

ANEXO B
GENERACIÓN DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES EN CUENCAS INTERMEDIAS

TABLA DE CONTENIDOS

| | | |
|----------|---|----------|
| 1 | INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1 | OBJETIVOS | 1 |
| 1.2 | METODOLOGÍA DE TRABAJO | 1 |
| 2 | DESCRIPCIÓN DEL MODELO PLUVIAL “MPL” | 3 |
| 2.1 | DESCRIPCIÓN CONCEPTUAL | 3 |
| 2.2 | DATOS DE ENTRADA | 5 |
| 2.3 | PARÁMETROS DEL MODELO..... | 5 |
| 2.4 | FUNCIONAMIENTO DEL MODELO | 6 |
| 3 | ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN | 7 |
| 3.1 | ASPECTOS GENERALES | 7 |
| 3.2 | INFORMACIÓN PLUVIOMETRÍA | 7 |
| 3.3 | INFORMACIÓN DE CAUDALES | 8 |
| 4 | RESULTADOS | 9 |
| 4.1 | PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO..... | 9 |
| 4.2 | GENERACIÓN DE SERIES DE ESCORRENTÍA | 9 |
| 4.3 | COMENTARIOS GENERALES..... | 11 |

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Aspectos Generales

Los modelos hidrológicos son representaciones conceptuales simplificadas de una parte del ciclo hidrológico, siendo uno de sus principales usos la determinación de los caudales de escorrentía en cuencas no controladas. Estos modelos se caracterizan por utilizar estructuras que utilizan especificaciones paramétricas para representar factores inherentes al ciclo hidrológico en una determinada cuenca, cuyos valores son desconocidos a priori, por lo tanto, es necesario realizar un proceso de calibración y validación de los diferentes parámetros del modelo, para su posterior uso en una cuenca específica.

Los procesos de calibración y validación del modelo se llevan a cabo empleando información concurrente en el tiempo de las variables hidrológicas de entrada para el modelo, con la finalidad de reproducir lo más parecido posible los resultados o variables de salida conocidas u observadas durante el mismo lapso de tiempo; este proceso se lleva a cabo ajustando los valores de los parámetros del modelo, dentro de rangos preestablecidos como aceptables.

El modelo debe reproducir la escorrentía ocurrida y representar fielmente la realidad, de tal manera que los datos de salida sean similares a los observados en el mismo periodo de tiempo.

En este informe se utiliza el modelo pluvial para cuencas no controladas MPL. Este modelo permite transformar la estadística de precipitaciones mensuales sobre una determinada cuenca en series de escorrentía.

1.2 Objetivos

El objetivo principal de este informe es la estimación de las series de caudales medios mensuales en las subcuencas del río Copiapó donde no se dispone de información, a partir del desarrollo de un modelo de simulación hidrológica. Para lograr este objetivo fue necesario alcanzar los siguientes objetivos específicos:

- Revisar antecedentes bibliográficos de la zona de estudio que permita describir las características generales de las subcuencas analizadas tales como, áreas, tipo y uso de suelo, tipo de vegetación, pendientes, etc.
- Definir y analizar los datos hidro-meteorológicos existentes para la realización de la calibración del modelo de simulación hidrológica.
- Utilizar el Modelo Pluvial MPL para calibrar y validar las escorrentías en las subcuencas del río Copiapó.

1.3 Metodología de Trabajo

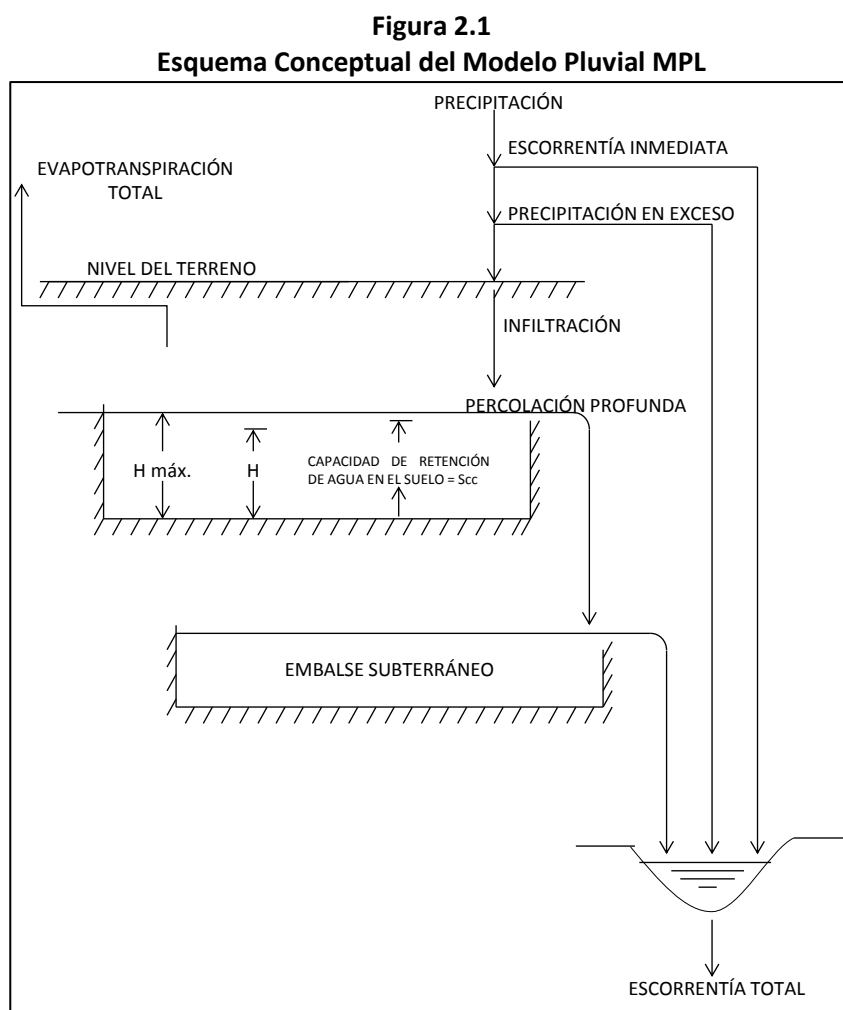
Para la implementación del modelo de simulación hidrológica MPL en las distintas subcuencas del río Copiapó se llevó a cabo el siguiente plan de trabajo:

- Revisión y evaluación de los modelos hidrológicos existentes en la cuenca, dentro de los que se destacan el modelo hidrológico desarrollado por la División de Ingeniería Hidráulica y Ambiental (DICTUC S.A) en el año 2010, utilizando el modelo SEAMOD (SEAsonal MODel), que permite la simulación de cuencas hidrográficas, representando los diversos procesos hidrológicos que ocurren en ella a una escala de tiempo estacional. Este modelo permite transformar la estadística de precipitaciones mensuales sobre la cuenca en escorrentía a la salida de la cuenca en periodos mensuales aplicando relaciones de balance de masa entre los diferentes componentes del sistema. El modelo entrega como resultado series temporales del comportamiento del flujo superficial, flujo base y flujo subterráneo, que se puede esperar como aporte de las diferentes quebradas una vez que se conoce la precipitación sobre ellas y las condiciones de evaporación en la zona.
- Revisión y evaluación de los antecedentes disponibles para la elaboración de un modelo de simulación hidrológica en la cuenca en estudio. La información revisada incluyó fundamentalmente datos meteorológicos, estadísticas de caudales en las diferentes subcuencas de la zona de análisis, tipos y usos de suelo, entre otros.
- Calibración y validación de un modelo de simulación hidrológica. Se realizará el ajuste de los parámetros del modelo pluvial MPL para que los resultados del modelo reproduzcan las series de caudales obtenidas con el modelo SEAMOD en once subcuencas del río Copiapó.
- Uso del modelo de simulación hidrológico para la estimación de la serie de caudales de las diferentes subcuencas del río Copiapó que servirán de base para la determinación de las series de recarga para el modelo de simulación hidrogeológica que se desarrollará más adelante.

2 DESCRIPCIÓN DEL MODELO PLUVIAL “MPL”

2.1 Descripción Conceptual

El MPL corresponde a un modelo hidrológico de generación de caudales que simula el ciclo de escorrentía de una cuenca pluvial aplicando la ecuación de continuidad sobre un elemento de área y/o volumen de control en la cuenca. Los procesos básicos considerados son precipitación, escurrimiento superficial, infiltración, evapotranspiración, percolación profunda, escurrimiento base y escurrimiento subterráneo. Las interacciones entre los procesos descritos y los almacenamientos se presentan esquemáticamente en la Figura 2.1.



Fuente: Elaboración Propia

En la figura anterior se puede observar que el modelo pluvial MPL considera dos elementos de embalse de agua que se describen a continuación:

- Un volumen de almacenamiento cercano a la superficie del suelo, cuya magnitud representa la capacidad media de retención de agua en la cuenca y desde el cual se extrae agua para satisfacer la demanda evapotranspirativa.

- Un volumen subterráneo que retiene el agua que percola y que al vaciarse en forma lenta, contribuye al escurrimiento subsuperficial y subterráneo. Este almacenamiento es el que produce la escorrentía en periodos de estiaje.

El modelo utiliza la ecuación de continuidad aplicada sobre un área unitaria en la zona no saturada del suelo:

$$I - O = \frac{dH}{dt}$$

Dónde:

I : Flujo de entrada al volumen de control, igual a la tasa de infiltración desde la superficie.

O : Flujo de salida del volumen de control, igual a la evapotranspiración más la percolación profunda.

$\frac{dH}{dt}$: Variación en el tiempo de la lámina de agua (H) almacenada en forma de humedad del suelo.

Donde la lámina de agua (H) almacenada en el suelo en un instante dado se puede expresar como:

$$H = S * n * D$$

Dónde:

D : Profundidad del suelo

n : Porosidad del suelo:

$$\frac{V_{poros}}{V_{total}}$$

S : Grado de saturación del suelo:

$$S = \frac{V_{Liquido}}{V_{poros}}$$

En igual forma la humedad almacenada (H) en el suelo se puede expresar como:

$$H = S * H_{m\acute{a}x}$$

Dónde:

$H_{m\acute{a}x}$: Lámina de agua correspondiente al estado de saturación.

Por lo tanto, la ecuación de continuidad se puede expresar sin dimensiones como:

$$\frac{1}{H_{m\acute{a}x}} (I - O) = \frac{dS}{dt}$$

2.2 Datos de Entrada

El modelo considera como datos de entrada las series de precipitación mensual y la evaporación media mensual de alguna estación base o patrón, el área de cada subcuenca, características básicas de los suelos, tales como la tasa de infiltración, la capacidad de campo, el punto de marchitez permanente, entre otros, y los factores de precipitación y evaporación que multiplican las estadísticas base para obtener valores asociados a la cuenca en análisis.

- Estadística de precipitación mensual

$$P = A * PM \quad \left\{ \frac{mm}{mes} \right\}$$

- Estadística de evaporación

$$TP = B * EM \quad \left\{ \frac{mm}{mes} \right\}$$

2.3 Parámetros del Modelo

Todos los parámetros utilizados por el MPL tienen una interpretación física y por consiguiente, un rango de variación. En la Tabla 2.1 se muestra una breve descripción de los parámetros utilizados por el modelo para simular los caudales de escorrentía de una determinada cuenca o subcuenca.

Tabla 2.1
Parámetros del Modelo Pluvial MPL

| PARÁMETRO | DESCRIPCIÓN |
|----------------------------------|--|
| <i>A</i> : | Coefficiente de Precipitación, Factor de Transposición (adimensional). Multiplica el dato lluvia de la estación base, para obtener la precipitación media sobre la cuenca. |
| <i>B</i> : | Coefficiente de Evaporación (adimensional). Cuociente entre la evapotranspiración potencial de la subcuenca y la evaporación media del evaporímetro de la estación base, ración para obtener la evapotranspiración potencial media sobre la cuenca. |
| <i>FC</i> : | Tasa de infiltración correspondiente al suelo saturado ($S = 1$) medida (mm/día). |
| <i>ALFA</i> : | Variación de la tasa de infiltración por unidad de variación del grado de humedad (adimensional). |
| <i>SMIN</i> : | Grado de humedad correspondiente al punto de marchitez permanente ($^{\circ}/1$). |
| <i>SCRIT</i> : | Grado de humedad crítico bajo el cual la tasa de evapotranspiración real decrece linealmente ($^{\circ}/1$). |
| <i>SCC</i> : | Grado de humedad correspondiente a la capacidad de campo ($^{\circ}/1$). |
| <i>H_{·máx}</i> : | Máxima lámina de agua contenida en el suelo saturado (mm). |
| <i>k</i> : | Constante de tiempo del embalse subterráneo (días). |
| <i>P_{min}</i> : | Porcentaje de lluvia que se manifiesta como escorrentía superficial inmediata (%). |
| <i>AREA</i> : | Área de la cuenca o subcuenca (Km ²). |
| <i>S_i</i> : | Grado de saturación al inicio de período de modelación, (corresponde a las condiciones iniciales del modelo) ($^{\circ}/1$). |
| <i>EZ_i</i> : | Escorrentía subterránea al inicio del período de modelación, (corresponde a las condiciones iniciales del modelo) (m ³ /s). |

Nota: los valores en **negrita** son parámetros de calibración

2.4 Funcionamiento del Modelo

El procedimiento utilizado por el modelo consiste en calcular para cada día del mes el grado de saturación final (S_f), conocido el grado de saturación al inicio del día (S_i), y los valores diarios de la infiltración, percolación profunda y evapotranspiración.

- Grado de saturación final para cada día del mes:

$$S_f = S_i + \frac{1}{H_{m\acute{a}x}} * (I - PP - ET)$$

Donde,

- S_f : Grado de Saturación final para cada día del mes
 S_i : Grado de Saturación inicial para cada día del mes
 $H_{m\acute{a}x}$: Máxima lámina de agua contenida en el suelo saturado
 I : Infiltración
 PP : Percolación Profunda
 ET : Evapotranspiración

Considerando el grado de saturación promedio diario (S_p) como:

$$S_p = \frac{S + S_i}{2}$$

Se tiene que los valores diarios de infiltración, percolación profunda y evapotranspiración en términos (S_p) estarían dados por:

$$I = I(S_p)$$

$$PP = PP(S_p)$$

$$ET = ET(S_p)$$

Con respecto al grado de saturación inicial S_i los valores diarios de infiltración, percolación profunda y evapotranspiración en términos (S_i) estarían dados por:

$$S = S_i + \frac{1}{H_{m\acute{a}x}} * (I_i - PP_i - ET_i)$$

$$I_i = I(S_i)$$

$$PP_i = PP(S_i)$$

$$ET_i = ET(S_i)$$

3 ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

3.1 Aspectos Generales

El modelo requiere la definición de una estación base o patrón con estadísticas de precipitación, evaporación y escurrimiento, así como los datos del área, los parámetros A y B y las estadísticas de caudales observados en cada subcuenca que deben ser reproducidos por el modelo.

3.2 Información Pluviométrica

La estación pluviométrica Pastos Grandes fue definida como la estación base para los datos de precipitación cuya estadística mensual fue obtenida de la Dirección General de Aguas actualizada hasta diciembre de 2012, mientras que para los datos de evaporación se utilizó la estación Copiapó, cuyos valores medios mensuales fueron tomados del estudio “Análisis Integrado de Gestión en Cuenca del Río Copiapó” desarrollado por la División de Ingeniería Hidráulica y Ambiental (DICTUC S.A) en el año 2010. En la Tabla 3.1 se presenta un resumen de las estaciones empleadas en la simulación hidrológica.

Tabla 3.1
Estaciones Meteorológicas

| Estación Meteorológica | Código | UTM WGS84 | | Altitud |
|--------------------------------|------------|-----------|-----------|----------|
| | BNA | Este | Norte | m.s.n.m. |
| Copiapó (Evaporación) | 03450004-5 | 367.723 | 6.971.879 | 385 |
| Pastos Grandes (Precipitación) | 03441001-1 | 443.897 | 7.000.375 | 2.260 |

Fuente: DICTUC (2010)

La estadística de precipitación medida en la estación Pastos Grandes presenta datos faltantes, lo que requiere la aplicación de alguna técnica para el relleno de los registros. En este estudio se utilizaron los datos rellenos por el DICTUC (2010) actualizadas hasta diciembre de 2012, de acuerdo a los datos de la DGA, con una precipitación media anual de 35.4 mm/año en el periodo comprendido entre enero de 1971 y diciembre de 2012.

En el estudio del DICTUC (2010) se emplearon registros de precipitación que fueron considerados como más representativos de cada subcuenca dentro de las series presentadas en el Tomo III de este informe. Dado que las estaciones con registros no se ubican exactamente sobre las subcuencas, o la precipitación media en ellas no es la misma que la que cae sobre las estaciones, se utilizaron los valores medios asignados a cada subcuenca según el mapa de isoyetas presentado en el Tomo III. Para trasladar la información de precipitación desde la estación a la subcuenca, multiplicaron los valores mensuales por un factor resultante entre la precipitación media anual de la estación y la precipitación media anual representativa según el mapa de isoyetas.

Situación similar ocurrió con la evaporación, en donde utilizaron los valores registrados en la estación Embalse Lautaro, que es la más extensa y completa, y se trasladaron a cada subcuenca en forma similar al caso de la precipitación. En la Tabla 3.2 se presentan las distintas subcuencas definidas por el DICTUC (2010) en la cuenca del río Copiapó, con los valores del área y los valores de los parámetros para el cálculo de la precipitación y evaporación en cada cuenca, estos dos últimos parámetros corresponden a los parámetros A y B del modelo pluvial MPL utilizado en el presente trabajo.

Tabla 3.1
Parámetros para el Cálculo de la Precipitación y Evaporación en cada subcuenca

| No. | Subcuenca | Área Km ² | Estación Pluviométrica | Factor de Precipitación (A) | Facto de Evaporación (B) |
|-----|--|----------------------|------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| 1 | Intermedia Manflas - Junta | 220.9 | Lautaro | 1.36 | 1.21 |
| 2 | Intermedia Junta - Lautaro | 46.3 | Lautaro | 1.14 | 1.11 |
| 3 | Intermedia Lautaro - La Puerta | 854.9 | Los Loros | 1.04 | 1.00 |
| 4 | Intermedia La Puerta - Pabellón | 470.4 | Los Loros | 0.78 | 0.88 |
| 5 | Cuenca Quebrada Carrizalillo | 1,115.9 | Los Loros | 1.01 | 1.00 |
| 6 | Intermedia Pabellón - Mal Paso | 237.0 | Copiapó | 1.34 | 0.78 |
| 7 | Cuenca Quebrada Paipote | 6,648.6 | Pastos Grandes | 1.10 | 1.04 |
| 8 | Intermedia Mal Paso - Copiapó | 338.0 | Copiapó | 1.00 | 0.69 |
| 9 | Intermedia Copiapó - Piedra Colgada | 733.2 | Copiapó | 0.77 | 0.59 |
| 10 | Intermedia Piedra Colgada - Valle Fértil | 264.3 | Copiapó | 0.57 | 0.52 |
| 11 | Intermedia Valle Fértil - Angostura | 396.0 | Copiapó | 0.34 | 0.41 |

Fuente: DICTUC (2010)

3.3 Información de Caudales

Las series de escorrentía reproducidas con el modelo MPL en este informe corresponden a los caudales calculados con el modelo SEAMOD para cada una de las subcuencas definidas por el DICTUC (2010). La subcuenca base utilizada con datos de escorrentía para la simulación de caudales corresponde a la cuenca de la Quebrada Paipote.

4 RESULTADOS

4.1 Procedimiento de Cálculo

Una vez se ha definido la información de precipitación, evaporación y escorrentía de las estaciones base se procede a la calibración de los parámetros del modelo, utilizando un programa de algoritmos genéticos (AG). Cabe mencionar que los parámetros del MPL deber tener sentido físico, lo que restringe los resultados permitidos para los mismos. A continuación se realiza una breve descripción del procedimiento utilizado para obtener los parámetros del modelo

- Definición del rango de datos de precipitación y evaporación que se utilizarán para la calibración validación de los parámetros del modelo.
- Definición del área de la cuenca: corresponde a la determinada en el estudio del DICTUC (2010) para la cuenca de la quebrada Paipote 6,648.6 km².
- Definición de los parámetros del modelo: los valores de las áreas y de los parámetros A y B corresponden a los valores de los parámetros de precipitación y evaporación consignados en la Tabla 3.1, mientras que el resto de los parámetros son definidos con base en la aplicación del modelo MPL en otras cuencas del norte de Chile y del estudio del DICTUC (2010) y corresponden a parámetros calibrables. El resultado obtenido puede ser observado en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1
Parámetros del Modelo

| Subcuenca | Área | A | B | FC | ALFA | SMIN | SCRIT | SCC | HMAX | K | PMIN | Si | Ezi |
|-----------|-----------------|------|------|--------|------|------|-------|------|------|------|-------|-----|-------------------|
| | Km ² | Adim | Adim | mm/día | Adim | °/1 | °/1 | °/1 | mm | Días | % | °/1 | m ³ /s |
| 1 | 220.9 | 1.36 | 1.21 | 1.6 | 6 | 0.1 | 0.1 | 0.12 | 200 | 30 | 0.002 | 0 | 0 |
| 2 | 46.3 | 1.14 | 1.11 | 1.6 | 6 | 0.1 | 0.1 | 0.12 | 200 | 30 | 0.002 | 0 | 0 |
| 3 | 854.9 | 1.04 | 1.00 | 1.6 | 6 | 0.1 | 0.1 | 0.12 | 200 | 30 | 0.002 | 0 | 0 |
| 4 | 470.4 | 0.78 | 0.88 | 1.6 | 6 | 0.1 | 0.1 | 0.12 | 200 | 30 | 0.002 | 0 | 0 |
| 5 | 1,115.9 | 1.01 | 1.00 | 1.6 | 6 | 0.1 | 0.1 | 0.12 | 200 | 30 | 0.002 | 0 | 0 |
| 6 | 237.0 | 1.34 | 0.78 | 1.6 | 6 | 0.1 | 0.1 | 0.12 | 200 | 30 | 0.002 | 0 | 0 |
| 7 | 6,648.6 | 1.10 | 1.04 | 1.6 | 6 | 0.1 | 0.1 | 0.12 | 200 | 30 | 0.002 | 0 | 0 |
| 8 | 338.0 | 1.00 | 0.69 | 1.6 | 6 | 0.1 | 0.1 | 0.12 | 200 | 30 | 0.002 | 0 | 0 |
| 9 | 733.2 | 0.77 | 0.59 | 1.6 | 6 | 0.1 | 0.1 | 0.12 | 200 | 30 | 0.002 | 0 | 0 |
| 10 | 264.3 | 0.57 | 0.52 | 1.6 | 6 | 0.1 | 0.1 | 0.12 | 200 | 30 | 0.002 | 0 | 0 |
| 11 | 396.0 | 0.34 | 0.41 | 1.6 | 6 | 0.1 | 0.1 | 0.12 | 200 | 30 | 0.002 | 0 | 0 |

Fuente: Elaboración Propia

4.2 Generación de Series de Escorrentía

En la Tabla 4.2 se resumen los valores medios anuales de caudales aportantes estimados para el periodo analizado en las cuencas sin registro, respectivamente. Estos caudales constituyen una estimación calibrada que son utilizados como datos de partida para la calibración del modelo Aquatool que se discutirá más adelante.

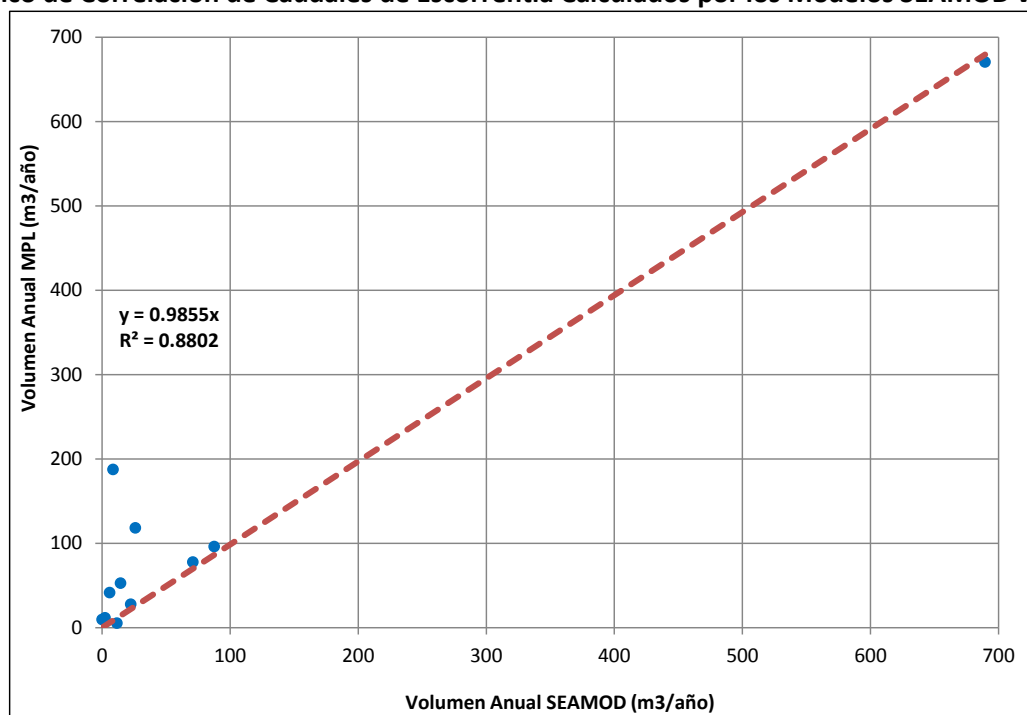
Tabla 4.2
Series de Caudales Medios Anuales para Subcuencas Aportantes sin Registro

| Subcuenca | Caudal Medio Anual |
|--|---------------------------|
| | Miles m ³ /Año |
| Cuenca Quebrada Paipote | 670.42 |
| Intermedia Manflas - Junta | 118.27 |
| Intermedia Junta - Lautaro | 5.48 |
| Intermedia Lautaro - La Puerta | 77.61 |
| Intermedia La Puerta - Pabellón | 27.75 |
| Intermedia Pabellón - Mal Paso | 187.44 |
| Cuenca Quebrada Carrizalillo | 96.07 |
| Intermedia Mal Paso - Copiapó | 41.56 |
| Intermedia Copiapó - Piedra Colgada | 52.73 |
| Intermedia Piedra Colgada - Valle Fértil | 11.57 |
| Intermedia Valle Fértil - Angostura | 9.73 |

Fuente: Elaboración Propia

Estos resultados difieren un poco de los calculados en 2010 por el DICTUC. En general se tiene que los valores calculados por el MPL son mayores que los caudales calculados por el modelo SEAMOD (ver Figura 4.1).

Figura 4.1
Gráfico de Correlación de Caudales de Escorrentía Calculados por los Modelos SEAMOD vs MPL



Fuente: Elaboración Propia

4.3 Comentarios Generales

Los factores y variables más importantes que se deben tener en cuenta a la hora de calibrar y validar los parámetros del modelo pluvial MPL son: 1) usos y características del suelo de la zona en estudio y contar con una base de datos de precipitación, evapotranspiración y escorrentía que guarden una clara correlación entre ellos, esta situación no necesariamente se cumplió en las subcuencas analizadas.

La definición de los parámetros del modelo se realizó a partir de una estimación de rangos coherentes de todas aquellas variables con representación física (capacidad de campo, punto de marchitez permanente, grado de humedad bajo el cual se restringe la evapotranspiración y el grado de humedad inicial), conllevando a una disminución de los parámetros de calibración.

La obtención de un conjunto de parámetros adecuados del modelo pluvial MPL requiere en primer lugar, que la señal observada y la simulada sean similares, es decir, que los valores de caudales simulados y observados sean relativamente iguales, lo que implica que el residual sea cercano a cero; en segundo lugar, que la función objetivo evaluada alcance su valor óptimo (cero, ejemplo complemento de correlación y 1, ejemplo Nash sutcliffe).

Los resultados obtenidos en términos de los caudales de escorrentía para cada una de las subcuencas en estudio fueron considerados válidos, estableciéndose que el modelo pluvial MPL es adecuado para la estimación de series de caudales en cuencas no controladas.