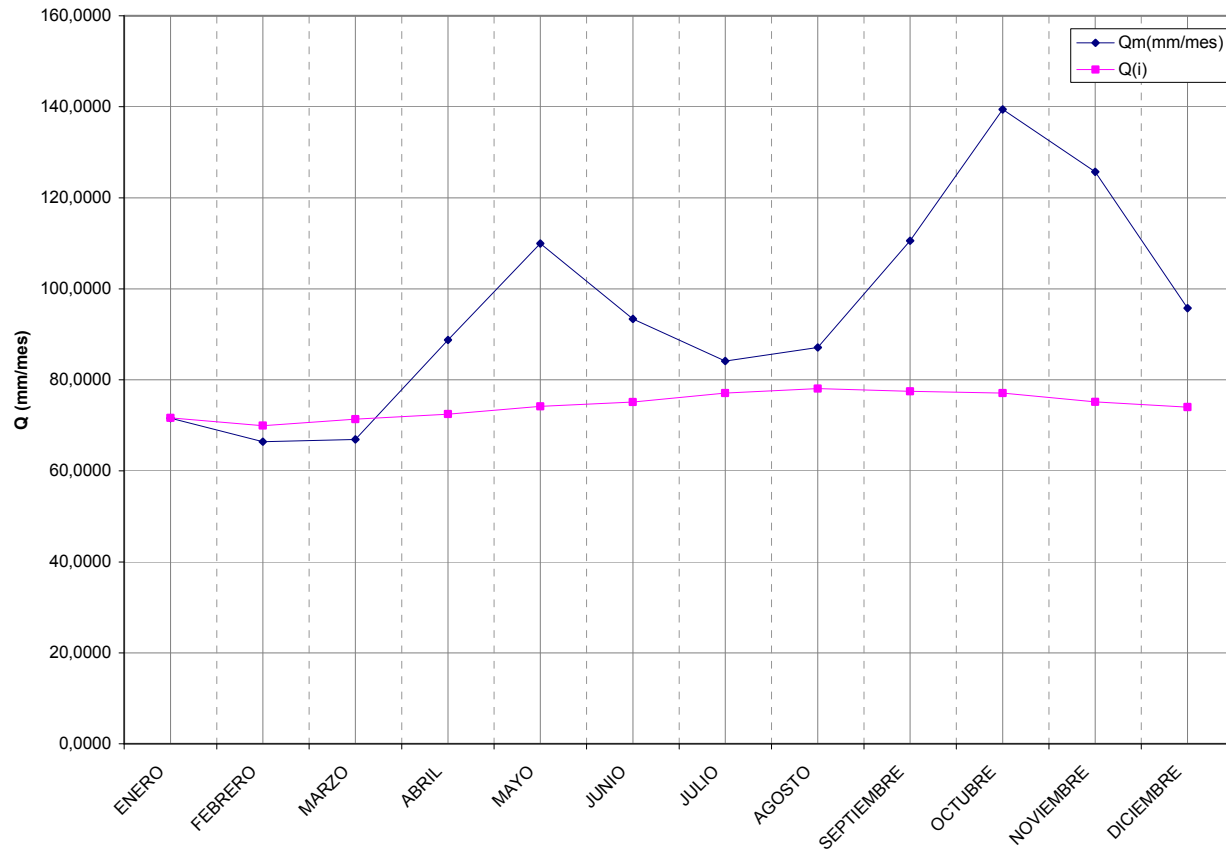


Gráfico No. 7. Comparación  $Q_{simulado}$  Vs  $Q_{medido}$  de la cuenca 7.

### CUENCA 8

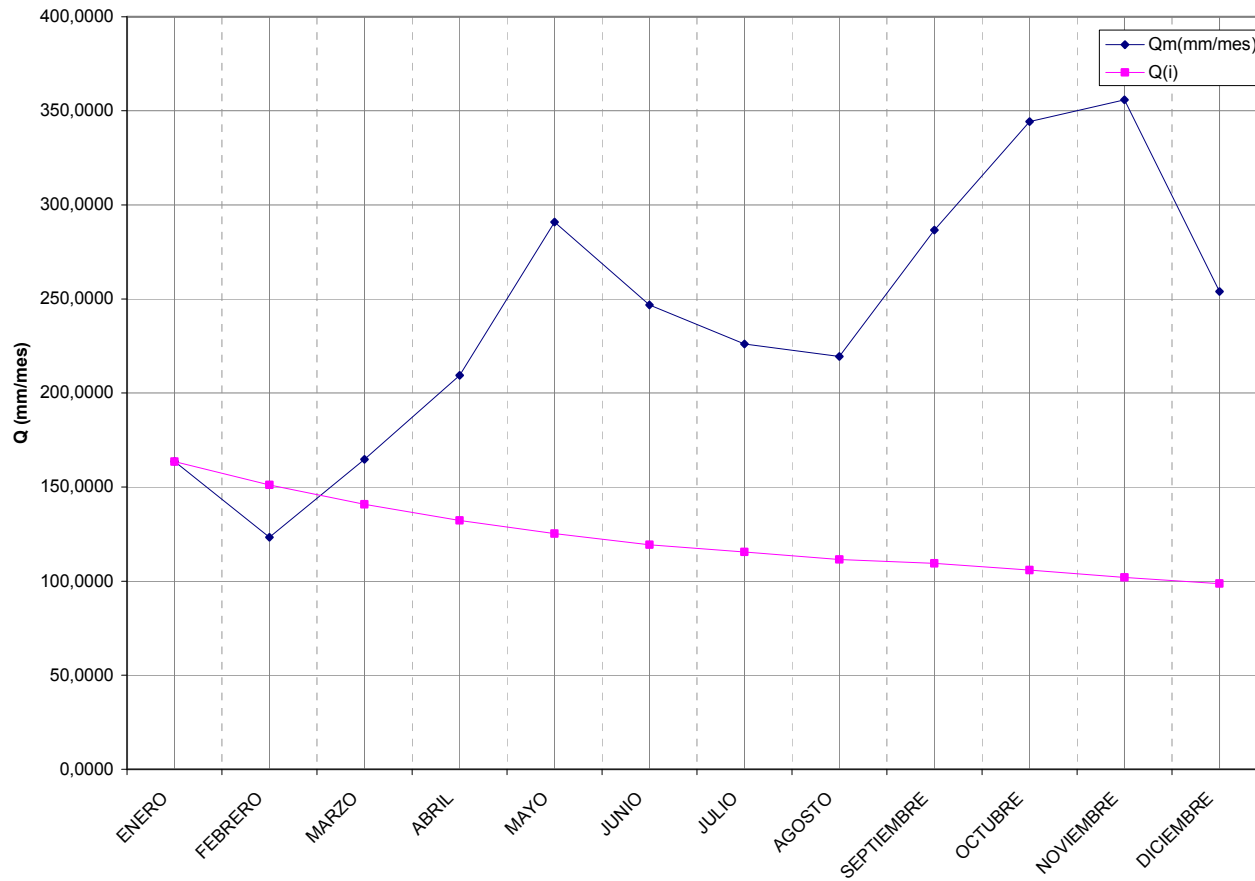


Gráfico No. 8. Comparación  $Q_{simulado}$  Vs  $Q_{medido}$  de la cuenca 8.

### CUENCA 9

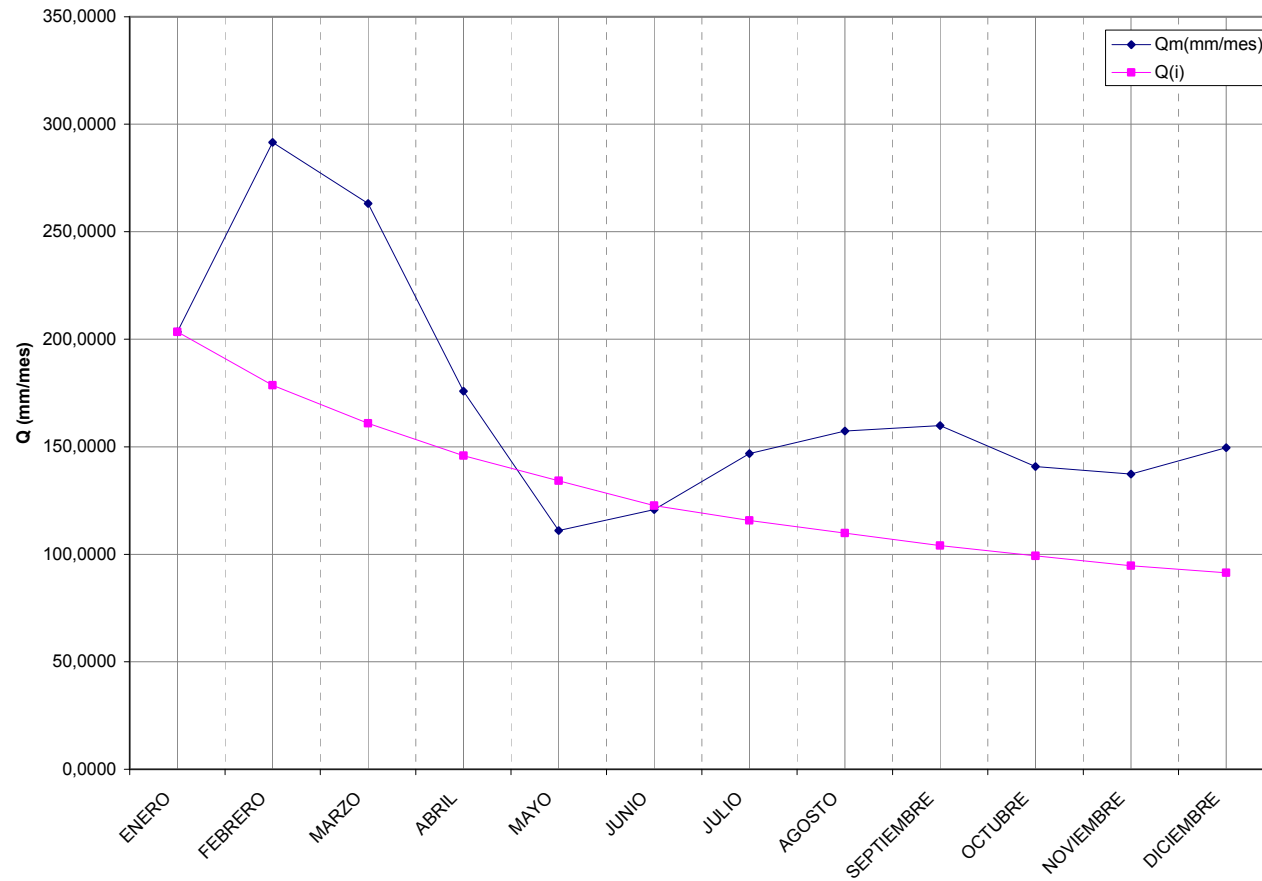


Gráfico No. 9. Comparación  $Q_{simulado}$  Vs  $Q_{medido}$  de la cuenca 9.

### CUENCA 10

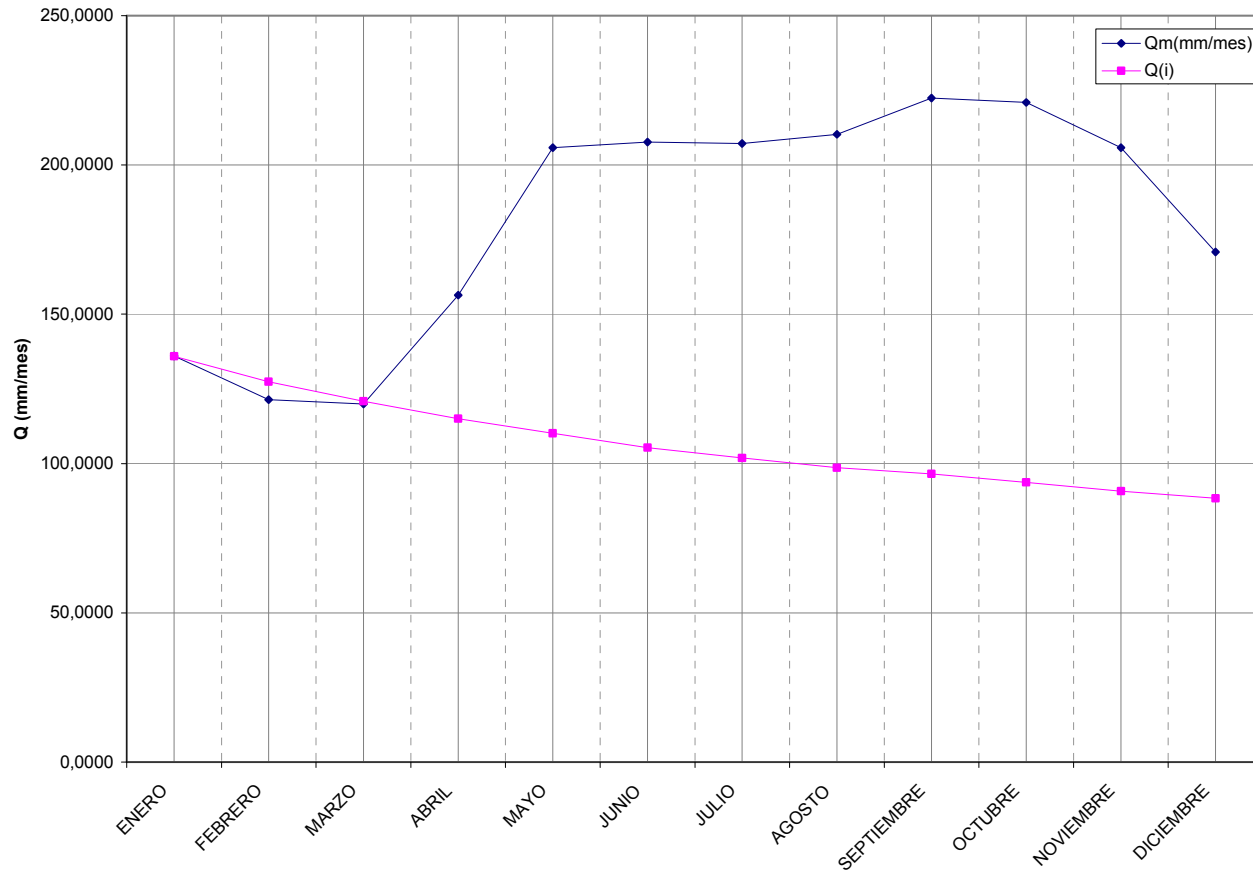


Gráfico No. 10. Comparación Qsimulado Vs Qmedido de la cuenca 10.

### CUENCA 11

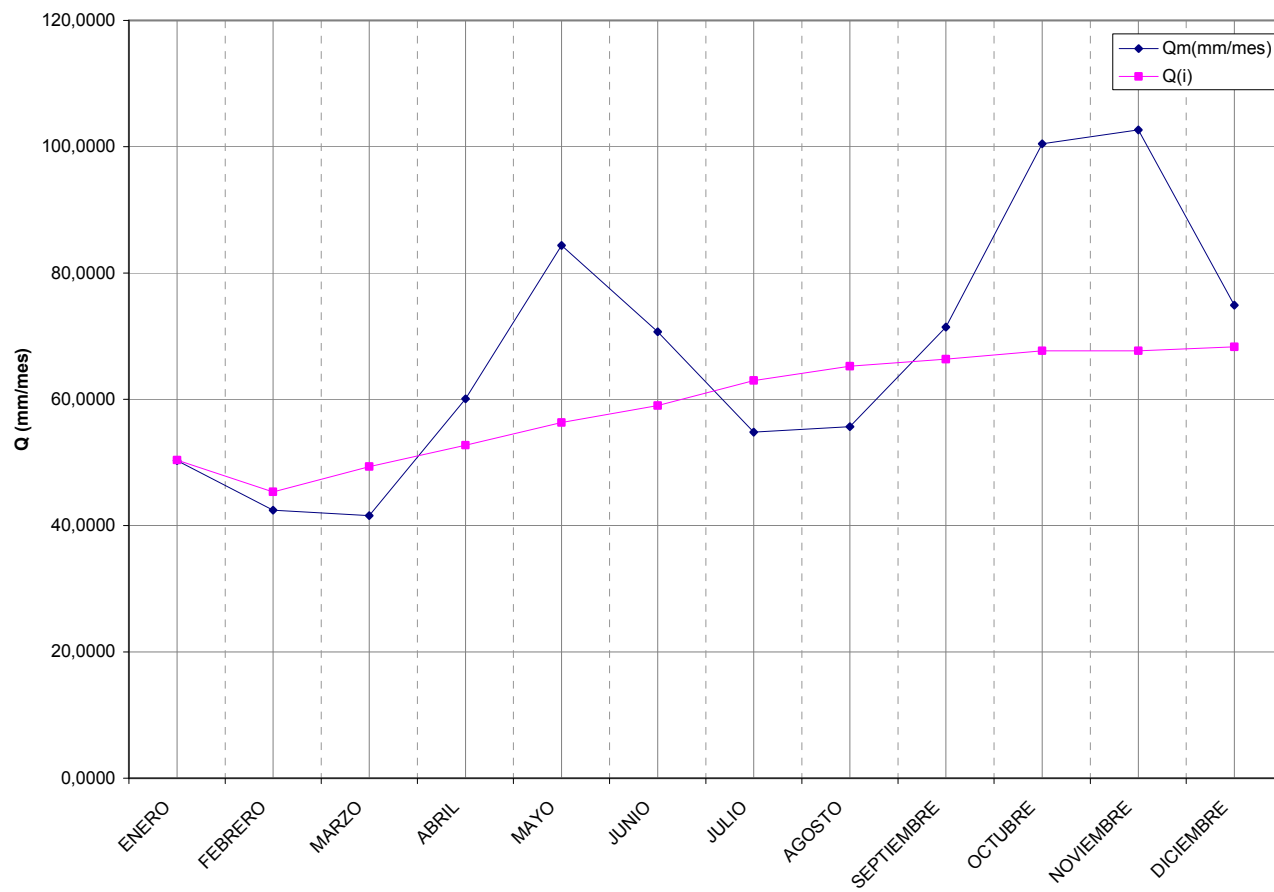


Gráfico No. 11. Comparación  $Q_{simulado}$  Vs  $Q_{medido}$  de la cuenca 11.



### CUENCA 12

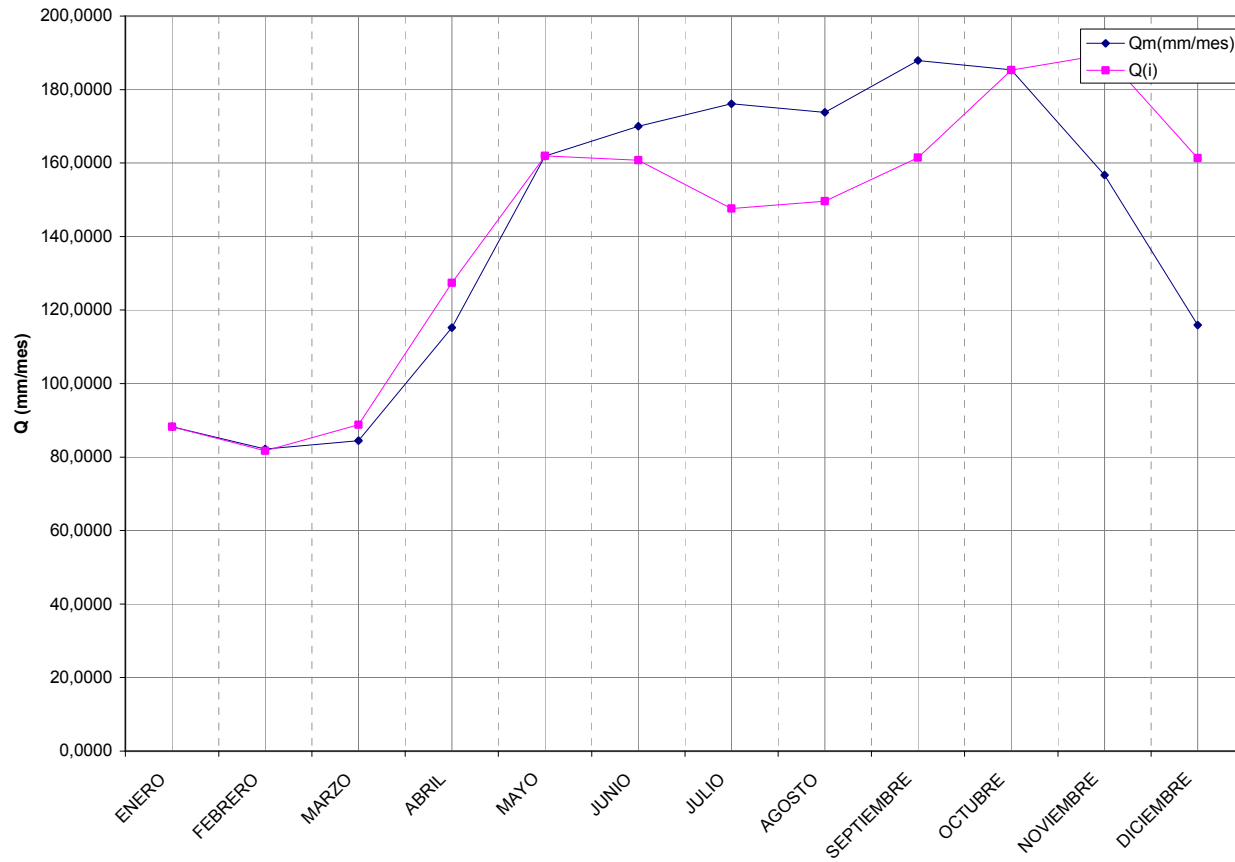


Gráfico No. 12. Comparación Qsimulado Vs Qmedido de la cuenca 12.

CUENCA 13

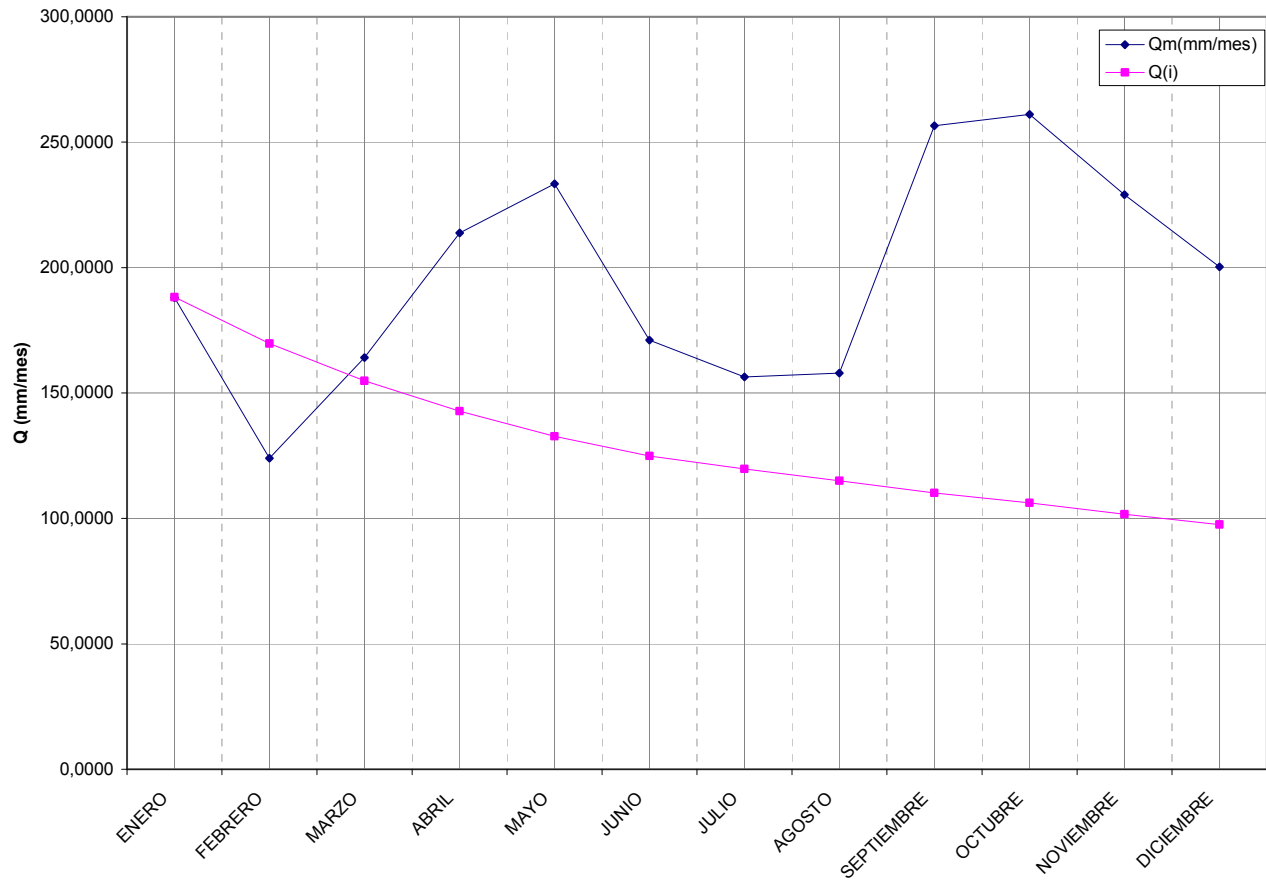


Gráfico No. 13. Comparación  $Q_{simulado}$  Vs  $Q_{medido}$  de la cuenca 13.

### CUENCA 14

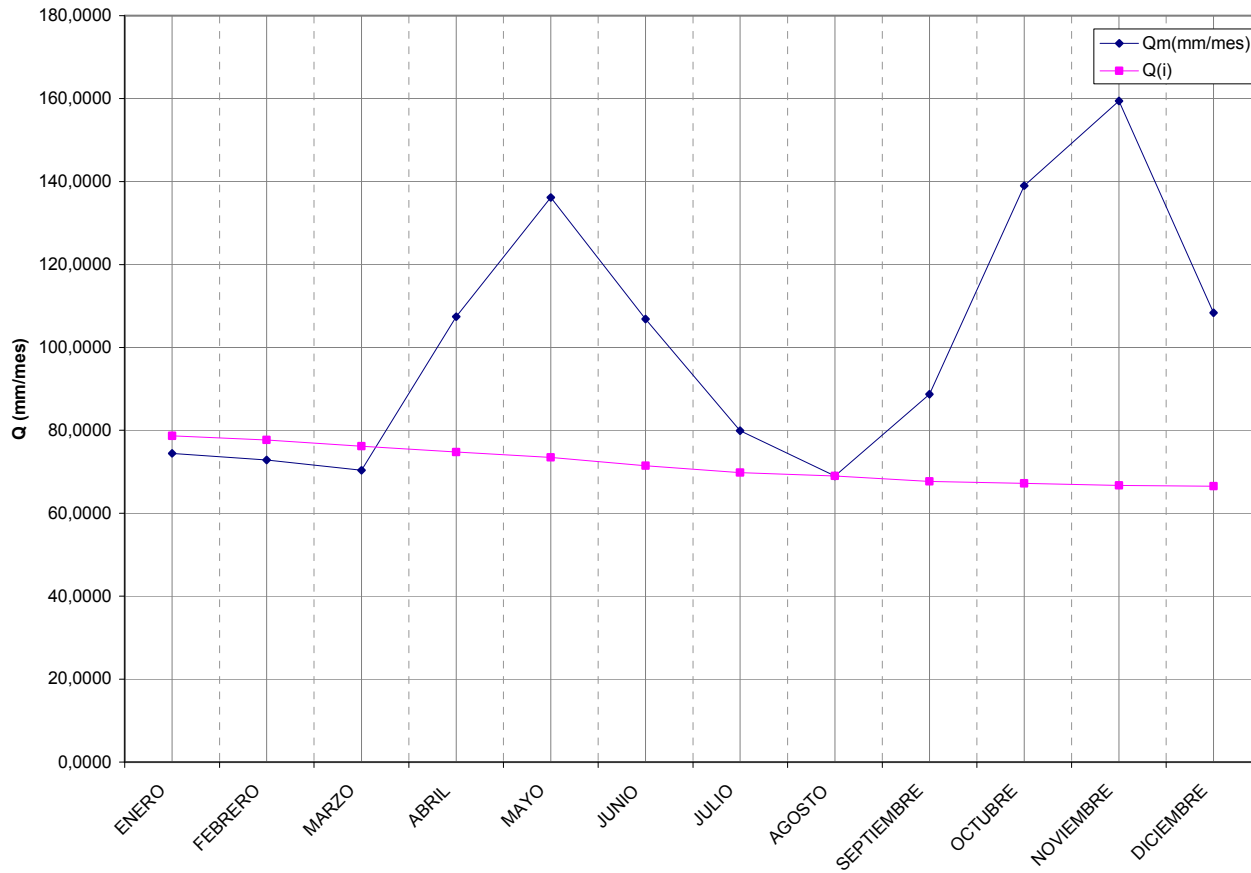


Gráfico No. 14. Comparación  $Q_{simulado}$  Vs  $Q_{medido}$  de la cuenca 14.

### CUENCA 15

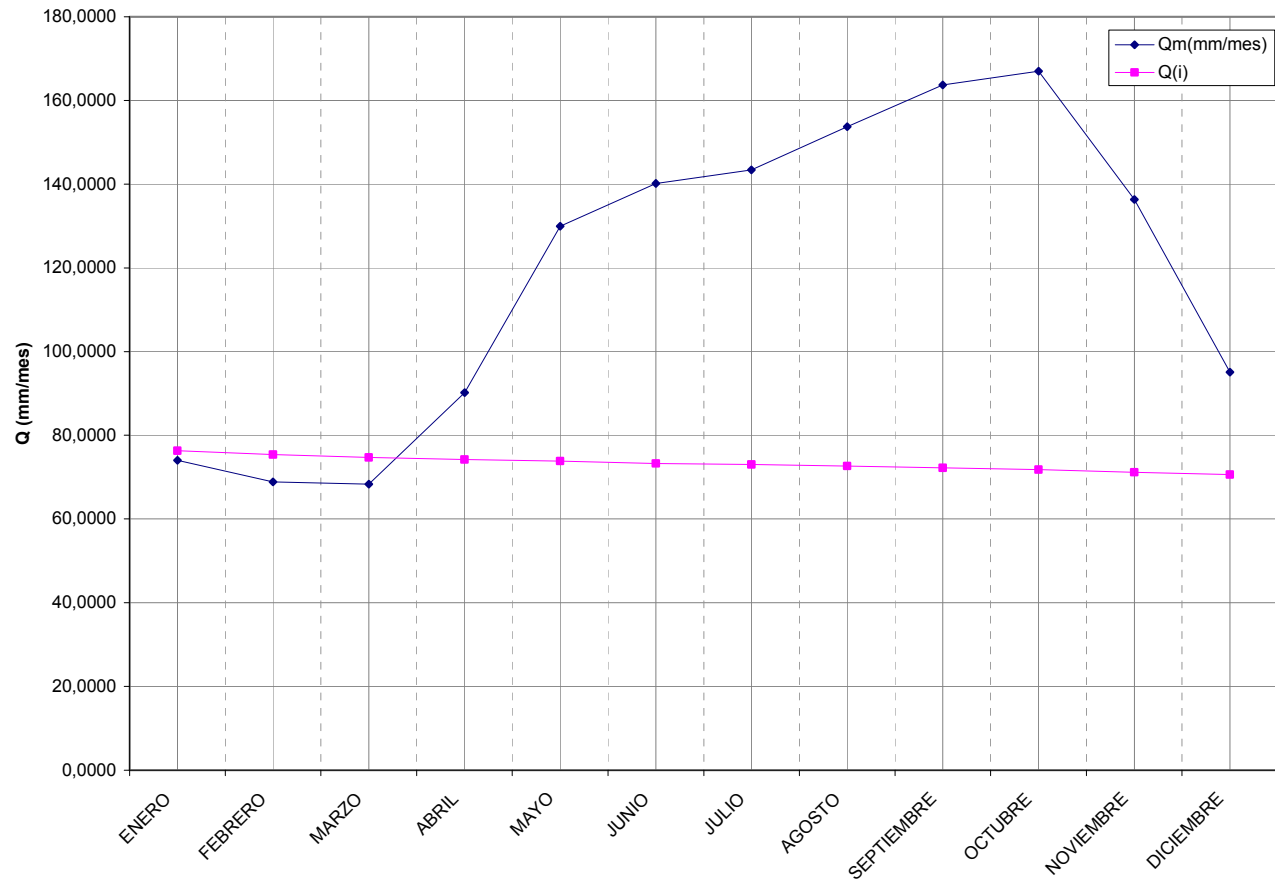


Gráfico No. 15. Comparación  $Q_{simulado}$  Vs  $Q_{medido}$  de la cuenca 15.

### CUENCA 16

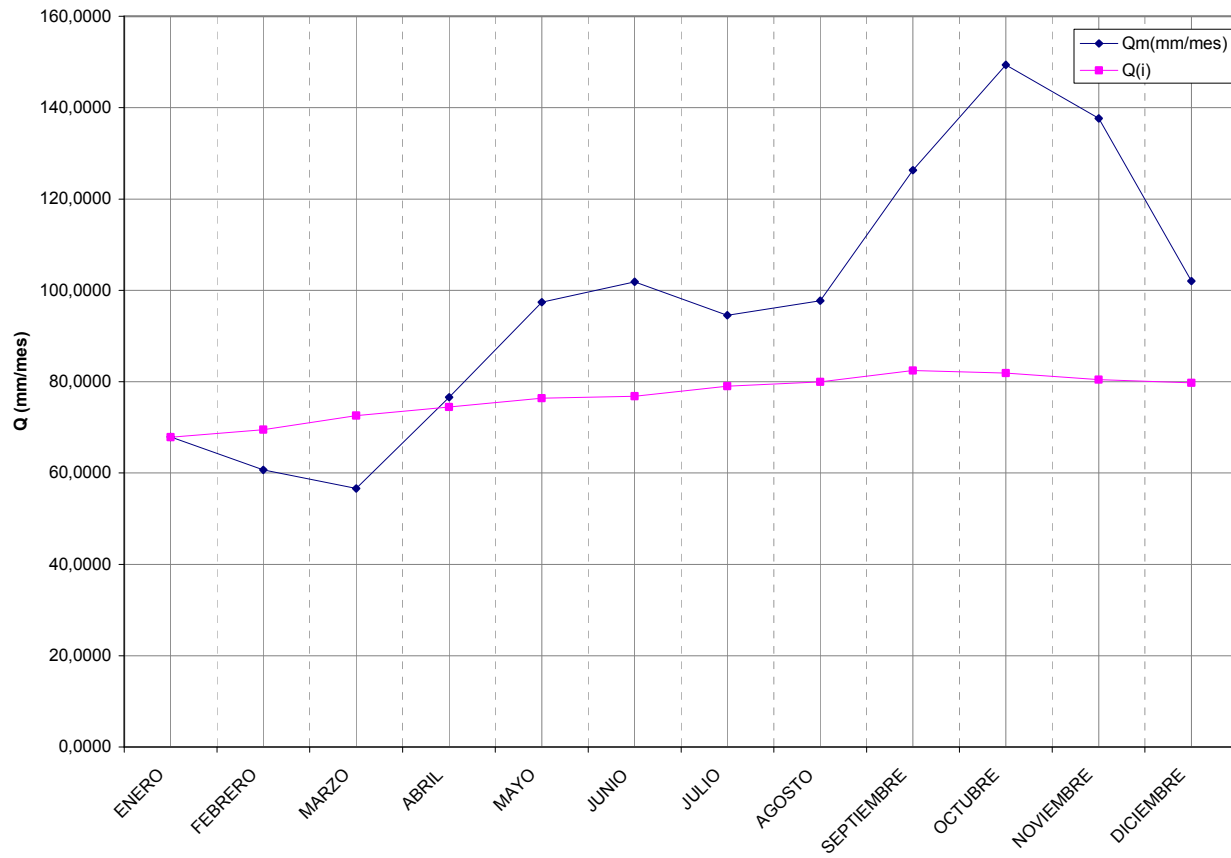


Gráfico No. 16. Comparación  $Q_{simulado}$  Vs  $Q_{medido}$  de la cuenca 16.

### CUENCA 17

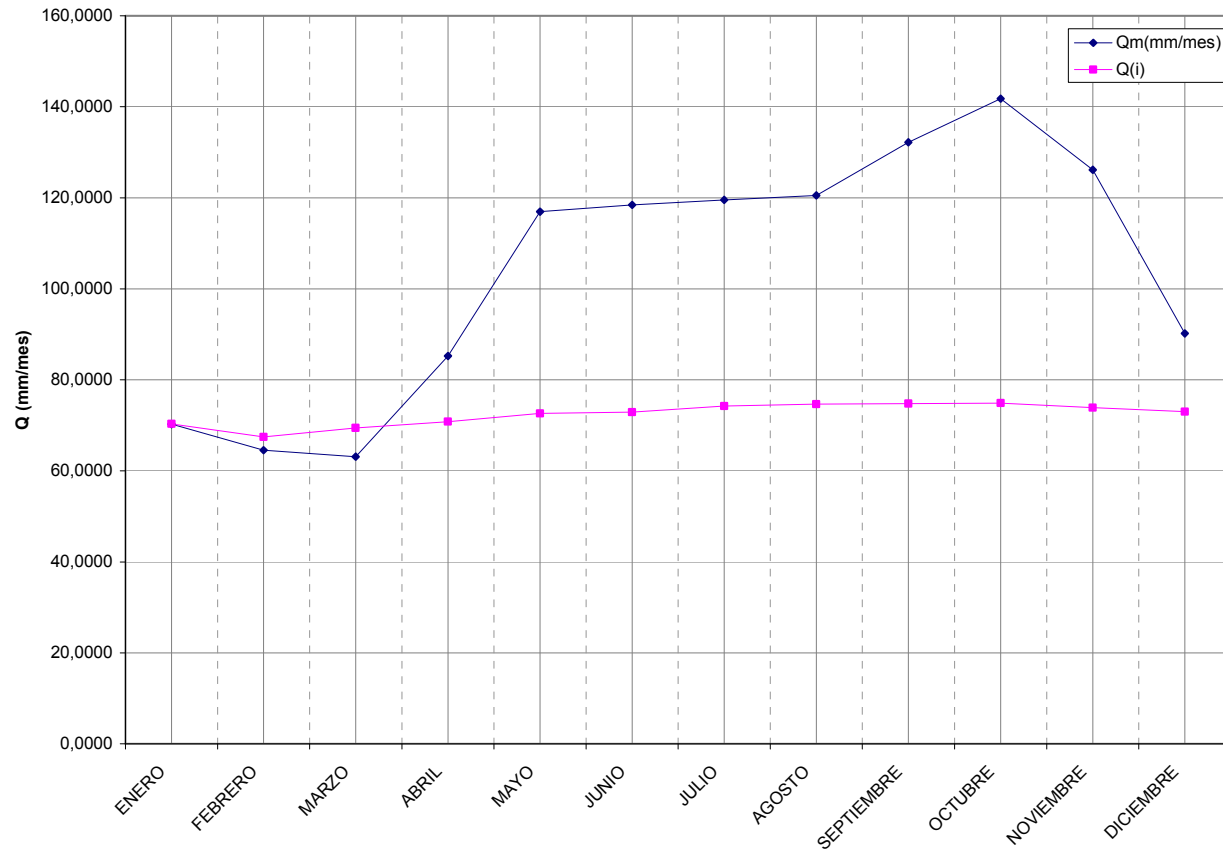


Gráfico No. 17. Comparación  $Q_{simulado}$  Vs  $Q_{medido}$  de la cuenca 17.

### CUENCA 18

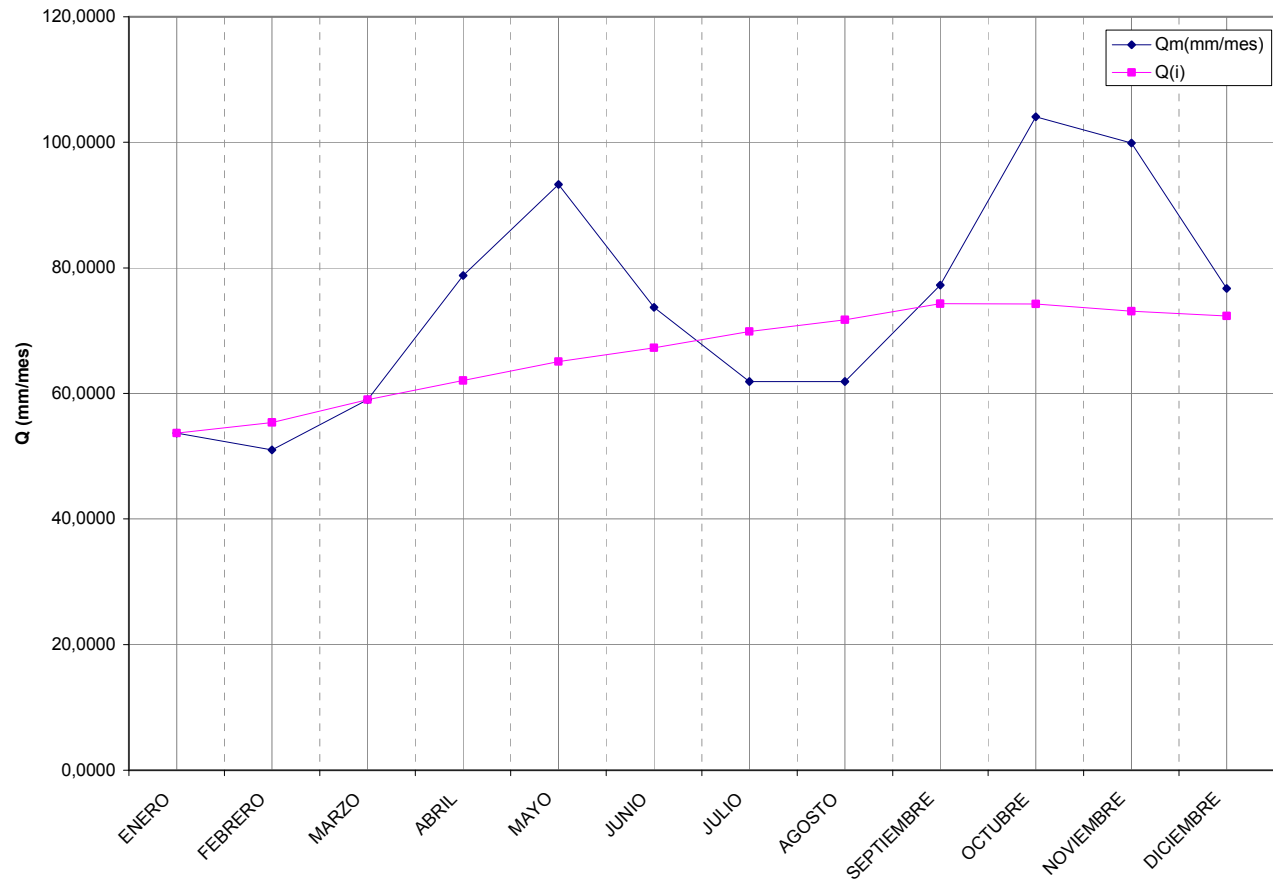


Gráfico No. 18. Comparación  $Q_{simulado}$  Vs  $Q_{medido}$  de la cuenca 18.

CUENCA 19

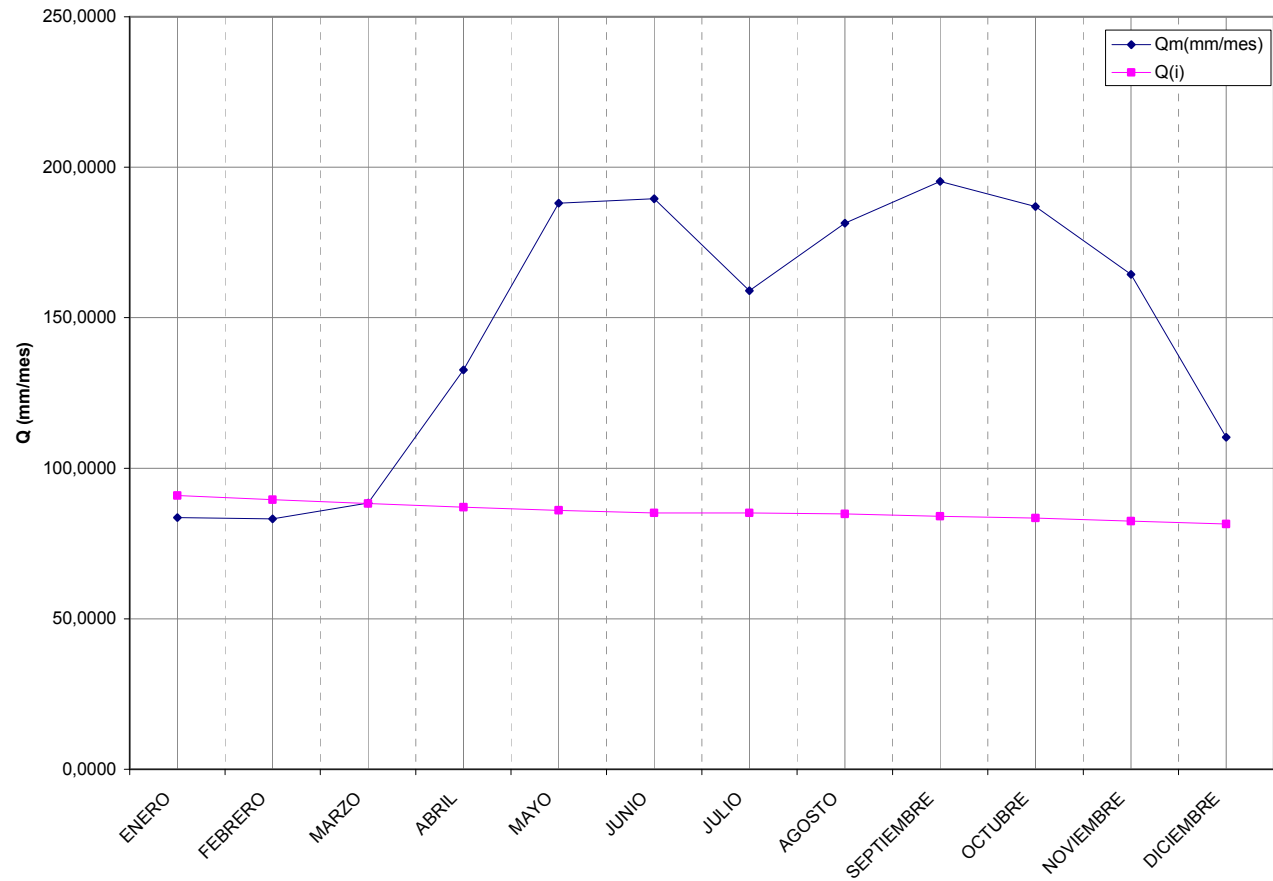


Gráfico No. 19. Comparación Qsimulado Vs Qmedido de la cuenca 19.



CUENCA 20

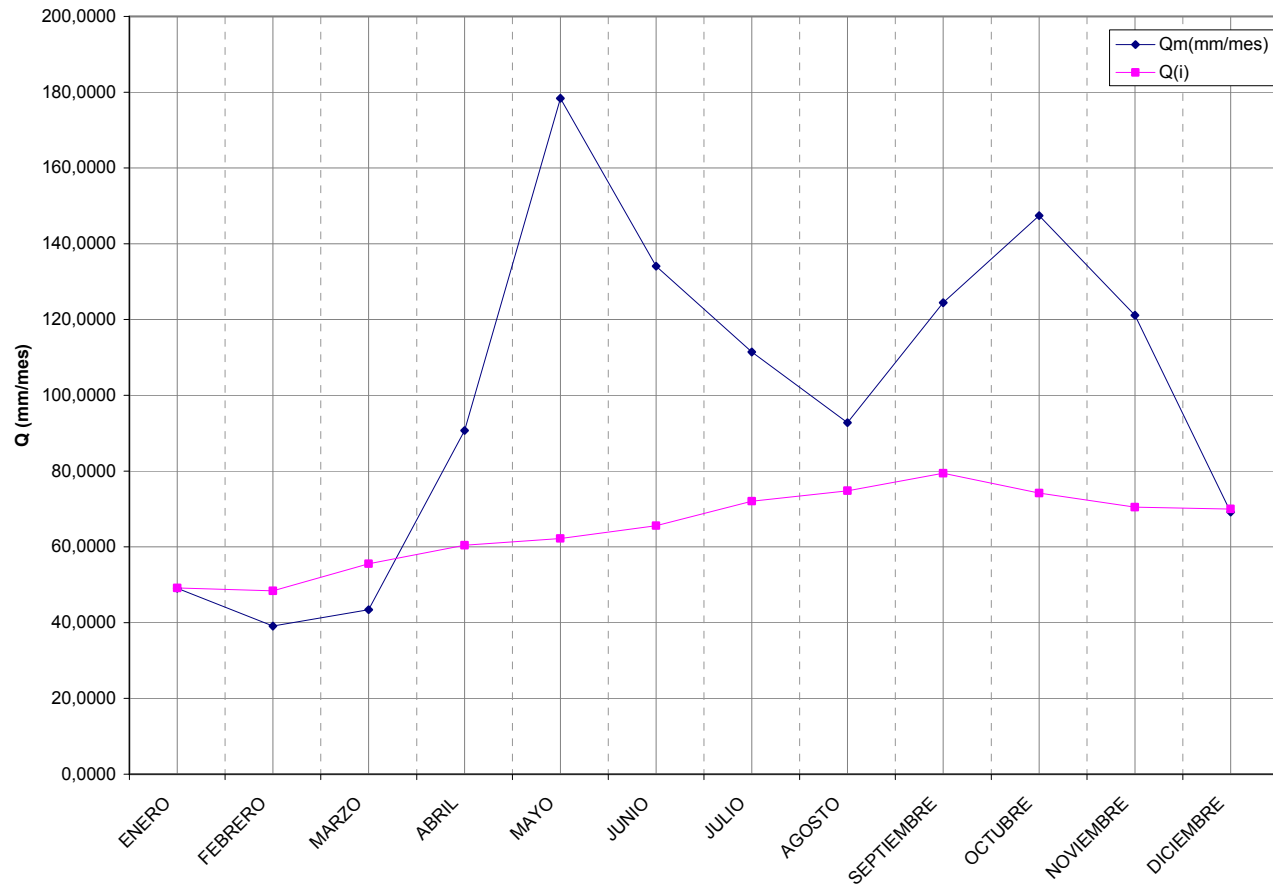


Gráfico No. 20. Comparación Qsimulado Vs Qmedido de la cuenca 20.

### CUENCA 21

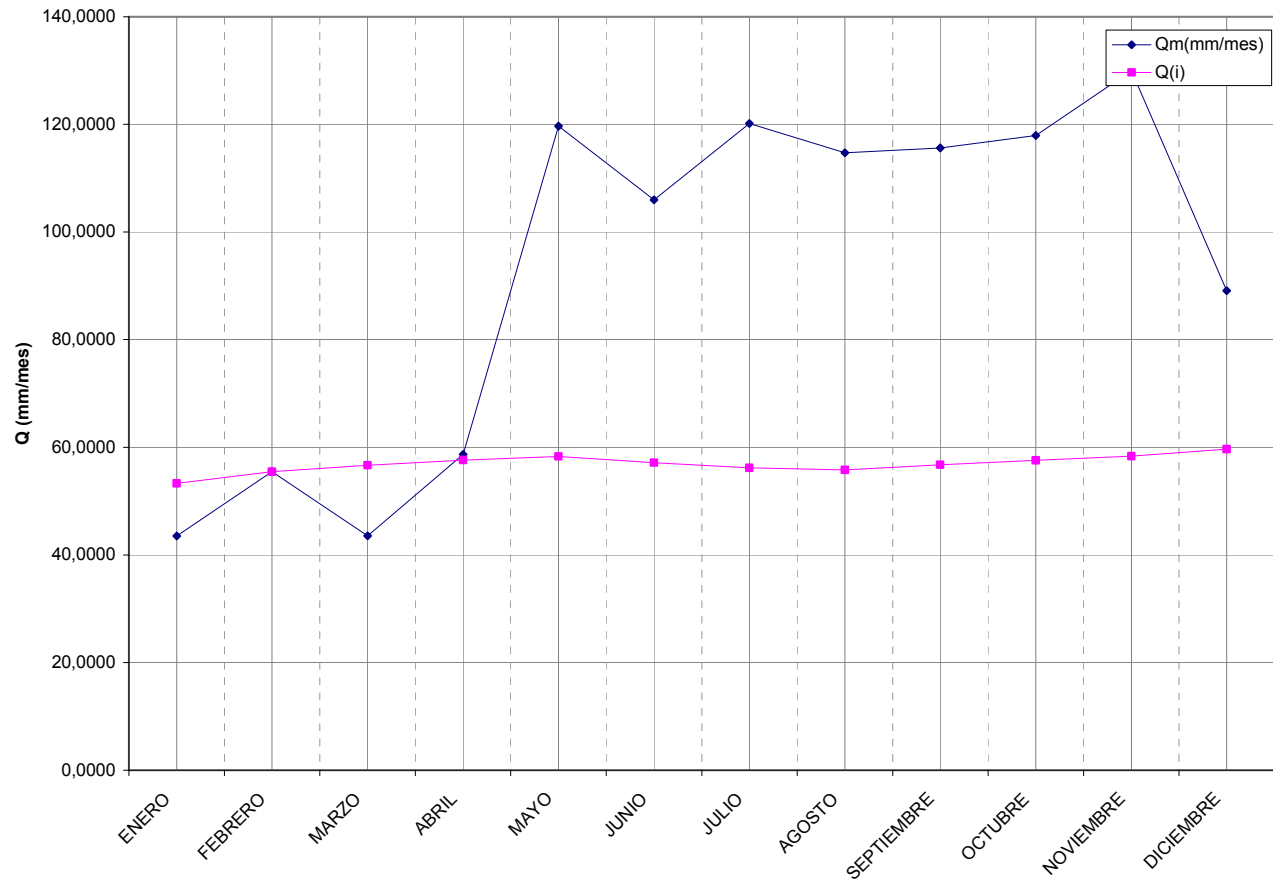


Gráfico No. 21. Comparación  $Q_{simulado}$  Vs  $Q_{medido}$  de la cuenca 21.

CUENCA 22

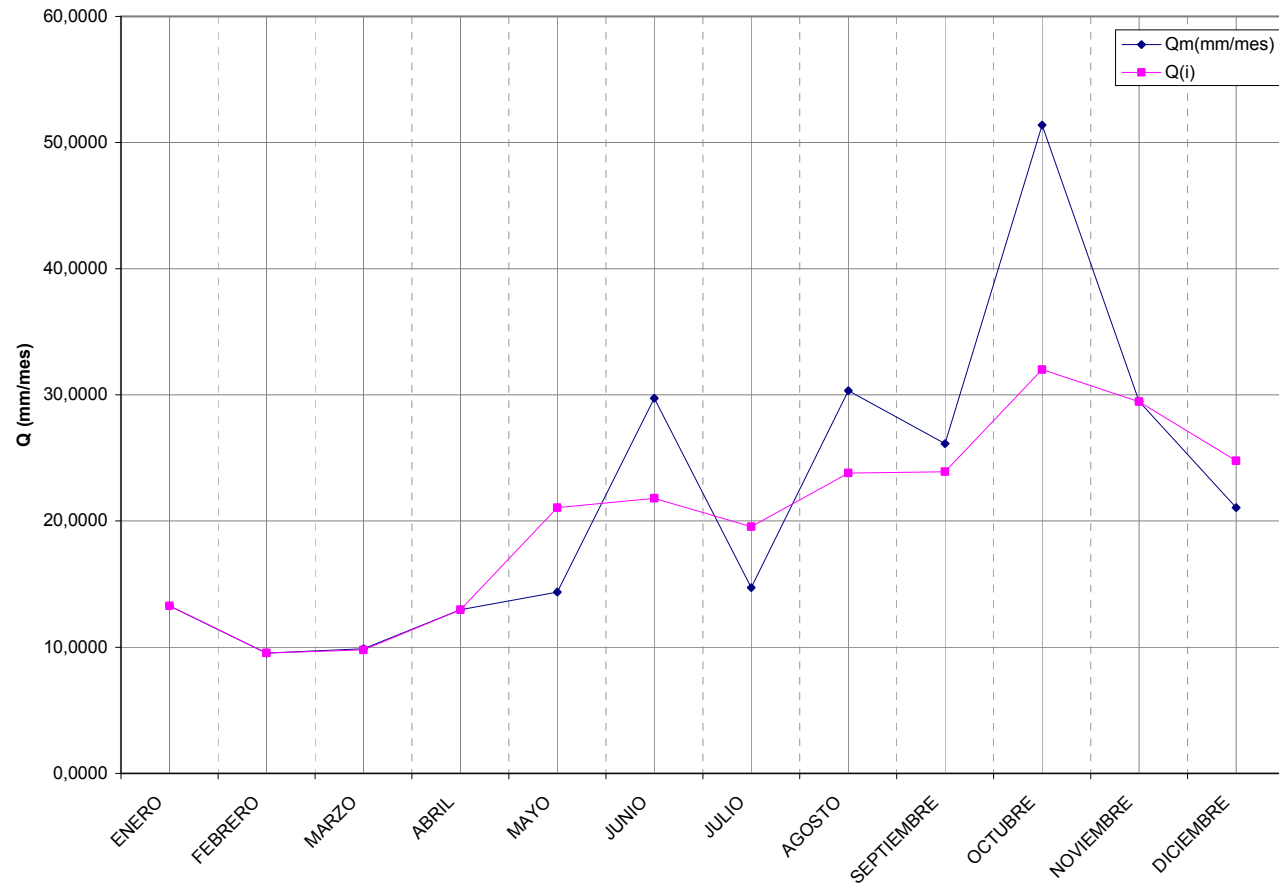


Gráfico No. 22. Comparación Qsimulado Vs Qmedido de la cuenca 22.

CUENCA 23

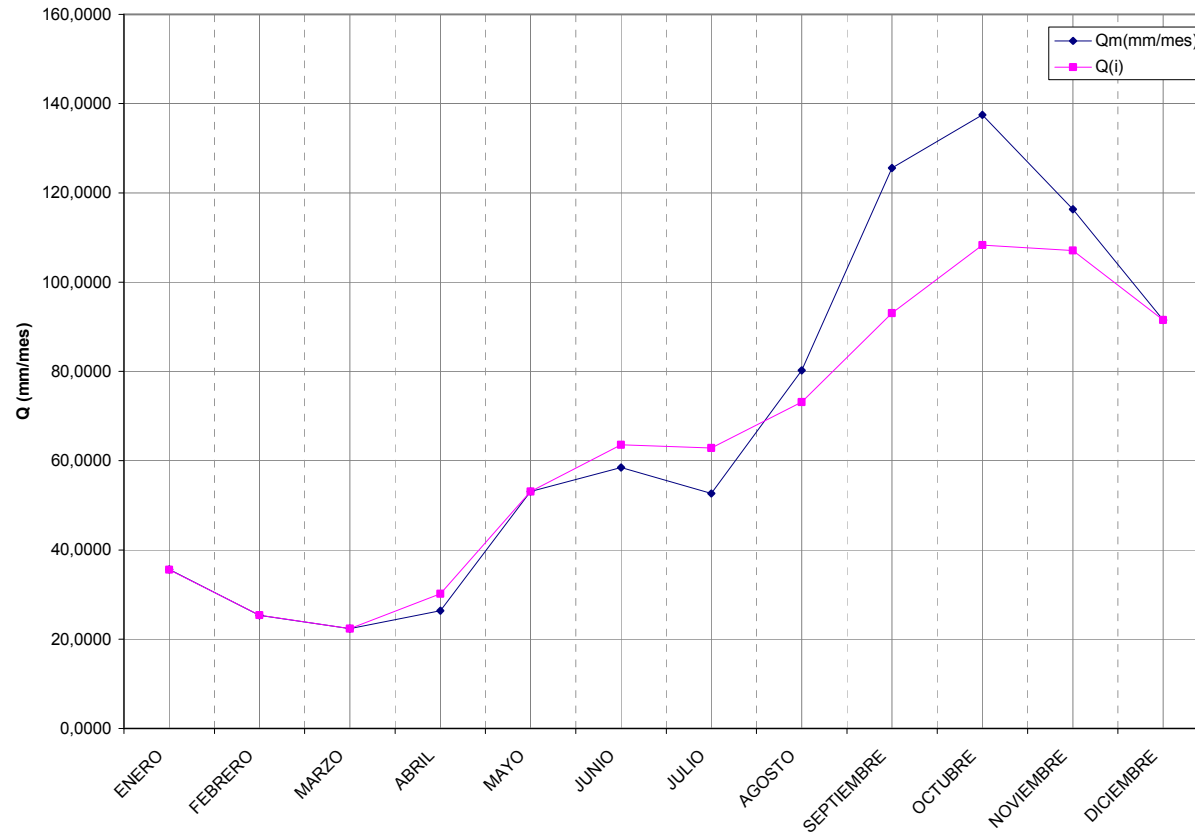


Gráfico No. 23. Comparación  $Q_{simulado}$  Vs  $Q_{medido}$  de la cuenca 23.

CUENCA 24

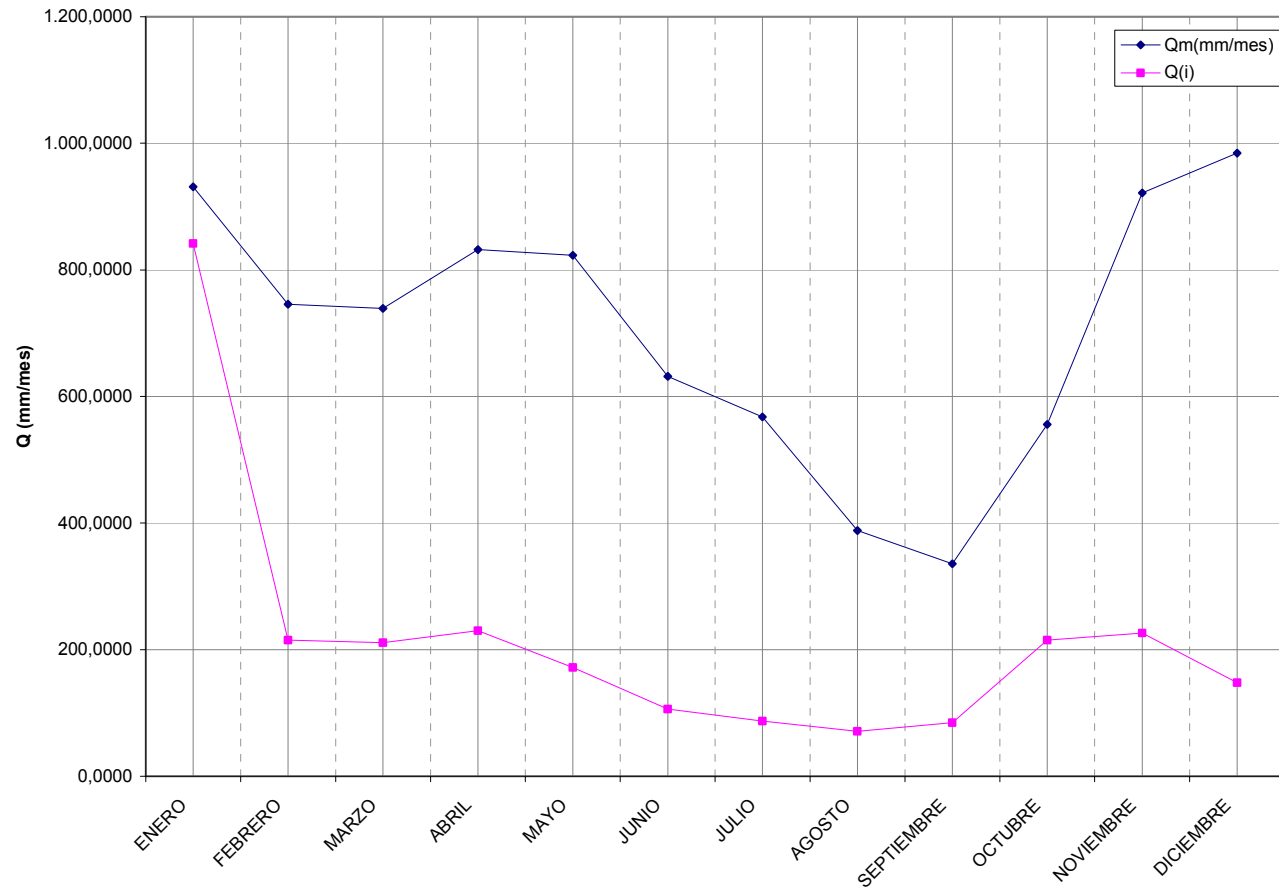


Gráfico No. 24. Comparación  $Q_{simulado}$  Vs  $Q_{medido}$  de la cuenca 24.

### CUENCA 25

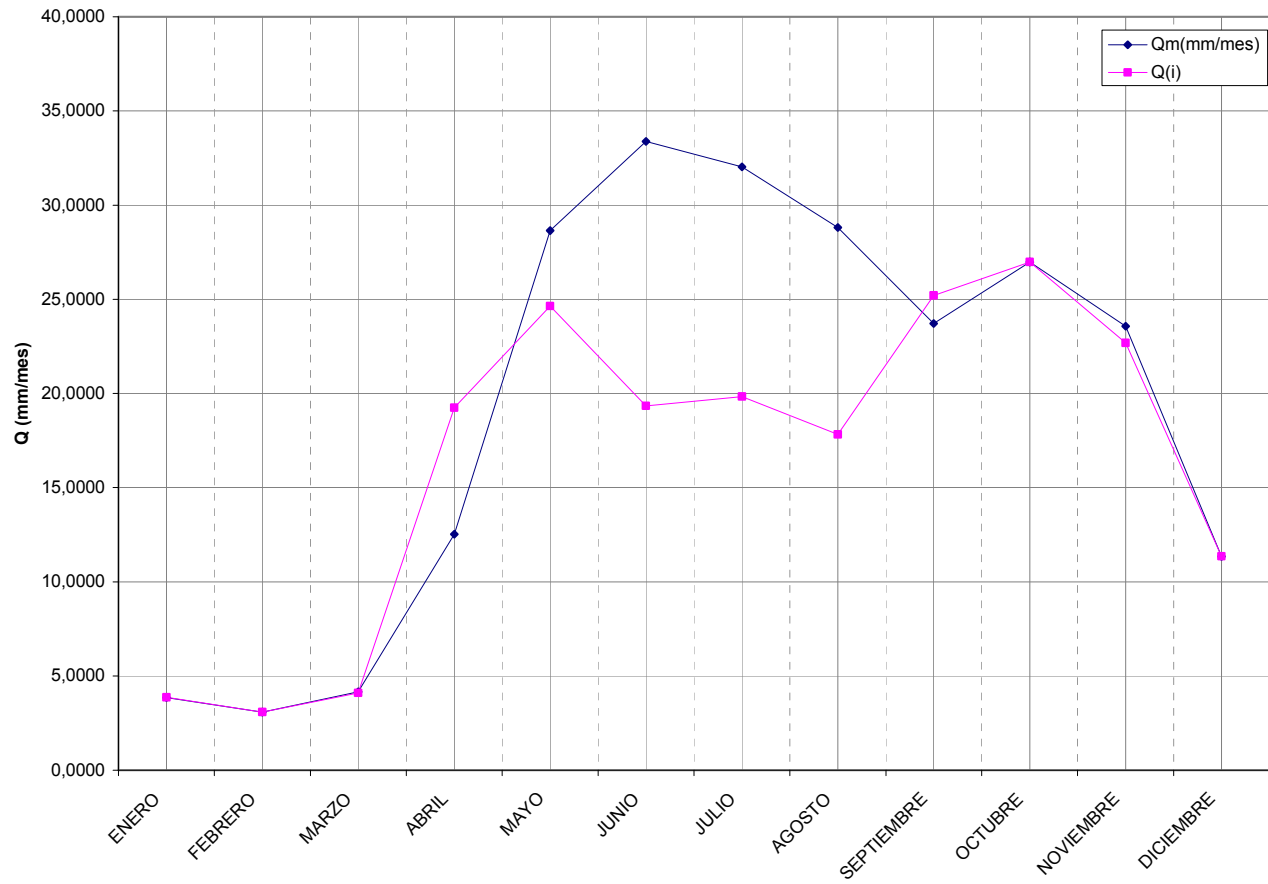


Gráfico No. 25. Comparación  $Q_{simulado}$  Vs  $Q_{medido}$  de la cuenca 25.

CUENCA 26

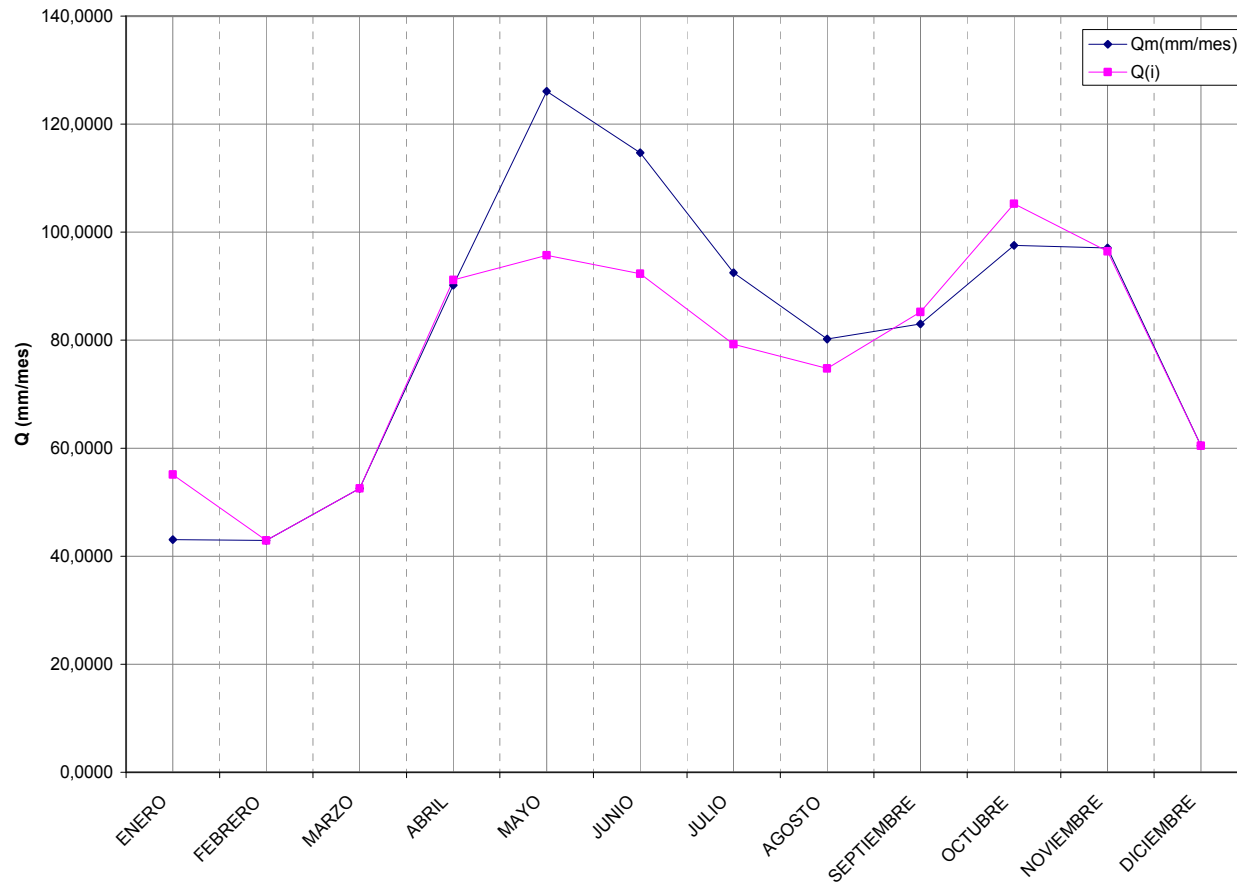


Gráfico No. 26. Comparación  $Q_{simulado}$  Vs  $Q_{medido}$  de la cuenca 26.

CUENCA 27

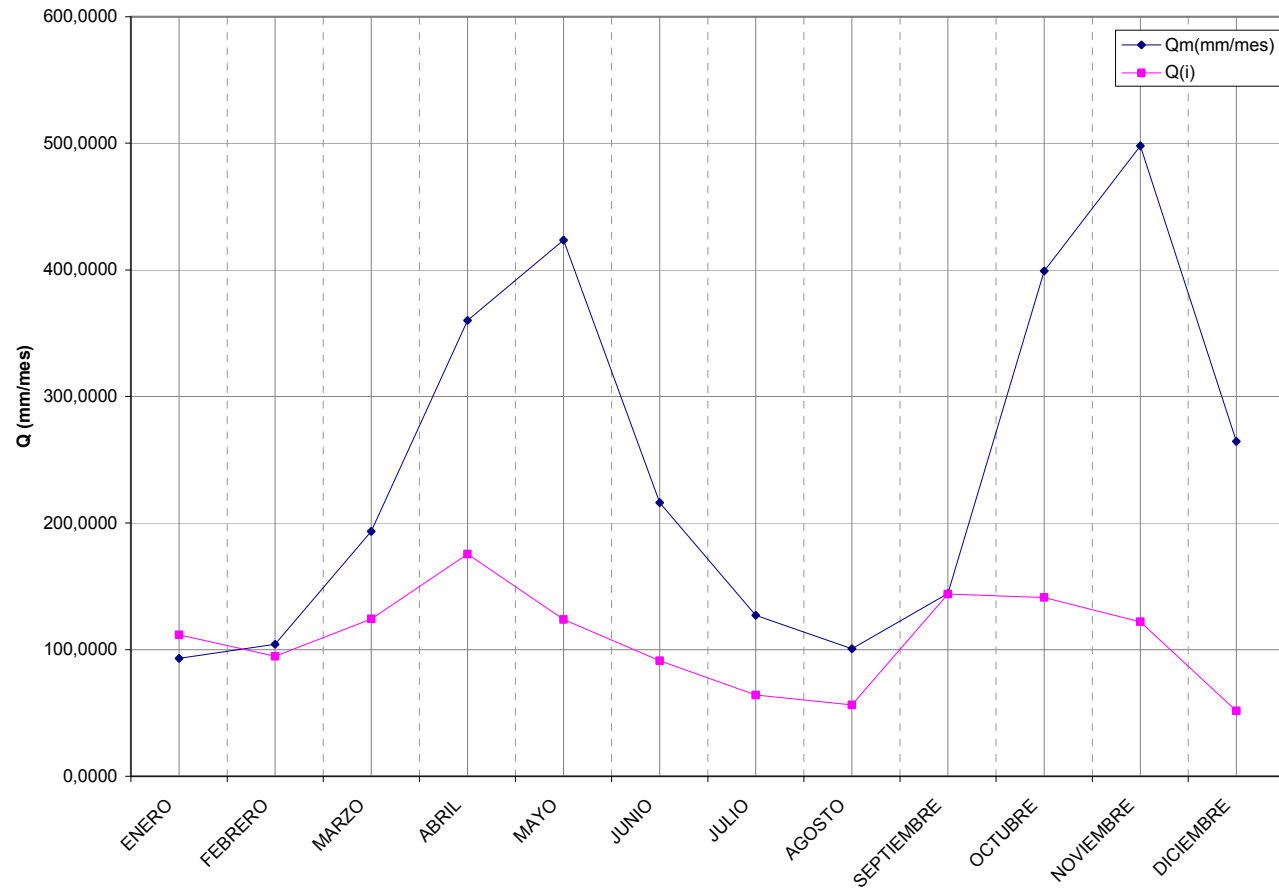


Gráfico No. 27. Comparación Qsimulado Vs Qmedido de la cuenca 27.



CUENCA 28

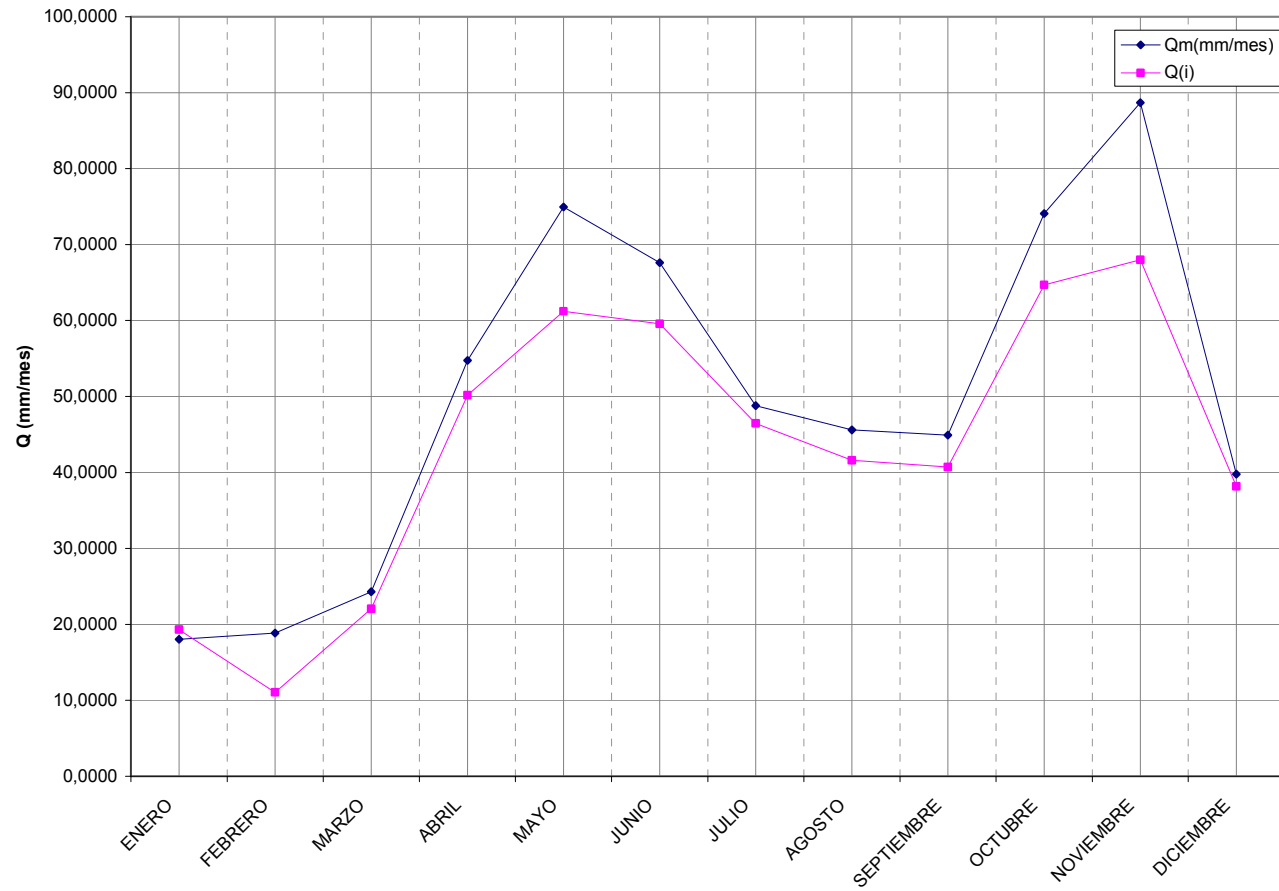


Gráfico No. 28. Comparación Qsimulado Vs Qmedido de la cuenca 28.

CUENCA 29

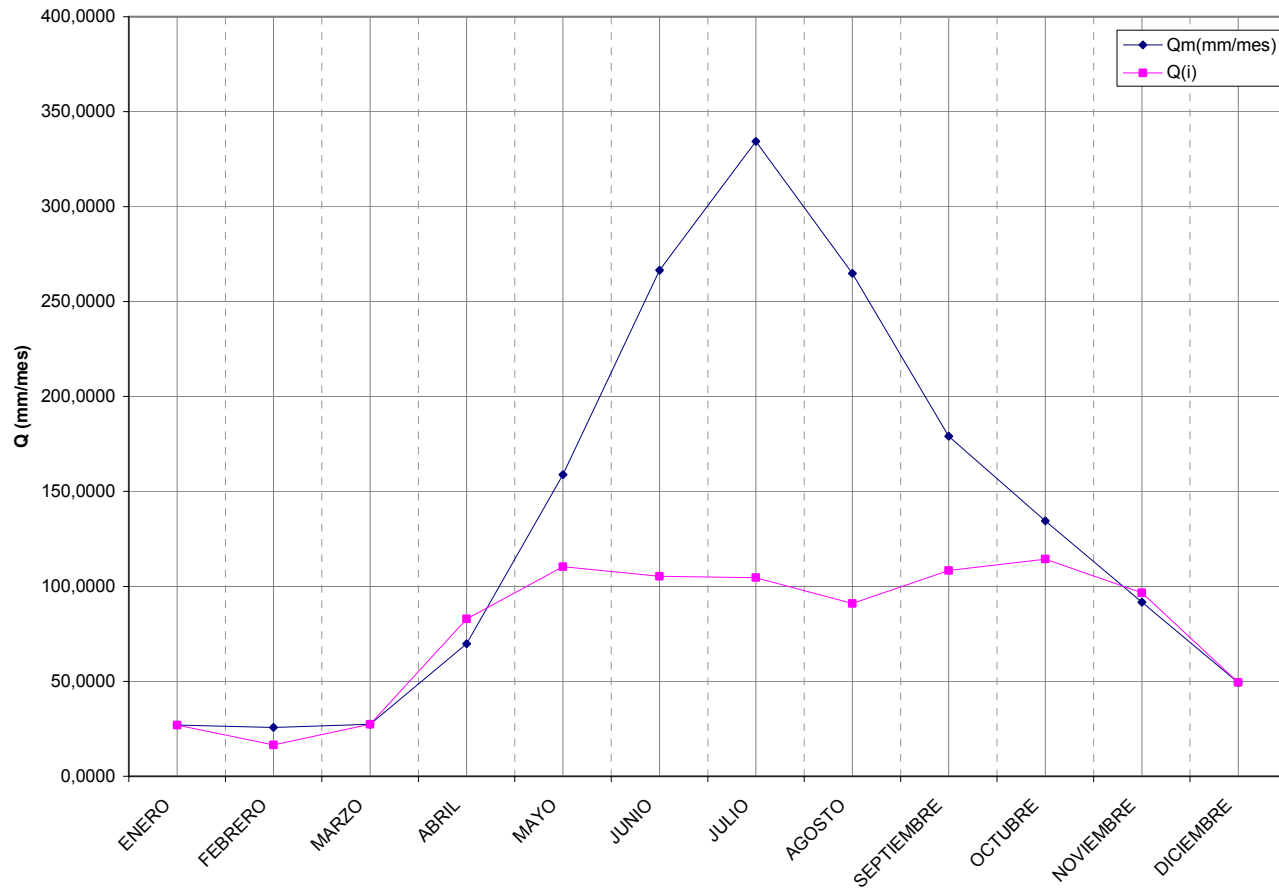


Gráfico No. 29. Comparación Qsimulado Vs Qmedido de la cuenca 29.

CUENCA 30

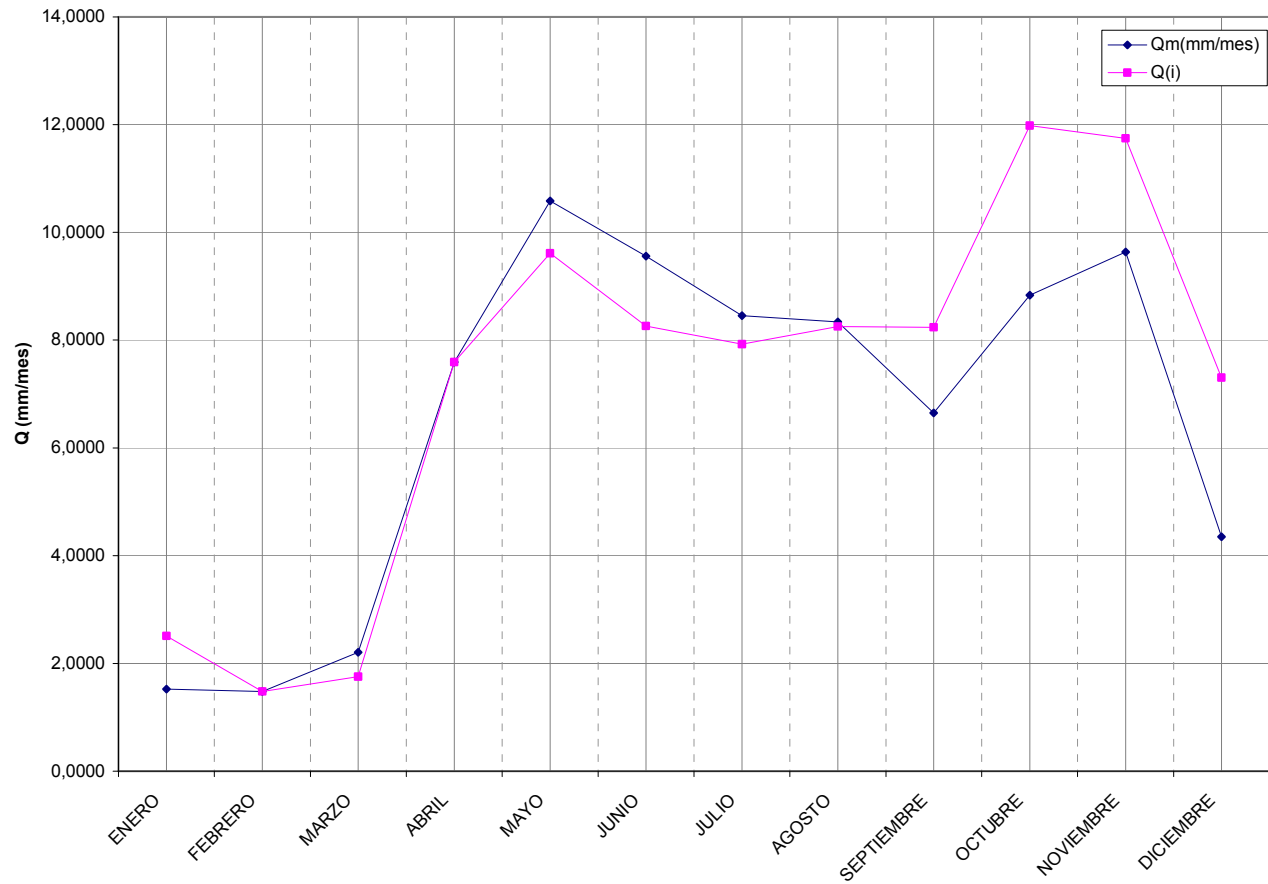


Gráfico No. 30. Comparación Qsimulado Vs Qmedido de la cuenca 30.

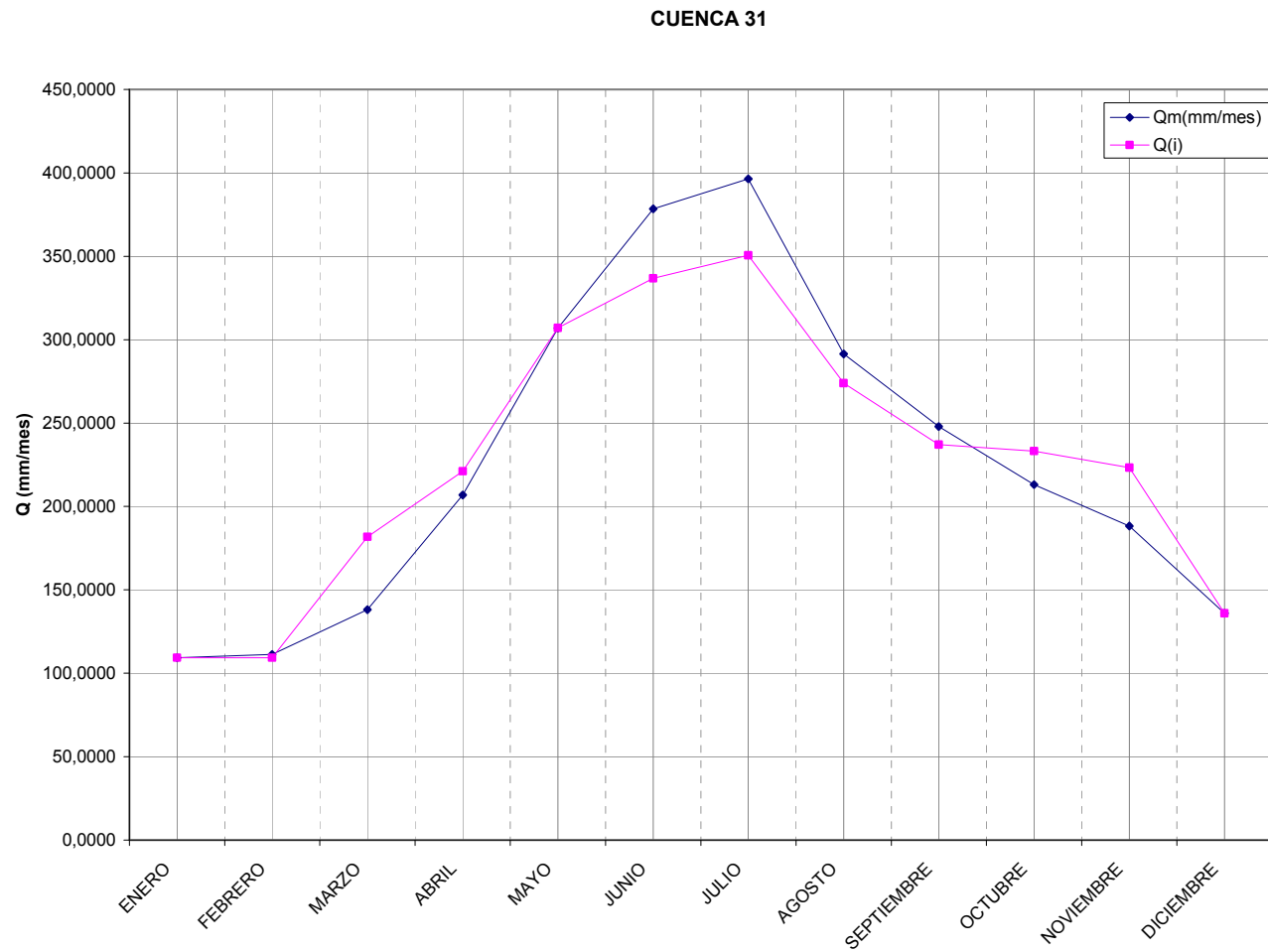


Gráfico No. 31. Comparación  $Q_{simulado}$  Vs  $Q_{medido}$  de la cuenca 31.

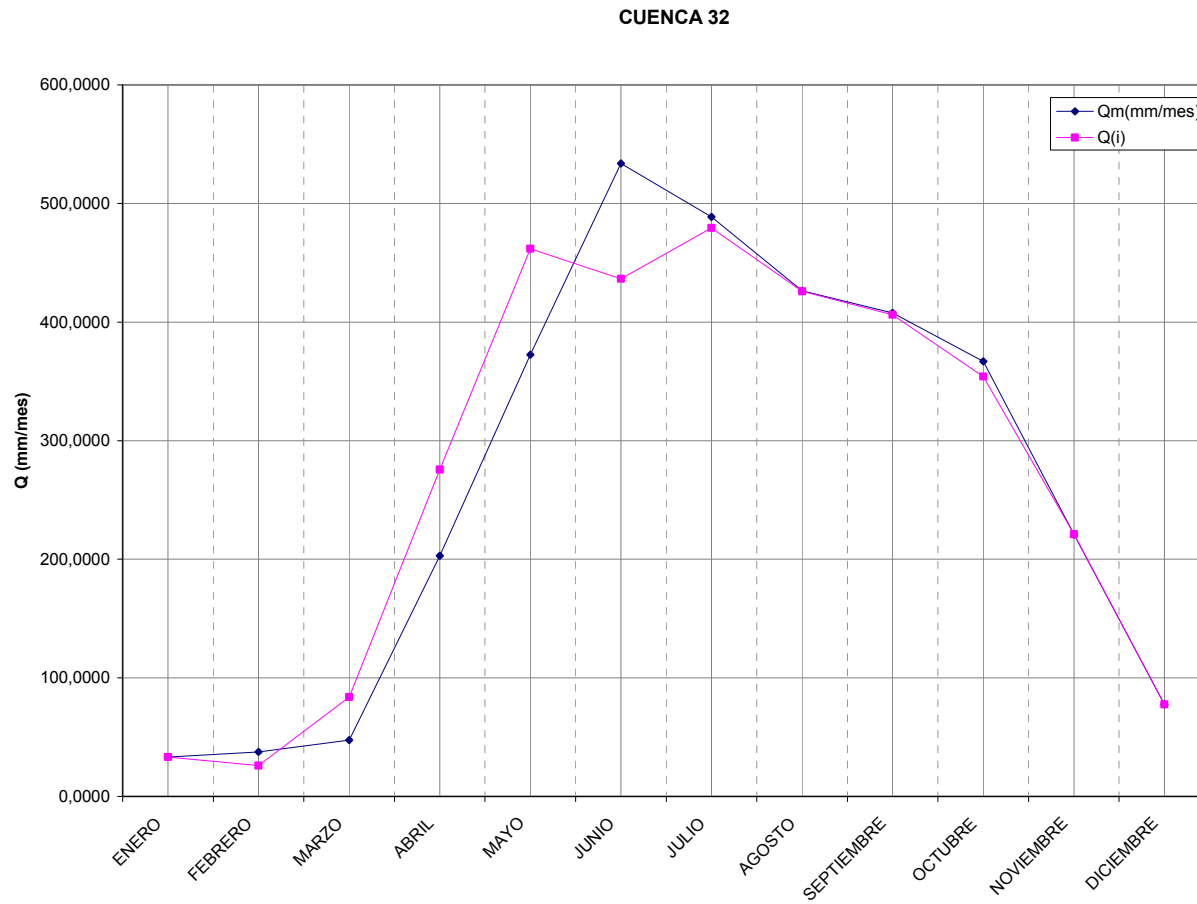


Gráfico No. 32. Comparación  $Q_{simulado}$  Vs  $Q_{medido}$  de la cuenca 32.

CUENCA 33

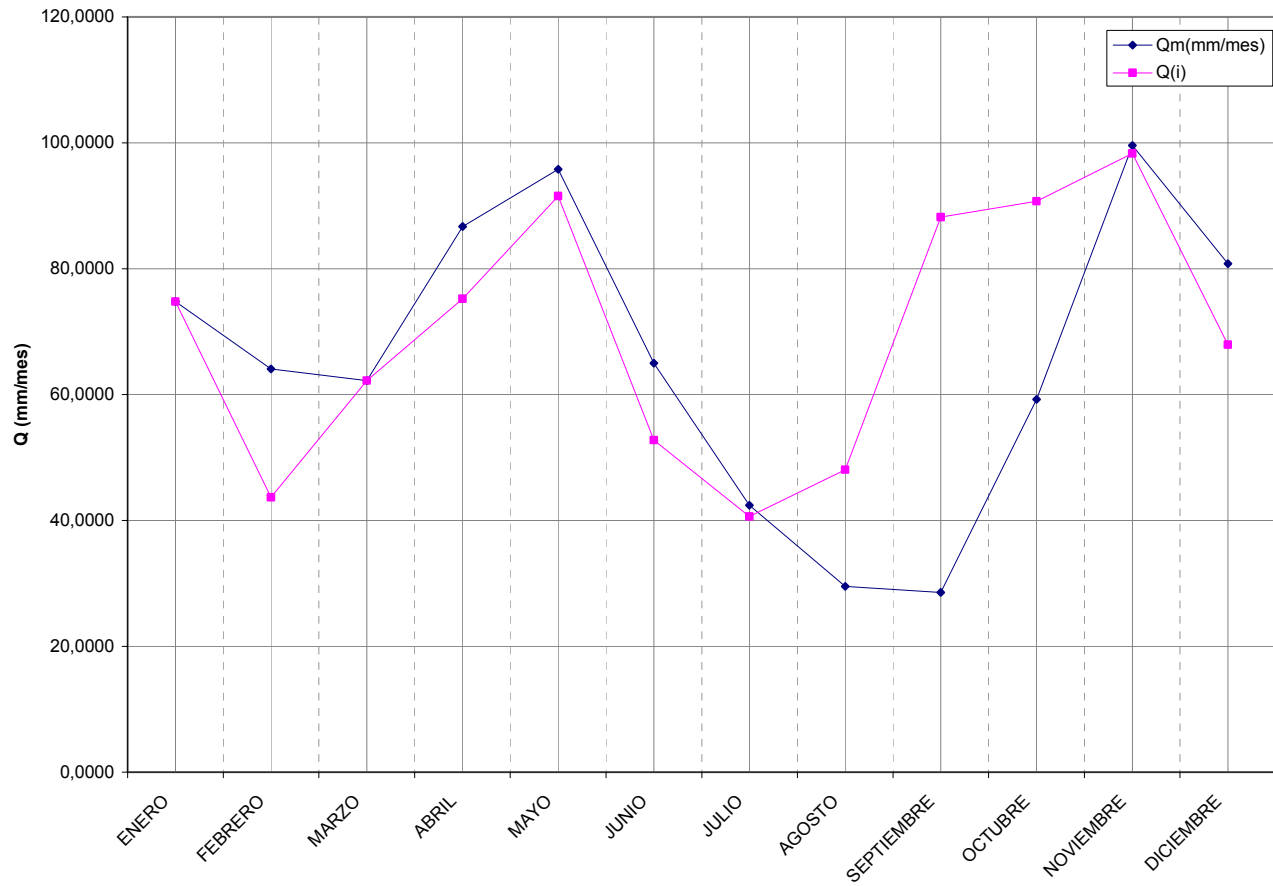


Gráfico No. 33. Comparación  $Q_{simulado}$  Vs  $Q_{medido}$  de la cuenca 33.

### CUENCA 34

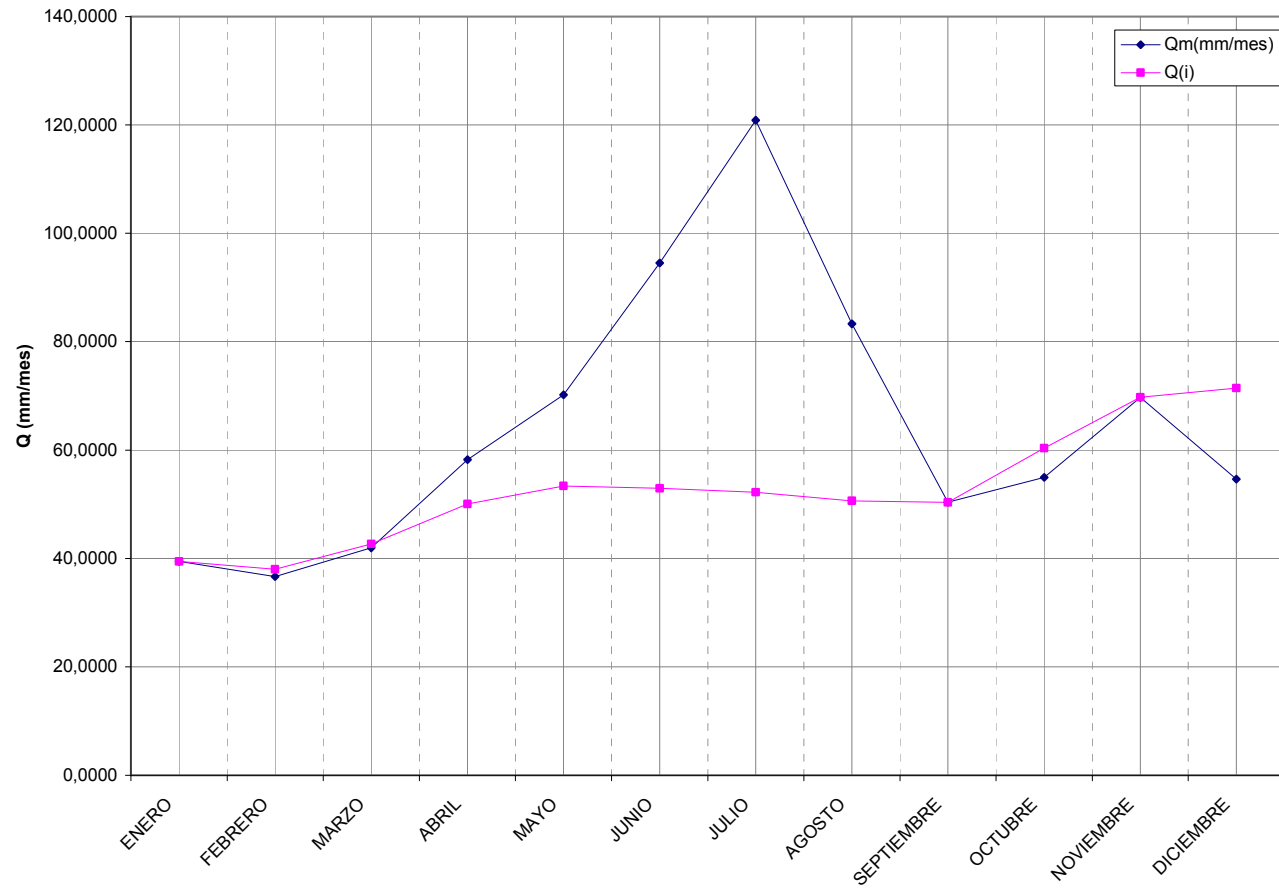


Gráfico No. 34. Comparación Qsimulado Vs Qmedido de la cuenca 34.

### CUENCA 35

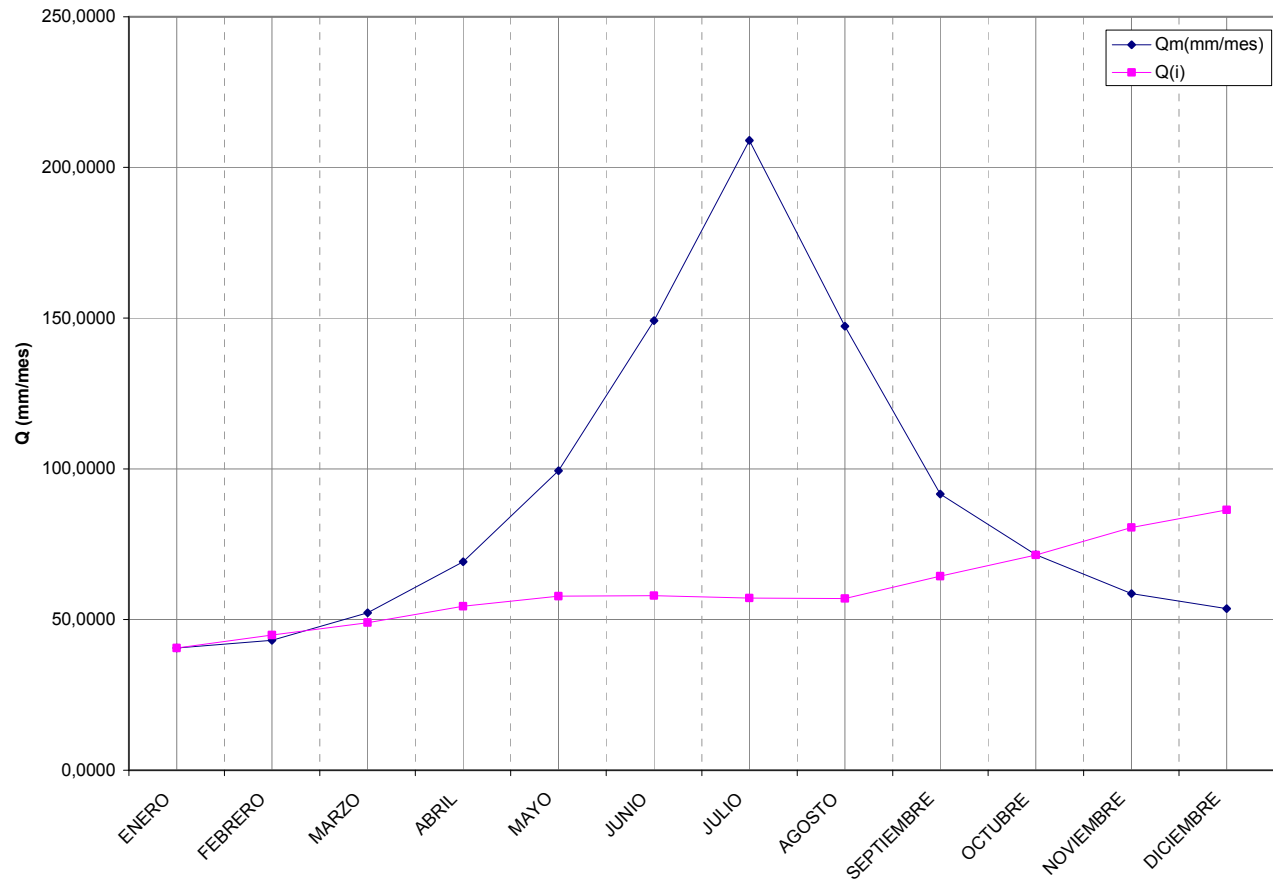


Gráfico No. 35. Comparación  $Q_{simulado}$  Vs  $Q_{medido}$  de la cuenca 35.



CUENCA 36

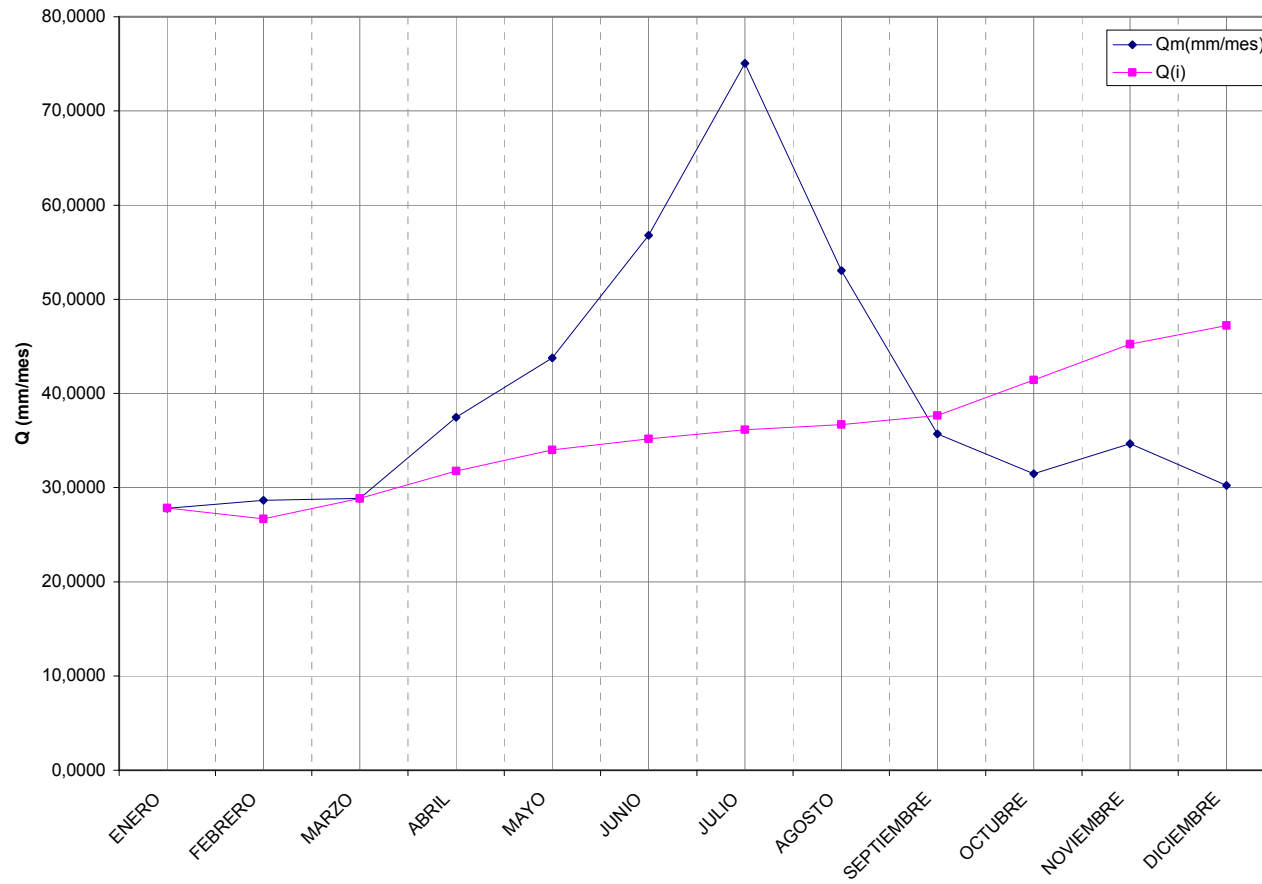


Gráfico No. 36. Comparación Qsimulado Vs Qmedido de la cuenca 36.

CUENCA 37

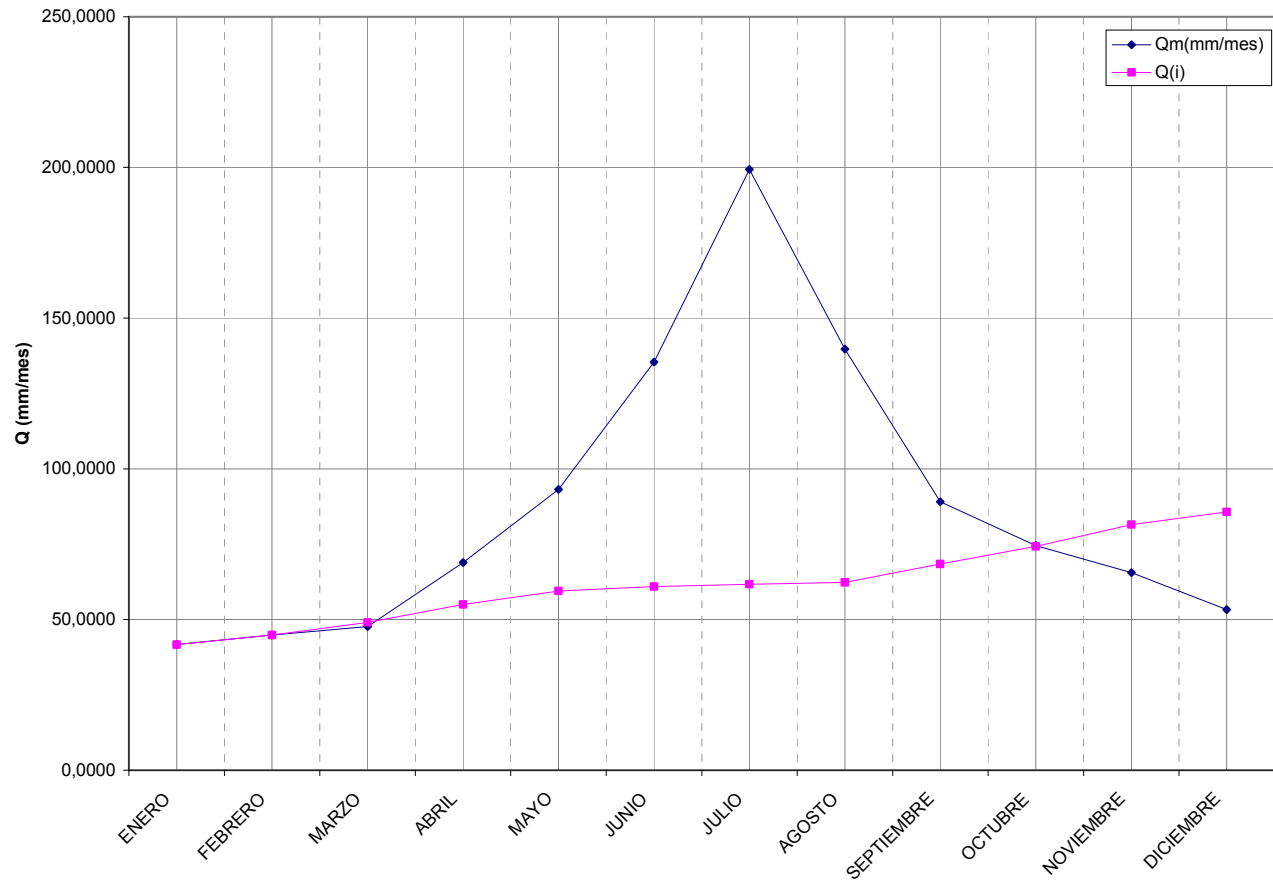


Gráfico No. 37. Comparación Qsimulado Vs Qmedido de la cuenca 37.

CUENCA 38

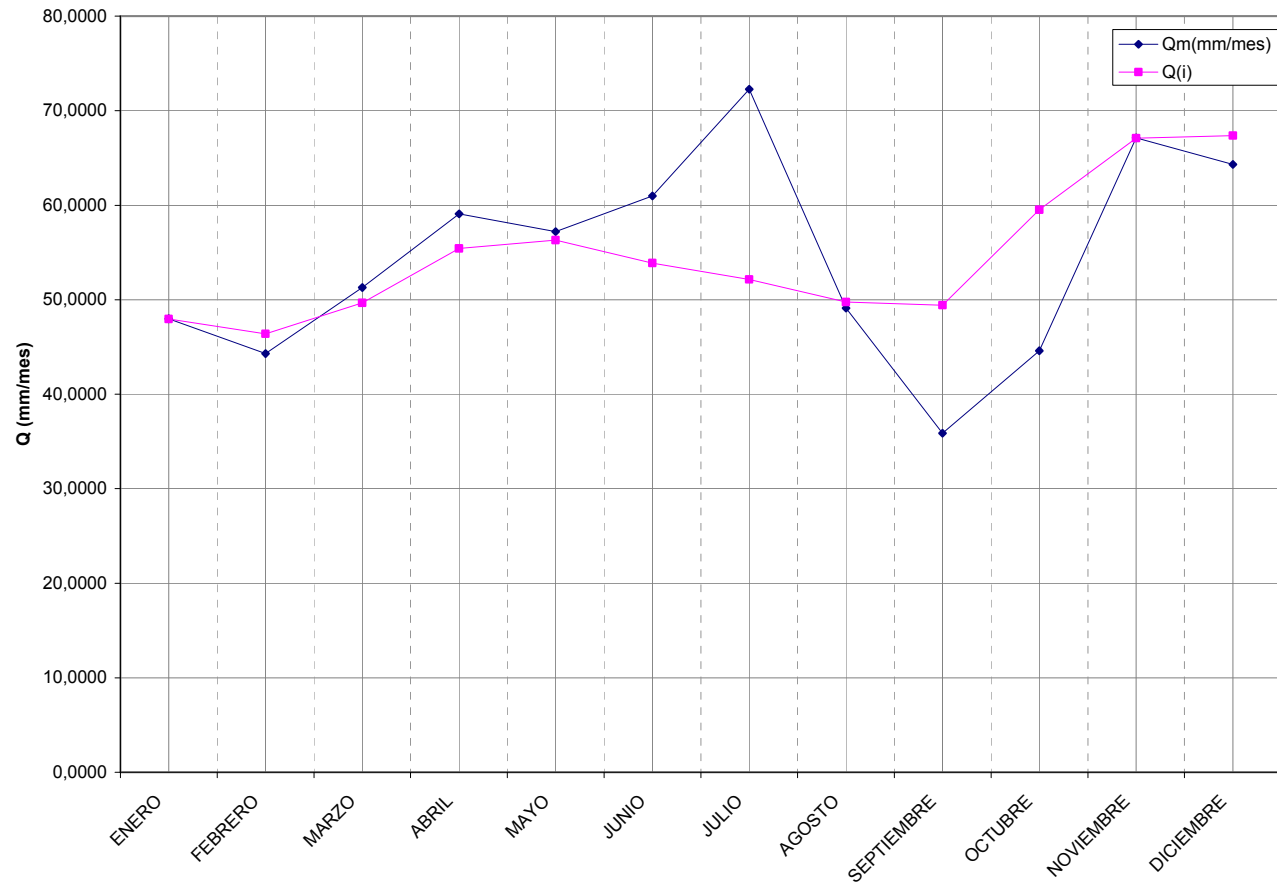


Gráfico No. 38. Comparación Qsimulado Vs Qmedido de la cuenca 38.

### CUENCA 39

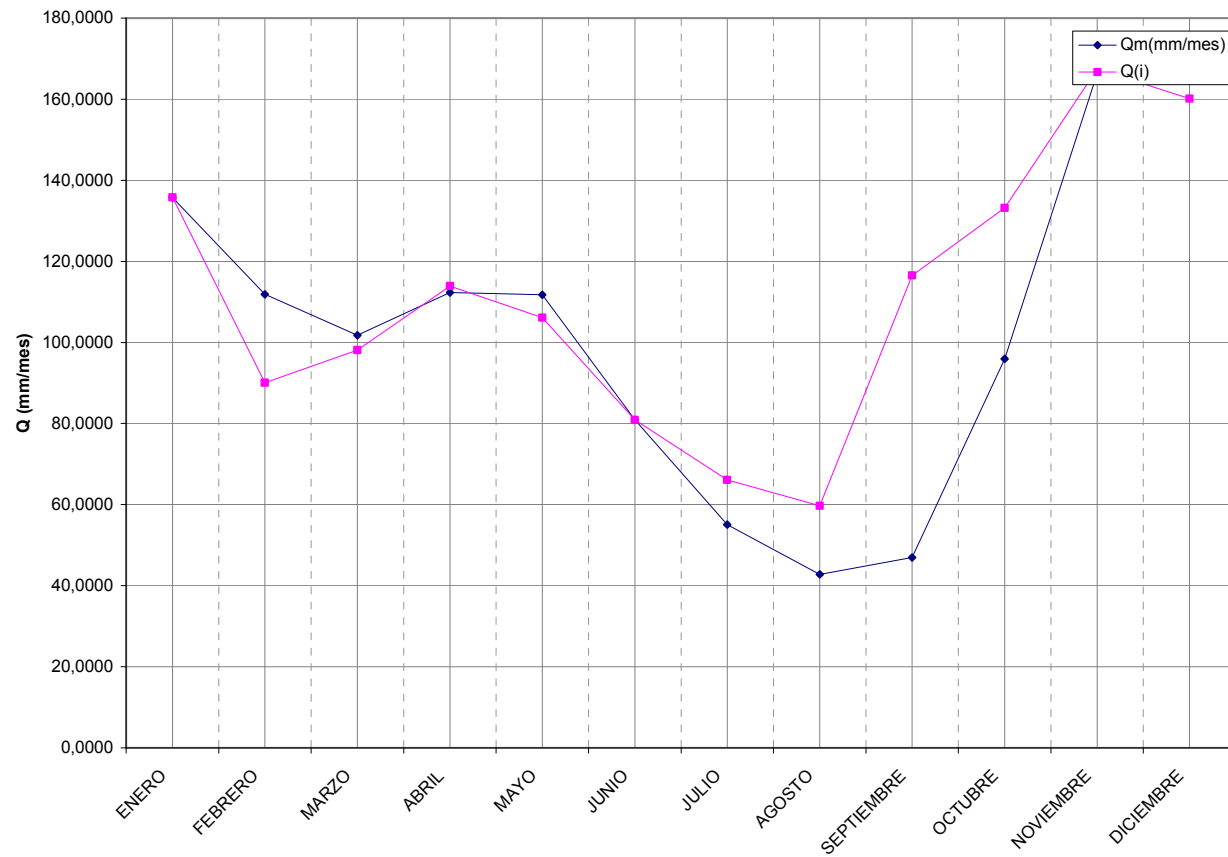


Gráfico No. 39. Comparación Qsimulado Vs Qmedido de la cuenca 39.

### CUENCA 40

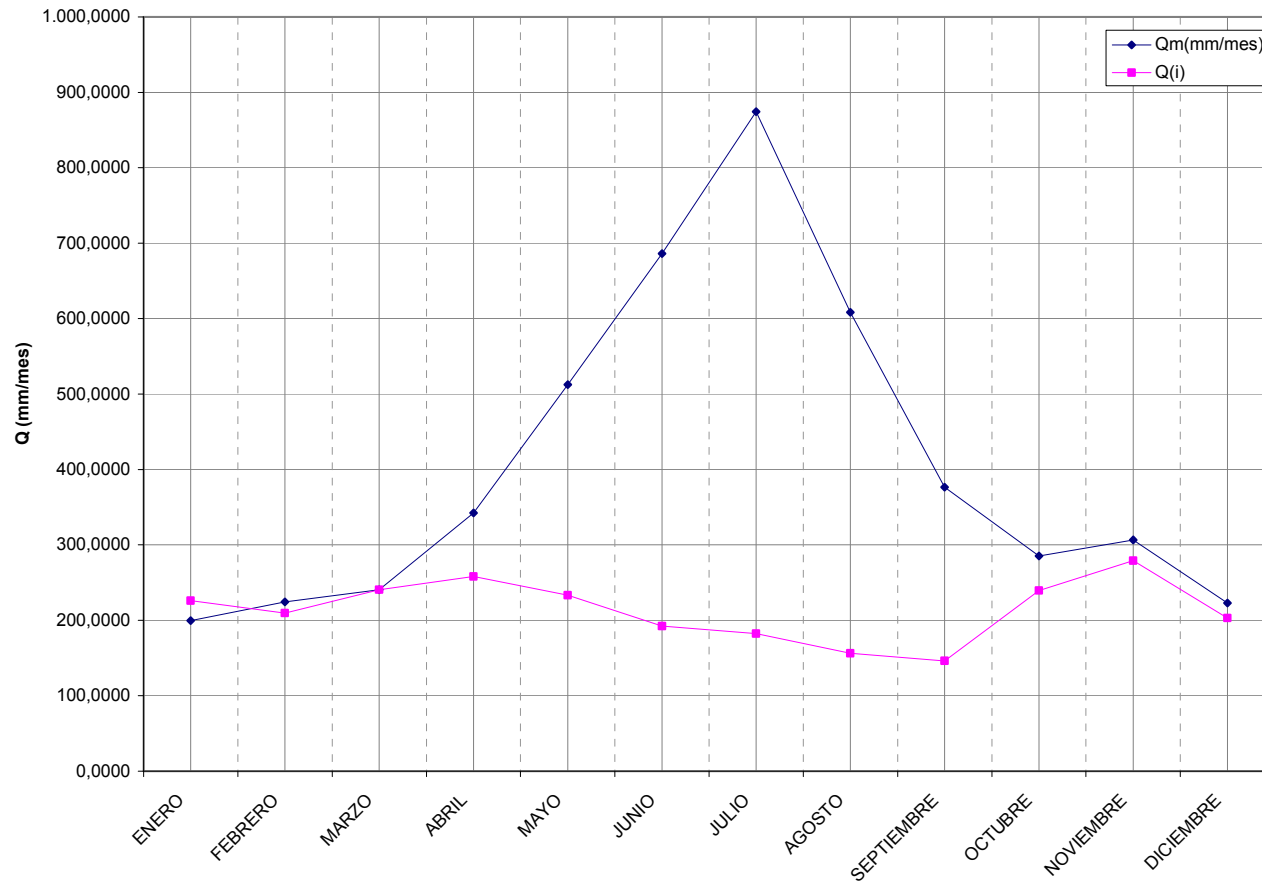


Gráfico No. 40. Comparación  $Q_{simulado}$  Vs  $Q_{medido}$  de la cuenca 40.

CUENCA 41

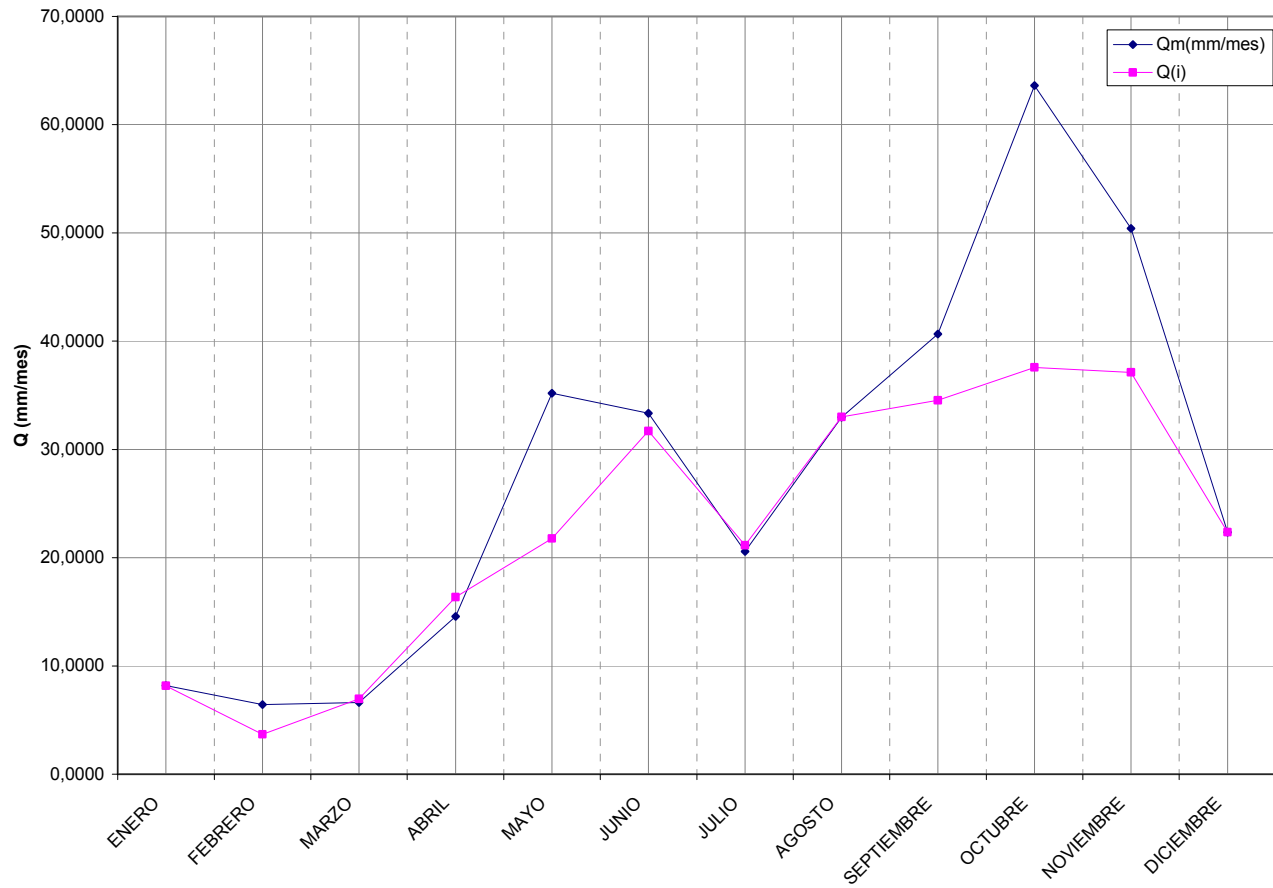


Gráfico No. 41. Comparación  $Q_{simulado}$  Vs  $Q_{medido}$  de la cuenca 41.

CUENCA 42

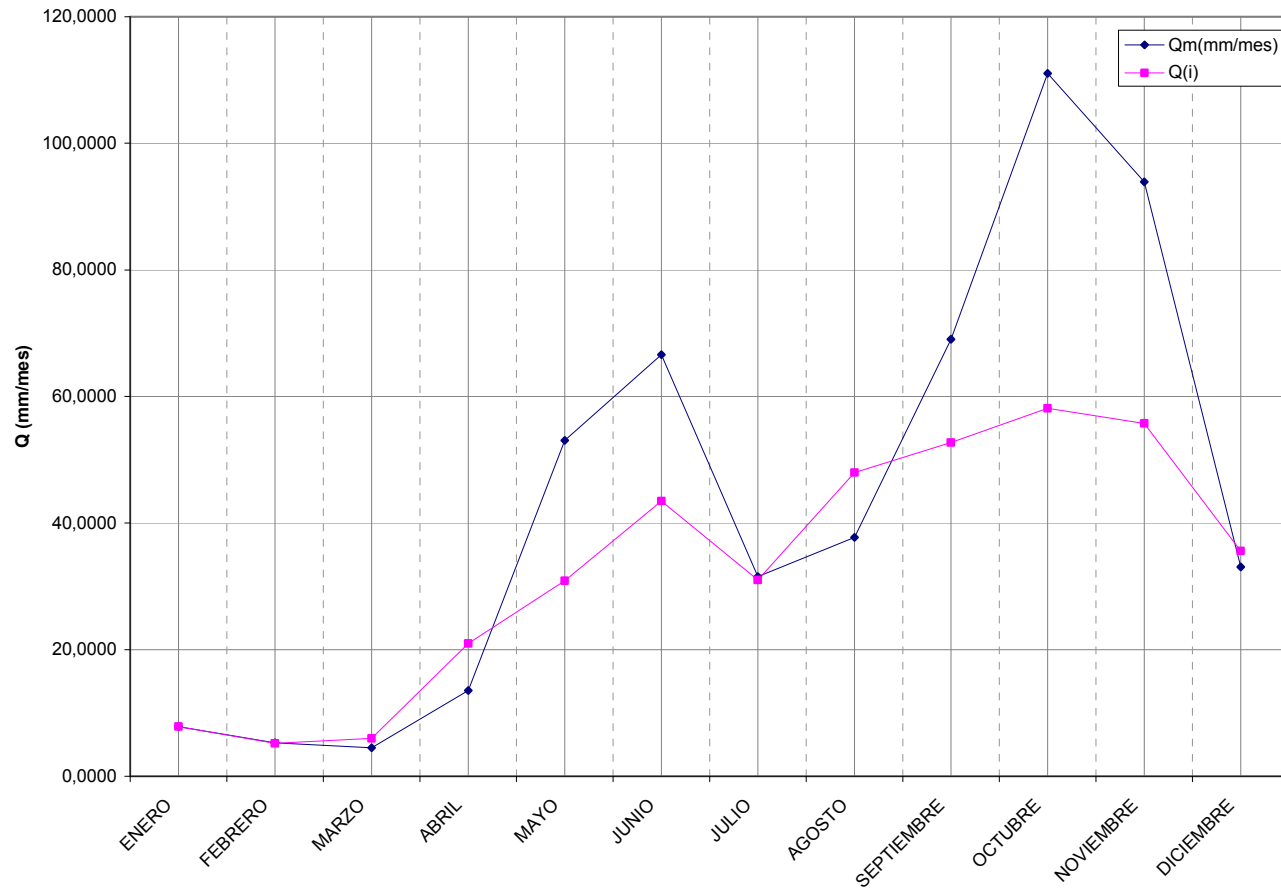


Gráfico No. 42. Comparación Qsimulado Vs Qmedido de la cuenca 42.

CUENCA 43

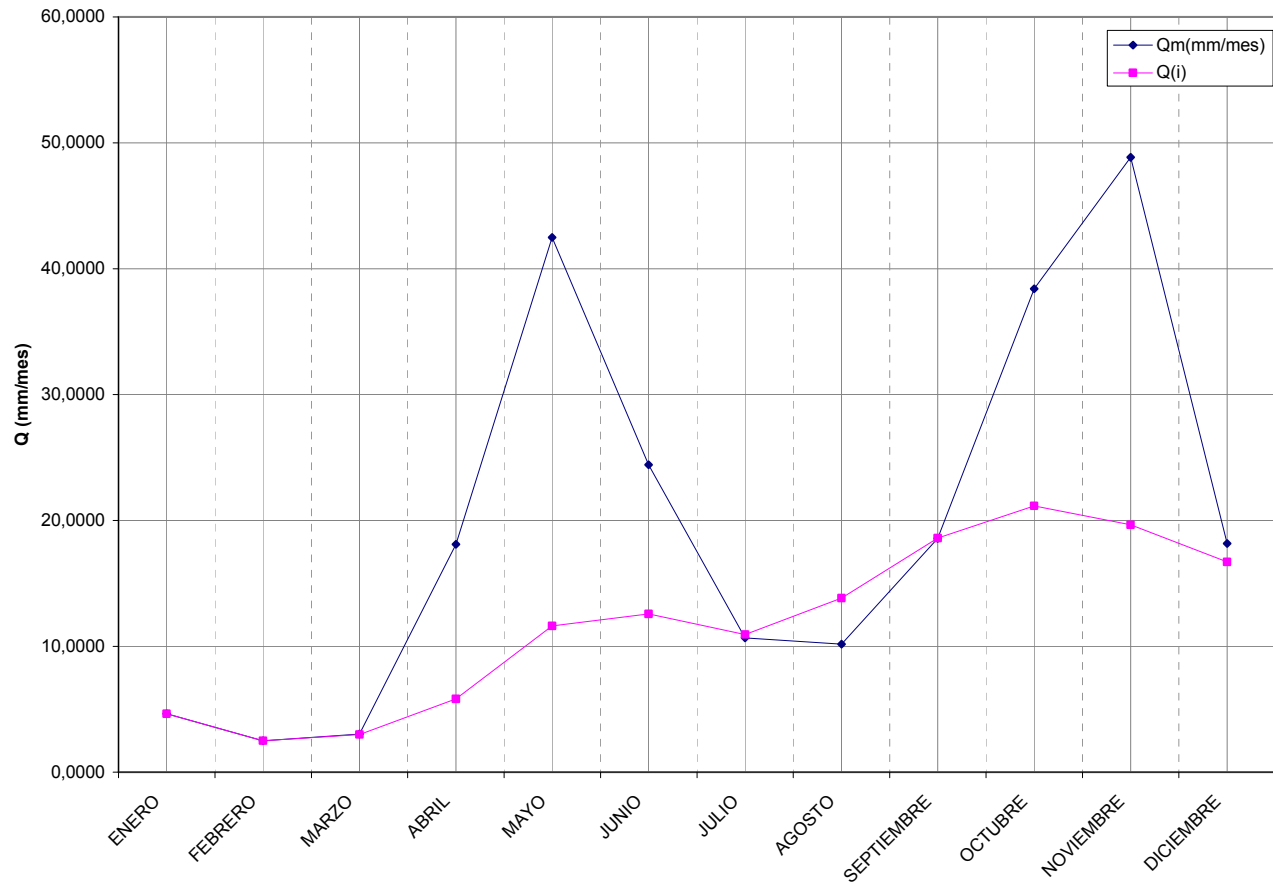


Gráfico No. 43. Comparación Qsimulado Vs Qmedido de la cuenca 43.



CUENCA 44

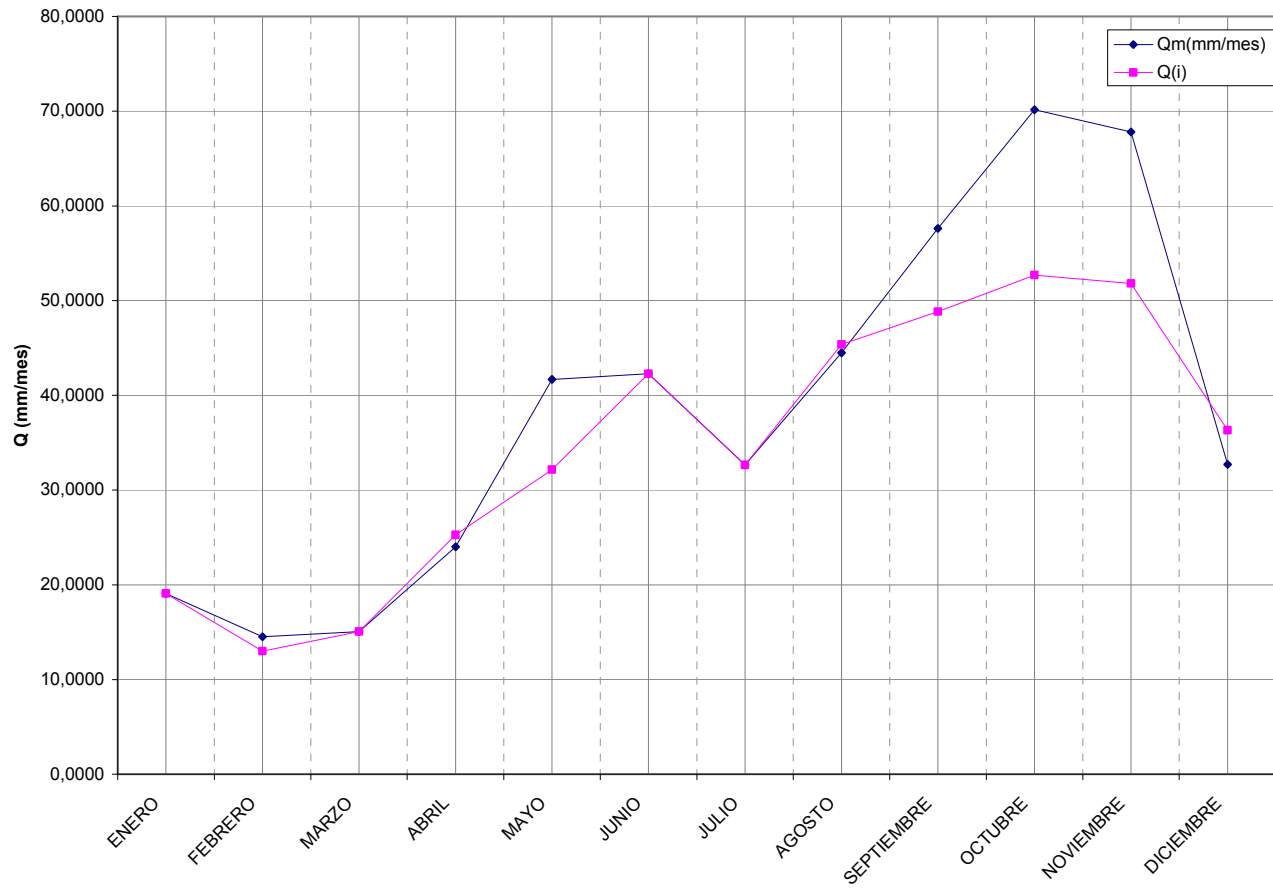


Gráfico No. 44. Comparación Qsimulado Vs Qmedido de la cuenca 44.

### CUENCA 45

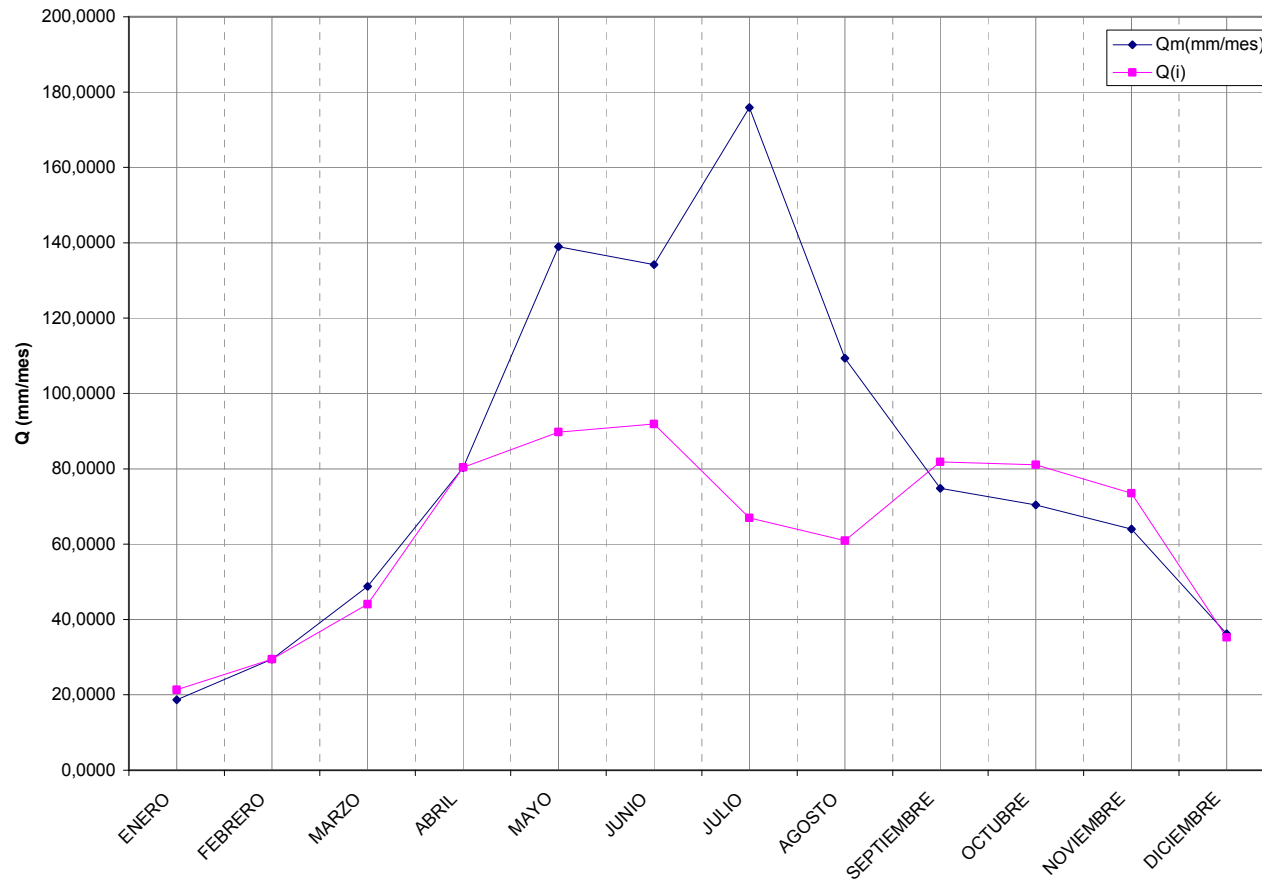


Gráfico No. 45. Comparación  $Q_{simulado}$  Vs  $Q_{medido}$  de la cuenca 45.

CUENCA 46

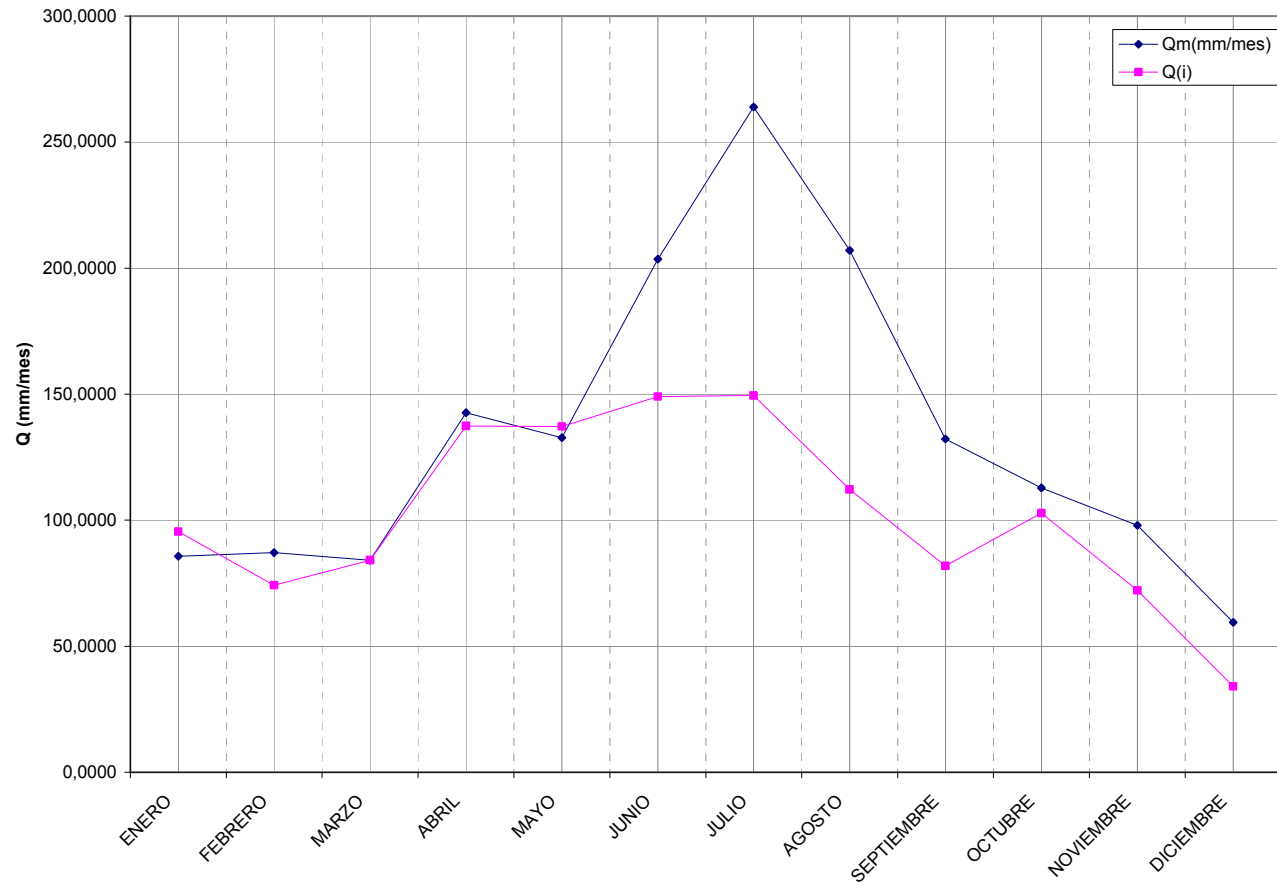


Gráfico No. 46. Comparación  $Q_{simulado}$  Vs  $Q_{medido}$  de la cuenca 46.

CUENCA 47

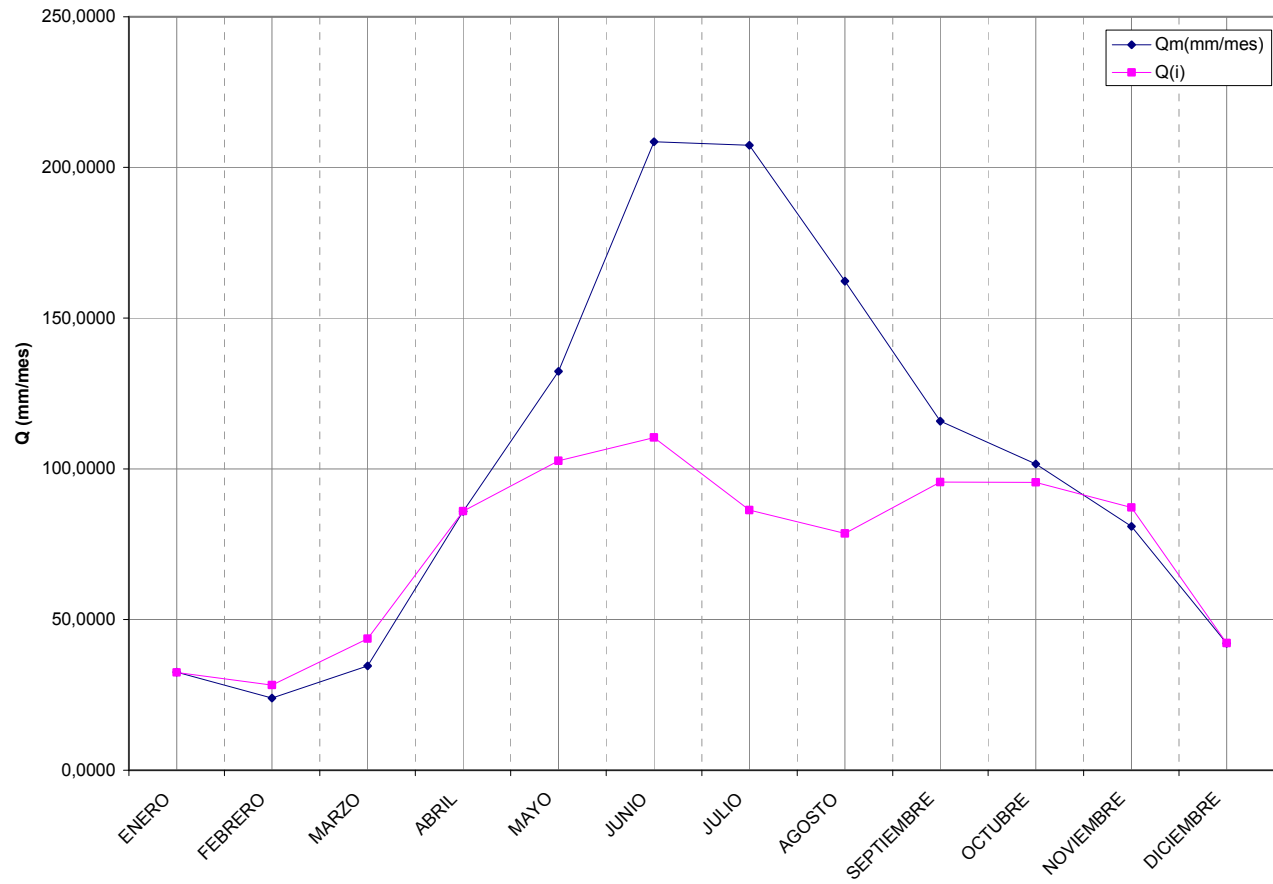


Gráfico No. 47. Comparación Qsimulado Vs Qmedido de la cuenca 47.

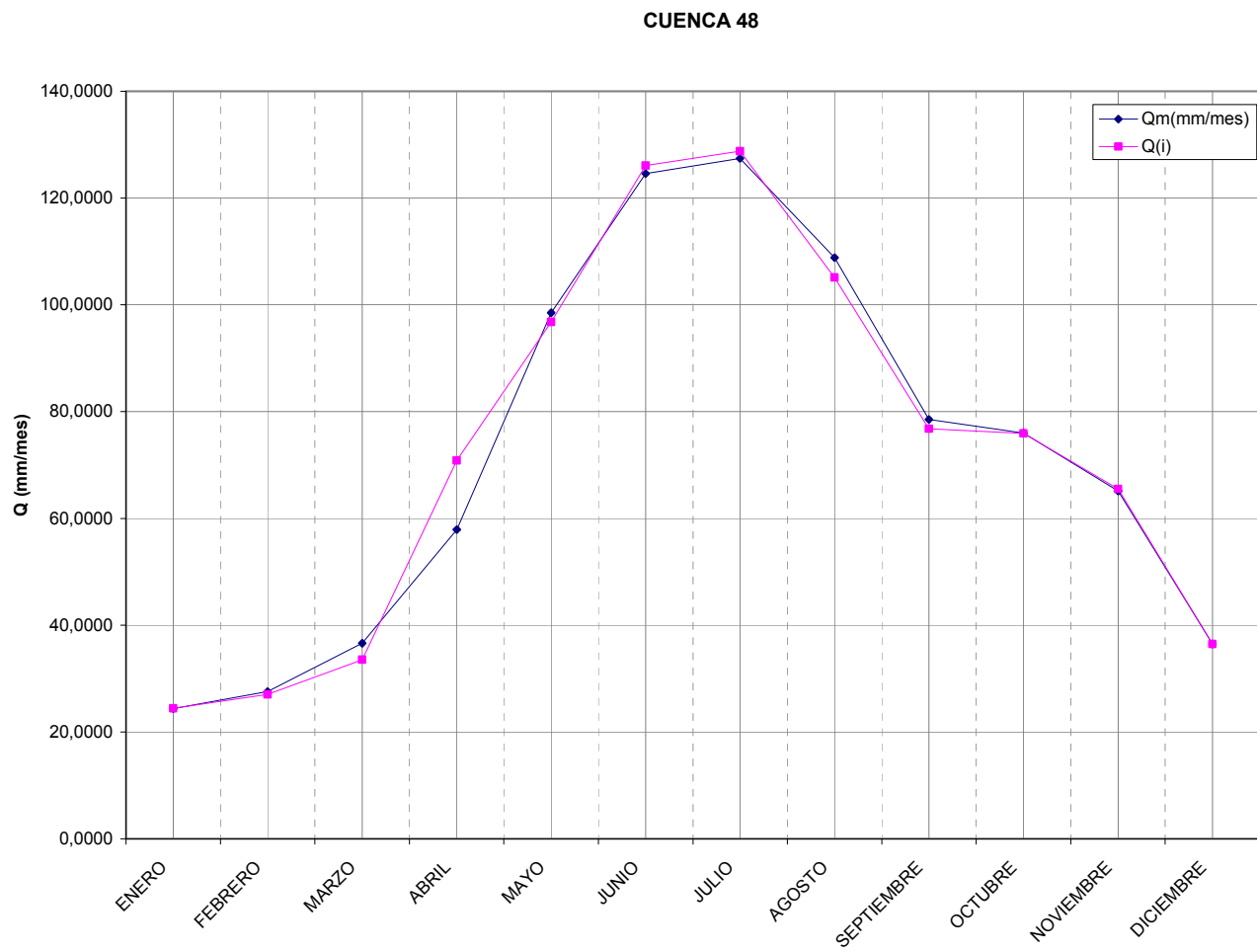


Gráfico No. 48. Comparación  $Q_{simulado}$  Vs  $Q_{medido}$  de la cuenca 48.

CUENCA 49

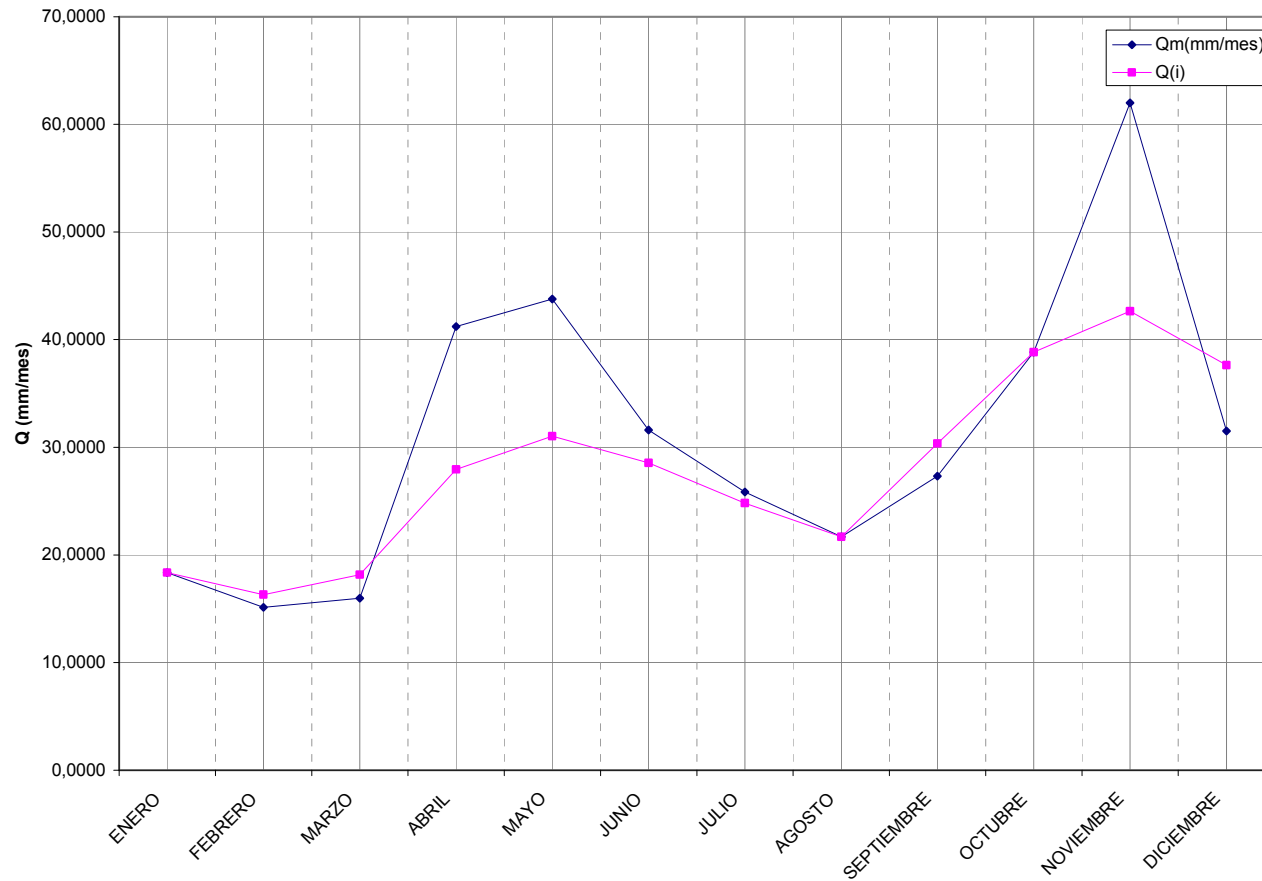


Gráfico No. 49. Comparación Qsimulado Vs Qmedido de la cuenca 49.

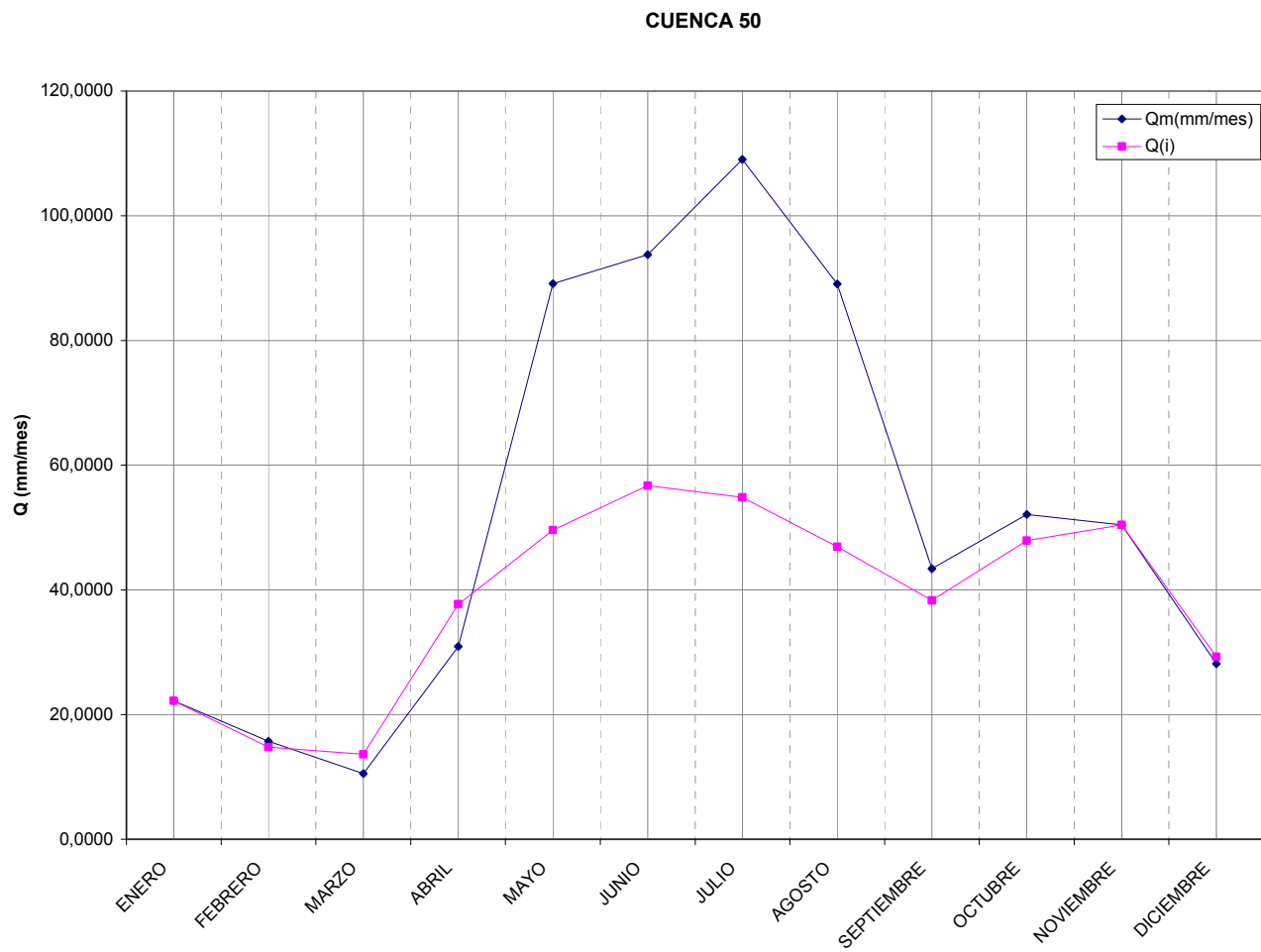


Gráfico No. 50. Comparación Qsimulado Vs Qmedido de la cuenca 50.

CUENCA 51

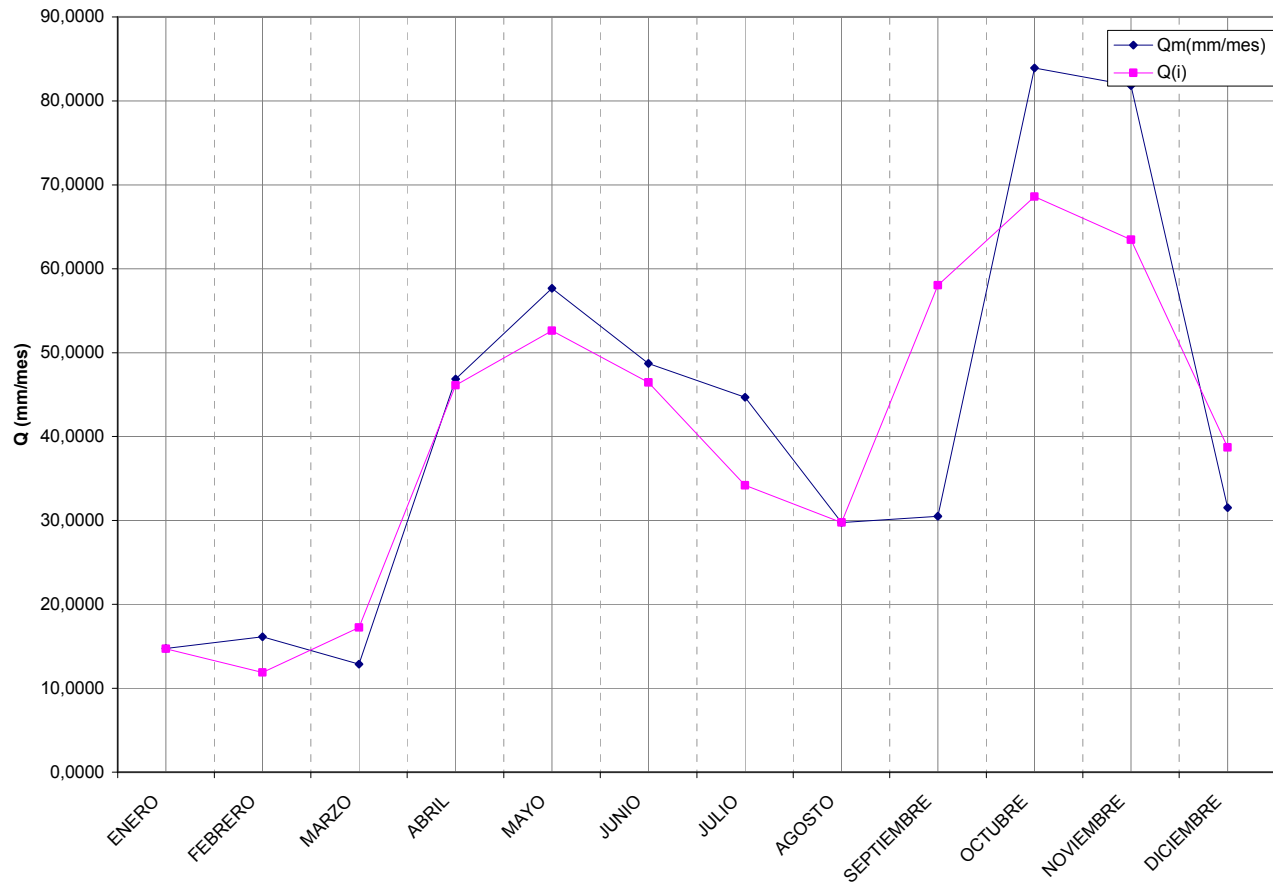


Gráfico No. 51. Comparación Qsimulado Vs Qmedido de la cuenca 51.



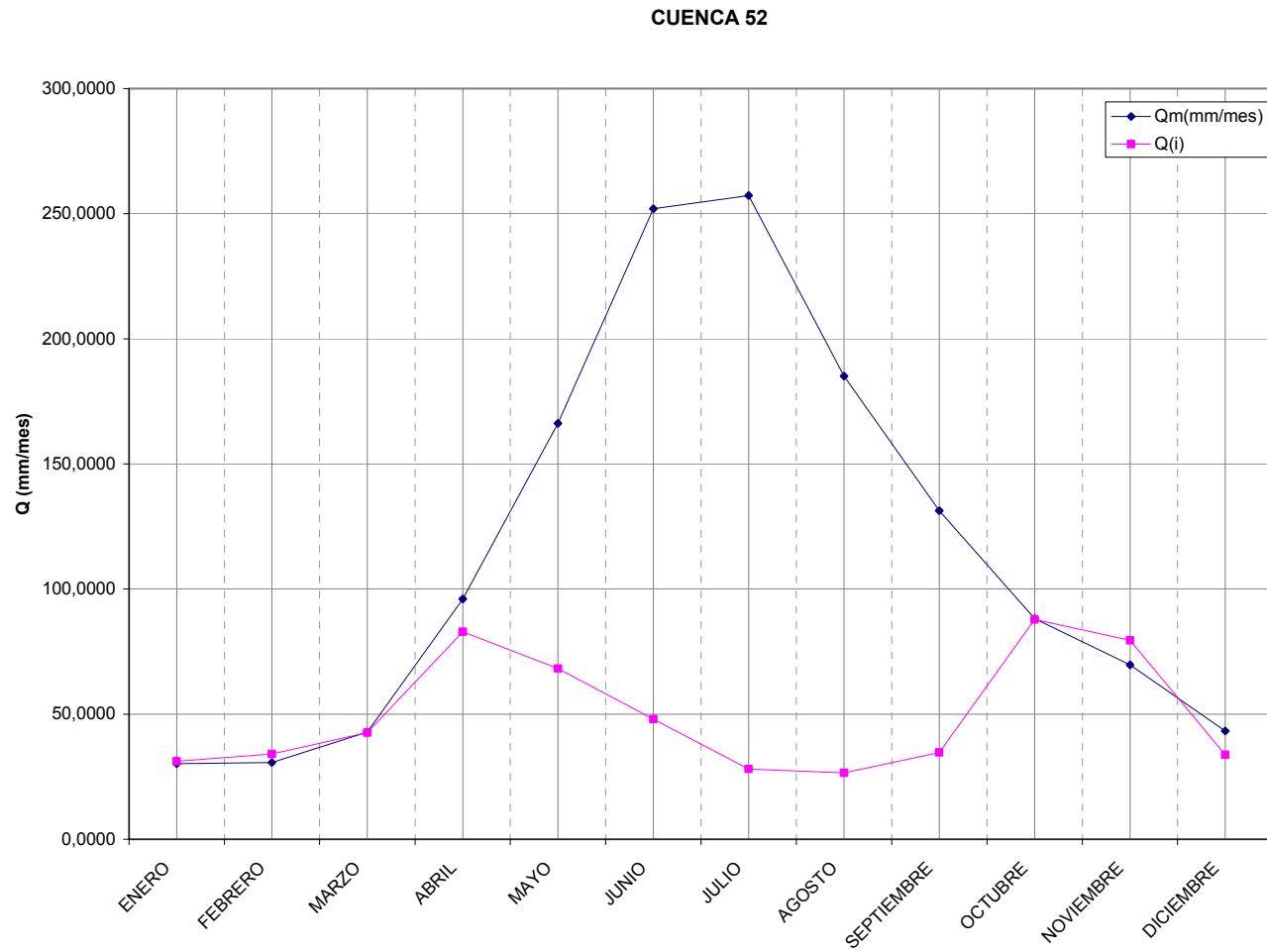


Gráfico No. 52. Comparación Qsimulado Vs Qmedido de la cuenca 52.

### CUENCA 53

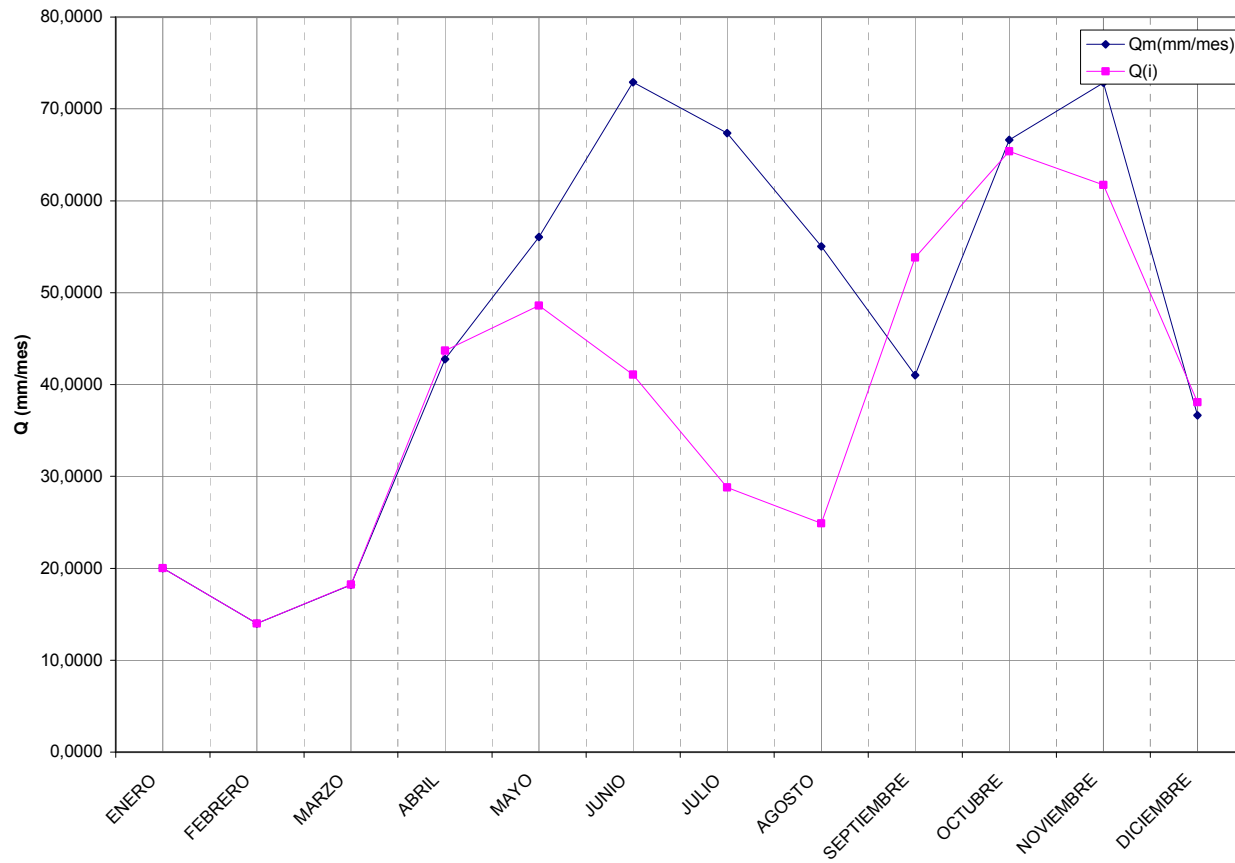


Gráfico No. 53. Comparación  $Q_{simulado}$  Vs  $Q_{medido}$  de la cuenca 53.

CUENCA 54

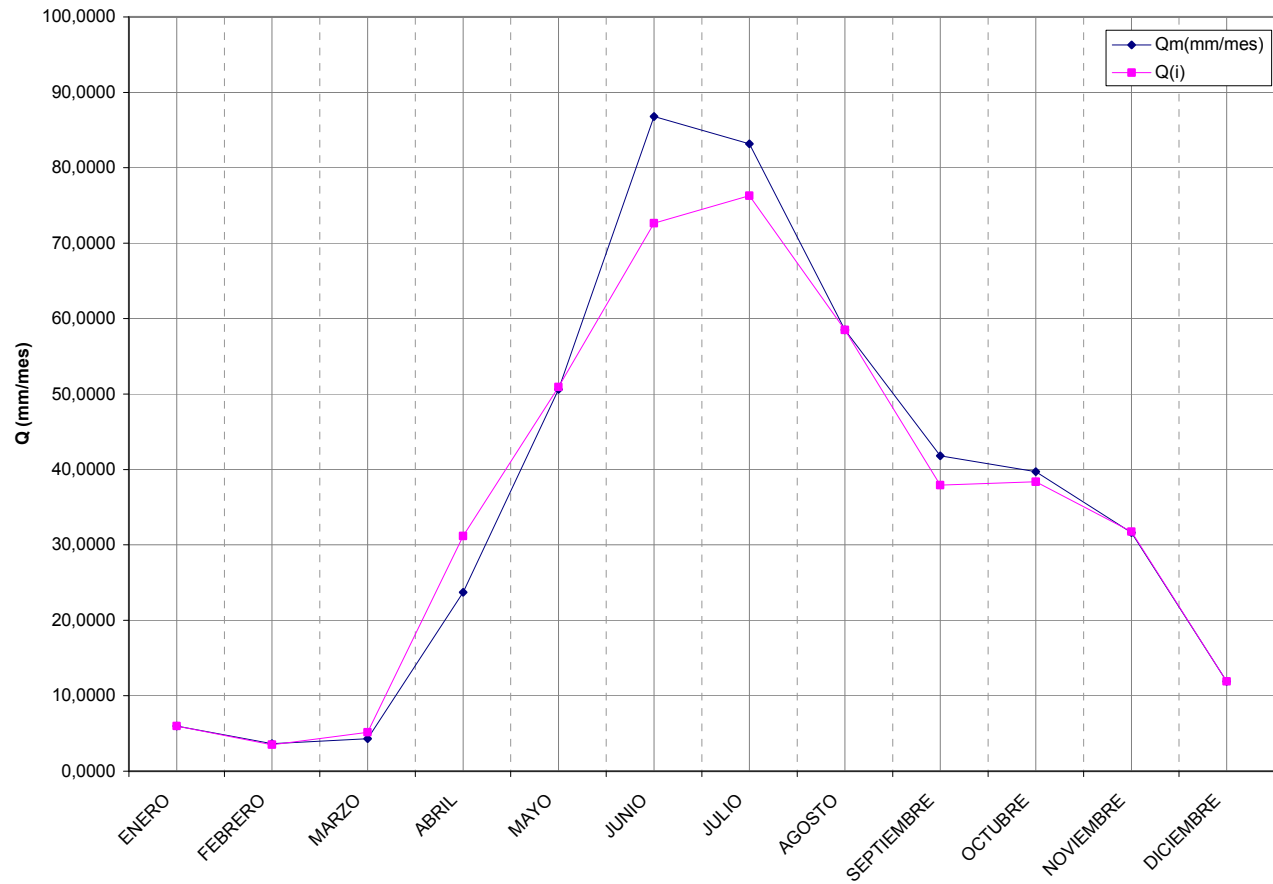


Gráfico No. 54. Comparación Qsimulado Vs Qmedido de la cuenca 54.

CUENCA 55

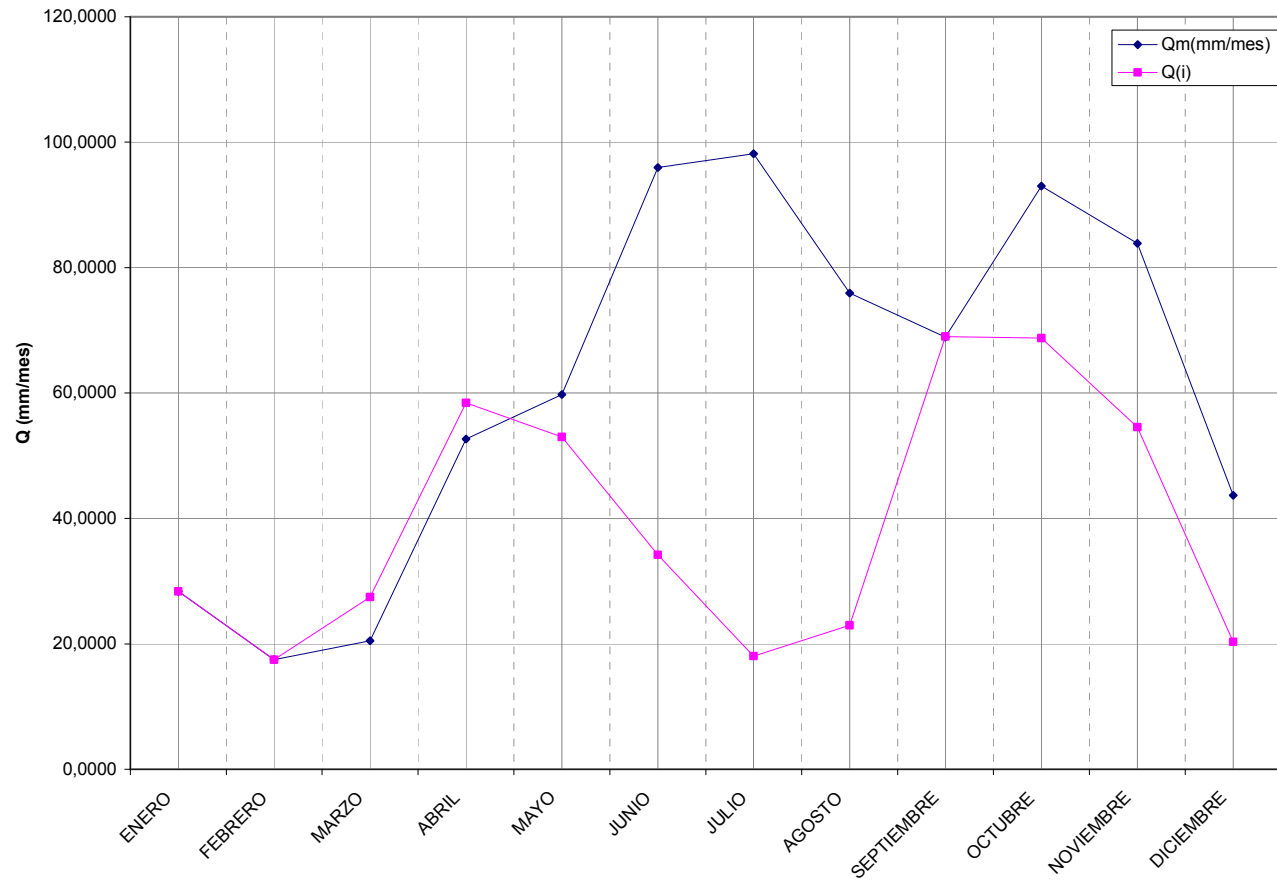


Gráfico No. 55. Comparación  $Q_{simulado}$  Vs  $Q_{medido}$  de la cuenca 55.

CUENCA 56

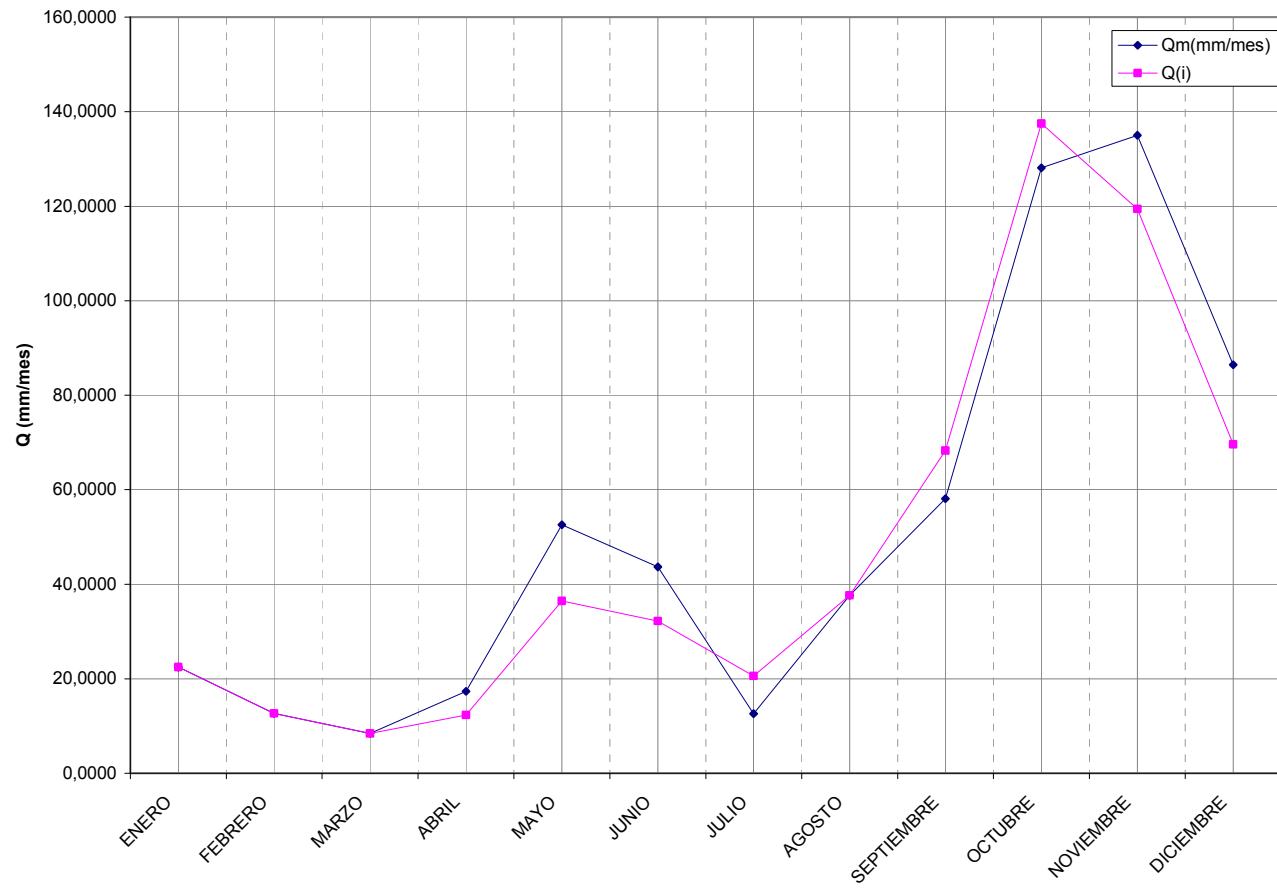


Gráfico No. 56. Comparación Qsimulado Vs Qmedido de la cuenca 56.

CUENCA 57

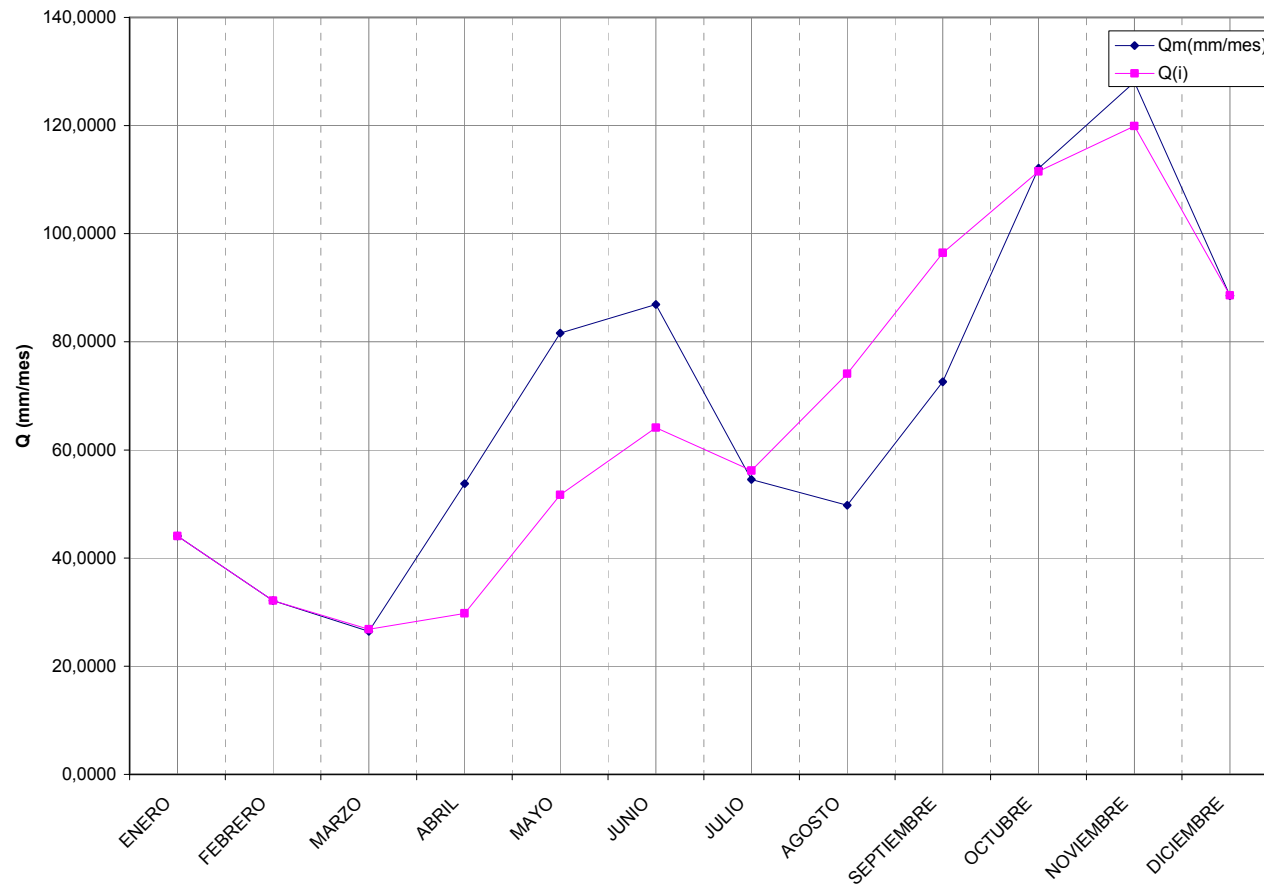


Gráfico No. 57. Comparación  $Q_{simulado}$  Vs  $Q_{medido}$  de la cuenca 57.

CUENCA 58

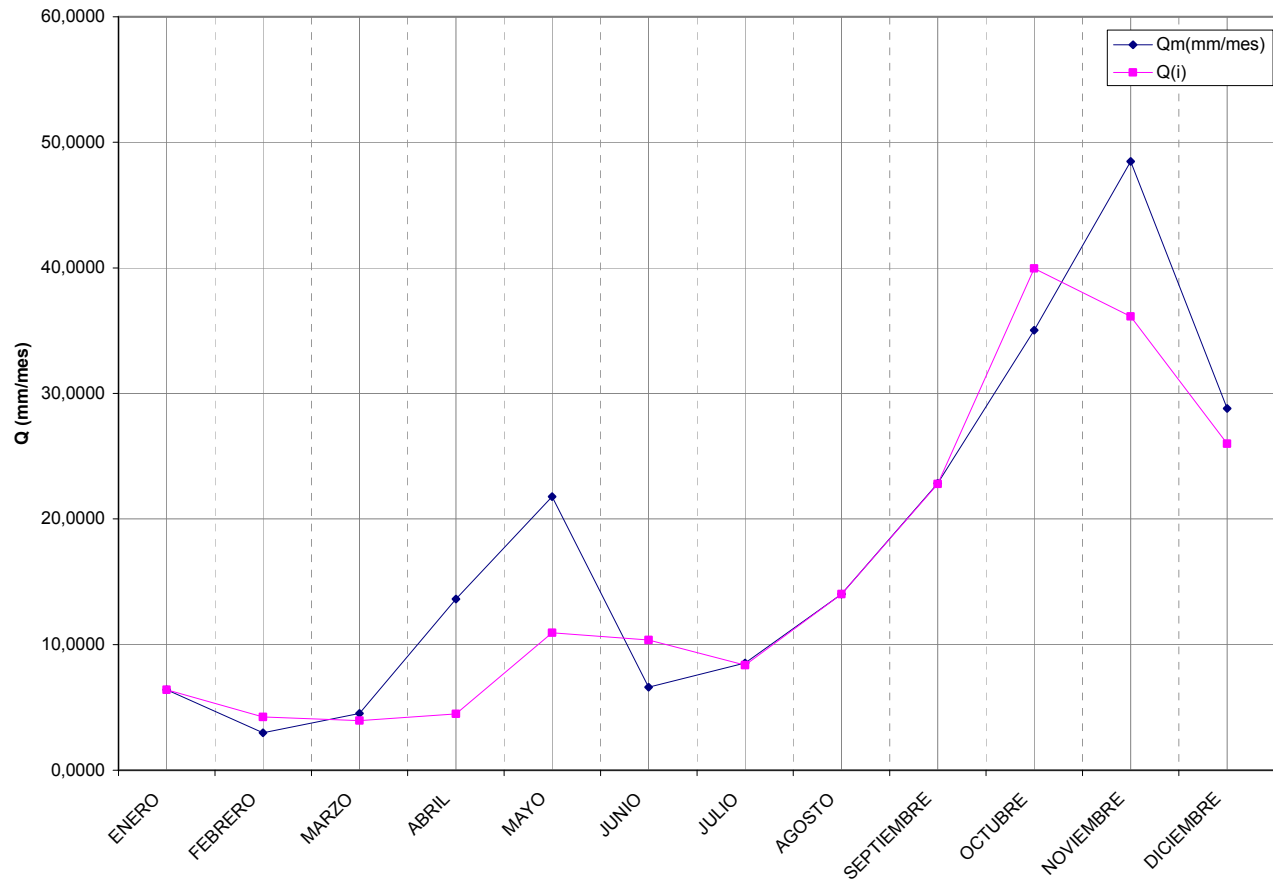


Gráfico No. 58. Comparación Qsimulado Vs Qmedido de la cuenca 58.

CUENCA 59

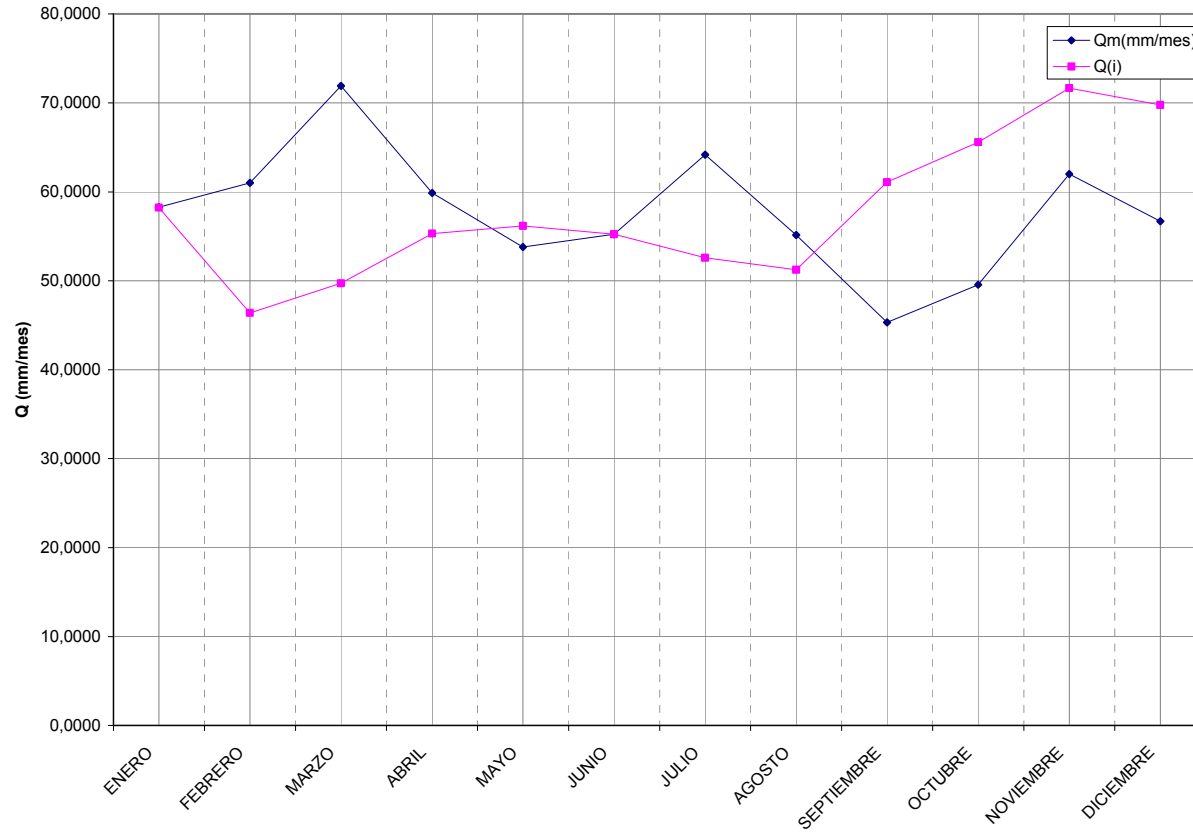


Gráfico No. 59. Comparación  $Q_{simulado}$  Vs  $Q_{medido}$  de la cuenca 59.



CUENCA 60

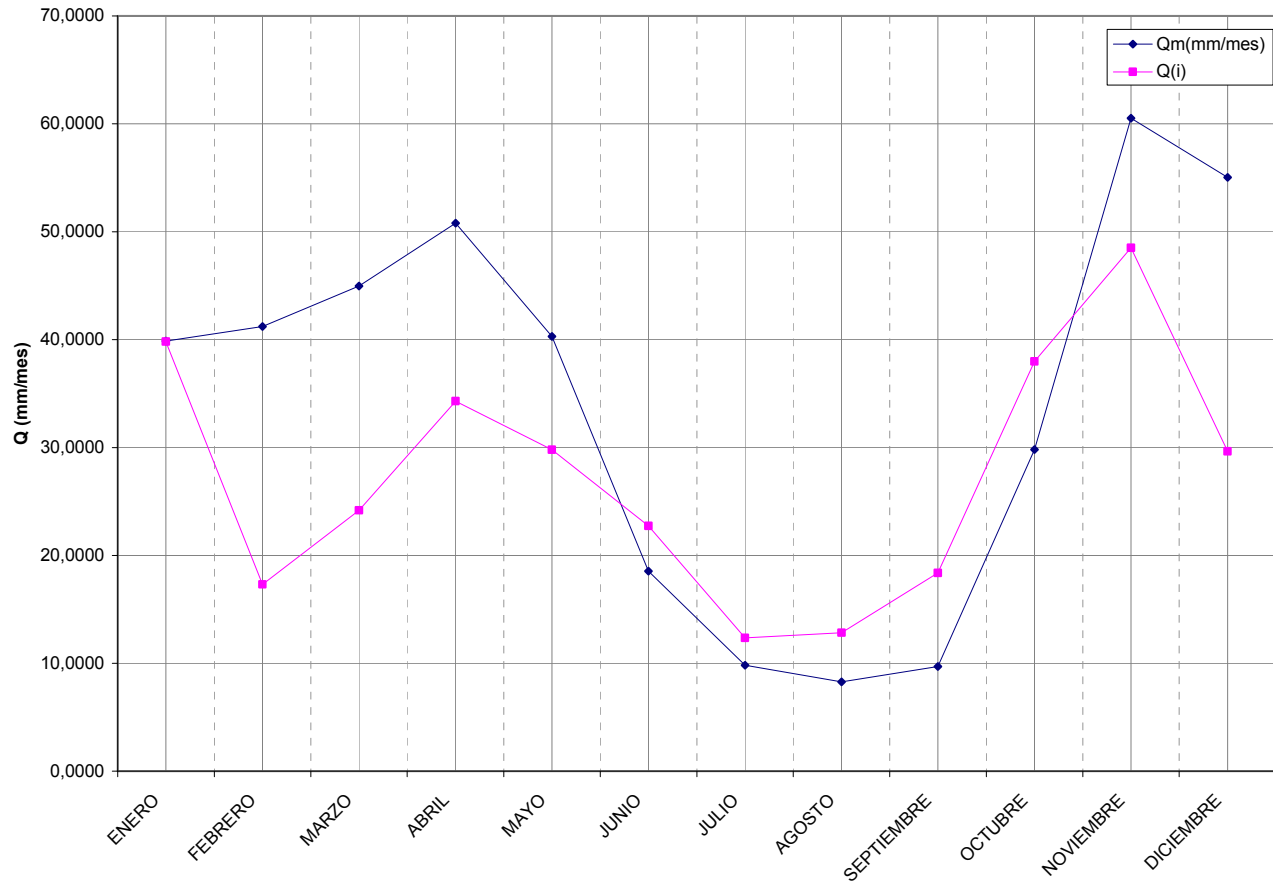


Gráfico No. 60. Comparación Qsimulado Vs Qmedido de la cuenca 60.

### CUENCA 61

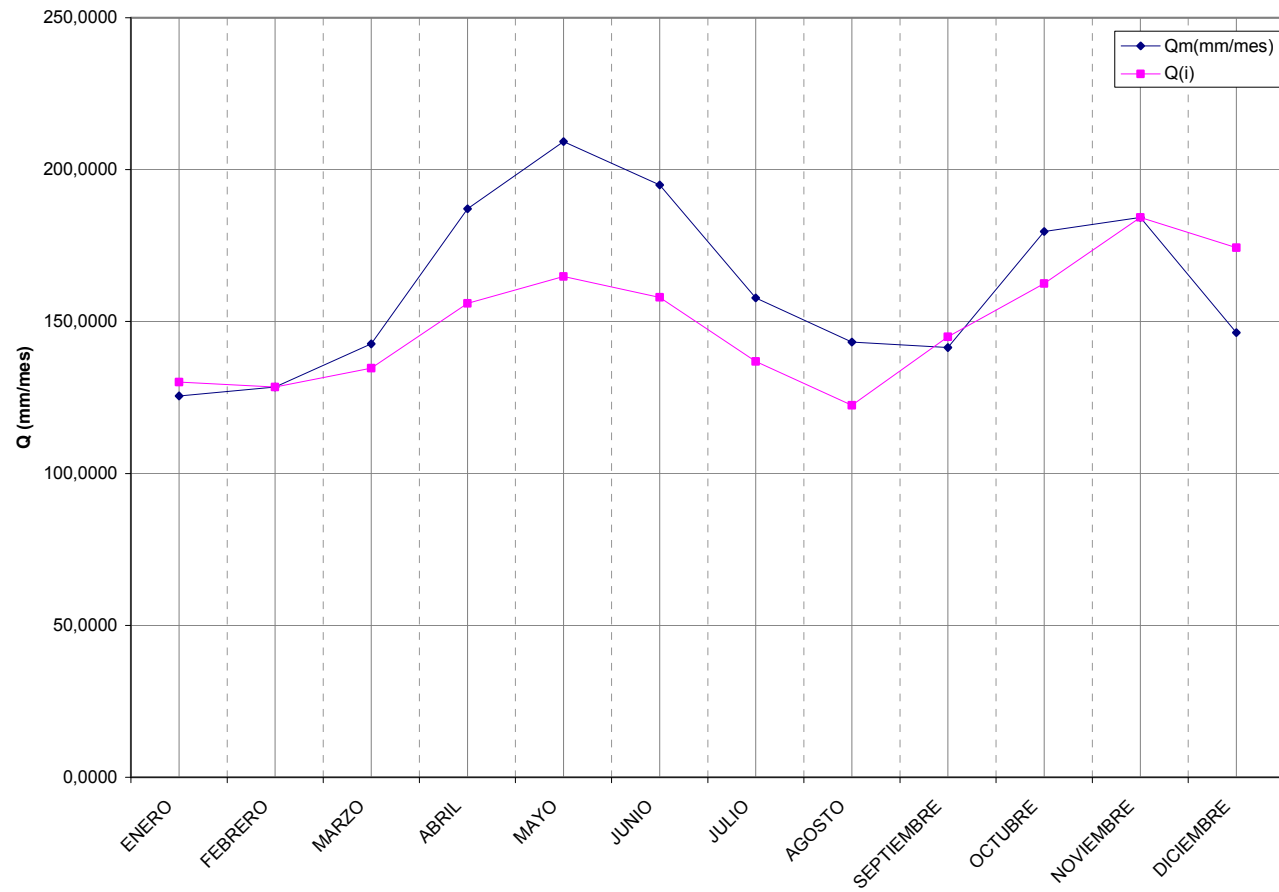


Gráfico No. 61. Comparación Qsimulado Vs Qmedido de la cuenca 61.

CUENCA 62

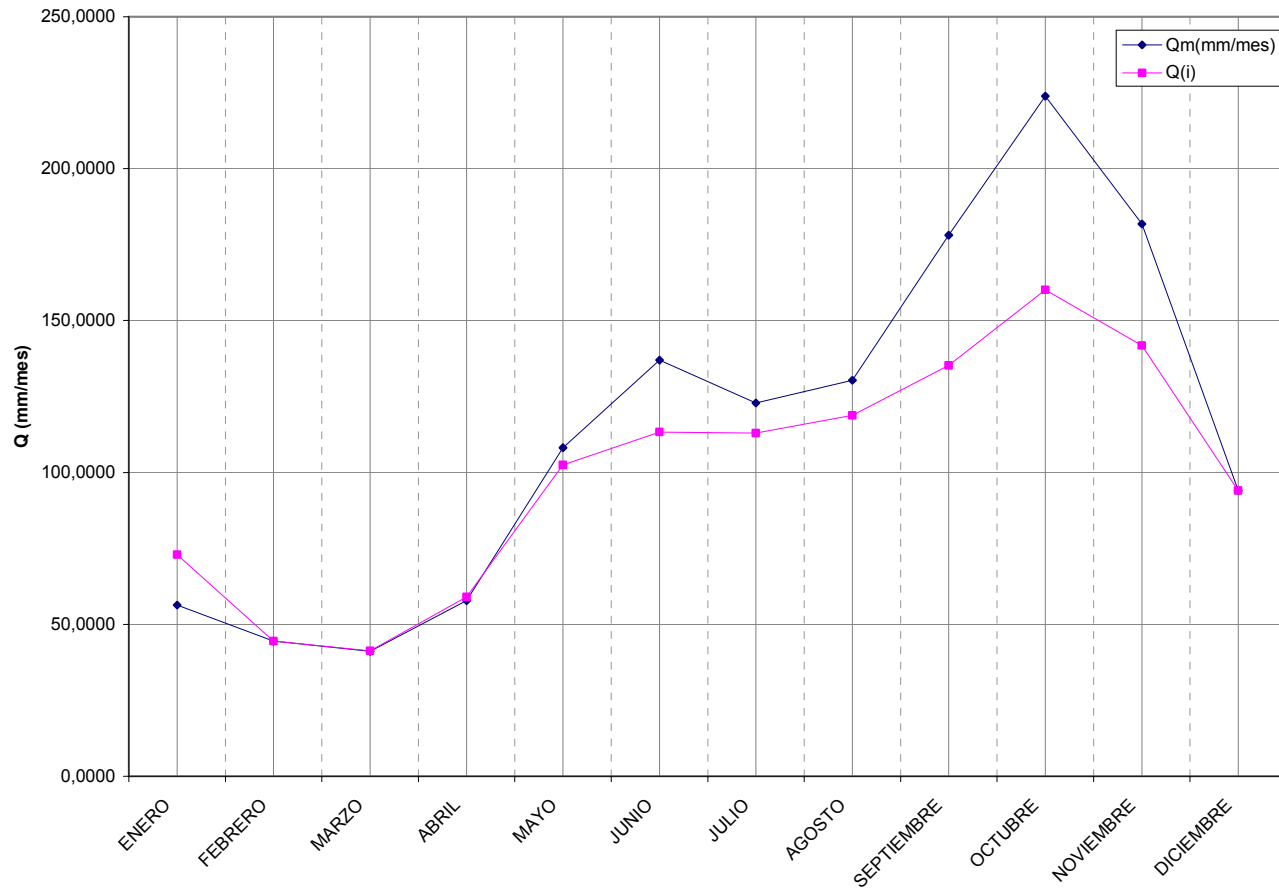


Gráfico No. 62. Comparación Qsimulado Vs Qmedido de la cuenca 62.

CUENCA 63

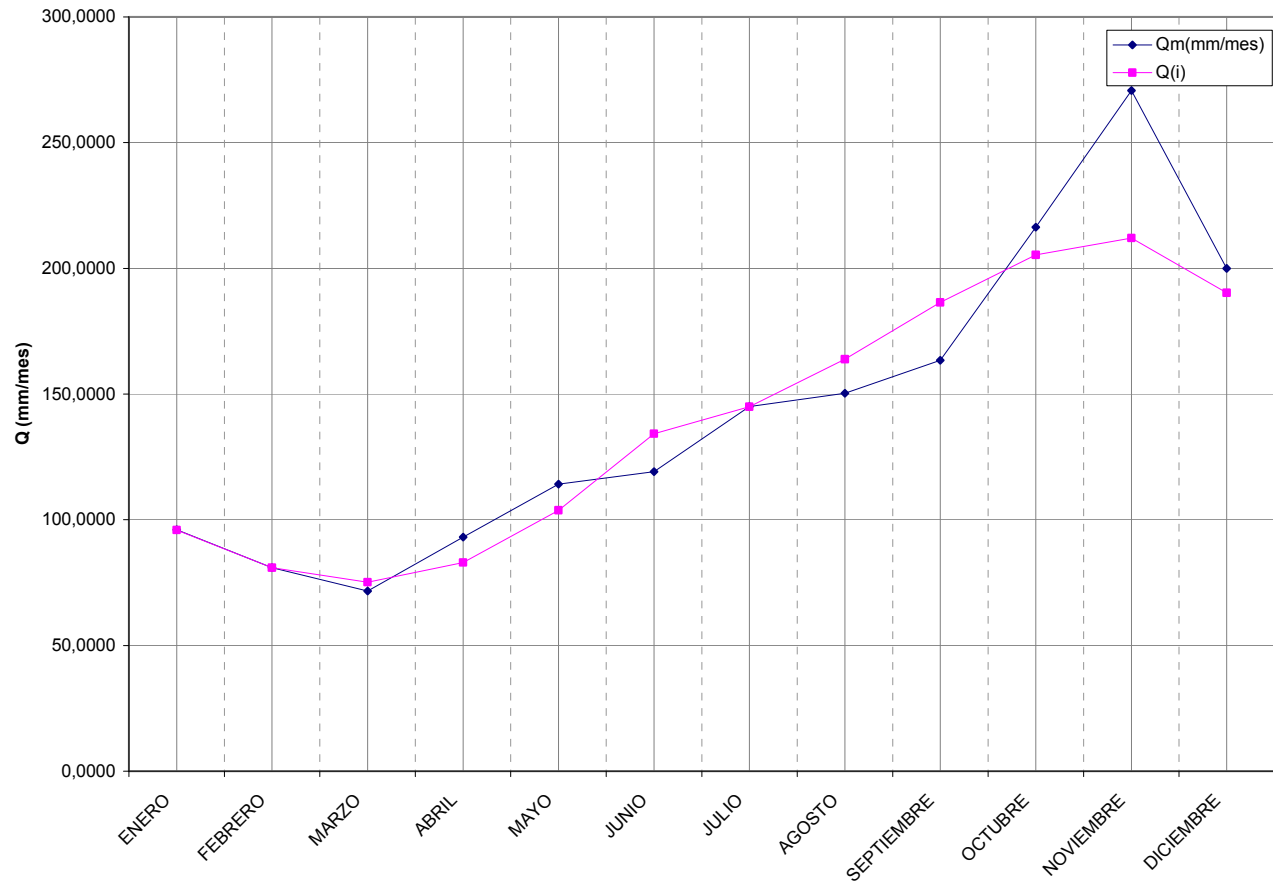


Gráfico No. 63. Comparación Qsimulado Vs Qmedido de la cuenca 63.

CUENCA 64

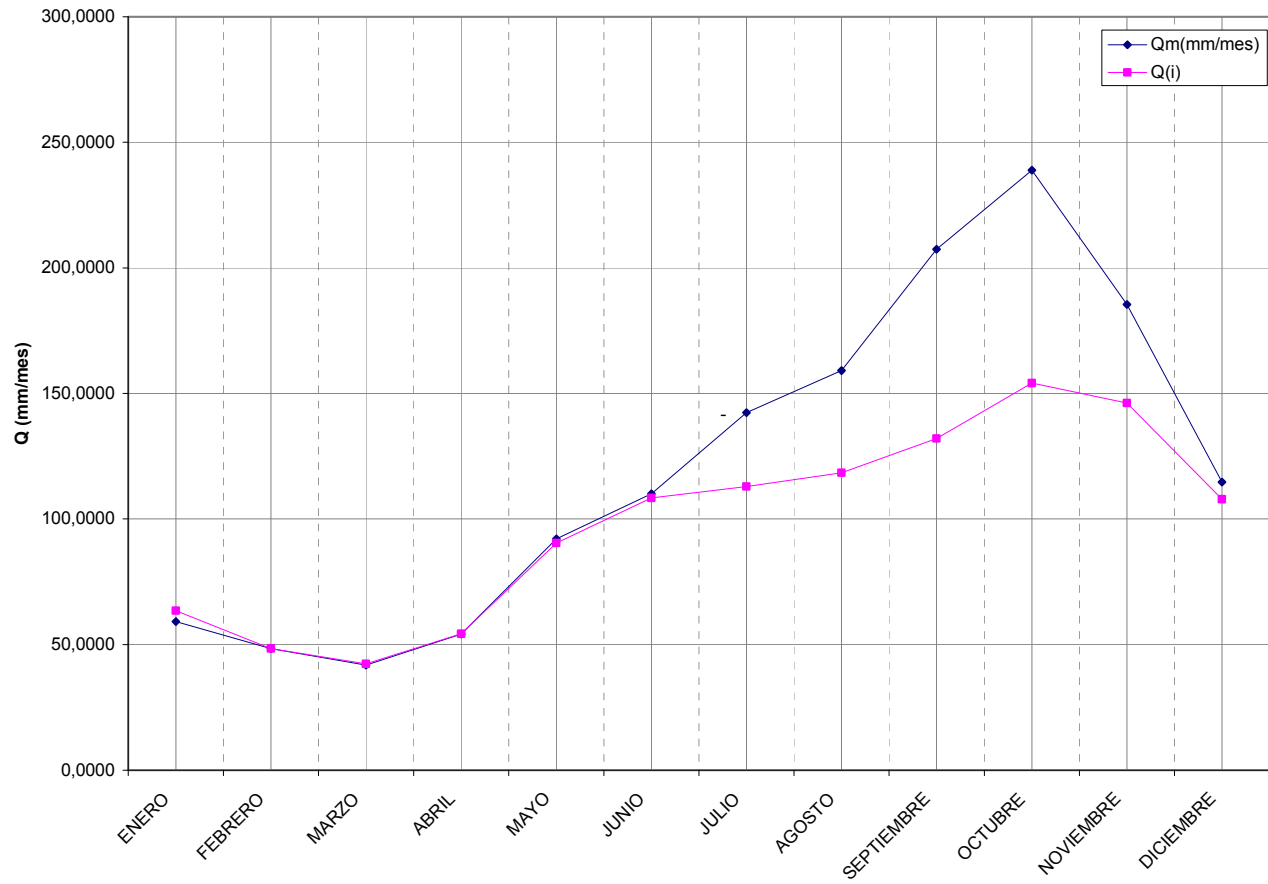


Gráfico No. 64. Comparación Qsimulado Vs Qmedido de la cuenca 64.

### CUENCA 65

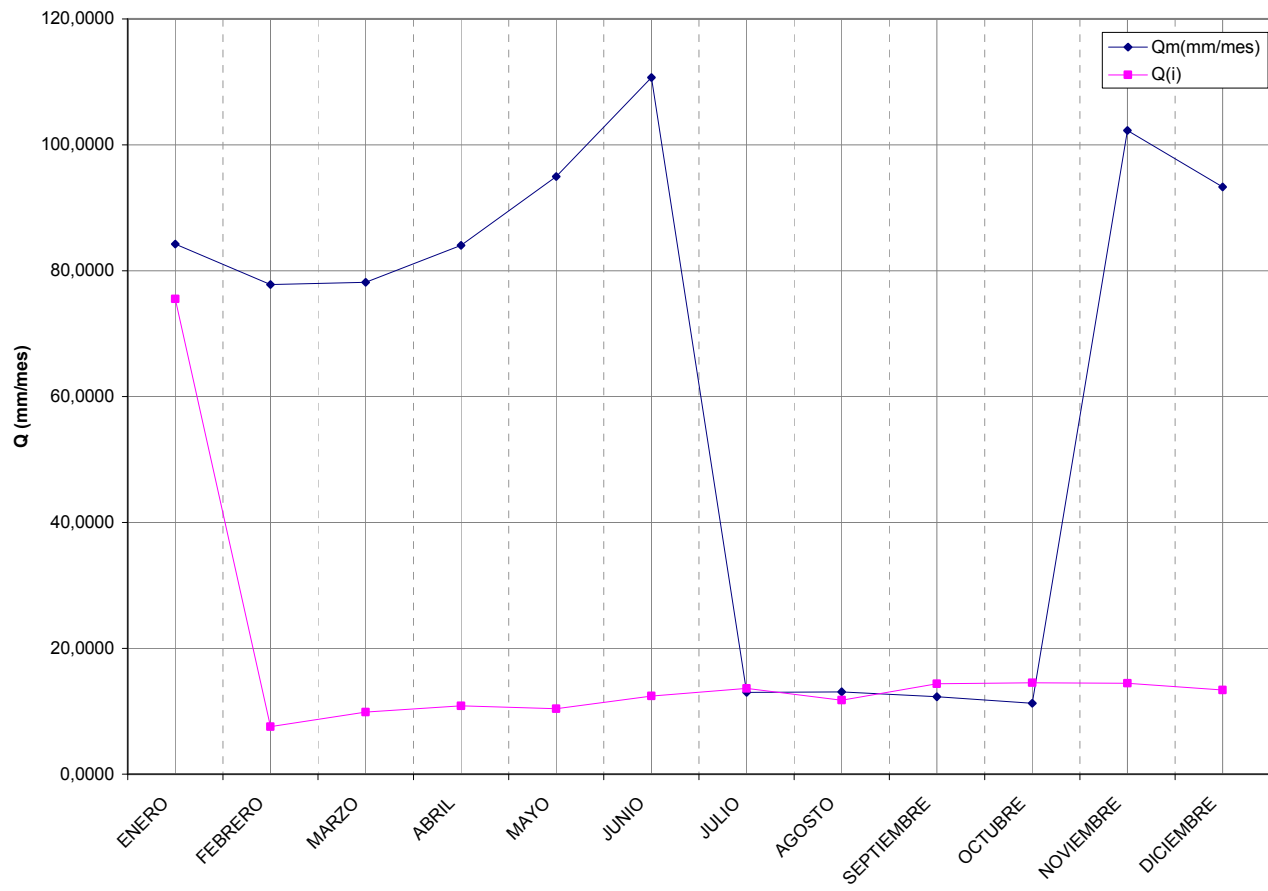


Gráfico No. 65. Comparación  $Q_{simulado}$  Vs  $Q_{medido}$  de la cuenca 65.

CUENCA 66

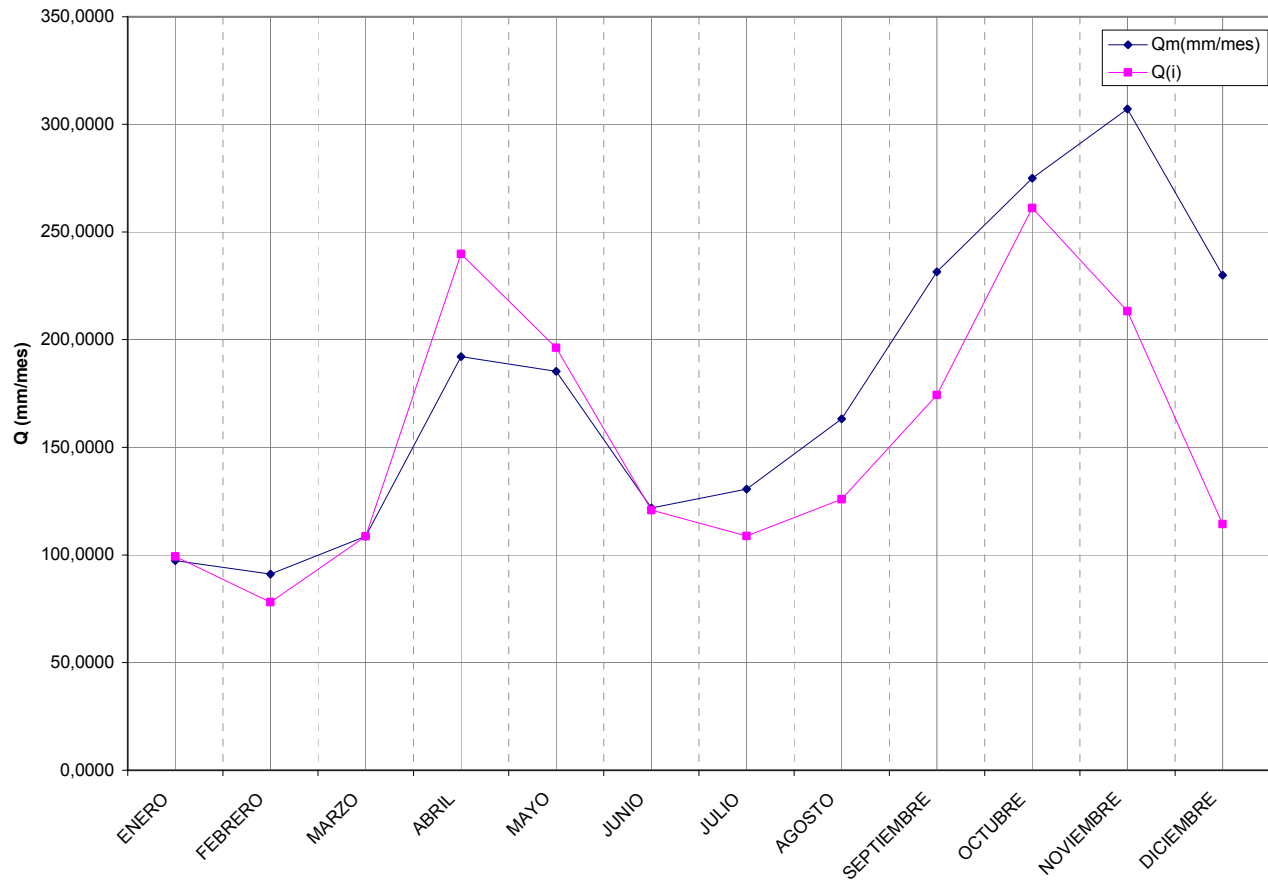


Gráfico No. 66. Comparación  $Q_{simulado}$  Vs  $Q_{medido}$  de la cuenca 66.

CUENCA 67

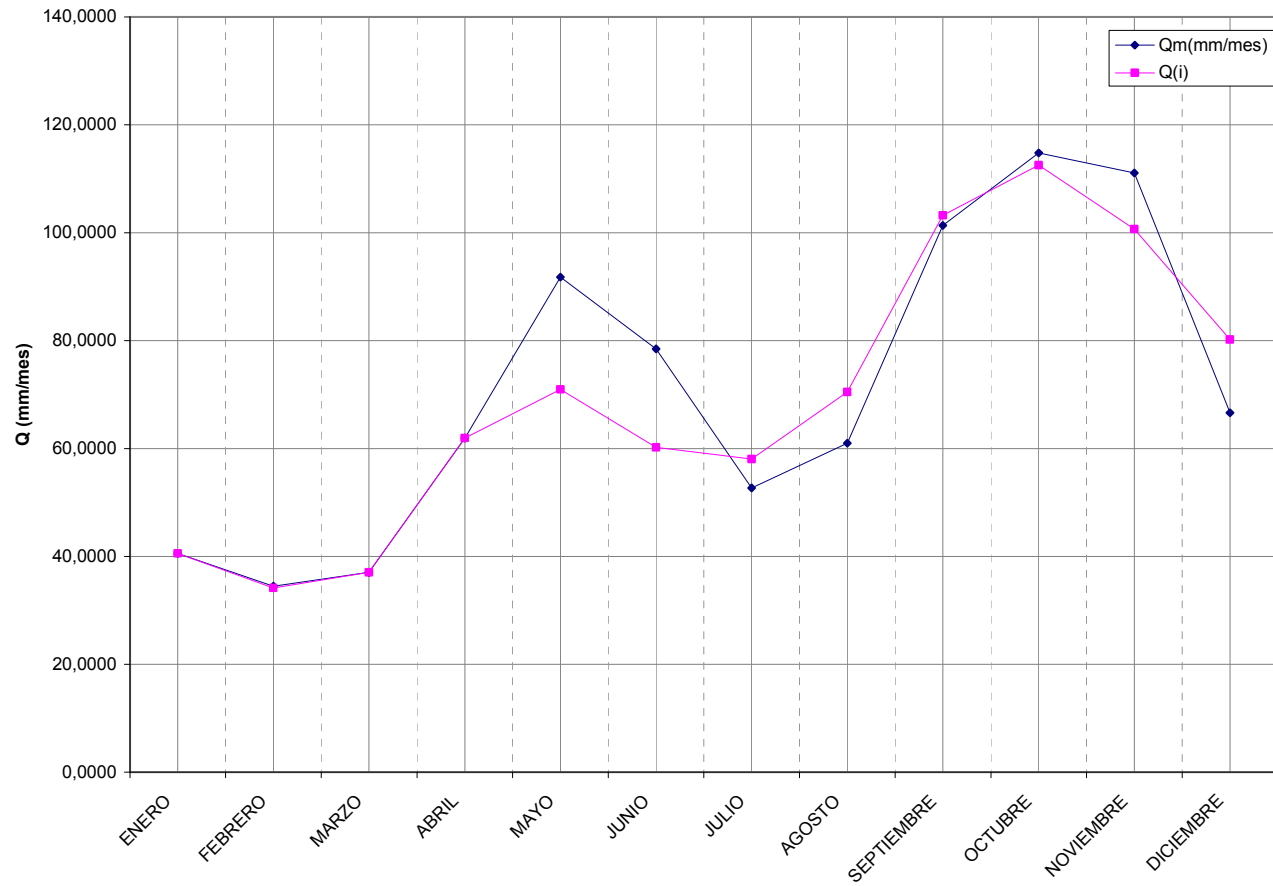


Gráfico No. 67. Comparación Qsimulado Vs Qmedido de la cuenca 67.



### CUENCA 68

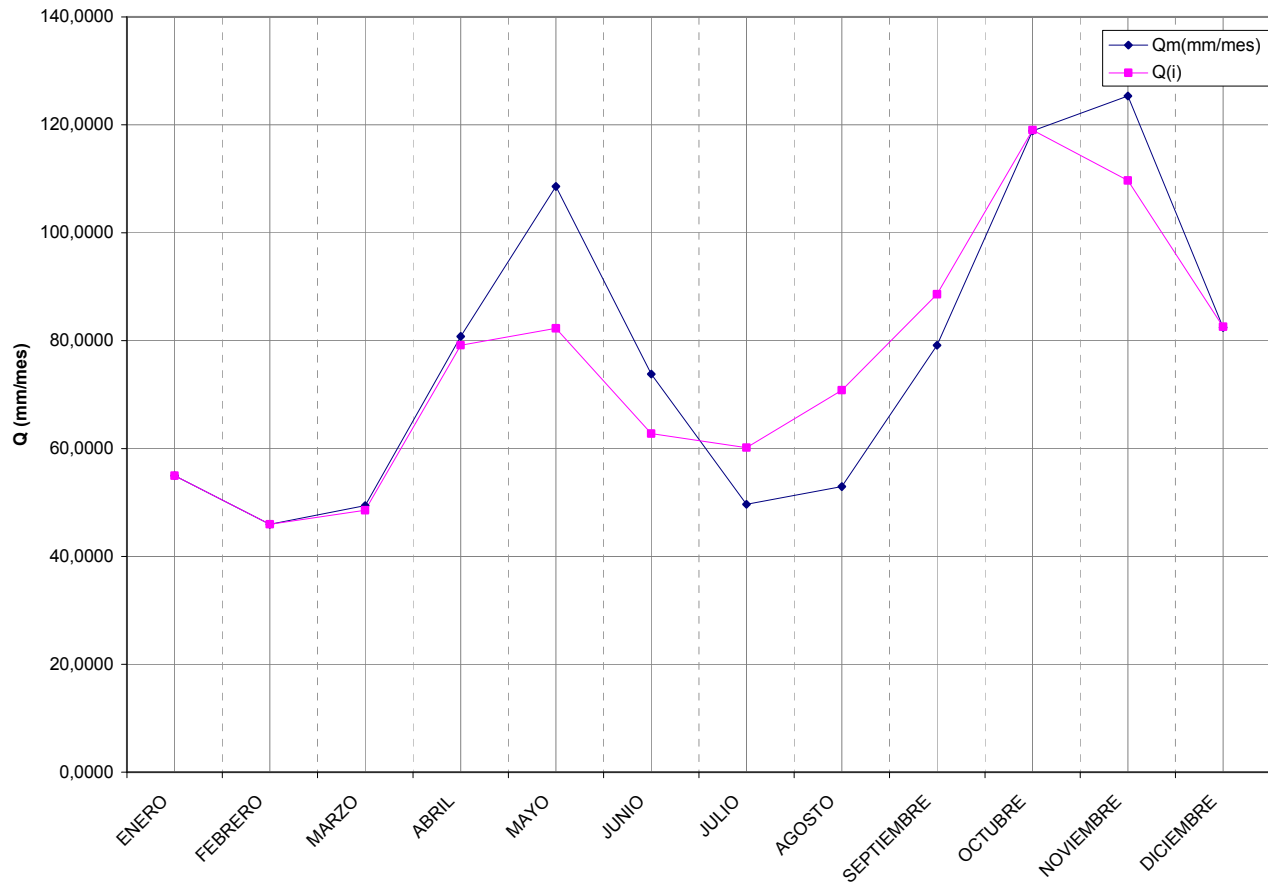


Gráfico No. 68. Comparación  $Q_{simulado}$  Vs  $Q_{medido}$  de la cuenca 68.

CUENCA 69

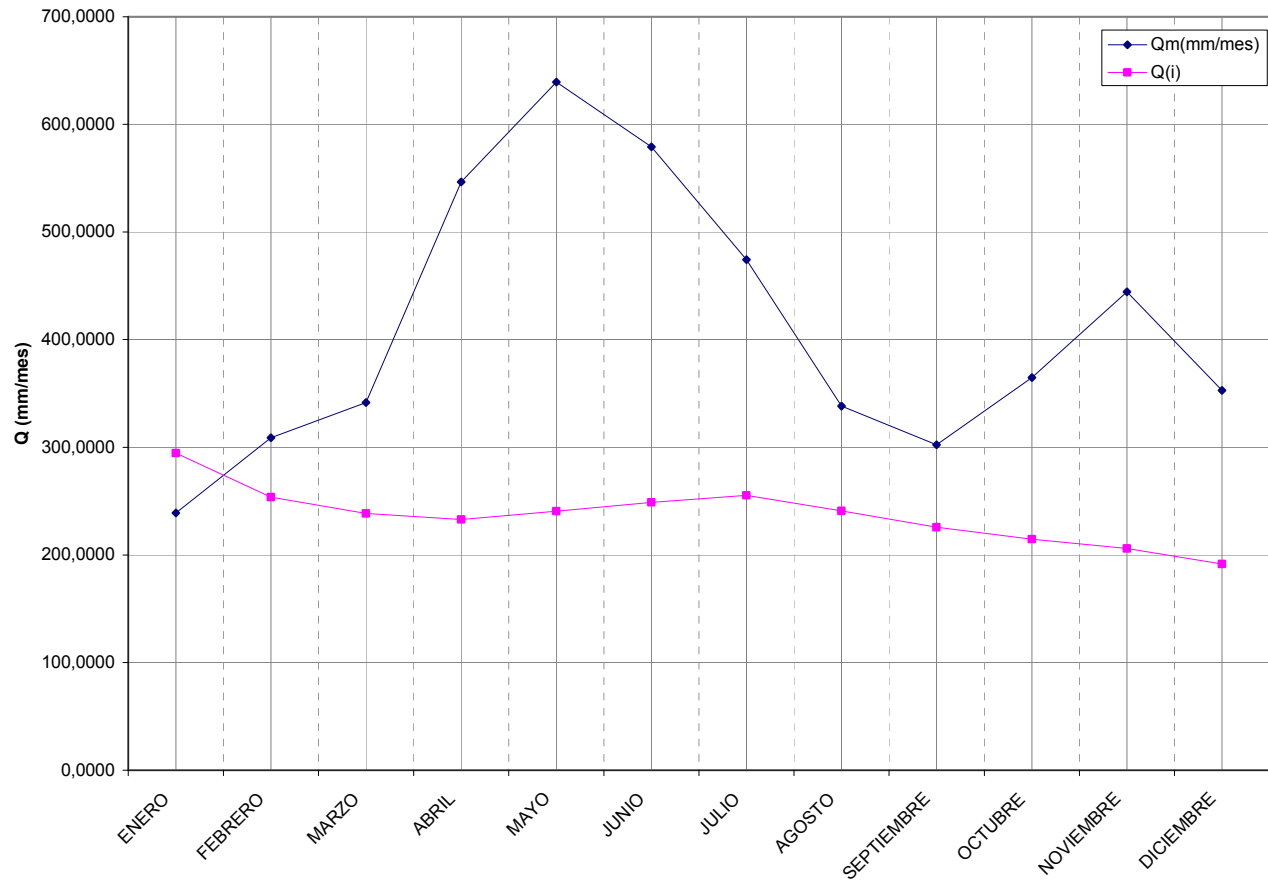


Gráfico No. 69. Comparación Qsimulado Vs Qmedido de la cuenca 69.

### CUENCA 70

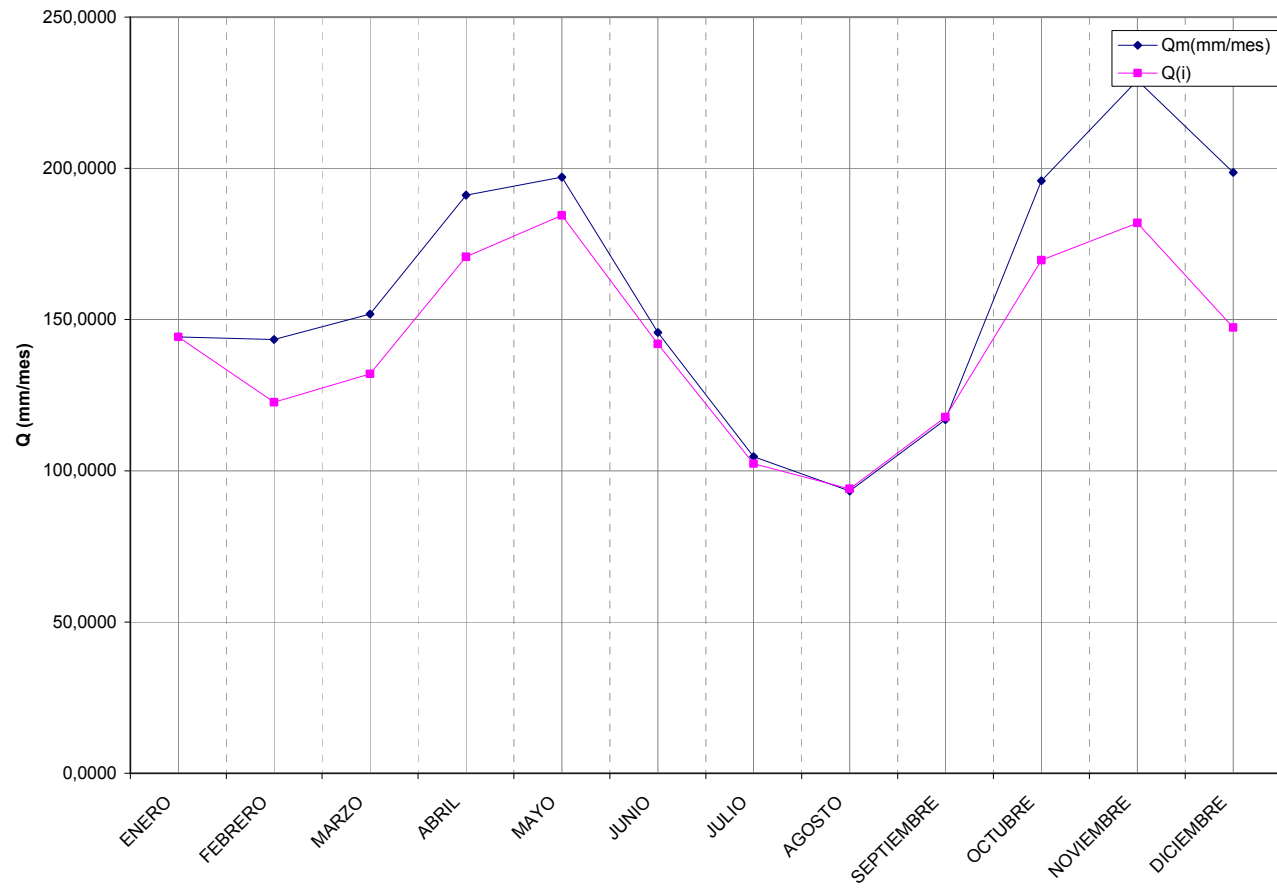


Gráfico No. 70. Comparación  $Q_{simulado}$  Vs  $Q_{medido}$  de la cuenca 70.

CUENCA 71

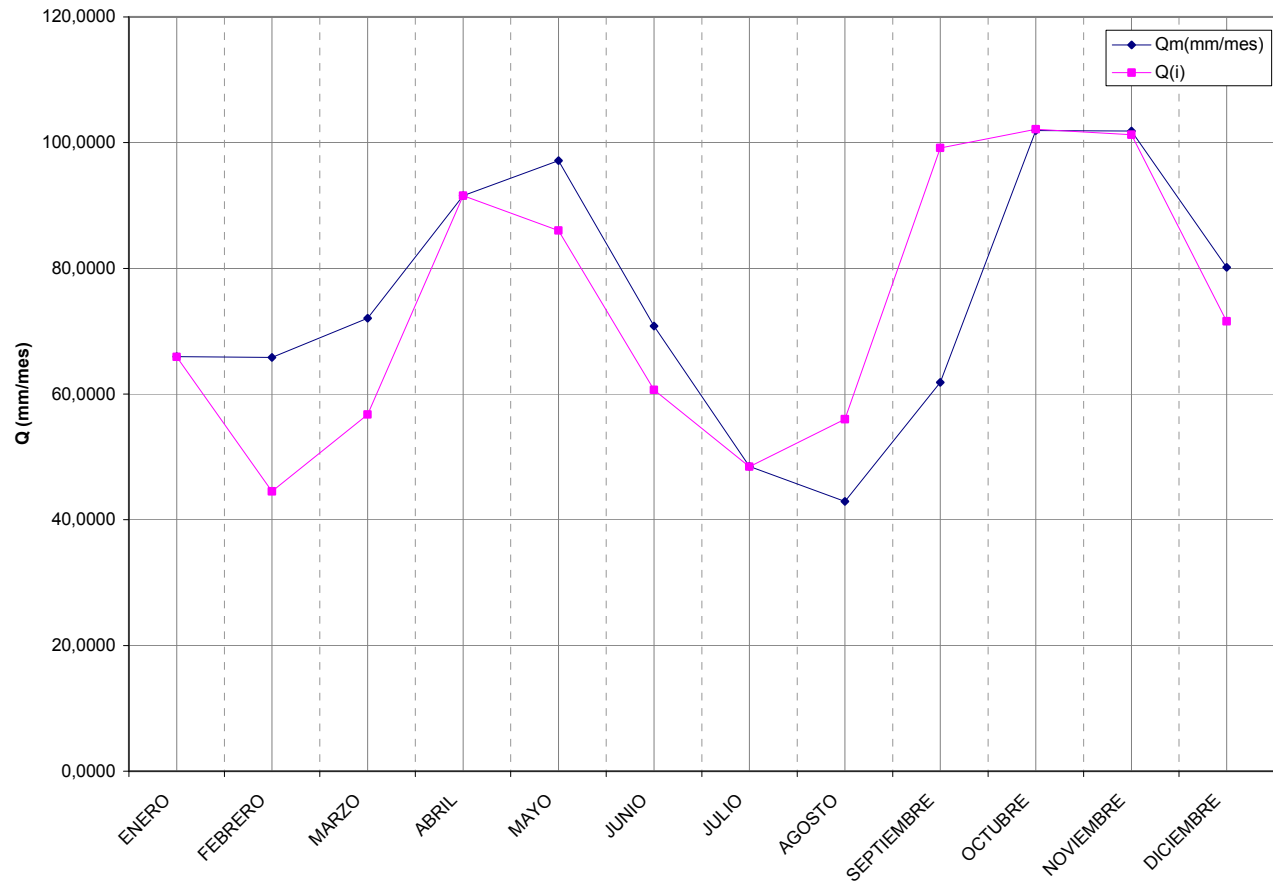


Gráfico No. 71. Comparación Qsimulado Vs Qmedido de la cuenca 71.

### CUENCA 72

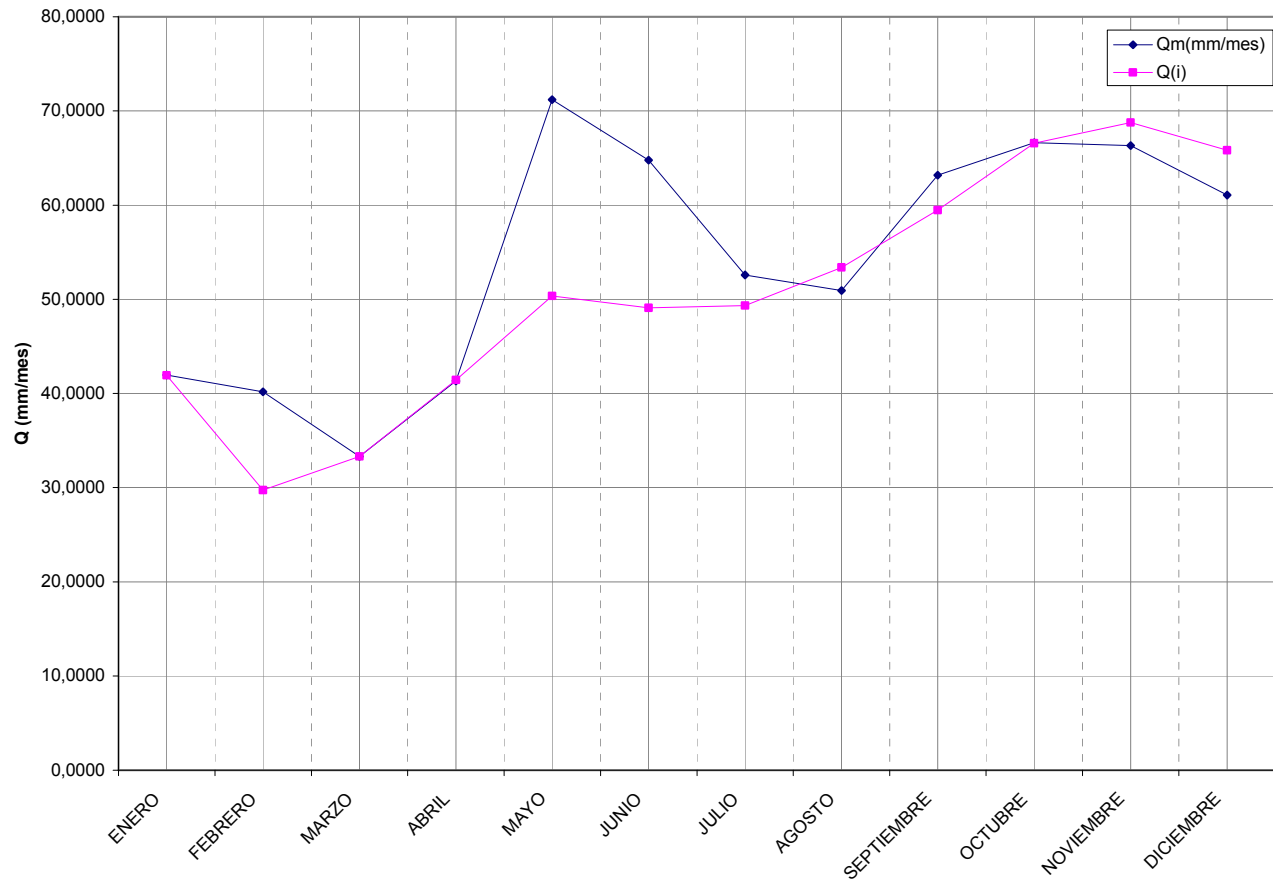


Gráfico No. 72. Comparación  $Q_{simulado}$  Vs  $Q_{medido}$  de la cuenca 72.

CUENCA 73

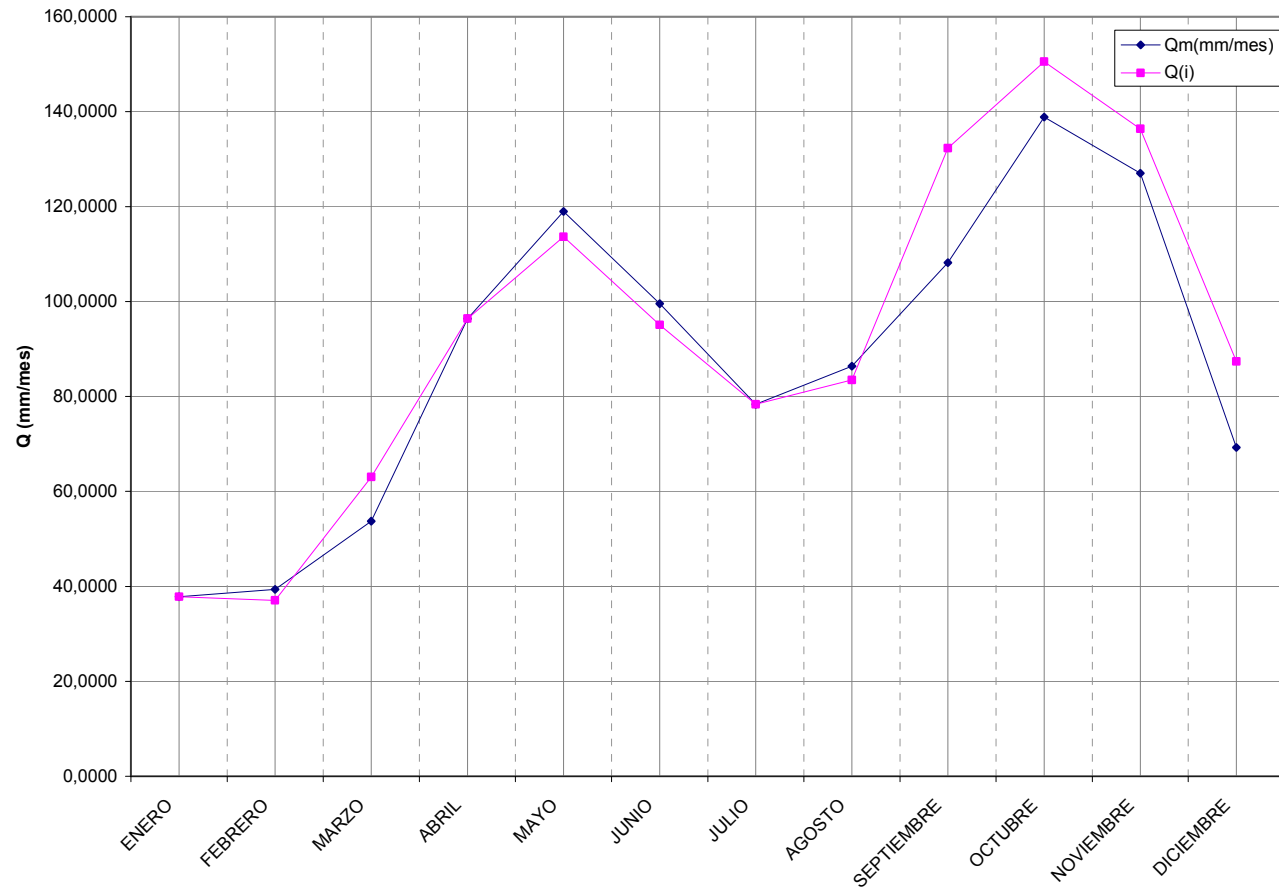


Gráfico No. 73. Comparación Qsimulado Vs Qmedido de la cuenca 73.

### CUENCA 74

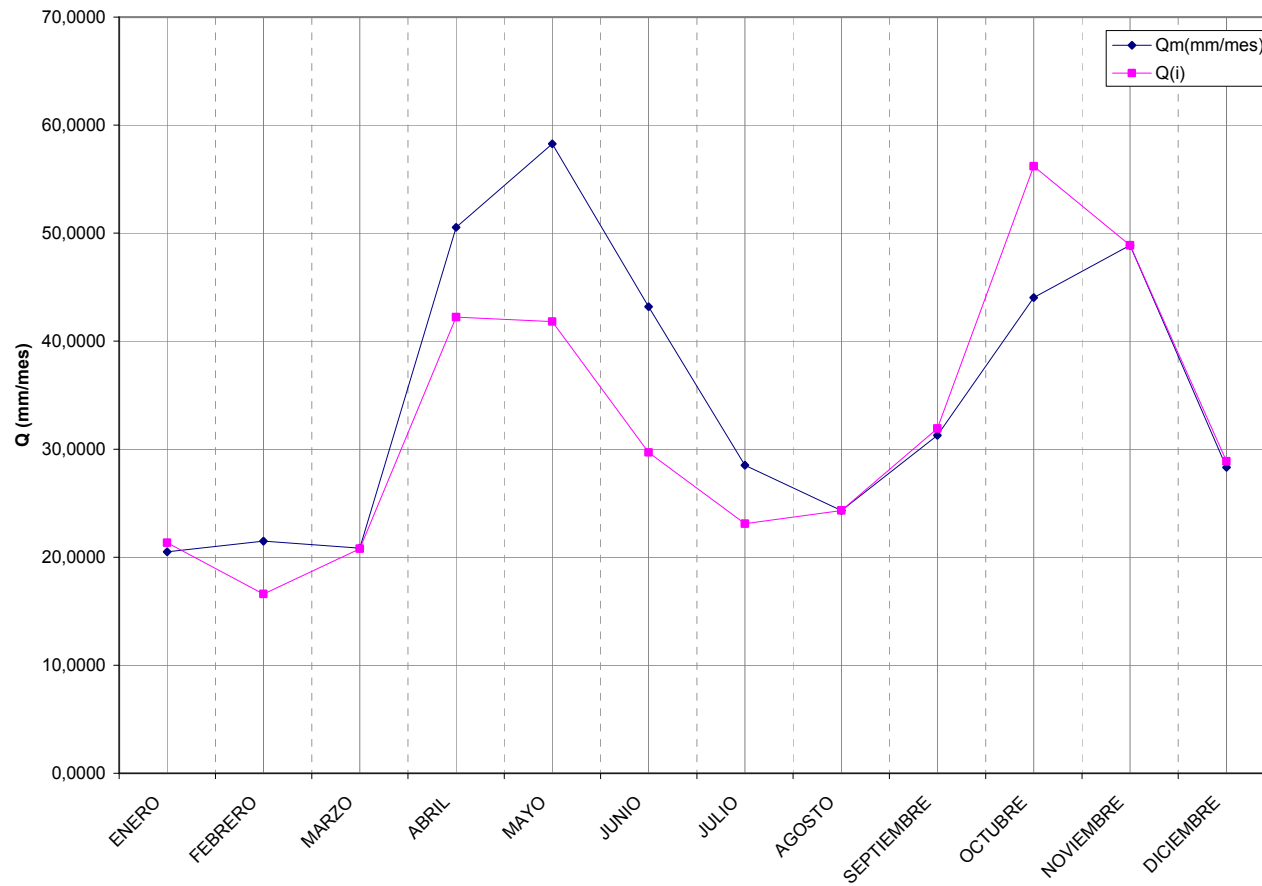


Gráfico No. 74. Comparación  $Q_{simulado}$  Vs  $Q_{medido}$  de la cuenca 74.

CUENCA 75

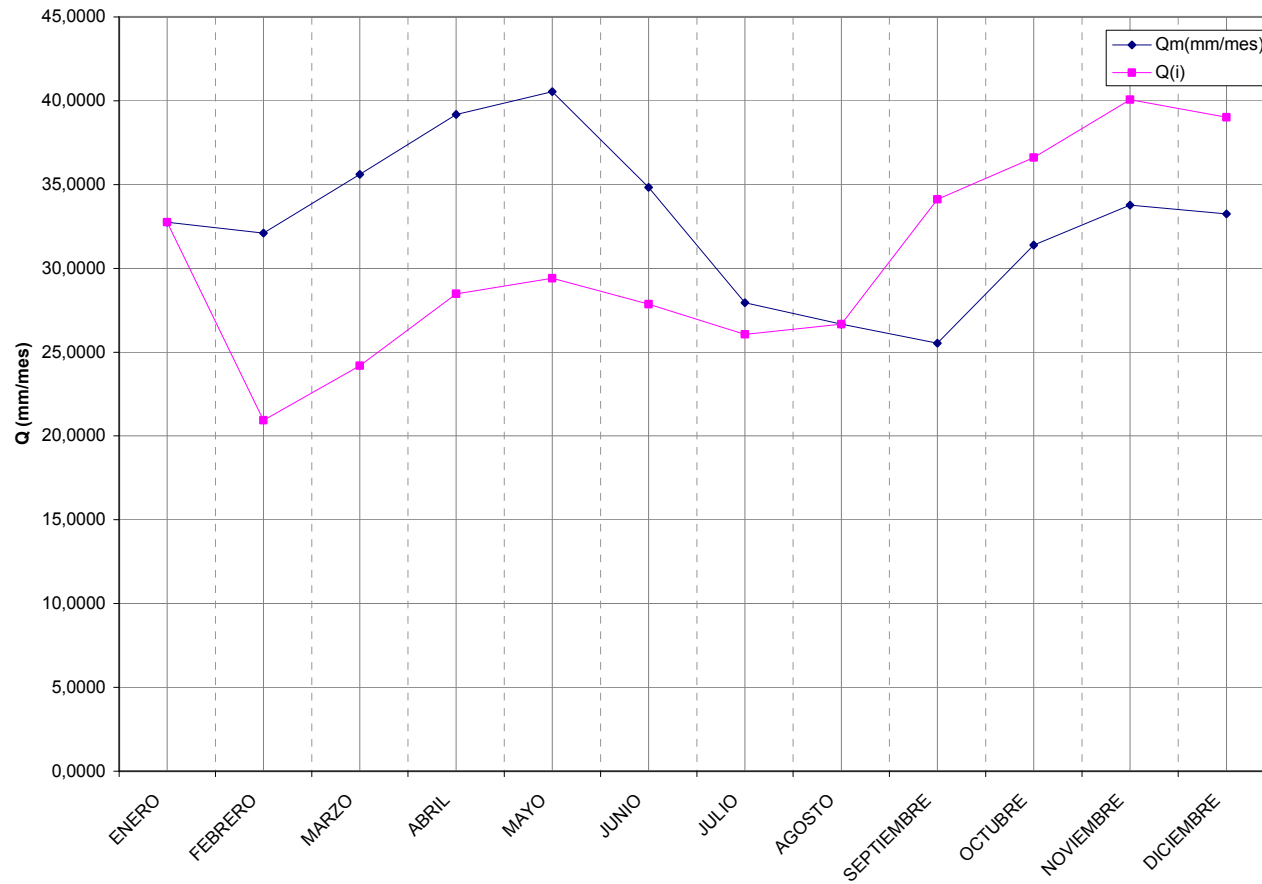


Gráfico No. 75. Comparación Qsimulado Vs Qmedido de la cuenca 75.



### CUENCA 76

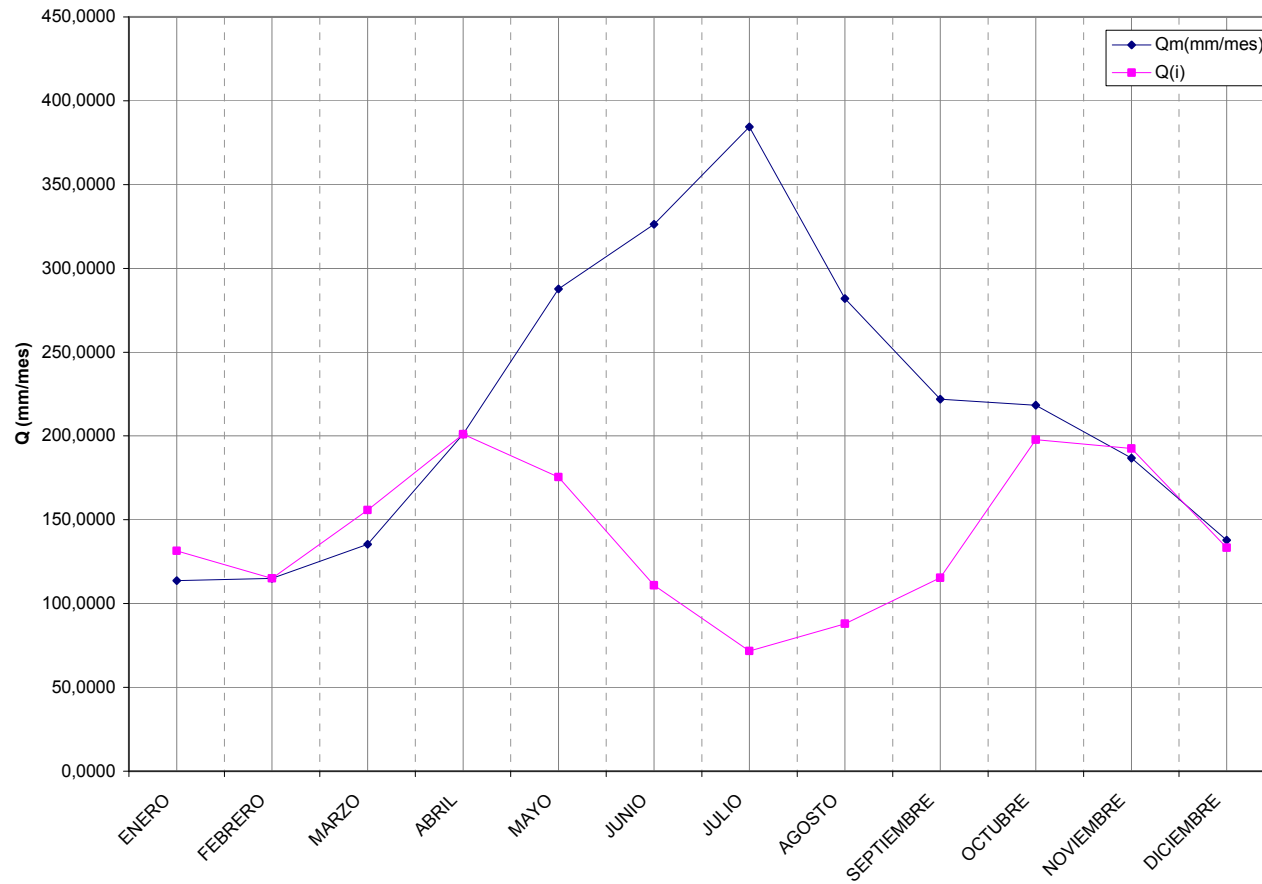


Gráfico No. 76. Comparación  $Q_{simulado}$  Vs  $Q_{medido}$  de la cuenca 76.

CUENCA 77

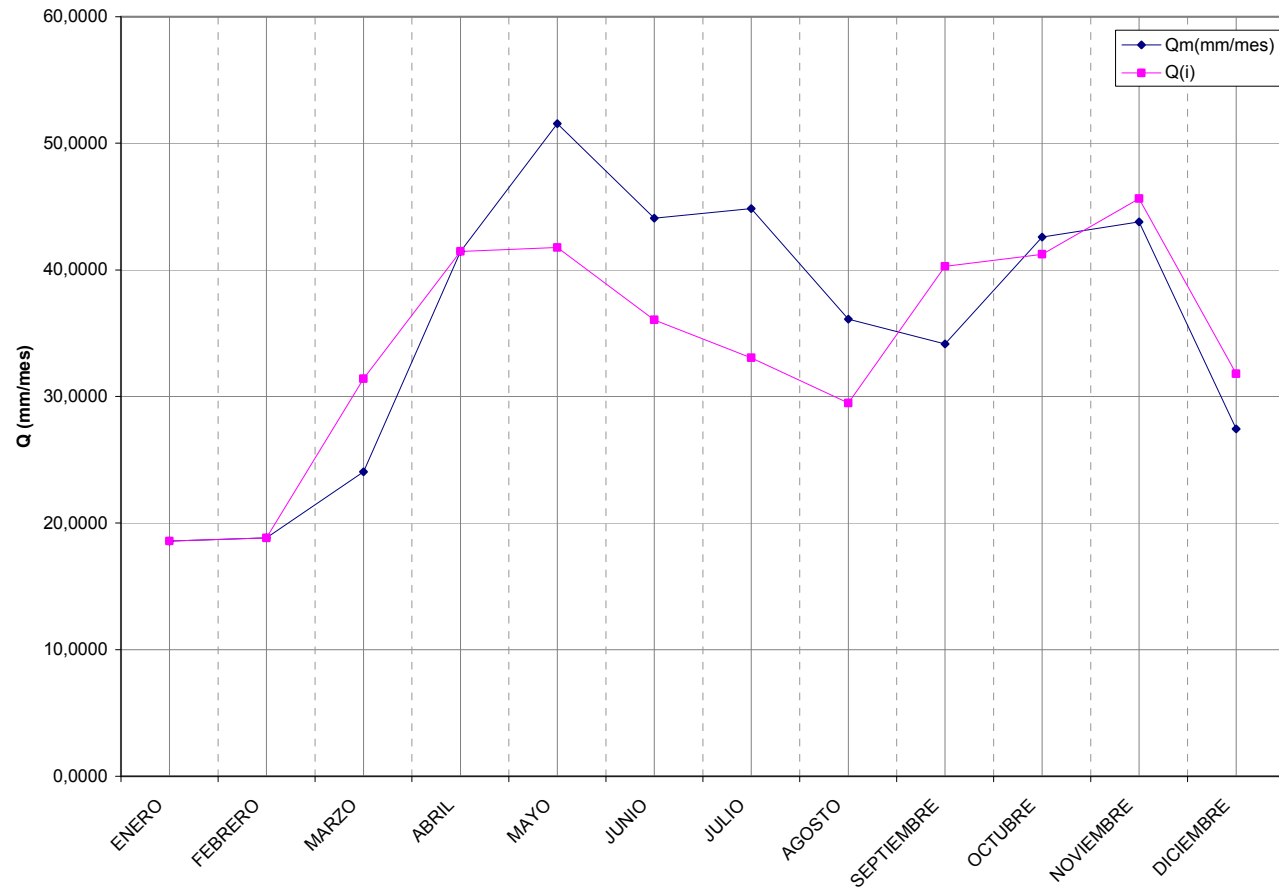


Gráfico No. 77. Comparación Qsimulado Vs Qmedido de la cuenca 77.

### CUENCA 78



Gráfico No. 78. Comparación  $Q_{simulado}$  Vs  $Q_{medido}$  de la cuenca 78.

CUENCA 79

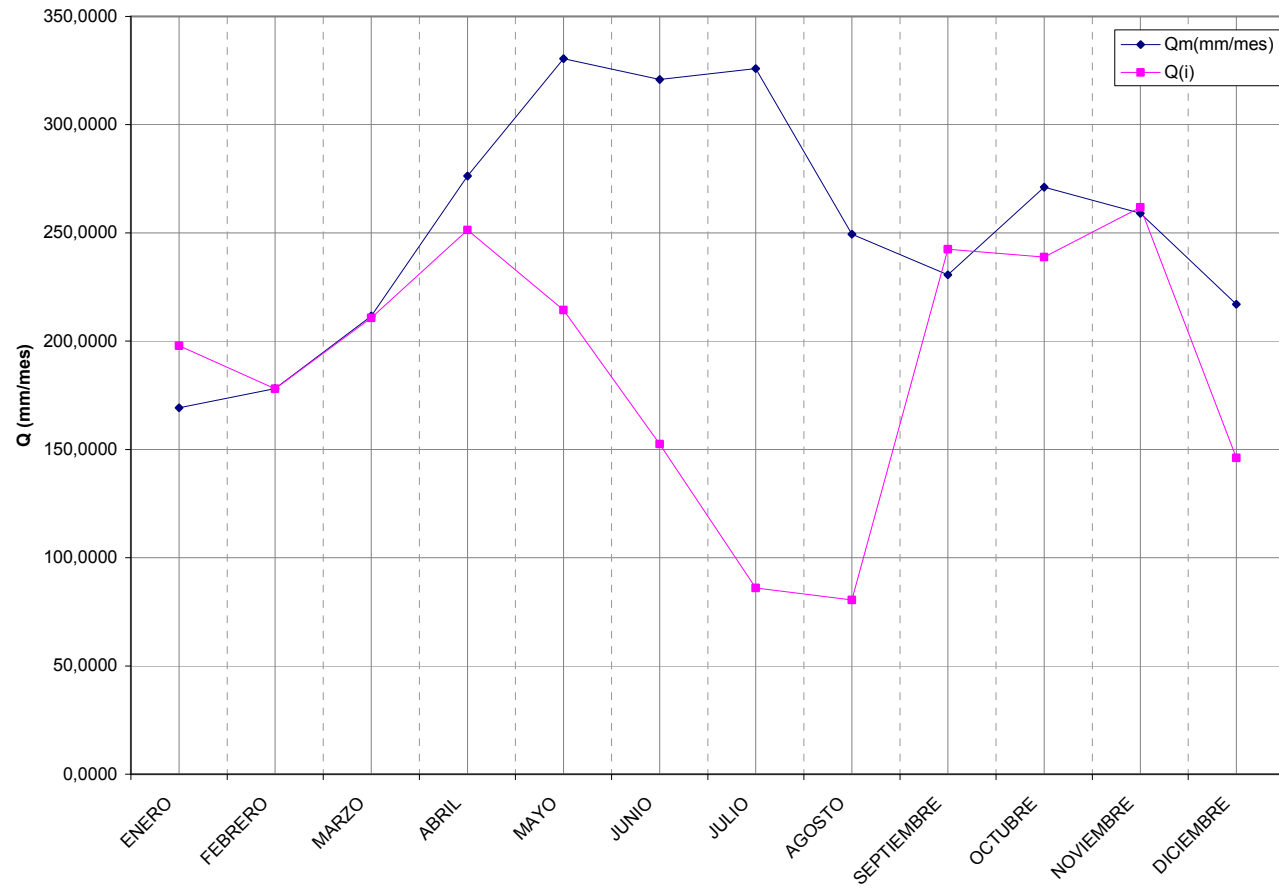


Gráfico No. 79. Comparación Qsimulado Vs Qmedido de la cuenca 79.

CUENCA 80

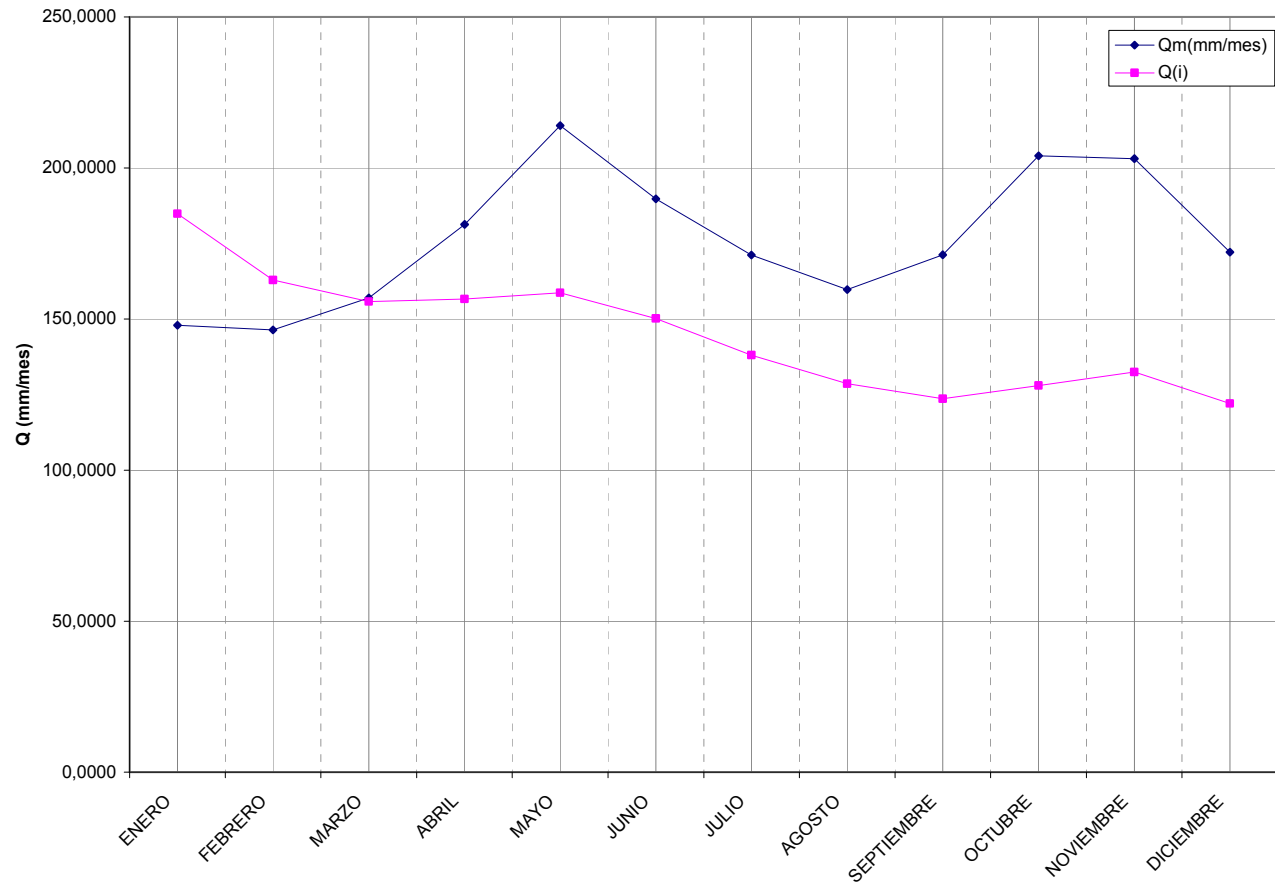


Gráfico No. 80. Comparación Qsimulado Vs Qmedido de la cuenca 80.

CUENCA 81

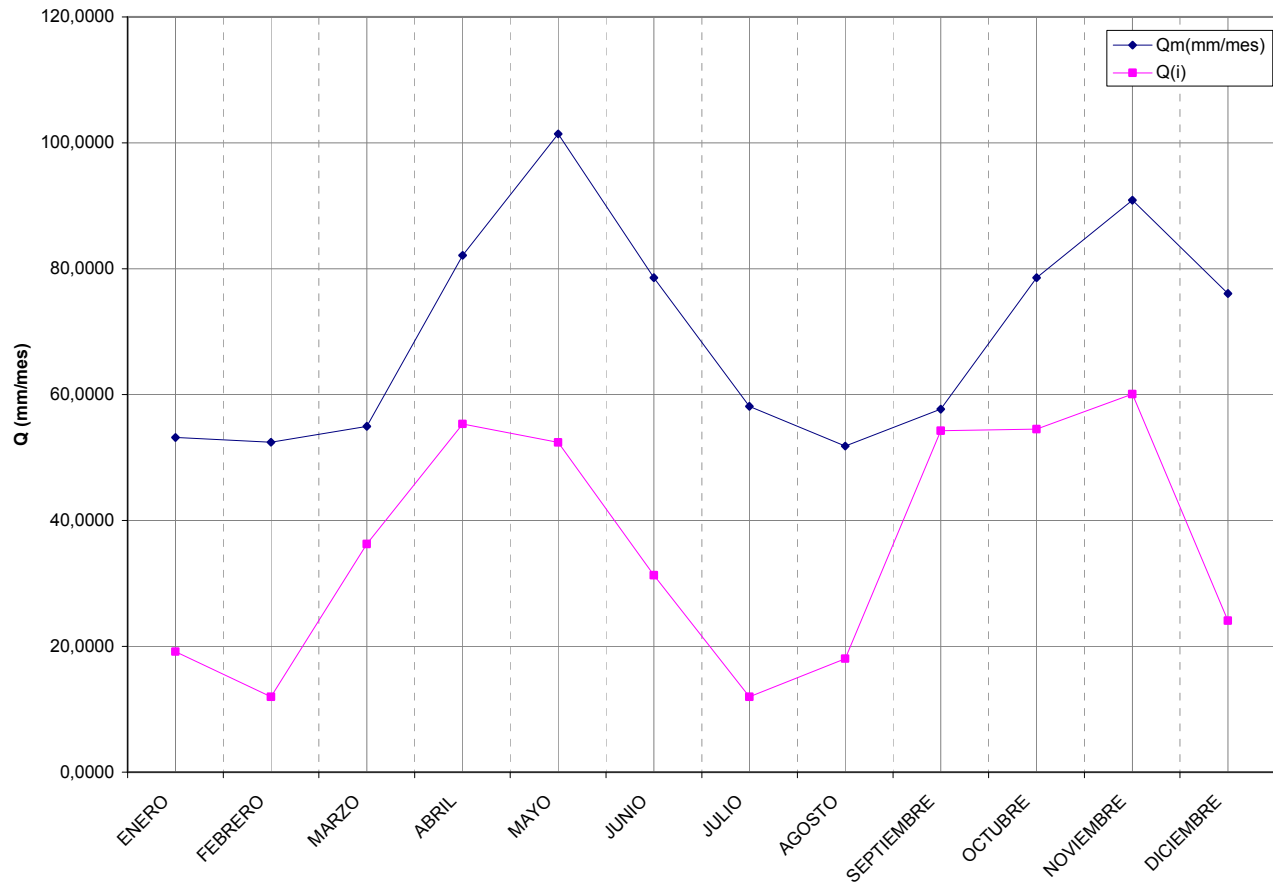


Gráfico No. 81. Comparación  $Q_{simulado}$  Vs  $Q_{medido}$  de la cuenca 81.

CUENCA 82

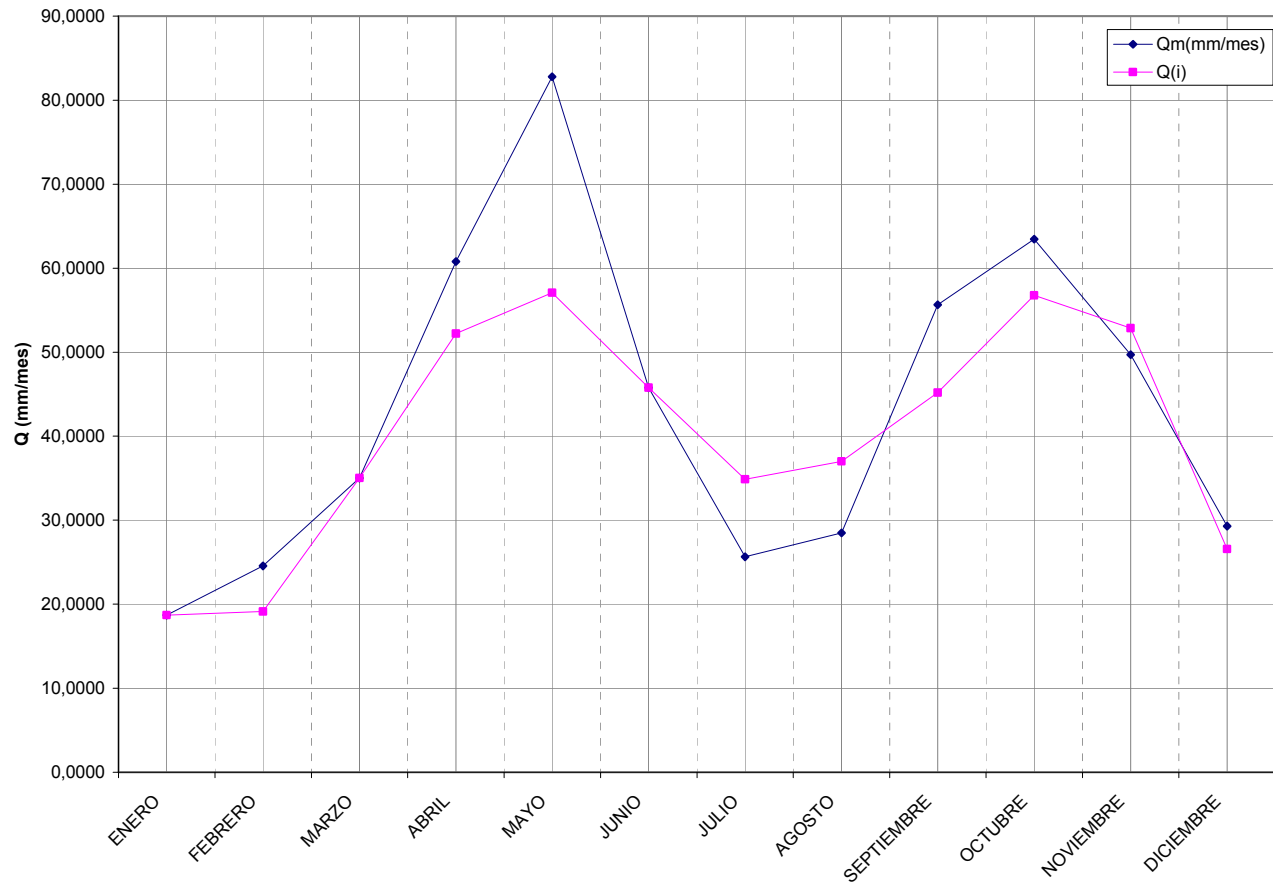


Gráfico No. 82. Comparación Qsimulado Vs Qmedido de la cuenca 82.

CUENCA 83

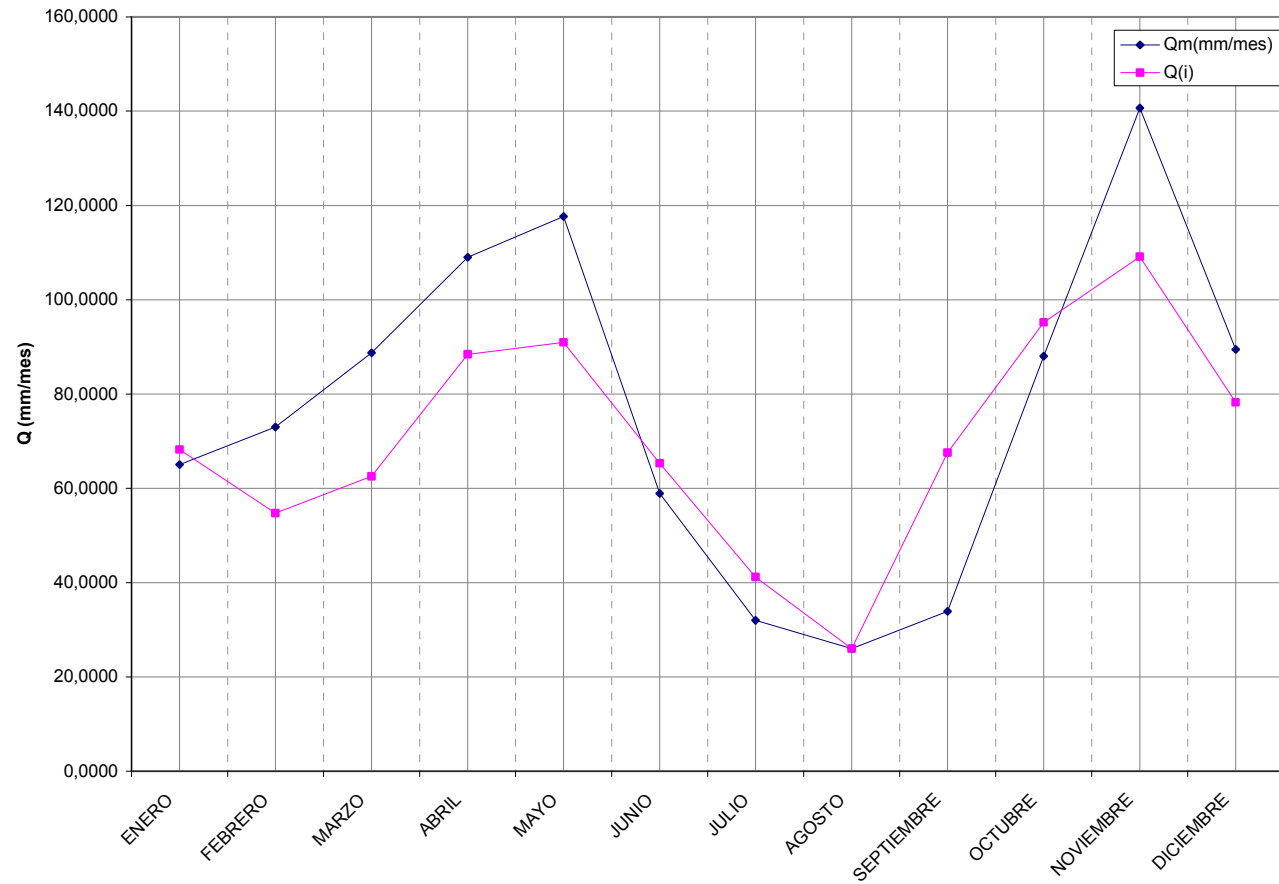


Gráfico No. 83. Comparación  $Q_{simulado}$  Vs  $Q_{medido}$  de la cuenca 83.



CUENCA 84

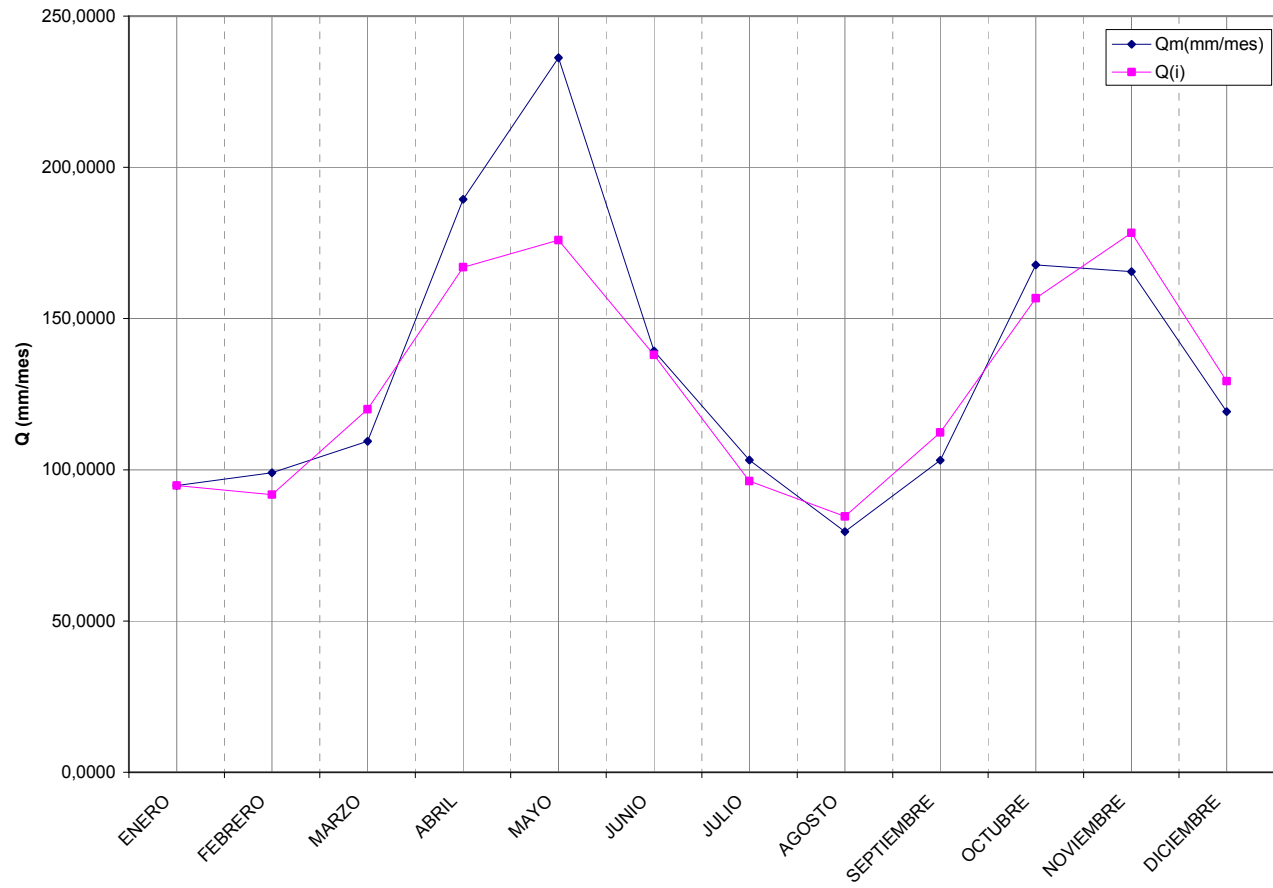


Gráfico No. 84. Comparación Qsimulado Vs Qmedido de la cuenca 84.

CUENCA 85

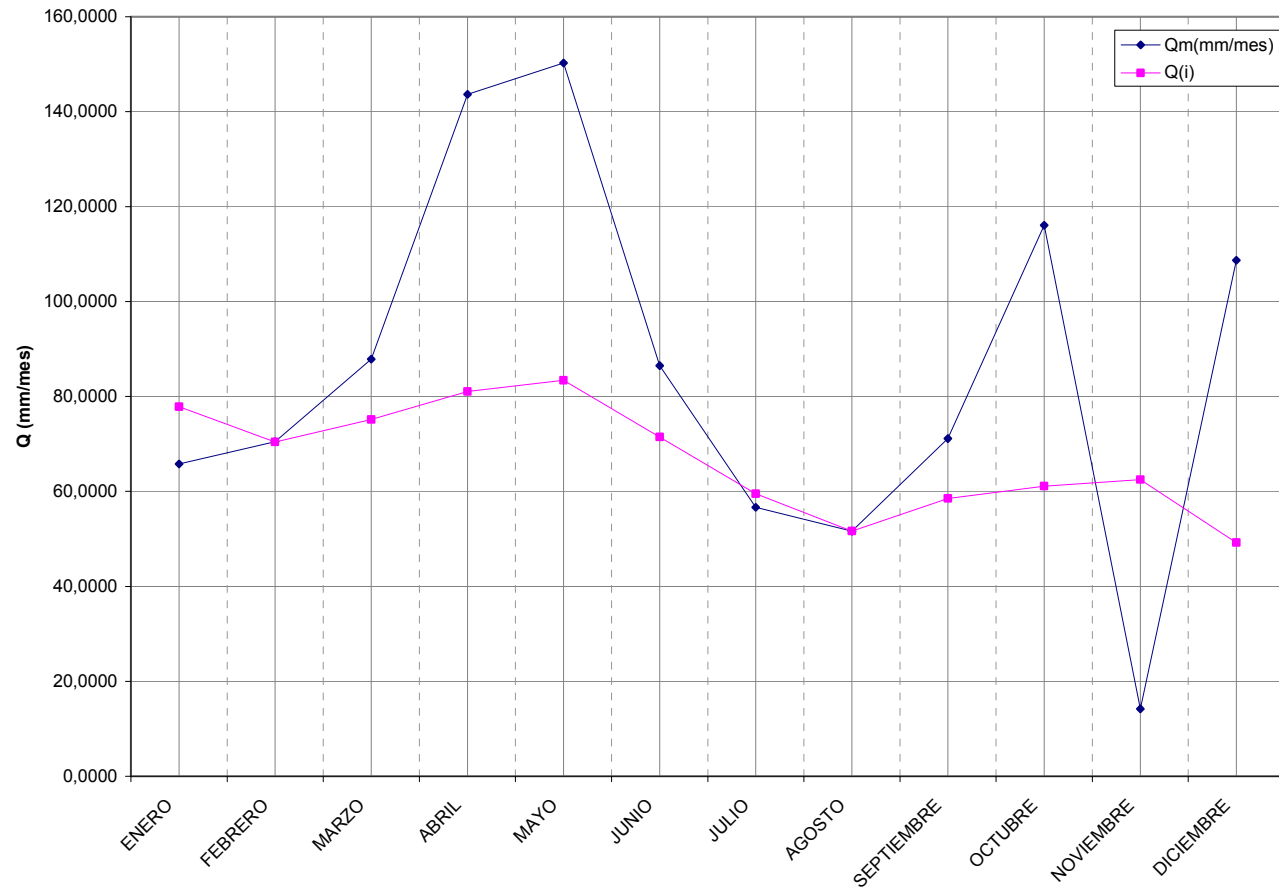


Gráfico No. 85. Comparación Qsimulado Vs Qmedido de la cuenca 85.

CUENCA 86

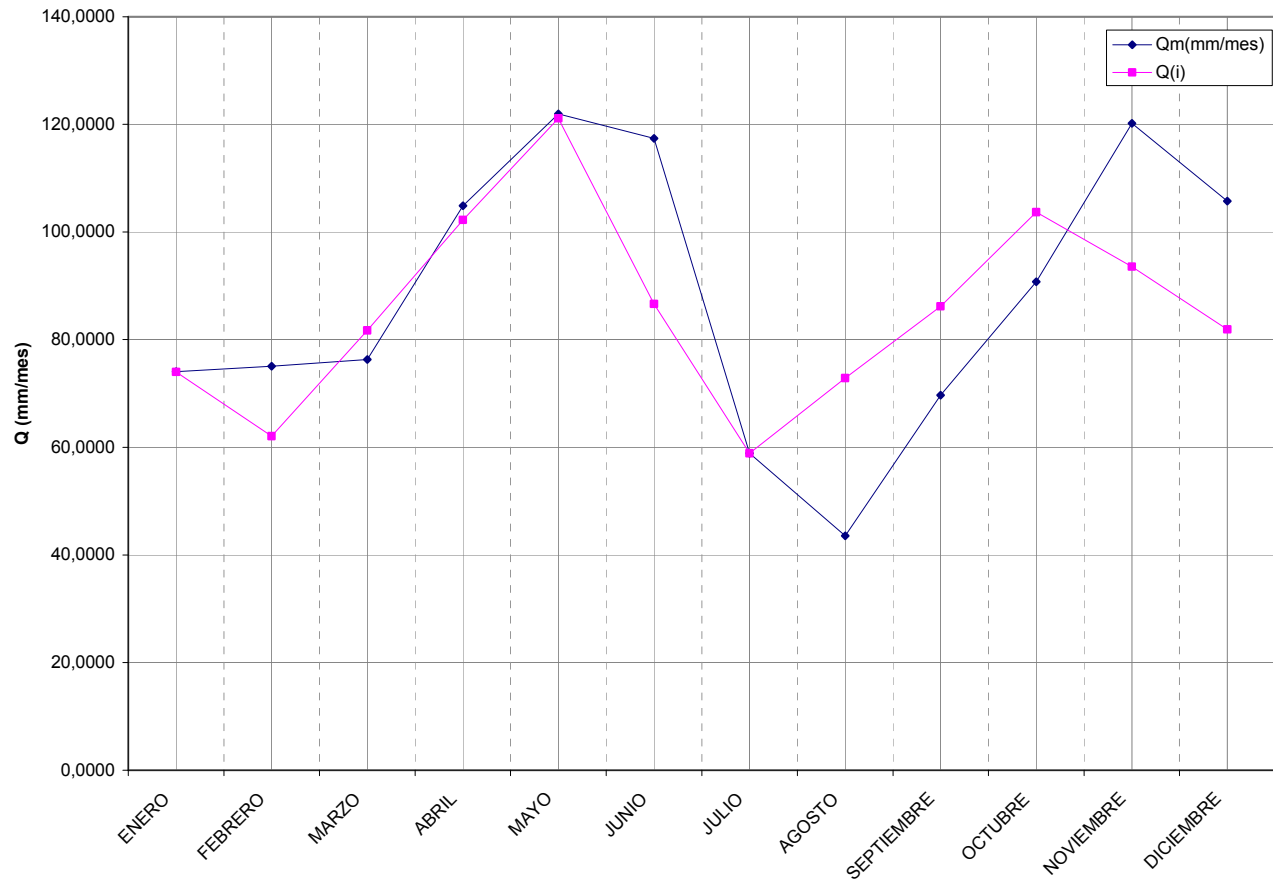


Gráfico No. 86. Comparación Qsimulado Vs Qmedido de la cuenca 86.

CUENCA 87

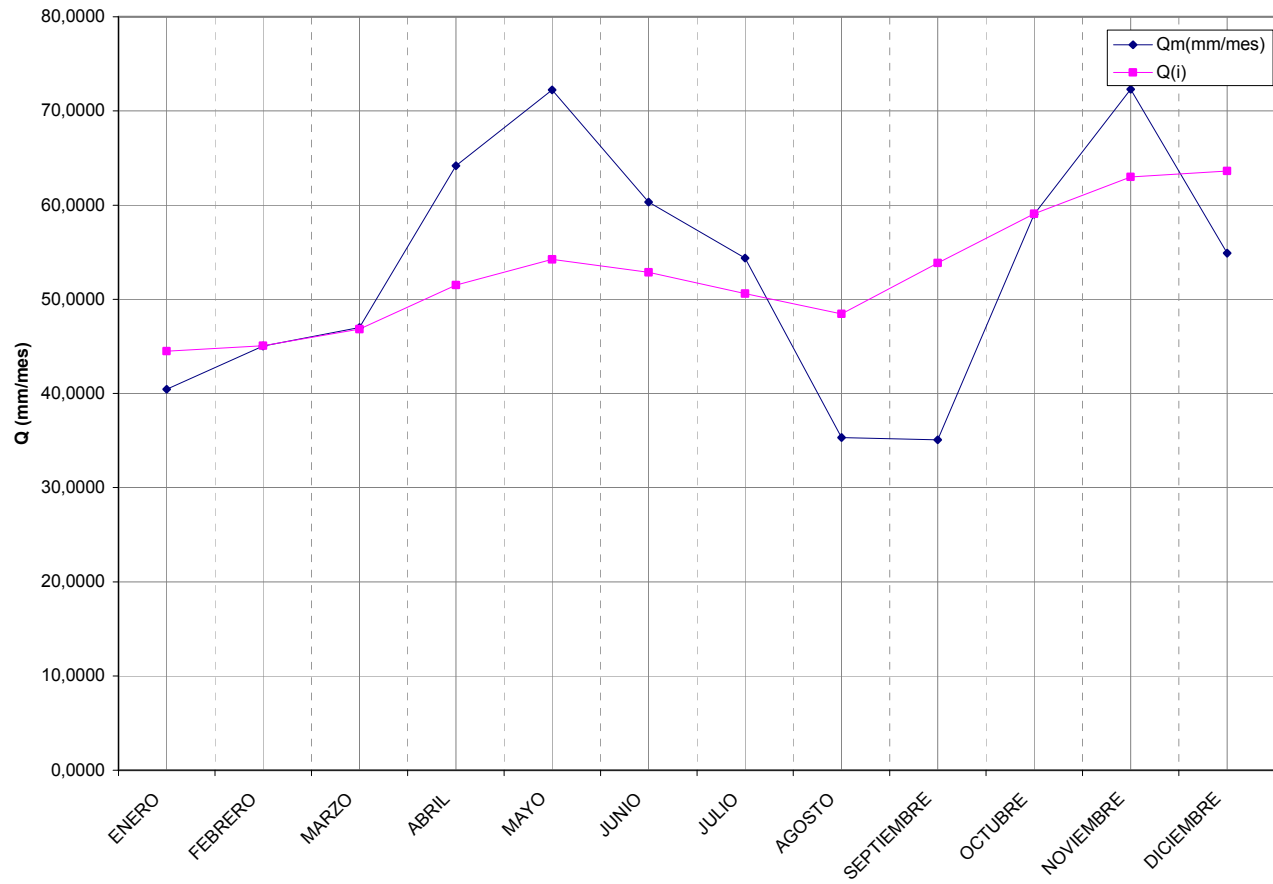


Gráfico No. 87. Comparación Qsimulado Vs Qmedido de la cuenca 87.

CUENCA 88

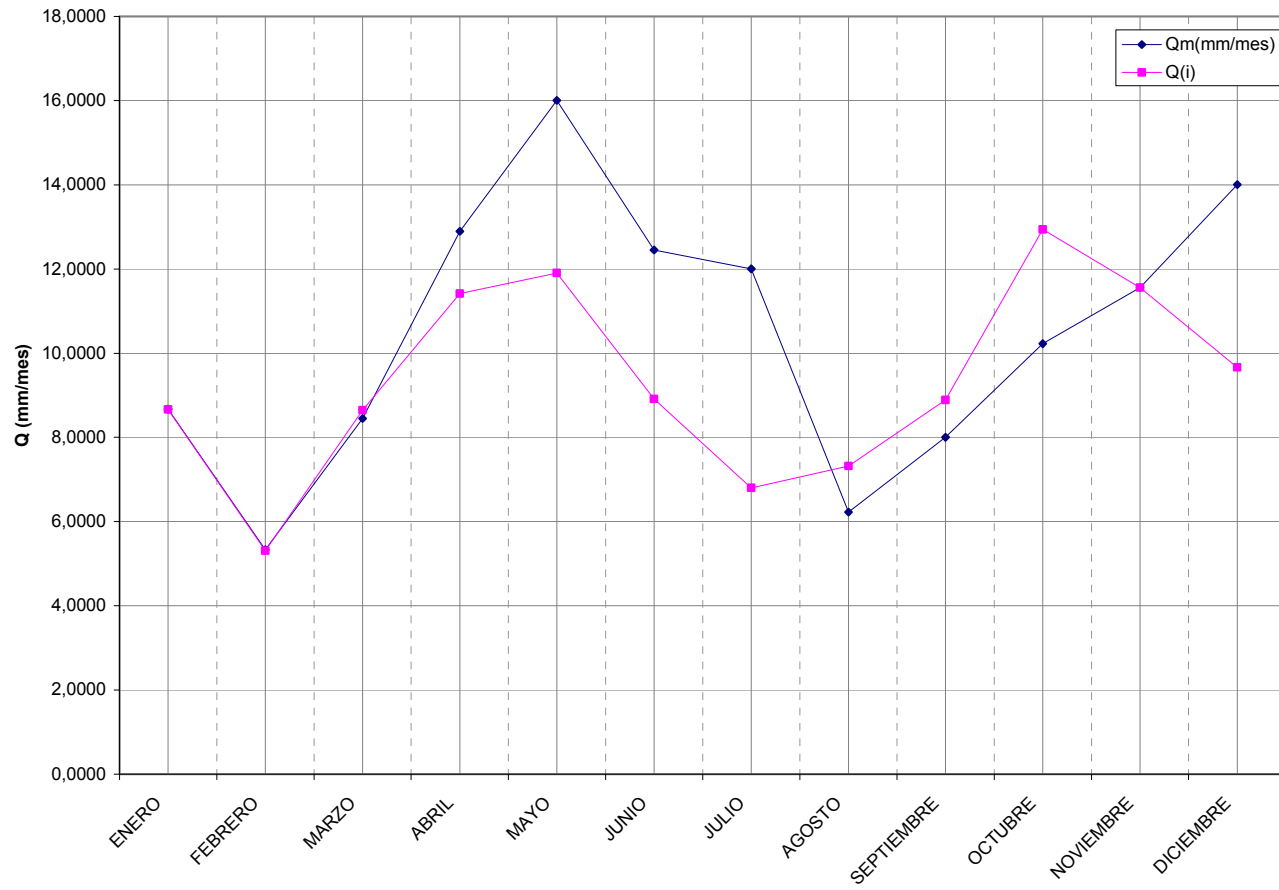


Gráfico No. 88. Comparación  $Q_{simulado}$  Vs  $Q_{medido}$  de la cuenca 88.

CUENCA 89

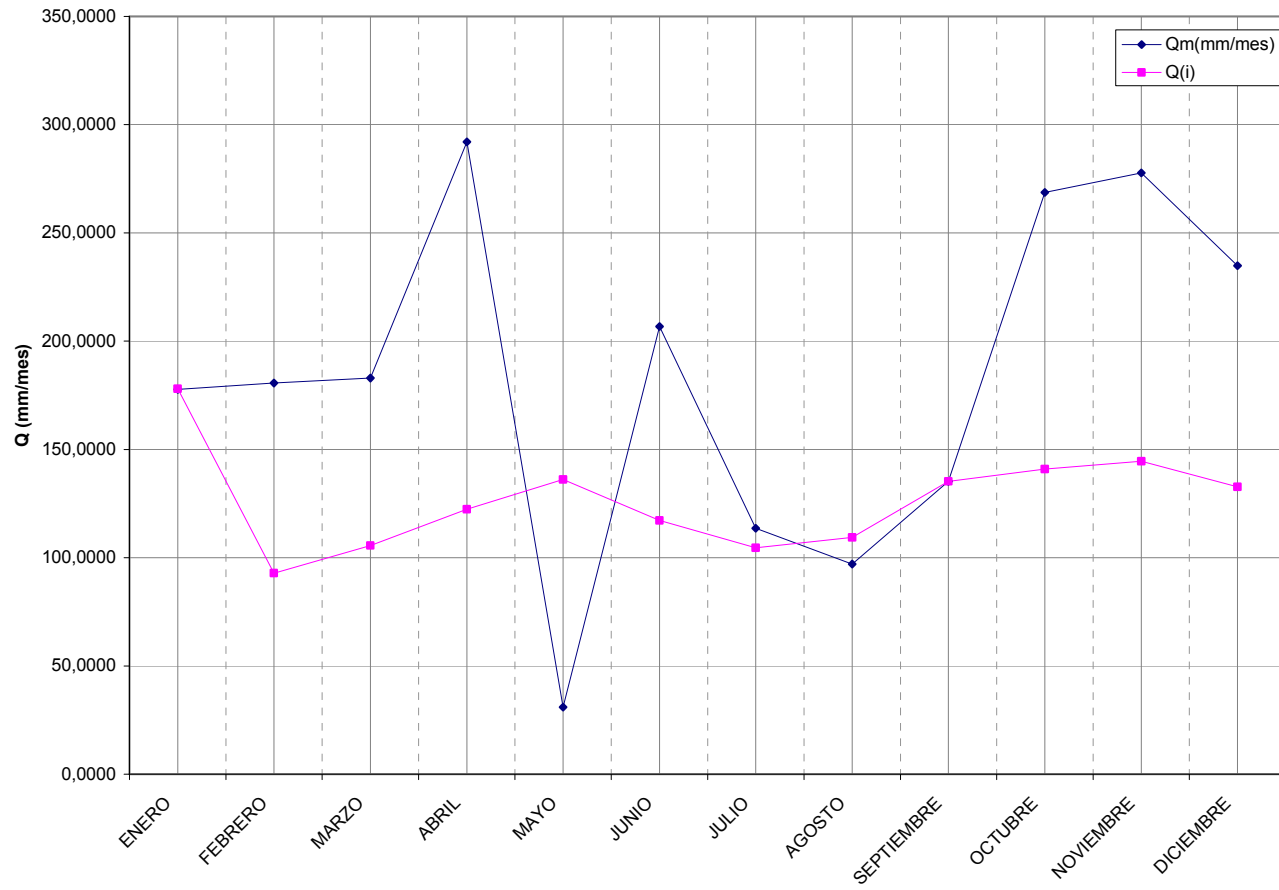


Gráfico No. 89. Comparación Qsimulado Vs Qmedido de la cuenca 89.

CUENCA 90

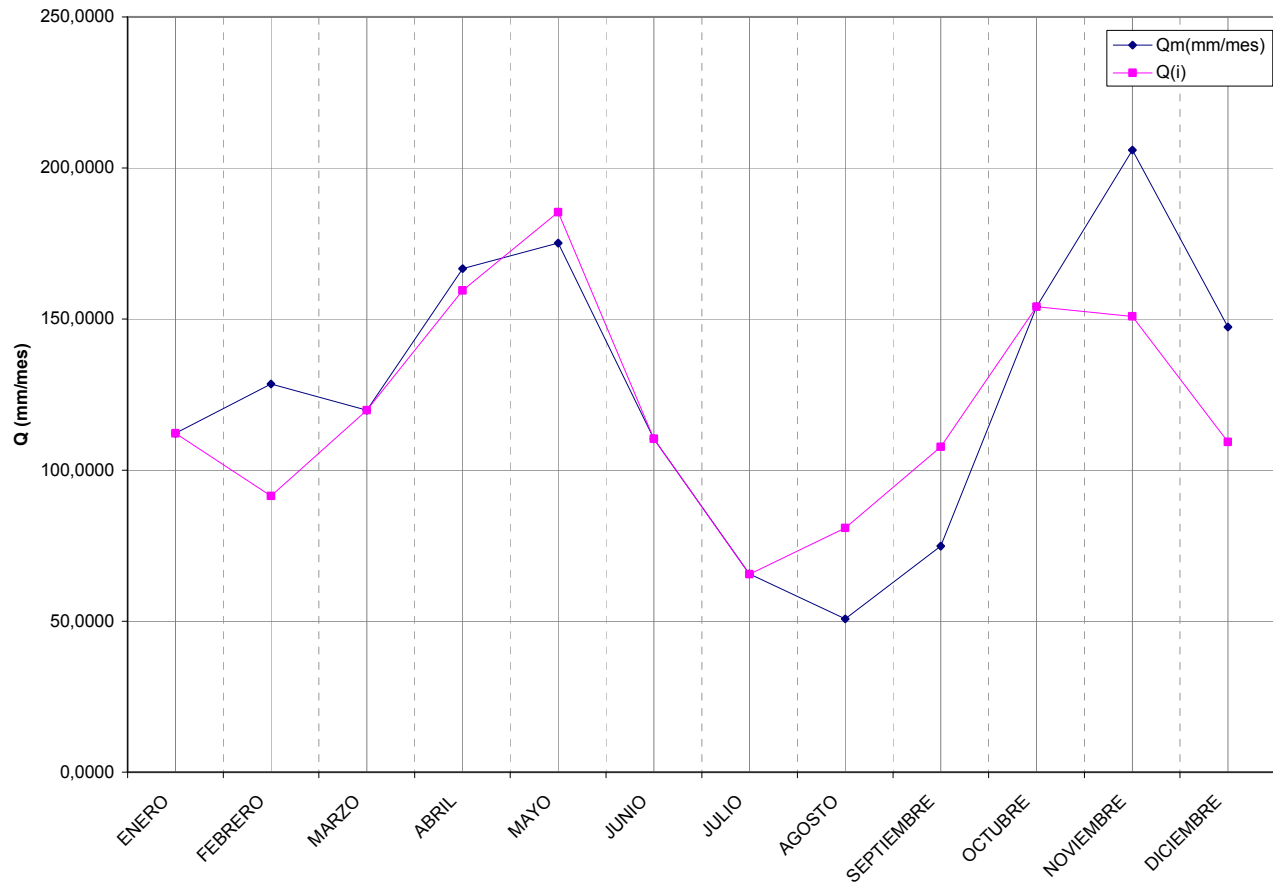


Gráfico No. 90. Comparación Qsimulado Vs Qmedido de la cuenca 90.

CUENCA 91

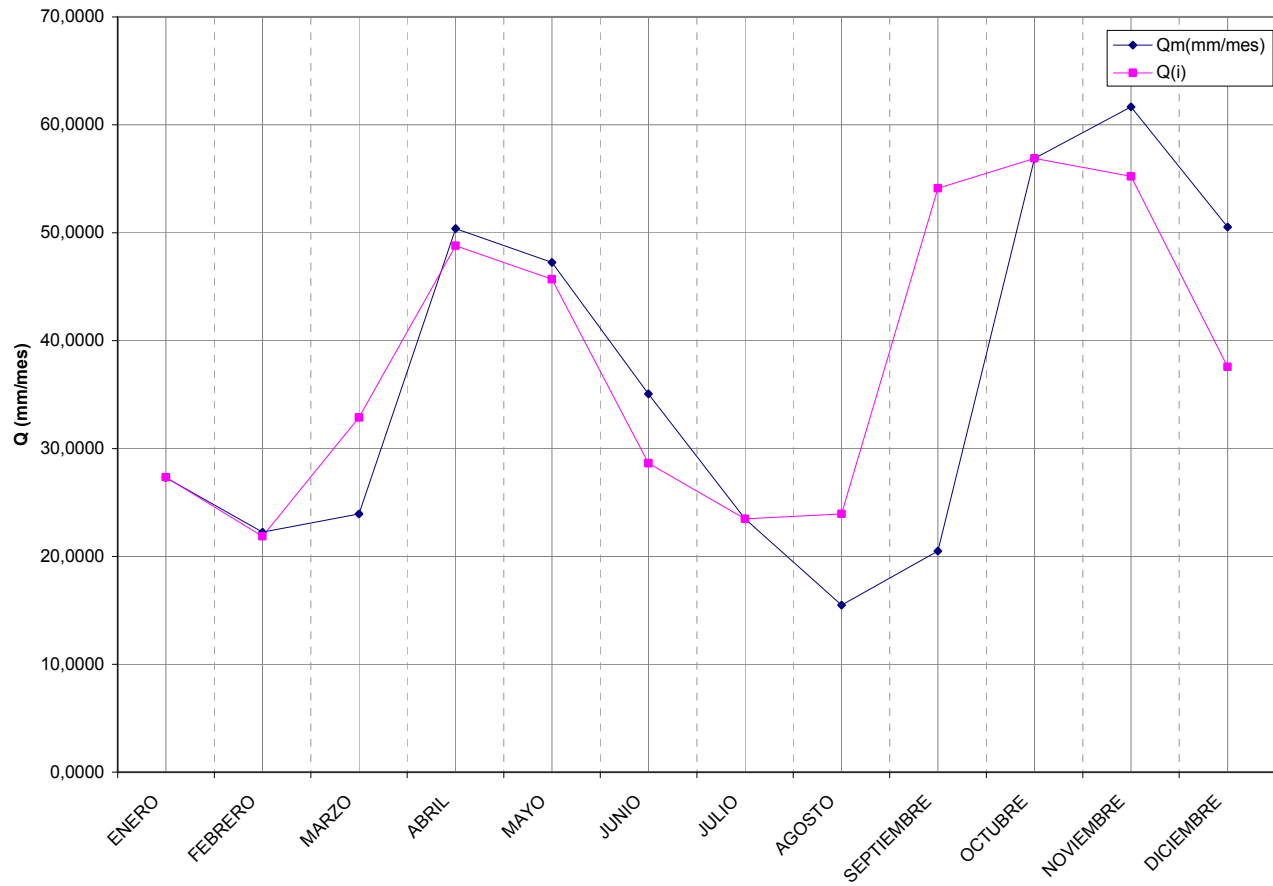


Gráfico No. 91. Comparación Qsimulado Vs Qmedido de la cuenca 91.



CUENCA 92

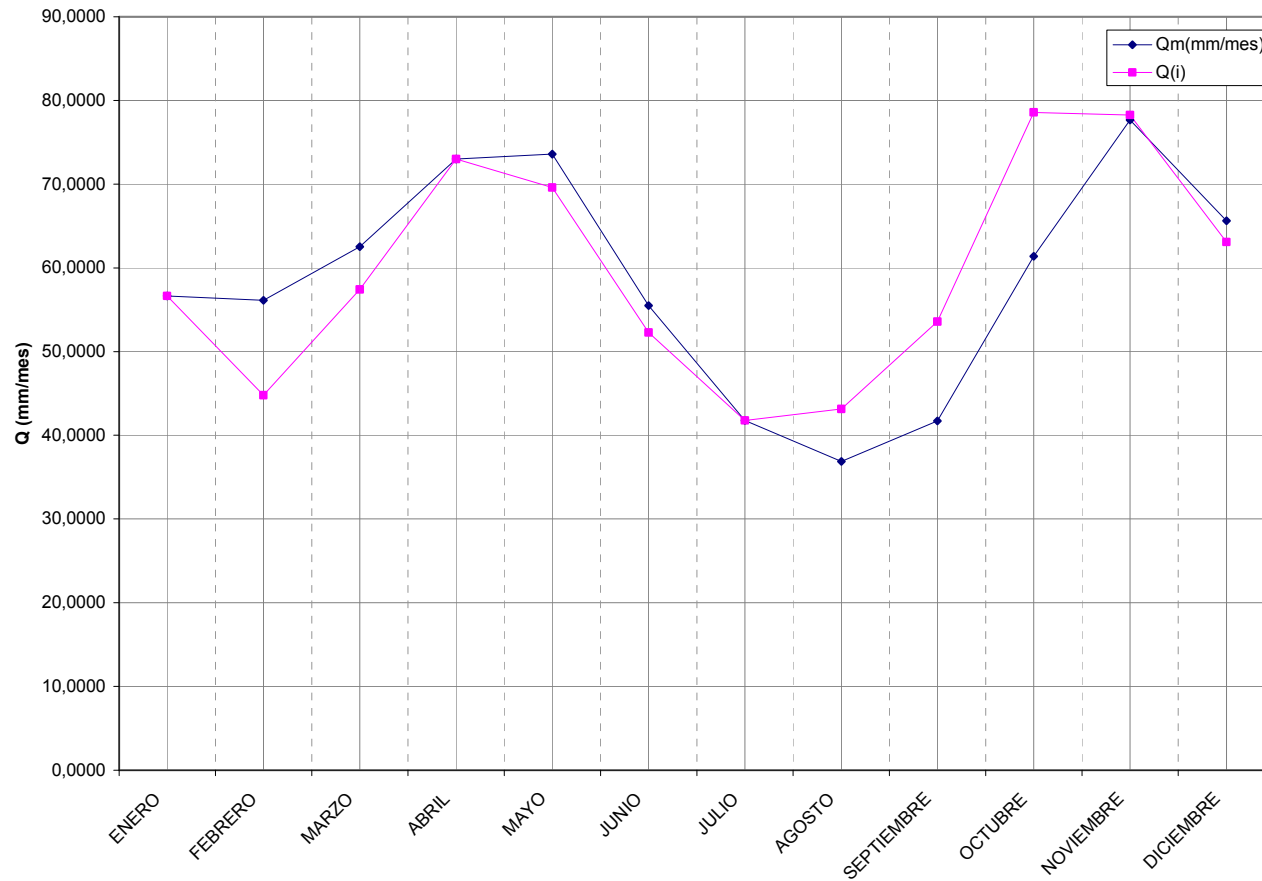


Gráfico No. 92. Comparación Qsimulado Vs Qmedido de la cuenca 92.

CUENCA 93

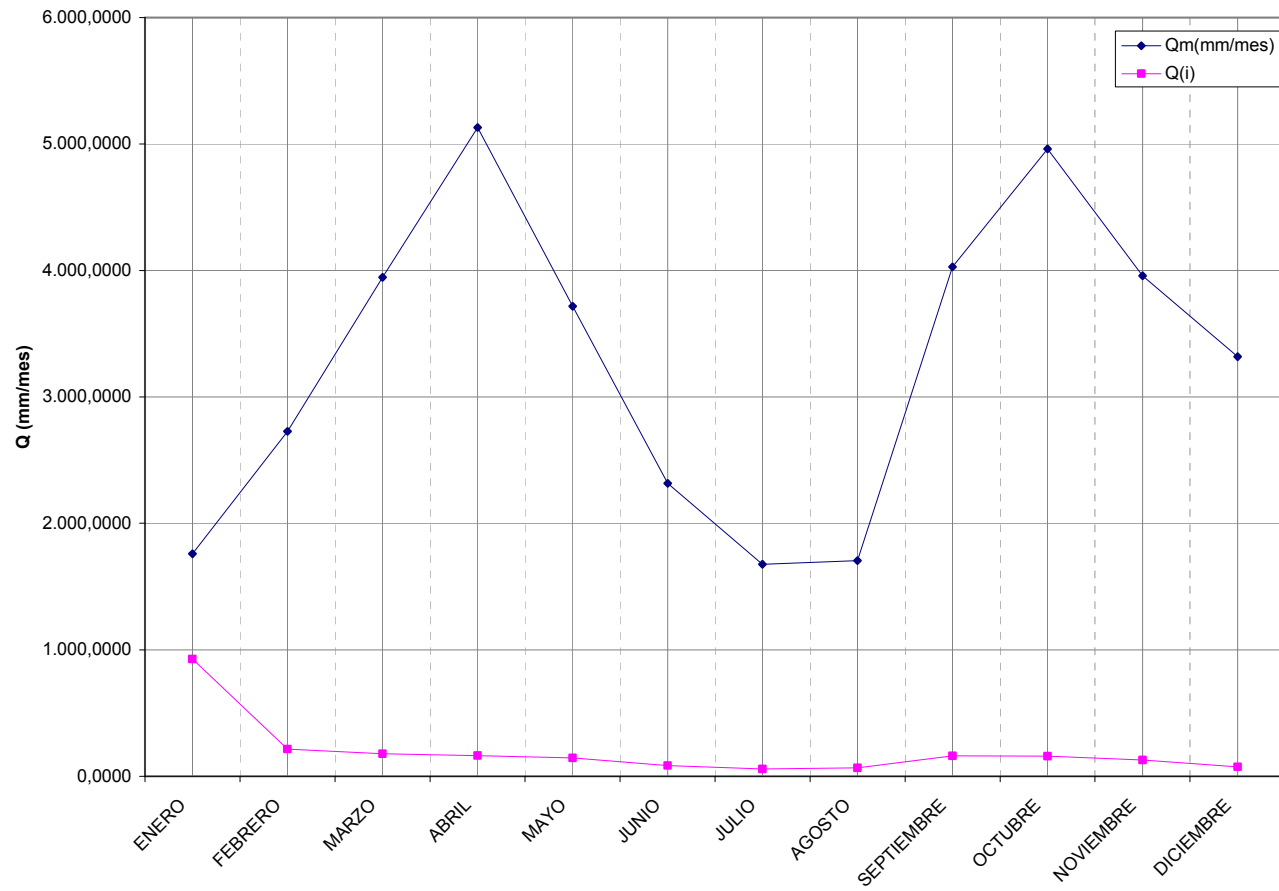


Gráfico No. 93. Comparación Qsimulado Vs Qmedido de la cuenca 93.

CUENCA 94

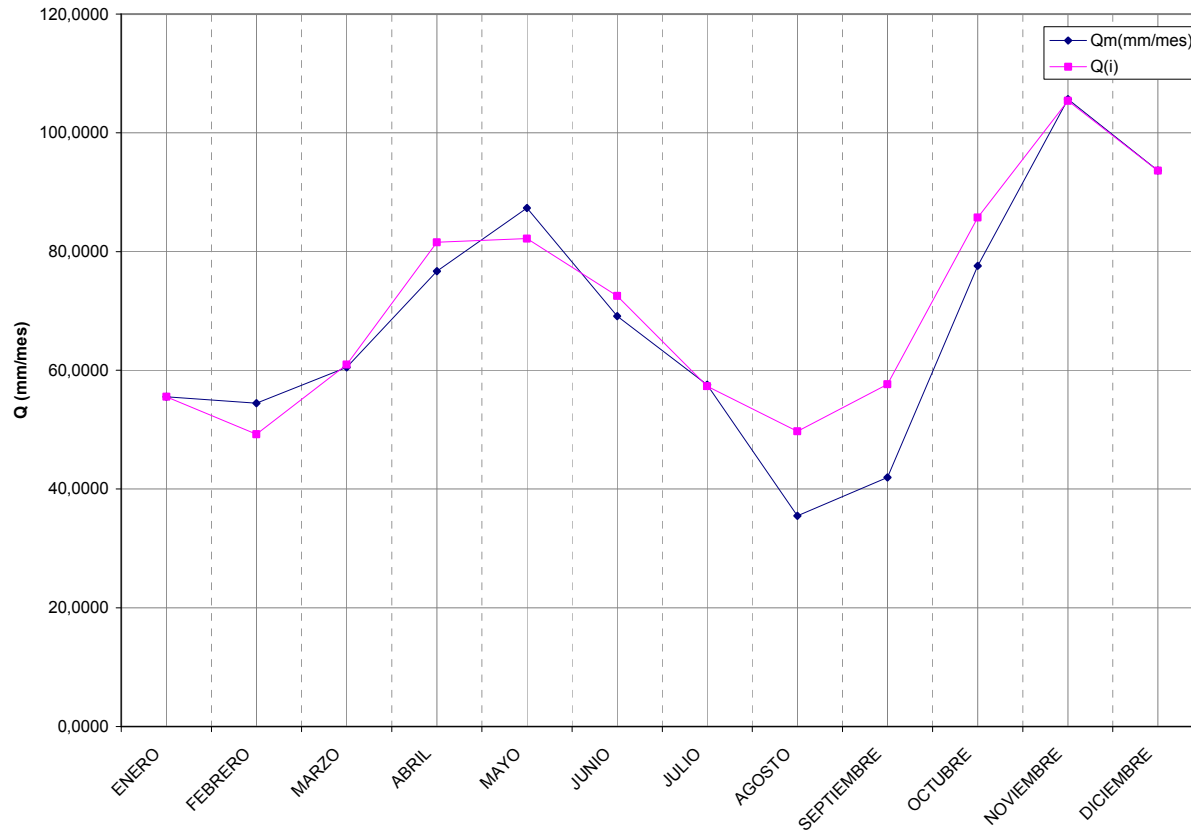


Gráfico No. 94. Comparación Qsimulado Vs Qmedido de la cuenca 94.

CUENCA 95

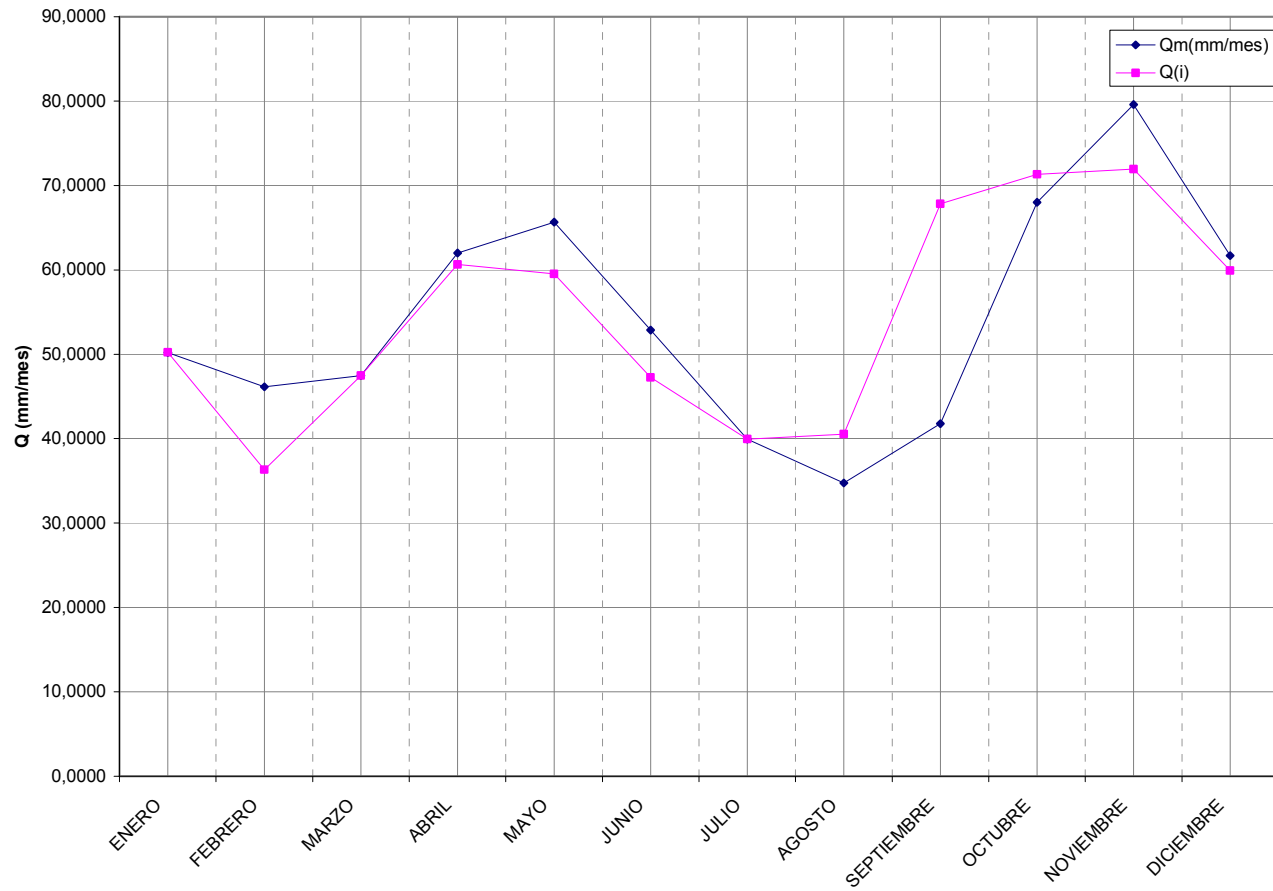


Gráfico No. 95 Comparación  $Q_{simulado}$  Vs  $Q_{medido}$  de la cuenca 95