

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXIII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

ESTIMACIÓN DE CURVAS DE CAUDAL SÓLIDO EN SUSPENSIÓN EN CUENCAS CHILENAS Y COMPARACIÓN CON EXPRESIONES EMPÍRICAS DE FLEMING Y MANUAL DE PRESAS PEQUEÑAS

IRIS JIMÉNEZ P.¹
PEDRO KAMANN CH.²
LUDWIG STOWHAS B.³

RESUMEN

El estudio de la cantidad y el tipo de sedimentos que transporta un cauce es de vital importancia en proyectos de obras hidráulicas, no sólo para su diseño propiamente tal, sino también para evaluar su interacción con otras alteraciones del entorno producto de la actividad humana. En particular para el país, se presenta el problema de estimar la cantidad de sedimentos en suspensión transportados en un cauce en el cual no se realicen mediciones sedimentométricas.

En este trabajo se desarrolla un análisis comparativo entre estimaciones de la curva de descarga del caudal sólido en suspensión para cuencas chilenas, obtenidas a partir de la información disponible de las estaciones sedimentométricas analizadas; y modelos empíricos que estiman el caudal sólido en suspensión de una cuenca en función del caudal líquido promedio (Curvas de Fleming) o el área de drenaje de ésta (modelo del Manual de Presas Pequeñas). Posteriormente, y en base a los resultados del análisis comparativo, se realizan ajustes de tipo Fleming y Manual de Presas Pequeñas a los datos estimados de las estaciones chilenas, lográndose obtener ajustes más representativos de éstos. Finalmente, en base a los errores obtenidos para los ajustes propuestos, se concluye que estos permiten obtener una buena aproximación de los datos reales de caudal sólido en suspensión promedio de las estaciones analizadas, por lo cual el método propuesto puede usarse para estimar sedimentos en cuencas no controladas.

¹Ingeniero Civil, Universidad Santa María. 4C Ingenieros Ltda. – irisjimenezp@gmail.com

²Profesor, Departamento de Obras Civiles, Universidad Santa María – pedro.kamann@usm.cl

³Profesor, Departamento de Obras Civiles, Universidad Santa María – ludwig.stowhas@usm.cl

1. INTRODUCCIÓN

El estudio de la cantidad y el tipo de sedimentos que transporta un cauce es de vital importancia en proyectos de obras hidráulicas, no sólo para su diseño propiamente tal, sino también para evaluar su interacción con otras alteraciones del entorno producto de la actividad humana, como es por ejemplo la disposición de terreno para uso urbano, agrícola y/o ganadero, entre otros.

En particular, para el país de Chile, se presenta el problema de determinar la cantidad de sedimentos en suspensión (o caudal sólido en suspensión) transportados en un cauce en el cual no se realicen mediciones sedimentométricas. Lo anterior se puede resolver obteniendo el caudal sólido en suspensión promedio en función de otra variable conocida, como por ejemplo, el caudal líquido promedio o el área de drenaje de la cuenca en estudio. Obteniendo relaciones como las mencionadas para varios ríos del país, se pueden crear modelos empírico-analíticos que permitan interpolar y extrapolar estos resultados a los cauces del país donde no se realicen mediciones de sedimentos.

Para realizar lo mencionado en el párrafo anterior, se utilizan los antecedentes estadísticos de 45 estaciones sedimento-fluviométricas que la Dirección General de Aguas tiene bajo tuición, desde la Región de Antofagasta (II Región) hasta la Región de Magallanes y de la Antártica (XII Región). Una vez realizado el análisis de éstas, se comparan los resultados obtenidos con modelos empíricos desarrollados en el extranjero, con el objetivo de verificar si éstos son o no representativos del comportamiento de las cuencas del país, y reajustarlos a la realidad país en caso de ser necesario. Se utilizan para el análisis comparativo dos modelos empíricos: el Modelo de las Curvas de Fleming y el Modelo del Manual de Presas Pequeñas. Las Curvas de Fleming relacionan el caudal sólido en suspensión promedio y el caudal líquido promedio mediante constantes que dependen del tipo de cubierta de la cuenca; en cambio, el Modelo del Manual de Presas Pequeñas, relaciona el caudal sólido en suspensión promedio con sólo el área de drenaje de la cuenca.

El presente trabajo está organizado de la siguiente manera: en la sección 2 se presenta un marco teórico de los modelos empíricos analizados. La sección 3 describe la metodología de trabajo para el análisis de datos sedimento-fluviométricos. Los resultados de este análisis se presentan en la sección 4 y su comparación con los modelos empíricos se presenta en la sección 5. En la sección 6 se realiza la proposición de modelos. En la sección 7 se muestra un resumen de las expresiones obtenidas, para finalizar con la sección 8 donde se presentan las conclusiones.

2. MARCO TEÓRICO: MODELOS EMPÍRICOS

Método de las Curvas de Fleming

Fleming (1969) utilizó datos de más de 250 cuencas alrededor del mundo para obtener las relaciones que permiten determinar la tasa media anual de transporte en suspensión (o caudal sólido en suspensión promedio) en unidades de toneladas por año, en función del caudal líquido promedio o medio anual, en unidades de pies cúbicos por segundo. Esta relación depende del tipo de cobertura vegetal de la cuenca.

La expresión obtenida por Fleming se puede expresar en términos de que el caudal líquido medio anual ingresado esté en unidades de metros cúbicos por segundo. Efectuando esta conversión, la ecuación (1) es la relación o fórmula obtenida por Fleming en su análisis, y la Tabla 1 tabula los parámetros a utilizar dependiendo del tipo de cobertura vegetal de la cuenca.

$$G_s = a \cdot Q^n \quad (1)$$

Donde G_s es el gasto o caudal sólido en suspensión promedio, en [ton/año]; Q es el caudal líquido promedio o medio anual, en [m³/s]; y los parámetros a y n están definidos por la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros de la ecuación (1), para Q en [m³/s].

| Cobertura vegetal | n | a (Para Q_s en ton/año) |
|------------------------------------|------|---------------------------|
| Variada, de hoja ancha y coníferas | 1.02 | 4437 |
| Floresta conífera y pastos altos | 0.82 | 65499 |
| Pastos bajos y arbustos | 0.65 | 195356 |
| Desierto y arbustos | 0.72 | 491150 |

Método del Manual de Presas Pequeñas

En el Manual de Presas Pequeñas (Design of Small Dams, citado con título en inglés en referencias) (1987), se presenta un gráfico de donde se ha obtenido una relación entre la tasa de producción de sedimento promedio y el tamaño del área de drenaje de la cuenca (ver Figura 1). El estudio fue desarrollado con una selección de datos recopilados de embalses en el suroeste de Estados Unidos, donde el clima es semiárido.

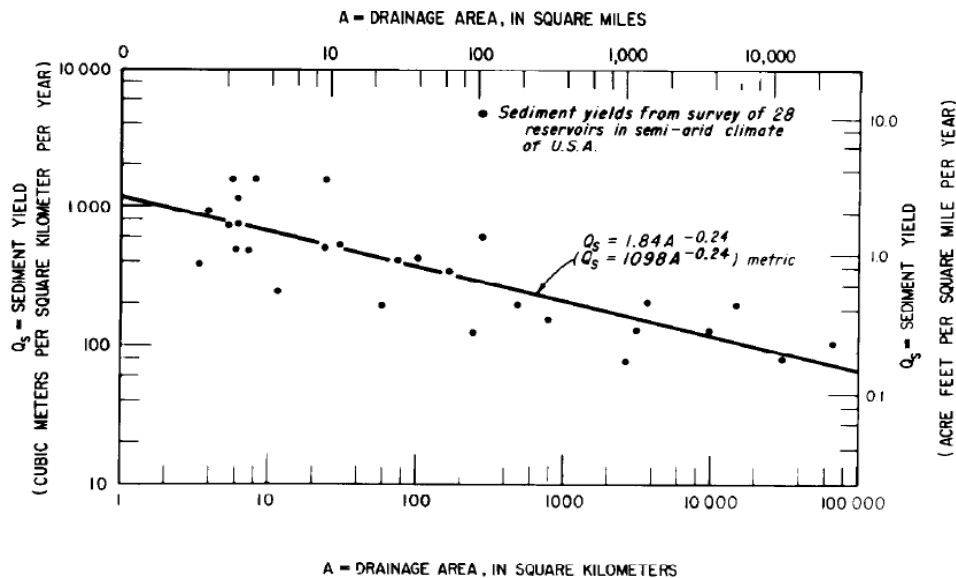


Figura 1. Tasa de producción de sedimento promedio anual vs tamaño del área de drenaje.

En la ecuación (2) se indica la relación obtenida del gráfico, donde A es el área de drenaje en [km²] y Q_s es la tasa de producción de sedimento promedio en [m³/km²/año].

$$Q_s = 1098 \cdot A^{-0.24} \quad (2)$$

La ecuación (2) se puede expresar en unidades de toneladas por año considerando una densidad aparente de la suspensión de aproximadamente 1.3 [ton/m³] y multiplicando por el área de drenaje de la cuenca, obteniéndose así la ecuación (3).

$$Q_s = 1427.4 \cdot A^{0.76} \quad (3)$$

3. METODOLOGÍA DE TRABAJO PARA EL ANÁLISIS DE DATOS SEDIMENTO-FLUVIOMÉTRICOS

En la siguiente sección se detalla la metodología de trabajo a seguir para el análisis de los datos de las 45 estaciones sedimento-fluviométricas de la Dirección General de Aguas (en adelante, DGA), con el fin de obtener el caudal sólido en suspensión promedio en cada una de ellas.

Obtención de Datos Estadísticos

Los datos requeridos de cada estación comprenden datos fluviométricos y sedimentométricos, los que se han obtenido mediante solicitud de datos a la DGA vía e-mail, o bien mediante descarga directa de su página. La obtención de los datos está avalada por la “Ley de Transparencia”: Ley N°20.285, sobre Acceso a la Información Pública.

Obtención del Área de Drenaje

Para la obtención del área de drenaje que corresponde a cada estación sedimento-fluviométrica, se utilizan los programas de computadora Global Mapper, para obtener imágenes georreferenciadas; y WMS, para delinear la cuenca hidrográfica. Por otra parte, Vicencio (2012) determinó el área de drenaje para varias de las estaciones sedimento-fluviométricas que se incluyen en este trabajo. Las áreas de drenaje ya obtenidas por Vicencio no se calculan nuevamente mediante el uso de los programas mencionados, sino que se utilizan los valores obtenidos en aquel documento.

Correlación Muestreo Integrado vs Muestreo Rutinario

Con la estadística de muestreo integrado (*CI*) y muestreo rutinario (*CR*) de la estación, se obtiene la correlación entre ambas. Como los datos rutinarios se registran generalmente de manera diaria, y en cambio, los integrados cada uno o más meses, se desea obtener una ecuación donde a partir de los primeros puedan obtenerse los segundos. La correlación obtenida para *CI* vs *CR* es una ecuación potencial de la forma:

$$CI = a \cdot CR^b \quad (4)$$

En la mayoría de los casos, la correlación es evidente. En caso contrario, se ha optado por ajustar los datos a una línea de 45°, es decir, ajustar a un valor equivalente para ambos muestreos (*CI* = *CR*). A la concentración obtenida mediante la ecuación (4) se le llama “concentración media”.

Curva de Duración de Caudales Medios Diarios

Para la obtención de la curva de duración de caudales medios diarios, se ordena de mayor a menor valor la estadística de caudales medios diarios de la estación, y a cada uno de estos valores, se le asigna la probabilidad de excedencia de Weibull, dada por la ecuación (5). Además, a esta lista se agregan el caudal máximo diario anual asociado a 50 y 100 años de período de retorno, según corresponda. A éstos se les asocia la probabilidad de excedencia (P_{exc}) determinada de acuerdo a la ecuación (6), donde T_R es el período de retorno en años.

$$P_{exc} = \frac{n}{(N+1)} \quad (5)$$

$$P_{exc} = \frac{1}{(365 \cdot T_R)} \quad (6)$$

El caudal máximo diario anual asociado a 50 y 100 años de período de retorno se obtiene realizando un análisis de caudales máximos diarios. Lo anterior se realiza con dos motivos: uniformizar el largo de las series de caudales medios diarios, e incluir los caudales que presentan las mayores tasas de arrastre.

Correlación Caudal Sólido vs Caudal Líquido

Para obtener la correlación entre el caudal sólido (Q_s) y el caudal líquido (Q_l), se obtiene primero el valor de caudal sólido para los datos de estadística disponibles, usando la ecuación (7):

$$Q_{si} = \bar{C}_i \cdot Q_{li} \quad (7)$$

Donde \bar{C} es la concentración media, y Q_l es el caudal líquido (que en este caso, corresponde al caudal medio diario). Esta operación se realiza para toda la estadística disponible.

Una vez obtenidos los valores de caudal sólido para la estadística disponible, se obtiene la correlación entre caudal sólido y caudal líquido. La correlación obtenida para Q_s vs Q_l es una ecuación potencial de la forma:

$$Q_s = a \cdot Q_l^b \quad (8)$$

En la mayoría de los casos, la correlación es evidente. En algunos casos, es necesario obtener dos rectas, cuando la tendencia de los valores inferiores de las variables difiere de la de los superiores. En este caso se obtienen dos ecuaciones para rangos de caudal diferente.

Obtención del Caudal Sólido en Suspensión Promedio y Caudal Líquido Promedio

En primera instancia, se debe obtener los caudales sólidos asociados a la curva de duración de caudales medios diarios líquidos (caudal medio diario). A su vez, éstos tendrán también asociado el valor de probabilidad de excedencia que corresponda. Luego, se debe integrar la curva de

duración de caudales medios diarios sólidos, formada con los caudales sólidos obtenidos del párrafo anterior, obteniéndose así el caudal sólido en suspensión promedio ($\bar{Q}_{s,prom}$). Para datos discretos, lo anterior se resume en la ecuación (9):

$$\bar{Q}_{s,prom} = \sum_{i=1}^M Q_{si} \Delta p_i \quad (9)$$

Donde p es la probabilidad de excedencia; e $i = 1, \dots, M$, siendo M el número de datos que se hayan tomado como representativos de la muestra total N , siendo aproximadamente veinte. Asimismo se ha considerado en la curva de duración los caudales medios diarios asociados a los periodos de retorno de 50 y 100 años.

El procedimiento es similar para la obtención del caudal líquido promedio ($\bar{Q}_{l,prom}$), donde se debe integrar la curva de duración de caudales medios diarios líquidos (caudal medio diario). Para datos discretos, lo anterior se resume en la ecuación (10):

$$\bar{Q}_{l,prom} = \sum_{i=1}^M Q_{li} \Delta p_i \quad (10)$$

4. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE DATOS SEDIMENTO-FLUVIOMÉTRICOS EN CUENCAS CHILENAS

Usando la metodología señalada en la sección 3, los resultados obtenidos del análisis de datos sedimento-fluviométricos de las 45 cuencas chilenas se señalan en la Tabla 2.

Tabla 2. Resumen de resultados del análisis de las 45 estaciones sedimento-fluviométricas

| N° | Estación | $A_{drenaje}$ [km ²] | Q_s [kg/s] = $A_1 \cdot (Q_l$ [m ³ /s]) ^{A_2} | $\bar{Q}_{s,prom}$ [Ton/año] | $\bar{Q}_{l,prom}$ [m ³ /s] |
|----|------------------------------------|-------------------------------------|--|---------------------------------|---|
| 1 | Río Loa antes Represa Lequena | 2 010.00 | - Para $Q_l < 0.95$ [m ³ /s] $Q_s = 0.16 \cdot Q_l^{5.79}$ - Para $Q_l > 0.9506$ [m ³ /s] $Q_s = 0.13 \cdot Q_l^{1.92}$ | 1 282.34 | 0.56 |
| 2 | Río Salado en Sifón Ayquina | 770.00 | $Q_s = 0.04 \cdot Q_l^{2.96}$ | 8 840.57 | 0.51 |
| 3 | Río Huasco en Algodones | 7 187.00 | $Q_s = 0.01 \cdot Q_l^{2.22}$ | 96 249.05 | 6.26 |
| 4 | Río Jorquera en Vertedero | 4 150.00 | $Q_s = 0.62 \cdot Q_l^{2.47}$ | 28 869.74 | 0.68 |
| 5 | Río Cogotí entrada Embalse Cogotí | 735.00 | - Para $Q_l < 0.68$ [m ³ /s] $Q_s = 0.01 \cdot Q_l^{1.33}$ - Para $Q_l > 0.68$ [m ³ /s] $Q_s = 0.01 \cdot Q_l^{2.58}$ | 173 449.85 | 2.33 |
| 6 | Río Choapa en Cuncumén | 1 176.00 | $Q_s = 1.93 \cdot 10^{-4} \cdot Q_l^{3.21}$ | 198 175.46 | 9.65 |
| 7 | Río Grande en Puntilla San Juan | 3 512.00 | - Para $Q_l < 4.01$ [m ³ /s] $Q_s = 0.01 \cdot Q_l^{1.26}$ - Para $Q_l > 4.01$ [m ³ /s] $Q_s = 1.00 \cdot 10^{-3} \cdot Q_l^{2.76}$ | 522 152.50 | 9.36 |
| 8 | Río Hurtado en Angostura de Pangué | 1 772.00 | - Para $Q_l < 1.85$ [m ³ /s] $Q_s = 0.01 \cdot Q_l^{1.36}$ - Para $Q_l > 1.85$ [m ³ /s] $Q_s = 3.54 \cdot 10^{-3} \cdot Q_l^{2.83}$ | 236 772.62 | 3.27 |

Tabla 2. Resumen de resultados del análisis de las 45 estaciones sedimento-fluviométricas
(Continuación)

| N° | Estación | $A_{drenaje}$ [km ²] | Q_s [kg/s] = $A_1 \cdot (Q_l$ [m ³ /s]) ^{A₂} | $\bar{Q}_{s,prom}$ [Ton/año] | $\bar{Q}_{l,prom}$ [m ³ /s] |
|----|-------------------------------------|-------------------------------------|--|---------------------------------|---|
| 9 | Río Turbio en Varillar | 4 148.00 | $Q_s = 0.01 \cdot Q_l^{2.79}$ | 351 820.84 | 7.86 |
| 10 | Río Aconcagua en Chacabuquito | 2 400.00 | $Q_s = 2.90 \cdot 10^{-5} \cdot Q_l^{3.16}$ | 515 449.38 | 33.09 |
| 11 | Río Blanco en Río Blanco | 382.00 | $Q_s = 0.01 \cdot Q_l^{2.42}$ | 112 914.70 | 7.86 |
| 12 | Río Putaendo en Resguardo Los Patos | 927.00 | $Q_s = 1.14 \cdot 10^{-3} \cdot Q_l^{3.02}$ | 380 956.75 | 8.27 |
| 13 | Río Colorado antes Junta Río Maipo | 1 713.00 | $Q_s = 1.05 \cdot 10^{-5} \cdot Q_l^{3.97}$ | 2 009 286.97 | 30.40 |
| 14 | Río Maipo en El Manzano | 4 968.00 | $Q_s = 1.97 \cdot 10^{-7} \cdot Q_l^{4.12}$ | 23 359 734.81 | 108.55 |
| 15 | Río Mapocho en Los Almendros | 620.00 | $Q_s = 0.01 \cdot Q_l^{2.61}$ | 239 934.74 | 6.52 |
| 16 | Río Mapocho Rinconada de Maipú | 4068.00 | $Q_s = 2.78 \cdot 10^{-6} \cdot Q_l^{4.44}$ | 648 691 583.44 | 28.61 |
| 17 | Río Tinguiririca bajo Los Briones | 1 441.00 | $Q_s = 6.16 \cdot 10^{-5} \cdot Q_l^{3.16}$ | 3 022 922 10 | 50.44 |
| 18 | Río Loncomilla en Las Brisas | 10 046.00 | $Q_s = 6.21 \cdot 10^{-4} \cdot Q_l^{1.72}$ | 842 075.81 | 276.43 |
| 19 | Río Purapel en Sauzal | 680.31 | $Q_s = 0.02 \cdot Q_l^{1.83}$ | 76 958.26 | 4.86 |
| 20 | Río Tenó después de Junta con Claro | 1 188.00 | $Q_s = 6.81 \cdot 10^{-6} \cdot Q_l^{3.33}$ | 1 708 972.18 | 56.91 |
| 21 | Río Biobío en Desembocadura | 21 255.67 | $Q_s = 1.51 \cdot 10^{-5} \cdot Q_l^{2.09}$ | 1 988 318.65 | 1 002.15 |
| 22 | Río Chillán en Camino a Confluencia | 811.13 | – Para $Q_l < 6.28$ [m ³ /s] $Q_s = 0.01 \cdot Q_l^{1.05}$ – Para $Q_l > 6.28$ [m ³ /s] $Q_s = 4.82 \cdot 10^{-4} \cdot Q_l^{2.44}$ | 289 312.20 | 21.23 |
| 23 | Río Diguillín en Longitudinal | 726.12 | – Para $Q_l < 42.89$ [m ³ /s] $Q_s = 0.01 \cdot Q_l^{0.94}$ – Para $Q_l > 42.89$ [m ³ /s] $Q_s = 8.42 \cdot 10^{-6} \cdot Q_l^{2.72}$ | 154 533.63 | 49.76 |
| 24 | Río Itata en Balsa Nueva Aldea | 4 491.12 | $Q_s = 1.33 \cdot 10^{-4} \cdot Q_l^{2.25}$ | 1 435 518.93 | 137.73 |
| 25 | Río Itata en Cholguán | 854.29 | $Q_s = 3.27 \cdot 10^{-5} \cdot Q_l^{2.42}$ | 45 038.03 | 45.07 |
| 26 | Río Itata en Coelemu | 10 353.13 | – Para $Q_l < 141.82$ [m ³ /s] $Q_s = 3.51 \cdot 10^{-3} \cdot Q_l^{1.19}$ – Para $Q_l > 141.82$ [m ³ /s] $Q_s = 1.20 \cdot 10^{-6} \cdot Q_l^{2.80}$ | 7 963 239.15 | 353.29 |
| 27 | Río Laja en Puente Perales | 3 598.59 | $Q_s = 9.35 \cdot 10^{-6} \cdot Q_l^{2.90}$ | 3 191 891.46 | 153.41 |
| 28 | Río Ñuble en San Fabián | 1 709.00 | $Q_s = 2.30 \cdot 10^{-6} \cdot Q_l^{2.84}$ | 380 358.30 | 111.03 |
| 29 | Río Allipén en Los Laureles | 1 717.95 | $Q_s = 4.12 \cdot 10^{-15} \cdot Q_l^{6.92}$ | 266 342 569.21 | 142.23 |
| 30 | Río Cautín en Rari-Ruca | 1 252.44 | $Q_s = 5.27 \cdot 10^{-8} \cdot Q_l^{3.89}$ | 1 582 687.53 | 105.23 |
| 31 | Río Cholchol en Cholchol | 4 880.40 | $Q_s = 2.90 \cdot 10^{-4} \cdot Q_l^{1.79}$ | 119 641.14 | 130.00 |
| 32 | Río Dónquil en Gorbea | 741.34 | $Q_s = 2.68 \cdot 10^{-3} \cdot Q_l^{1.43}$ | 16 231.70 | 31.95 |
| 33 | Río Lumaco en Lumaco | 1 036.30 | $Q_s = 0.01 \cdot Q_l^{1.71}$ | 65 911.73 | 18.21 |
| 34 | Río Quepe en Quepe | 1 620.76 | $Q_s = 2.42 \cdot 10^{-5} \cdot Q_l^{2.69}$ | 622 221.12 | 88.36 |
| 35 | Río Trancura antes Río Llafenco | 1 418.58 | $Q_s = 1.46 \cdot 10^{-5} \cdot Q_l^{2.45}$ | 140 783.87 | 114.69 |
| 36 | Río Vergara en Tijeral | 2 333.13 | $Q_s = 2.25 \cdot 10^{-3} \cdot Q_l^{1.57}$ | 66 686.17 | 54.93 |
| 37 | Río Cruces en Rucaco | 1 828.49 | $Q_s = 2.19 \cdot 10^{-5} \cdot Q_l^{2.37}$ | 106 502.70 | 88.08 |
| 38 | Río Rahue en Forrahue | 5 593.58 | $Q_s = 2.20 \cdot 10^{-7} \cdot Q_l^{2.93}$ | 238 846.20 | 244.75 |
| 39 | Río Grande en Tierra del Fuego | 2 797.01 | $Q_s = 2.78 \cdot 10^{-4} \cdot Q_l^{2.22}$ | 25 126.72 | 28.74 |
| 40 | Río Las Minas en BT. Sendos | 35.16 | $Q_s = 0.09 \cdot Q_l^{2.37}$ | 19 430.69 | 0.93 |
| 41 | Río Oro en Bahía San Felipe | 565.81 | $Q_s = 3.77 \cdot 10^{-4} \cdot Q_l^{3.85}$ | 15 083.10 | 3.24 |
| 42 | Río Penitente en Morro Chico | 1 499.42 | $Q_s = 1.78 \cdot 10^{-4} \cdot Q_l^{2.50}$ | 18 020.35 | 14.25 |
| 43 | Río Pérez en Desembocadura | 323.57 | $Q_s = 1.30 \cdot 10^{-4} \cdot Q_l^{3.85}$ | 578 545.92 | 8.19 |
| 44 | Río San Juan en Desembocadura | 861.20 | $Q_s = 5.62 \cdot 10^{-4} \cdot Q_l^{2.50}$ | 82 292.06 | 18.49 |
| 45 | Río Tres Brazos antes BT. Sendos | 97.46 | $Q_s = 0.01 \cdot Q_l^{2.00}$ | 3 897.43 | 2.06 |

5. ANÁLISIS COMPARATIVO DE DATOS SEDIMENTO-FLUVIOMÉTRICOS DE CUENCAS CHILENAS CON MODELOS EMPÍRICOS

Usando los resultados obtenidos del análisis de datos sedimento-fluviométricos para cada estación analizada (ver Tabla 2); se realiza un análisis comparativo con los modelos empíricos presentados en la sección 2.

Para el análisis, se han agrupado las 45 estaciones analizadas en tres zonas (la numeración de las estaciones es la misma que la de Tabla 2).

- Zona norte: Desde la Región de Antofagasta (II) hasta la Región de Atacama (III).
- Zona centro: Desde la Región de Coquimbo (IV) hasta la Región del Maule (VII).
- Zona sur: Desde la Región del Biobío (VIII) hasta la Región de Magallanes y la Antártica (XII).

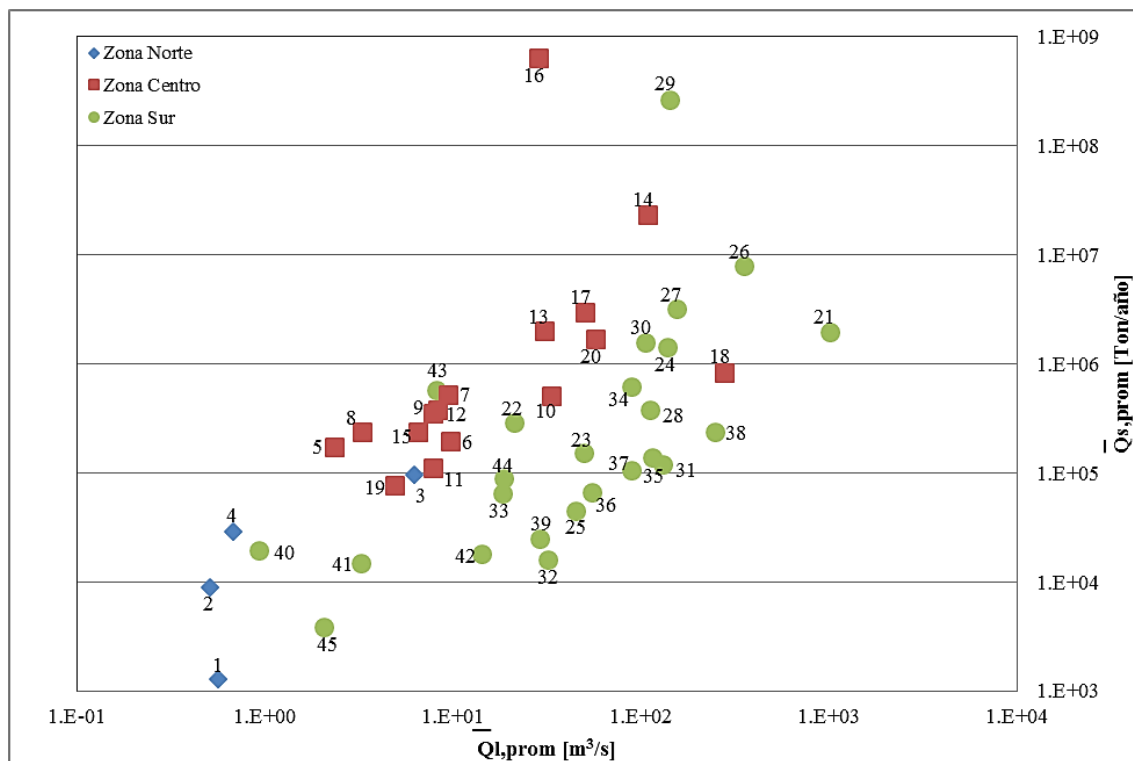


Figura 2. Caudal Sólido en Suspensión Promedio vs Caudal Líquido Promedio

Análisis Comparativo con Curvas de Fleming

Utilizando el modelo empírico de Curvas de Fleming (ver sección 2), se ha obtenido la Figura 3, donde se contrastan los resultados obtenidos usando este modelo y los obtenidos mediante el análisis de estaciones chilenas.

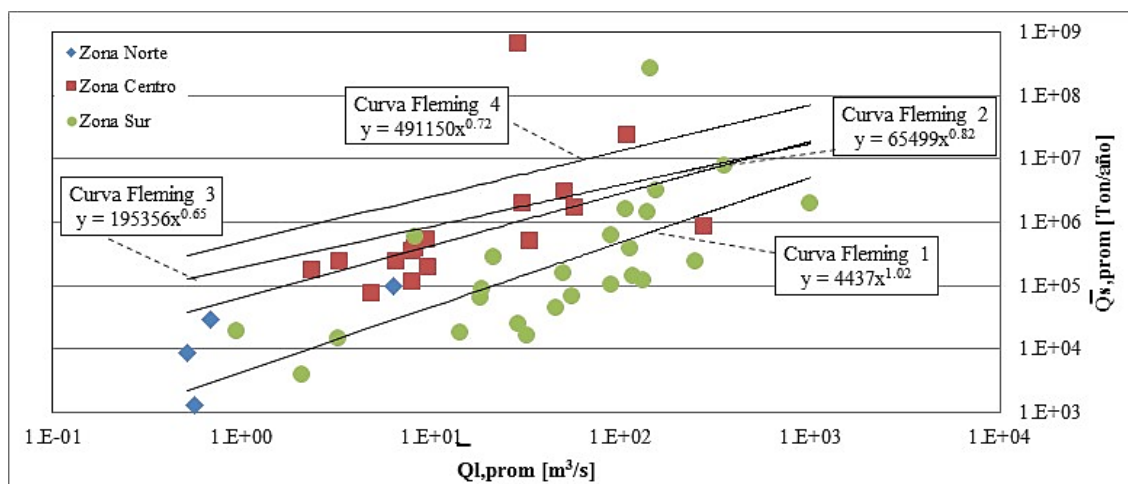


Figura 3. Caudal Sólido en Suspensión Promedio vs Caudal Líquido Promedio (Medido), y Curvas de Fleming.

Las Curvas de Fleming que presentan un mejor ajuste con los datos de cuencas chilenas son las Curvas de Fleming 1, 2 y 3. Es decir, los modelos que más se ajustan a la realidad del país son aquellos donde el tipo de cobertura corresponde a: vegetación variada, de hoja ancha y coníferas (Curva de Fleming 1), floresta coníferas y pastos altos (Curva de Fleming 2), y pastos bajos y arbustos (Curva de Fleming 3).

Esto concuerda con el tipo de vegetación presente dentro del país, pues la zona centro del país posee un clima mediterráneo donde la vegetación dominante es de tipo matorral (cobertura de Curva de Fleming 3), pasando a coníferas a medida que se avanza hacia el sur (cobertura de Curva de Fleming 2). la zona sur por su parte, posee vegetación variada, principalmente bosques de coníferas como la zona del Bosque o Selva Valdiviana; y pastizales al sur en sectores más australes como la Patagonia Magallánica (Curva de Fleming 1). La Curva de Fleming 4 es para cobertura vegetal de tipo desierto y arbustos, lo que concuerda con la vegetación del norte del país. Sin embargo, los datos que se poseen de la zona norte (Norte Grande, desde Arica hasta Atacama) son sólo seis, y no es posible establecer una correcta relación entre éstos y la Curva de Fleming 4.

Los errores de ajuste obtenidos para las Curvas de Fleming, con su zona correspondiente de acuerdo a la vegetación de la cuenca, son mayores al 100%. Esto puede deberse a valores extremos que se alejen del promedio y/o de la tendencia, haciendo que el error sea mayor. Luego de analizar los datos, se determina que son tres las estaciones que se alejan de la tendencia; dos de la zona centro y una de la zona sur. Calculando nuevamente los errores de ajuste, los resultados son los de la Tabla 3.

Tabla 3. Error relativo de ajuste, Curvas de Fleming.

| Zona | Curva Fleming 1 | Curva Fleming 2 | Curva Fleming 3 | Curva Fleming 4 |
|--------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | E. Relativo % | E. Relativo % | E. Relativo % | E. Relativo % |
| Norte | - | - | - | 2706.76% |
| Centro | - | 67.66% | 79.30% | - |
| Sur | 43.30% | - | - | - |

En lo posterior, las tres estaciones que se alejan de la tendencia, que son las estaciones Río Maipo en El Manzano, Río Mapocho Rinconada de Maipú y Río Allipén en Los Laureles, no se incluirán en el análisis comparativo ni en la proposición de modelos.

Análisis Comparativo con Manual de Presas Pequeñas

Utilizando el método del Manual de Presas Pequeñas (ver sección 2), se ha obtenido la Figura 4, donde se contrastan los resultados obtenidos usando este modelo y los obtenidos mediante el análisis de estaciones chilenas, sin incluir las tres estaciones que se alejan de la tendencia (ver subsección anterior). Los errores de ajuste entre el método del Manual de Presas Pequeñas y los datos obtenidos de cuencas chilenas, son los de la Tabla 4.

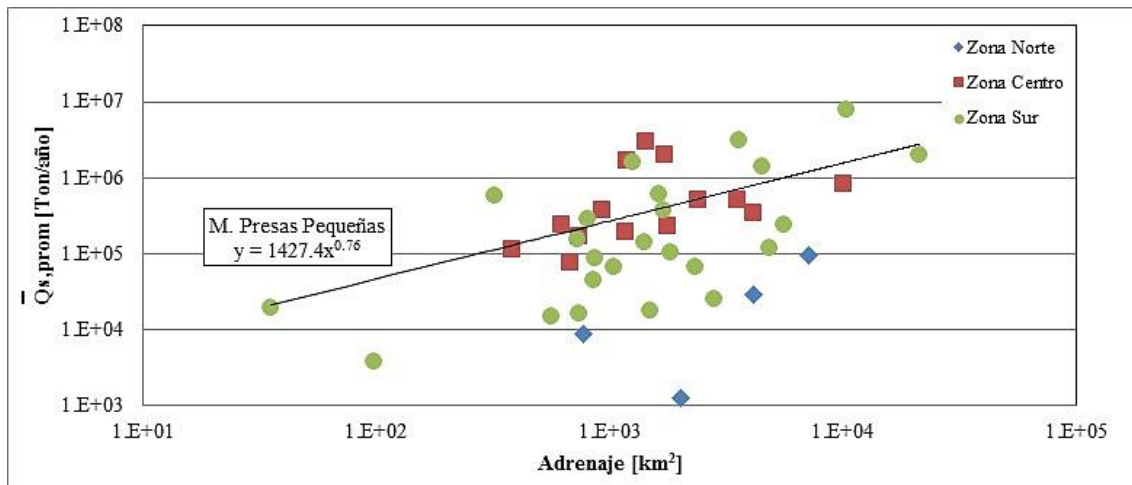


Figura 4. Caudal Sólido en Suspensión Promedio vs Área de Drenaje (Medido), y Manual de Presas Pequeñas.

Tabla 4. Error relativo de ajuste, Manual de Presas Pequeñas.

| | E. Relativo % |
|---------------------------------|----------------------|
| Zona Norte, Centro y Sur | 28.06% |
| Zona Norte | 1433.43% |
| Zona Centro | 36.58% |
| Zona Sur | 39.10% |

Los errores de ajuste obtenidos varían entre 28.1% y un 39.1%; esto sin contar el alto error de 1433% de la zona norte, debido probablemente a los pocos datos con los que se cuenta. Se observa que para todos los datos de las estaciones (zona norte, centro y sur) el error es de 28.1%, arrojando un mejor ajuste que en el caso de la zona centro y zona sur por separado, con un 36.6% y 39.1% respectivamente.

6. PROPOSICIÓN DE MODELOS

Debido a que los modelos empíricos con los que se ha realizado el análisis comparativo, Modelo de Curvas de Fleming y Modelo del Manual de Presas Pequeñas, se ajustan parcialmente a los

valores obtenidos para las cuencas chilenas, se proponen modelos similares que se ajusten de mejor manera a los datos medidos.

Ajuste de Modelo tipo Curvas de Fleming

Se ajustan los datos obtenidos de las estaciones a una curva de tipo potencial, como es en el modelo de Curvas de Fleming, dejando el caudal sólido en suspensión promedio en función del caudal líquido promedio o medio anual. Se han realizado ajustes a los datos en su totalidad (zona norte, centro y sur; sumando 42 estaciones), y a la zona centro (14 estaciones) y zona sur (24 estaciones) por separado. La cantidad de datos que se poseen de la zona norte (4 estaciones) se considera insuficiente para ajustar un modelo que represente la zona a estudio.

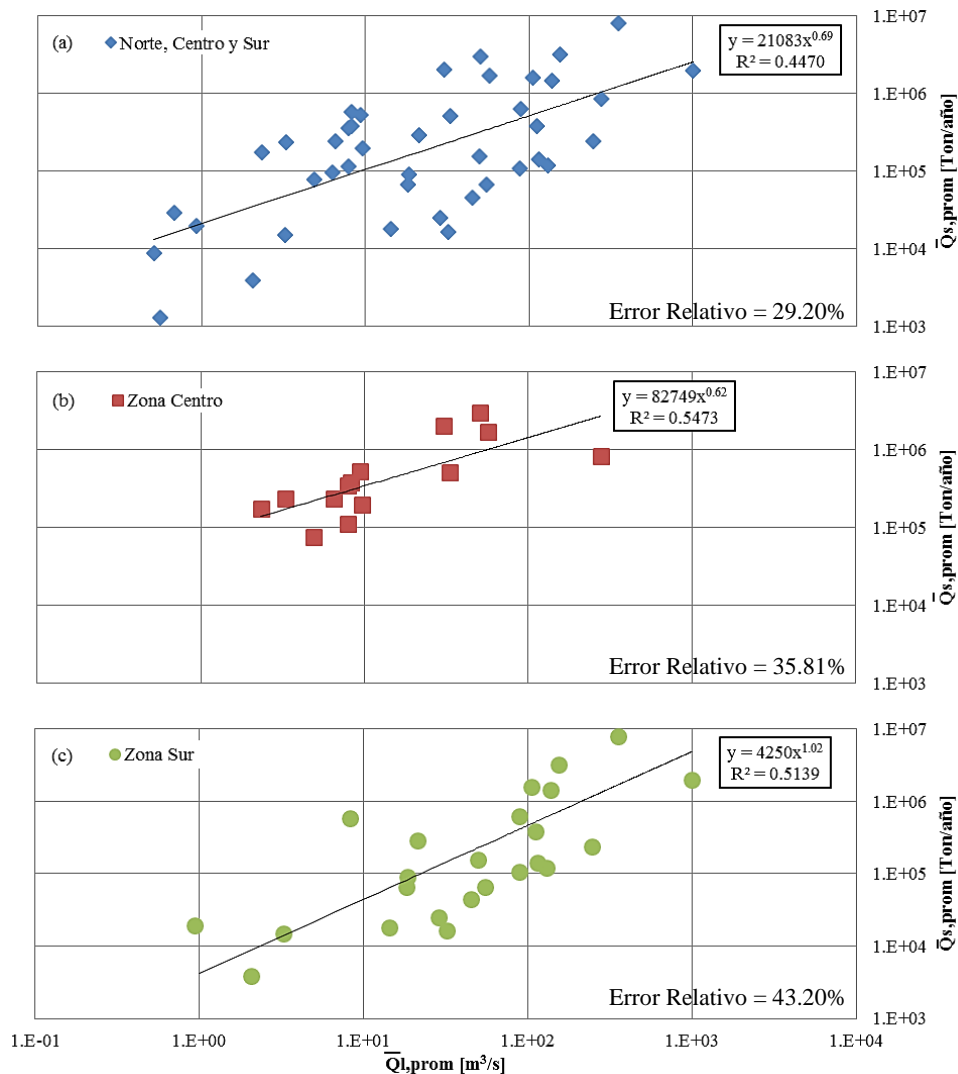


Figura 5. Caudal sólido en suspensión promedio vs caudal líquido promedio (medido), y ajustes de tipo potencial Fleming. (a) Zona norte, centro y sur. (b) Zona centro. (c) Zona sur.

Ajuste de Modelo tipo Manual de Presas Pequeñas

Se ajustan los datos obtenidos de las estaciones a una curva de tipo potencial, como es en el modelo del Manual de Presas Pequeñas, dejando el caudal sólido en suspensión promedio en función del área de drenaje de la cuenca. Se han realizado ajustes a los datos en su totalidad (zona norte, centro y sur; sumando 42 estaciones), y a la zona centro (14 estaciones) y zona sur (24 estaciones) por separado. La cantidad de datos que se poseen de la zona norte (4 estaciones) se considera insuficiente para ajustar un modelo que represente la zona a estudio.

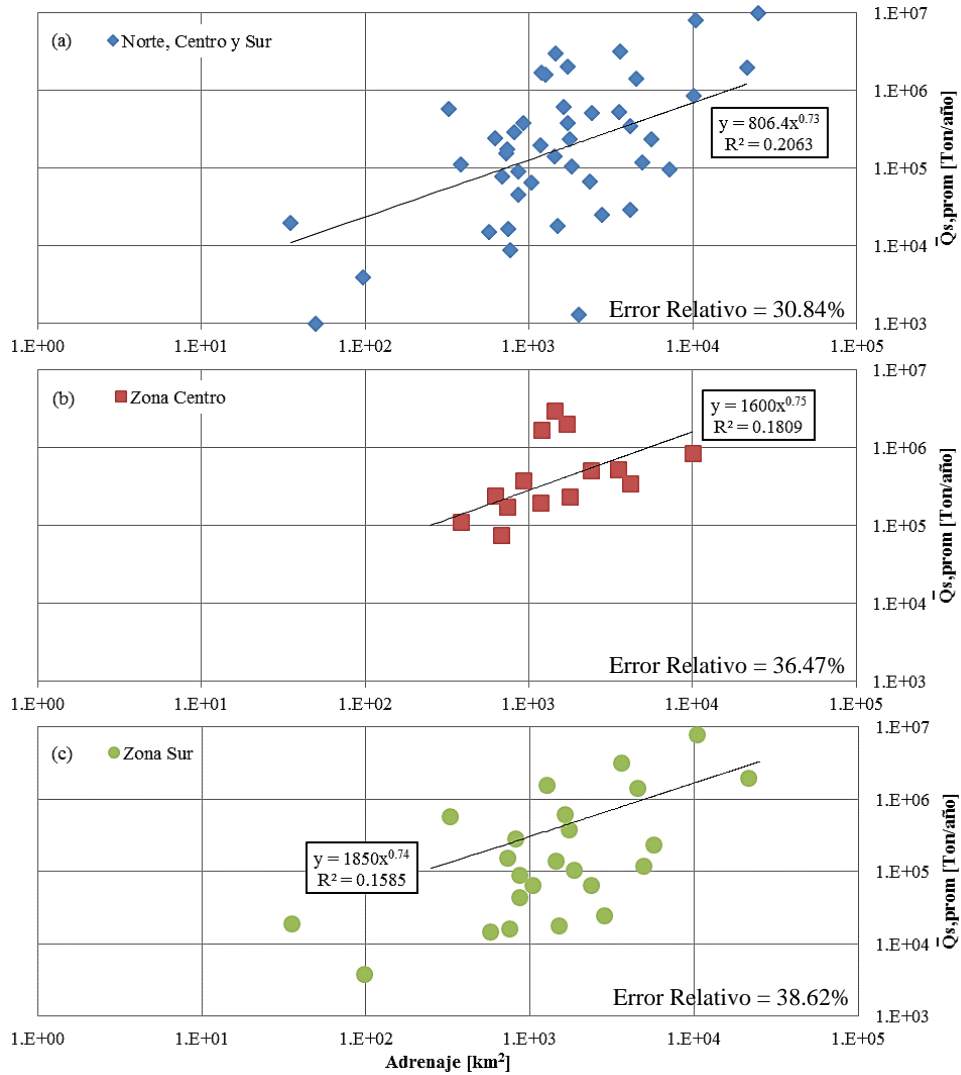


Figura 6. Caudal sólido en suspensión promedio vs área de drenaje, y ajustes de tipo potencial M. Presas Pequeñas. (a) Zona norte, centro y sur. (b) Zona centro. (c) Zona sur.

7. RESUMEN DE RESULTADOS

Resumen de Ajuste de Modelo tipo Fleming

En la Tabla 5 se presenta la comparación de los errores obtenidos para el Modelo de Curvas de Fleming y el Ajuste de Modelo tipo Curvas de Fleming.

Tabla 5. Comparación de errores obtenidos: Modelo Curvas de Fleming y Ajuste Propuesto

| Zona | E. Relativo % | |
|---------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| | Modelo de Curvas de Fleming | Ajuste de Modelo tipo Fleming |
| Norte, Centro y Sur | - | 29.20% |
| Centro | Curva 3 Fleming | 79.30% |
| | Curva 2 Fleming | 67.66% |
| Sur | Curva 1 Fleming | 43.30% |

En el caso de todo el país (zona norte, centro y sur), no se analizó con las Curvas de Fleming, puesto que la vegetación es diferente a lo largo del país, por lo que ajustar una sola curva de Fleming no es posible; sin embargo, de todos modos se intentó un Ajuste de Modelo tipo Fleming, obteniendo un 29% de error, por lo que se acepta esta expresión como ajuste para todo el país. Para la zona centro se analizaron las Curvas de Fleming 2 y 3, arrojando errores del 68% y 79% respectivamente; sin embargo, con el Ajuste de Modelo tipo Fleming, se obtuvo un error de sólo 36%, por lo que se acepta esta expresión como ajuste para la zona centro. Para la zona sur se analizó la Curva de Fleming 1, arrojando un error de 43%, obteniendo lo mismo con el Ajuste de Modelo tipo Fleming. Debido a que el error prácticamente no varía, se considera mantener la expresión dada por la Curva de Fleming 1. Respetando lo mencionado, las expresiones de ajuste para cada zona del país, con $Q_{s,prom}$ en [Ton/año] y $Q_{l,prom}$ en [m³/s], son:

Expresiones obtenidas de Ajuste de Modelo tipo Fleming

- Para todo el país (Zona Norte, Centro y Sur):

$$Q_{s,prom} = 21083 \cdot Q_{l,prom}^{0.69} \quad (11)$$

- Para Zona Centro - Desde la Región de Coquimbo (IV) hasta la Región del Maule (VII):

$$Q_{s,prom} = 82749 \cdot Q_{l,prom}^{0.62} \quad (12)$$

- Para Zona Sur - Desde la Región del Biobío (VIII) hasta la Región de Magallanes y la Antártica (XII) (Expresión original de la Curva de Fleming 1):

$$Q_{s,prom} = 4437 \cdot Q_{l,prom}^{1.02} \quad (13)$$

Resumen de Ajuste de Modelo tipo Manual de Presas Pequeñas

En la Tabla 5 se presenta la comparación de los errores obtenidos para el Modelo del Manual de Presas Pequeñas y el Ajuste de Modelo tipo Manual de Presas Pequeñas.

Tabla 5. Comparación de errores obtenidos: Modelo de M. Presas Pequeñas y Ajuste Propuesto

| Zona | E. Relativo % | |
|---------------------|------------------------------|--|
| | Modelo de M. Presas Pequeñas | Ajuste de Modelo tipo M. Presas Pequeñas |
| Norte, Centro y Sur | 28.06% | 30.84% |
| Centro | 36.58% | 36.47% |
| Sur | 39.10% | 38.62% |

De la tabla anterior, se observa que tanto para el análisis de todo el país (zona norte, centro y sur), como para la zona centro y zona sur por separado, los errores entre el Modelo del M. Presas Pequeñas y el Ajuste de Modelo tipo M. Presas Pequeñas son aproximadamente los mismos. Dado que el Modelo del M. Presas Pequeñas considera una sola ecuación que relaciona el área de drenaje con el caudal sólido en suspensión promedio, se mantiene esta expresión para todas las zonas del país. Respetando lo mencionado, la expresión de ajuste para todas las zonas del país, con $Q_{s,prom}$ en [Ton/año] y $A_{drenaje}$ en [km²], es:

Expresión obtenida de Ajuste de Modelo tipo Manual de Presas Pequeñas

- Para todas las zonas del país (Expresión original del Manual de Presas Pequeñas)

$$Q_{s,prom} = 1427.4 \cdot A_{drenaje}^{0.76} \quad (14)$$

8. CONCLUSIONES

El trabajo realizado entrega una buena aproximación sobre la cantidad de sedimentos en suspensión medio anual que transporta un cauce en el país de Chile. Al compararse los resultados obtenidos para cuencas chilenas con los modelos empíricos de Curvas de Fleming y del Manual de Presas Pequeñas, se concluye que éstos se ajustan parcialmente en las cuencas chilenas de las que se tiene información sedimento-fluviométrica. Esto puede ser debido a múltiples factores como el tipo de suelo, de terreno, cobertura vegetal, uso del suelo, etc., por lo que los altos errores obtenidos al comparar con ambos modelos no son inusuales. Buscando disminuir el error de ajuste de estos modelos, se realizaron ajustes de tipo Fleming y Manual de Presas Pequeñas a los datos obtenidos de las estaciones, lográndose así obtener en algunas zonas un ajuste un poco más representativo de éstas.

En particular, en el caso del Ajuste de Modelo tipo Curvas de Fleming, que relaciona caudal líquido promedio y cobertura vegetal de cuenca con caudal sólido en suspensión promedio, los errores disminuyeron de un 43-79% a un 36-43% para la zona centro y sur; además de obtenerse una expresión para todo el país con un error del 29%. En el caso del Ajuste de Modelo tipo Manual de Presas Pequeñas, que relaciona área de drenaje de la cuenca con caudal sólido en suspensión promedio, los errores no variaron considerablemente, manteniéndose aproximadamente entre un 30-40%, por lo que se decidió mantener la ecuación original del Manual de Presas Pequeñas, por ser representativa de todo el país.

REFERENCIAS

Fleming, G. 1969. Design curves for suspended load estimation. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 43(1):1-9.

Jiménez, I. 2016. Estimación de curvas de caudal sólido en suspensión y comparación con expresiones empíricas de Fleming y Manual de Presas Pequeñas. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad Técnica Federico Santa María.

Strand, R.I. y E.L. Pemberton. 1987. Reservoir sedimentation. En: United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation. Design of Small Dams, Water Resources Technical Publication Series. 3° ed. Estados Unidos, U.S. Government Printing Office, 529-564.

Vicencio, M. 2012. Estimación de curvas de caudal sólido en suspensión y comparación con expresiones empíricas de Fleming; Dendy y Bolton. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Valparaíso.