



UNIVERSIDAD DE VALPARAÍSO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

“Estimación de Curvas de Gasto Sólido en Suspensión,
Comparación con Expresiones Empíricas y Análisis de
la Geomorfología de las Cuencas”

Por

Cristian Andrés Robles Castro

Trabajo de Título para optar al Grado de Licenciado en
Ciencias de la Ingeniería y Título de Ingeniero Civil.

Prof. Guía Yerel Morales Pino

Agosto, 2013

*“Sí de verdad deseas algo, sólo basta que lo desees
realmente, con el alma y corazón”*

Agradecimientos

Quiero agradecer primero que todo a mi familia (Papá, Mamá y hermana), por el amor y apoyo incondicional que me han dado. Todo lo que soy, se los debo a ustedes.

Maritza y Antonio, espero dios les dé tiempo aquí, y me permita poder retribuirles por su constante esfuerzo y entrega...quizás de este momento en adelante se vengan tiempos mejores....los amo inmensamente.

Agradecer a mi familia completa (tíos/as, primos/as, etc), por interés constante en este largo proceso, su apoyo y ayuda sin tener obligación alguna. Se les quiere de distintas formas y maneras, pero en sí, es un sólo querer.

A mi profesora guía Yerel por su ayuda y apoyo, para que las mil ideas y resultados, pudieran ser encausados en un sólo punto final, que es esta tesis.

A Mariela Vicencio, muchas gracias por la ayuda, la constante disposición y disculpa las molestias. Te deseo mucho éxito.

Agradecer a mis amigos, dígase: aquellos que me acompañan de hace ya casi 10 años, a mis amigos conseguidos en el proceso de universidad y aquellos que la vida puso en mi camino, se les agradece aquellos momentos de risas, carretes, etc!, eso ayuda, siempre es bueno despejarse o no?...jaja.!

Dar gracias simbólicamente a aquellos que ya no están (abuelita, tata, abuelita rene), quizás no puedan leer esto, sin embargo sé que de algún lado estarán contentos y celebrando...siempre estarán vivos en el corazón de quienes los conocimos y quisimos.

Finalmente y no menos importante, a Dios, por cruzarnos a todos en esta vida, permitirnos querernos y poder caminar juntos.....Infinitas Gracias!!!

Índice

Ítem	pág.
Glosario	7
Lista de abreviaturas o siglas.....	8
Lista de símbolos	10
Lista de Figuras	11
Lista de Tablas.....	16
Resumen de la Memoria.....	20
1. Introducción.....	22
2. Planteamiento del Problema	23
3. Objetivos.....	24
3.1.-Generales	24
3.2.-Específicos.....	24
4. Alcance de la Investigación.....	25
5. Marco Teórico	26
5.1.- Sedimentos.	26
5.2.- El proceso de erosión.....	27
5.2.1- Factores que controlan la erosión	28
5.2.2.- Clasificación del arrastre de sedimentos.....	29
5.3.- Sedimentos en suspensión y arrastre de fondo	30
5.4.- Medición del transporte de sedimentos	30
5.5.- Curvas de gasto sólido en suspensión diario	31
5.6.- Curva de duración de caudales	32
5.7.- Curvas de gasto sólido en suspensión medio anual.....	33
5.8.- Geomorfología de las cuencas.....	35
5.8.1.- Laderas.....	35
5.8.2.- Morfología fluvial.....	35
5.8.3.- Papel morfológico de la vegetación.....	37
6. Metodología.....	38
6.1.- Arrastre de sedimentos en suspensión	38
6.2.- Relación Pendiente - Gasto sólido en suspensión	41

7. Obtención de relaciones caudal sólido en suspensión v/s caudal líquido.....	42
7.1.- Análisis de estaciones.....	42
7.1.1. Estación Río Teno después junta con Río Claro.....	42
7.1.2 Estación Loncomilla en Las Brisas (*).	50
7.1.3 Estación Río Purapel en Sauzal.....	54
7.1.4 Estación Río Ñuble en San Fabián.....	58
7.1.5 Estación Río Chillan en camino a Confluencia.....	62
7.1.6 Estación Río Itata en Balsa Nueva Aldea. (*).....	66
7.1.7 Estación Río Diguillin en San Lorenzo (atacalco).....	70
7.1.8 Estación Río Itata en Cholguan.....	74
7.1.9 Estación Río Vergara en Tijeral.....	78
7.1.10 Estación Río Lumaco en Lumaco.....	82
7.1.11 Estación Río Cautín en Rari-ruca.....	86
7.1.12 Estación Río Cholchol en Cholchol.....	90
7.1.13 Estación Río Cautín en Cajón.....	94
7.1.14 Estación Río Quepe en Quepe.....	98
7.1.15 Estación Río Donguil en Gorbea.....	102
7.1.16 Estación Río Trancura antes de Río Llanfeco.....	106
7.1.17 Estación Río Cruces en Rucaco.....	110
7.1.18 Estación Río Rahue en Forrahue.....	114
7.1.19 Estación Río Palena bajo junta Rosselot.....	118
7.1.20 Estación Río Cisnes en Puerto Cisnes.....	122
7.1.21 Estación Río Aysén en Puerto Aysén.....	126
7.1.22 Estación Río Ibáñez en Desembocadura.....	130
7.1.23 Estación Río Murta en Desembocadura.....	134
7.1.24 Estación Río Penitente en Morro Chico.....	138
7.1.25 Estación Río Pérez en Desembocadura. (*).....	142
7.1.26 Estación Río Oro en Bahía San Felipe.....	146
7.1.27 Estación Río Tres Brazos antes de Bt. Sendos.....	150
7.1.28 Estación Río Grande en Tierra del Fuego.....	154
8. Análisis y comparación con expresiones empíricas	162

8.1.- Análisis y comparación del gasto sólido en suspensión medido con las curvas de Fleming.	163
8.2.- Análisis y comparación de gasto sólido en suspensión medido con método de Dendy y Bolton.....	167
9. Proposición de modelos.....	170
9.1.- Ajuste modelo tipo Fleming.	170
9.2.- Ajuste modelo tipo Dendy y Bolton.	173
9.4.- Análisis de las condiciones geomorfológicas presentes en las estaciones que presentan un alto nivel de gasto sólido en suspensión medio anual.	176
10. Análisis de la relación Pendiente – Gasto sólido en suspensión.	178
10.1.- Análisis dimensional.	181
10.1.1.- Aplicación del Teorema Vaschy-Buckingham.	181
10.2.- Validación del Modelo de Tres Variables	184
11. Conclusiones.....	186
Referencias bibliográficas	188

Glosario

DEM: Modelo de elevación digital. Estructura numérica que representa de forma cuantitativa y continua las características topográficas del terreno.

Escorrentía: Agua de lluvia que discurre por un terreno.

Fluviométrica: Medición de los niveles de agua, velocidades y caudales en los ríos.

Geomorfología: Estudio de las formas de la superficie terrestre.

Mapa Raster: Imagen formada por una gran cantidad de píxeles. Dentro de las características de estos mapas están que presentan gran nitidez al agrandar o disminuir la imagen y son detallados.

Mapa Vectorial: Es un mapa representado por vectores o expresiones gráficas de ecuaciones matemáticas, que se ven en pantalla en forma de figuras geométricas, tales como líneas, puntos, círculos, polígonos, etc. Combinando estas figuras geométricas se obtiene la imagen final.

Morfología Fluvial: Estudio de la forma que presentan los ríos.

Sedimentométrica: Medición de concentración de sedimentos en suspensión.

Lista de abreviaturas o siglas

D.G.A: Dirección General de Aguas.

M.O.P: Ministerio de Obras Públicas.

DEM: Modelo de elevación digital.

GrassGis: Sistema de información geográfica.

G_{sd} : Gasto sólido en suspensión medio diario (Ton/día).

Q_d : Caudal medio diario (m^3/s).

G_{sma} : Gasto sólido en suspensión medio anual (Ton/año).

g_{sma} : Gasto sólido en suspensión específico medio anual (Ton/ km^2 /año).

Q_{ma} : Caudal medio anual (m^3/s).

C_i : Concentración muestreo integrado (mg/l).

C_r : Concentración muestreo rutinario (mg/l).

S_R : Gasto sólido en suspensión medio anual referencial de 635 (Ton/ km^2 /año).

Q_R : Escorrentía media anual referencial de 50,8 (mm/año).

A_R : Área de drenaje de cuenca referencial de 2,59 (km^2).

A: Área de drenaje de una cuenca en (km^2).

T: Segundos en un día.

Log-log: Logaritmo-logaritmo.

mm: Milímetros.

km^2 : Kilómetros cuadrados.

Ton: Toneladas.

m^3/s : Metros cúbicos por segundo.

mg/l: Miligramos por litro.

Ton/día: Toneladas por día.

Ton/año: Toneladas por año.

mm/año: Milímetros por año.

Prob: Probabilidad.

Ln. Logaritmo Natural.

Pág.: Página

Prom: Promedio

Acum: Acumulación

Lista de símbolos



: Ubicación de la estación.

%

: Porcentaje.



: Ubicación de ciudades.

Δ

: Diferencia entre Magnitudes.



: Orientación del Norte en la Superficie Terrestre.



: Leyenda de las variaciones de altura en la cuenca.

Lista de Figuras

Figura 5.1 - Proceso de sedimentación y los cambios morfológicos asociados a una cuenca [3].	26
Figura 5.2- Transporte colina debajo de las partículas de suelo por impacto de la lluvia [2]...27	27
Figura 5.3 - Perfil típico de una Cárcava [1].	28
Figura 5.4 - Erosión de superficie como resultado del impacto de las gotas de lluvia [7].....	29
Figura 5.5 - Esquema representativo del origen y modo de transporte de los sedimentos [11].	29
Figura 5.6 - Muestreador integrador de profundidad [6].....	31
Figura 5.7 - Curva de gasto sólido en suspensión para el río Maipo en San Alfonso, Santiago, Chile.	32
Figura 5.8 - Curva de duración de caudales.	32
Figura 5.9 - Tipos de morfología fluvial.	36
Figura 7.1 - Ubicación estación Río Teno después de junta Río Claro.....	42
Antecedentes Básicos	43
Figura 7.2 - Relación entre las concentraciones existentes de muestreos rutinarios e integrados en la estación Río Teno después de junta Río Claro.	44
Figura 7.3 - Relación entre el caudal y gasto sólido en suspensión en la estación Río Teno después de junta Río Claro.	45
Figura 7.4 - Curva de duración de caudales de la estación Río Teno después de junta Río Claro.	46
Figura 7.5 - Cuenca aportante de la estación Río Teno después junta con Río Claro.....	49
Figura 7.6 - Ubicación estación Río Loncomilla en las Brisas.	50
Figura 7.7 - Relación entre el caudal y gasto sólido en suspensión en la estación Río Loncomilla en las Brisas.	52
Figura 7.8 - Cuenca aportante de la estación Río Loncomilla en las Brisas.	53
Figura 7.9 - Ubicación estación Río Purapel en Sauzal.	54
Figura 7.10 - Relación entre el caudal y gasto sólido en suspensión en la estación Río Purapel en Sauzal.....	56
Figura 7.11 - Cuenca aportante de la estación Río Purapel en Sauzal.	57
Figura 7.12 - Ubicación estación Río Ñuble en San Fabián.....	58
Figura 7.13 - Relación entre el caudal y gasto sólido en suspensión en la estación Río Ñuble en San Fabián.	60
Figura 7.14 - Cuenca aportante de la estación Río Ñuble en San Fabián.....	61

Figura 7.15 - Ubicación estación Río Chillan en camino a Confluencia.	62
Figura 7.16 - Relación entre el caudal y gasto sólido en suspensión en la estación Río Chillan en camino a Confluencia.	64
Figura 7.17 - Cuenca aportante de la estación Río Chillán en camino a Confluencia.	65
Figura 7.18 - Ubicación estación Río Itata en Balsa Nueva Aldea.	66
Figura 7.19 - Relación entre el caudal y gasto sólido en suspensión en la estación Río Itata en Balsa Nueva Aldea.	68
Figura 7.20 - Cuenca aportante de la estación Río Itata en Balsa Nueva Aldea.	69
Figura 7.21 - Ubicación estación Río Diguillin en San Lorenzo (atacalco).	70
Figura 7.22 - Relación entre el caudal y gasto sólido en suspensión en la estación Río Diguillin en San Lorenzo (atacalco).	72
Figura 7.23 - Cuenca aportante de la estación Río Diguillin en San Lorenzo (atacalco).	73
Figura 7.24 - Ubicación estación Río Itata en Cholguan.	74
Figura 7.25 - Relación entre el caudal y gasto sólido en suspensión en la estación Río Itata en Cholguan.	76
Figura 7.26 - Cuenca aportante de la estación Río Itata en Cholguan.	77
Figura 7.27 - Ubicación estación Río Vergara en Tijeral.	78
Figura 7.28 - Relación entre el caudal y gasto sólido en suspensión en la estación Río Vergara en Tijeral.	80
Figura 7.29 - Cuenca aportante de la estación Río Vergara en Tijeral.	81
Figura 7.30 - Ubicación estación Río Lumaco en Lumaco.	82
Figura 7.31 - Relación entre el caudal y gasto sólido en suspensión en la estación Río Lumaco en Lumaco.	84
Figura 7.32 - Cuenca aportante de la estación Río Lumaco en Lumaco.	85
Figura 7.33 - Ubicación estación Río Cautín en Rari-ruca.	86
Figura 7.34 - Relación entre el caudal y gasto sólido en suspensión en la estación Río Cautín en Rari-ruca.	88
Figura 7.35 - Cuenca aportante de la estación Río Cautín en Rari-ruca.	89
Figura 7.36 - Ubicación estación Río Cholchol en Cholchol.	90
Figura 7.37 - Relación entre el caudal y gasto sólido en suspensión en la estación Río Cholchol en Cholchol.	92
Figura 7.38 - Cuenca aportante de la estación Río Cholchol en Cholchol.	93
Figura 7.39 - Ubicación estación Río Cautín en Cajón.	94
Figura 7.40 - Relación entre el caudal y gasto sólido en suspensión en la estación Río Cautín en Cajón.	96

Figura 7.41 - Cuenca aportante de la estación Río Cautín en Cajón.	97
Figura 7.42 - Ubicación estación Río Quepe en Quepe.	98
Figura 7.43 - Relación entre el caudal y gasto sólido en suspensión en la estación Río Quepe en Quepe.	100
Figura 7.44 - Cuenca aportante de la estación Río Quepe en Quepe.	101
Figura 7.45 - Ubicación estación Río Donguil en Gorbea.	102
Figura 7.46 - Relación entre el caudal y gasto sólido en suspensión en la estación Río Donguil en Gorbea.	104
Figura 7.47 - Cuenca aportante de la estación Río Donguil en Gorbea.	105
Figura 7.48 - Ubicación estación Río Trancura antes de Río Llanfeco.	106
Figura 7.49 - Relación entre el caudal y gasto sólido en suspensión en la estación Río Trancura antes de Río Llanfeco.	108
Figura 7.50 - Cuenca aportante de la estación Río Trancura antes de Llanfeco.	109
Figura 7.51 - Ubicación estación Río Cruces en Rucaco.	110
Figura 7.52 - Relación entre el caudal y gasto sólido en suspensión en la estación Río Cruces en Rucaco.	112
Figura 7.53 - Cuenca aportante de la estación Río Cruces en Rucaco.	113
Figura 7.54 - Ubicación estación Río Rahue en Forrahue.	114
Figura 7.55 - Relación entre el caudal y gasto sólido en suspensión en la estación Río Rahue en Forrahue.	116
Figura 7.56 - Cuenca aportante de la estación Río Rahue en Forrahue.	117
Figura 7.57 - Ubicación estación Río Palena bajo junta Rosselot.	118
Figura 7.58 - Relación entre el caudal y gasto sólido en suspensión en la estación Río Palena bajo junta Rosselot.	120
Figura 7.59 - Cuenca aportante de la estación Río Palena bajo junta Rosselot.	121
Figura 7.60 - Ubicación estación Río Cisnes en Puerto Cisnes.	122
Figura 7.61 - Relación entre el caudal y gasto sólido en suspensión en la estación Río Cisnes en Puerto Cisnes.	124
Figura 7.62 - Cuenca aportante de la estación Río Cisnes en Puerto Cisnes.	125
Figura 7.63 - Ubicación estación Río Aysén en Puerto Aysén.	126
Figura 7.64 - Relación entre el caudal y gasto sólido en suspensión en la estación Río Aysén en Puerto Aysén.	128
Figura 7.65 - Cuenca aportante de la estación Río Aysén en Puerto Aysén.	129
Figura 7.66 - Ubicación estación Río Ibáñez en Desembocadura.	130

Figura 7.67 - Relación entre el caudal y gasto sólido en suspensión en la estación Río Ibáñez en Desembocadura.....	132
Figura 7.68 - Cuenca aportante de la estación Río Ibáñez en Desembocadura.....	133
Figura 7.69 - Ubicación estación Río Murta en Desembocadura.....	134
Figura 7.70 - Relación entre el caudal y gasto sólido en suspensión en la estación Río Murta en Desembocadura.	136
Figura 7.71 - Cuenca aportante de la estación Río Murta en Desembocadura.....	137
Figura 7.72 - Ubicación estación Río Penitente en Morro Chico.....	138
Figura 7.73 - Relación entre el caudal y gasto sólido en suspensión en la estación Río Penitente en Morro Chico.....	140
Figura 7.74 - Cuenca aportante de la estación Río Penitente en Morro Chico.....	141
Figura 7.75 - Ubicación estación Río Pérez en Desembocadura.....	142
Figura 7.76 - Relación entre el caudal y gasto sólido en suspensión en la estación Río Pérez en Desembocadura.	144
Figura 7.77 - Cuenca aportante de la estación Río Pérez en Desembocadura.....	145
Figura 7.78 - Ubicación estación Río oro en Bahía San Felipe.....	146
Figura 7.79 - Relación entre el caudal y gasto sólido en suspensión en la estación Río Oro en Bahía San Felipe.	148
Figura 7.80 - Cuenca aportante de la estación Río Oro en Bahía San Felipe.....	149
Figura 7.81 - Ubicación estación Río Tres Brazos antes de Bt. Sendos.....	150
Figura 7.82 - Relación entre el caudal y gasto sólido en suspensión en la estación Río Tres Brazos antes de Bt. Sendos.....	152
Figura 7.83 - Cuenca aportante de la estación Río Tres Brazos antes de Bt. Sendos.	153
Figura 7.84 - Ubicación estación Río Grande en Tierra del Fuego.....	154
Figura 7.85 - Relación entre el caudal y gasto sólido en suspensión en la estación Río Grande en Tierra del Fuego.....	156
Figura 7.86 - Cuenca aportante de la estación Río Grande en Tierra del Fuego.....	157
Figura 8.1 - Relación caudal medio anual y gasto sólido en suspensión medio anual medido.	163
Figura 8.2 - Comparación entre el gasto sólido en suspensión medido y el gasto sólido en suspensión obtenido mediante las expresiones empíricas de Fleming.	164
Figura 8.3 - Gasto sólido en suspensión empírico versus gasto sólido en suspensión empírico Fleming tres.....	165
Figura 8.4 - Gasto sólido en suspensión empírico versus gasto sólido en suspensión empírico Fleming cuatro.....	166

Figura 8.5 - Curvas de gasto sólido en suspensión específico medido y de Dendy y Bolton.	168
Figura 9.1 - Grafico en escala logarítmica, de la relación caudal medio anual versus gasto sólido en suspensión medio anual.	170
Figura 9.2 - Grafico en ejes normales, relación caudal medio anual versus gasto sólido en suspensión medio anual.	171
Figura 9.3 - Relación gasto sólido en suspensión medido versus gasto sólido en suspensión utilizando modelo ajustado tipo Fleming.	173
Figura 9.4 - Comparación gasto sólido medio anual medido versus gasto sólido obtenido utilizando modelo ajustado tipo Dendy y Bolton.	174
Figura 10.1 - Relación pendiente media y gasto sólido en suspensión medio anual.....	180
Figura 10.2 - Modelo tres variables generado con las estaciones en estudio.	183
Figura 10.3 - Relación gasto sólido en suspensión medido versus gasto sólido en suspensión modelado.	185

Lista de Tablas

Tabla 5.1 – Valores “a y n” para la Ecuación 5.1, para varios tipo de cobertura vegetal (unidades compatibilizadas).	34
Tabla 7.1 – Registros fluviométricos Río Teno después junta Río Claro.	43
Tabla 7.2 – Registros sedimentométricos Río Teno después junta Río Claro.	43
Tabla 7.3 – Curva de duración de Caudales de la estación Río Teno después junta Río Claro. Cálculo del promedio Anual de Gasto Sólido en Suspensión.	47
Tabla 7.4 – Curva de duración de Caudales de la estación Río Teno después junta Río Claro. Cálculo Caudal Medio Anual.	48
Tabla 7.5 – Resultados entregados por GrassGis para la estación Río Teno después junta con Río Claro.	49
Tabla 7.6 – Registros fluviométricos Río Loncomilla en las Brisas.	51
Tabla 7.7 – Registros sedimentométricos Río Loncomilla en las Brisas.	51
Tabla 7.8 – Resultados entregados por GrassGis para la estación Río Loncomilla en las Brisas.	53
Tabla 7.9 – Registros fluviométricos Río Purapel en Sauzal.	55
Tabla 7.10 – Registros sedimentométricos Río Purapel en Sauzal.	55
Tabla 7.11 – Resultados entregados por GrassGis para la estación Río Purapel en Sauzal.	57
Tabla 7.12 – Registros fluviométricos Río Ñuble en San Fabián.	59
Tabla 7.13 – Registros sedimentométricos Río Ñuble en San Fabián.	59
Tabla 7.14 – Resultados entregados por GrassGis para la estación Río Ñuble en San Fabián.	61
Tabla 7.15 – Registros fluviométricos Río Chillan en camino a Confluencia.	63
Tabla 7.16 – Registros sedimentométricos Río Chillan en camino a Confluencia.	63
Tabla 7.17 – Resultados entregados por GrassGis para la estación Río Chillan en camino a Confluencia.....	65
Tabla 7.18 – Registros fluviométricos Río Itata en Balsa Nueva Aldea.	67
Tabla 7.19 – Registros sedimentométricos Río Itata en Balsa Nueva Aldea.	67
Tabla 7.20 – Resultados entregados por GrassGis para la estación Río Itata en Balsa Nueva Aldea.....	69
Tabla 7.21 – Registros fluviométricos Río Diguillin en San Lorenzo (atacalco).	71
Tabla 7.22 – Registros sedimentométricos Río Diguillin en San Lorenzo (atacalco).....	71
Tabla 7.23 – Resultados entregados por GrassGis para la estación Río Diguillin en San Lorenzo (atacalco).	73
Tabla 7.24 – Registros fluviométricos Río Itata en Cholguan.	75

Tabla 7.25 – Registros sedimentométricos Río Itata en Cholguan.	75
Tabla 7.26 – Resultados entregados por GrassGis para la estación Río Itata en Cholguan.	77
Tabla 7.27 – Registros fluviométricos Río Vergara en Tijeral.....	79
Tabla 7.28 – Registros sedimentométricos Río Vergara en Tijeral.....	79
Tabla 7.29 – Resultados entregados por GrassGis para la estación Río Vergara en Tijeral.	81
Tabla 7.30 – Registros fluviométricos Río Lumaco en Lumaco.	83
Tabla 7.31 – Registros sedimentométricos Río Lumaco en Lumaco.	83
Tabla 7.32 – Resultados entregados por GrassGis para la estación Río Lumaco en Lumaco...	85
Tabla 7.33 – Registros fluviométricos Río Cautín en Rari-ruca.	87
Tabla 7.34 – Registros sedimentométricos Río Cautín en Rari-ruca.	87
Tabla 7.35 – Resultados entregados por GrassGis para la estación Río Cautín en Rari-ruca. ..	89
Tabla 7.36 – Registros fluviométricos Río Cholchol en Cholchol.....	91
Tabla 7.37 – Registros sedimentométricos Río Cholchol en Cholchol.....	91
Tabla 7.38 – Resultados entregados por GrassGis para la estación Río Cholchol en Cholchol.	93
Tabla 7.39 – Registros fluviométricos Río Cautín en Cajón.....	95
Tabla 7.40 – Registros sedimentométricos Río Cautín en Cajón.	95
Tabla 7.41 – Resultados entregados por GrassGis para la estación Río Cautín en Cajón.....	97
Tabla 7.42 – Registros fluviométricos Río Quepe en Quepe.	99
Tabla 7.43 – Registros sedimentométricos Río Quepe en Quepe.	99
Tabla 7.44 – Resultados entregados por GrassGis para la estación Río Quepe en Quepe.	101
Tabla 7.45 – Registros fluviométricos Río Donguil en Gorbea.	103
Tabla 7.46 – Registros sedimentométricos Río Donguil en Gorbea.	103
Tabla 7.47 – Resultados entregados por GrassGis para la estación Río Donguil en Gorbea. .	105
Tabla 7.48 – Registros fluviométricos Río Trancura antes de Río Llanfeco.	107
Tabla 7.49 – Registros sedimentométricos Río Trancura antes de Río Llanfeco.....	107
Tabla 7.50 – Resultados entregados por GrassGis para la estación Río Trancura antes de Llanfeco.	109
Tabla 7.51 – Registros fluviométricos Río Cruces en Rucaco.	111
Tabla 7.52 – Registros sedimentométricos Río Cruces en Rucaco.	111
Tabla 7.53 – Resultados entregados por GrassGis para la estación Río Cruces en Rucaco....	113
Tabla 7.54 – Registros fluviométricos Río Rahue en Forrahue.	115
Tabla 7.55 – Registros sedimentométricos Río Rahue en Forrahue.	115

Tabla 7.56 – Resultados entregados por GrassGis para la estación Río Rahue en Forrahue. .	117
Tabla 7.57 – Registros fluviométricos Río Palena bajo junta Rosselot.	119
Tabla 7.58 – Registros sedimentométricos Río Palena bajo junta Rosselot.....	119
Tabla 7.59 – Resultados entregados por GrassGis para la estación Río Palena bajo junta Rosselot.	121
Tabla 7.60 – Registros fluviométricos Río Cisnes en Puerto Cisnes.	123
Tabla 7.61 – Registros sedimentométricos Río Cisnes en puerto Cisnes.....	123
Tabla 7.62 – Resultados entregados por GrassGis para la estación Río Cisnes en Puerto Cisnes.	125
Tabla 7.63 – Registros fluviométricos Río Aysén en Puerto Aysén.	127
Tabla 7.64 – Registros sedimentométricos Río Aysén en Puerto Aysén.	127
Tabla 7.65 – Resultados entregados por GrassGis para la estación Río Aysén en Puerto Aysén.....	129
Tabla 7.66 – Registros fluviométricos Río Ibáñez en Desembocadura.....	131
Tabla 7.67 – Registros sedimentométricos Río Ibáñez en Desembocadura.....	131
Tabla 7.68 – Resultados entregados por GrassGis para la estación Río Ibáñez en Desembocadura.	133
Tabla 7.69 – Registros fluviométricos Río Murta en Desembocadura.	135
Tabla 7.70 – Registros sedimentométricos Río Murta en Desembocadura.....	135
Tabla 7.71 – Resultados entregados por GrassGis para la estación Río Murta en Desembocadura.	137
Tabla 7.72 – Registros fluviométricos Río Penitente en Morro Chico.	139
Tabla 7.73 – Registros sedimentométricos Río Penitente en Morro Chico.	139
Tabla 7.74 – Resultados entregados por GrassGis para la estación Río Penitente en Morro Chico.....	141
Tabla 7.75 – Registros fluviométricos Río Pérez en Desembocadura.	143
Tabla 7.76 – Registros sedimentométricos Río Pérez en Desembocadura.....	143
Tabla 7.77 – Resultados entregados por GrassGis para la estación Río Pérez en Desembocadura.	145
Tabla 7.78 – Registros fluviométricos Río Oro en Bahía San Felipe.	147
Tabla 7.79 – Registros sedimentométricos Río Oro en Bahía San Felipe.....	147
Tabla 7.80 – Resultados entregados por GrassGis para la estación Río Oro en Bahía San Felipe.	149
Tabla 7.81 – Registros fluviométricos Río Tres Brazos antes de BT Sendos.....	151

Tabla 7.82 – Registros sedimentométricos Río Tres Brazos antes de BT Sendos.	151
Tabla 7.83 – Resultados entregados por GrassGis para la estación Río Tres Brazos antes de Bt. Sendos.....	153
Tabla 7.84 – Registros fluviométricos Río Grande en Tierra del Fuego.....	155
Tabla 7.85 – Registros sedimentométricos Río Grande en Tierra del Fuego.....	155
Tabla 7.86 – Resultados entregados por GrassGis para la estación Río Grande en Tierra del Fuego.	157
Tabla 7.87 – Resumen de resultados hidrológicos en cada estación.	158
Tabla 7.88 – Resumen de resultados hidrológicos en cada estación. Continuación.	159
Tabla 7.89 – Resumen de resultados hidrológicos en cada estación. Continuación	160
Tabla 7.90 – Resumen resultados estudio geomorfológico de cada estación.....	161
Tabla 8.1 – Estaciones enumeradas.....	162
Tabla 8.2 – Parámetros en base a la cobertura vegetal.....	163
Tabla 8.3 – Resultados errores cuadráticos de Fleming 3 y 4.	166
Tabla 8.4 – Resultados errores relativos de Fleming 3 y 4.....	167
Tabla 8.5 – Resultado error cuadrático método Dendy y Bolton.	168
Tabla 8.6 – Resultados error relativo método Dendy y Bolton.	169
Tabla 9.1 – Resultados errores cuadráticos modelo ajustado tipo Fleming.	172
Tabla 9.2 – Resultados errores relativos modelo ajustado tipo Fleming.....	172
Tabla 9.3 – Resultado error cuadrático método ajustado tipo Dendy y Bolton.	175
Tabla 9.4 – Resultados errores relativo método ajustado tipo Dendy y Bolton.	175
Tabla 10.1 – Resumen gasto sólido en suspensión medido y pendiente media de la cuenca.	179
Tabla 10.2 – Resultado error cuadrático modelo tres variables.	184
Tabla 10.3 – Resultado error relativo modelo tres variables.....	184

Resumen de la Memoria

El estudio del arrastre y/o transporte de sedimentos en los ríos y cauces ha sido tema de investigación en la hidrología, debido a que estos sedimentos pueden ser un factor negativo e intervenir en las obras proyectadas por los ingenieros, tanto a corto como largo plazo. Dentro de las obras que pueden verse afectadas por la acumulación o el simple flujo masivo de estos sólidos se encuentran los canales, bocatomas y principalmente los embalses.

La zona centro-sur y sur del país presentan los mayores niveles de precipitaciones, por lo cual es fundamental conocer la realidad del arrastre de sólidos en suspensión que en estas zonas ocurre. Debido a lo anterior es que se busca conocer si los métodos empíricos ya creados son realmente aplicables en estas zonas del país, junto a esto también se crea un modelo en el cual la pendiente media de la cuenca es involucrada como un factor primordial.

El presente trabajo de título se basa en la recopilación de los datos de sedimentos y caudal de distintas estaciones seleccionadas desde de Séptima región del Maule hasta la Decimosegunda región de Magallanes, determinando las curvas de gasto sólido en suspensión medio diario de cada una de ellas, e integrando posteriormente la curva de duración de caudales, dando como resultado el gasto sólido en suspensión medio anual y el caudal medio anual de cada estación. Se utiliza el software GrassGis el cual utiliza imágenes satelitales y que permite determinar el área de la cuenca aportante, la pendiente media de la cuenca y el largo del cauce principal. Con esta información se genera un modelo que permite analizar las variables de caudal medio anual, pendiente media de la cuenca y peso específico estimado del sólido en suspensión, mediante una función de gasto sólido en suspensión medio anual.

Los modelos empíricos utilizados para comparar el gasto sólido en suspensión anual medido son: (1) las curvas de Fleming, las cuales están basadas en el estudio de 250 cuencas distribuidas en el mundo, y que señala la existencia de cuatro curvas que dependen del caudal medio de la cuenca y se diferencian por el tipo de cobertura vegetal existente. (2) El segundo modelo empírico utilizado es el creado por Dendy y Bolton, el cual se basa en un estudio realizado a 800 cuencas ubicadas en Estados Unidos de América. Este modelo relaciona el gasto sólido en suspensión medio anual por área con el área de drenaje de la cuenca y la escorrentía media anual.

En función de los resultados obtenidos, la aplicación de los métodos empíricos de Fleming y Dendy y Bolton, no se asimilan a la realidad de las zonas del país en estudio, es por esto que se ajustaron dos modelos, uno tipo Fleming y otro tipo Dendy y Bolton, además se determinó un nuevo modelo de tres variables. Estos modelos permiten obtener el gasto sólido en suspensión medio anual en cuencas donde no existe información sedimentométrica.

Expresiones de modelos ajustados

Modelo ajustado tipo Fleming

$$G_{sma} = 370,8 Q_{ma}^{1,1552} \quad (\text{Ton/año})$$

Con un error cuadrático de 49.820 (Ton/año) y un error relativo de 29,45 (%).

Modelo ajustado tipo Dendy y Bolton

$$\frac{S}{S_R} = 0,38e^{\left(\frac{0,014xQ}{Q_R}\right)} \left(0,081 + 0,02 \log\left(\frac{A}{A_R}\right)\right) \quad (\text{Ton/km}^2/\text{año}), \text{ para escorrentías iguales o mayores a } 50,8 \text{ (mm)}.$$

Con un error cuadrático de 49.404 (Ton/año) y un error relativo de 29,21 (%).

Modelo de tres Variables

$$G_{sma} = (0,0013 P^2 - 0,0004 P + 4E-05) Q_{ma} \gamma_{esp} T \quad (\text{Ton/año})$$

Con un error cuadrático de 9.348 (Ton/año) y un error relativo de 26,33 (%).

1. Introducción

La estimación de las curvas de gasto sólido en suspensión en cuencas ubicadas en el centro-sur y sur de Chile se basan en los resultados del análisis y serán comparados con modelos empíricos (curvas de Fleming y método de Dendy y Bolton) utilizados para la determinación del volumen muerto en suspensión que llega especialmente a los embalses. Las curvas de Fleming relacionan el caudal líquido y el gasto sólido en suspensión mediante constantes que varían en función del tipo de cobertura vegetal existente, mientras que el método de Dendy y Bolton relaciona escorrentía, área de drenaje de la cuenca y volumen de sedimento depositado.

Utilizando el programa GrassGis, se obtienen parámetros geomorfológicos de las cuencas (pendiente, área y largo del cauce principal), y determinar si existe una correlación entre la pendiente media de la cuenca y el gasto sólido en suspensión.

El estudio se realiza en base a antecedentes proporcionados por la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas, dichos antecedentes provienen de estaciones sedimentométricas y fluviométricas controladas por dicho organismo, junto con DEMs entregados por Aster, y utilizados en el programa GrassGis.

2. Planteamiento del Problema

El interés principal en hidrología son las tasas de transporte y las tasas de deposición en embalses, puertos y estuarios, así como los medios para controlar la erosión en los sitios donde se produce, tanto para conservar el suelo en su sitio, como para minimizar la acumulación en embalses y puertos [1].

Su acumulación puede llegar a generar volúmenes muertos considerables y en algunos casos colapsos parciales o totales en el normal funcionamiento de estas obras. Dichos volúmenes muertos pueden afectar obras que cumplen una variada gama de utilidades para el país, tales como riego y producción de electricidad.

El resultado final del presente trabajo es generar modelos que permitan tomar decisiones estratégicas, ya sea en base a los dos tipos de modelos empíricos ya señalados o utilizando la relación existente entre la pendiente y el gasto sólido en suspensión.

3. Objetivos

3.1.-Generales

- i) Obtener el caudal líquido medio anual y el gasto sólido en suspensión medio anual en diferentes cuencas ubicadas desde la VII a la XII región y comparar dichos resultados con los con modelos empíricos de Fleming y Dendy y Bolton.
- ii) Analizar la geomorfología de las cuencas en estudio, y determinar si existe relación entre la pendiente de la cuenca y el arrastre de sólidos en suspensión.
- iii) Proponer modelos empíricos para las cuencas chilenas de la zona centro-sur y sur de Chile, que permitan determinar el gasto sólido en suspensión.

3.2.-Específicos

- a) Buscar estadística de caudal y gasto sólido en suspensión en estaciones sedimentométricas.
- b) Obtener curva de gasto sólido en suspensión diario, de la estadística encontrada.
- c) Obtener curva de gasto sólido en suspensión media anual.
- d) Comparar las curvas obtenidas con las curvas empíricas de Fleming.
- e) Comparar el gasto sólido en suspensión medio anual con el método de Dendy y Bolton.
- f) Ajustar modelos empíricos existentes a las cuencas chilenas.
- g) Obtener parámetros geomorfológicos de las cuencas, tales como área, pendiente y largo del cauce principal.
- h) Determinar si existe una relación entre la pendiente de la cuenca y el arrastre de sólidos en suspensión.
- i) Determinar el efecto de la cobertura vegetal en el arrastre de sólidos en suspensión.

4. Alcance de la Investigación

El estudio a realizar abarca estaciones ubicadas desde la Séptima región del Maule hasta las Decimosegunda región de Magallanes, es por esto que en primer lugar se debe buscar y encontrar la estadística de caudal y gasto sólido en las cuencas de Chile [4].

Se recopilan datos estadísticos, provenientes de las estaciones controladas por la D.G.A, perteneciente al M.O.P, que permiten determinar el caudal líquido medio anual y el gasto sólido en suspensión medio anual en cuencas de Chile.

Para los parámetros geomorfológicos, se utiliza el programa GrassGis, que permite obtener las cuencas asociadas a las estaciones utilizadas, esto se logra en base a imágenes satelitales.

5. Marco Teórico

5.1.- Sedimentos.

El régimen de crecidas de un río implica el tránsito de agua, junto con sedimentos, nutrientes y otros arrastres [2]. El desprendimiento de las partículas se debe a variados fenómenos, los cuáles pueden ser de tipo natural como por acción del ser humano. Ejemplos de ellos son:

- i) Morfología
- ii) Uso de la Tierra
- iii) Actividad Sismotectónica
- iv) Viento (Erosión Eólica)
- v) Régimen de Precipitaciones (Erosión Hídrica).

Según J.M.Ramirez [5], la erosión hídrica es el principal agente encargado del desprendimiento de sedimentos.

Debido al tránsito del agua y el arrastre de sedimentos se producen cambios en el relieve existente, es por esto que desde su origen todas las lagunas y lagos están condenados a desaparecer en el tiempo, al ser llenados por los sedimentos transportados por los ríos que desembocan en ellos, siendo esto un proceso naturalmente irreversible [9]. En condiciones naturales, sin intervención del ser humano (mediante las diferentes obras hidráulicas), la deposición de sedimentos a lo largo de una cuenca, sería el señalado por la Figura 5.1:

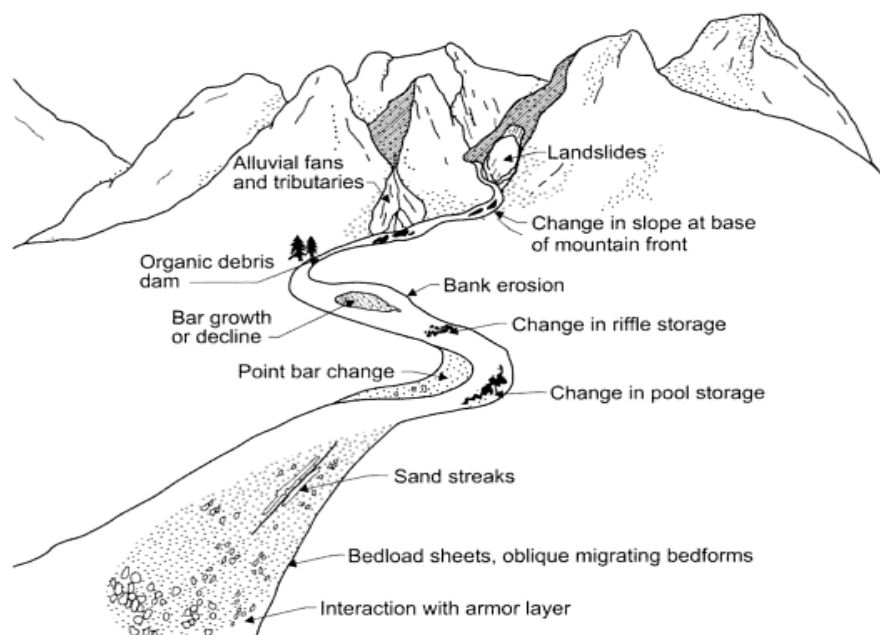


Figura 5.1 - Proceso de sedimentación y los cambios morfológicos asociados a una cuenca [3].

La erosión hídrica puede ser superficial o por movimientos de masa. Cuando se lleva a cabo en la superficie, se divide en laminar, riachuelo, cauces y barrancos [8]. Los movimientos en masa se dividen en lentos, rápidos y deslizamientos [10].

Por otra parte la actividad sismotectónica es también un factor a considerar, pues en los Himalaya, así como en los Andes se ha podido establecer que en las zonas de mayor actividad sismotectónica, también se observan los mayores aportes de sedimentos fluviales [2].

Aquellas zonas que están cubiertas por glaciares, aportan sedimentos en suspensión debido al aumento de la temperatura. Las partículas de diámetros cercanos o bajos a 0,2 (mm), son transportadas en suspensión a lo largo del cauce del río [9].

5.2.- El proceso de erosión

Una vez que comienza el proceso de erosión, la partícula culmina su viaje en distintas zonas, tales como lagos, embalses o en la desembocadura del río en el mar. Por esto hay que tener presente, cuál es su tasa de acumulación y como esto podría afectar a proyectos hidráulicos.

El efecto de la lluvia actúa de manera directa e indirecta sobre la erosión del suelo. La acción directa hace relación al impacto de las gotas de la lluvia en la superficie del suelo, mientras que de manera indirecta, el suelo se mezcla con el agua y se produce un movimiento lateral de las partículas a otros puntos de la ladera [5].

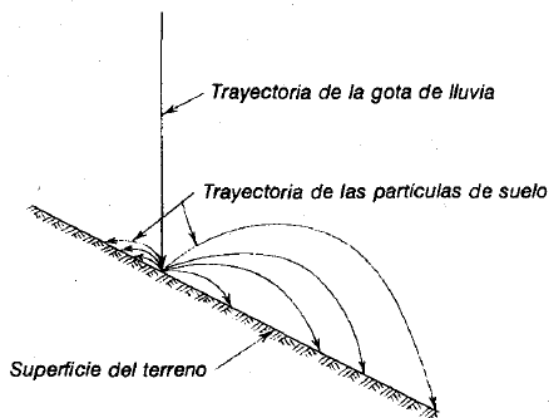


Figura 5.2- Transporte colina debajo de las partículas de suelo por impacto de la lluvia [2].

El escurrimiento ocurre cuando la intensidad de la lluvia es mayor que la velocidad de infiltración, es por esto que pequeñas cantidades de tormentas de gran intensidad son las causantes generalmente de gran parte de la erosión de una cuenca, esto se ve en que el mayor flujo superficial ocurre en general cuando están presentes dichas tormentas.

Otro suceso que puede existir en el fondo del cauce, es que se produzca un fondo de Cárcava, que se origina cuando en algún sitio de la pendiente existe suficiente acumulación de flujo superficial para causar una pequeña socavación, esto ocurre sólo si la turbulencia del flujo en las vecindades de esta perturbación es suficiente para sacar partículas del fondo y las bancas del pequeño canal formado.

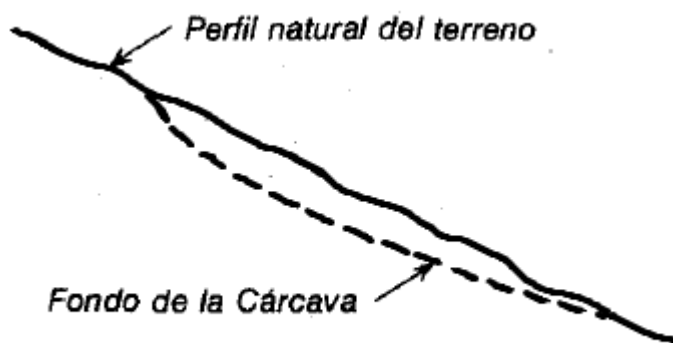


Figura 5.3 - Perfil típico de una Cárcava [1].

El tercer suceso erosivo que puede existir es el deslizamiento, aunque es menos frecuente genera un aumento considerable en el arrastre de sólidos “normal” dentro de un cauce.

5.2.1- Factores que controlan la erosión

La erosión es un proceso que depende principalmente de cuatro factores en conjunto:

- i) Pendiente del Terreno
- ii) Régimen de lluvias
- iii) Tipo de suelo
- iv) Cobertura vegetal

En general se señala que en aquellos terrenos de mayor pendiente existe una mayor. La longitud de la pendiente también es un factor considerable, pues en una longitud pequeña, los sedimentos llegan de manera mucho más rápida al cauce natural.

Un suelo suelto genera una mayor cantidad de sedimentos que aquel suelo que es más compacto. Si se suman los efectos de tener un suelo suelto con el efecto que tienen las gotas de lluvia al caer debido a las precipitaciones y un terreno en pendiente, ocurre lo señalado en la Figura 5.4.

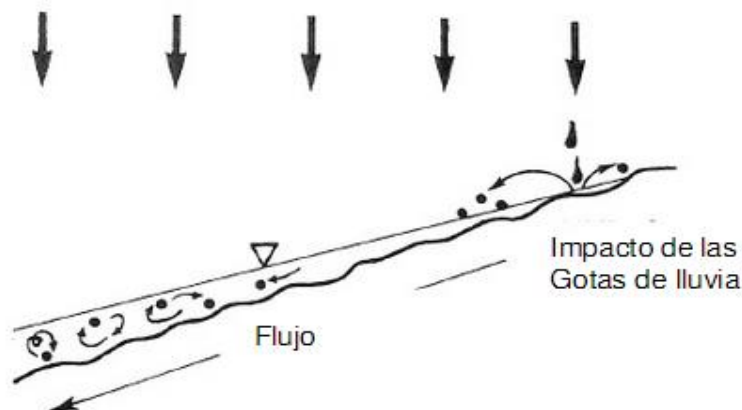


Figura 5.4 - Erosión de superficie como resultado del impacto de las gotas de lluvia [7].

La cobertura vegetal da una protección significativa, pues absorbe la energía de las gotas que caen, y reduce el tamaño de la gota que alcanza el suelo.

5.2.2.- Clasificación del arrastre de sedimentos

Existen dos criterios de clasificación para un río: según el modo de transporte y según el origen del material. Según el método de transporte, el sedimento puede ser transportado en suspensión, sostenido por la turbulencia del flujo, o bien por el fondo rodando, deslizando o saltando [11]. Una partícula inicialmente en reposo puede ser transportada a saltos por el fondo cuando se supera el umbral del movimiento, pero sí el río sigue creciendo puede ser luego transportada en suspensión. Cuanto más grande es la fuerza de la corriente, mayor puede ser el tamaño del material de fondo que puede ser puesto en suspensión. Según el origen del material, este puede provenir del cauce y de la cuenca. Hay que aclarar que esta clasificación se refiere a un evento de lluvias y crecida fluvial, ya que, como es lógico a largo plazo todo el material es proveniente de la cuenca. En la Figura 5.5 se puede ver un esquema representativo.

MODO DE TRANSPORTE	ORIGEN DEL MATERIAL
EN SUSPENSIÓN	CUENCA
DE FONDO	LECHO

Figura 5.5 - Esquema representativo del origen y modo de transporte de los sedimentos [11].

5.3.- Sedimentos en suspensión y arrastre de fondo

El transporte de sólido es un aspecto clave en los procesos fluviales y se relaciona directamente con la dinámica morfométrica de los ríos [2, 12]. Los aportes de los sedimentos generados desde las laderas de las cuencas durante periodos de tormentas son transportados en los cauces en suspensión, mientras que los provenientes de las erosiones en la red de drenaje o desde las laderas adyacentes a la misma son movilizados principalmente como transporte de fondo o acarreos [2, 13, 14].

Bagnold (1956) define el transporte de carga de fondo como aquel en el que los contactos sucesivos de las partículas con la cama están estrictamente limitados por el efecto de la gravedad [3]. El transporte sólido de fondo en cursos de agua con lecho de grava ha sido descrito [2, 15, 16] como un fenómeno de diferentes fases y en particular con dos condiciones del movimiento de los sedimentos. Superado el estado crítico del inicio del movimiento, en la primera fase la carga de fondo presenta una intensidad moderada junto a un determinado umbral de caudal líquido, mientras que en la segunda fase la intensidad de la carga de fondo aumenta. El umbral de caudal líquido que define el límite entre las dos fases del transporte sólido correspondería al caudal de cauce lleno [2, 17, 18], aun cuando asocia el inicio de la segunda fase con la ruptura del acorazamiento del lecho.

Los sedimentos en suspensión difieren de la carga de fondo, ya que pueden ser difundidos a lo largo de la columna vertical del fluido a través de la turbulencia [3]. El transporte sólido en suspensión estaría más influenciado por la disponibilidad de sedimentos finos que por las características energéticas o hidrodinámicas del torrente [2, 19]. El aporte de transporte de sólidos en suspensión al transporte de sólido total es bastante variable y se sitúa en un rango de un 70 a 95% para ríos fluviales [2, 19] y entre un 10 a 90% para torrentes en zona de montaña [2, 20, 21].

5.4.- Medición del transporte de sedimentos

Para la toma de muestras, se han diseñado variados instrumentos que permiten la recolección de datos, en la Figura 5.6, se puede observar un muestreador integrador, éste instrumento obtiene una muestra única agrupando pequeñas submuestras tomadas en diferentes puntos. Está constituido por una botella de vidrio metida en una armadura en forma de pez que se monta sobre una varilla cuando se quiere medir la altura de corrientes pequeñas o se suspende a un cable para corrientes mayores. A modo de que se llene la botella de manera fácil y regular cuando se encuentra debajo de la superficie es necesario que se disponga de una boca para la entrada del agua, y de un tubo para la salida del aire. La boca se suele diseñar con una sección transversal ligeramente ampliada detrás del punto de entrada para reducir el peligro de una presión contraria que podría obstaculizar la entrada de la corriente en la botella.

Un buen muestreador debe producir el mínimo de perturbación posible en el flujo del río, debe evitar errores producidos por las fluctuaciones a corto plazo de las concentraciones, y debe dar resultados que puedan relacionarse con las mediciones de la velocidad del flujo.

Muestreador integrador de profundidad

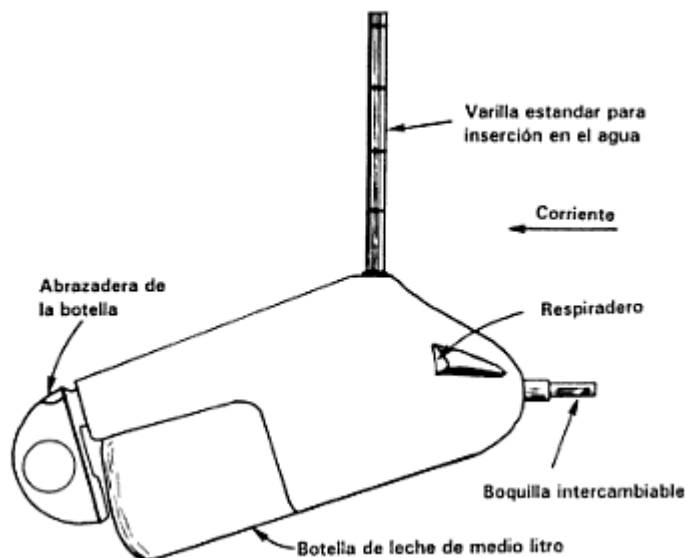


Figura 5.6 – Muestreador integrador de profundidad [6].

Por otra parte, los muestreadores puntuales se utilizan solamente cuando es imposible usar los aparatos integradores debido a grandes profundidades, altas velocidades, o cuando se están haciendo mediciones de la distribución de sedimentos en la sección [2].

Las muestras de sedimentos recogidas se filtran y el sedimento es secado. La relación entre el peso seco de los sedimentos y el peso total de la muestra es la concentración de sedimentos, que en general se expresa en partes por millón.

5.5.- Curvas de gasto sólido en suspensión diario

Un caudal puede ser el resultado de lluvias de diferente intensidad, o de la fusión de nieve, donde ambos parámetros pueden causar niveles de transporte de sedimentos completamente distintos. Las mediciones de transporte de sedimentos ocurren de manera parcial, es por esto que se generan las curvas de gasto de sedimentos, ya que se relaciona la tasa de transporte de sedimentos en suspensión con los caudales. La distribución espacial de la precipitación puede ser una causa de las diferencias, ya que en las distintas partes de la cuenca existen diferente cantidad y producción de sedimentos. Cuando las curvas se utilizan sólo para estimar la producción media anual de sedimentos, los errores tienden a compensarse y la respuesta es satisfactoria si existe un registro suficientemente largo [2]. En la Figura 5.7, se puede observar una curva de gasto de sedimentos del Río Maipo.

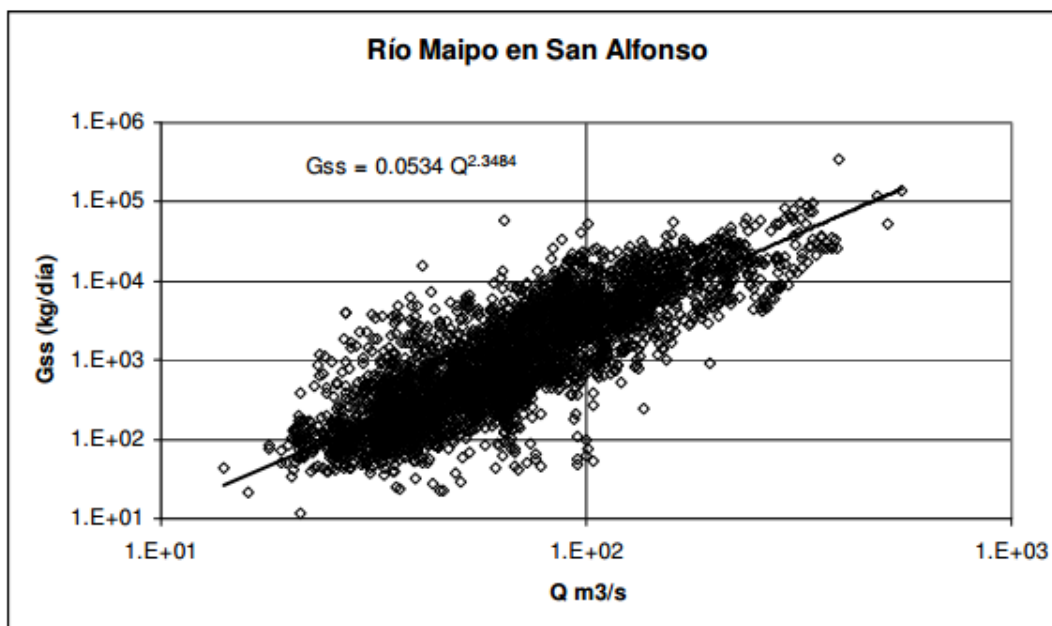


Figura 5.7 – Curva de gasto sólido en suspensión para el río Maipo en San Alfonso, Santiago, Chile.

5.6.- Curva de duración de caudales

La curva de duración de caudales es un estudio de frecuencia acumulada independiente de la cronología de las descargas y puede elaborarse para descargas medias diarias, semanales o mensuales [22], a mayor número de registros existentes será más representativa.

Para dibujar la curva se deben ordenar los caudales (medios diarios, semanales, mensuales, o cualquier otro rango de tiempo) de manera decreciente, y luego se determina el porcentaje de tiempo en el cual ellos fueron igualados o excedidos. Dibujando el caudal contra el porcentaje de tiempo en que éste fue igualado o excedido, se obtiene una curva como se ve en la Figura 5.8

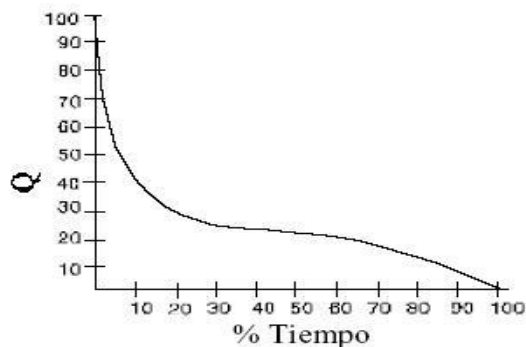


Figura 5.8 - Curva de duración de caudales.

La curva de duración de caudales permite combinar en una sola figura las cualidades fluviométricas del río. Estas curvas permiten conocer de manera preliminar la capacidad de futuras plantas hidroeléctricas, comparar cuencas cuando se desea trasladar registros de caudal y para estudio de control de inundaciones.

Las características más importantes de la curva de duración, del punto de vista hidrológico son:

- i) La pendiente de la curva depende de los tipos de datos, una curva con caudales diarios presenta una pendiente mayor a una curva generada con caudales mensuales, esto ya que los picos se suavizan con registros mensuales.
- ii) Pendientes altas indican caudales muy variables, pendientes bajas indican respuestas lentas a la lluvia y variaciones pequeñas del caudal.

Existen dos métodos regularmente usados para construir las curvas de duración de caudales, el “método del año calendario” y el “método del periodo total”.

En el método del año calendario se ordenan los valores para cada año en función de su magnitud y se les asigna un número de orden. Posteriormente se promedian los caudales para un mismo número de orden y se llevan a un gráfico, los caudales en el eje de las ordenadas y el número de orden en las abscisas.

El método del periodo total se considera de mayor precisión al anterior, en él se agrupa los caudales en clases de acuerdo a su magnitud. Los totales para cada año se acumulan y se les calcula una probabilidad de excedencia.

5.7.- Curvas de gasto sólido en suspensión medio anual

La curva de gasto sólido en suspensión medio anual se obtiene con la integración de la curva de duración de caudales perteneciente a cada cuenca y la curva de gasto sólido en suspensión diario ya señalada, es así como se logra tener un registro de la producción anual de sólidos en suspensión para una cuenca y caudal determinado.

La producción anual de sedimentos en suspensión en una cuenca depende de factores como el uso y tipo de suelo existente, la topografía, el clima, y la creación de embalses y bocatomas.

Fleming [23] utilizó datos de más de 250 cuencas distribuidas en el mundo para obtener la Ecuación 5.1 y la Tabla 5.1 para la tasa media anual de transporte en suspensión G_s en (toneladas/año), como una función del caudal medio anual para varios tipos de cobertura vegetal:

$$G_s = a Q^n \quad (5.1)$$

Para cuencas sin registros de sedimentos, la relación mostrada puede interpretarse como un orden de magnitud de transporte esperado.

Tabla 5.1 – Valores “a y n” para la Ecuación 5.1, para varios tipo de cobertura vegetal (unidades compatibilizadas).

Cobertura Vegetal	n	a
		Para Qs en Ton.
Variada de hoja ancha y Coníferas	1,02	3,09
Floresta Conífer y Pastos Altos	0,82	189,05
Pastos Bajos y Arbustos	0,65	1898,8
Desierto y Arbustos	0,72	2898,4

Fuente: Extraído y adoptado de [23].

Dendy y Bolton [24] relacionan las características de la cuenca de interés a las otras de referencia. La cuenca de referencia fue desarrollada en base a información de 800 cuencas pertenecientes a los Estados Unidos de América. Las ecuaciones 5.2 y 5.3 expresan la relación entre escorrentía, volumen de sedimentos producidos y superficie.

Para escorrentía inferior a 50.8 (mm/año):

$$\frac{S}{S_R} = 1.07 \left(\frac{Q}{Q_R} \right)^{0.46} \left(1.43 - 0.26 \log \left(\frac{A}{A_R} \right) \right) \quad (5.2)$$

Para escorrentía mayor a 50,8 (mm/año):

$$\frac{S}{S_R} = 1.19 e^{\left(\frac{-0.11Q}{Q_R} \right)} \left(1.43 - 0.26 \log \left(\frac{A}{A_R} \right) \right) \quad (5.3)$$

Donde:

S_R = Gasto sólido en suspensión medio anual referencial de 635 en Ton/km²/año.

Q_R = Escorrentía media anual referencial de 50,8 mm/año.

A_R = Área de drenaje cuenca referencial de 2,59 km².

S = Volumen de sedimentos producidos en ton/km²/año.

Q = Escorrentía media anual en mm/año.

A = Área de drenaje cuenca en km².

5.8.- Geomorfología de las cuencas

Es de importancia para este análisis el conocer la geomorfología de los ríos, esto debido a que los ríos van cambiando tanto su forma como el relieve de la cuenca que lo rodea con el pasar del tiempo

5.8.1.- Laderas

En la montaña la gravedad es el principal agente de erosión ya que las rocas y clastos caen rápidamente hasta el fondo de los valles, en donde se encuentran los canales. El caudal de los primeros cauces no alcanza a remover este material, conocido como coluvio, el cual se acumula por siglos o milenios hasta que eventualmente colapsa y desciende masivamente como un coluvión [25].

Desplazamientos de masas o corrimiento de tierra es el nombre genérico que se da a los diversos modos en que las rocas y suelos, descienden masivamente sin la intervención de la corriente de agua, viento o hielo. Los desplazamientos involucran escalas espaciales y temporales muy diversas, pues una partícula puede avanzar sólo unos centímetros en cientos de años, mediante un lento descenso gravitacional, y toda una ladera puede desmoronarse en cuestión de minutos.

Los deslizamientos de terreno ocurren cuando una masa inestable de terreno se desliza a lo largo de su talud de corte o plano de falla. El plano de falla es la superficie a lo largo de la cual las tensiones de corte superan la resistencia del material y este se fractura. En general, la inclinación de una ladera corresponde a su talud de corte.

Los flujos de detritos son desplazamientos en masa en los cuales no se distingue un plano de corte bien definido y el material fluye al desplazarse, debido a que se deforma continuamente. Los flujos de arcilla y lodos tienen un alto contenido de agua y se desplazan rápidamente. Los flujos menos líquidos suelen ser una mezcla de lodos y sólidos, que avanzan lentamente.

El ingreso de grandes volúmenes de material sólido es discreto y afecta la morfología de los canales a escala local, aunque puede llegar a alterar las tasas de transporte y acopios de sedimento a lo largo de las redes [26].

5.8.2.- Morfología fluvial

Cuando se habla de morfología fluvial, se habla del estudio de las formas que tienen los ríos. Cuando se habla de la forma de los ríos, es decir de su apariencia, debe entenderse que esto equivale a describirlos tal como se ven desde el aire. Es necesario aclarar que la forma de los ríos cambia al pasar el tiempo, es por esto que cuando se habla de la forma de un río se debe hacer mención a que se habla de la forma de un tramo del río.

La clasificación de la morfología fluvial se basa en la sinuosidad de los ríos, es así como se han determinado tres tipos de morfologías, ríos rectos, ríos trenzados y río sinuoso o con meandros. En la Figura 5.9, se puede observar los tres tipos de morfología.



Figura 5.9 - Tipos de morfología fluvial.

i) Ríos rectos: En la naturaleza prácticamente no existen estos ríos, es por esto que se les suele considerar como un estado transitorio al meandrino. Se señala que un tramo recto es anormal y transitorio, es decir esencialmente inestable [27].

ii) Río trenzado: A estos ríos también se les llama entrelazados. Son cauces muy anchos compuestos por pequeños cauces entrelazados, que dejan islas (sumergibles) entre sí al unirse y separarse. Son considerados inestables, debido a que una crecida puede cambiarlos considerablemente. De este modo se les llama “divagantes” porque un brazo puede encontrarse tan pronto en un lugar como en otro [11]. Su presencia se asocia a una gran capacidad de transporte de sólidos, esto debido a que se observan en general en zonas de montañas con pendiente alta. También es frecuente encontrarlos en áreas llamadas piedemonte, donde los cauces abandonan su curso de montaña perdiendo pendiente y depositando su carga sólida.

iii) Ríos sinuosos o con meandros: El cauce es único pero con formas curvas. La ondulación en planta se acompaña de una asimetría en las secciones transversales, ya que el calado es mayor junto a la orilla exterior y menor junto a la orilla interior. En la orilla interior se depositan materiales que emergen en forma de playas, llamadas barras alternadas. El ritmo de la evolución de los meandros depende de la resistencia de las orillas a la erosión. Se ha observado en laboratorio que una corriente de agua y sedimentos circulando sobre un cauce aluvial recto da lugar a meandros a partir de la más mínima imperfección de la alineación recta. Si la región por la que circula la corriente se ve sometida a una elevación tectónica, los meandros acabaran siendo un profundo valle, y pasan a ser llamados meandros encajados.

5.8.3.- Papel morfológico de la vegetación

El papel morfológico de la vegetación se explica por su acción directa sobre el suelo. Las raíces de las plantas tienen la capacidad de fijar el material suelto. La fijación ocurre en lugares como las orillas del cauce principal o las llanuras de inundación. Las secciones fluviales resultan de la interacción del agua, los sólidos y la resistencia ofrecida por la vegetación, tanto en el sentido de la resistencia del flujo (rugosidad) como en el de resistencia frente al arrastre del material aluvial.

6. Metodología

Se seleccionaron estaciones que miden datos fluviométricos y sedimentométricos pertenecientes a la Dirección General de Aguas (D.G.A), donde dichas estaciones miden concentraciones y caudales medios diarios.

6.1.- Arrastre de sedimentos en suspensión

De manera de poder determinar el arrastre de sedimento en suspensión que llega a la estación, se utilizarán los datos medidos de muestras rutinarias (diarias) e integradas.

Obtención del gasto sólido en suspensión medio anual afluyente a la estación:

Los muestreos integrados otorgan una mejor información de la concentración de sólido en suspensión existente en la estación que los muestreos rutinarios, es por esto que primero se debe obtener un modelo realizando una correlación entre los muestreos rutinarios e integrados, en aquellas fechas que ambos datos son tomados en conjunto (fechas concurrentes).

Con el modelo obtenido, es posible determinar una estadística de concentraciones equivalentes a muestreos integrados diarios en la estación.

Finalmente, multiplicando la estadística de concentraciones equivalentes a muestreos integrados diarios de la estación con la estadística de caudales medios diarios, de acuerdo a la Ecuación (6.1) es posible generar una estadística de gasto sólido en suspensión.

$$G_{sd} = C Q_d T 10^{-6} \quad (6.1)$$

Donde:

G_{sd} = Gasto sólido en suspensión (Ton/día)

C = Concentración medida ($mg/l = gr/m^3$)

Q_d = Caudal medio diarios (m^3/s)

T = Segundos en un día

10^{-6} = Factor de conversión de gramos a toneladas

Determinación de la curva de descarga de sólido en suspensión representada por la relación.

$$G_{sd} = f(Q)$$

El gasto sólido en suspensión obtenido se relaciona con el caudal medio anual, dicha relación se establece en un gráfico log-log, obteniéndose una nube de puntos, donde cada punto representa el gasto sólido en suspensión diario existente en la estación. A la nube de puntos se ajusta una recta que represente la tendencia media de la nube.

De esta manera es posible determinar la ecuación de la recta, en cada una de las estaciones, donde dicha ecuación tiene la forma:

$$G_s = a Q^b \text{ (Ton/día)}$$

Posteriormente, es necesario generar la curva de duración de caudales en cada estación, e integrar dicha curva de manera discreta (mediante intervalos), lo que permite obtener el caudal medio anual esperado y el gasto sólido en suspensión medio anual en cada una de las estaciones.

Finalmente, se correlaciona en un gráfico tipo log-log, el gasto sólido en suspensión medio anual y el caudal medio anual obtenido en cada una de las estaciones utilizadas, obteniéndose una nube de puntos, a la que se ajusta una recta que muestre la tendencia de los datos.

A continuación, se muestra la ecuación tipo potencial, que es de la siguiente forma:

$$G_{sma} = a (Q_{ma})^b$$

Se compara el modelo final obtenido en función de los datos medidos con las curvas empíricas de Fleming, donde dichas curvas relacionan el caudal medio anual con el gasto sólido en suspensión medio anual. Las diferentes curvas de Fleming y los datos medidos se muestran en un gráfico tipo log-log, lo que permite una mejor visualización de las curvas de Fleming que tienen mejor ajuste. Posteriormente se determinan el error cuadrático (ecuación 6.2), y el error relativo porcentual (ecuación 6.3) de cada modelo de Fleming, además se grafican los datos medidos versus el gasto sólido en suspensión medio anual obtenido utilizando las curvas de Fleming que presentan menor error.

Error cuadrático

$$e = \frac{\sqrt{\sum(x-\bar{x})^2}}{(n-2)} \quad (6.2)$$

Error relativo

$$e_r = \left(\frac{e}{\bar{x}}\right) 100 \quad (6.3)$$

Donde:

x : Gasto sólido en suspensión medio anual modelado (Ton/año)

\bar{x} : Gasto sólido en suspensión medio anual medido (Ton/año)

n : Número de datos medidos

$\bar{\bar{x}}$: Promedio de los gastos sólidos en suspensión medio anual medidos (Ton/año)

Posteriormente, con el método de Dendy y Bolton, se obtiene el gasto sólido en suspensión por área de cada estación, con las ecuaciones (5.2) y (5.3), luego se comparan los datos medidos, con los obtenidos mediante el método de Dendy y Bolton y se calcula el error cuadrático (ecuación 6.4) y el error relativo (ecuación 6.5).

Error cuadrático	Error relativo
$e = \frac{\sqrt{\sum(x-\bar{x})^2}}{(n-3)} \quad (6.4)$	$e_r = \left(\frac{e}{\bar{\bar{x}}}\right) 100 \quad (6.5)$

Donde:

x : Gasto sólido en suspensión medio anual modelado (Ton/año)

\bar{x} : Gasto sólido en suspensión medio anual medido (Ton/año)

n : Número de datos medidos

$\bar{\bar{x}}$: Promedio de los gastos sólidos en suspensión medio anual medidos (Ton/año)

Finalmente, los datos medidos se ajustan a modelos tipo Fleming y modelos tipo Dendy y Bolton, para luego obtener el error cuadrático y el error relativo.

6.2.- Relación Pendiente - Gasto sólido en suspensión

Descargar los DEMs entregados por ASTER, de las áreas cercanas a la ubicación de la estación.

Unir los DEMs en un sólo mapa delimitado. El programa permite determinar el flujo, la acumulación del flujo y el cauce.

Posteriormente se convierten los cauces del mapa raster resultante a vectores, lo que permite obtener la forma de los cauces existentes, para luego definir la cuenca mediante el punto de salida, utilizando las coordenadas geográficas de la estación.

Una vez creada la cuenca definida por la estación, se pueden obtener los siguientes parámetros y mapas:

- i) Área de la Cuenca.
- ii) Altura Máxima y Mínima.
- iii) Pendiente Media.
- iv) Longitud cauce principal.
- v) Mapa de las alturas en la cuenca.

Posteriormente se realiza una correlación entre la pendiente media y el gasto sólido en suspensión medio anual obtenido en base a los datos medidos, para observar si existe algún tipo de correlación real.

7. Obtención de relaciones caudal sólido en suspensión v/s caudal líquido.

7.1.- Análisis de estaciones.

Mediante la aplicación de la metodología señalada en el capítulo anterior es posible realizar un análisis a las estaciones controladas por la D.G.A que han sido consideradas para este trabajo de título.

7.1.1. Estación Río Teno después junta con Río Claro.

Ubicación de la estación.

La estación ubicada en el río Teno se encuentra pasando la junta de este río con el río Claro, tal como se señala en el nombre de la estación (ver Figura 7.1). Este río presenta un régimen mixto, es así como en años secos los mayores caudales se generan entre los meses de Noviembre y Enero debido a los deshielos provenientes de las montañas ubicadas aguas arriba de la estación. En aquellos años lluviosos, el río presenta caudales de magnitud alta entre finales de Octubre a Enero y en los meses de Marzo y Abril. Estos últimos debido a la presencia de lluvias invernales en la zona.

Coordenadas (UTM): 333498 E ; 6125582 S. Zona: 19 H

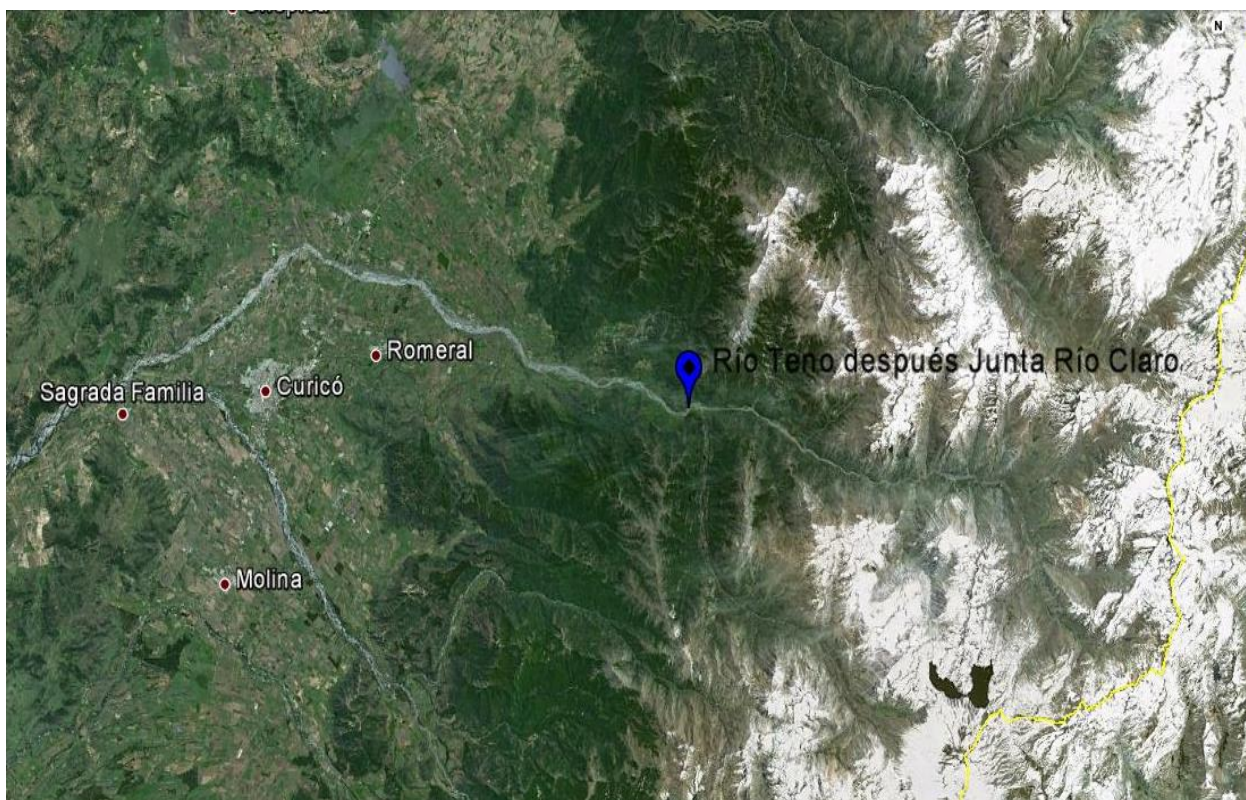


Figura 7.1 – Ubicación estación Río Teno después de junta Río Claro.

Antecedentes Básicos

a) Fluviométricos

Se dispone de datos de series de caudales medios diarios medidos en la estación Río Teno después de junta con Río Claro controlada por la Dirección General de Aguas del M.O.P, para el periodo que se muestra en la Tabla 7.1:

Tabla 7.1 – Registros fluviométricos Río Teno después junta Río Claro.

Nombre Estación	Periodo	
	Desde	Hasta
Río Teno después de junta Río Claro	10/1947	03/2012

b) Sedimentométricos

Se cuenta con los registros de concentraciones de la estación Río Teno después de junta Río Claro. En la Tabla 7.2 se observan los tipos de muestreos realizados y los periodo de tiempo que abarcan los datos entregados por la D.G.A.

Tabla 7.2 – Registros sedimentométricos Río Teno después junta Río Claro.

Nombre Estación	Muestreos		Muestreos	
	Rutinarios		Integrados	
Río Teno después de junta Río Claro	Desde	Hasta	Desde	Hasta
		11/1976	09/2008	06/1985

Es necesario relacionar los muestreos rutinarios e integrados mediante la creación de un modelo que permita llevar los datos de muestreos rutinarios a muestreos integrados diarios. El modelo es posible de generar utilizando la información de muestreos rutinarios e integrados pertenecientes a un mismo día (concurrentes). En la Figura 7.2 es posible observar la relación entre ambas forma de medición y el modelo que representa la tendencia media de los puntos.

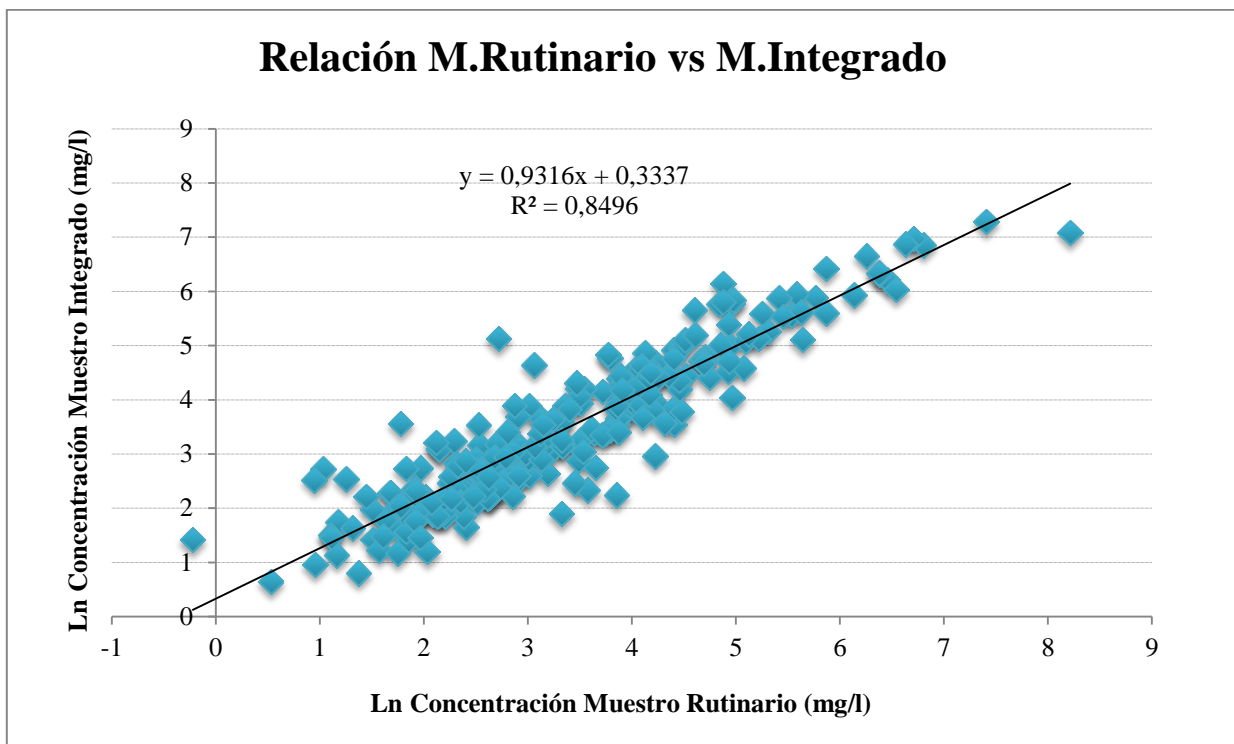


Figura 7.2 – Relación entre las concentraciones existentes de muestreos rutinarios e integrados en la estación Río Teno después de junta Río Claro.

El modelo obtenido en la gráfica es:

$$C_i = 1.40 C_r^{0.93}$$

Donde:

C_i = concentración de muestreos integrados (mg/l)

C_r = concentración de muestreos rutinarios (mg/l).

Reemplazando en este modelo las concentraciones de muestreo rutinario es posible generar una estadística de concentraciones equivalentes a muestreos integrados diarios.

Luego es necesario multiplicar la estadística de caudales medios diarios con la estadística de concentraciones equivalentes a muestreos integrados diarios, así es posible generar una estadística de gastos sólidos en suspensión medios diarios.

Utilizando los registros fluviométricos disponibles y la estadística de gastos sólidos en suspensión medios diarios, se obtiene una relación tipo potencial $Q_s = a Q^n$, en la cual, las constantes (“a” y “n”) se establecen por la correlación del modelo. En la Figura 7.3 se muestra de manera gráfica la relación.

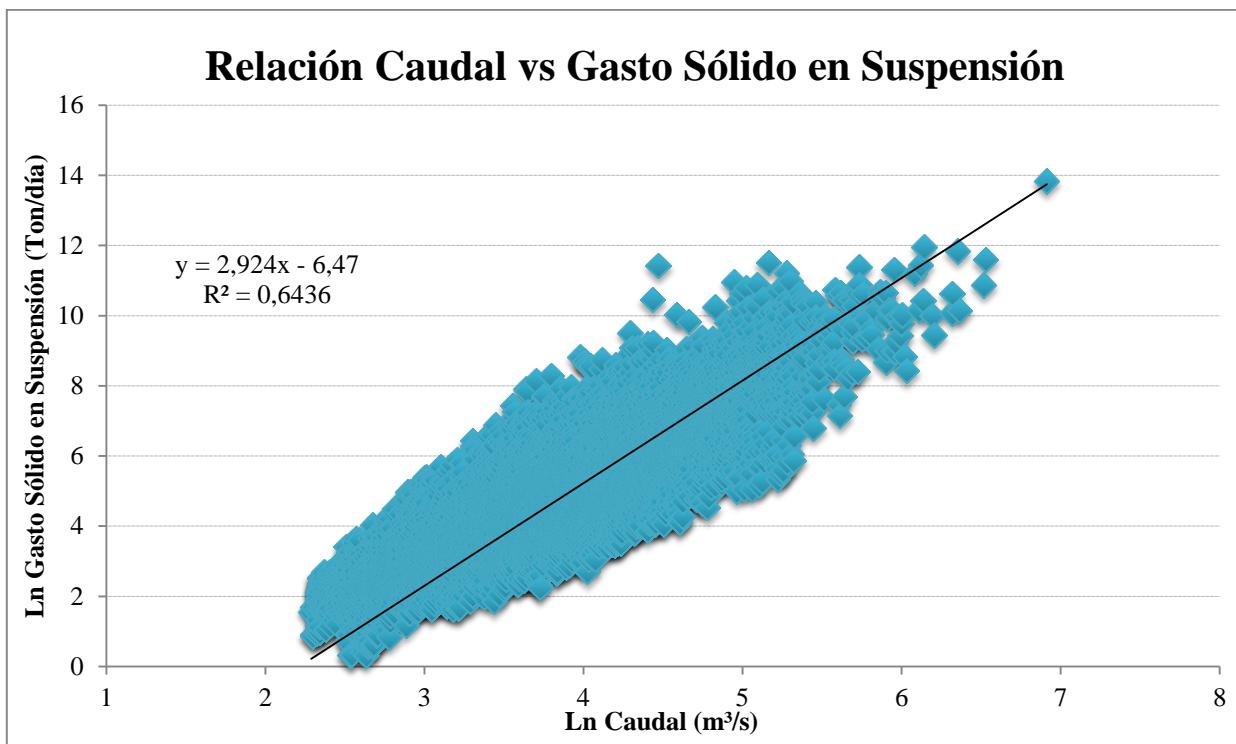


Figura 7.3 – Relación entre el caudal y gasto sólido en suspensión en la estación Río Teno después de junta Río Claro.

El modelo de la Curva de gasto sólido en suspensión es:

$$G_{sd} = 0.0015 Q_d^{2.924} \quad G_{sd} \text{ (Ton/día); } Q_d \text{ (m}^3\text{/s)}$$

Utilizando los caudales medios diarios de la estación, se construyó la curva general de duración de caudales, para posteriormente integrarla de manera discreta (intervalos), de esta forma se obtuvieron el caudal medio anual y el gasto sólido en suspensión medio anual de cada estación.

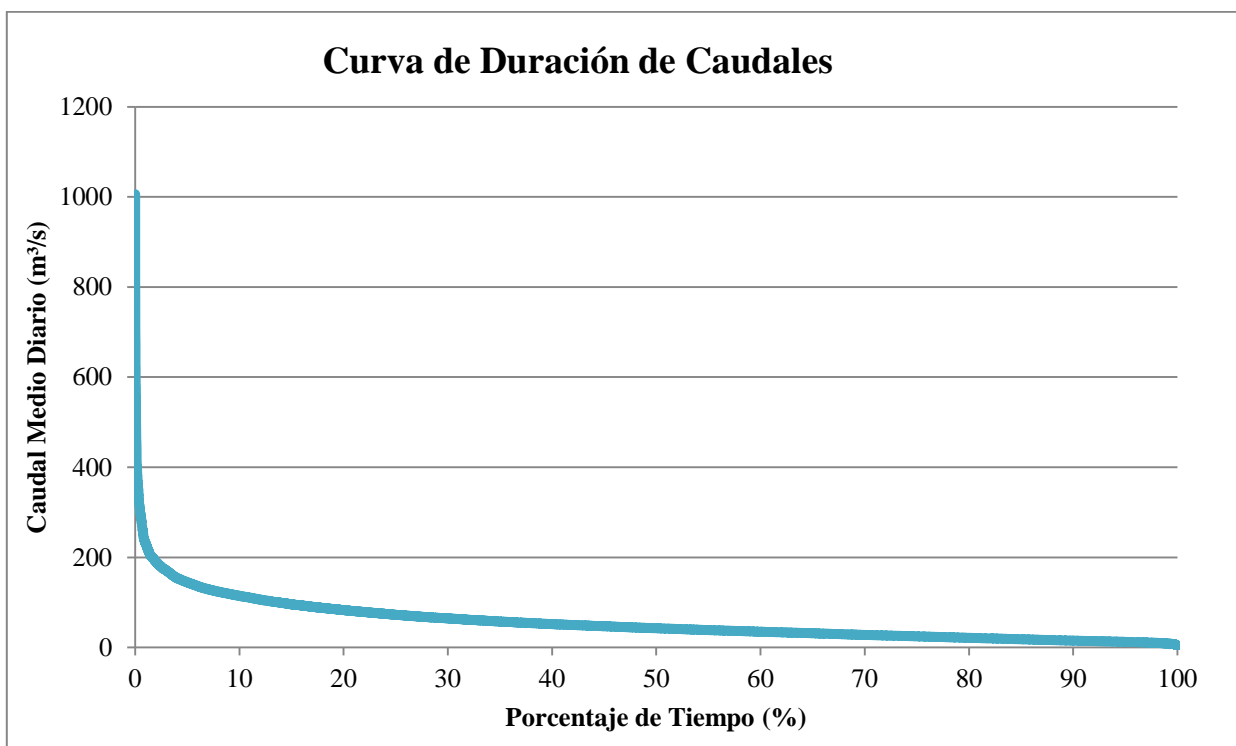


Figura 7.4 - Curva de duración de caudales de la estación Río Teno después de junta Río Claro.

Tabla 7.3 - Curva de duración de Caudales de la estación Río Teno después junta Río Claro.
Cálculo del promedio Anual de Gasto Sólido en Suspensión.

Prob (%)	Q _d (m ³ /s)	G _{sd} (Ton/día)	Prom. G _{sd} (Ton/día)	ΔProb. (%)	Prom.G _{sd} ΔProb (Ton/día)	Acum. G _{sd} (Ton/día)
	1006.00	903000.01				
0.01	1006.00	903000.01	903000.01	0.01	90.30	90.30
0.02	793.00	450366.48	676683.24	0.01	67.67	157.97
0.05	624.00	223465.77	336916.12	0.03	101.07	259.04
0.10	489.00	109554.54	166510.15	0.05	83.26	342.30
0.15	417.00	68765.26	89159.90	0.05	44.58	386.88
0.20	388.00	55697.44	62231.35	0.05	31.12	417.99
0.30	353.00	42245.89	48971.67	0.10	48.97	466.97
0.45	308.00	28353.95	35299.92	0.15	52.95	519.92
0.70	298.00	25745.40	27049.67	0.25	67.62	587.54
1.00	232.00	12381.64	19063.52	0.30	57.19	644.73
1.50	204.00	8500.61	10441.12	0.50	52.21	696.94
3.00	171.00	5074.25	6787.43	1.50	101.81	798.75
5.00	145.00	3132.79	4103.52	2.00	82.07	880.82
7.50	126.00	2077.66	2605.23	2.50	65.13	945.95
10.00	115.00	1590.64	1834.15	2.50	45.85	991.80
15.00	95.90	935.25	1262.95	5.00	63.15	1054.95
20.00	83.10	615.18	775.22	5.00	38.76	1093.71
25.00	72.70	416.12	515.65	5.00	25.78	1119.49
30.00	64.70	295.92	356.02	5.00	17.80	1137.29
35.00	57.70	211.72	253.82	5.00	12.69	1149.98
40.00	52.00	156.20	183.96	5.00	9.20	1159.18
45.00	47.20	117.68	136.94	5.00	6.85	1166.03
50.00	42.80	88.40	103.04	5.00	5.15	1171.18
55.00	38.70	65.85	77.12	5.00	3.86	1175.04
60.00	35.10	49.50	57.67	5.00	2.88	1177.92
70.00	28.00	25.56	37.53	10.00	3.75	1181.67
80.00	21.50	11.81	18.68	10.00	1.87	1183.54
90.00	15.30	4.37	8.09	10.00	0.81	1184.35
99.99	3.00	0.04	2.20	9.99	0.22	1184.57

Tabla 7.4 - Curva de duración de Caudales de la estación Río Teno después junta Río Claro.
Cálculo Caudal Medio Anual.

Prob (%)	Q _d (m ³ /s)	Prom Q _d (m ³ /s)	ΔProb (%)	PromQ _d ΔProb (m ³ /s)	Acum Q _d (m ³ /s)
	1006.00				
0.01	1006.00	1006.00	0.01	0.10	0.10
0.02	793.00	899.50	0.01	0.09	0.19
0.05	624.00	708.50	0.03	0.21	0.40
0.10	489.00	556.50	0.05	0.28	0.68
0.15	417.00	453.00	0.05	0.23	0.91
0.20	388.00	402.50	0.05	0.20	1.11
0.30	353.00	370.50	0.10	0.37	1.48
0.45	308.00	330.50	0.15	0.50	1.98
0.70	298.00	303.00	0.25	0.76	2.73
1.00	232.00	265.00	0.30	0.80	3.53
1.50	204.00	218.00	0.50	1.09	4.62
3.00	171.00	187.50	1.50	2.81	7.43
5.00	145.00	158.00	2.00	3.16	10.59
7.50	126.00	135.50	2.50	3.39	13.98
10.00	115.00	120.50	2.50	3.01	16.99
15.00	95.90	105.45	5.00	5.27	22.26
20.00	83.10	89.50	5.00	4.48	26.74
25.00	72.70	77.90	5.00	3.90	30.63
30.00	64.70	68.70	5.00	3.44	34.07
35.00	57.70	61.20	5.00	3.06	37.13
40.00	52.00	54.85	5.00	2.74	39.87
45.00	47.20	49.60	5.00	2.48	42.35
50.00	42.80	45.00	5.00	2.25	44.60
55.00	38.70	40.75	5.00	2.04	46.64
60.00	35.10	36.90	5.00	1.85	48.48
70.00	28.00	31.55	10.00	3.16	51.64
80.00	21.50	24.75	10.00	2.48	54.11
90.00	15.30	18.40	10.00	1.84	55.95
99.99	3.00	9.15	9.99	0.91	56.87

En función de lo realizado, el caudal medio anual afluente y el gasto sólido medio anual para la estación Río Teno después junta Río Claro son:

Caudal Medio Anual: 56,87 (m³/s)

Gasto Sólido en Suspensión Medio Anual: 432.368 (Ton/año)

Análisis Geomorfológico

Mediante la utilización del programa GrassGis, es posible realizar un estudio de la cuenca definida por la estación considerada.

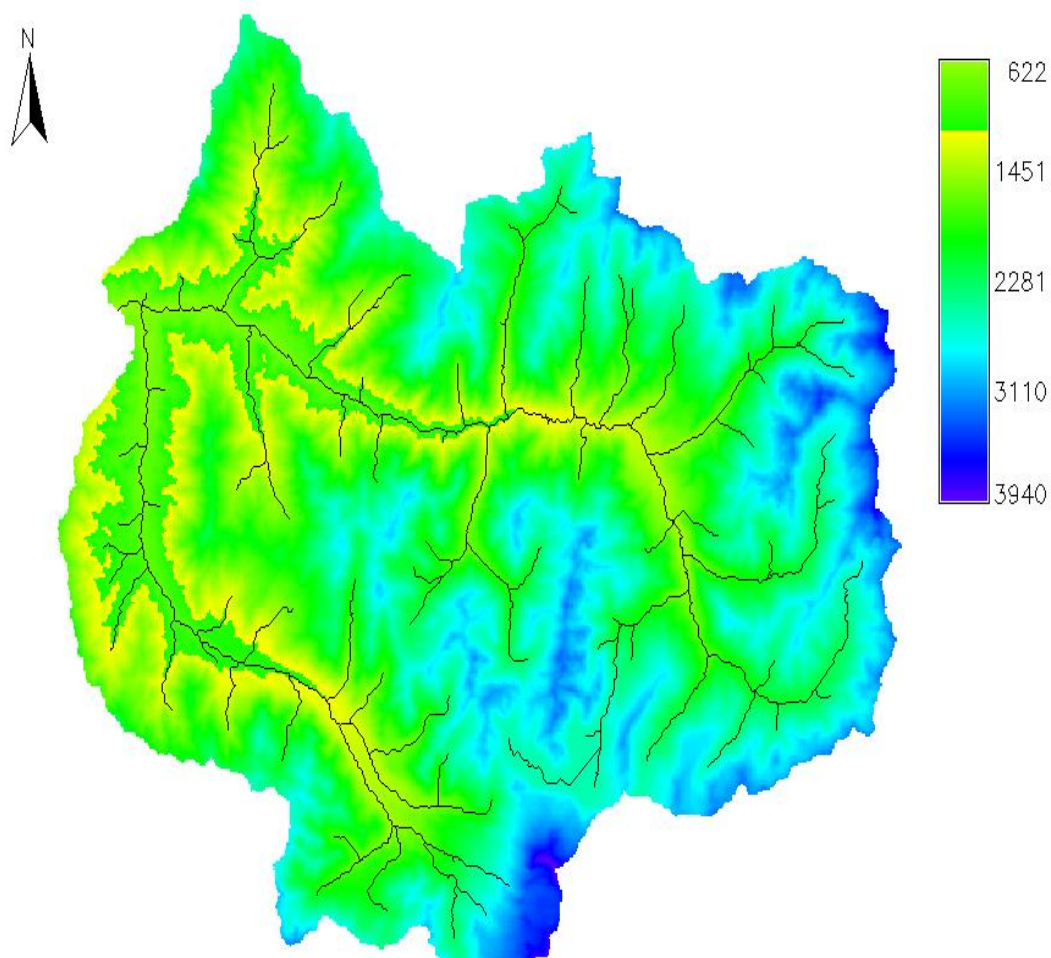


Figura 7.5 – Cuenca aportante de la estación Río Teno después junta con Río Claro.

En la Tabla 7.5, se presentan los resultados entregados mediante la utilización del programa.

Tabla 7.5 – Resultados entregados por GrassGis para la estación Río Teno después junta con Río Claro.

Área de la Cuenca	1.205 (Km ²)
Pendiente Media	48,08 (%)
Largo del Cauce	68,27 (Km)
Altura Máxima	3.940 (m)
Altura Mínima	622 (m)

7.1.2 Estación Loncomilla en Las Brisas (*)¹.

Ubicación de la estación.

La estación se ubica en el río Loncomilla, y se encuentra aguas abajo de la junta con el río Pataguán. El río Loncomilla presenta un régimen pluvial, en años lluviosos se observan caudales de gran magnitud. Entre los meses de Mayo y Agosto, se observan los mayores caudales, mientras que en los meses de Enero y Marzo los caudales son menores. En la Figura 7.6, se señala la ubicación de la estación.

Coordenadas (UTM): 249258 E ; 6054640 S. Zona: 19 H

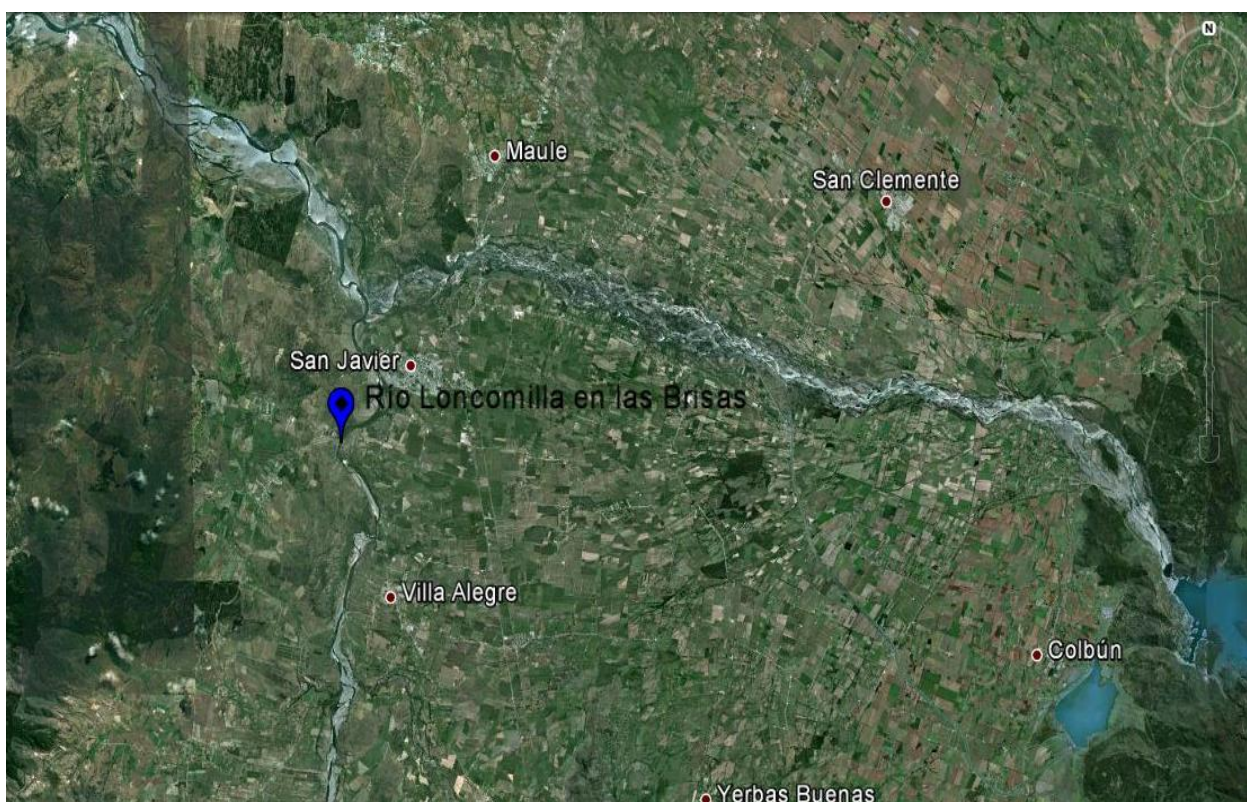


Figura 7.6 – Ubicación estación Río Loncomilla en las Brisas.

¹ Esta estación cuenta aguas arriba con un tramo que desaparece en la visualización de Google Earth.

Antecedentes Básicos

a) Fluviométricos

Se dispone de datos de series de caudales medios diarios observados de la estación Río Loncomilla en las Brisas controlada por la Dirección General de Aguas del M.O.P, para el periodo que se muestra en la Tabla 7.6:

Tabla 7.6 – Registros fluviométricos Río Loncomilla en las Brisas.

Nombre Estación	Periodo	
	Desde	Hasta
Río Loncomilla en las Brisas	05/1975	03/2012

b) Sedimentométricos

Se dispone de los registros sedimentométricos de la estación Río Loncomilla en las Brisas. En la Tabla 7.7 se observan los tipos de muestreos realizados y los periodos de tiempo que abarcan los datos entregados por la D.G.A.

Tabla 7.7 – Registros sedimentométricos Río Loncomilla en las Brisas.

Nombre Estación	Muestreos Rutinarios		Muestreos Integrados	
	Desde	Hasta	Desde	Hasta
Río Loncomilla en las Brisas	06/1985	09/2008	06/1985	08/2008

Utilizando la metodología señalada en el punto 7.1.1, se obtuvo el modelo:

$$C_i = 3.22 C_r^{0.57}$$

Donde:

C_i = concentración de muestreos integrados (mg/l).

C_r = corresponde a la concentración de muestreos rutinarios (mg/l).

Posteriormente en la Figura 7.7 se muestra de manera gráfica la relación que existe entre el caudal líquido y gasto sólido en suspensión.

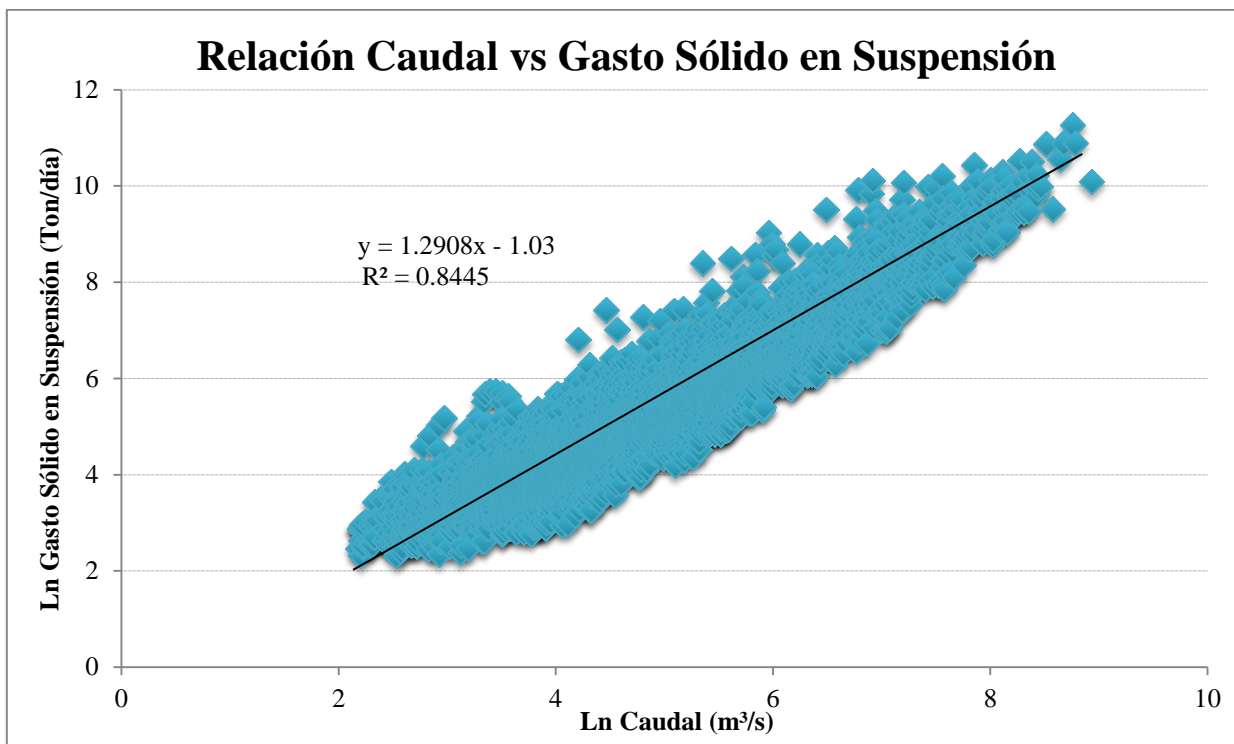


Figura 7.7 – Relación entre el caudal y gasto sólido en suspensión en la estación Río Loncomilla en las Brisas.

El modelo de la Curva de gasto sólido en suspensión es:

$$G_{sd} = 0.357 Q_d^{1.29} \quad G_{sd} \text{ (Ton/día); } Q_d \text{ (m}^3\text{/s)}$$

Finalmente, utilizando los caudales medios diarios de la estación, se construyó la curva general de duración de caudales, para posteriormente integrarla de manera discreta (intervalos) y de esta manera obtener el gasto sólido en suspensión medio anual y el caudal medio anual. En el Anexo 2 digital se encuentran las tablas de las curvas de duración de caudales mencionadas y en el Anexo 3 digital se muestra de manera gráfica la curva general de duración de caudales.

En función del trabajo realizado, el caudal medio anual afluente y el gasto sólido medio anual para la estación Río Loncomilla en las Brisas son:

Caudal Medio Anual: 272,15 (m³/s)

Gasto Sólido en Suspensión Medio Anual: 246.608 (Ton/año)

Análisis Geomorfológico

Mediante la utilización del programa GrassGis, es posible realizar un análisis de la cuenca definida por la estación estudio.

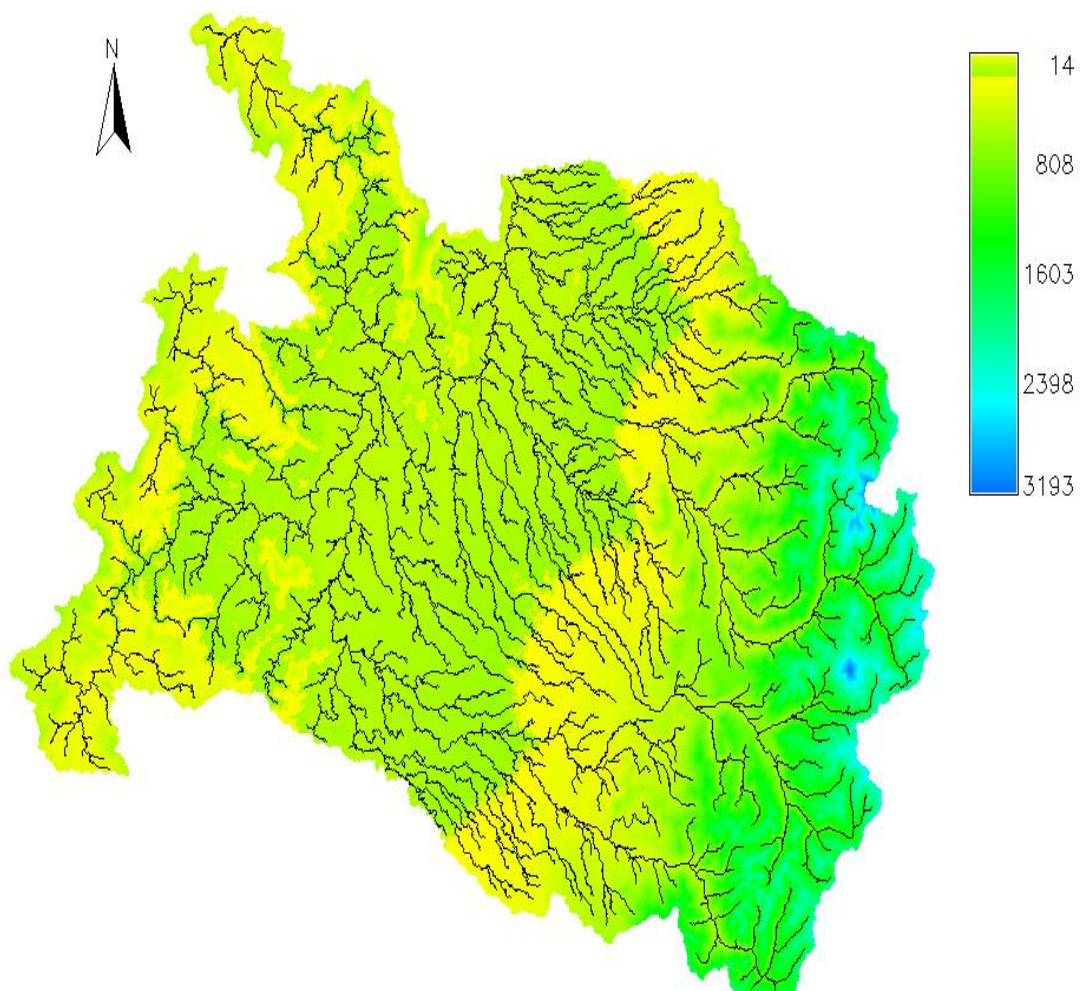


Figura 7.8 – Cuenca aportante de la estación Río Loncomilla en las Brisas.

En la Tabla 7.8 se presentan los resultados entregados mediante la utilización del programa.

Tabla 7.8 – Resultados entregados por GrassGis para la estación Río Loncomilla en las Brisas.

Área de la Cuenca	10.336 (Km ²)
Pendiente Media	16,32 (%)
Largo del Cauce	301,18 (Km)
Altura Máxima	3.193 (m)
Altura Mínima	14 (m)

7.1.3 Estación Río Purapel en Sauzal.

Ubicación de la estación.

Esta estación se ubica en el río Purapel. El río presenta a un régimen pluvial. Los caudales en este río son en general de baja magnitud, y se presentan pequeñas alzas en el caudal en los meses de Julio y Agosto. Esto debido a pequeñas lluvias invernales. En épocas de sequía el río puede no presentar caudal ($0 \text{ (m}^3/\text{s)}$). En la Figura 7.9, se muestra la ubicación de la estación.

Coordenadas (UTM): 765313 E ; 6039441 S. Zona: 18 H

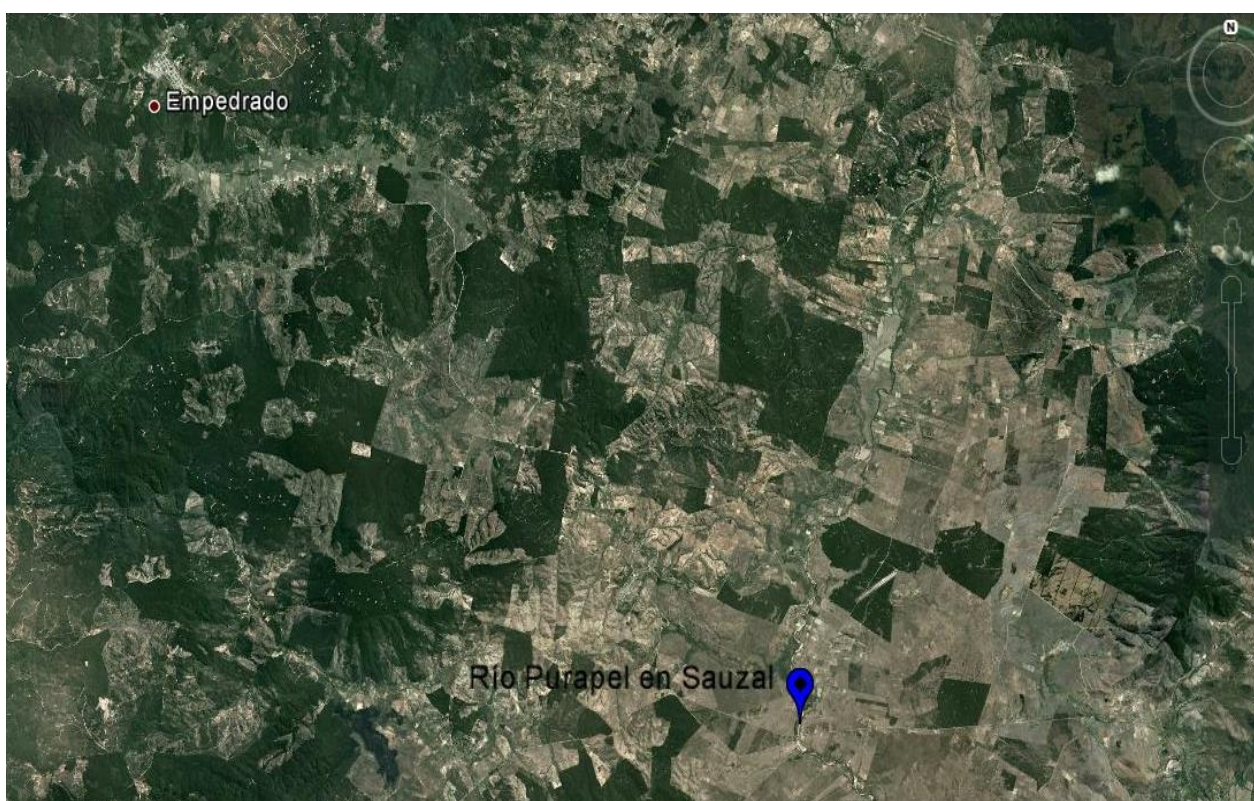


Figura 7.9 - Ubicación estación Río Purapel en Sauzal.

Antecedentes Básicos

a) Fluviométricos

Se dispone con datos de series de caudales medios diarios observados de la estación Río Purapel en Sauzal, controlada por la Dirección General de Aguas del M.O.P, para el periodo mostrado en la Tabla 7.9:

Tabla 7.9 – Registros fluviométricos Río Purapel en Sauzal.

Nombre Estación	Periodo	
	Desde	Hasta
Río Purapel en Sauzal	06/1981	06/2011

b) Sedimentométricos

Se dispone de los registros sedimentométricos de la estación Río Purapel en Sauzal. En la Tabla 7.10 se observan los tipos de muestreos realizados y los periodos de tiempo que abarcan los datos entregados por la D.G.A.

Tabla 7.10 – Registros sedimentométricos Río Purapel en Sauzal.

Nombre Estación	Muestreos Rutinarios		Muestreos Integrados	
	Desde	Hasta	Desde	Hasta
Río Purapel en Sauzal	06/1963	03/1970	06/1985	08/2008
	06/1985	10/2012		

Utilizando la metodología señalada en el punto 7.1.1, se obtuvo el modelo:

$$C_i = 1.01 C_r^{0.94}$$

Donde:

C_i = concentración de muestreos integrados (mg/l)

C_r = concentración de muestreos rutinarios (mg/l).

Posteriormente en la Figura 7.10 se muestra de manera gráfica la relación que existe entre el caudal líquido y gasto sólido en suspensión.

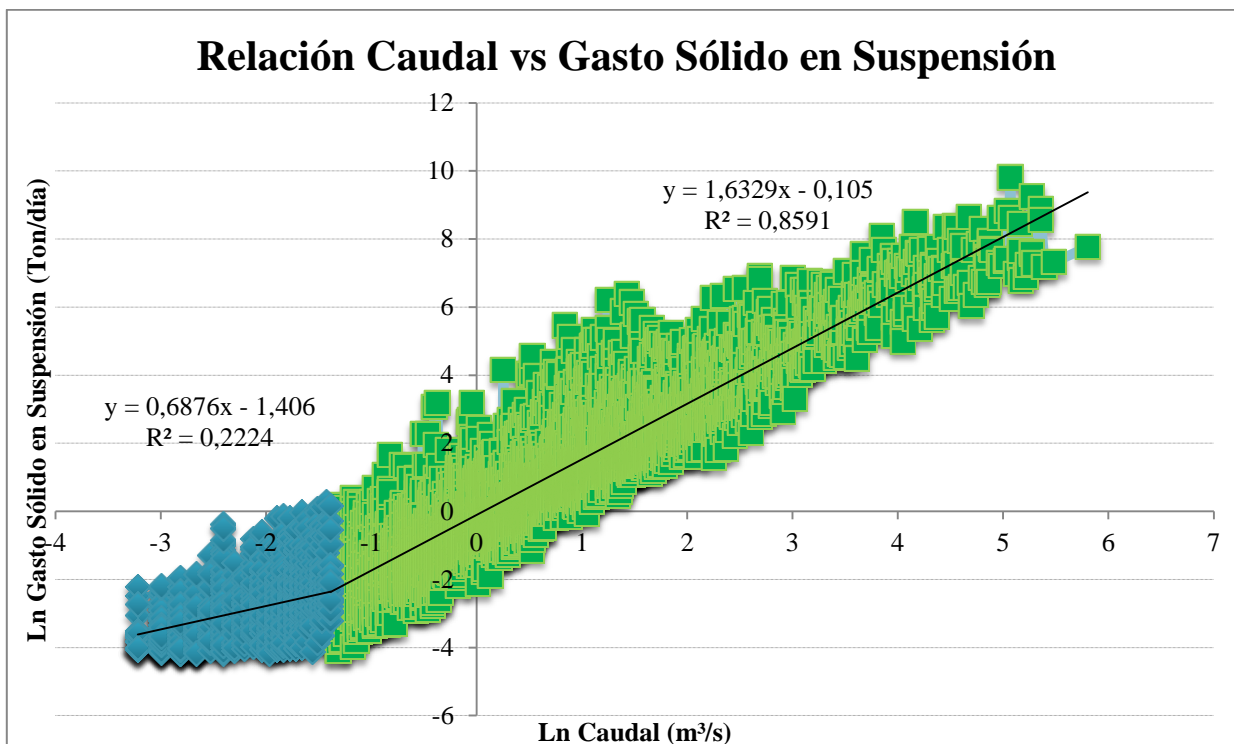


Figura 7.10 – Relación entre el caudal y gasto sólido en suspensión en la estación Río Purapel en Sauzal.

Los modelos de la Curva de gasto sólido en suspensión corresponden a:

$$\text{Para } Q < 0.25 \text{ (m}^3/\text{s)} \quad G_{sd} = 0.245 Q_d^{0.687} \quad G_{sd} \text{ (Ton/día); } Q_d \text{ (m}^3/\text{s)}$$

$$\text{Para } Q > 0.25 \text{ (m}^3/\text{s)} \quad G_{sd} = 0.90 Q_d^{1.632} \quad G_{sd} \text{ (Ton/día); } Q_d \text{ (m}^3/\text{s)}$$

Finalmente, utilizando los caudales medios diarios de la estación, se construyó la curva general de duración de caudales, para posteriormente integrarla de manera discreta (intervalos) y de esta manera obtener el gasto sólido en suspensión medio anual y el caudal medio anual. En el Anexo 2 digital se encuentran las tablas de las curvas de duración de caudales mencionadas y en el Anexo 3 digital se muestra de manera gráfica la curva general de duración de caudales.

En función del análisis realizado, el caudal medio anual afluente y el gasto sólido medio anual para la estación Río Purapel en Sauzal son:

$$\text{Caudal Medio Anual:} \quad 4,83 \text{ (m}^3/\text{s)}$$

$$\text{Gasto Sólido en Suspensión Medio Anual:} \quad 17.819 \text{ (Ton/año)}$$

Análisis Geomorfológico

Mediante la utilización del programa GrassGis, es posible realizar un análisis de la cuenca definida por la estación en estudio.

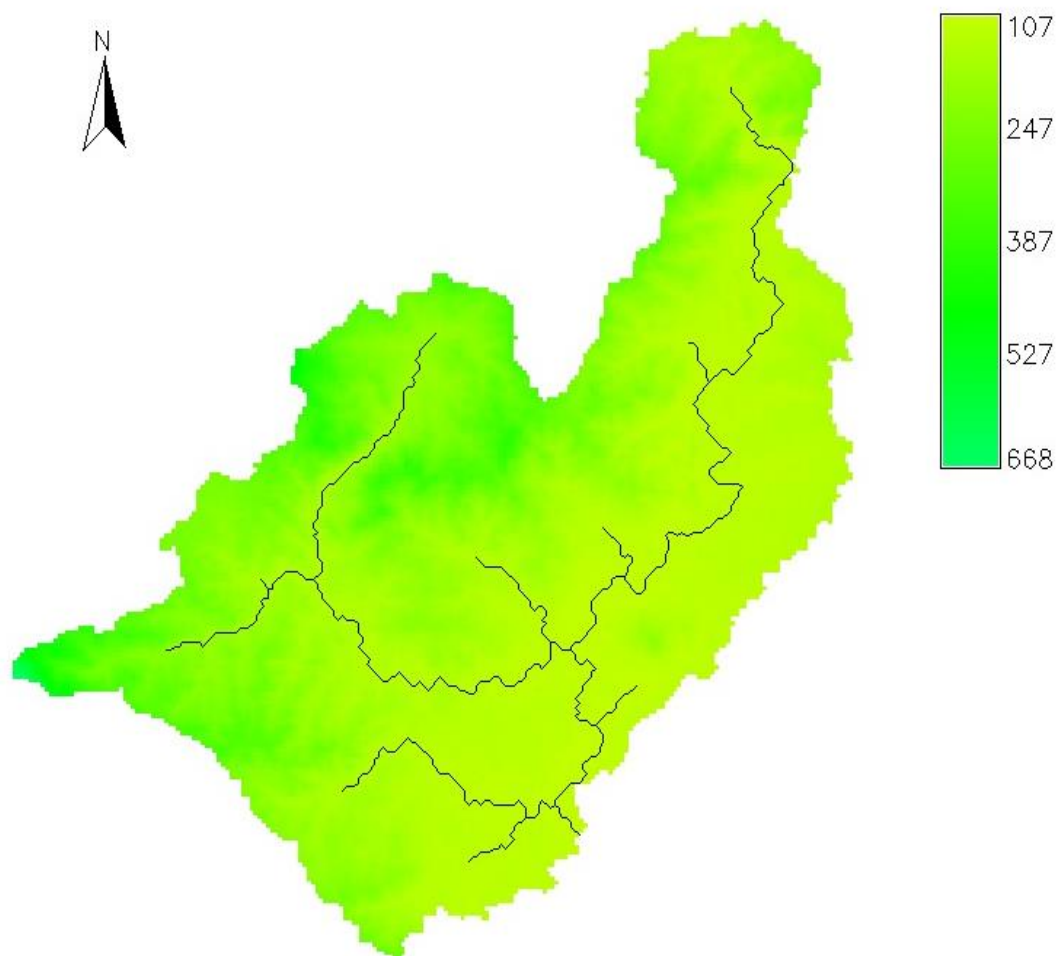


Figura 7.11 – Cuenca aportante de la estación Río Purapel en Sauzal.

En la Tabla 7.11 se presentan los resultados entregados mediante la utilización del programa.

Tabla 7.11 – Resultados entregados por GrassGis para la estación Río Purapel en Sauzal.

Área de la Cuenca	157 (Km ²)
Pendiente Media	9,59 (%)
Largo del Cauce	32,42 (Km)
Altura Máxima	668 (m)
Altura Mínima	107 (m)

7.1.4 Estación Río Ñuble en San Fabián.

Ubicación de la estación.

La estación se encuentra en el río Ñuble, próxima a la Cordillera de los Andes, y presenta un régimen mixto. Se observa que en años secos, los mayores caudales se generan en los meses de Enero a Abril, mientras que en los años húmedos, los mayores caudales ocurren en Mayo y Junio debido a las lluvias de invierno, y entre Octubre y Noviembre debido a los deshielos. En la Figura 7.12, se señala la ubicación de la estación.

Coordenadas (UTM): 271273 E ; 5949450 S. Zona: 19 H

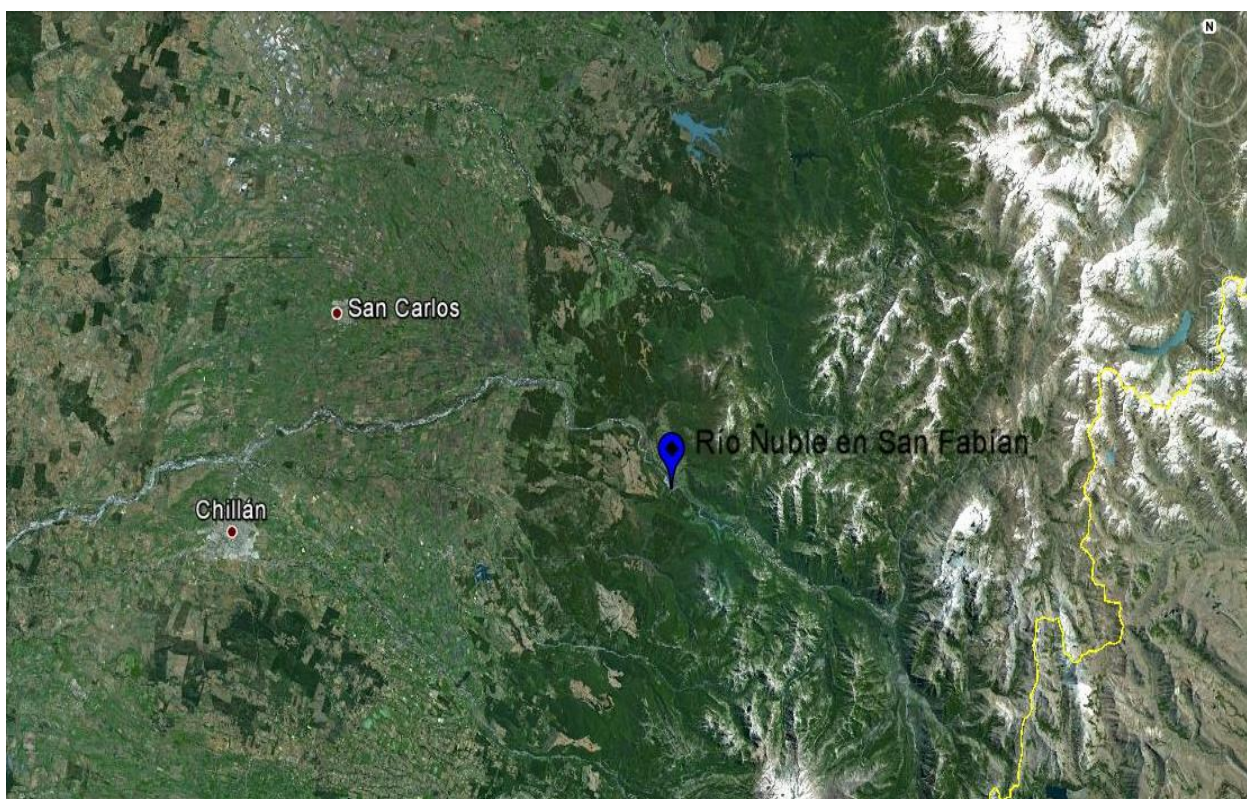


Figura 7.12 – Ubicación estación Río Ñuble en San Fabián.

Antecedentes Básicos

a) Fluviométricos

Se dispone con datos de series de caudales medios diarios observados de la estación Río Ñuble en San Fabián controlada por la Dirección General de Aguas del M.O.P para el periodo mostrado en la siguiente Tabla 7.12:

Tabla 7.12 – Registros fluviométricos Río Ñuble en San Fabián.

Nombre Estación	Periodo	
	Desde	Hasta
Río Ñuble en San Fabián	04/1950	03/1998

b) Sedimentométricos

Se dispone de los registros sedimentométricos de la estación Río Ñuble en San Fabián. En la Tabla 7.13 se observan los tipos de muestreos realizados y los periodos de tiempo que abarcan los datos entregados por la D.G.A.

Tabla 7.13 – Registros sedimentométricos Río Ñuble en San Fabián.

Nombre Estación	Muestreos		Muestreos	
	Rutinarios		Integrados	
Río Ñuble en San Fabián	Desde	Hasta	Desde	Hasta
	06/1985	11/1989	05/1993	04/1999
	08/1992	08/1992		
	04/1993	03/1997		

Utilizando la metodología señalada en el punto 7.1.1, se obtuvo el modelo:

$$C_i = 1.19 C_r^{1.11}$$

Donde

C_i = concentración de muestreos integrados (mg/l).

C_r = concentración de muestreos rutinarios (mg/l).

Posteriormente en la Figura 7.13 se muestra de manera gráfica la relación que existe entre el caudal líquido y gasto sólido en suspensión.

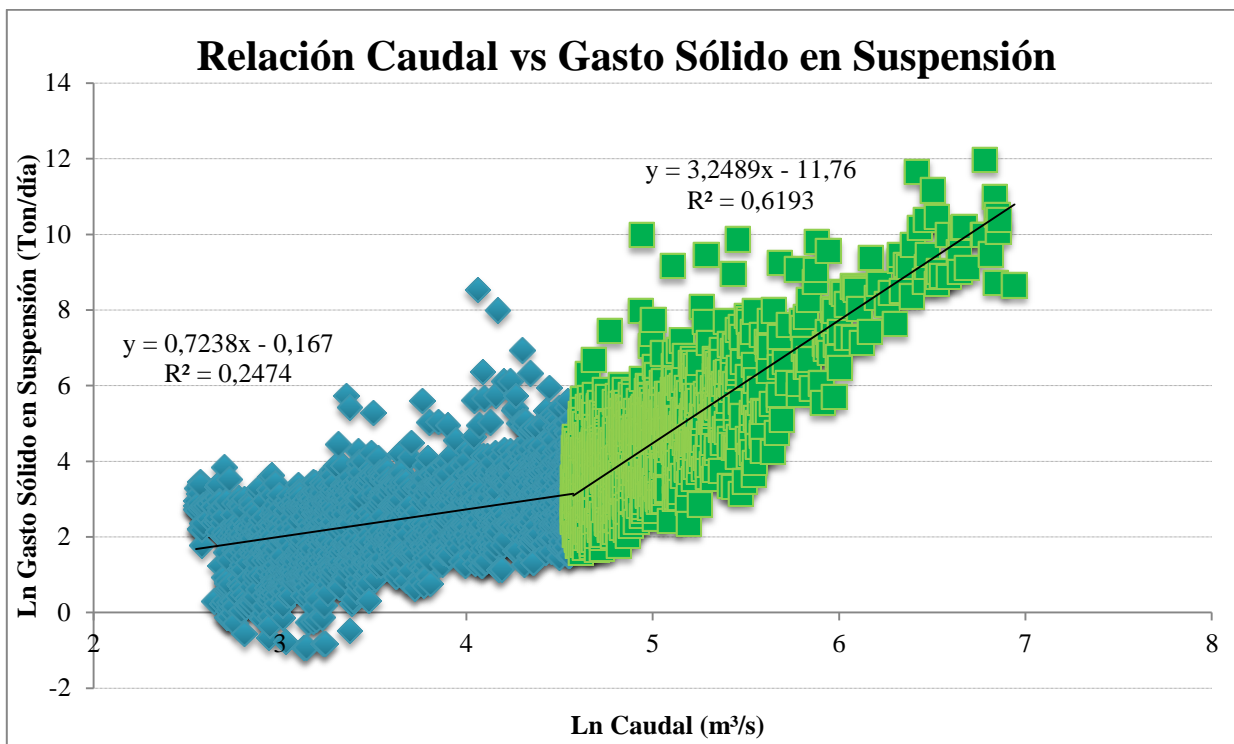


Figura 7.13 – Relación entre el caudal y gasto sólido en suspensión en la estación Río Ñuble en San Fabián.

Los modelos de la Curva de gasto sólido en suspensión corresponden a:

$$\text{Para } Q < 96.8 \text{ (m}^3/\text{s)} \quad G_{sd} = 0.846 Q_d^{0.723} \quad G_{sd} \text{ (Ton/día); } Q_d \text{ (m}^3/\text{s)}$$

$$\text{Para } Q > 96.8 \text{ (m}^3/\text{s)} \quad G_{sd} = 0.0000078 Q_d^{3.248} \quad G_{sd} \text{ (Ton/día); } Q_d \text{ (m}^3/\text{s)}$$

Finalmente, utilizando los caudales medios diarios de la estación, se construyó la curva general de duración de caudales, para posteriormente integrarla de manera discreta (intervalos) y de esta manera obtener el gasto sólido en suspensión medio anual y el caudal medio anual. En el Anexo 2 digital se encuentran las tablas de las curvas de duración de caudales mencionadas y en el Anexo 3 digital se muestra de manera gráfica la curva general de duración de caudales.

En función del análisis realizado, el caudal medio anual afluente y el gasto sólido medio anual para la estación Río Ñuble en San Fabián son:

$$\text{Caudal Medio Anual:} \quad 111,50 \text{ (m}^3/\text{s)}$$

$$\text{Gasto Sólido en Suspensión Medio Anual:} \quad 218.634 \text{ (Ton/año)}$$

Análisis Geomorfológico

Mediante la utilización del programa GrassGis, es posible realizar un análisis de la cuenca definida por la estación en estudio.

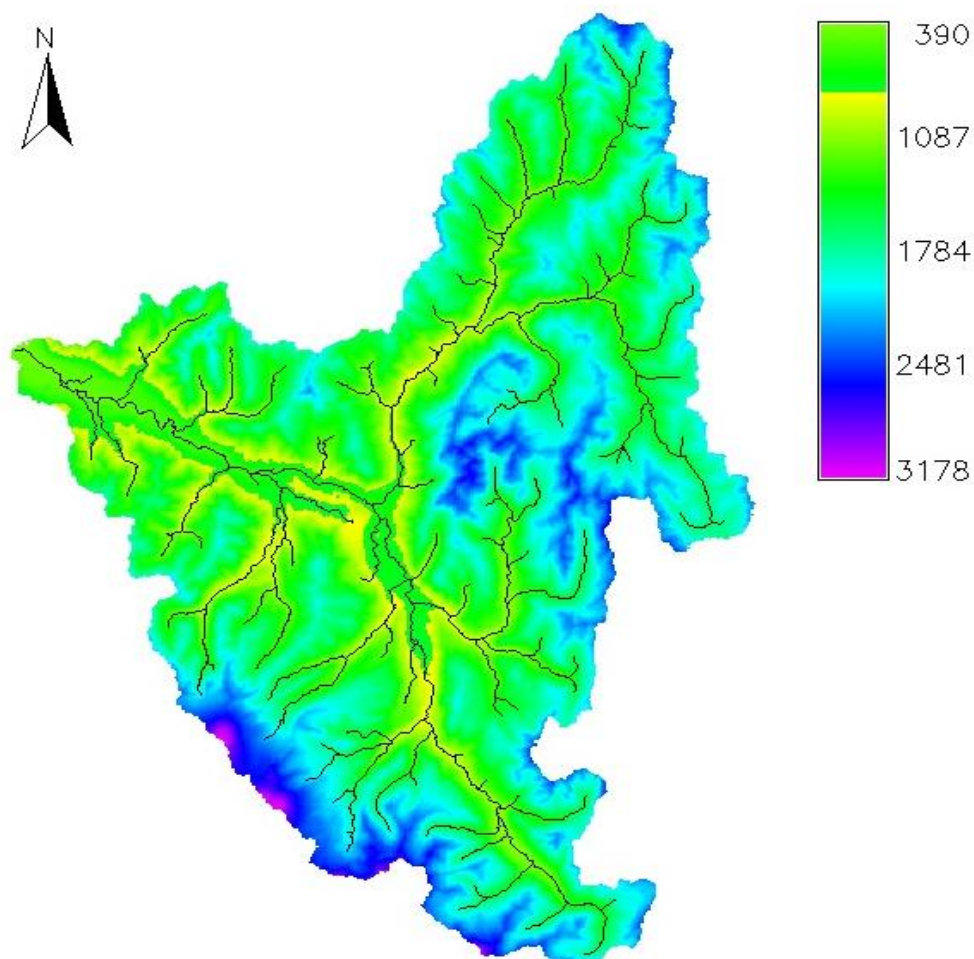


Figura 7.14 – Cuenca aportante de la estación Río Ñuble en San Fabián.

En la Tabla 7.14 se presentan los resultados entregados mediante la utilización del programa.

Tabla 7.14 – Resultados entregados por GrassGis para la estación Río Ñuble en San Fabián.

Área de la Cuenca	1.659 (Km ²)
Pendiente Media	43,14 (%)
Largo del Cauce	120,91 (Km)
Altura Máxima	3.178 (m)
Altura Mínima	390 (m)

7.1.5 Estación Río Chillán en camino a Confluencia

Ubicación de la estación.

La estación se ubica en el río Chillán a unos 2,4 (km) aguas arriba de la junta con el río Ñuble. El río Chillán presenta un régimen pluvial, y se pueden observar que los mayores caudales ocurren entre Mayo y Junio debido a importantes aportes pluviales, mientras que los menores caudales se observan en los meses de Enero y Marzo. En años secos, los mayores caudales pueden observarse entre Julio y Septiembre por lluvias invernales. En la Figura 7.15, se señala la ubicación de la estación.

Coordenadas (UTM): 739707 E ; 5943953 S. Zona: 18 H

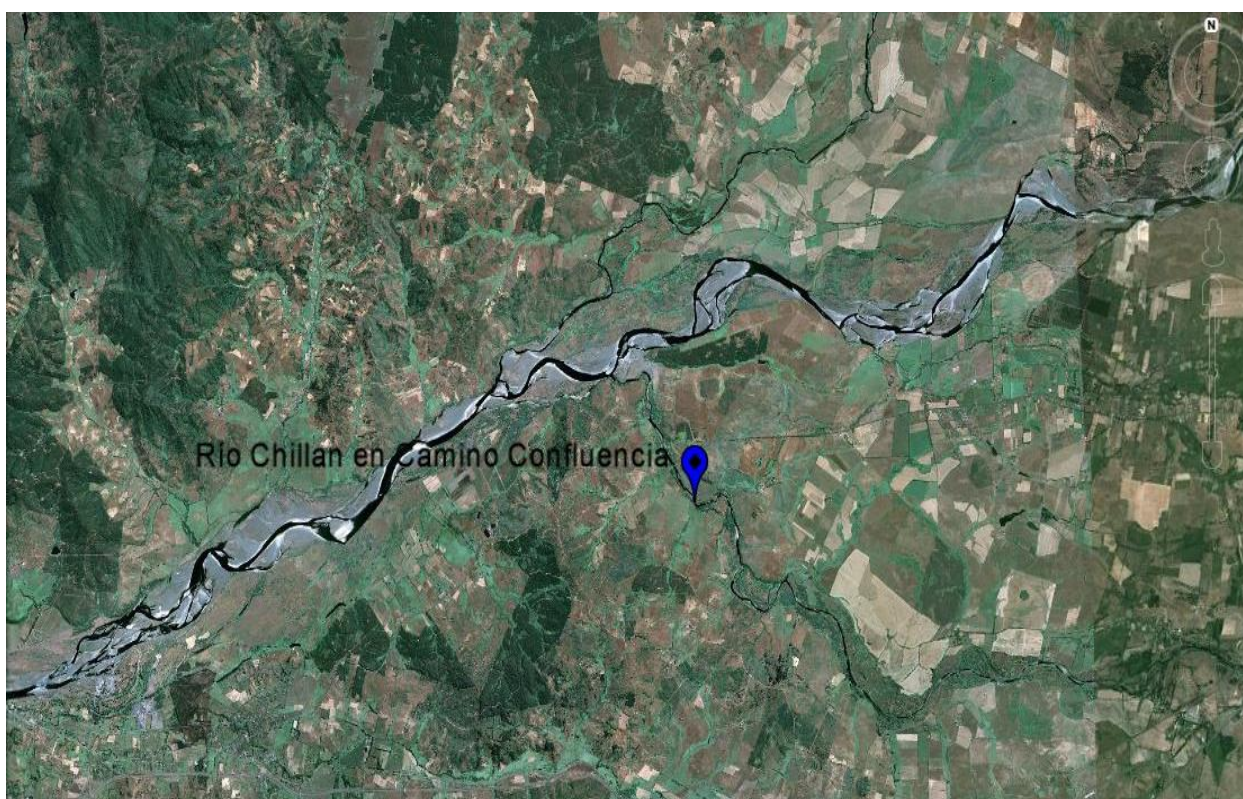


Figura 7.15 – Ubicación estación Río Chillan en camino a Confluencia.

Antecedentes Básicos

a) Fluviométricos

Se dispone de datos de series de caudales medios diarios observados de la estación Río Chillán en camino a Confluencia, controlada por la Dirección General de Aguas del M.O.P para el periodo que se muestra en la Tabla 7.15:

Tabla 7.15 – Registros fluviométricos Río Chillán en camino a Confluencia.

Nombre Estación	Periodo		Periodo	
	Desde	Hasta	Desde	Hasta
Río Chillán en Camino a Confluencia	10/1956	04/1959	11/1963	12/1973
	06/1961	11/1961	06/1975	05/1987
	07/1962	11/1962	07/1994	05/2012

b) Sedimentométricos

Se dispone de los registros sedimentométricos de la estación Río Chillán en camino a Confluencia. En la Tabla 7.16 se observan los tipos de muestreos realizados y los periodos de tiempo que abarcan los datos entregados por la D.G.A.

Tabla 7.16 – Registros sedimentométricos Río Chillán en camino a Confluencia.

Nombre Estación	Muestreos		Muestreos	
	Rutinarios		Integrados	
Río Chillán en Camino a Confluencia	Desde	Hasta	Desde	Hasta
	06/1985	11/1989	05/1985	11/1989
	08/1992	08/1992	05/1993	01/2009
	04/1993	12/2008		

Utilizando la metodología señalada en el punto 7.1.1, se obtuvo el modelo:

$$C_i = 2.02 C_r^{0.78}$$

Donde:

C_i = concentración de muestreos integrados (mg/l).

C_r = concentración de muestreos rutinarios (mg/l).

Posteriormente en la Figura 7.16 se muestra de manera gráfica la relación que existe entre el caudal líquido y gasto sólido en suspensión.

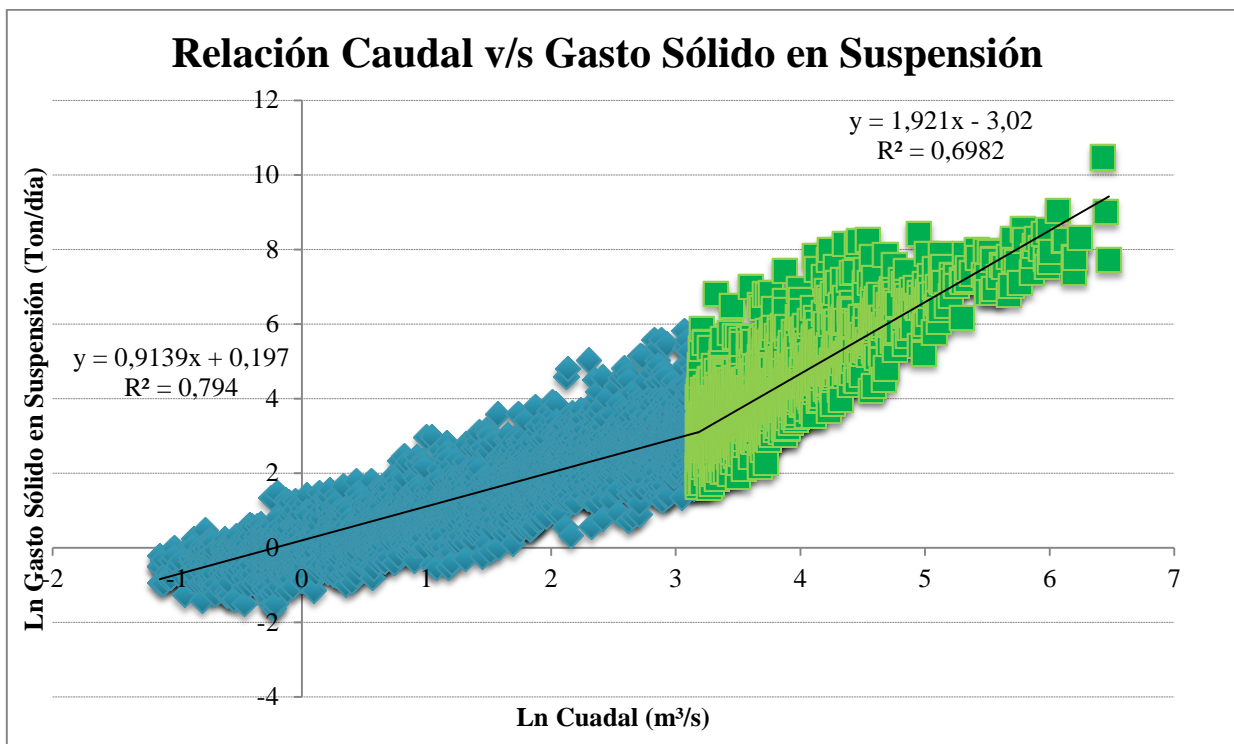


Figura 7.16 – Relación entre el caudal y gasto sólido en suspensión en la estación Río Chillán en camino a Confluencia.

Los modelos de la Curva de gasto sólido en suspensión corresponden a:

$$\text{Para } Q < 24.0 \text{ (m}^3\text{/s)} \quad G_{sd} = 1.2177 Q_d^{0.914} \quad G_{sd} \text{ (Ton/día); } Q_d \text{ (m}^3\text{/s)}$$

$$\text{Para } Q > 24.0 \text{ (m}^3\text{/s)} \quad G_{sd} = 0.048 Q_d^{1.921} \quad G_{sd} \text{ (Ton/día); } Q_d \text{ (m}^3\text{/s)}$$

Finalmente, utilizando los caudales medios diarios de la estación, se construyó la curva general de duración de caudales, para posteriormente integrarla de manera discreta (intervalos) y de esta manera obtener el gasto sólido en suspensión medio anual y el caudal medio anual. En el Anexo 2 digital se encuentran las tablas de las curvas de duración de caudales mencionadas y en el Anexo 3 digital se muestra de manera gráfica la curva general de duración de caudales.

En función de los análisis realizados, el caudal medio anual afluente y el gasto sólido medio anual para la estación Río Chillán en camino a Confluencia son:

$$\text{Caudal Medio Anual:} \quad 20,90 \text{ (m}^3\text{/s)}$$

$$\text{Gasto Sólido en Suspensión Medio Anual:} \quad 22.140 \text{ (T/año)}$$

Análisis Geomorfológico

Mediante la utilización del programa GrassGis, es posible realizar un análisis de la cuenca definida por la estación en estudio.

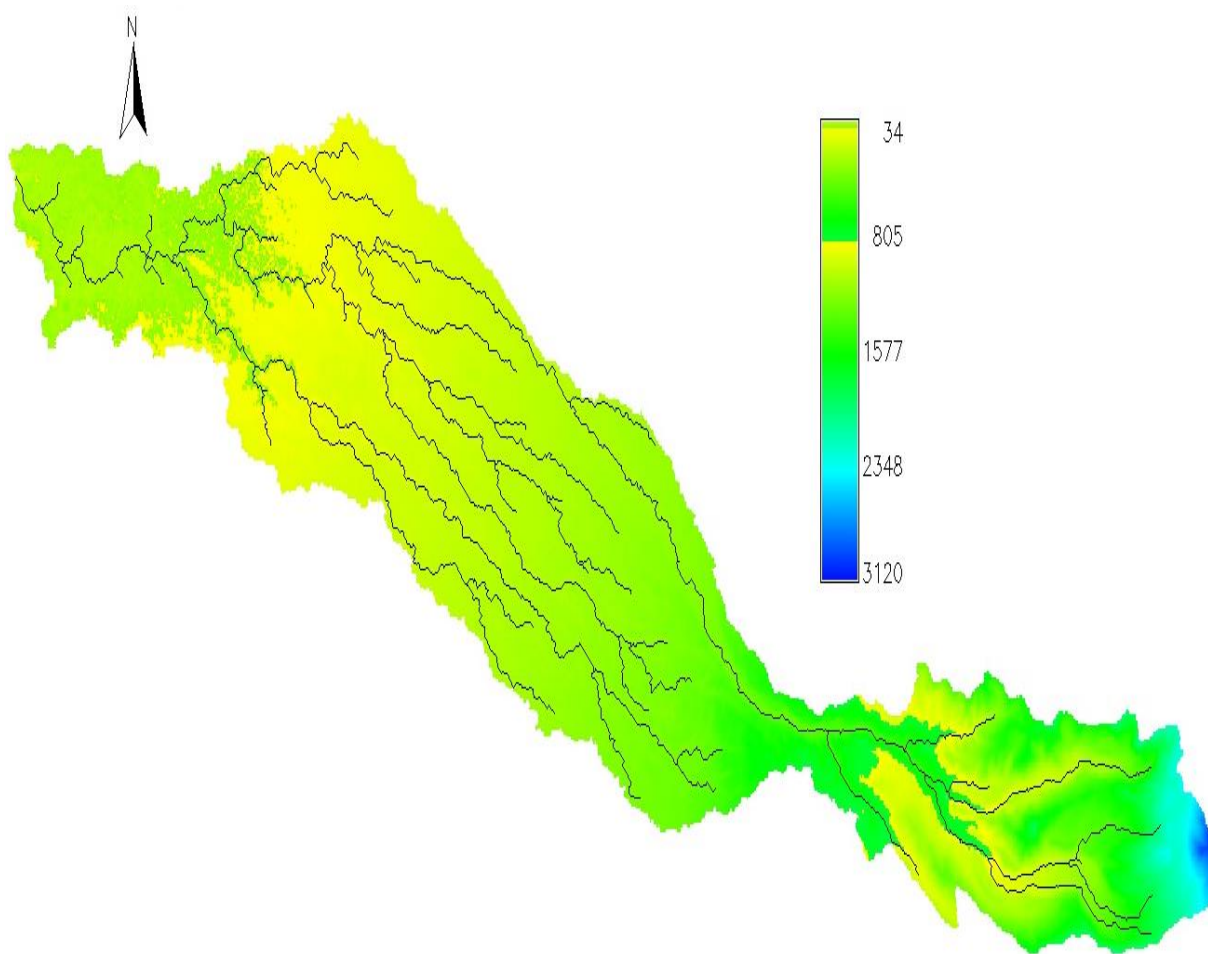


Figura 7.17 – Cuenca aportante de la estación Río Chillán en camino a Confluencia.

En la Tabla 7.17 se presentan los resultados entregados mediante la utilización del programa.

Tabla 7.17 – Resultados entregados por GrassGis para la estación Río Chillán en camino a Confluencia

Área de la Cuenca	750 (Km ²)
Pendiente Media	12,24 (%)
Largo del Cauce	133,49 (Km)
Altura Máxima	3.120 (m)
Altura Mínima	34 (m)

7.1.6 Estación Río Itata en Balsa Nueva Aldea. (*)²

Ubicación de la estación.

Esta estación se ubica en el río Itata, en un punto cercano a su desembocadura, y se encuentra aproximadamente a 1,5 (Km) aguas arriba de la unión con el río Ñuble. El río Itata presenta un régimen pluvial teniendo las mayores alzas de caudales entre los meses de Junio y Agosto, viéndose caudales que superan los 1000 (m^3/s), debido a grandes aportes pluviales, mientras que los mínimos caudales se ven entre los meses de Diciembre y Abril. En la Figura 7.18, se señala la ubicación de la estación.

Coordenadas (UTM): 727845 E ; 5940257 S. Zona: 18 H

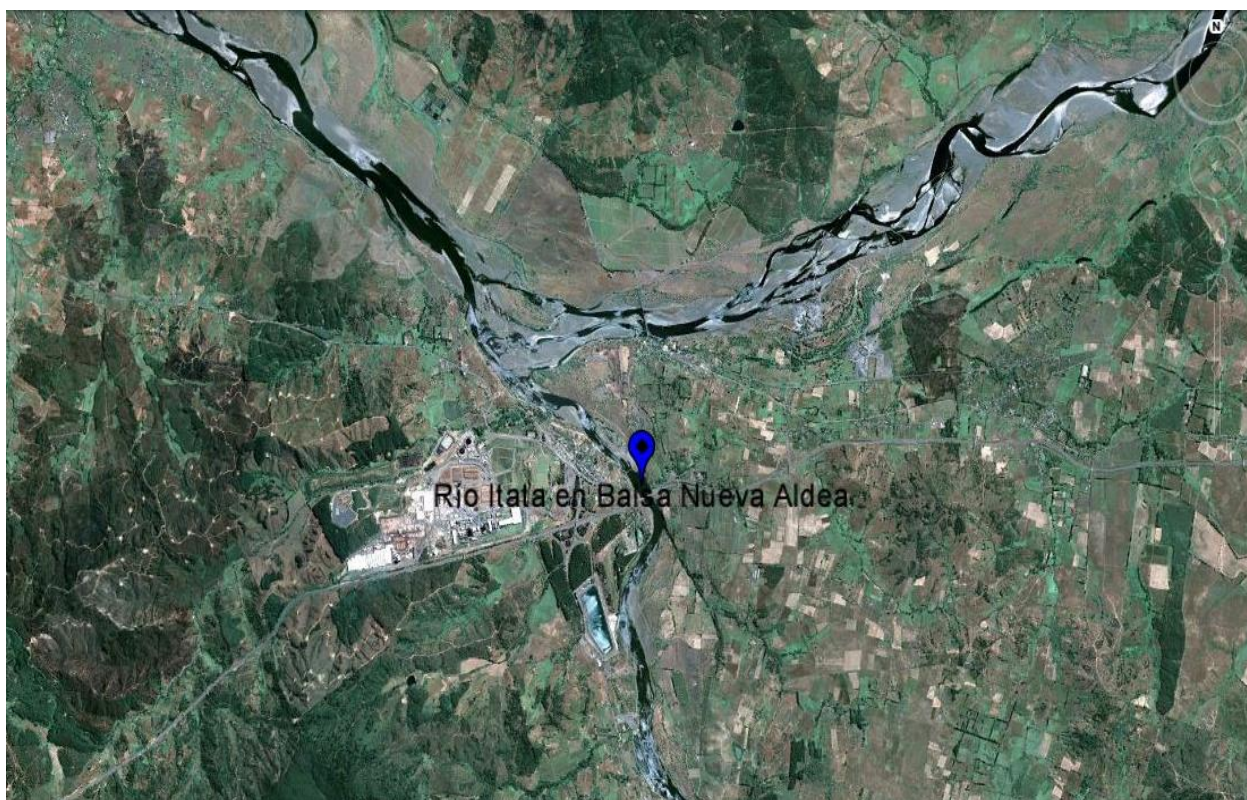


Figura 7.18 - Ubicación estación Río Itata en Balsa Nueva Aldea.

² Aguas arriba este río cuenta con una interrupción debido a un conglomerado de piedras (al parecer natural), en base a lo que se observa en Google Earth.

Antecedentes Básicos

a) Fluviométricos

Se dispone de datos de series de caudales medios diarios observados de la estación Río Itata en balsa Nueva Aldea controlada por la Dirección General de Aguas del M.O.P para el periodo mostrado en la Tabla 7.18:

Tabla 7.18 – Registros fluviométricos Río Itata en Balsa Nueva Aldea.

Nombre Estación	Periodo		Periodo	
	Desde	Hasta	Desde	Hasta
Río Itata en Balsa Nueva Aldea	09/1956	12/1973	06/1995	10/1998
	04/1974	09/1993	05/1999	05/2012
	06/1994	09/1994		

b) Sedimentométricos

Se dispone de los registros sedimentométricos de la estación Río Itata en Balsa Nueva Aldea. En la Tabla 7.19 se observan los tipos de muestreos realizados y los periodos de tiempo que abarcan los datos entregados por la D.G.A.

Tabla 7.19 – Registros sedimentométricos Río Itata en Balsa Nueva Aldea.

Nombre Estación	Muestreos		Muestreos	
	Rutinarios		Integrados	
Río Itata en Balsa Nueva Aldea	Desde	Hasta	Desde	Hasta
	06/1985	11/1989	05/1985	11/1989
	08/1992	08/1992	05/1993	12/2008
	04/1993	12/2008		

Utilizando la metodología señalada en el punto 7.1.1, se obtuvo el modelo:

$$C_i = 2.02 C_r^{0.65}$$

Donde:

C_i = concentración de muestreos integrados (mg/l).

C_r = concentración de muestreos rutinarios (mg/l).

Posteriormente en la Figura 7.19 se muestra de manera gráfica la relación que existe entre el caudal líquido y gasto sólido en suspensión.

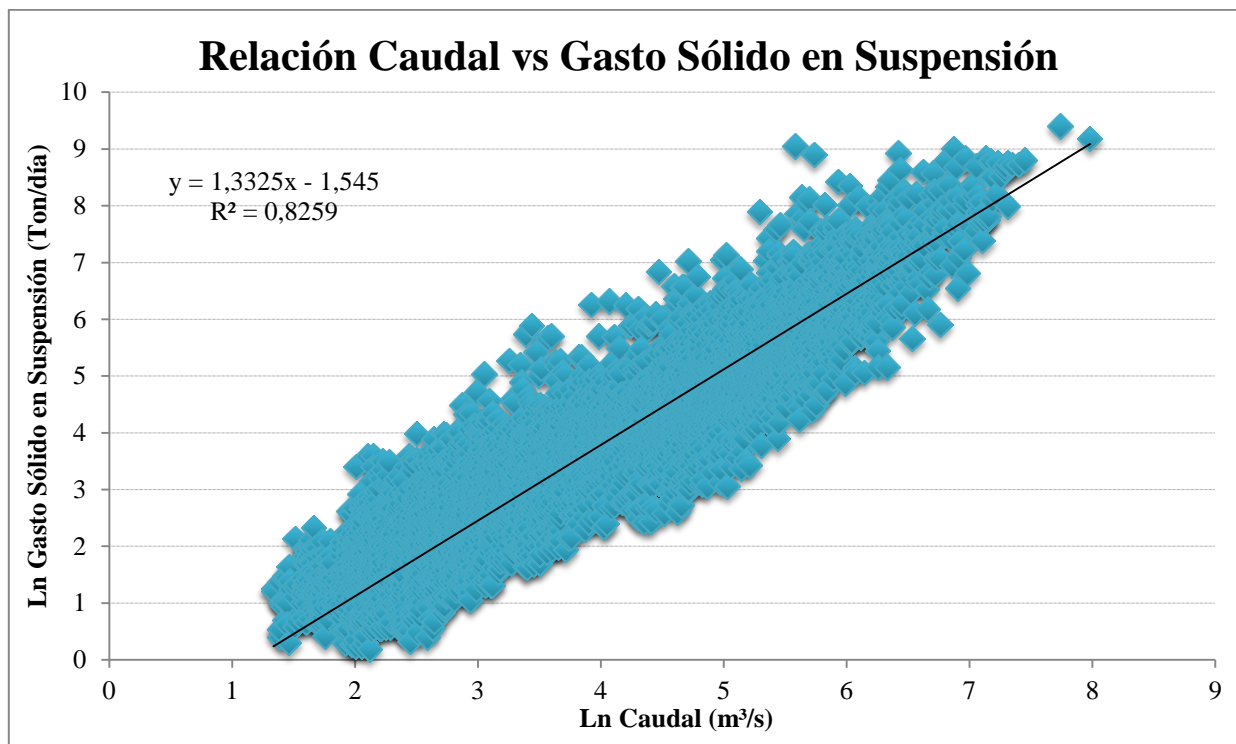


Figura 7.19 – Relación entre el caudal y gasto sólido en suspensión en la estación Río Itata en Balsa Nueva Aldea.

El modelo de la Curva de gasto sólido en suspensión es:

$$G_{sd} = 0.2133 Q_d^{1.332} \quad G_{sd} \text{ (Ton/día); } Q_d \text{ (m}^3\text{/s)}$$

Finalmente, utilizando los caudales medios diarios de la estación, se construyó la curva general de duración de caudales, para posteriormente integrarla de manera discreta (intervalos) de esta manera se obtienen el gasto sólido en suspensión medio anual y el caudal medio anual. En el Anexo 2 digital se encuentran las tablas de las curvas de duración de caudales mencionadas y en el Anexo 3 digital se muestra de manera gráfica la curva general de duración de caudales.

En función de los análisis realizados, el caudal medio anual afluente y el gasto sólido medio anual para la estación Río Itata en Balsa Nueva Aldea son:

Caudal Medio Anual: 135,39 (m³/s)

Gasto Sólido en Suspensión Medio Anual: 72.641 (Ton/año)

Análisis Geomorfológico

Mediante la utilización del programa GrassGis, es posible realizar un análisis de la cuenca definida por la estación en estudio.

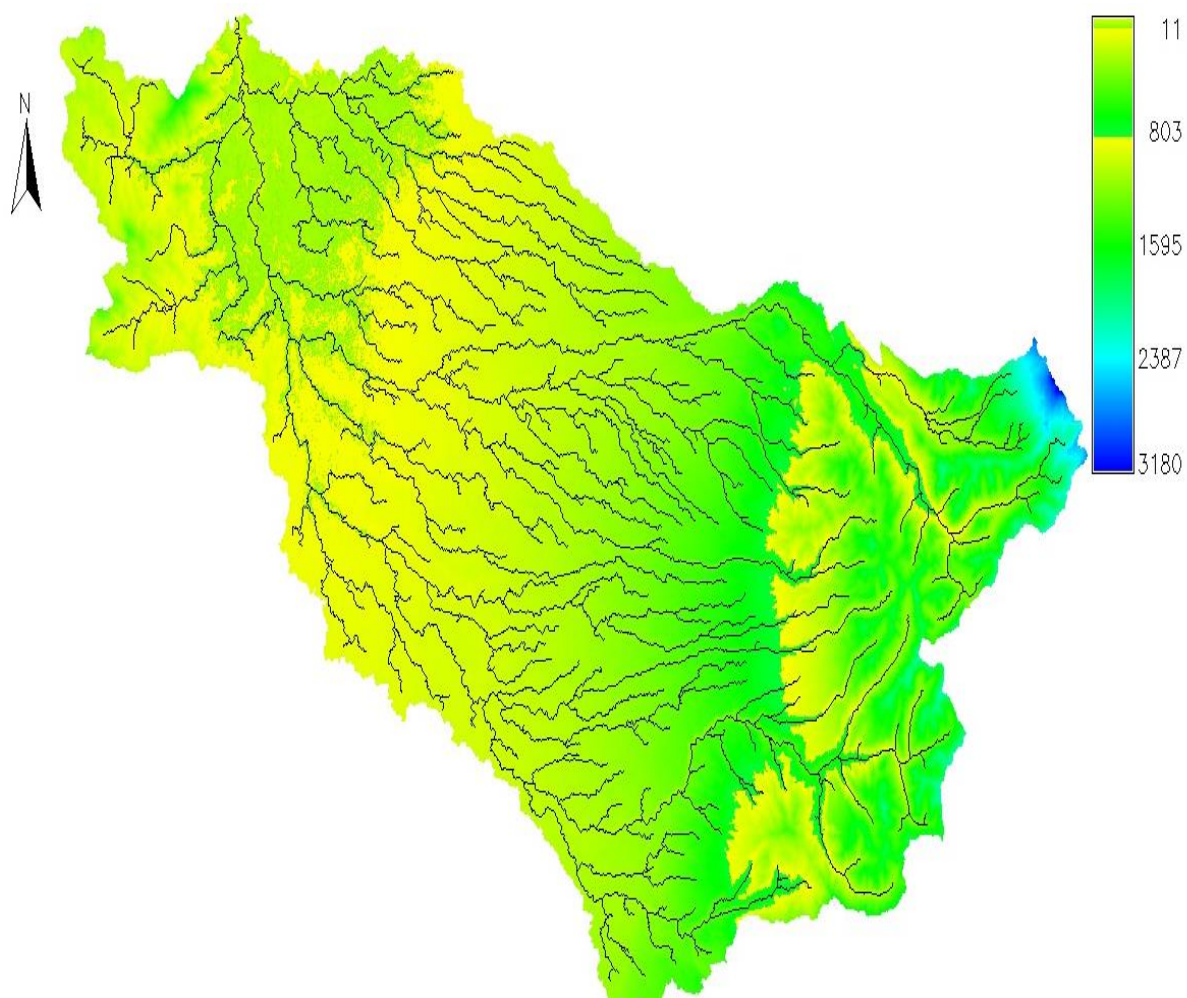


Figura 7.20 – Cuenca aportante de la estación Río Itata en Balsa Nueva Aldea.

En la Tabla 7.20 se presentan los resultados entregados mediante la utilización del programa.

Tabla 7.20 – Resultados entregados por GrassGis para la estación Río Itata en Balsa Nueva Aldea.

Área de la Cuenca	4.435 (Km ²)
Pendiente Media	13,63 (%)
Largo del Cauce	198,43 (Km)
Altura Máxima	3.180 (m)
Altura Mínima	11 (m)

7.1.7 Estación Río Diguillín en San Lorenzo (atacalco).

Ubicación de la estación.

Esta estación se ubica en el río Diguillín y se encuentra cercana al cerro San Lorenzo que tiene una altura que supera los 3000 (m). Es por su cercanía a este cerro el nombre que se le otorgo a la estación. El río Diguillín presenta un régimen pluvial, y se presenta los mayores caudales entre los meses de Mayo y Julio, mientras que los menores caudales se encuentran entre los meses de Enero y Abril. En general este río no consta con grandes variaciones de caudales. En la Figura 7.21, se señala la ubicación de la estación.

Coordenadas (UTM): 270045 E ; 5910880 S. Zona: 19 H

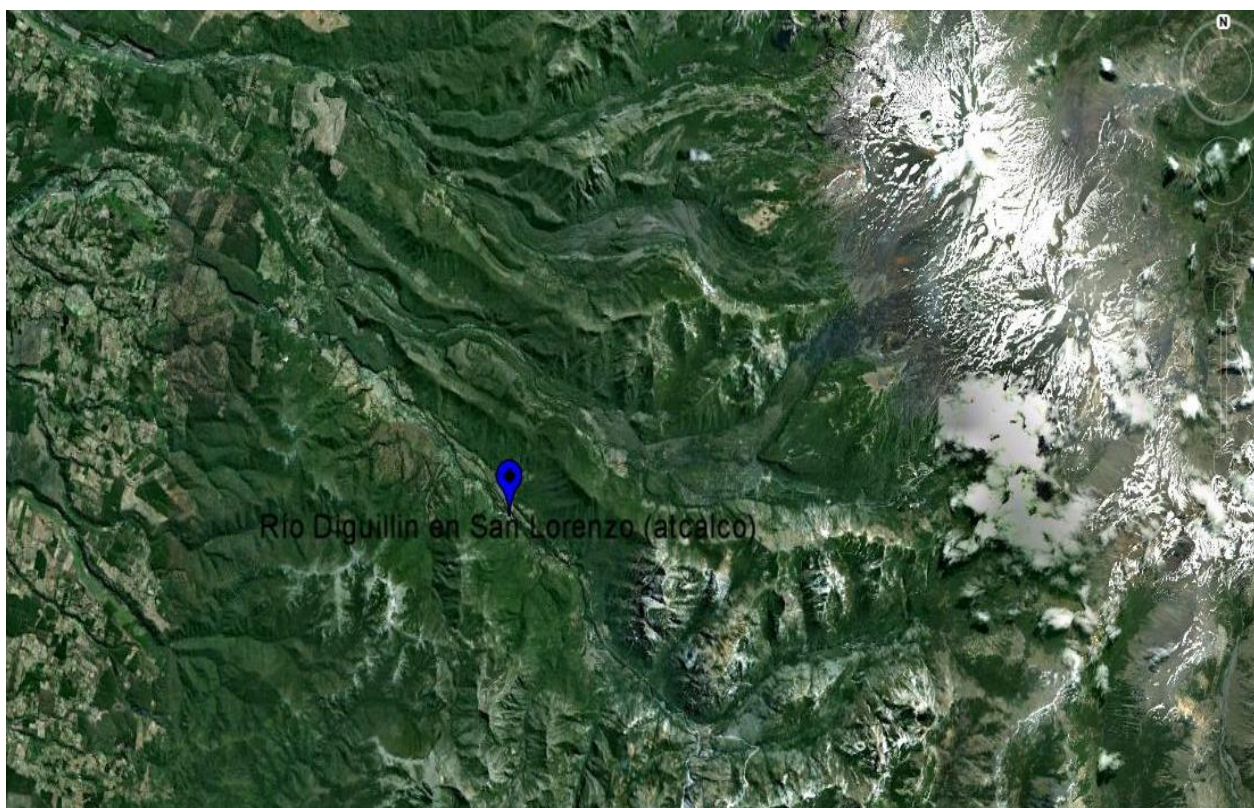


Figura 7.21 – Ubicación estación Río Diguillín en San Lorenzo (atacalco).

Antecedentes Básicos

a) Fluviométricos

Se dispone de datos de series de caudales medios diarios observados de la estación Río Diguillín en San Lorenzo (atacalco) controlada por la Dirección General de Aguas del M.O.P para los periodos señalados en la Tabla 7.21:

Tabla 7.21 – Registros fluviométricos Río Diguillín en San Lorenzo (atacalco).

Nombre Estación	Periodo		Periodo	
	Desde	Hasta	Desde	Hasta
Río Diguillín en San Lorenzo (atacalco)	06/1946	02/1962	04/1979	01/1981
	05/1962	12/1966	04/1981	03/2012
	04/1967	02/1979	05/2012	05/2012

b) Sedimentométricos

Se dispone de los registros sedimentométricos de la estación Río Diguillín en San Lorenzo (atacalco). En la Tabla 7.22 se observan los tipos de muestreos realizados y los periodos de tiempo que abarcan los datos entregados por la D.G.A.

Tabla 7.22 – Registros sedimentométricos Río Diguillín en San Lorenzo (atacalco).

Nombre Estación	Muestreos		Muestreos	
	Rutinarios		Integrados	
Río Diguillín en San Lorenzo (atacalco)	Desde	Hasta	Desde	Hasta
	05/1965	12/1966	06/1985	11/1989
	06/1985	11/1989	05/1993	01/2009
	01/2000	09/2003		

Utilizando la metodología señalada en el punto 7.1.1, se obtuvo el modelo:

$$C_i = 1.71 C_r^{0.63}$$

Donde:

C_i = concentración de muestreos integrados (mg/l).

C_r = concentración de muestreos rutinarios (mg/l).

Posteriormente en la Figura 7.22 se muestra de manera gráfica la relación que existe entre el caudal líquido y gasto sólido en suspensión.

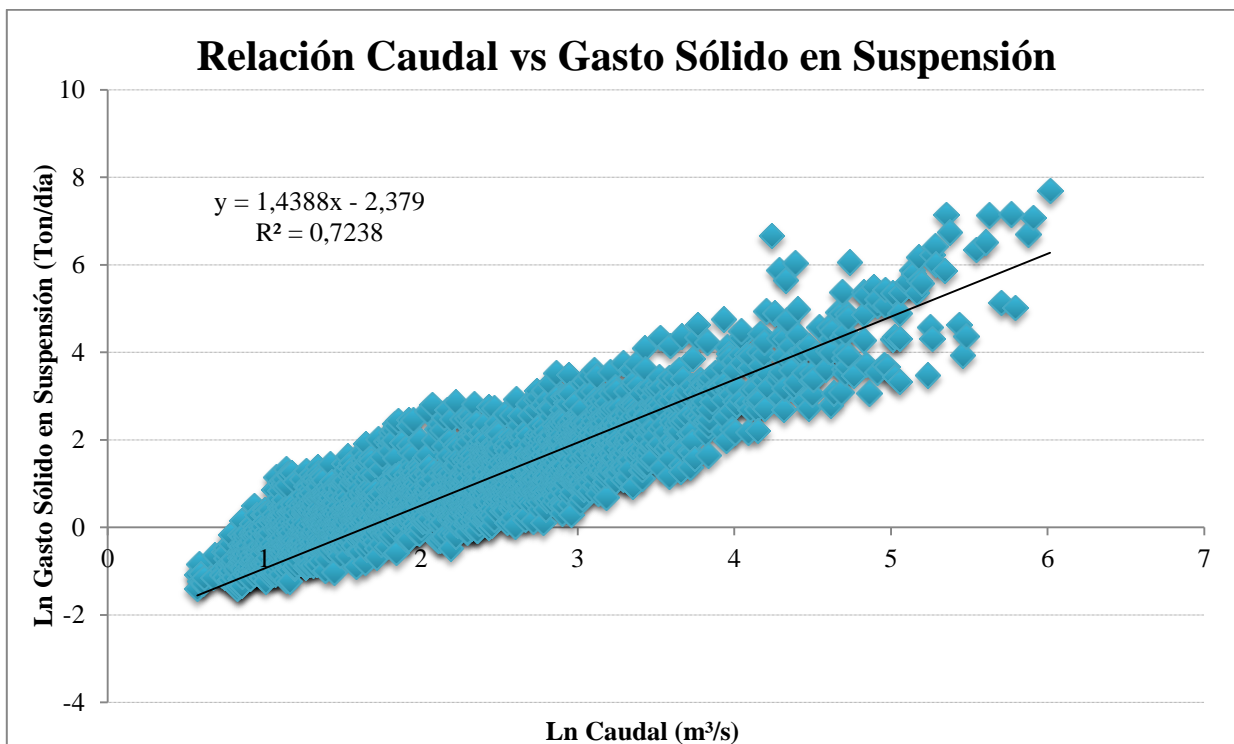


Figura 7.22 – Relación entre el caudal y gasto sólido en suspensión en la estación Río Diguillín en San Lorenzo (atacalco).

El modelo de la Curva de gasto sólido en suspensión es:

$$G_{sd} = 0.0926 Q_d^{1.438} \quad G_{sd} \text{ (Ton/día); } Q_d \text{ (m}^3\text{/s)}$$

Finalmente, utilizando los caudales medios diarios de la estación, se construyó la curva general de duración de caudales, para posteriormente integrarla de manera discreta (intervalos), de esta manera se obtienen el gasto sólido en suspensión medio anual y el caudal medio anual. En el Anexo 2 digital se encuentran las tablas de las curvas de duración de caudales mencionadas y en el Anexo 3 digital se muestra de manera gráfica la curva general de duración de caudales.

En función de los análisis realizados, el caudal medio anual afluente y el gasto sólido medio anual para la estación Río Diguillín en San Lorenzo (atacalco) son:

Caudal Medio Anual: 16,91 (m³/s)

Gasto Sólido en Suspensión Medio Anual: 2.929 (Ton/año)

Análisis Geomorfológico

Mediante la utilización del programa GrassGis, es posible realizar un análisis de la cuenca definida por la estación en estudio.

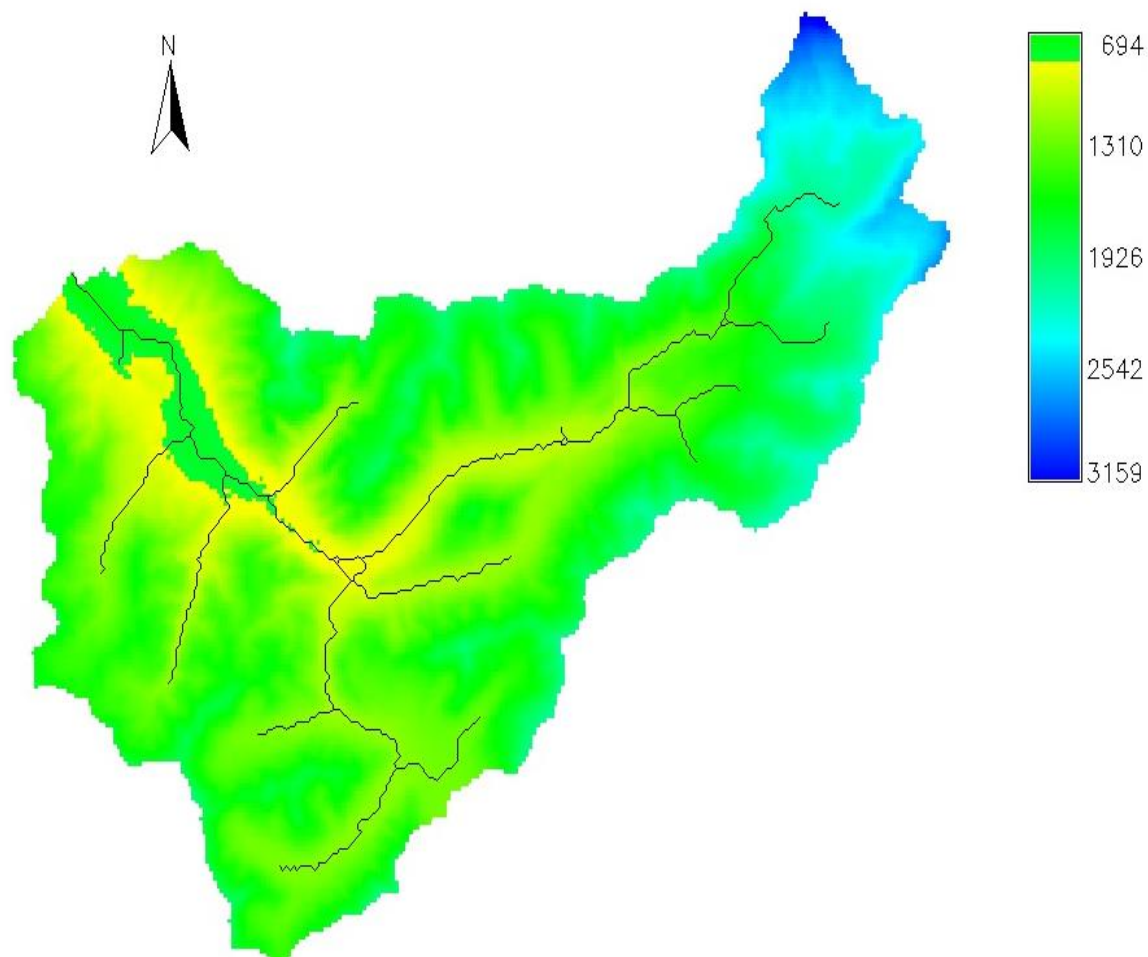


Figura 7.23 – Cuenca aportante de la estación Río Diguillín en San Lorenzo (atacalco).

En la Tabla 7.23 se presentan los resultados entregados mediante la utilización del programa.

Tabla 7.23 – Resultados entregados por GrassGis para la estación Río Diguillín en San Lorenzo (atacalco).

Área de la Cuenca	207 (Km ²)
Pendiente Media	43,54 (%)
Largo del Cauce	33,73 (Km)
Altura Máxima	3.159 (m)
Altura Mínima	694 (m)

7.1.8 Estación Río Itata en Cholguan.

Ubicación de la estación.

Esta estación se encuentra en el río Itata, a una distancia no muy lejana del origen del río. Este río cuenta con un régimen pluvial y presenta en este punto los mayores caudales entre los meses de Mayo y Julio, mientras que presenta los menores caudales entre los meses de Enero y Marzo. En la Figura 7.24, se señala la ubicación de la estación.

Coordenadas (UTM): 760186 E ; 5883664 S. Zona: 18 H

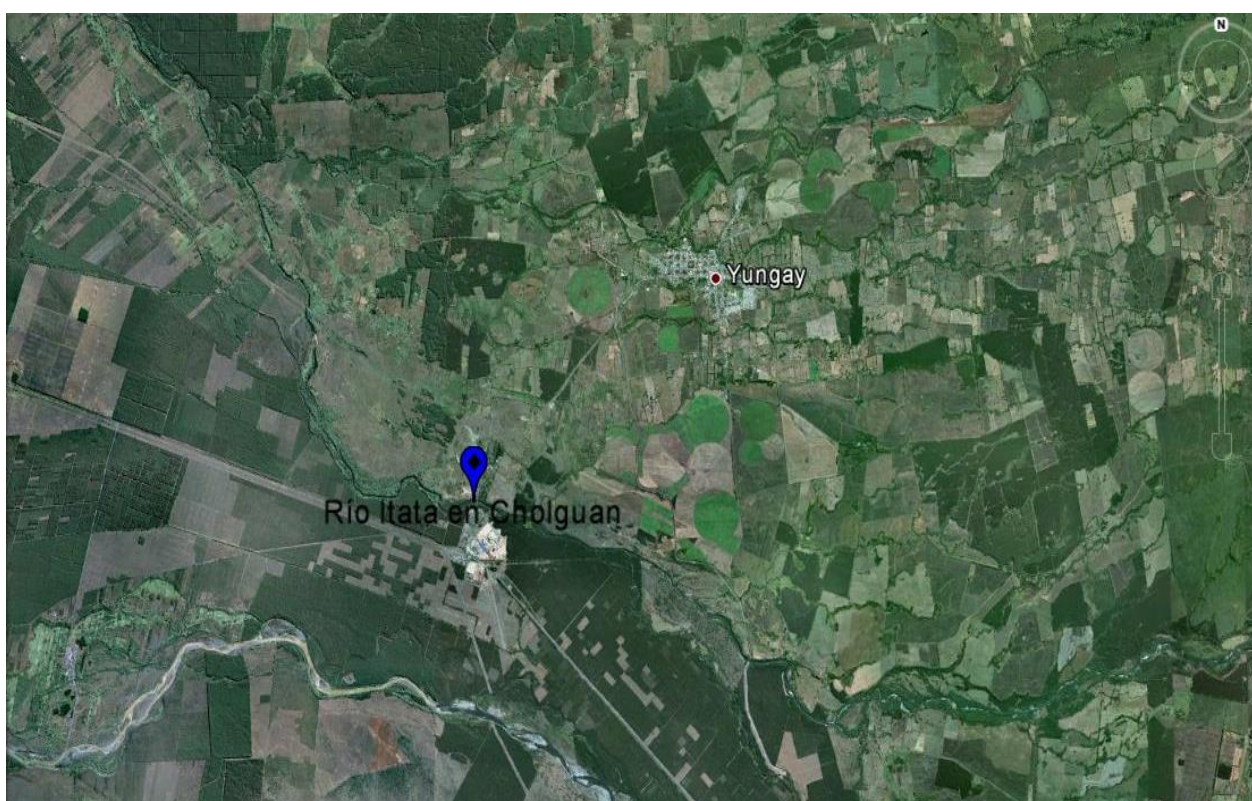


Figura 7.24 - Ubicación estación Río Itata en Cholguan.

Antecedentes Básicos

a) Fluviométricos

Se dispone de datos de series de caudales medios diarios observados de la estación Río Itata en Cholguan controlada por la Dirección General de Aguas del M.O.P para los periodos señalados en la Tabla 7.24:

Tabla 7.24 – Registros fluviométricos Río Itata en Cholguan.

Nombre Estación	Periodo		Periodo	
	Desde	Hasta	Desde	Hasta
Río Itata en Cholguan	01/1924	06/1925	04/1967	03/1971
	09/1925	09/1925	06/1971	05/1972
	12/1925	02/1928	07/1972	05/1974
	04/1928	09/1933	11/1977	11/1978
	10/1936	03/1960	04/1979	10/1980
	11/1960	12/1960	02/1981	09/2009
	06/1961	02/1962	12/2009	03/2012
	07/1962	02/1967		

b) Sedimentométricos

Se dispone de los registros sedimentométricos de la estación Río Itata en Cholguan. En la Tabla 7.25 se observan los tipos de muestreos realizados y los periodos de tiempo que abarcan los datos entregados por la D.G.A.

Tabla 7.25 – Registros sedimentométricos Río Itata en Cholguan.

Nombre Estación	Muestreos		Muestreos	
	Rutinarios		Integrados	
Río Itata en Cholguan	Desde	Hasta	Desde	Hasta
	11/1985	11/1989	05/1985	11/1989
	08/1992	08/1992	05/1993	12/2008
	04/1993	04/2006		

Utilizando la metodología señalada en el punto 7.1.1, se obtuvo el modelo:

$$C_i = 1.78 C_r^{0.7}$$

Donde:

C_i = concentración de muestreos integrados (mg/l).

C_r = concentración de muestreos rutinarios (mg/l).

Posteriormente en la Figura 7.25 se muestra de manera gráfica la relación que existe entre el caudal líquido y gasto sólido en suspensión.

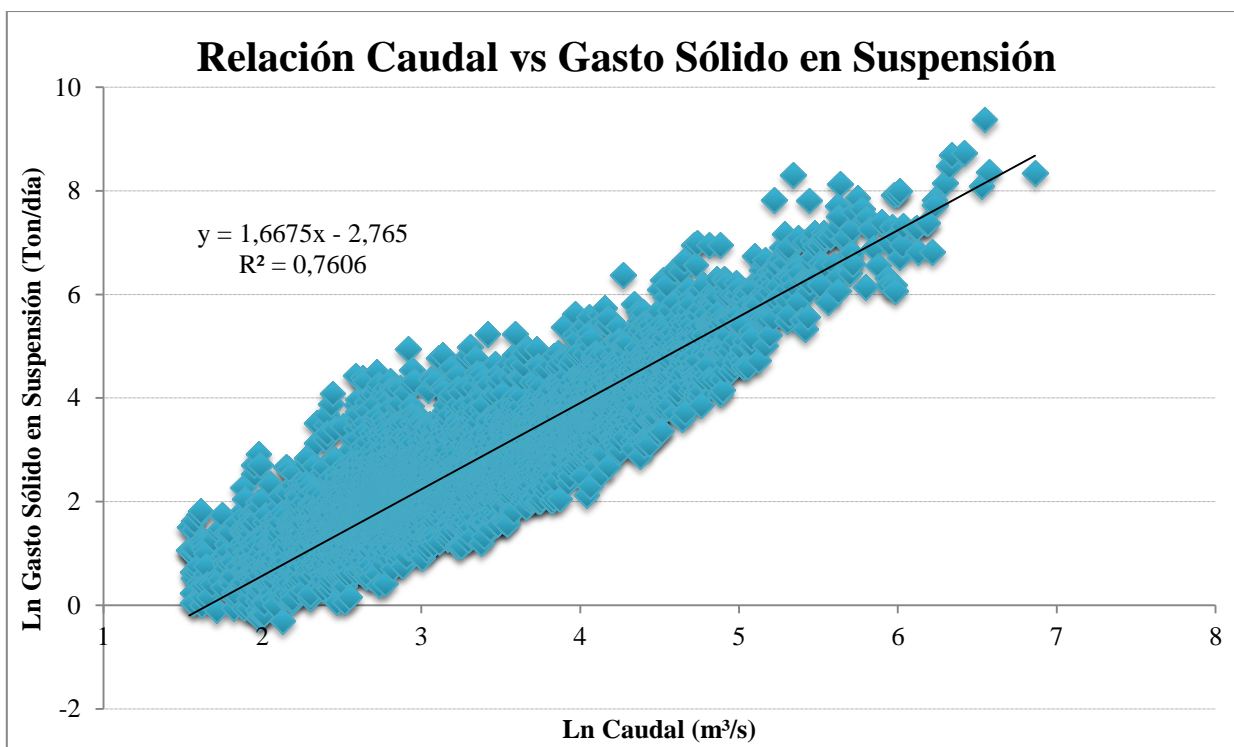


Figura 7.25 – Relación entre el caudal y gasto sólido en suspensión en la estación Río Itata en Cholguan.

El modelo de la Curva de gasto sólido en suspensión es:

$$G_{sd} = 0.0629 Q_d^{1.667} \quad G_{sd} \text{ (Ton/día); } Q_d \text{ (m}^3\text{/s)}$$

Finalmente, utilizando los caudales medios diarios de la estación, se construyó la curva general de duración de caudales, para posteriormente integrarla de manera discreta (intervalos), de esta manera se obtienen el gasto sólido en suspensión medio anual y el caudal medio anual. En el Anexo 2 digital se encuentran las tablas de las curvas de duración de caudales mencionadas y en el Anexo 3 digital se muestra de manera gráfica la curva general de duración de caudales.

En función de los análisis realizados, el caudal medio anual afluente y el gasto sólido medio anual para la estación Río Itata en Cholguan son:

Caudal Medio Anual: 44,71 (m³/s)

Gasto Sólido en Suspensión Medio Anual: 20.518 (Ton/año)

Análisis Geomorfológico

Mediante la utilización del programa GrassGis, es posible realizar un análisis de la cuenca definida por la estación en estudio.

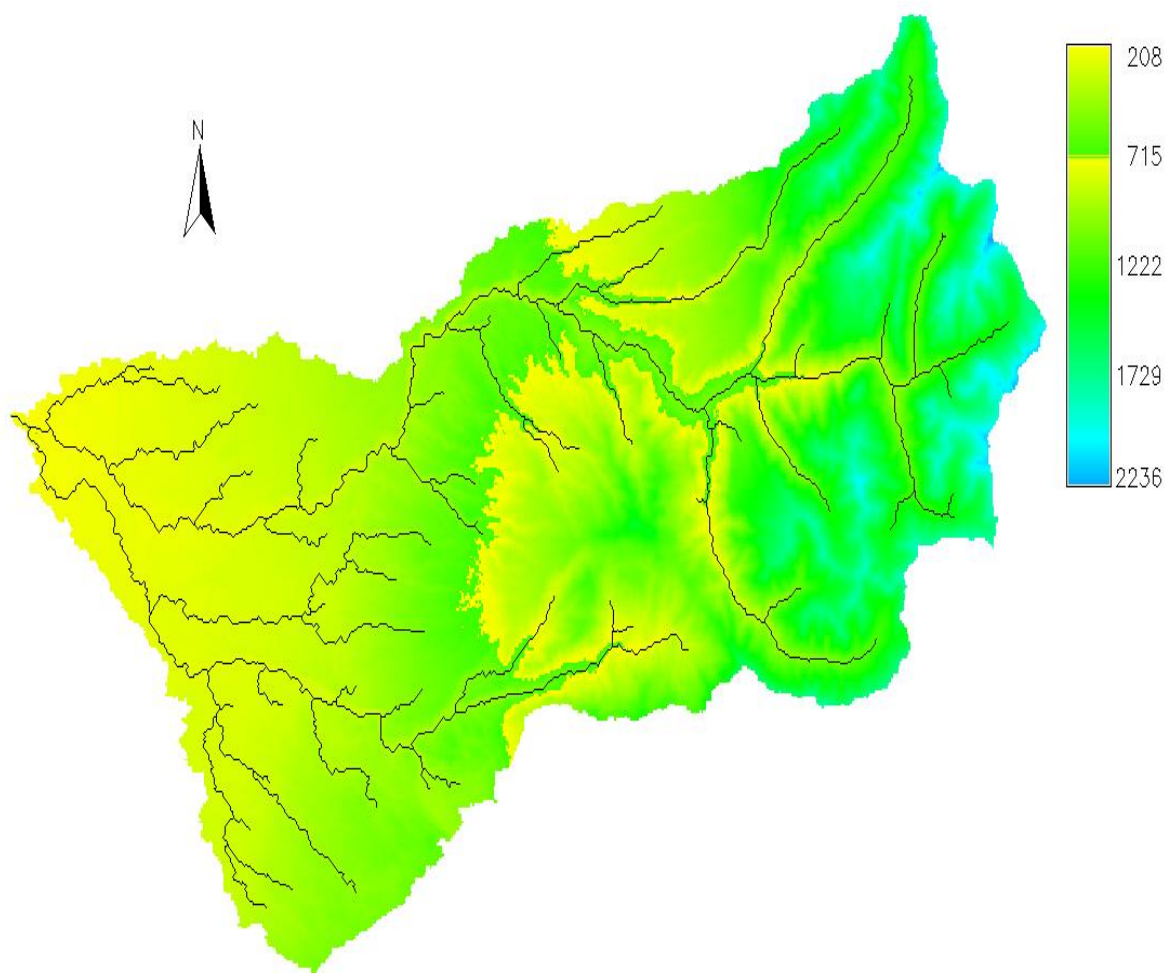


Figura 7.26 – Cuenca aportante de la estación Río Itata en Cholguan.

En la Tabla 7.26 se presentan los resultados entregados mediante la utilización del programa.

Tabla 7.26 – Resultados entregados por GrassGis para la estación Río Itata en Cholguan.

Área de la Cuenca	856 (Km ²)
Pendiente Media	22,81 (%)
Largo del Cauce	76,88 (Km)
Altura Máxima	2.236 (m)
Altura Mínima	208 (m)

7.1.9 Estación Río Vergara en Tijeral.

Ubicación de la estación.

Esta estación se ubica en el río Vergara, y se encuentra cercana a la línea divisoria entre la región del Biobío y la Araucanía. El río surge de la unión de los ríos Rehue y Picoiqué y presenta un régimen pluvial, teniendo sus máximos caudales entre los meses de Mayo y Agosto, mientras que los menores caudales se observan entre los meses de Diciembre y Febrero. En la Figura 7.27, se observa la ubicación de la estación.

Coordenadas (UTM): 709795 E ; 5821318 S. Zona: 18 H



Figura 7.27 - Ubicación estación Río Vergara en Tijeral.

Antecedentes Básicos

a) Fluviométricos

Se dispone de datos de series de caudales medios diarios observados de la estación Río Vergara en Tijeral controlada por la Dirección General de Aguas del M.O.P para los periodos mostrados en la Tabla 7.27:

Tabla 7.27 – Registros fluviométricos Río Vergara en Tijeral.

Nombre Estación	Periodo		Periodo	
	Desde	Hasta	Desde	Hasta
Río Vergara en Tijeral	01/1970	08/1971	10/2000	07/2008
	03/1972	06/2000	12/2008	11/2011

b) Sedimentométricos

Se dispone de los registros sedimentométricos de la estación Río Vergara en Tijeral. En la Tabla 7.28 se observan los tipos de muestreos realizados y los periodos de tiempo que abarcan los datos entregados por la D.G.A.

Tabla 7.28 – Registros sedimentométricos Río Vergara en Tijeral.

Nombre Estación	Muestreos		Muestreos	
	Rutinarios		Integrados	
Río Vergara en Tijeral	Desde	Hasta	Desde	Hasta
	03/1985	09/1989	03/1985	07/1989
	07/1992	08/1992	08/1993	09/1992
	01/1993	01/2009	02/1993	02/2009

Utilizando la metodología señalada en el punto 7.1.1, se obtuvo el modelo:

$$C_i = 1.16 C_r^{0.92}$$

Donde:

C_i = concentración de muestreos integrados (mg/l).

C_r = concentración de muestreos rutinarios (mg/l).

Posteriormente en la Figura 7.28 se muestra de manera gráfica la relación que existe entre el caudal líquido y gasto sólido en suspensión.

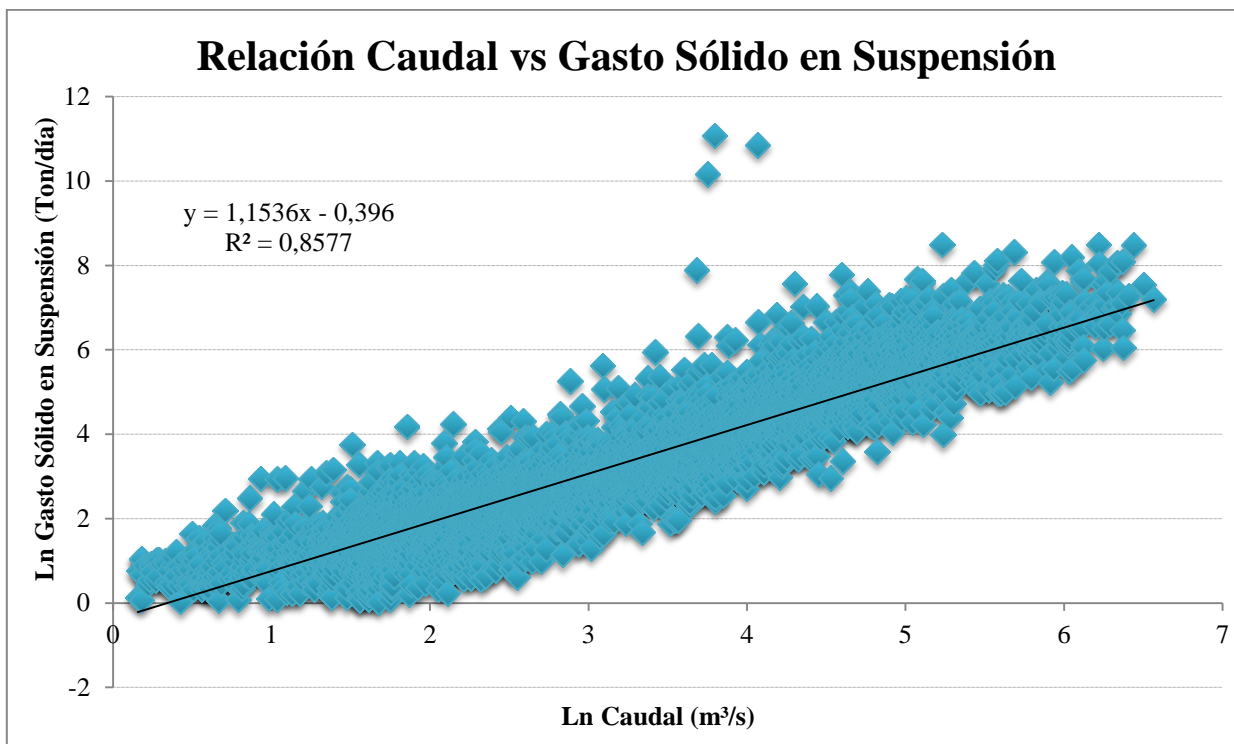


Figura 7.28 – Relación entre el caudal y gasto sólido en suspensión en la estación Río Vergara en Tijeral.

El modelo de la Curva de gasto sólido en suspensión es:

$$G_{sd} = 0.673 Q_d^{1.153} \quad G_{sd} \text{ (Ton/día); } Q_d \text{ (m}^3\text{/s)}$$

Finalmente, utilizando los caudales medios diarios de la estación, se construyó la curva general de duración de caudales, para posteriormente integrarla de manera discreta (intervalos), de esta manera se obtienen el gasto sólido en suspensión medio anual y el caudal medio anual. En el Anexo 2 digital se encuentran las tablas de las curvas de duración de caudales mencionadas y en el Anexo 3 digital se muestra de manera gráfica la curva general de duración de caudales.

En función de los análisis realizados, el caudal medio anual afluente y el gasto sólido medio anual para la estación Río Vergara en Tijeral son:

Caudal Medio Anual: 54,72 (m³/s)

Gasto Sólido en Suspensión Medio Anual: 27.873 (T/año)

Análisis Geomorfológico

Mediante la utilización del programa GrassGis, es posible realizar un análisis de la cuenca definida por la estación en estudio.

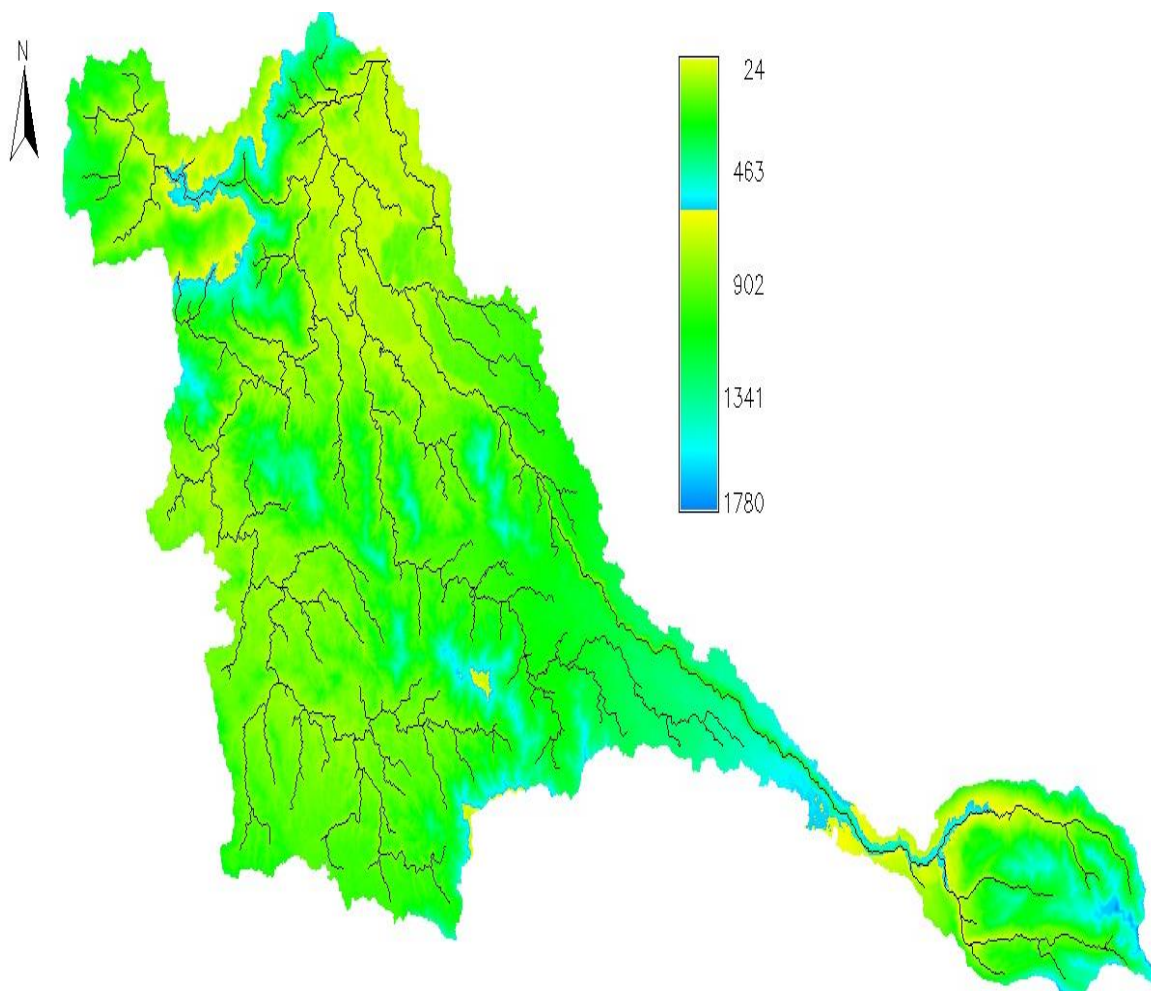


Figura 7.29 – Cuenca aportante de la estación Río Vergara en Tijeral.

En la Tabla 7.29 se presentan los resultados entregados mediante la utilización del programa.

Tabla 7.29 – Resultados entregados por GrassGis para la estación Río Vergara en Tijeral.

Área de la Cuenca	2.382 (Km ²)
Pendiente Media	8,85 (%)
Largo del Cauce	152,19 (Km)
Altura Máxima	1.780 (m)
Altura Mínima	24 (m)

7.1.10 Estación Río Lumaco en Lumaco.

Ubicación de la estación.

Esta estación se ubica en el río Lumaco. El río presenta un régimen pluvial, en años lluviosos tiene sus mayores caudales en los meses de Julio y Agosto, mientras que los menores caudales se observan entre los meses de Febrero y Abril. En los años secos, el río presenta a lo largo del año una variación de caudales baja. En la Figura 7.30, se muestra la ubicación exacta de la estación.

Coordenadas (UTM): 683964 E ; 5773543 S. Zona: 18 H

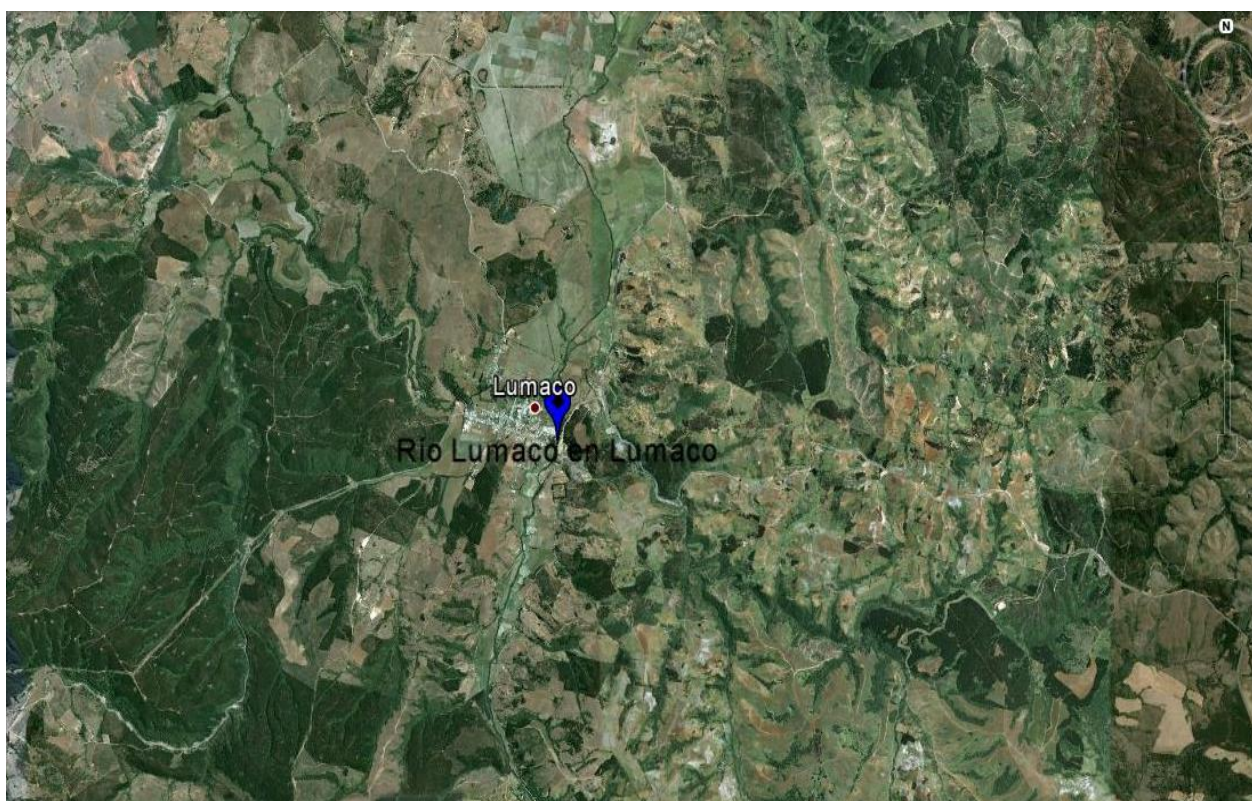


Figura 7.30 – Ubicación estación Río Lumaco en Lumaco.

Antecedentes Básicos

a) Fluviométricos

Se dispone de datos de series de caudales medios diarios observados de la estación Río Lumaco en Lumaco controlada por la Dirección General de Aguas del M.O.P para los periodos mostrados en la siguiente Tabla 7.30:

Tabla 7.30 – Registros fluviométricos Río Lumaco en Lumaco.

Nombre Estación	Periodo		Periodo	
	Desde	Hasta	Desde	Hasta
Río Lumaco en Lumaco	01/1970	10/1971	06/2004	07/2005
	05/1972	05/1973	10/2005	09/2007
	10/1974	03/2004	12/2007	05/2012

b) Sedimentométricos

Se dispone de los registros sedimentométricos de la estación Río Lumaco en Lumaco. En la Tabla 7.30 se observan los tipos de muestreos realizados y los periodos de tiempo que abarcan los datos entregados por la D.G.A.

Tabla 7.31 – Registros sedimentométricos Río Lumaco en Lumaco.

Nombre Estación	Muestreos		Muestreos	
	Rutinarios		Integrados	
Río Lumaco en Lumaco	Desde	Hasta	Desde	Hasta
	03/1985	09/1989	03/1985	07/1989
	07/1992	08/1992	09/2000	01/2009
	01/1993	09/2007		

Utilizando la metodología señalada en el punto 7.1.1, se obtuvo el modelo:

$$C_i = 2.87 C_r^{0.64}$$

Donde:

C_i = concentración de muestreos integrados (mg/l).

C_r = concentración de muestreos rutinarios (mg/l).

Posteriormente en la Figura 7.31 se muestra de manera gráfica la relación que existe entre el caudal líquido y gasto sólido en suspensión.

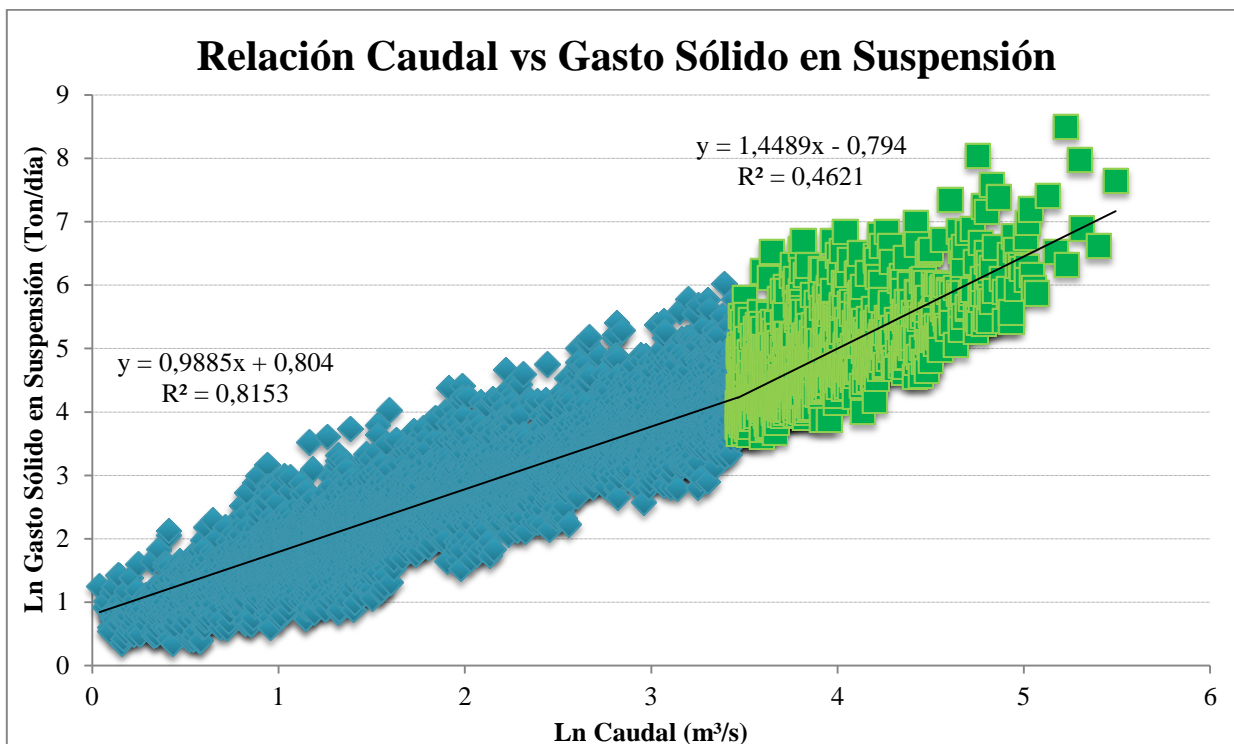


Figura 7.31 – Relación entre el caudal y gasto sólido en suspensión en la estación Río Lumaco en Lumaco.

Los modelos de la Curva de gasto sólido en suspensión corresponden a:

$$\text{Para } Q < 32.0 \text{ (m}^3/\text{s)} \quad G_{sd} = 2.2344 Q_d^{0.988} \quad G_{sd} \text{ (Ton/día); } Q_d \text{ (m}^3/\text{s)}$$

$$\text{Para } Q > 32.0 \text{ (m}^3/\text{s)} \quad G_{sd} = 0.452 Q_d^{1.448} \quad G_{sd} \text{ (Ton/día); } Q_d \text{ (m}^3/\text{s)}$$

Finalmente, utilizando los caudales medios diarios de la estación, se construyó la curva general de duración de caudales, para posteriormente integrar de manera discreta (intervalos) la curva de duración de caudales, de esta manera se generó el gasto sólido en suspensión medio anual y el caudal medio anual, en el Anexo 2 digital se encuentran las tablas de la curva de duración de caudales mencionadas y en el Anexo 3 digital se muestra de manera gráfica dicha curva.

En función del trabajo realizado, el caudal medio anual afluente y el gasto sólido medio anual para la estación Río Lumaco en Lumaco son:

$$\text{Caudal Medio Anual:} \quad 17,38 \text{ (m}^3/\text{s)}$$

$$\text{Gasto Sólido en Suspensión Medio Anual:} \quad 16.947 \text{ (Ton/año)}$$

Análisis Geomorfológico

Mediante la utilización del programa GrassGis, es posible realizar un análisis de la cuenca definida por la estación en estudio.

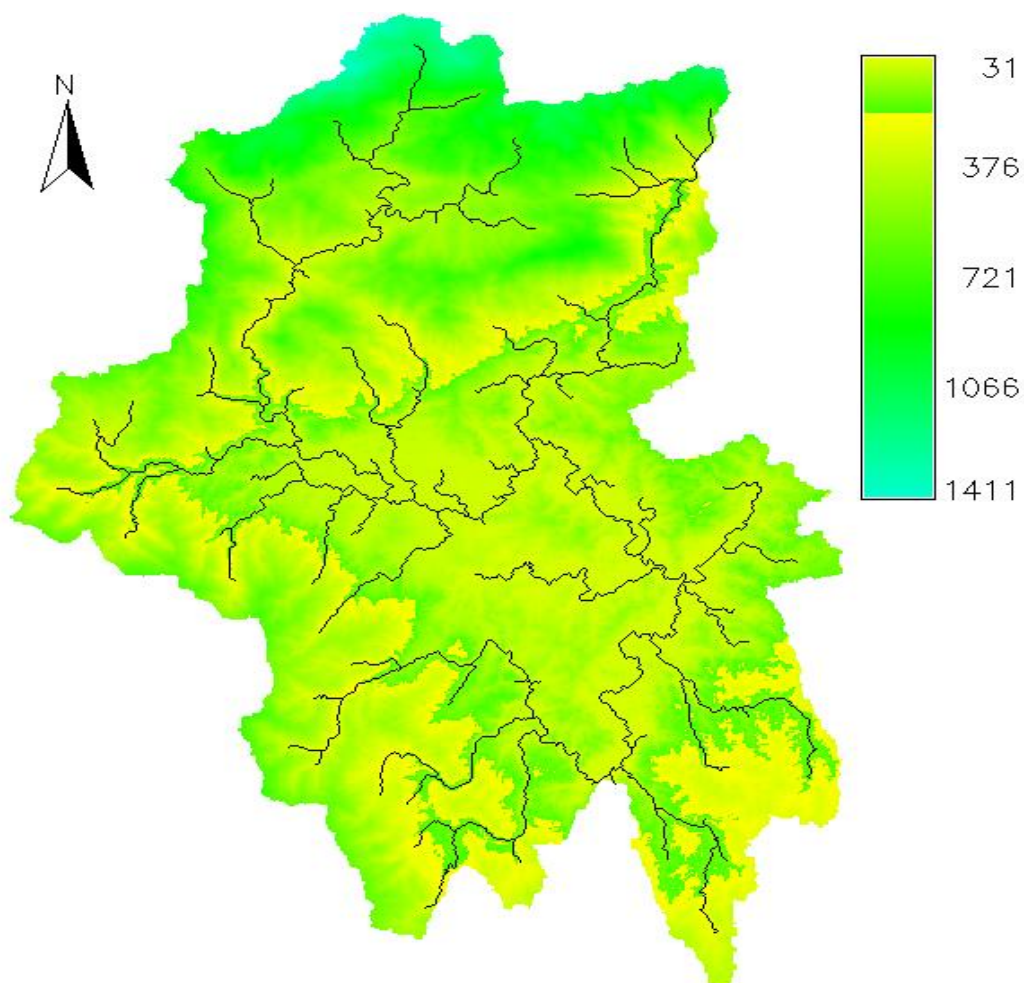


Figura 7.32 – Cuenca aportante de la estación Río Lumaco en Lumaco.

En la Tabla 7.32 se presentan los resultados entregados mediante la utilización del programa.

Tabla 7.32 – Resultados entregados por GrassGis para la estación Río Lumaco en Lumaco.

Área de la Cuenca	1.035 (Km ²)
Pendiente Media	17,56 (%)
Largo del Cauce	106,03 (Km)
Altura Máxima	1.411 (m)
Altura Mínima	31 (m)

7.1.11 Estación Río Cautín en Rari-ruca.

Ubicación de la estación.

La estación se ubica en el río Cautín, aguas abajo de la junta con el río Indio a unos 1,9 (Km) de distancia. Este río presenta un régimen pluvial, en los años lluviosos se observan grandes alzas de caudal entre los meses de Junio y Agosto, y los caudales más bajos se presentan entre los meses de Febrero y Abril. En aquellos años secos, la diferencia de caudal a lo largo del año es bastante baja. La Figura 7.33, señala la ubicación de la estación.

Coordenadas (UTM): 760953E ; 5742180 S. Zona: 18 H

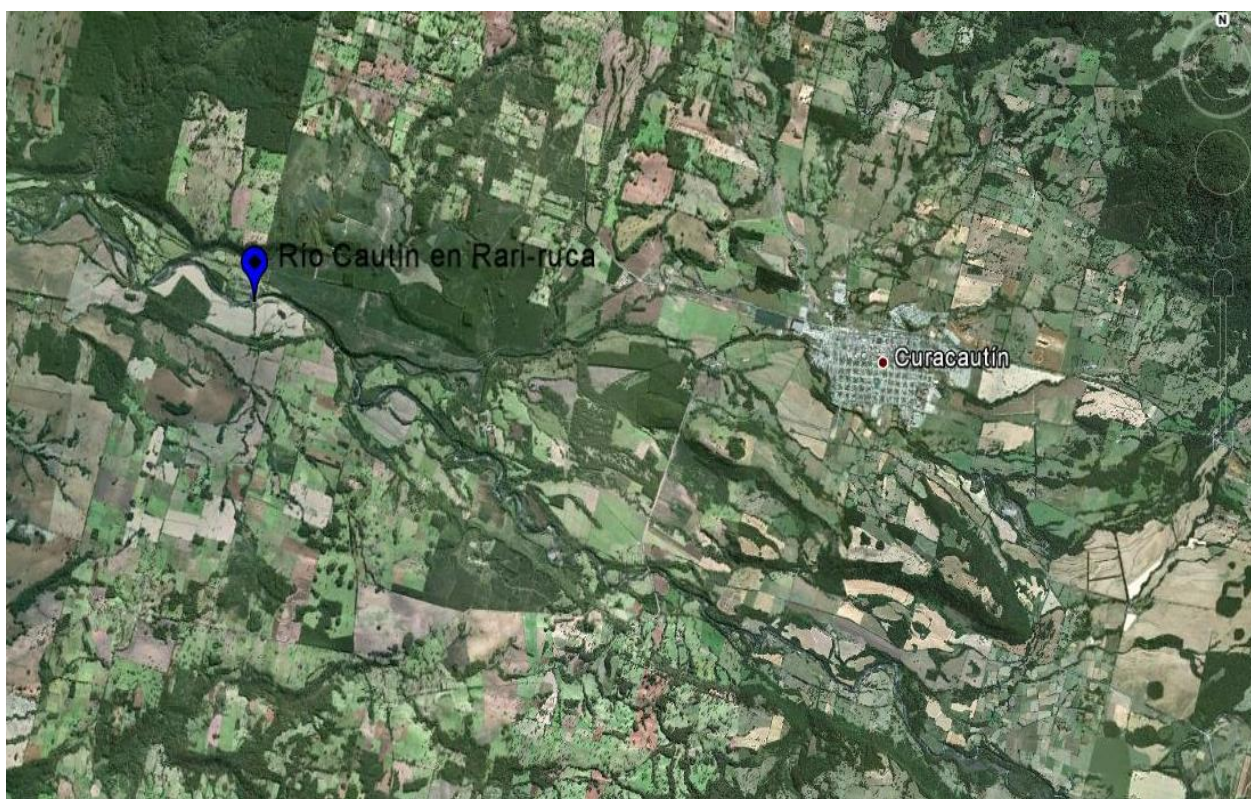


Figura 7.33 - Ubicación estación Río Cautín en Rari-ruca.

Antecedentes Básicos

a) Fluviométricos

Se dispone de datos de series de caudales medios diarios observados de la estación Río Cautín en Rari-ruca controlada por la Dirección General de Aguas del M.O.P para los periodos mostrados en la Tabla 7.33:

Tabla 7.33 – Registros fluviométricos Río Cautín en Rari-ruca.

Nombre Estación	Periodo		Periodo	
	Desde	Hasta	Desde	Hasta
Río Cautín en rari-ruca	01/1970	05/1971	10/1980	06/1981
	09/1971	11/1972	09/1981	03/1984
	03/1973	09/1974	05/1984	03/2010
	11/1974	03/1975	06/2010	05/2012
	11/1975	06/1980		

b) Sedimentométricos

Se dispone de los registros sedimentométricos de la estación Río Cautín en Rari-ruca. En la Tabla 7.34 se observan los tipos de muestreos realizados y los periodos de tiempo que abarcan los datos entregados por la D.G.A.

Tabla 7.34 – Registros sedimentométricos Río Cautín en Rari-ruca.

Nombre Estación	Muestreos		Muestreos	
	Rutinarios		Integrados	
Río Cautín en Rari-ruca	Desde	Hasta	Desde	Hasta
	03/1985	09/1989	05/1985	07/1989
	07/1992	08/1992	09/1992	09/1992
	01/1993	01/2009	02/1993	02/2009

Utilizando la metodología señalada en el punto 7.1.1, se obtuvo el modelo:

$$C_i = 1,69 C_r^{0.73}$$

Donde:

C_i = concentración de muestreos integrados (mg/l).

C_r = concentración de muestreos rutinarios (mg/l).

Posteriormente en la Figura 7.34 se muestra de manera gráfica la relación que existe entre el caudal líquido y gasto sólido en suspensión.

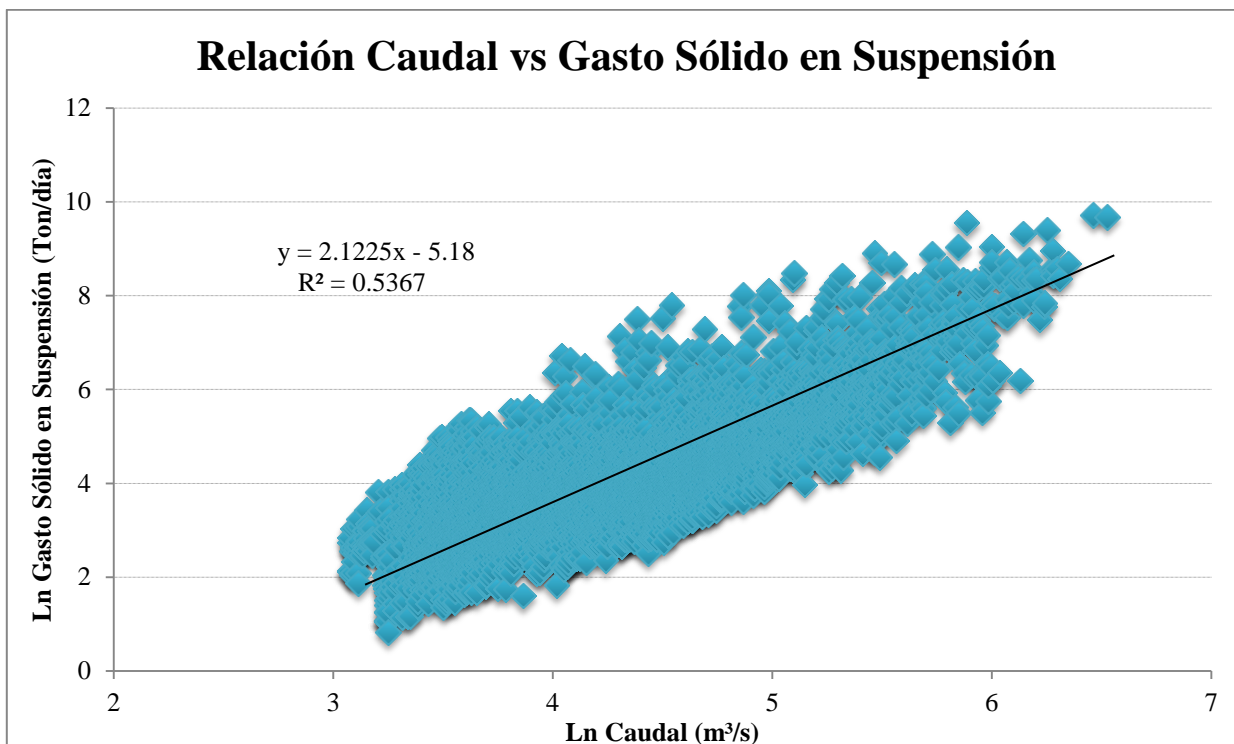


Figura 7.34 – Relación entre el caudal y gasto sólido en suspensión en la estación Río Cautín en Rari-ruca.

El modelo de la Curva de gasto sólido en suspensión es:

$$G_{sd} = 0.0056 Q_d^{2.122} \quad G_{sd} \text{ (Ton/día); } Q_d \text{ (m}^3\text{/s)}$$

Finalmente, utilizando los caudales medios diarios de la estación, se construyó la curva general de duración de caudales, para posteriormente integrar de manera discreta (intervalos) la curva de duración de caudales, de esta manera se generó el gasto sólido en suspensión medio anual y el caudal medio anual, en el Anexo 2 digital se encuentran las tablas de la curva de duración de caudales mencionadas y en el Anexo 3 digital se muestra de manera gráfica dicha curva.

En función de los análisis realizados, el caudal medio anual afluente y el gasto sólido medio anual para la estación Río Cautín en Rari-ruca son:

Caudal Medio Anual: 91,63 (m³/s)

Gasto Sólido en Suspensión Medio Anual: 51.217 (Ton/año)

Análisis Geomorfológico

Mediante la utilización del programa GrassGis, es posible realizar un análisis de la cuenca definida por la estación en estudio.

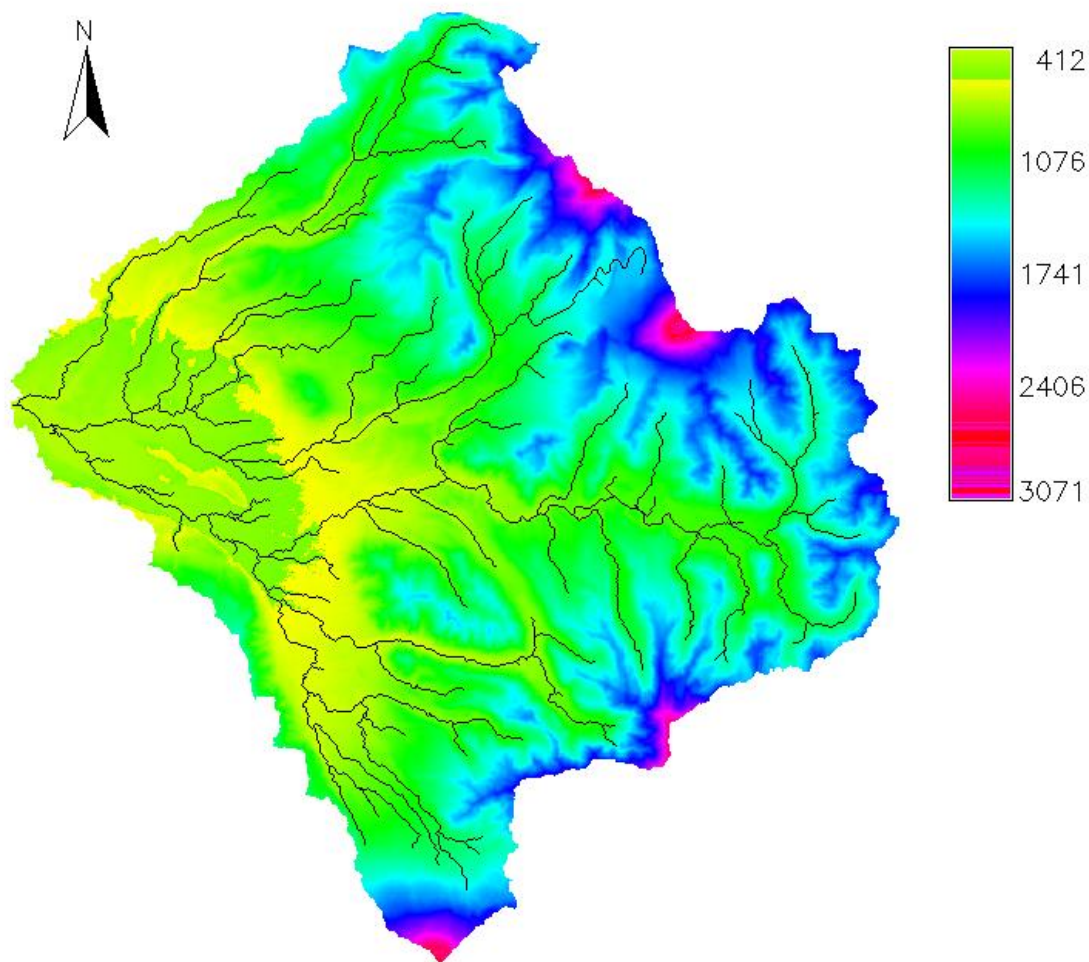


Figura 7.35 – Cuenca aportante de la estación Río Cautín en Rari-ruca.

En la Tabla 7.35 se presentan los resultados entregados mediante la utilización del programa.

Tabla 7.35 – Resultados entregados por GrassGis para la estación Río Cautín en Rari-ruca.

Área de la Cuenca	1.306 (Km ²)
Pendiente Media	13,42 (%)
Largo del Cauce	87,5 (Km)
Altura Máxima	3.071 (m)
Altura Mínima	412 (m)

7.1.12 Estación Río Cholchol en Cholchol.

Ubicación de la estación.

Esta estación se ubica en el río Cholchol. El río tiene un régimen pluvial, en aquellos años lluviosos, el caudal del río presenta un gran aumento entre los meses de Junio y Agosto, mientras que los menores caudales se dan entre los meses de Febrero y Abril. En los años secos el caudal tiene diferencias a lo largo del año, pero no tan bruscas en comparación a los años lluviosos. En la Figura 7.36, se señala la ubicación de la estación.

Coordenadas (UTM): 687424 E ; 5724505 S. Zona: 18 H

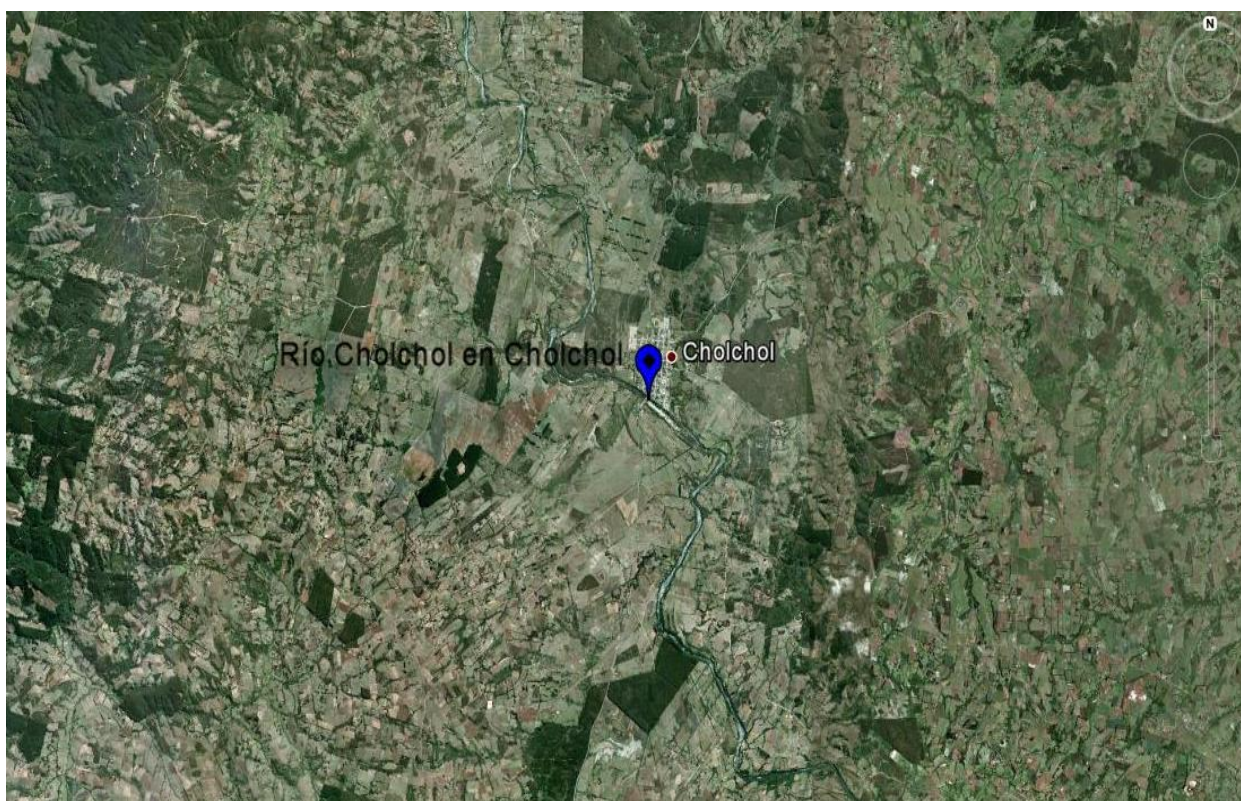


Figura 7.36 – Ubicación estación Río Cholchol en Cholchol.

Antecedentes Básicos

a) Fluviométricos

Se dispone de datos de series de caudales medios diarios observados de la estación Río Cholchol en Cholchol controlada por la Dirección General de Aguas del M.O.P para los periodos mostrados en la siguiente Tabla 7.36:

Tabla 7.36 – Registros fluviométricos Río Cholchol en Cholchol.

Nombre Estación	Periodo		Periodo	
	Desde	Hasta	Desde	Hasta
Río Cholchol en Cholchol	03/1970	11/1970	01/1974	08/1981
	04/1971	11/1971	10/1981	10/1986
	06/1972	08/1972	12/1986	05/2012

b) Sedimentométricos

Se dispone de los registros sedimentométricos de la estación Río Cholchol en Cholchol. En la Tabla 7.37 se observan los tipos de muestreos realizados y los periodos de tiempo que abarcan los datos entregados por la D.G.A.

Tabla 7.37 – Registros sedimentométricos Río Cholchol en Cholchol.

Nombre Estación	Muestreos		Muestreos	
	Rutinarios		Integrados	
Río Cholchol en Cholchol	Desde	Hasta	Desde	Hasta
	03/1985	09/1989	03/1985	07/1989
	07/1992	08/1992	07/1992	08/1992
	01/1993	01/2009	02/1993	02/2009

Utilizando la metodología señalada en el punto 7.1.1, se obtuvo el modelo:

$$C_i = 1.24 C_r^{0.88}$$

Donde:

C_i = concentración de muestreos integrados (mg/l).

C_r = concentración de muestreos rutinarios (mg/l).

Posteriormente en la Figura 7.37 se muestra de manera gráfica la relación que existe entre el caudal líquido y gasto sólido en suspensión.

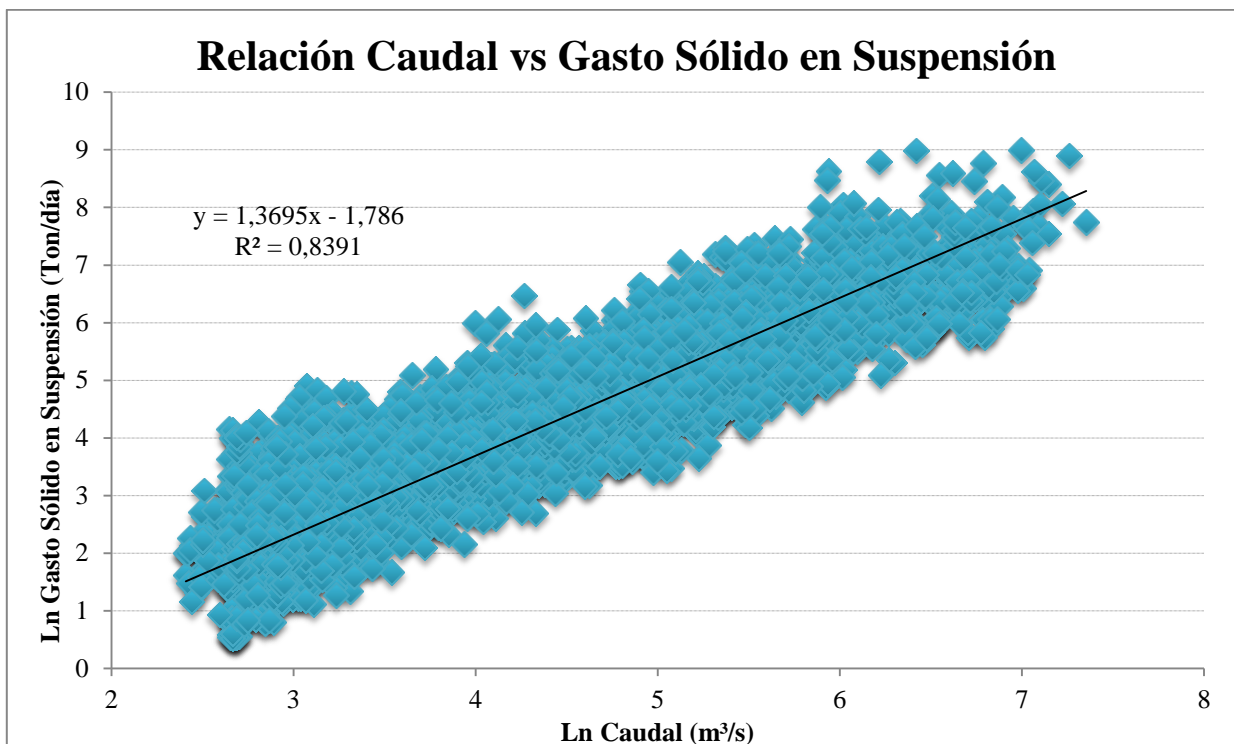


Figura 7.37 – Relación entre el caudal y gasto sólido en suspensión en la estación Río Cholchol en Cholchol.

El modelo de la Curva de gasto sólido en suspensión es:

$$G_{sd} = 0.1676 Q_d^{1.369} \quad G_{sd} \text{ (Ton/día); } Q_d \text{ (m}^3\text{/s)}$$

Finalmente, utilizando los caudales medios diarios de la estación, se construyó la curva general de duración de caudales, para posteriormente integrar de manera discreta (intervalos) la curva de duración de caudales, de esta manera se generó el gasto sólido en suspensión medio anual y el caudal medio anual, en el Anexo 2 digital se encuentran las tablas de la curva de duración de caudales mencionadas y en el Anexo 3 digital se muestra de manera gráfica dicha curva.

En función de los análisis realizados, el caudal medio anual afluente y el gasto sólido medio anual para la estación Río Cholchol en Cholchol son:

Caudal Medio Anual: 131,79 (m³/s)

Gasto Sólido en Suspensión Medio Anual: 64.754 (Ton/año)

Análisis Geomorfológico

Mediante la utilización del programa GrassGis, es posible realizar un análisis de la cuenca definida por la estación en estudio.

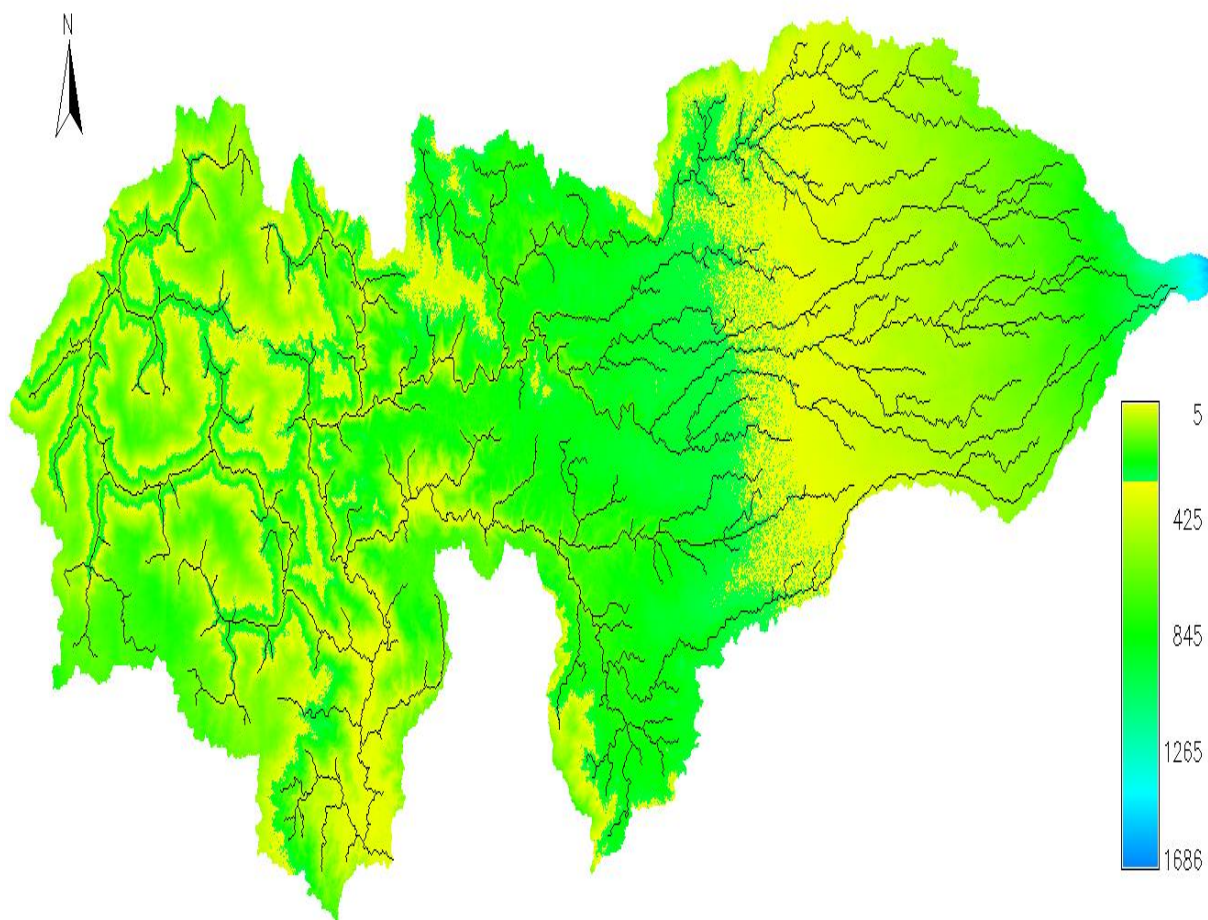


Figura 7.38 – Cuenca aportante de la estación Río Cholchol en Cholchol.

En la Tabla 7.38 se presentan los resultados entregados mediante la utilización del programa.

Tabla 7.38 – Resultados entregados por GrassGis para la estación Río Cholchol en Cholchol.

Área de la Cuenca	3.992 (Km ²)
Pendiente Media	6,73 (%)
Largo del Cauce	230,4 (Km)
Altura Máxima	1.686 (m)
Altura Mínima	5 (m)

7.1.13 Estación Río Cautín en Cajón.

Ubicación de la estación.

Esta estación se ubica en el río Cautín y presenta un régimen pluvial. En los años lluviosos tiene los mayores caudales entre los meses de Junio y Agosto debido a lluvias invernales, mientras que en los meses de Febrero y Marzo los caudales son los menores. En años secos la diferencia de caudales a lo largo del año es baja. En la Figura 7.39, se señala la ubicación de la estación.

Coordenadas (UTM): 716460 E ; 5714778 S. Zona: 18 H

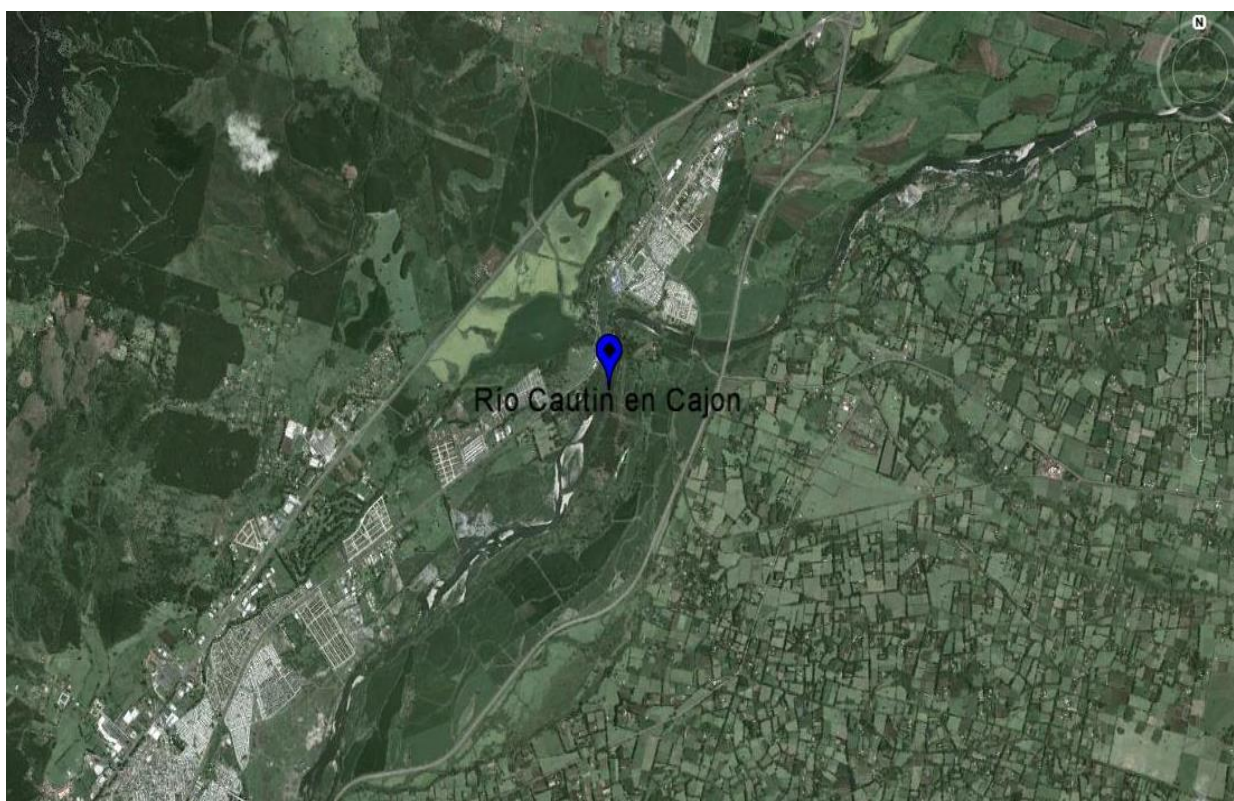


Figura 7.39 – Ubicación estación Río Cautín en Cajón.

Antecedentes Básicos

a) Fluviométricos

Se dispone de datos de series de caudales medios diarios observados de la estación Río Cautín en Cajón controlada por la Dirección General de Aguas del M.O.P para los periodos mostrados en la Tabla 7.39 siguiente:

Tabla 7.39 – Registros fluviométricos Río Cautín en Cajón.

Nombre Estación	Periodo		Periodo	
	Desde	Hasta	Desde	Hasta
Río Cautín en Cajón	01/1970	06/1973	05/1977	02/1978
	08/1973	03/1974	04/1978	12/1978
	05/1974	02/1975	02/1979	10/1980
	04/1975	02/1976	12/1980	05/2012
	06/1976	12/1976		

b) Sedimentométricos

Se dispone de los registros sedimentométricos de la estación Río Cautín en Cajón. En la Tabla 7.40 se observan los tipos de muestreos realizados y los periodos de tiempo que abarcan los datos entregados por la D.G.A.

Tabla 7.40 – Registros sedimentométricos Río Cautín en Cajón.

Nombre Estación	Muestreos		Muestreos	
	Rutinarios		Integrados	
Río Cautín en Cajón	Desde	Hasta	Desde	Hasta
	04/1985	09/1989	05/1985	07/1989
	07/1992	08/1992	08/1992	09/1992
	01/1993	01/2009	02/1993	02/2009

Utilizando la metodología señalada en el punto 7.1.1, se obtuvo el modelo:

$$C_i = 1.82 C_r^{0.67}$$

Donde:

C_i = concentración de muestreos integrados (mg/l).

C_r = concentración de muestreos rutinarios (mg/l).

Posteriormente en la Figura 7.40 se muestra de manera gráfica la relación que existe entre el caudal líquido y gasto sólido en suspensión.

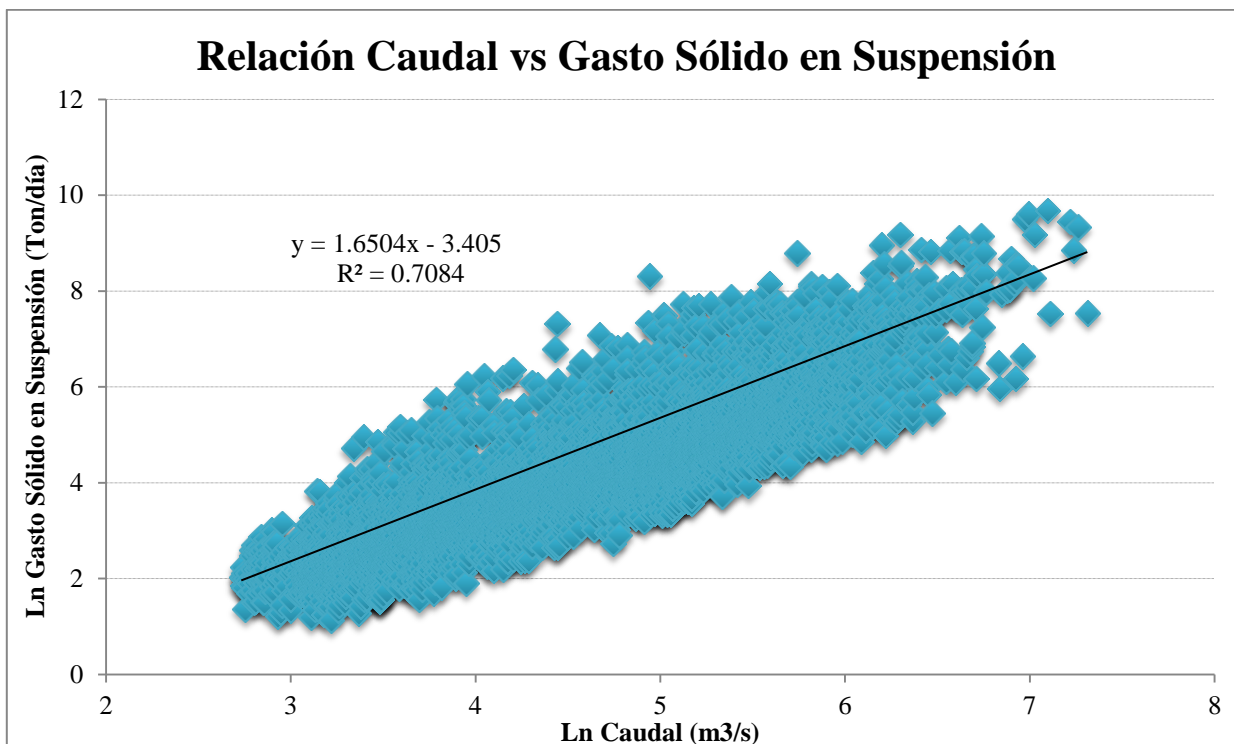


Figura 7.40 – Relación entre el caudal y gasto sólido en suspensión en la estación Río Cautín en Cajón.

El modelo de la Curva de gasto sólido en suspensión es:

$$G_{sd} = 0.0332 Q_d^{1.650} \quad G_{sd} \text{ (Ton/día); } Q_d \text{ (m}^3\text{/s)}$$

Finalmente, utilizando los caudales medios diarios de la estación, se construyó la curva general de duración de caudales, para posteriormente integrar de manera discreta (intervalos) la curva de duración de caudales, de esta manera se generó el gasto sólido en suspensión medio anual y el caudal medio anual, en el Anexo 2 digital se encuentran las tablas de la curva de duración de caudales mencionadas y en el Anexo 3 digital se muestra de manera gráfica dicha curva.

En función de los análisis realizados, el caudal medio anual afluente y el gasto sólido medio anual para la Estación río Cautín en Cajón son:

Caudal Medio Anual: 140,05 (m³/s)

Gasto Sólido en Suspensión Medio Anual: 60.185 (Ton/año)

Análisis Geomorfológico

Mediante la utilización del programa GrassGis, es posible realizar un análisis de la cuenca definida por la estación en estudio.

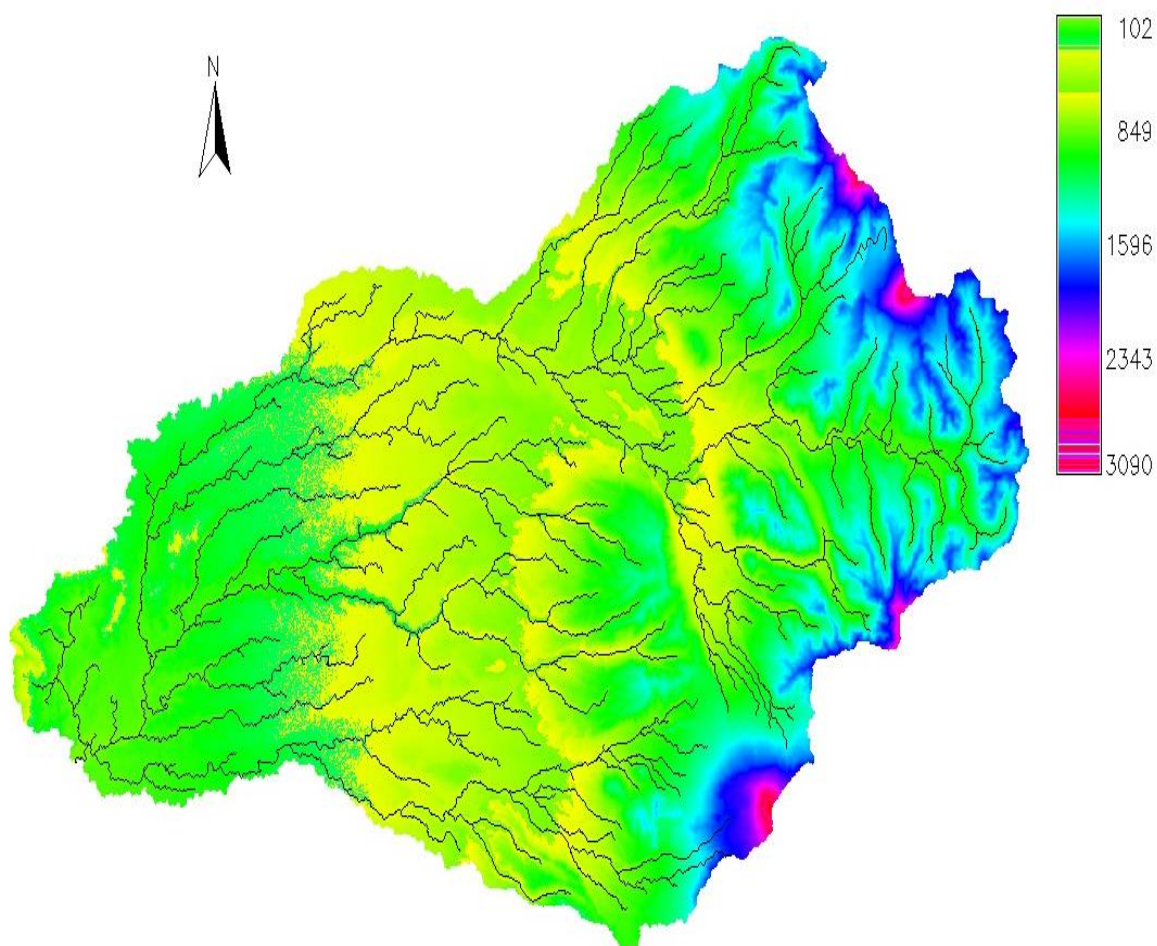


Figura 7.41 – Cuenca aportante de la estación Río Cautín en Cajón.

En la Tabla 7.41, se presentan los resultados entregados mediante la utilización del programa.

Tabla 7.41 – Resultados entregados por GrassGis para la estación Río Cautín en Cajón.

Área de la Cuenca	3.332 (Km ²)
Pendiente Media	8,96 (%)
Largo del Cauce	194,23 (Km)
Altura Máxima	3.090 (m)
Altura Mínima	102 (m)

7.1.14 Estación Río Quepe en Quepe.

Ubicación de la estación.

La estación se ubica en río Quepe, y tiene un régimen pluvial. Presenta los mayores caudales entre los meses de Mayo y Agosto, mientras que los menores caudales se dan entre los meses de Enero y Marzo. En la Figura 7.42, se puede observar la ubicación de la estación.

Coordenadas (UTM): 706832 E ; 5696711 S. Zona: 18 H

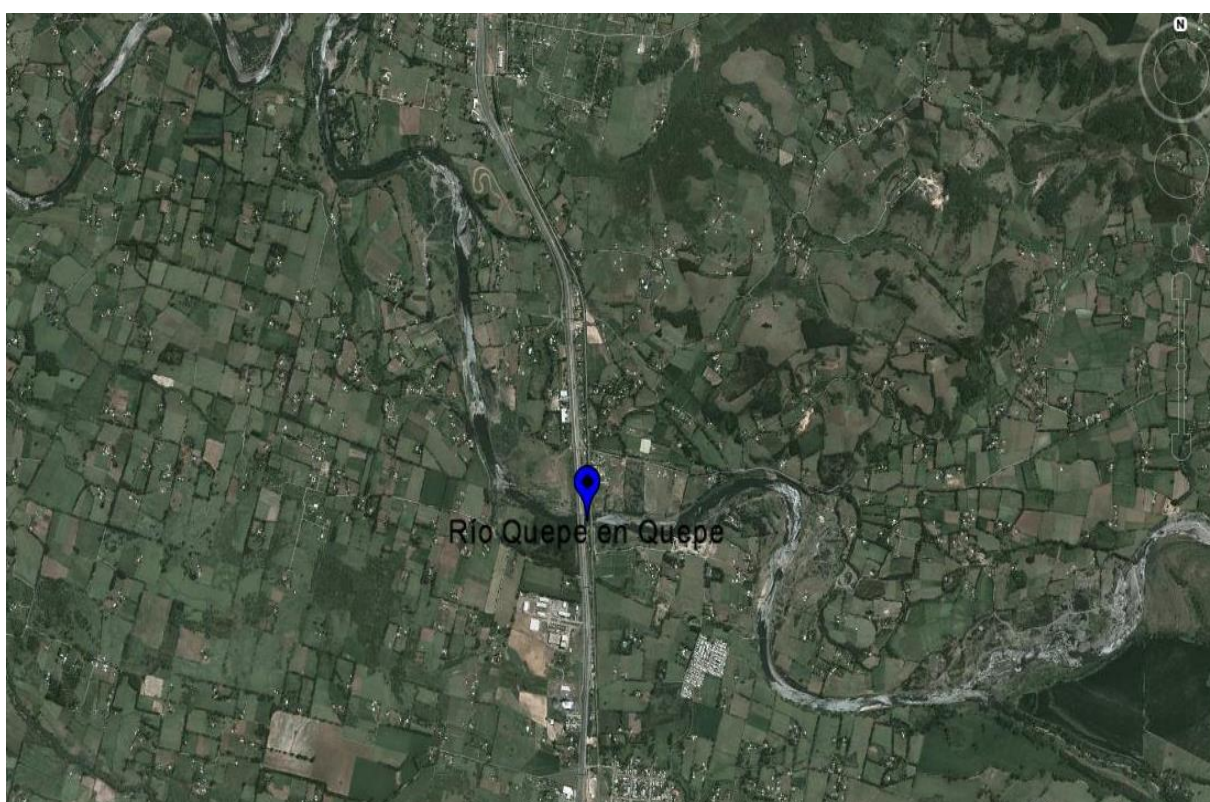


Figura 7.42 – Ubicación estación Río Quepe en Quepe.

Antecedentes Básicos

a) Fluviométricos

Se dispone de datos de series de caudales medios diarios observados de la estación Río Quepe en Quepe controlada por la Dirección General de Aguas del M.O.P para los periodos mostrados en la siguiente Tabla 7.42:

Tabla 7.42 – Registros fluviométricos Río Quepe en Quepe.

Nombre Estación	Periodo		Periodo	
	Desde	Hasta	Desde	Hasta
Río Quepe en Quepe	01/1970	08/1971	09/1974	07/2004
	06/1972	02/1973	11/2004	05/2012

b) Sedimentométricos

Se dispone de los registros sedimentométricos de la estación Río Quepe en Quepe. En la Tabla 7.43 se observan los tipos de muestreos realizados y los periodos de tiempo que abarcan los datos entregados por la D.G.A.

Tabla 7.43 – Registros sedimentométricos Río Quepe en Quepe.

Nombre Estación	Muestreos		Muestreos	
	Rutinarios		Integrados	
Río Quepe en Quepe	Desde	Hasta	Desde	Hasta
	03/1985	09/1989	05/1985	07/1989
	07/1992	08/1992	08/1992	09/1992
	01/1993	12/2008	02/1993	01/2009

Utilizando la metodología señalada en el punto 7.1.1, se obtuvo el modelo:

$$C_i = 1.41 C_r^{1.02}$$

Donde:

C_i = concentración de muestreos integrados (mg/l).

C_r = concentración de muestreos rutinarios (mg/l).

Posteriormente en la Figura 7.43 se muestra de manera gráfica la relación que existe entre el caudal líquido y gasto sólido en suspensión.

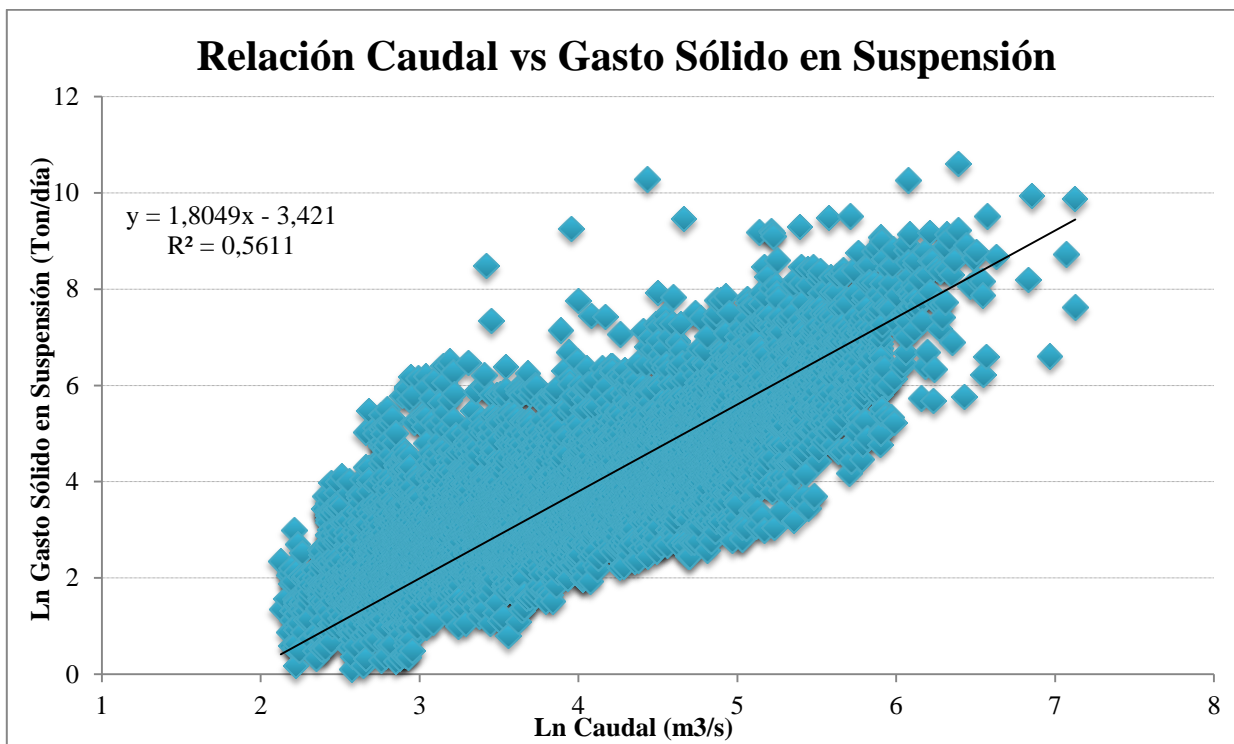


Figura 7.43 – Relación entre el caudal y gasto sólido en suspensión en la estación Río Quepe en Quepe.

El modelo de la Curva de gasto sólido en suspensión es:

$$G_{sd} = 0.0326 Q_d^{1.805} \quad G_{sd} \text{ (Ton/día); } Q_d \text{ (m}^3\text{/s)}$$

Finalmente, utilizando los caudales medios diarios de la estación, se construyó la curva general de duración de caudales, para posteriormente integrar de manera discreta (intervalos) la curva de duración de caudales, de esta manera se generó el gasto sólido en suspensión medio anual y el caudal medio anual, en el Anexo 2 digital se encuentran las tablas de la curva de duración de caudales mencionadas y en el Anexo 3 digital se muestra de manera gráfica dicha curva.

En función de los análisis realizados, el caudal medio anual afluente y el gasto sólido medio anual para la estación Río Quepe en Quepe son:

Caudal Medio Anual: 87,55 (m³/s)

Gasto Sólido en Suspensión Medio Anual: 65.999 (Ton/año)

Análisis Geomorfológico

Mediante la utilización del programa GrassGis, es posible realizar un análisis de la cuenca definida por la estación en estudio.

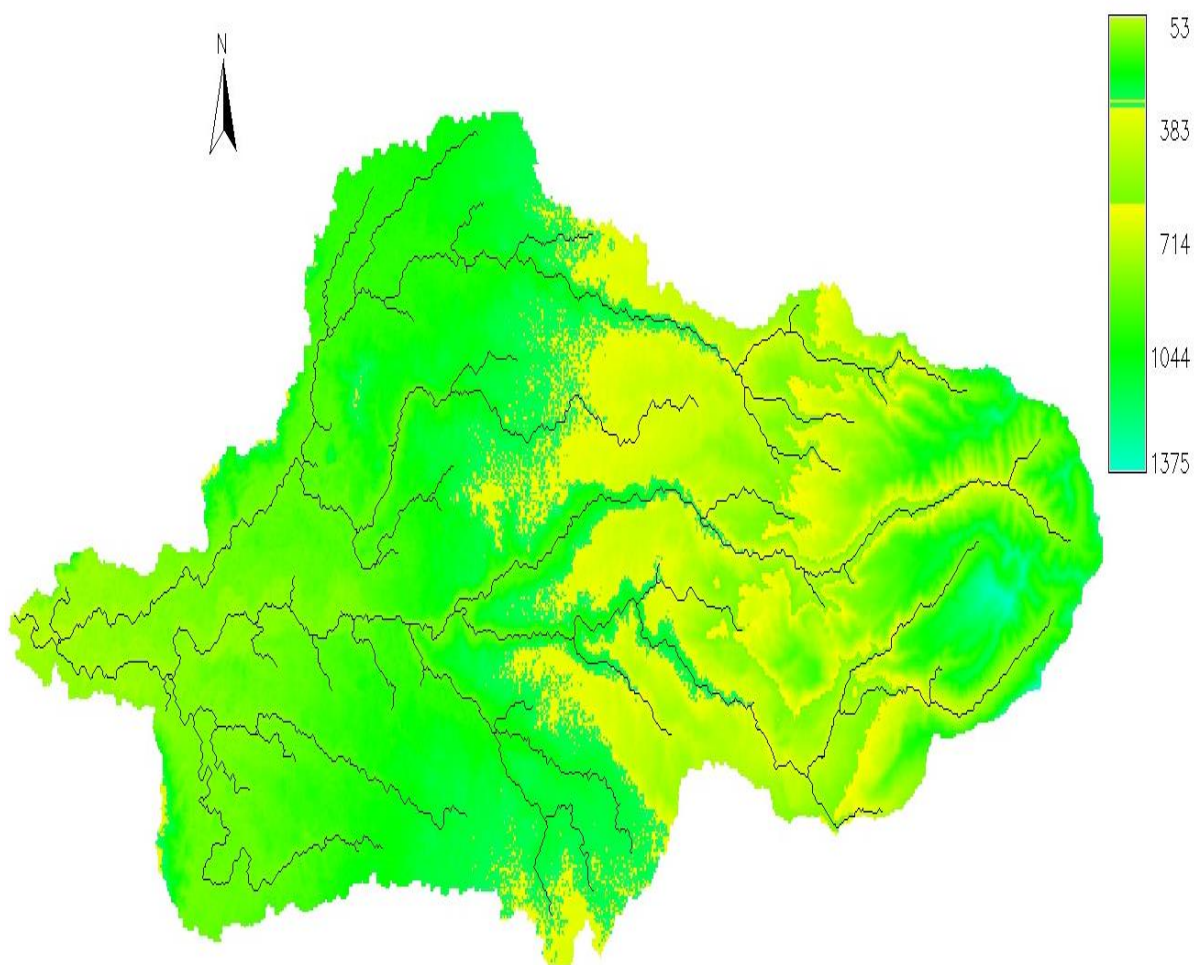


Figura 7.44 – Cuenca aportante de la estación Río Quepe en Quepe.

En la Tabla 7.44 se presentan los resultados entregados mediante la utilización del programa.

Tabla 7.44 – Resultados entregados por GrassGis para la estación Río Quepe en Quepe.

Área de la Cuenca	1.054 (Km ²)
Pendiente Media	13,47 (%)
Largo del Cauce	101,46 (Km)
Altura Máxima	1.375 (m)
Altura Mínima	53 (m)

7.1.15 Estación Río Donguil en Gorbea.

Ubicación de la estación.

La estación se ubica en el río Donguil. El río presenta un régimen pluvial, los mayores caudales se observan en los meses de Junio y Agosto debido a las lluvias invernales, mientras que los menores caudales se observan entre los meses de Febrero y Abril. En años secos, la variación de caudales es baja a lo largo del año. La Figura 7.45, señala la ubicación de la estación.

Coordenadas (UTM): 700807 E ; 5667490 S. Zona: 18 H

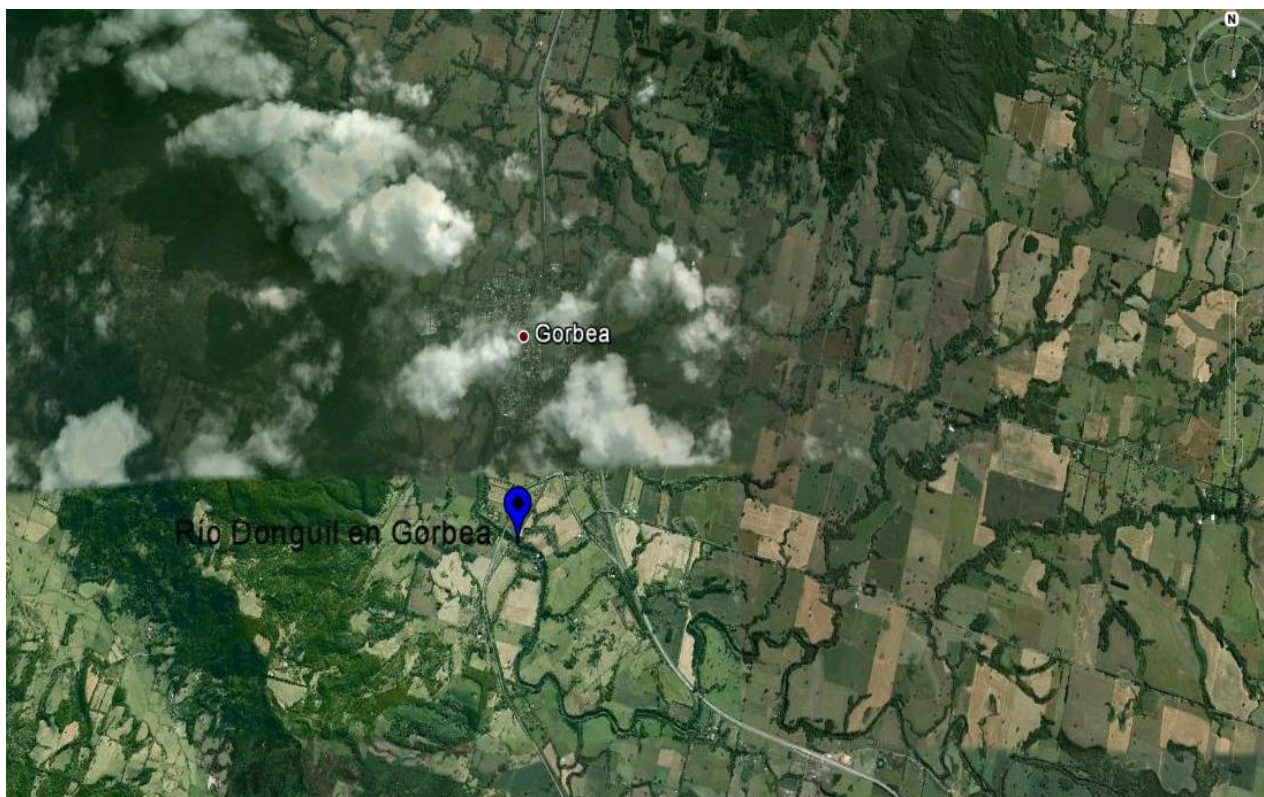


Figura 7.45 – Ubicación estación Río Donguil en Gorbea.

Antecedentes Básicos

a) Fluviométricos

Se dispone de datos de series de caudales medios diarios observados de la estación Río Donguil en Gorbea controlada por la Dirección General de Aguas del M.O.P para los periodos mostrados en la Tabla 7.45:

Tabla 7.45 – Registros fluviométricos Río Donguil en Gorbea.

Nombre Estación	Periodo		Periodo	
	Desde	Hasta	Desde	Hasta
Río Donguil en Gorbea	01/1970	10/1971	10/1979	02/2002
	04/1972	05/1975	04/2002	04/2003
	07/1975	04/1979	12/2003	05/2012
	06/1979	06/1979		

b) Sedimentométricos

Se dispone de los registros sedimentométricos de la estación Río Donguil en Gorbea. En la Tabla 7.46 se observan los tipos de muestreos realizados y los periodos de tiempo que abarcan los datos entregados por la D.G.A.

Tabla 7.46 – Registros sedimentométricos Río Donguil en Gorbea.

Nombre Estación	Muestreos		Muestreos	
	Rutinarios		Integrados	
Río Donguil en Gorbea	Desde	Hasta	Desde	Hasta
	03/1985	09/1989	03/1985	07/1989
	07/1992	08/1992	09/1992	09/1992
	01/1993	01/2009	03/1993	12/2009

Utilizando la metodología señalada en el punto 7.1.1, se obtuvo el modelo:

$$C_i = 1.05 C_r^{0.87}$$

Donde:

C_i = concentración de muestreos integrados (mg/l).

C_r = concentración de muestreos rutinarios (mg/l).

Posteriormente en la Figura 7.46 se muestra de manera gráfica la relación que existe entre el caudal líquido y gasto sólido en suspensión.

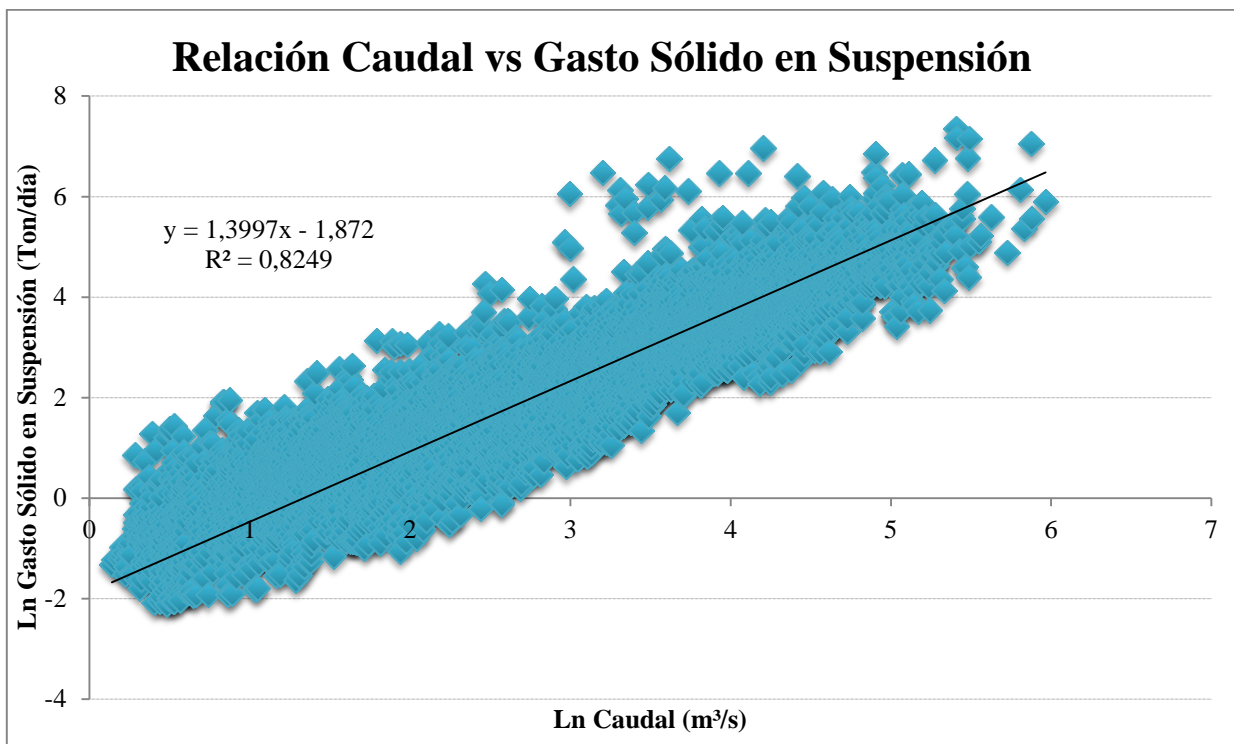


Figura 7.46 – Relación entre el caudal y gasto sólido en suspensión en la estación Río Donguil en Gorbea.

El modelo de la curva de gasto sólido en suspensión es:

$$G_{sd} = 0.1538 Q_d^{1.399} \quad G_{sd} \text{ (Ton/día); } Q_d \text{ (m}^3\text{/s)}$$

Finalmente, utilizando los caudales medios diarios de la estación, se construyó la curva general de duración de caudales, para posteriormente integrar de manera discreta (intervalos) la curva de duración de caudales, de esta manera se generó el gasto sólido en suspensión medio anual y el caudal medio anual, en el Anexo 2 digital se encuentran las tablas de la curva de duración de caudales mencionadas y en el Anexo 3 digital se muestra de manera gráfica dicha curva.

En función de los análisis realizados, el caudal medio anual afluente y el gasto sólido medio anual para la estación Río Donguil en Gorbea son:

Caudal Medio Anual: 31,33 (m³/s)

Gasto Sólido en Suspensión Medio Anual: 9.246 (Ton/año)

Análisis Geomorfológico

Mediante la utilización del programa GrassGis, es posible realizar un análisis de la cuenca definida por la estación en estudio.

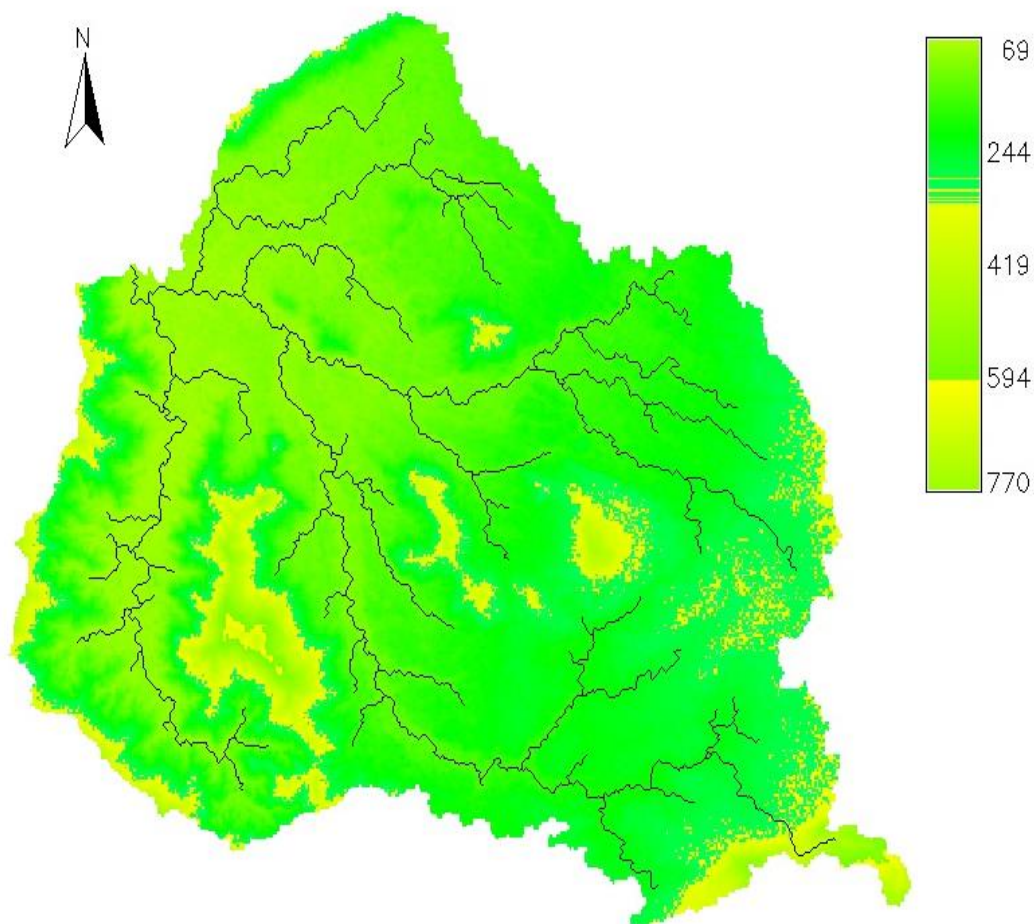


Figura 7.47 – Cuenca aportante de la estación Río Donguil en Gorbea.

En la Tabla 7.47 se presentan los resultados entregados mediante la utilización del programa.

Tabla 7.47 – Resultados entregados por GrassGis para la estación Río Donguil en Gorbea.

Área de la Cuenca	748 (Km ²)
Pendiente Media	9,59 (%)
Largo del Cauce	71,37 (Km)
Altura Máxima	770 (m)
Altura Mínima	69 (m)

7.1.16 Estación Río Trancura antes de Río Llanfeco.

Ubicación de la estación.

Esta estación se ubica en el río Trancura, alguno de sus afluentes son el río Liucura y el río Turbio. La estación se encuentra a unos 17 (Km) del Lago Villarica donde desemboca. El río presenta un régimen pluvial, teniendo sus mayores caudales entre los meses de Mayo y Agosto, debido a lluvias invernales, mientras que los menores caudales se presentan entre los meses de Febrero y Abril. En la Figura 7.48, se puede observar la ubicación de la estación.

Coordenadas (UTM): 256987 E ; 5642656 S. Zona: 19 H

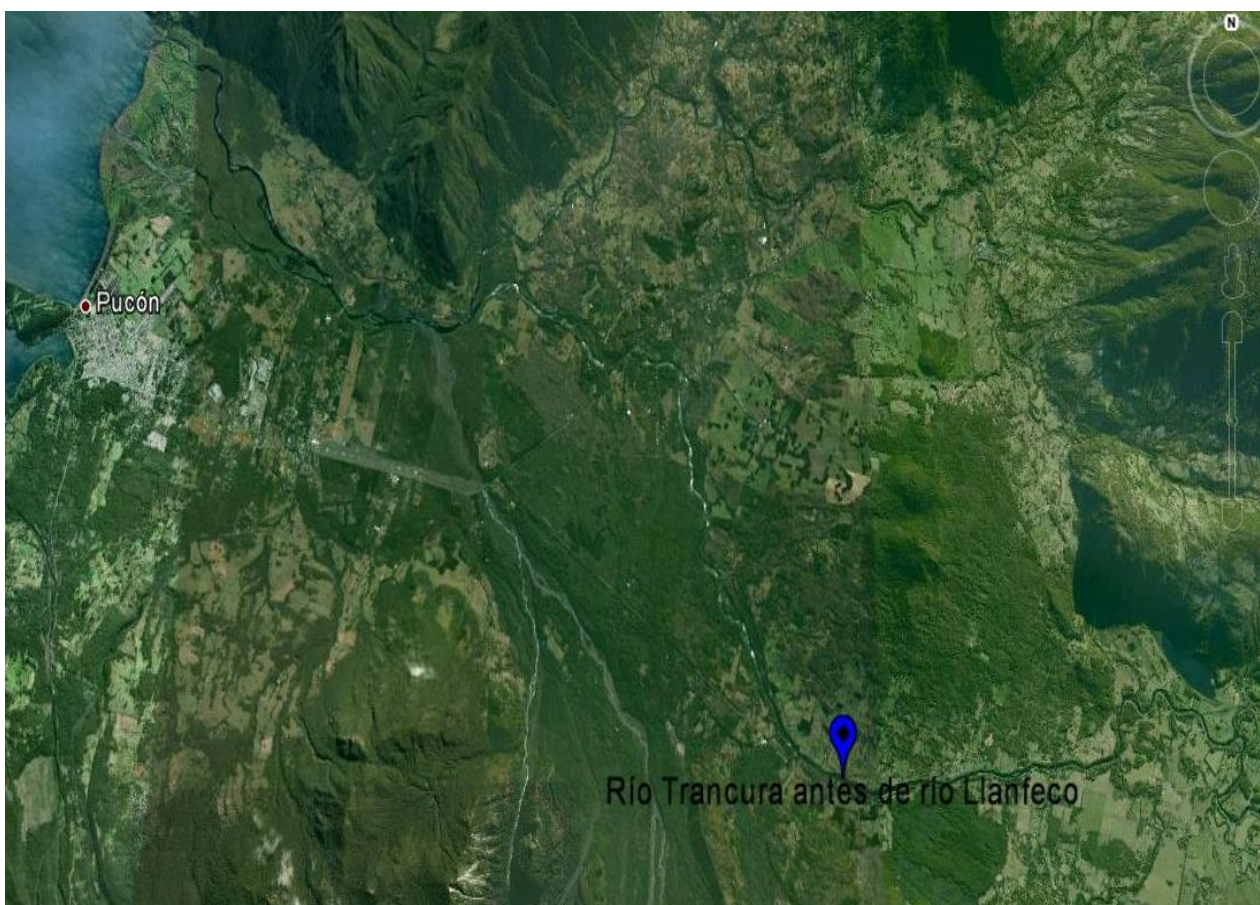


Figura 7.48 – Ubicación estación Río Trancura antes de Río Llanfeco.

Antecedentes Básicos

a) Fluviométricos

Se dispone de datos de series de caudales medios diarios observados de la estación Río Trancura antes de Río Llanfeco controlada por la Dirección General de Aguas del M.O.P para los periodos mostrados en la Tabla 7.48:

Tabla 7.48 – Registros fluviométricos Río Trancura antes de Río Llanfeco.

Nombre Estación	Periodo		Periodo	
	Desde	Hasta	Desde	Hasta
Río Trancura antes de Río Llanfeco	10/1970	02/1971	03/1972	06/1973
	04/1971	05/1971	08/1973	08/1973
	07/1971	08/1971	10/1973	10/1973
	01/1972	01/1972	05/1974	05/2012

b) Sedimentométricos

Se dispone de los registros sedimentométricos de la estación Río Trancura antes de Río Llanfeco. En la Tabla 7.49 se observan los tipos de muestreos realizados y los periodos de tiempo que abarcan los datos entregados por la D.G.A.

Tabla 7.49 – Registros sedimentométricos Río Trancura antes de Río Llanfeco.

Nombre Estación	Muestreos		Muestreos	
	Rutinarios		Integrados	
Río Trancura antes de Río Llanfeco	Desde	Hasta	Desde	Hasta
	03/1985	09/1989	05/1985	07/1989
	07/1992	08/1992	08/1992	09/1992
	01/1993	01/2009	02/1993	08/2008

Utilizando la metodología señalada en el punto 7.1.1, se obtuvo el modelo:

$$C_i = 1.13 C_r^{0.9}$$

Donde:

C_i = concentración de muestreos integrados (mg/l).

C_r = concentración de muestreos rutinarios (mg/l).

Posteriormente en la Figura 7.49 se muestra de manera gráfica la relación que existe entre el caudal líquido y gasto sólido en suspensión.

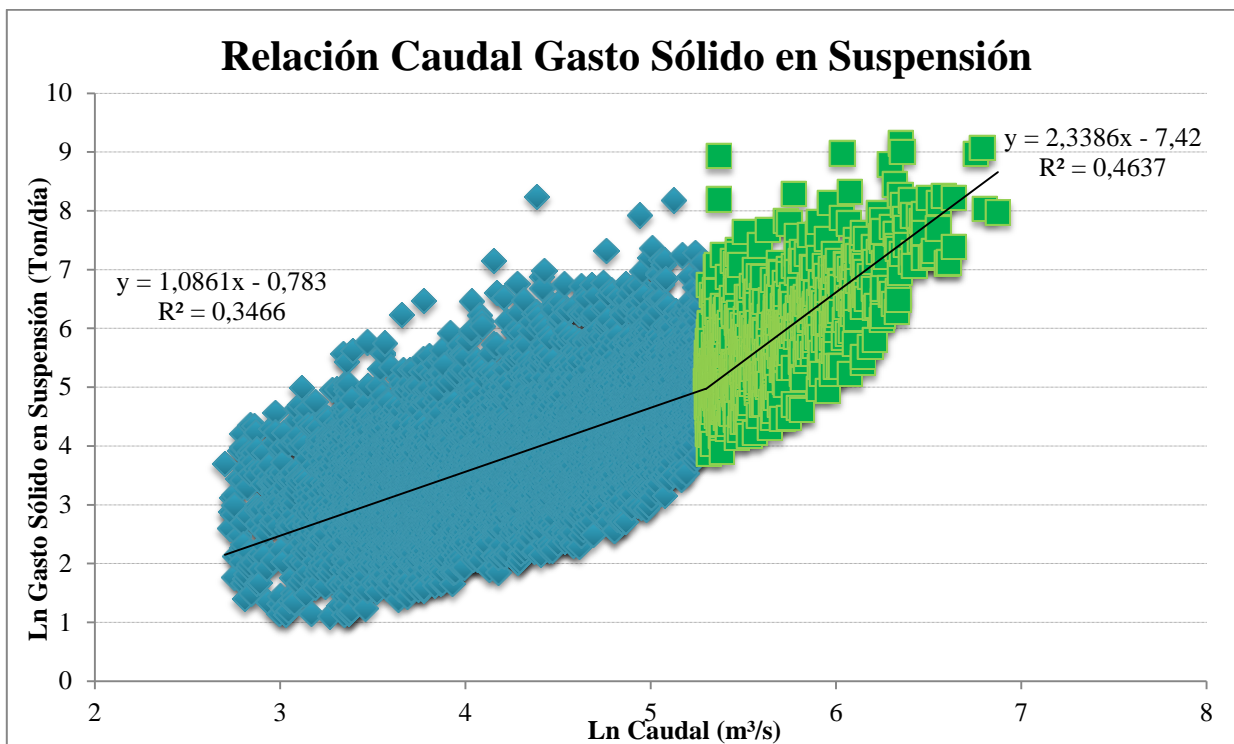


Figura 7.49 – Relación entre el caudal y gasto sólido en suspensión en la estación Río Trancura antes de Río Llanfeco.

Los modelos de la Curva de gasto sólido en suspensión corresponden a:

$$\text{Para } Q < 200.0 \text{ (m}^3/\text{s)} \quad G_{sd} = 0.457 Q_d^{1.086} \quad G_{sd} \text{ (Ton/día); } Q_d \text{ (m}^3/\text{s)}$$

$$\text{Para } Q > 200.0 \text{ (m}^3/\text{s)} \quad G_{sd} = 0.00059 Q_d^{2.338} \quad G_{sd} \text{ (Ton/día); } Q_d \text{ (m}^3/\text{s)}$$

Finalmente, utilizando los caudales medios diarios de la estación, se construyó la curva general de duración de caudales, para posteriormente integrar de manera discreta (intervalos) la curva de duración de caudales, de esta manera se generó el gasto sólido en suspensión medio anual y el caudal medio anual, en el Anexo 2 digital se encuentran las tablas de la curva de duración de caudales mencionadas y en el Anexo 3 digital se muestra de manera gráfica dicha curva.

En función de los análisis ejecutados, el caudal medio anual afluente y el gasto sólido medio anual para la estación Río Trancura antes de Río Llanfeco son:

$$\text{Caudal Medio Anual:} \quad 113,99 \text{ (m}^3/\text{s)}$$

$$\text{Gasto Sólido en Suspensión Medio Anual:} \quad 42.670 \text{ (Ton/año)}$$

Análisis Geomorfológico

Mediante la utilización del programa GrassGis, es posible realizar un análisis de la cuenca definida por la estación en estudio.

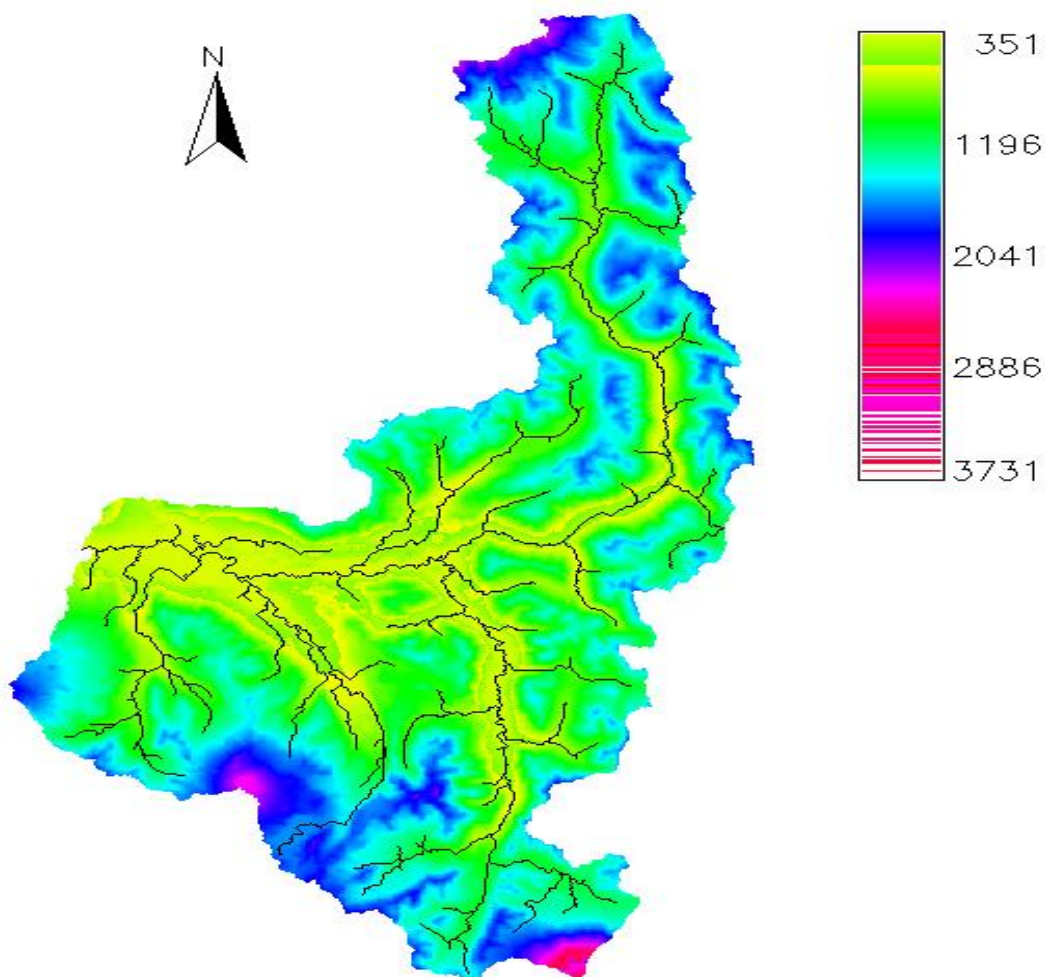


Figura 7.50 – Cuenca aportante de la estación Río Trancura antes de Llanfeco.

En la Tabla 7.50 se presentan los resultados entregados mediante la utilización del programa.

Tabla 7.50 – Resultados entregados por GrassGis para la estación Río Trancura antes de Llanfeco.

Área de la Cuenca	1.406 (Km ²)
Pendiente Media	33,82 (%)
Largo del Cauce	106,32 (Km)
Altura Máxima	3.731 (m)
Altura Mínima	351 (m)

7.1.17 Estación Río Cruces en Rucaco.

Ubicación de la estación.

Esta estación se ubica en el río Cruces. El río tiene como principales afluentes los ríos Pichoy y Nanihue. Se observa un régimen pluvial, teniendo los mayores caudales en los meses de Mayo y Agosto debido a lluvias invernales, mientras que los menores caudales se observan entre los meses de Enero y Marzo. En la Figura 7.51, se puede observar la ubicación de la estación.

Coordenadas (UTM): 680238 E ; 5619973 S. Zona: 18 H

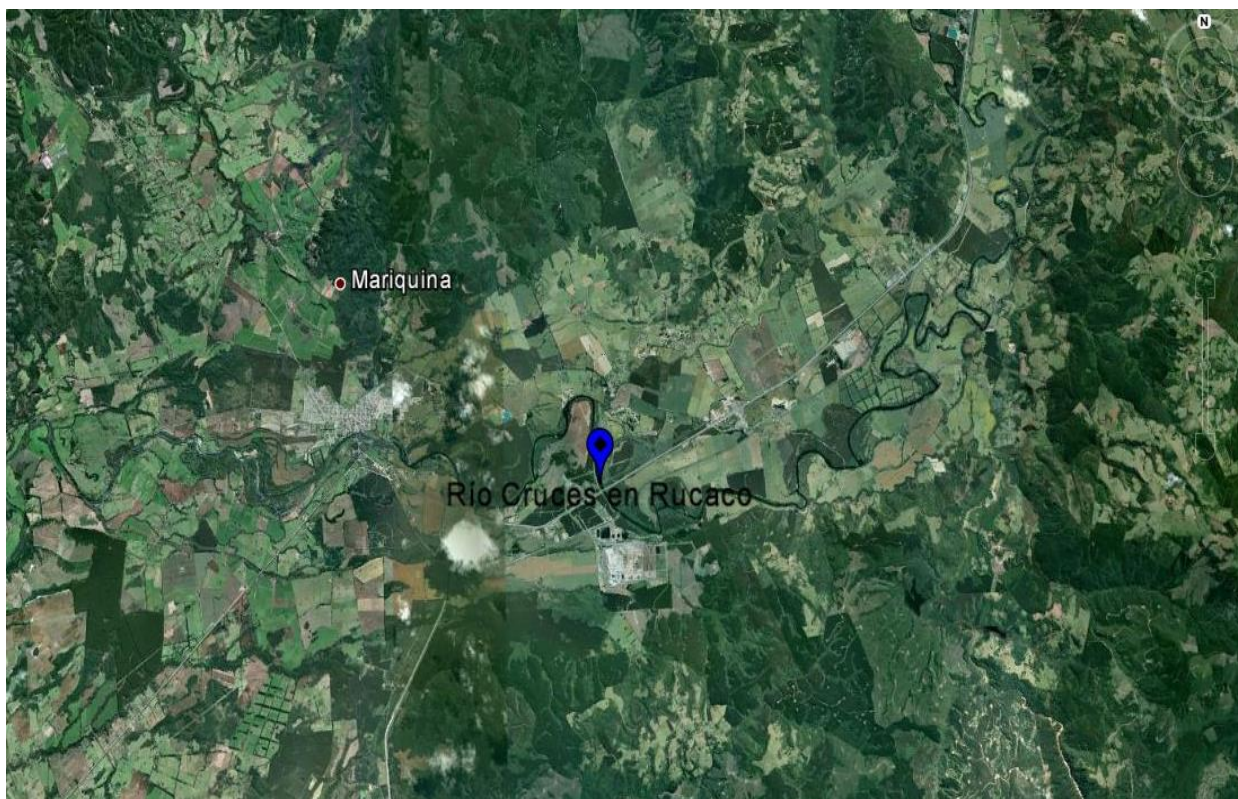


Figura 7.51 – Ubicación estación Río Cruces en Rucaco.

Antecedentes Básicos

a) Fluviométricos

Se dispone de datos de series de caudales medios diarios observados de la estación Río Cruces en Rucaco controlada por la Dirección General de Aguas del M.O.P para los periodos mostrados en la Tabla 7.51:

Tabla 7.51 – Registros fluviométricos Río Cruces en Rucaco.

Nombre Estación	Periodo		Periodo	
	Desde	Hasta	Desde	Hasta
Río Cruces en Rucaco	05/1969	08/1969	11/1975	07/1999
	10/1969	03/1974	09/1999	09/2011
	05/1974	03/1975	02/2012	05/2012
	05/1975	08/1975		

b) Sedimentométricos

Se dispone de los registros sedimentométricos de la estación Río Cruces en Rucaco. En la Tabla 7.52 se observan los tipos de muestreos realizados y los periodos de tiempo que abarcan los datos entregados por la D.G.A.

Tabla 7.52 – Registros sedimentométricos Río Cruces en Rucaco.

Nombre Estación	Muestreos		Muestreos	
	Rutinarios		Integrados	
Río Cruces en Rucaco	Desde	Hasta	Desde	Hasta
	03/1985	09/1989	05/1985	07/1989
	07/1992	08/1992	08/1992	09/1992
	01/1993	12/2008	02/1993	12/2008

Utilizando la metodología señalada en el punto 7.1.1, se obtuvo el modelo:

$$C_i = 2.06 C_r^{0.65}$$

Donde:

C_i = concentración de muestreos integrados (mg/l).

C_r = concentración de muestreos rutinarios (mg/l).

Posteriormente en la Figura 7.52 se muestra de manera gráfica la relación que existe entre el caudal líquido y gasto sólido en suspensión.

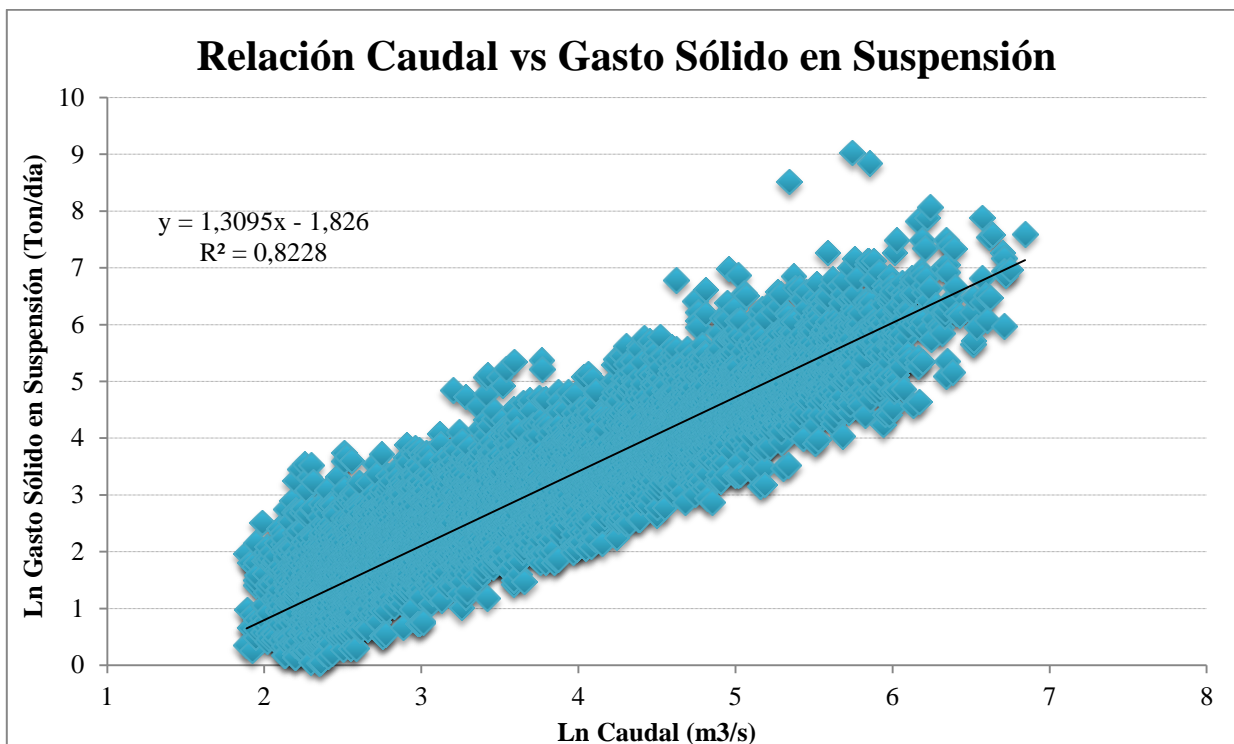


Figura 7.52 – Relación entre el caudal y gasto sólido en suspensión en la estación Río Cruces en Rucaco.

El modelo de la Curva de gasto sólido en suspensión es:

$$G_{sd} = 0.161 Q_d^{1.309} \quad G_{sd} \text{ (Ton/día); } Q_d \text{ (m}^3\text{/s)}$$

Finalmente, utilizando los caudales medios diarios de la estación, se construyó la curva general de duración de caudales, para posteriormente integrar de manera discreta (intervalos) la curva de duración de caudales, de esta manera se generó el gasto sólido en suspensión medio anual y el caudal medio anual, en el Anexo 2 digital se encuentran las tablas de la curva de duración de caudales mencionadas y en el Anexo 3 digital se muestra de manera gráfica dicha curva.

En función de los análisis realizados, el caudal medio anual afluente y el gasto sólido medio anual para la estación Río Cruces en Rucaco son:

Caudal Medio Anual: 87,18 (m³/s)

Gasto Sólido en Suspensión Medio Anual: 24.778 (Ton/año)

Análisis Geomorfológico

Mediante la utilización del programa GrassGis, es posible realizar un análisis de la cuenca definida por la estación en estudio.

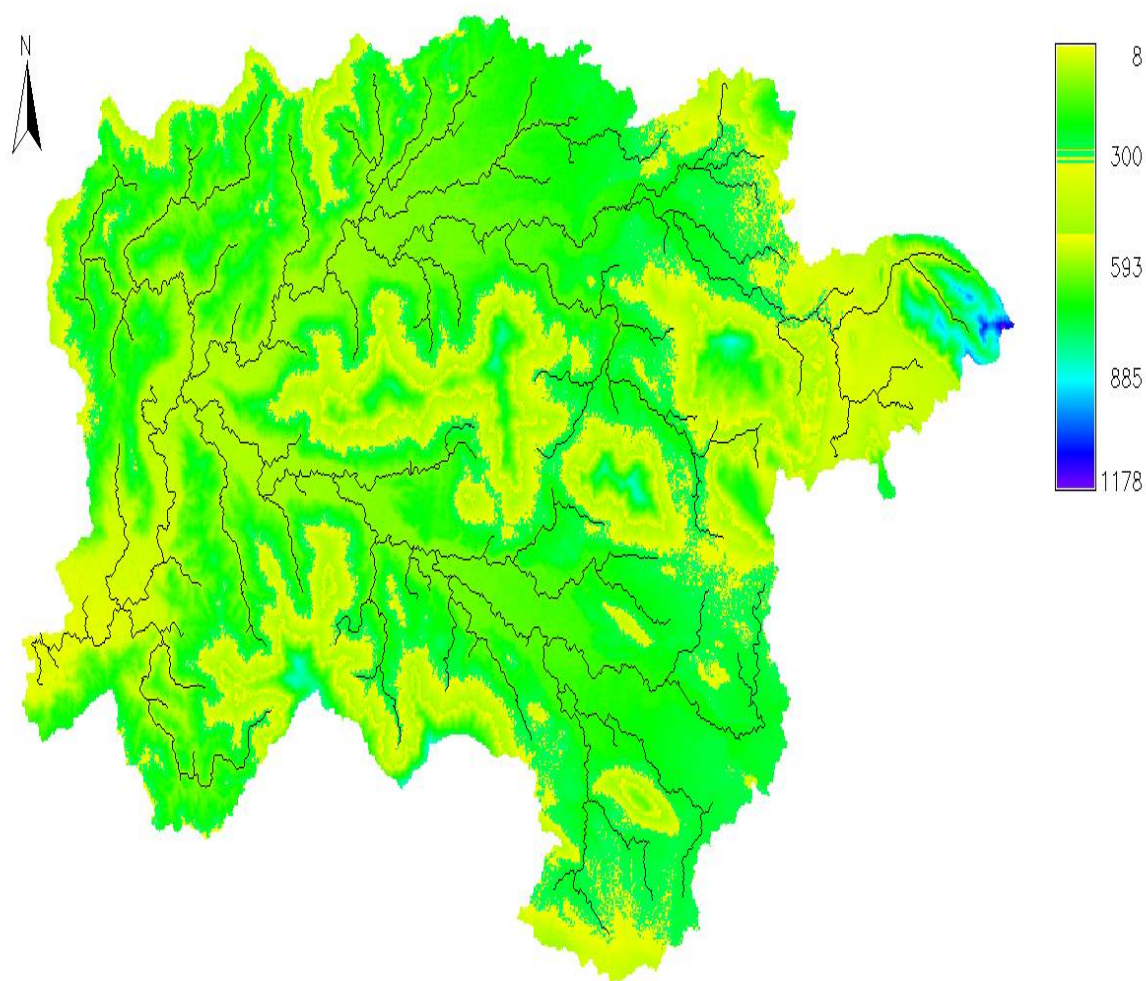


Figura 7.53 – Cuenca aportante de la estación Río Cruces en Rucaco.

En la Tabla 7.53 se presentan los resultados entregados mediante la utilización del programa.

Tabla 7.53 – Resultados entregados por GrassGis para la estación Río Cruces en Rucaco.

Área de la Cuenca	1.798 (Km ²)
Pendiente Media	14,64 (%)
Largo del Cauce	146,71 (Km)
Altura Máxima	1.178 (m)
Altura Mínima	8 (m)

7.1.18 Estación Río Rahue en Forrahue.

Ubicación de la estación.

La estación se ubica en río Rahue. Uno de los principales afluentes es el río Damas. El río Rahue presenta un régimen pluvial, teniendo sus mayores caudales entre los meses de Mayo y Agosto, debido a las lluvias invernales, mientras que los menores caudales se dan en los meses de Febrero y Marzo. Este río presenta caudales de alta magnitud, independiente si se trata de un año seco o lluvioso. En la Figura 7.54, se puede observar la ubicación de la estación.

Coordenadas (UTM): 646645 E ; 5512060 S. Zona: 18 G

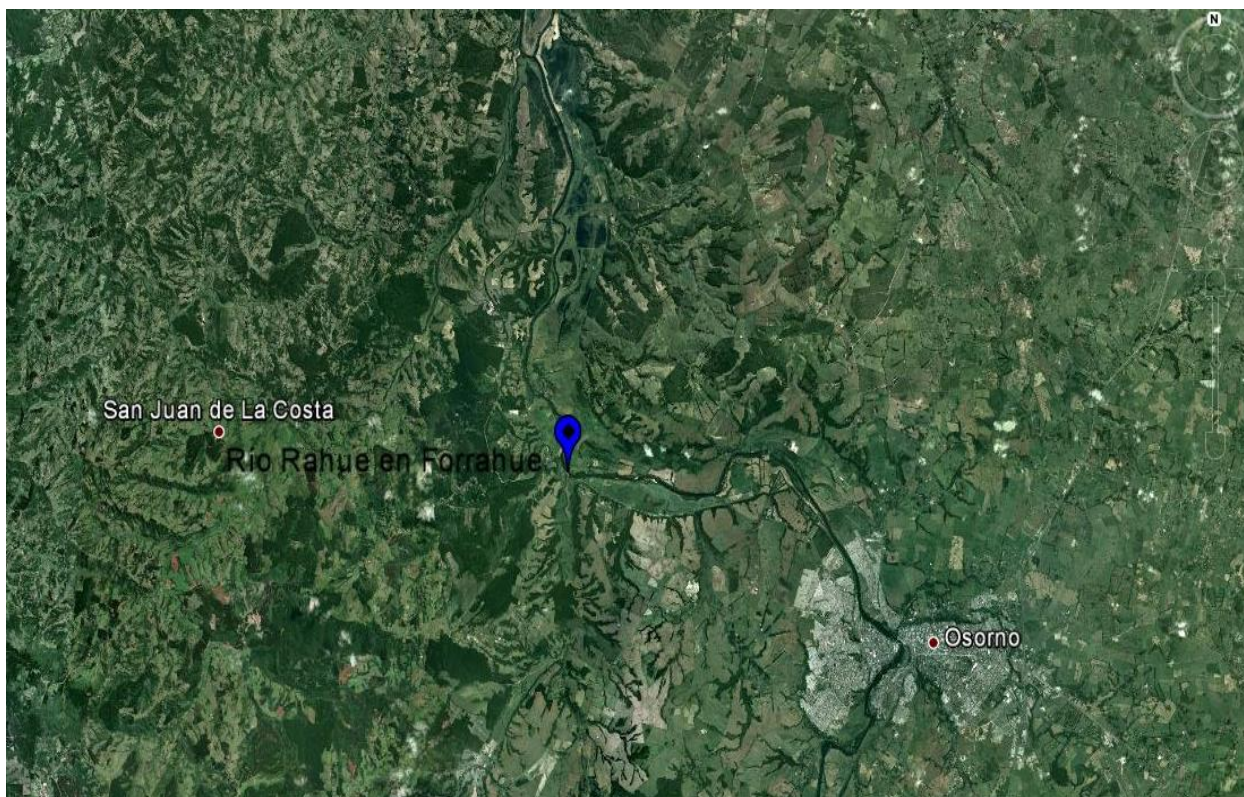


Figura 7.54 – Ubicación estación Río Rahue en Forrahue.

Antecedentes Básicos

a) Fluviométricos

Se dispone de datos de series de caudales medios diarios observados de la estación Río Rahue en Forrahue controlada por la Dirección General de Aguas del M.O.P para los periodos mostrados en la Tabla 7.54:

Tabla 7.54 – Registros fluviométricos Río Rahue en Forrahue.

Nombre Estación	Periodo		Periodo	
	Desde	Hasta	Desde	Hasta
Río Rahue en Forrahue	03/1986	09/1990	06/2001	04/2008
	11/1990	06/1996	06/2008	06/2009
	08/1996	05/1997	08/2009	02/2012
	07/1997	08/2000		

b) Sedimentométricos

Se dispone de los registros sedimentométricos de la estación Río Rahue en Forrahue. En la Tabla 7.55 se observan los tipos de muestreos realizados y los periodos de tiempo que abarcan los datos entregados por la D.G.A.

Tabla 7.55 – Registros sedimentométricos Río Rahue en Forrahue.

Nombre Estación	Muestreos		Muestreos	
	Rutinarios		Integrados	
Río Rahue en Forrahue	Desde	Hasta	Desde	Hasta
	11/1999	06/2004	11/1999	03/2003
	08/2004	01/2008	05/2003	12/2008
	09/2008	11/2008		

Utilizando la metodología señalada en el punto 7.1.1, se obtuvo el modelo:

$$C_i = 0.98 C_r^{1.08},$$

Donde:

C_i = concentración de muestreos integrados (mg/l).

C_r = concentración de muestreos rutinarios (mg/l).

Posteriormente en la Figura 7.55 se muestra de manera gráfica la relación que existe entre el caudal líquido y gasto sólido en suspensión.

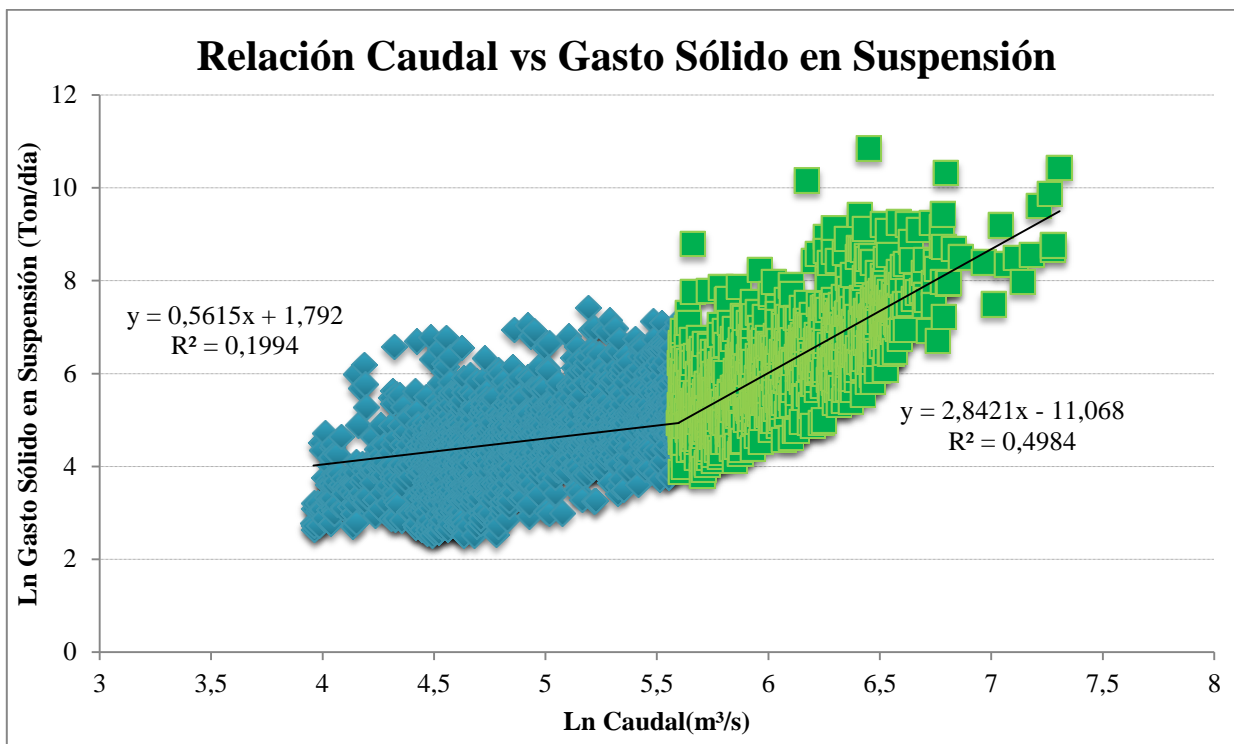


Figura 7.55 – Relación entre el caudal y gasto sólido en suspensión en la estación Río Rahue en Forrahue.

Los modelos de la Curva de gasto sólido en suspensión corresponden a:

$$\text{Para } Q < 270.0 \text{ (m}^3/\text{s)} \quad G_{sd} = 6.001 Q_d^{0.561} \quad G_{sd} \text{ (Ton/día); } Q_d \text{ (m}^3/\text{s)}$$

$$\text{Para } Q > 270.0 \text{ (m}^3/\text{s)} \quad G_{sd} = 0.000015 Q_d^{2.843} \quad G_{sd} \text{ (Ton/día); } Q_d \text{ (m}^3/\text{s)}$$

Finalmente, utilizando los caudales medios diarios de la estación, se construyó la curva general de duración de caudales, para posteriormente integrar de manera discreta (intervalos) la curva de duración de caudales, de esta manera se generó el gasto sólido en suspensión medio anual y el caudal medio anual, en el Anexo 2 digital se encuentran las tablas de la curva de duración de caudales mencionadas y en el Anexo 3 digital se muestra de manera gráfica dicha curva.

En función de los resultados obtenidos, el caudal medio anual afluente y el gasto sólido medio anual para la estación Río Rahue en Forrahue son:

$$\text{Caudal Medio Anual:} \quad 244,72 \text{ (m}^3/\text{s)}$$

$$\text{Gasto Sólido en Suspensión Medio Anual:} \quad 123.241 \text{ (Ton/año)}$$

Análisis Geomorfológico

Mediante la utilización del programa GrassGis, es posible realizar un análisis de la cuenca definida por la estación en estudio.

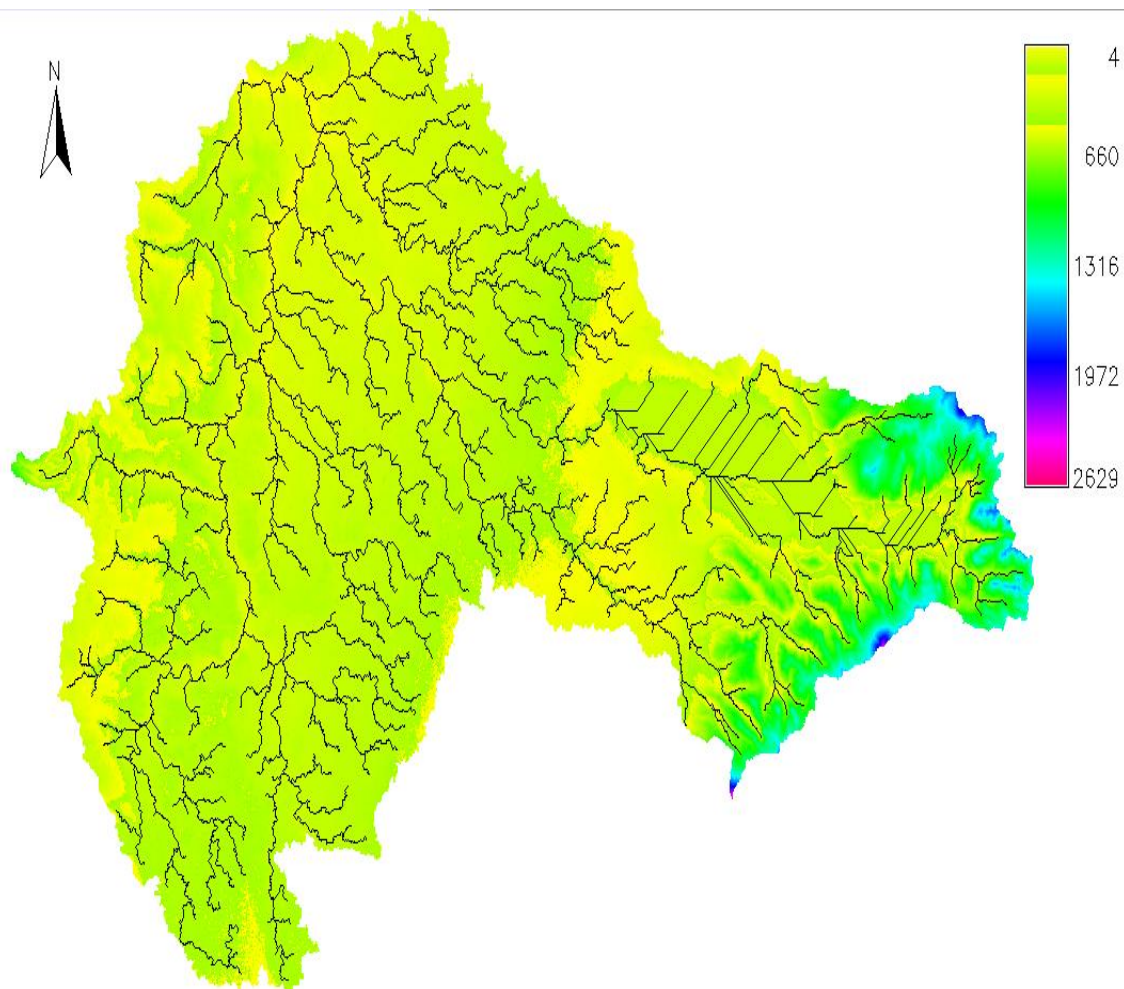


Figura 7.56 – Cuenca aportante de la estación Río Rahue en Forrahue.

En la Tabla 7.56 se presentan los resultados entregados mediante la utilización del programa.

Tabla 7.56 – Resultados entregados por GrassGis para la estación Río Rahue en Forrahue.

Área de la Cuenca	5.571 (Km ²)
Pendiente Media	10,18 (%)
Largo del Cauce	206,36 (Km)
Altura Máxima	2.629 (m)
Altura Mínima	4 (m)

7.1.19 Estación Río Palena bajo junta Rosselot.

Ubicación de la estación.

La estación se ubica en el río Palena. El río cuenta con un régimen mixto, teniendo un alza de caudales entre los meses de Junio y Agosto debido a las lluvias invernales, y entre los meses de Noviembre y Enero, debido a los deshielos producidos en la Cordillera de los Andes. Los menores caudales se observan en los meses de Septiembre y Febrero. En la Figura 7.57, se puede observar la ubicación de la estación.

Coordenadas (UTM): 706486 E ; 5129038 S. Zona: 18 G

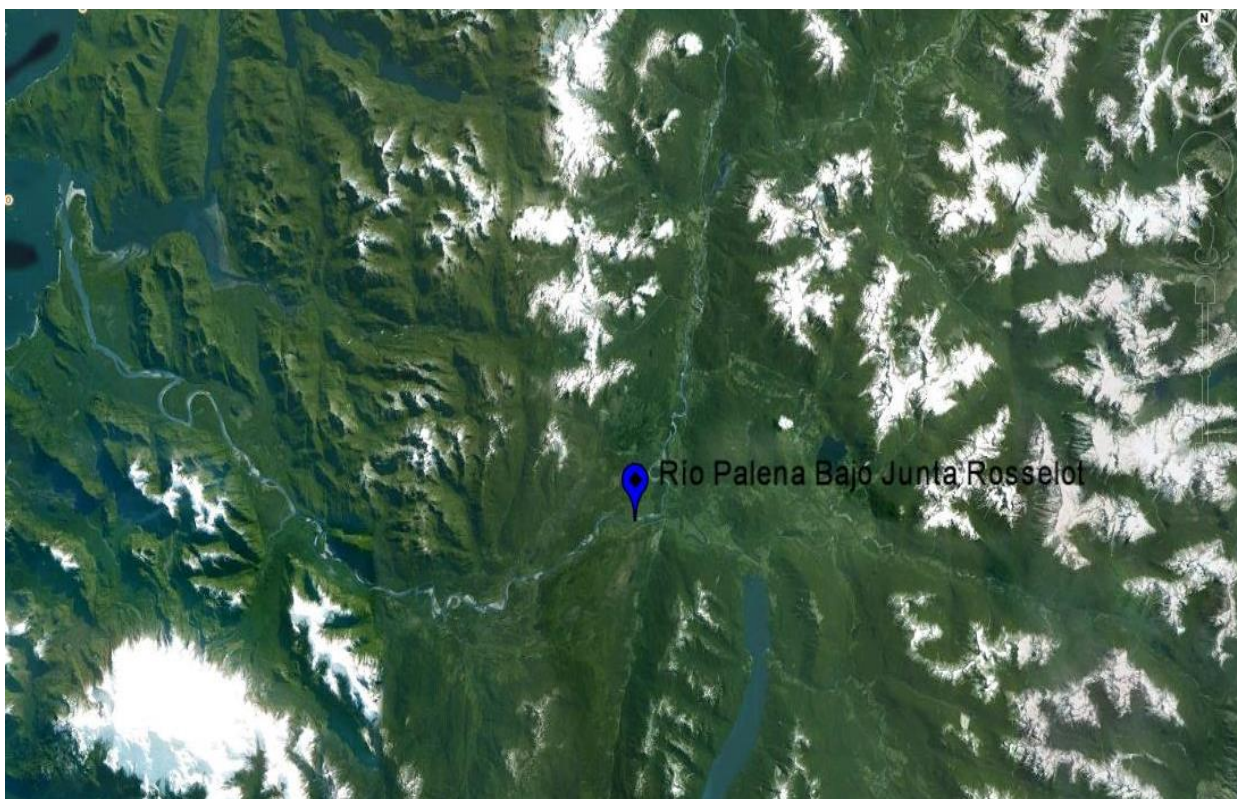


Figura 7.57 – Ubicación estación Río Palena bajo junta Rosselot.

Antecedentes Básicos

a) Fluviométricos

Se dispone de datos de series de caudales medios diarios observados de la estación Río Palena bajo junta Rosselot controlada por la Dirección General de Aguas del M.O.P para los periodos mostrados en la Tabla 7.57:

Tabla 7.57 – Registros fluviométricos Río Palena bajo junta Rosselot.

Nombre Estación	Periodo		Periodo	
	Desde	Hasta	Desde	Hasta
Río Palena bajo Junta Rosselot	06/1999	10/2000	01/2003	12/2009
	11/2000	06/2002	03/2010	09/2011
	08/2002	11/2002		

b) Sedimentométricos

Se dispone de los registros sedimentométricos de la estación Río Palena bajo junta Rosselot. En la Tabla 7.58 se observa el tipo de muestreo realizado y el periodo de tiempo que abarcan los datos entregados por la D.G.A.

Tabla 7.58 – Registros sedimentométricos Río Palena bajo junta Rosselot.

Nombre Estación	Muestreos	
	Integrados	
Río Palena Bajo Junta Rosselot	Hasta	Desde
		11/2002

Esta estación no cuenta con información de muestreo rutinario, por consiguiente se pasó directamente a multiplicar la estadística de caudales medios diarios con la estadística de concentraciones de muestreos integrados, y se generó la estadística de gastos sólidos en suspensión medios diarios. En la Figura 7.58 se muestra de manera gráfica la relación existente entre el caudal medio diario y el gasto sólido en suspensión medio diario.

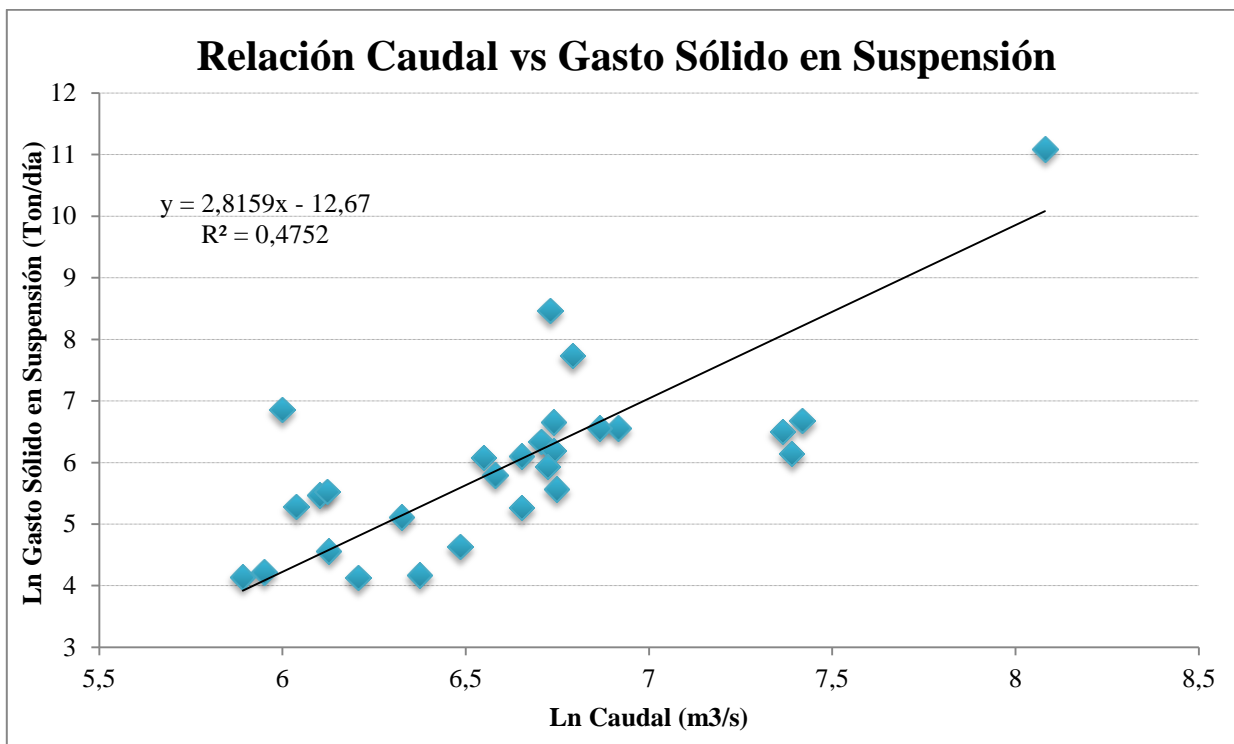


Figura 7.58 – Relación entre el caudal y gasto sólido en suspensión en la estación Río Palena bajo junta Rosselot.

El modelo de la Curva de gasto sólido en suspensión es:

$$G_{sd} = 0.0000031 Q_d^{2.816} \quad G_{sd} \text{ (Ton/día); } Q_d \text{ (m}^3\text{/s)}$$

Finalmente, utilizando los caudales medios diarios de la estación, se construyó la curva general de duración de caudales, para posteriormente integrar de manera discreta (intervalos) la curva de duración de caudales, de esta manera se generó el gasto sólido en suspensión medio anual y el caudal medio anual, en el Anexo 2 digital se encuentran las tablas de la curva de duración de caudales mencionadas y en el Anexo 3 digital se muestra de manera gráfica dicha curva.

En función de los análisis realizados, el caudal medio anual afluente y el gasto sólido medio anual para la estación Río Palena bajo junta Rosselot son:

Caudal Medio Anual: 853,40 (m³/s)

Gasto Sólido en Suspensión Medio Anual: 632.353 (Ton/año)

Análisis Geomorfológico

Mediante la utilización del programa GrassGis, es posible realizar un análisis de la cuenca definida por la estación en estudio.

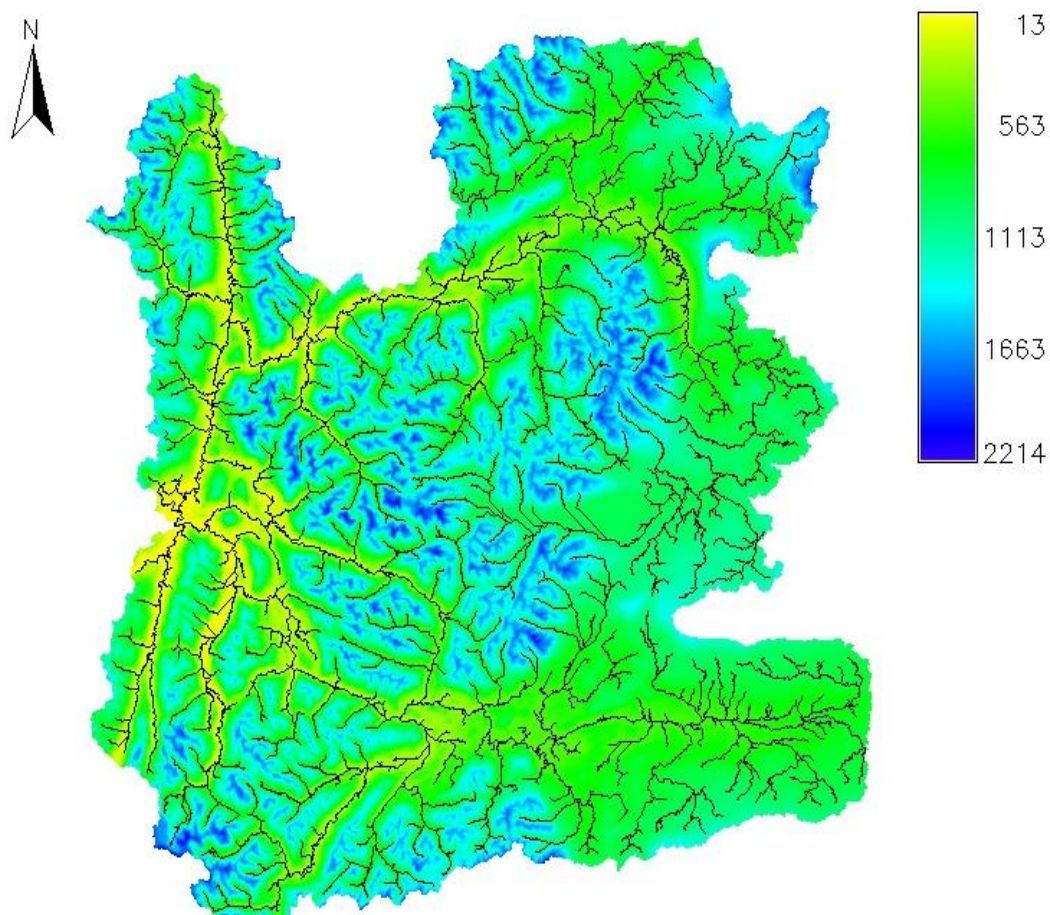


Figura 7.59 – Cuenca aportante de la estación Río Palena bajo junta Rosselot.

En la Tabla 7.59 se presentan los resultados entregados mediante la utilización del programa.

Tabla 7.59 – Resultados entregados por GrassGis para la estación Río Palena bajo junta Rosselot.

Área de la Cuenca	12.107 (Km ²)
Pendiente Media	33,20 (%)
Largo del Cauce	241,50 (Km)
Altura Máxima	2.214 (m)
Altura Mínima	13 (m)

7.1.20 Estación Río Cisnes en Puerto Cisnes.

Ubicación de la estación.

La estación se ubica en el río Cisnes. La estación se encuentra a unos 5,9 (km) aguas abajo de la unión con la laguna Escondida, que desemboca en este río. Cuenta con un régimen mixto, es así como en años lluviosos, los mayores caudales se observan entre los meses de Junio y Agosto debido a las lluvias invernales, mientras que en años secos, los mayores caudales se presentan entre los meses de Noviembre y Enero, debido a los deshielos que ocurren en las montañas. En la Figura 7.60, se puede observar la ubicación de la estación.

Coordenadas (UTM): 680884 E ; 5041808 S. Zona: 18 G

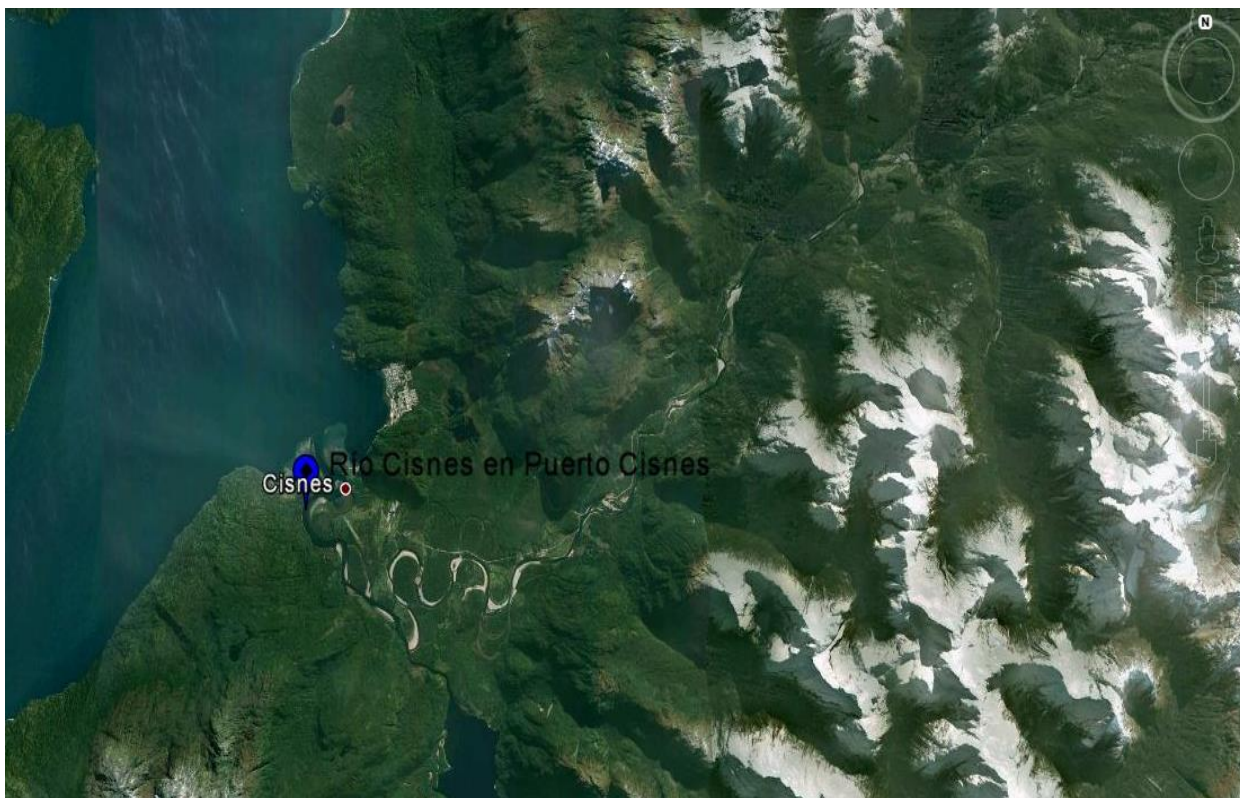


Figura 7.60 - Ubicación estación Río Cisnes en Puerto Cisnes.

Antecedentes Básicos

a) Fluviométricos

Se dispone de datos de series de caudales medios diarios observados de la estación Río Cisnes en Puerto Cisnes controlada por la Dirección General de Aguas del M.O.P para el periodo mostrado en la Tabla 7.60:

Tabla 7.60 – Registros fluviométricos Río Cisnes en Puerto Cisnes.

Nombre Estación	Periodo	
	Desde	Hasta
Río Cisnes en Puerto Cisnes	04/2001	01/2012

b) Sedimentométricos

Se dispone de los registros sedimentométricos de la estación Río Cisnes en Puerto Cisnes. En la Tabla 7.61 se observa el tipo de muestreo realizado y el periodo de tiempo que abarcan los datos entregados por la D.G.A.

Tabla 7.61 – Registros sedimentométricos Río Cisnes en puerto Cisnes.

Nombre Estación	Muestreos	
	Integrados	
Río Cisnes en Puerto Cisnes	Desde	Hasta
		11/2003

Utilizando la metodología señalada en el punto 7.1.19, en la Figura 7.61 se muestra de manera gráfica la relación existente entre el caudal medio diario y el gasto sólido en suspensión diario.

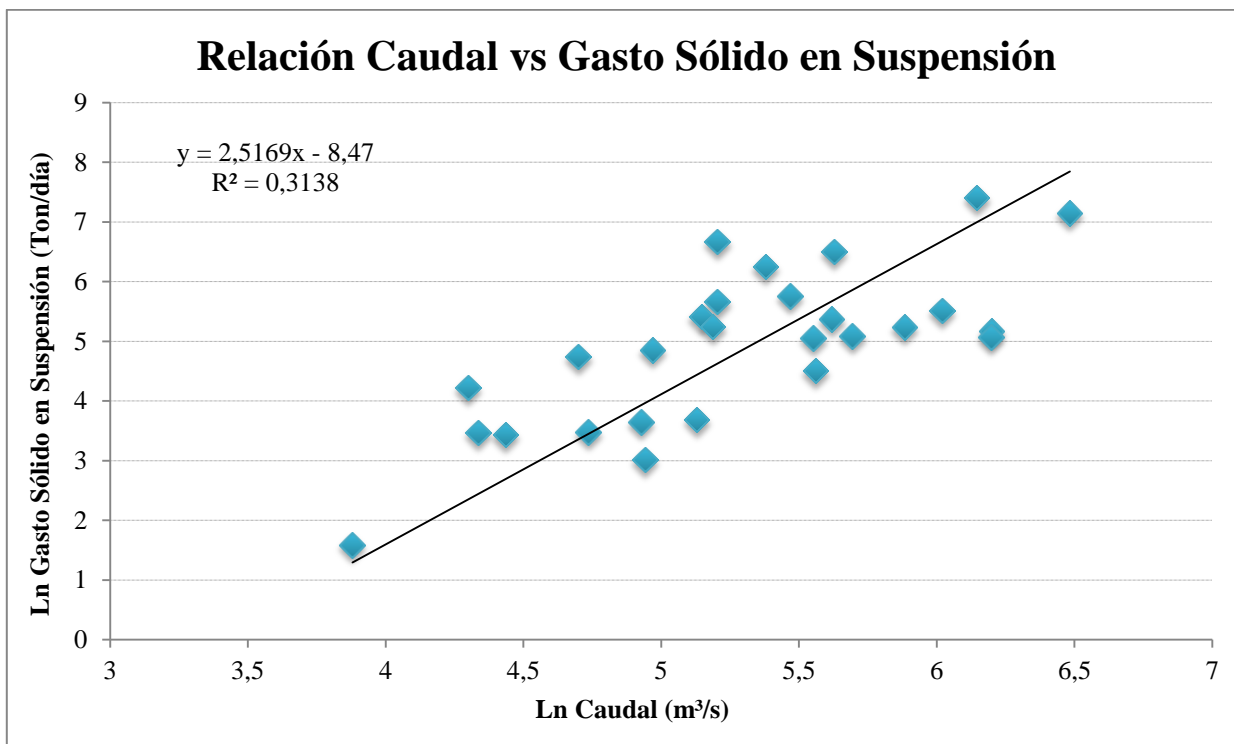


Figura 7.61 – Relación entre el caudal y gasto sólido en suspensión en la estación Río Cisnes en Puerto Cisnes.

El modelo de la Curva de gasto sólido en suspensión es:

$$G_{sd} = 0.00021 Q_d^{2.516} \quad G_{sd} \text{ (Ton/día); } Q_d \text{ (m}^3\text{/s)}$$

Finalmente, utilizando los caudales medios diarios de la estación, se construyó la curva general de duración de caudales, para posteriormente integrar de manera discreta (intervalos) la curva de duración de caudales, de esta manera se generó el gasto sólido en suspensión medio anual y el caudal medio anual, en el Anexo 2 digital se encuentran las tablas de la curva de duración de caudales mencionadas y en el Anexo 3 digital se muestra de manera gráfica dicha curva.

En función de los resultados obtenidos, el caudal medio anual afluente y el gasto sólido medio anual para la estación Río Cisnes en Puerto Cisnes son:

Caudal Medio Anual: 220,60 (m³/s)

Gasto Sólido en Suspensión Medio Anual: 159.718 (Ton/año)

Análisis Geomorfológico

Mediante la utilización del programa GrassGis, es posible realizar un análisis de la cuenca definida por la estación en estudio.

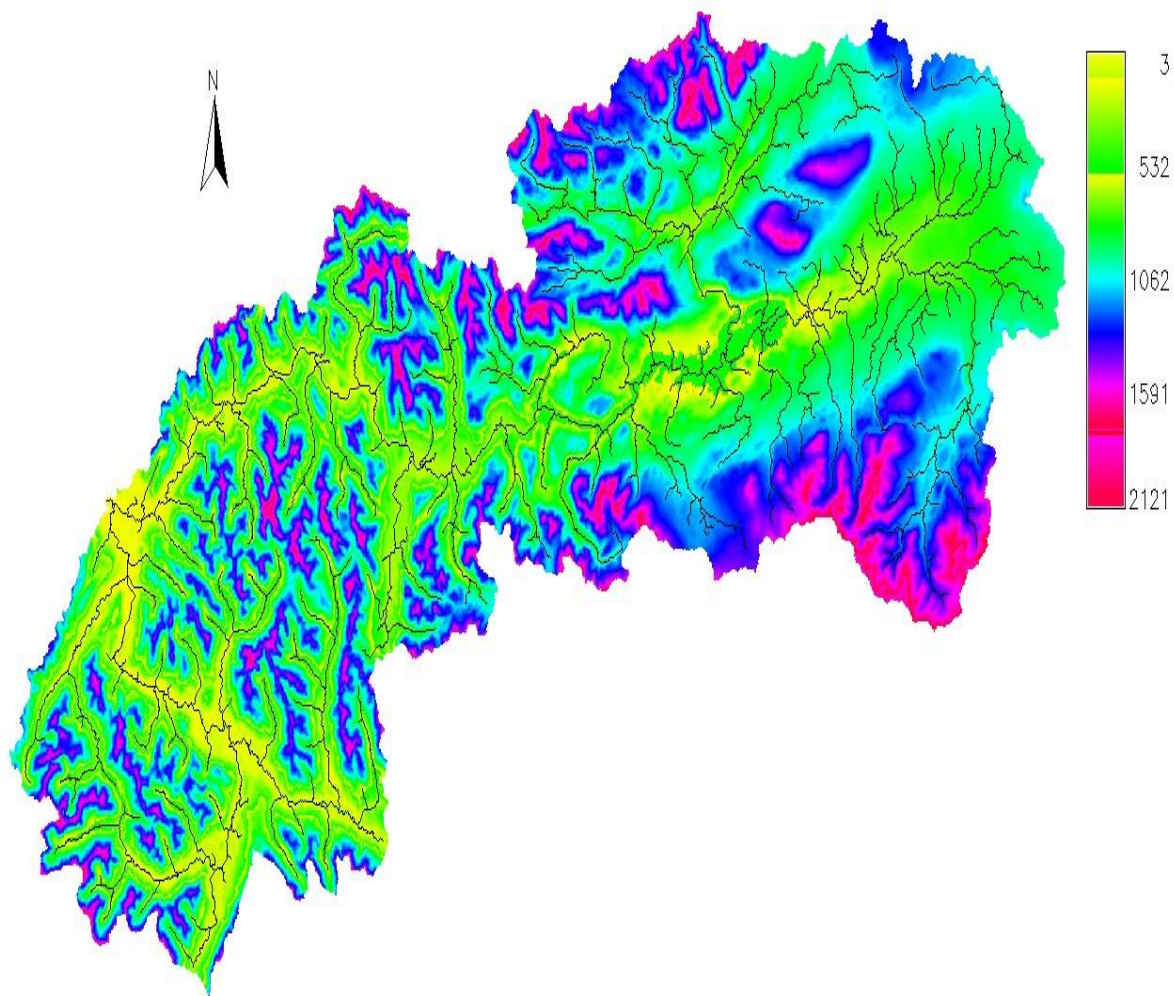


Figura 7.62 – Cuenca aportante de la estación Río Cisnes en Puerto Cisnes.

En la Tabla 7.62 se presentan los resultados entregados mediante la utilización del programa.

Tabla 7.62 – Resultados entregados por GrassGis para la estación Río Cisnes en Puerto Cisnes.

Área de la Cuenca	5.142 (Km ²)
Pendiente Media	34,63 (%)
Largo del Cauce	237,31 (Km)
Altura Máxima	2.121 (m)
Altura Mínima	3 (m)

7.1.21 Estación Río Aysén en Puerto Aysén.

Ubicación de la estación.

La estación se ubica en el río Aysén. Se encuentra a unos 6 (Km) aguas abajo de la unión de éste río con los ríos Simpson y Blanco. Parte de la cuenca de este río pertenece al territorio Argentino. El río Aysén presenta grandes caudales durante todo el año, pero las mayores alzas de caudal ocurren entre los meses de Junio a Agosto debido a lluvias invernales, y entre los meses de Noviembre y Enero debido a los deshielos. En la Figura 7.63, se puede observar la ubicación de la estación.

Coordenadas (UTM): 681090 E ; 4969460 S. Zona: 18 G

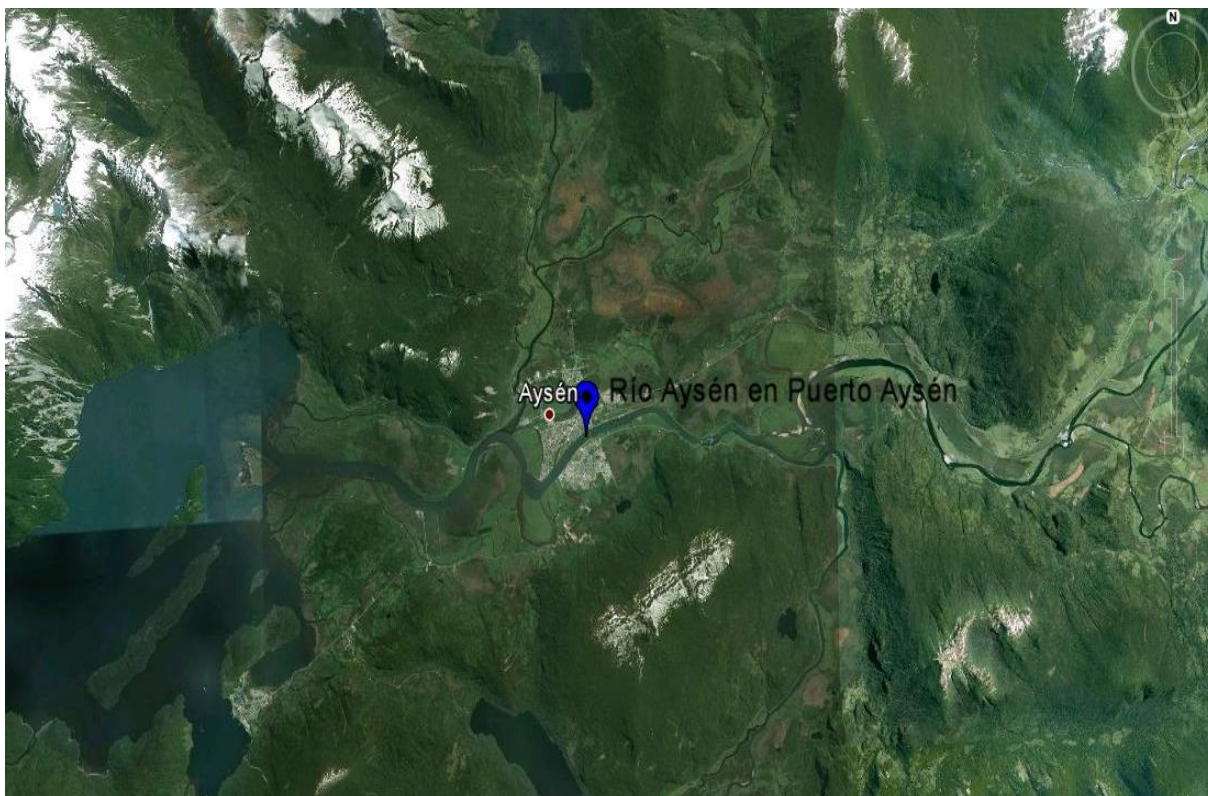


Figura 7.63 – Ubicación estación Río Aysén en Puerto Aysén.

Antecedentes Básicos

a) Fluviométricos

Se dispone de datos de series de caudales medios diarios observados de la estación Río Aysén en Puerto Aysén controlada por la Dirección General de Aguas del M.O.P para los periodos mostrados en la Tabla 7.63:

Tabla 7.63 – Registros fluviométricos Río Aysén en Puerto Aysén.

Nombre Estación	Periodo		Periodo	
	Desde	Hasta	Desde	Hasta
Río Aysén en Puerto Aysén	12/1995	05/1998	01/2004	07/2009
	07/1998	11/2003	09/2009	10/2011

b) Sedimentométricos

Se dispone de los registros sedimentométricos de la estación Río Aysén en Puerto Aysén. En la Tabla 7.64 se observa el tipo de muestreo realizado y el periodo de tiempo que abarcan los datos entregados por la D.G.A.

Tabla 7.64 – Registros sedimentométricos Río Aysén en Puerto Aysén.

Nombre Estación	Muestreos	
	Integrados	
Río Aysén en Puerto Aysén	Desde	Hasta
		11/2002

Utilizando la metodología señalada en el punto 7.1.19, en la Figura 7.64 se muestra de manera gráfica la relación existente entre el caudal medio diario y el gasto sólido en suspensión medio diario.

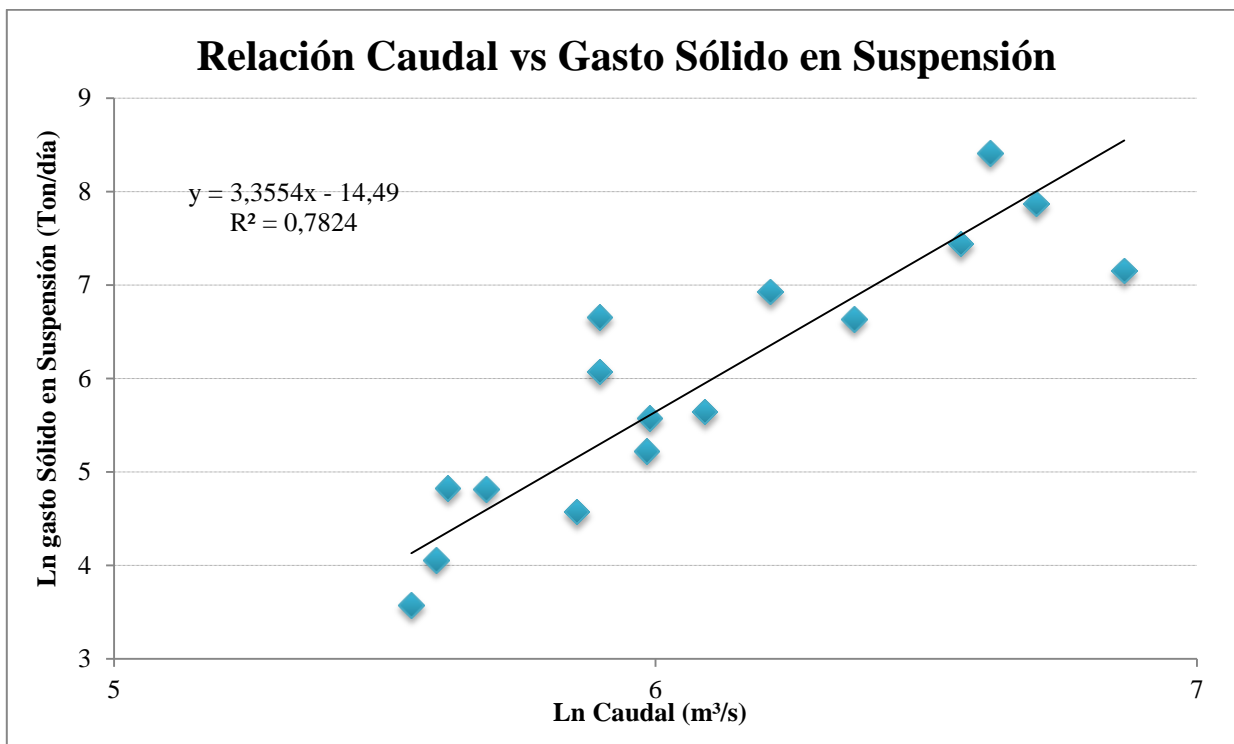


Figura 7.64 – Relación entre el caudal y gasto sólido en suspensión en la estación Río Aysén en Puerto Aysén.

El modelo de la Curva de gasto sólido en suspensión es:

$$G_{sd} = 5.09 \times 10^{-7} Q_d^{3.355} \quad G_{sd} \text{ (Ton/día); } Q_d \text{ (m}^3\text{/s)}$$

Finalmente, utilizando los caudales medios diarios de la estación, se construyó la curva general de duración de caudales, para posteriormente integrar de manera discreta (intervalos) la curva de duración de caudales, de esta manera se generó el gasto sólido en suspensión medio anual y el caudal medio anual, en el Anexo 2 digital se encuentran las tablas de la curva de duración de caudales mencionadas y en el Anexo 3 digital se muestra de manera gráfica dicha curva.

En función de los análisis realizados, el caudal medio anual afluente y el gasto sólido medio anual para la estación Río Aysén en Puerto Aysén son:

Caudal Medio Anual: 547,76 (m³/s)

Gasto Sólido en Suspensión Medio Anual: 1.428.571 (Ton/año)

Análisis Geomorfológico

Mediante la utilización del programa GrassGis, es posible realizar un análisis de la cuenca definida por la estación en estudio.

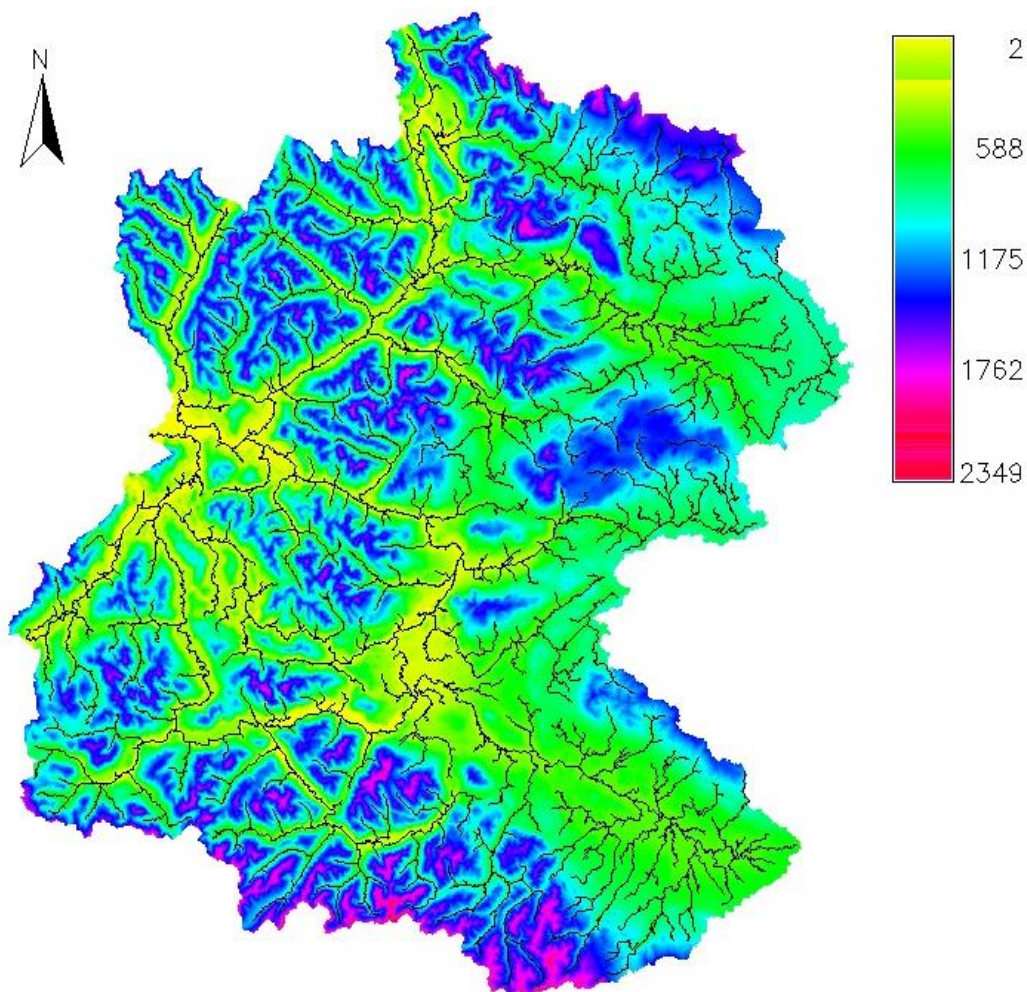


Figura 7.65 – Cuenca aportante de la estación Río Aysén en Puerto Aysén.

En la Tabla 7.65 se presentan los resultados entregados mediante la utilización del programa.

Tabla 7.65 – Resultados entregados por GrassGis para la estación Río Aysén en Puerto Aysén.

Área de la Cuenca	11.735 (Km ²)
Pendiente Media	31,82 (%)
Largo del Cauce	312,89 (Km)
Altura Máxima	2.349 (m)
Altura Mínima	2 (m)

7.1.22 Estación Río Ibáñez en Desembocadura.

Ubicación de la estación.

Esta estación se ubica en el río Ibáñez. Se encuentra a unos 6 (km) aguas arriba de su desembocadura en el lago General Carrera, además el río se desarrolla rodeando la reserva nacional cerro Castillo. El río presenta un régimen mixto, es así como en años secos, los mayores caudales se desarrollan entre los meses de Octubre y Enero, mientras que en los años lluviosos, los meses de Julio y Agosto aumentan sus caudales. En la Figura 7.66, se señala la ubicación de la estación.

Coordenadas (UTM): 269108 E ; 4872010 S. Zona: 19 G

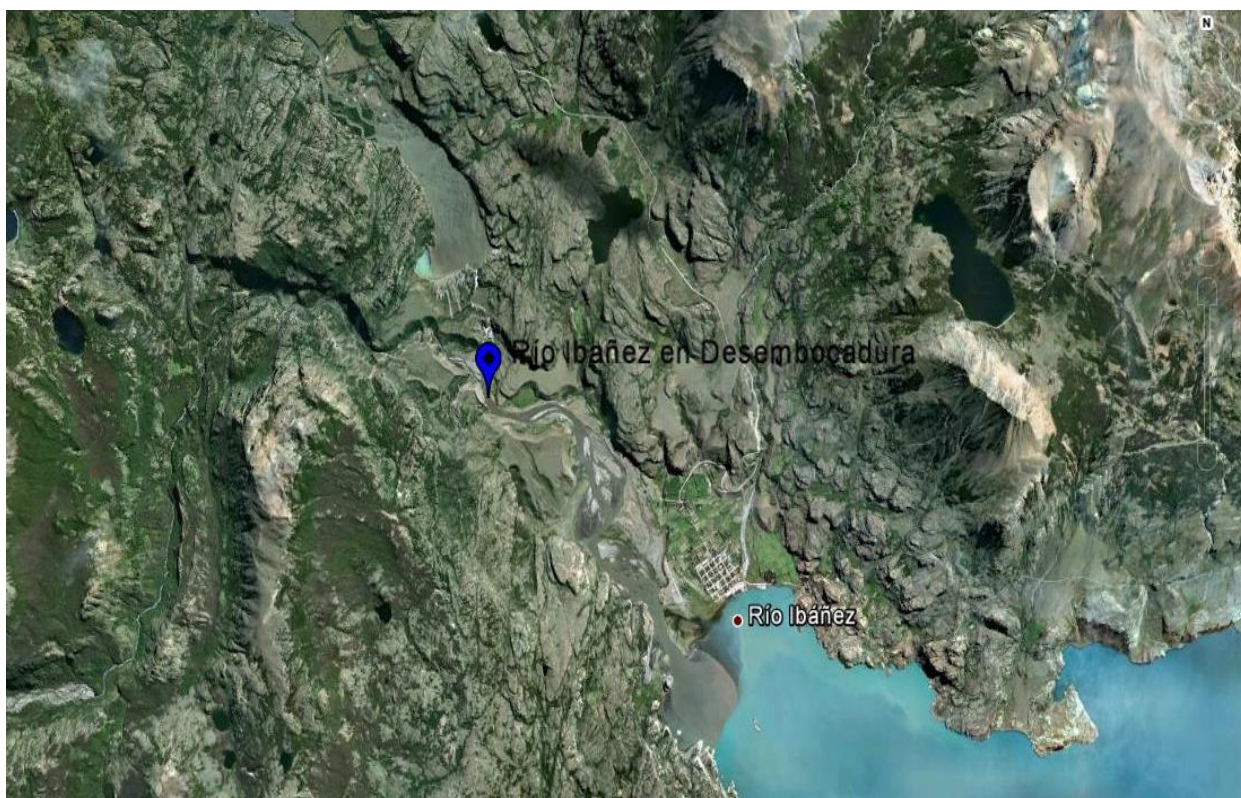


Figura 7.66 - Ubicación estación Río Ibáñez en Desembocadura.

Antecedentes Básicos

a) Fluviométricos

Se dispone de datos de series de caudales medios diarios observados de la estación Río Ibáñez en Desembocadura controlada por la Dirección General de Aguas del M.O.P, para los periodos mostrados en la Tabla 7.66:

Tabla 7.66 – Registros fluviométricos Río Ibáñez en Desembocadura.

Nombre Estación	Periodo		Periodo	
	Desde	Hasta	Desde	Hasta
Río Ibáñez en Desembocadura	08/1970	03/1971	03/1991	03/1992
	05/1971	02/1972	06/1992	10/1997
	04/1972	09/1972	01/1998	03/2009
	03/1985	09/1990	06/2009	06/2010
	12/1990	01/1991	02/2011	01/2012

b) Sedimentométricos

Se dispone de los registros sedimentométricos de la estación Río Ibáñez en Desembocadura. En la Tabla 7.67 se observa el tipo de muestreo realizado y el periodo de tiempo que abarcan los datos entregados por la D.G.A.

Tabla 7.67 – Registros sedimentométricos Río Ibáñez en Desembocadura.

Nombre Estación	Muestreos	
	Integrados	
Río Ibáñez en Desembocadura	Desde	Hasta
	10/2002	01/2009

Utilizando la metodología señalada en el punto 7.1.19, en la Figura 7.67 se muestra de manera gráfica la relación existente entre el caudal medio diario y el gasto sólido en suspensión medio diario.

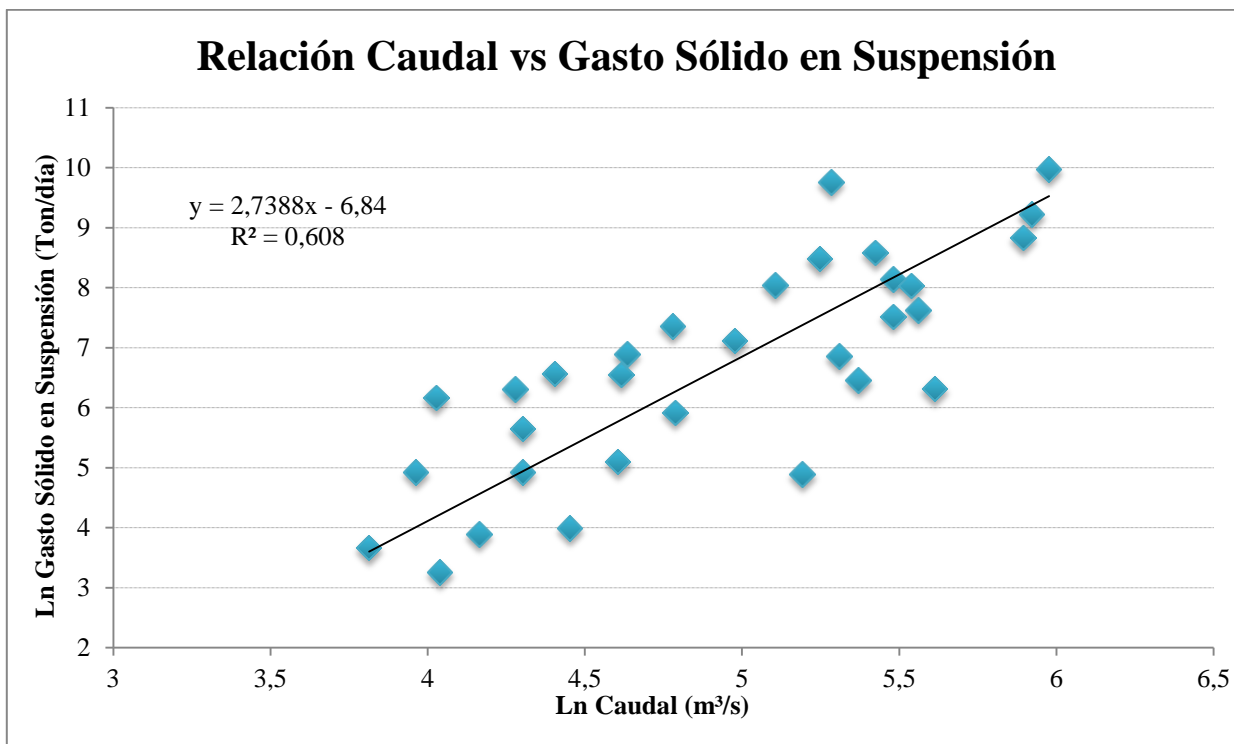


Figura 7.67 – Relación entre el caudal y gasto sólido en suspensión en la estación Río Ibáñez en Desembocadura.

El modelo de la Curva de gasto sólido en suspensión es:

$$G_{sd} = 0.0011 Q_d^{2.738} \quad G_{sd} \text{ (Ton/día); } Q_d \text{ (m}^3\text{/s)}$$

Finalmente, utilizando los caudales medios diarios de la estación, se construyó la curva general de duración de caudales, para posteriormente integrar de manera discreta (intervalos) la curva de duración de caudales, de esta manera se generó el gasto sólido en suspensión medio anual y el caudal medio anual, en el Anexo 2 digital se encuentran las tablas de la curva de duración de caudales mencionadas y en el Anexo 3 digital se muestra de manera gráfica dicha curva.

En función de los análisis realizados, el caudal medio anual afluente y el gasto sólido medio anual para la estación Río Ibáñez en Desembocadura son:

Caudal Medio Anual: 147,78 (m³/s)

Gasto Sólido en Suspensión Medio Anual: 907.015 (Ton/año)

Análisis Geomorfológico

Mediante la utilización del programa GrassGis, es posible realizar un análisis de la cuenca definida por la estación en estudio.

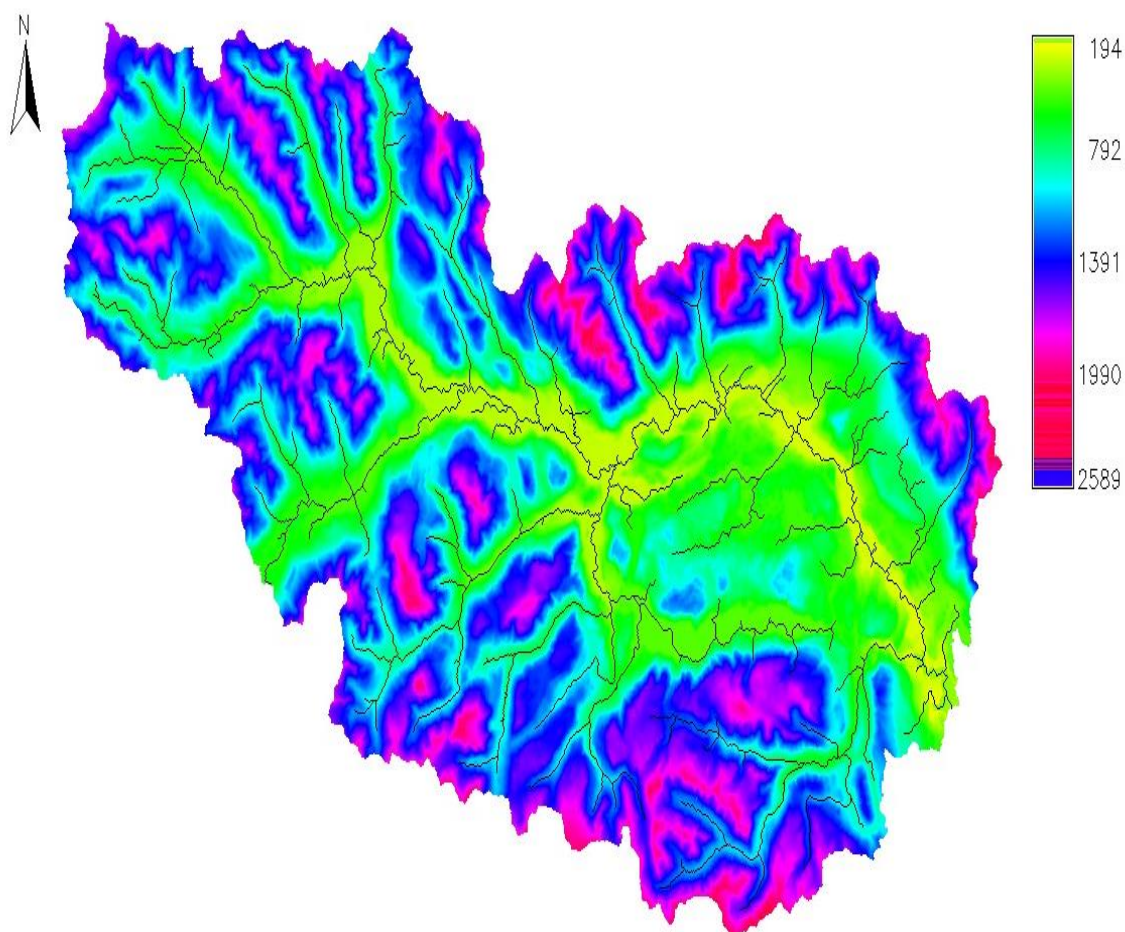


Figura 7.68 – Cuenca aportante de la estación Río Ibáñez en Desembocadura.

En la Tabla 7.68 se presentan los resultados entregados mediante la utilización del programa.

Tabla 7.68 – Resultados entregados por GrassGis para la estación Río Ibáñez en Desembocadura.

Área de la Cuenca	2.446 (Km ²)
Pendiente Media	37,32 (%)
Largo del Cauce	146,11 (Km)
Altura Máxima	2.589 (m)
Altura Mínima	194 (m)

7.1.23 Estación Río Murta en Desembocadura.

Ubicación de la estación.

La estación se ubica en el río Murta, a unos 5,3 (Km) aguas arriba de la desembocadura en el lago General Carrera. Los mayores caudales se presentan en los meses de verano entre Enero y Marzo, y los menores caudales se presentan entre los meses de Julio y Septiembre. En la Figura 7.69, se puede observar la ubicación de la estación.

Coordenadas (UTM): 676553 E ; 4855141 S. Zona: 18 G



Figura 7.69 – Ubicación estación Río Murta en Desembocadura.

Antecedentes Básicos

a) Fluviométricos

Se dispone de datos de series de caudales medios diarios observados de la estación Río Murta en Desembocadura controlada por la Dirección General de Aguas del M.O.P para los periodos mostrados en la Tabla 7.69:

Tabla 7.69 – Registros fluviométricos Río Murta en Desembocadura.

Nombre Estación	Periodo		Periodo	
	Desde	Hasta	Desde	Hasta
Río Murta en Desembocadura	02/1985	01/1987	12/1994	06/1998
	03/1987	12/1989	08/1998	06/2003
	04/1990	08/1990	09/2003	05/2006
	09/1990	09/1990	07/2006	03/2008
	11/1990	03/1993	05/2008	06/2009
	05/1993	04/1994	11/2009	05/2012
	08/1994	09/1994		

b) Sedimentométricos

Se dispone de los registros sedimentométricos de la estación Río Murta en Desembocadura. En la Tabla 7.70 se observa el tipo de muestreo realizado y el periodo de tiempo que abarcan los datos entregados por la D.G.A.

Tabla 7.70 – Registros sedimentométricos Río Murta en Desembocadura.

Nombre Estación	Muestreos	
	Integrados	
Río Murta en Desembocadura	Desde	Hasta
		10/2002

Utilizando la metodología señalada en el punto 7.1.19, en la Figura 7.70 se muestra de manera gráfica la relación existente entre el caudal medio diario y el gasto sólido en suspensión medio diario.

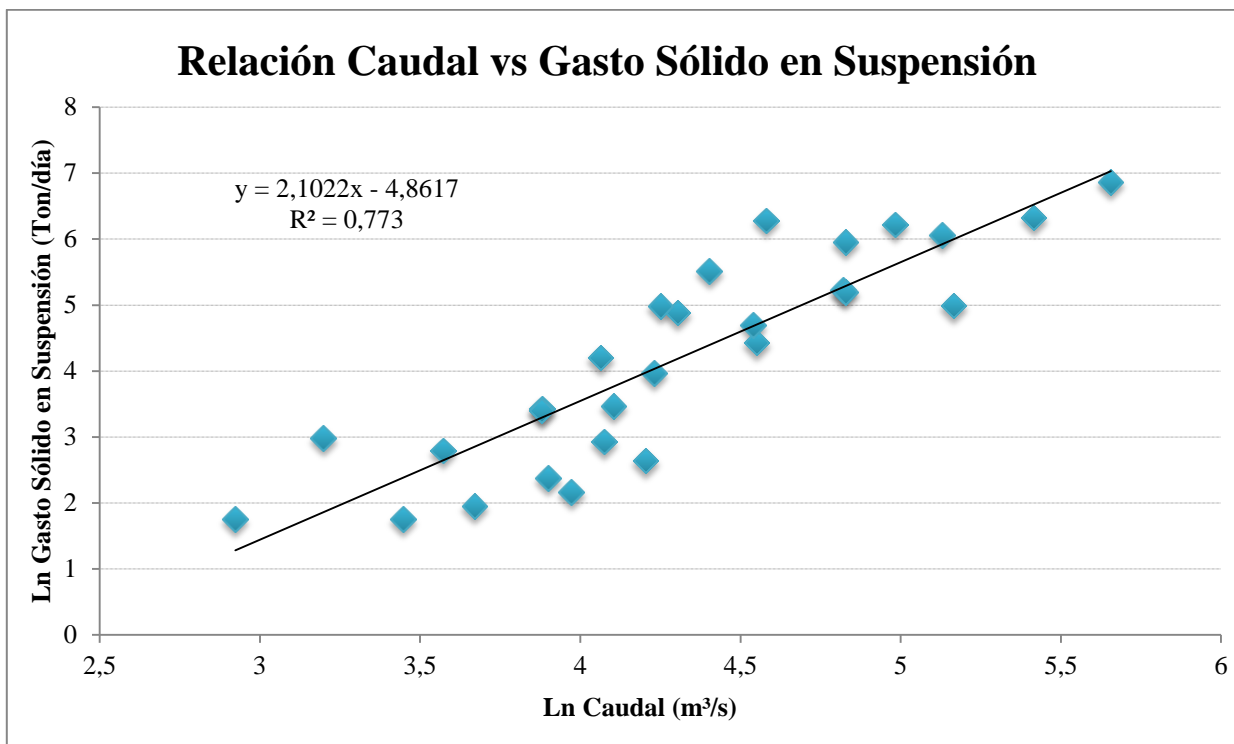


Figura 7.70 – Relación entre el caudal y gasto sólido en suspensión en la estación Río Murta en Desembocadura.

El modelo de la Curva de gasto sólido en suspensión es:

$$G_{sd} = 0.0077 Q_d^{2.102} \quad G_{sd} \text{ (Ton/día); } Q_d \text{ (m}^3\text{/s)}$$

Finalmente, utilizando los caudales medios diarios de la estación, se construyó la curva general de duración de caudales, para posteriormente integrar de manera discreta (intervalos) la curva de duración de caudales, de esta manera se generó el gasto sólido en suspensión medio anual y el caudal medio anual, en el Anexo 2 digital se encuentran las tablas de la curva de duración de caudales mencionadas y en el Anexo 3 digital se muestra de manera gráfica dicha curva.

En función del trabajo realizado, el caudal medio anual afluente y el gasto sólido medio anual para la estación Río Murta en Desembocadura son:

Caudal Medio Anual: 93,76 (m³/s)

Gasto Sólido en Suspensión Medio Anual: 67.971 (Ton/año)

Análisis Geomorfológico

Mediante la utilización del programa GrassGis, es posible realizar un análisis de la cuenca definida por la estación en estudio.

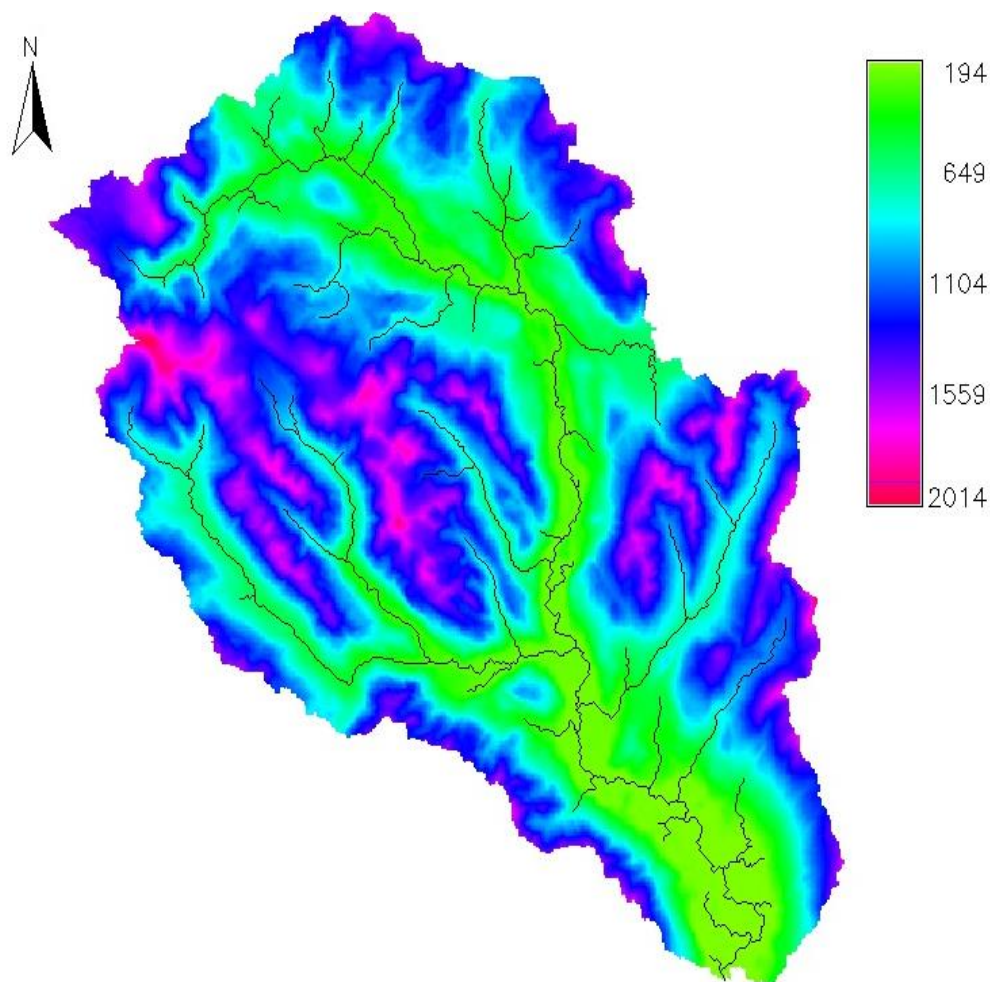


Figura 7.71 – Cuenca aportante de la estación Río Murta en Desembocadura.

En la Tabla 7.71 se presentan los resultados entregados mediante la utilización del programa.

Tabla 7.71 – Resultados entregados por GrassGis para la estación Río Murta en Desembocadura.

Área de la Cuenca	896 (Km ²)
Pendiente Media	38,40 (%)
Largo del Cauce	91,22 (Km)
Altura Máxima	2.014
Altura Mínima	194 (m)

7.1.24 Estación Río Penitente en Morro Chico.

Ubicación de la estación.

La estación se ubica en el río Penitente. La estación se encuentra cercana al límite con Argentina. El río presenta los mayores caudales entre Julio y Octubre, mientras que se observan los menores caudales entre los meses de Enero y Marzo. En la Figura 7.72, se puede observar la ubicación de la estación.

Coordenadas (UTM): 334722 E ; 4231254 S. Zona: 19 F

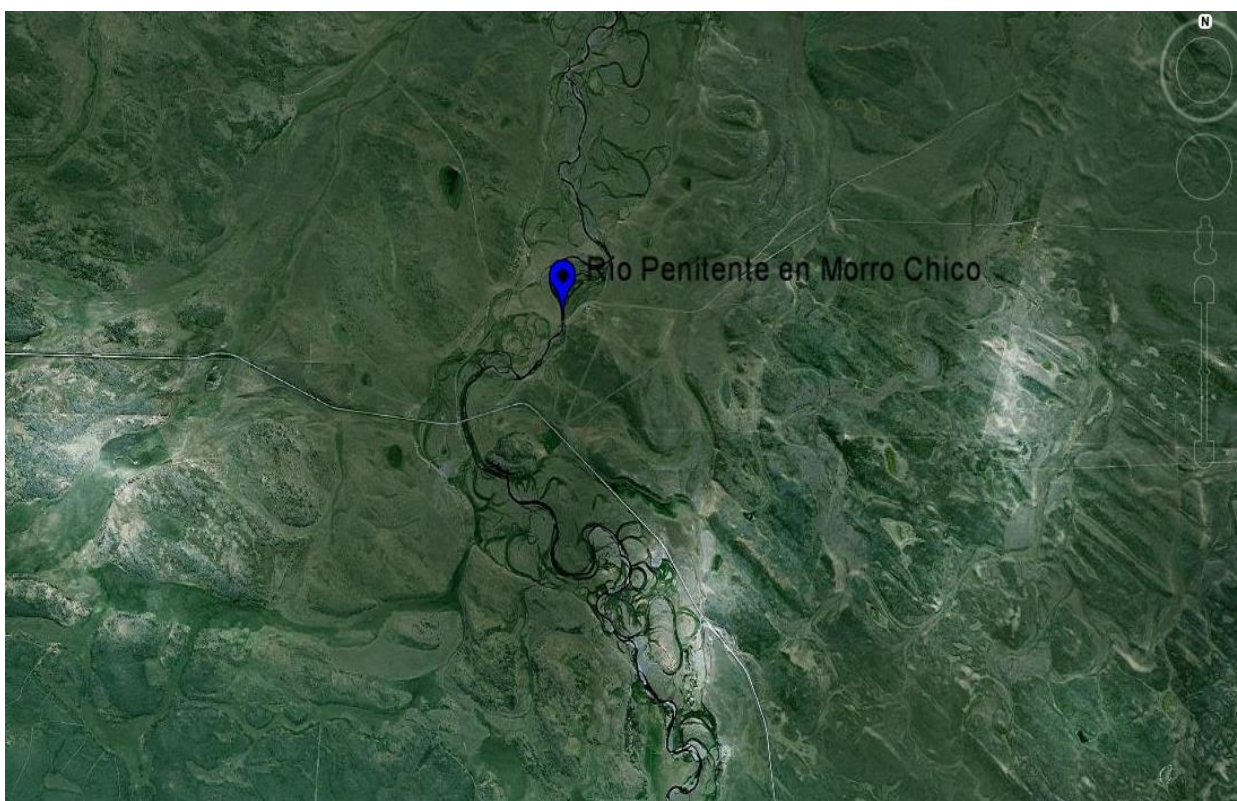


Figura 7.72 – Ubicación estación Río Penitente en Morro Chico.

Antecedentes Básicos

a) Fluviométricos

Se dispone de datos de series de caudales medios diarios observados de la estación Río Penitente en Morro Chico controlada por la Dirección General de Aguas del M.O.P para los periodos mostrados en la Tabla 7.72 siguiente:

Tabla 7.72 – Registros fluviométricos Río Penitente en Morro Chico.

Nombre Estación	Periodo		Periodo	
	Desde	Hasta	Desde	Hasta
Río Penitente en Morro Chico	06/1980	09/1981	11/1984	06/1987
	11/1981	03/1982	08/1987	05/1994
	06/1982	06/1982	07/1994	06/2005
	09/1982	06/1984	09/2005	10/2011
	08/1984	09/1984		

b) Sedimentométricos

Se dispone de los registros sedimentométricos de la estación Río Penitente en Morro Chico. En la Tabla 7,73 se observan los tipos de muestreos realizados y los periodos de tiempo que abarcan los datos entregados por la D.G.A.

Tabla 7.73 – Registros sedimentométricos Río Penitente en Morro Chico.

Nombre Estación	Muestreos		Muestreos	
	Rutinarios		Integrados	
Río Penitente en Morro Chico	Desde	Hasta	Desde	Hasta
	05/1994	06/1994	03/1994	04/2012
	09/1994	05/2012		

Utilizando la metodología señalada en el punto 7.1.1, se obtuvo el modelo:

$$C_i = 1.52 C_r^{0.89}$$

Donde:

C_i = concentración de muestreos integrados (mg/l).

C_r = concentración de muestreos rutinarios (mg/l).

Posteriormente en la Figura 7.73 se muestra de manera gráfica la relación que existe entre el caudal líquido y gasto sólido en suspensión.

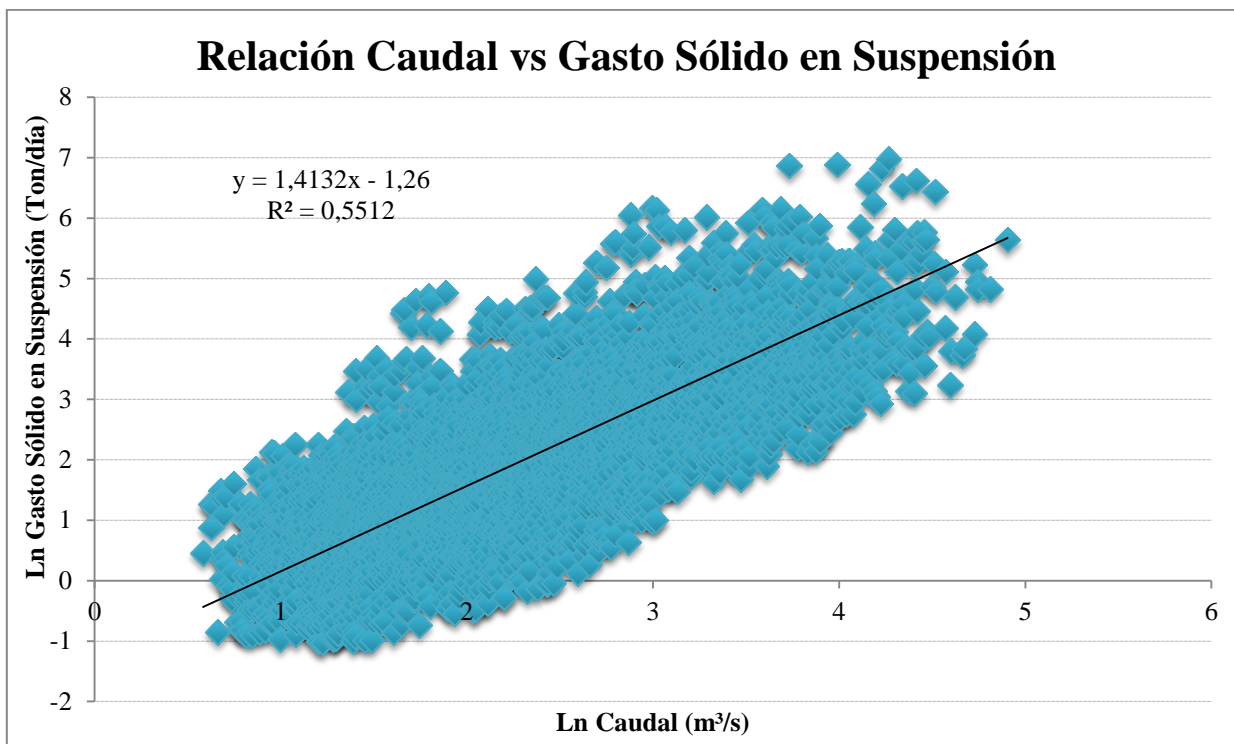


Figura 7.73 – Relación entre el caudal y gasto sólido en suspensión en la estación Río Penitente en Morro Chico.

El modelo de la Curva de gasto sólido en suspensión es:

$$G_{sd} = 0.2836 Q_d^{1.413} \quad G_{sd} \text{ (Ton/día); } Q_d \text{ (m}^3\text{/s)}$$

Finalmente, utilizando los caudales medios diarios de la estación, se construyó la curva general de duración de caudales, para posteriormente integrar de manera discreta (intervalos) la curva de duración de caudales, de esta manera se generó el gasto sólido en suspensión medio anual y el caudal medio anual, en el Anexo 2 digital se encuentran las tablas de la curva de duración de caudales mencionadas y en el Anexo 3 digital se muestra de manera gráfica dicha curva.

En función de los análisis realizados, el caudal medio anual afluente y el gasto sólido medio anual para la estación Río Penitente en Morro Chico son:

Caudal Medio Anual: 13,93 (m³/s)

Gasto Sólido en Suspensión Medio Anual: 5.475 (Ton/año)

Análisis Geomorfológico

Mediante la utilización del programa GrassGis, es posible realizar un análisis de la cuenca definida por la estación en estudio.

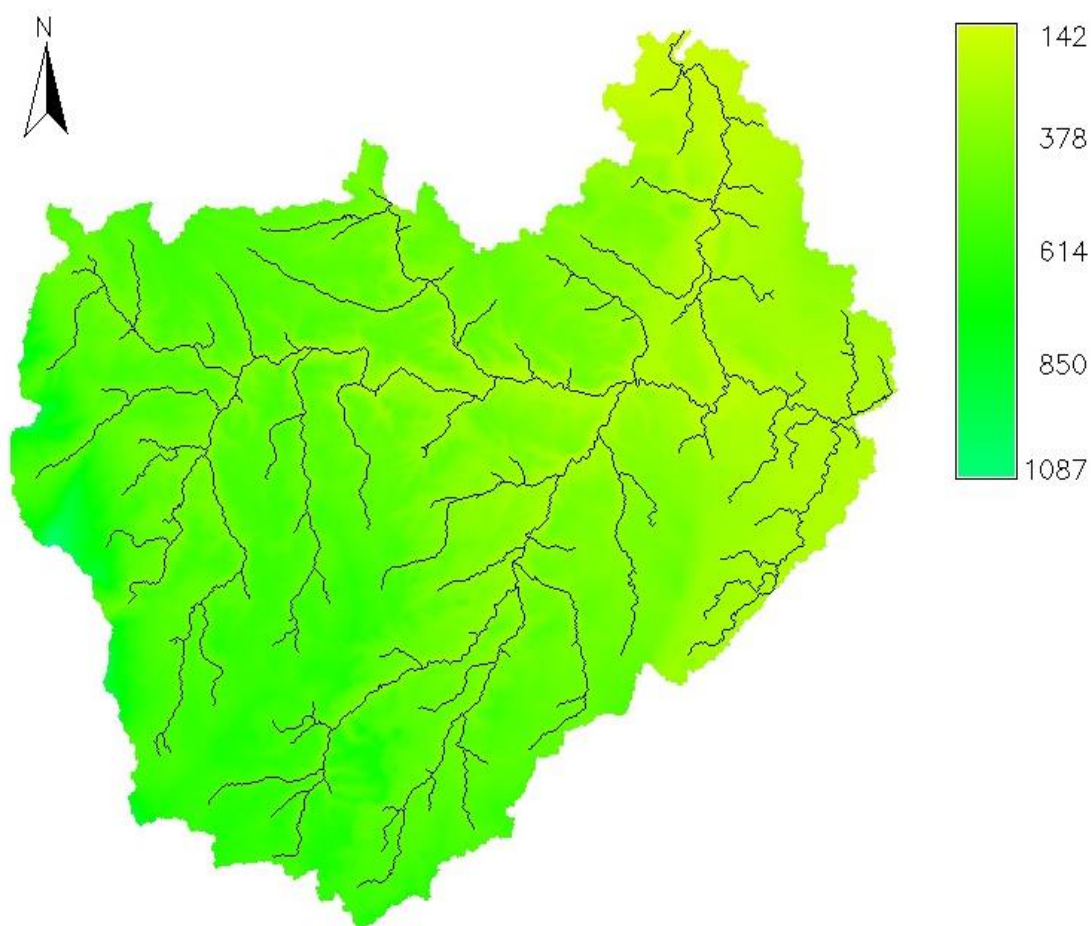


Figura 7.74 – Cuenca aportante de la estación Río Penitente en Morro Chico.

En la Tabla 7.74 se presentan los resultados entregados mediante la utilización del programa.

Tabla 7.74 – Resultados entregados por GrassGis para la estación Río Penitente en Morro Chico.

Área de la Cuenca	1.495 (Km ²)
Pendiente Media	9,84 (%)
Largo del Cauce	117,45 (Km)
Altura Máxima	1.087 (m)
Altura Mínima	142 (m)

7.1.25 Estación Río Pérez en Desembocadura.(*)

Ubicación de la estación.

La estación se ubica en el río Pérez, cercana al punto de desembocadura en el mar. En años secos, los mayores caudales se observan entre los meses de Septiembre y Noviembre, mientras que en años lluviosos, entre los meses de Abril y Mayo se ve un aumento del caudal. En general este río no presenta caudales mayores a 25 (m³/s). En la Figura 7.75, se puede observar la ubicación de la estación.

Coordenadas (UTM): 297997 E ; 4173394 S. Zona: 19 F

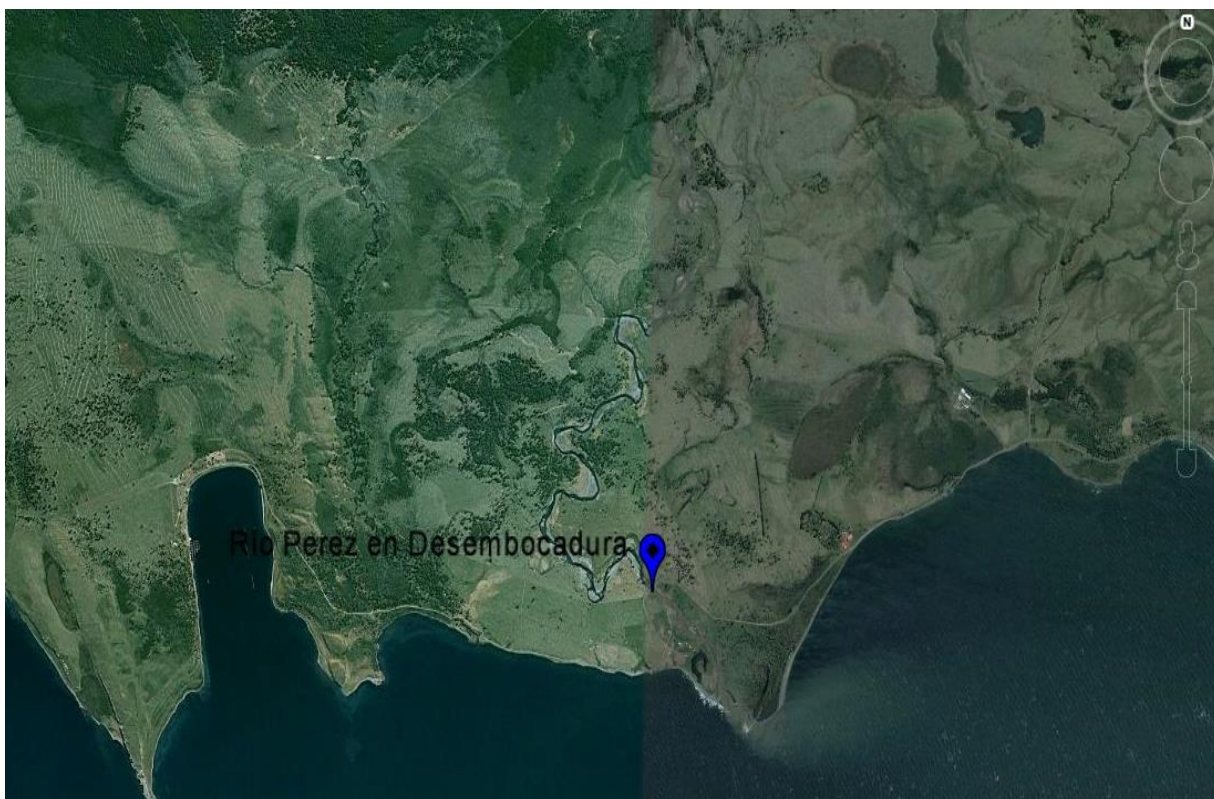


Figura 7.75 – Ubicación estación Río Pérez en Desembocadura.

Antecedentes Básicos

a) Fluviométricos

Se dispone de datos de series de caudales medios diarios observados de la estación Río Pérez en Desembocadura controlada por la Dirección General de Aguas del M.O.P para los periodos mostrados en la siguiente Tabla 7.75:

Tabla 7.75 – Registros fluviométricos Río Pérez en Desembocadura.

Nombre Estación	Periodo		Periodo	
	Desde	Hasta	Desde	Hasta
Río Pérez en Desembocadura	05/1991	08/1994	10/2008	12/2008
	10/1994	04/2005	02/2010	05/2012
	07/2005	08/2008		

b) Sedimentométricos

Se dispone de los registros sedimentométricos de la estación Río Pérez en Desembocadura. En la Tabla 7.76 se observan los tipos de muestreos realizados y los periodos de tiempo que abarcan los datos entregados por la D.G.A.

Tabla 7.76 – Registros sedimentométricos Río Pérez en Desembocadura.

Nombre Estación	Muestreos		Muestreos	
	Rutinarios		Integrados	
Río Pérez en Desembocadura	Desde	Hasta	Desde	Hasta
	04/1996	01/1998	01/1996	06/2012
	07/1998	11/1998		
	03/1999	06/2001		

Utilizando la metodología señalada en el punto 7.1.1, se obtuvo el modelo:

$$C_i = 14.09 C_r^{-0.37}$$

Donde:

C_i = concentración de muestreos integrados (mg/l).

C_r = concentración de muestreos rutinarios (mg/l).

Posteriormente en la Figura 7.76 se muestra de manera gráfica la relación que existe entre el caudal líquido y gasto sólido en suspensión.

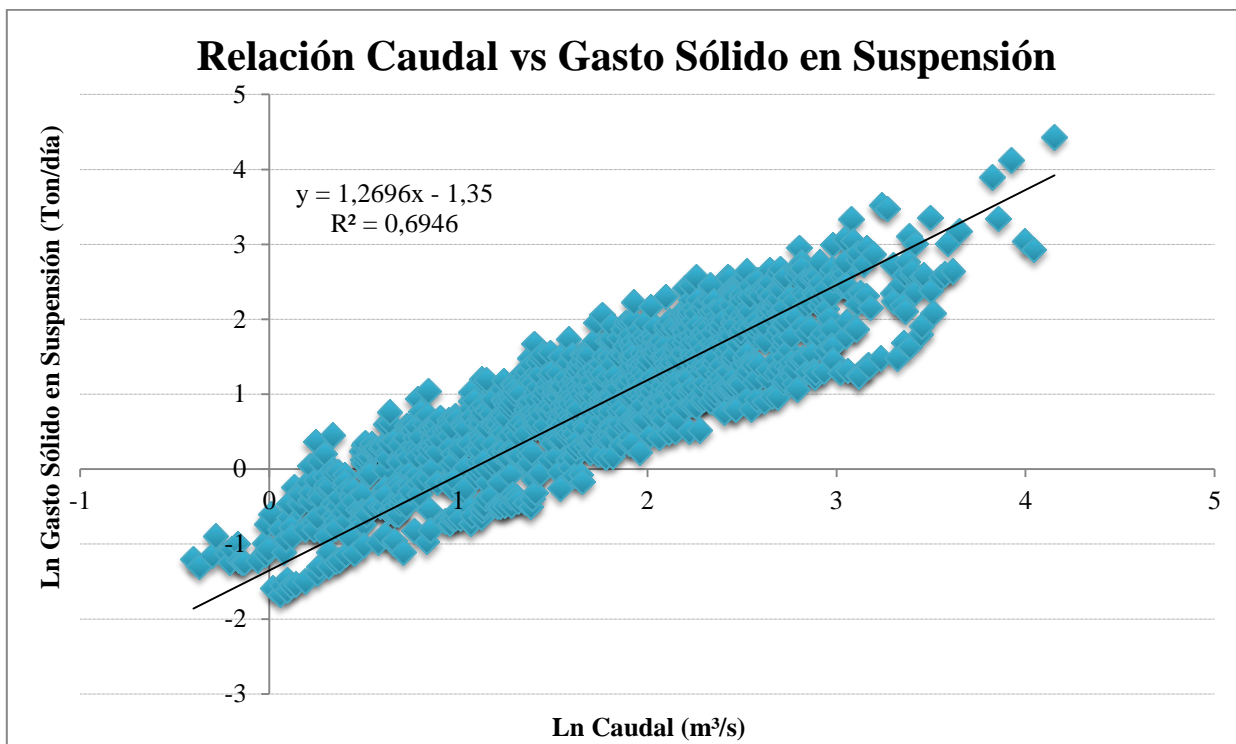


Figura 7.76 – Relación entre el caudal y gasto sólido en suspensión en la estación Río Pérez en Desembocadura.

El modelo de la Curva de gasto sólido en suspensión es:

$$G_{sd} = 0.2592 Q_d^{1.269} \quad G_{sd} \text{ (Ton/día); } Q_d \text{ (m}^3\text{/s)}$$

Finalmente, utilizando los caudales medios diarios de la estación, se construyó la curva general de duración de caudales, para posteriormente integrar de manera discreta (intervalos) la curva de duración de caudales, de esta manera se generó el gasto sólido en suspensión medio anual y el caudal medio anual, en el Anexo 2 digital se encuentran las tablas de la curva de duración de caudales mencionadas y en el Anexo 3 digital se muestra de manera gráfica dicha curva.

En función de los análisis realizados, el caudal medio anual afluente y el gasto sólido medio anual para la estación Río Pérez en Desembocadura son:

Caudal Medio Anual: 7,97 (m³/s)

Gasto Sólido en Suspensión Medio Anual: 1.476 (Ton/año)

Análisis Geomorfológico

Mediante la utilización del programa GrassGis, es posible realizar un análisis de la cuenca definida por la estación en estudio.

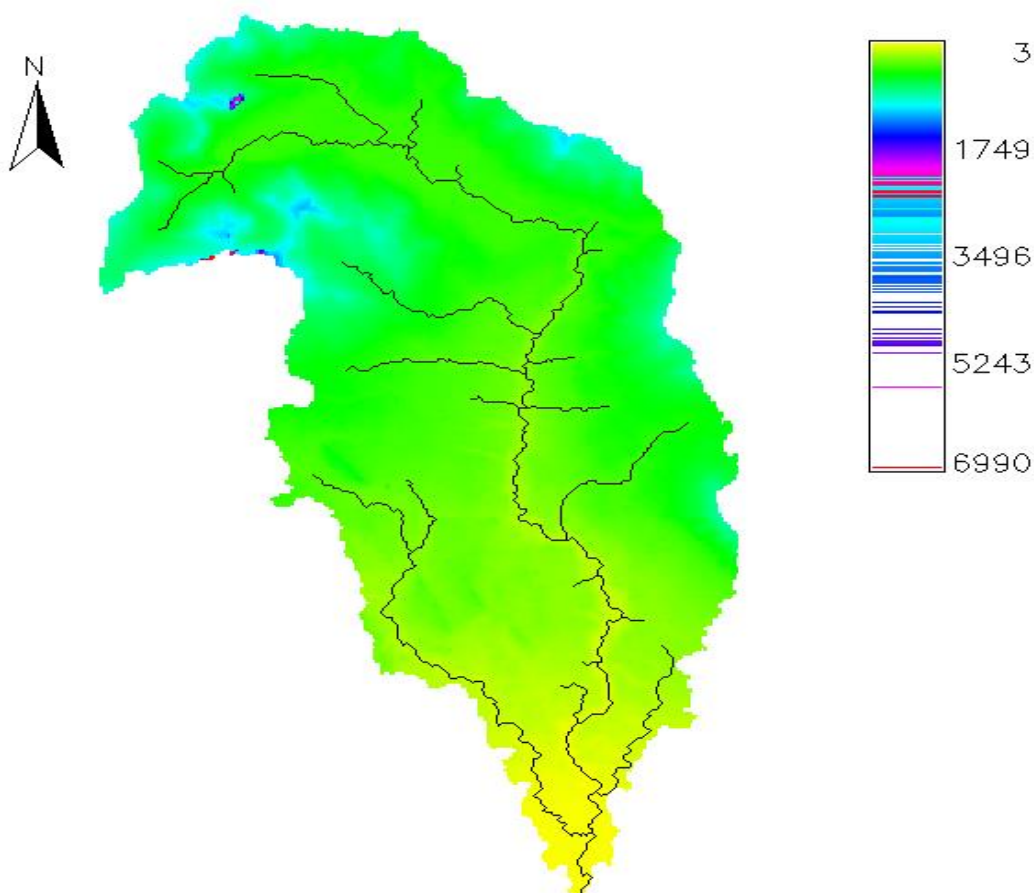


Figura 7.77 – Cuenca aportante de la estación Río Pérez en Desembocadura.

En la Tabla 7.77 se presentan los resultados entregados mediante la utilización del programa.

Tabla 7.77 – Resultados entregados por GrassGis para la estación Río Pérez en Desembocadura.

Área de la Cuenca	341 (Km ²)
Pendiente Media ³	15,83 (%)
Largo del Cauce	62,33 (Km)
Altura Máxima ⁴	6990 (m)
Altura Mínima	3 (m)

³ Uno de los Dems utilizados en esta cuenca, tiene un error, ya que señala una altura de 6.990 (m) y dicha altura no se observa al navegar de manera satelital utilizando el programa Google Earth.

⁴ Debido al error (3), la pendiente esta sobreestimada, debería tener una menor magnitud.

7.1.26 Estación Río Oro en Bahía San Felipe.

Ubicación de la estación.

La estación se ubica en el río Oro, a unos 1,4 (km) aguas arriba de su desembocadura en el estrecho de Magallanes. El río presenta caudales menores a 20 (m³/s), y presenta los máximos caudales entre los meses de Julio y Septiembre, mientras que los menores caudales se observan entre Enero y Marzo. En la Figura 7.78, se observa la ubicación de la estación.

Coordenadas (UTM): 439435 E ; 4144060 S. Zona: 19 F

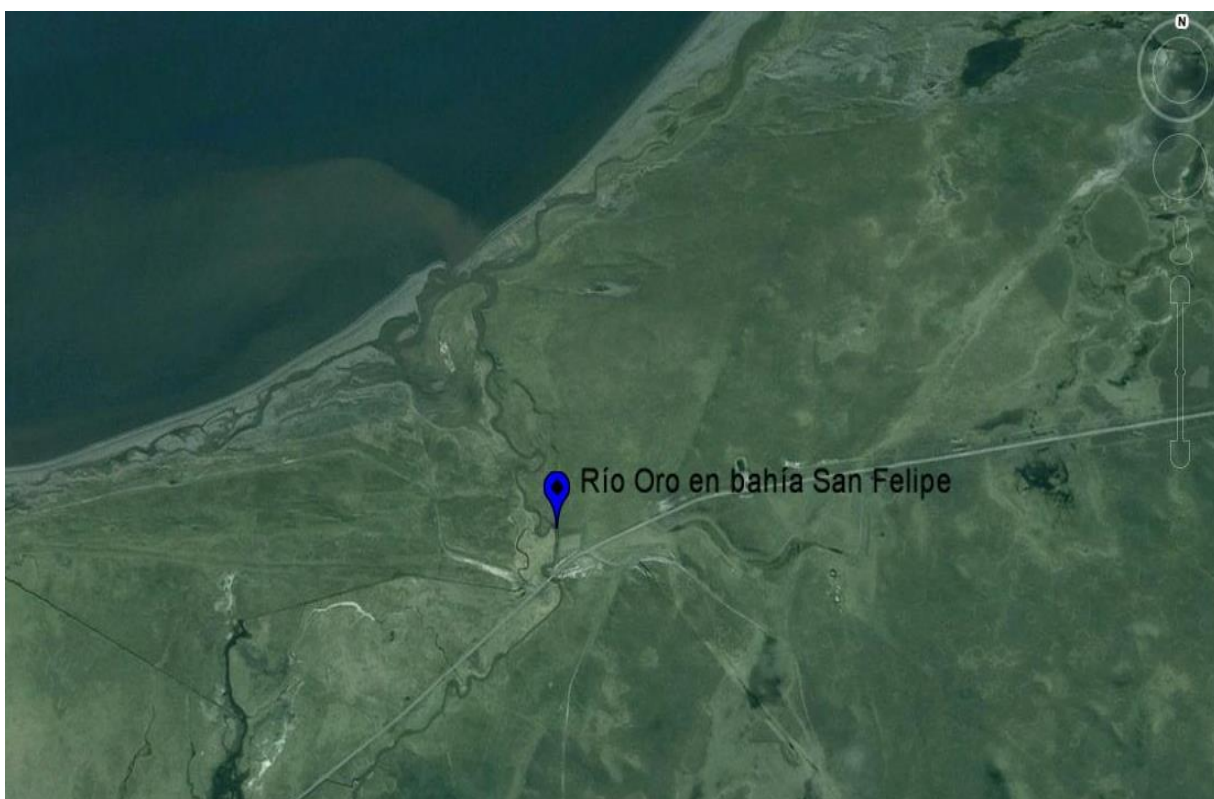


Figura 7.78 – Ubicación estación Río oro en Bahía San Felipe.

Antecedentes Básicos

a) Fluviométricos

Se dispone de datos de series de caudales medios diarios observados de la estación Río Oro en Bahía San Felipe controlada por la Dirección General de Aguas del M.O.P para los periodos mostrados en la siguiente Tabla 7.78:

Tabla 7.78 – Registros fluviométricos Río Oro en Bahía San Felipe.

Nombre Estación	Periodo		Periodo	
	Desde	Hasta	Desde	Hasta
Río Oro en Bahía San Felipe	06/1980	09/1981	08/1984	01/2010
	11/1981	06/1984	03/2010	05/2012

b) Sedimentométricos

Se dispone de los registros sedimentométricos de la estación Río Oro en Bahía San Felipe. En la Tabla 7.79 se observan los tipos de muestreos realizados y los periodos de tiempo que abarcan los datos entregados por la D.G.A.

Tabla 7.79 – Registros sedimentométricos Río Oro en Bahía San Felipe.

Nombre Estación	Muestreos		Muestreos	
	Rutinarios		Integrados	
Río Oro en Bahía San Felipe	Desde	Hasta	Desde	Hasta
	01/1996	06/1996	02/1996	03/2012
	08/1996	08/1996		
	10/1996	05/2001		
	07/2001	08/2001		
	10/2001	12/2010		
	03/2011	05/2012		

Utilizando la metodología señalada en el punto 7.1.1, se obtuvo el modelo:

$$C_i = 2.31 C_r^{0.64}$$

Donde:

C_i = concentración de muestreos integrados (mg/l).

C_r = concentración de muestreos rutinarios (mg/l).

Posteriormente en la Figura 7.79 se muestra de manera gráfica la relación que existe entre el caudal líquido y gasto sólido en suspensión.

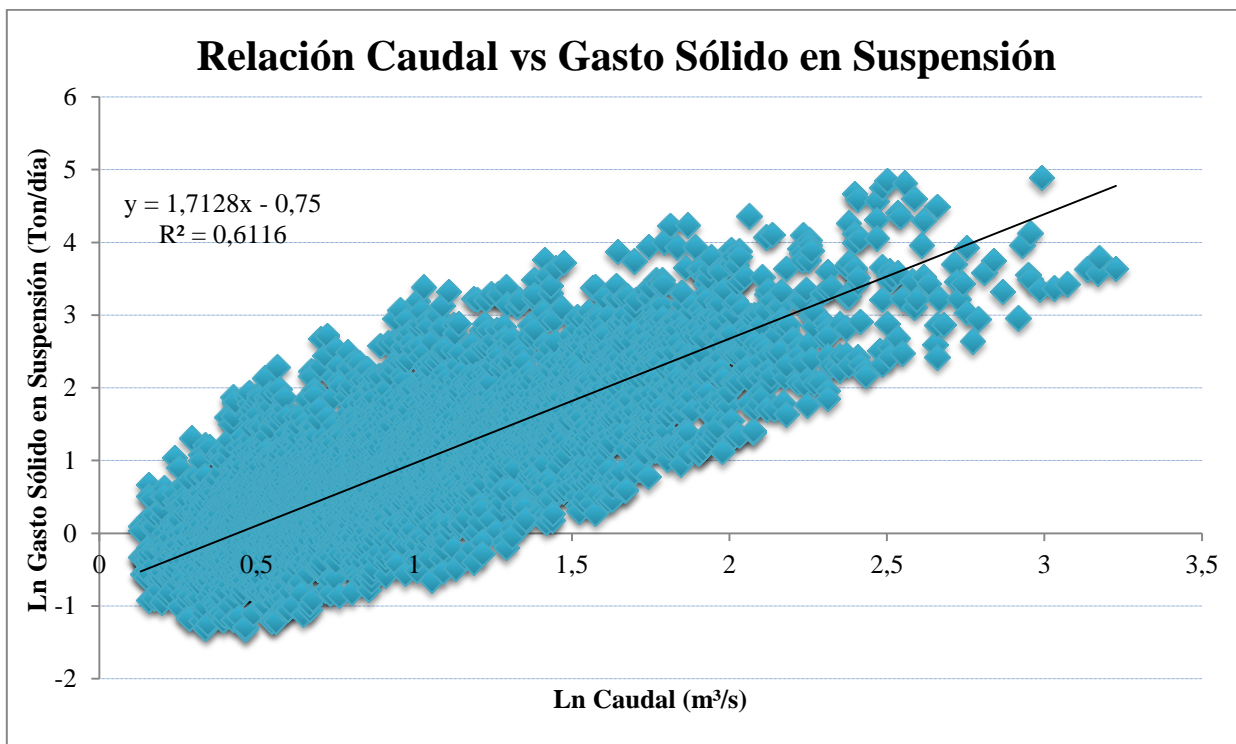


Figura 7.79 – Relación entre el caudal y gasto sólido en suspensión en la estación Río Oro en Bahía San Felipe.

El modelo de la Curva de gasto sólido en suspensión es:

$$G_{sd} = 0.4723 Q_d^{1.712} \quad G_{sd} \text{ (Ton/día); } Q_d \text{ (m}^3\text{/s)}$$

Finalmente, utilizando los caudales medios diarios de la estación, se construyó la curva general de duración de caudales, para posteriormente integrar de manera discreta (intervalos) la curva de duración de caudales, de esta manera se generó el gasto sólido en suspensión medio anual y el caudal medio anual, en el Anexo 2 digital se encuentran las tablas de la curva de duración de caudales mencionadas y en el Anexo 3 digital se muestra de manera gráfica dicha curva.

En función de los análisis realizados, el caudal medio anual afluente y el gasto sólido medio anual para la estación Río Oro en Bahía San Felipe son:

Caudal Medio Anual: 3,20 (m³/s)

Gasto Sólido en Suspensión Medio Anual: 1.694 (Ton/año)

Análisis Geomorfológico

Mediante la utilización del programa GrassGis, es posible realizar un análisis de la cuenca definida por la estación en estudio.

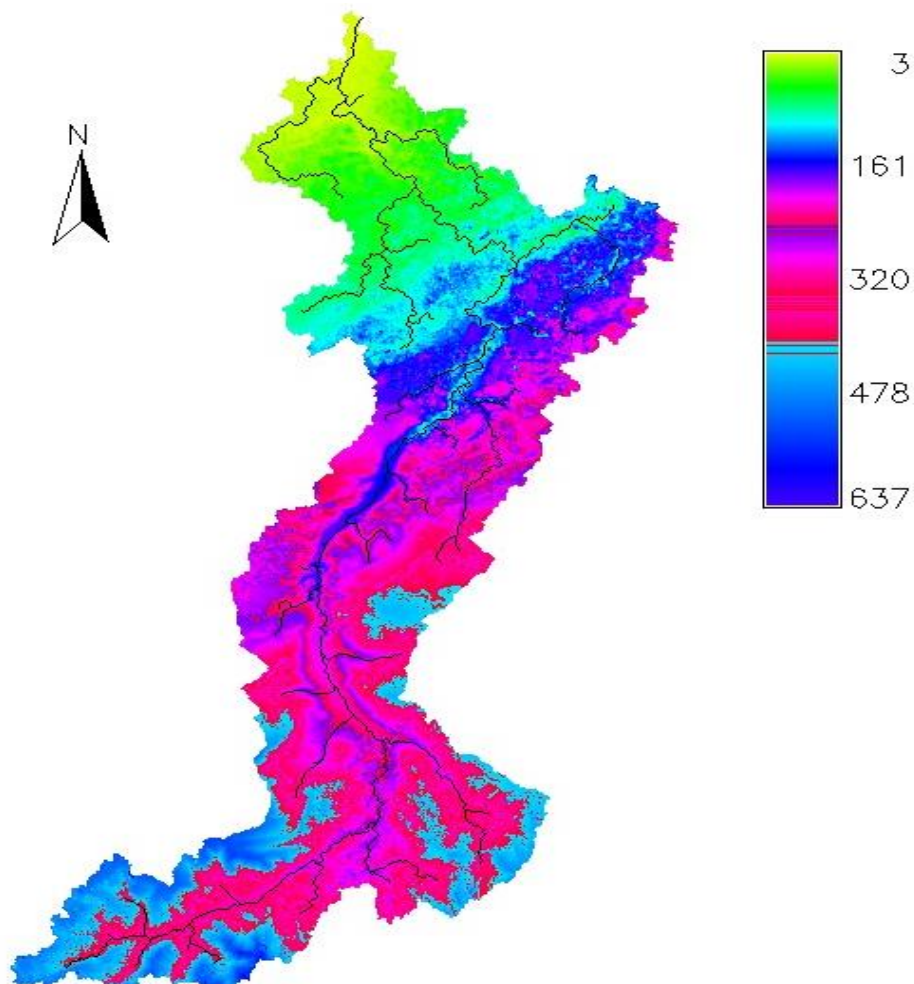


Figura 7.80 – Cuenca aportante de la estación Río Oro en Bahía San Felipe.

En la Tabla 7.80 se presentan los resultados entregados mediante la utilización del programa.

Tabla 7.80 – Resultados entregados por GrassGis para la estación Río Oro en Bahía San Felipe.

Área de la Cuenca	618 (Km ²)
Pendiente Media	9,97 (%)
Largo del Cauce	110,73 (Km)
Altura Máxima	637 (m)
Altura Mínima	3 (m)

7.1.27 Estación Río Tres Brazos antes de Bt. Sendos.

Ubicación de la estación.

La estación se ubica en el río Tres Brazos, y tal como lo dice su nombre, se encuentra antes de una bocatoma instalada en su curso. En este río se observan los mayores caudales entre los meses de Junio y Septiembre, y los menores caudales entre los meses de Diciembre y Febrero, pudiendo alcanzar caudales cercanos a 0 (m³/s). En la Figura 7.81, se observa la ubicación de la estación.

Coordenadas (UTM): 367770 E ; 4094481 S. Zona: 19 F

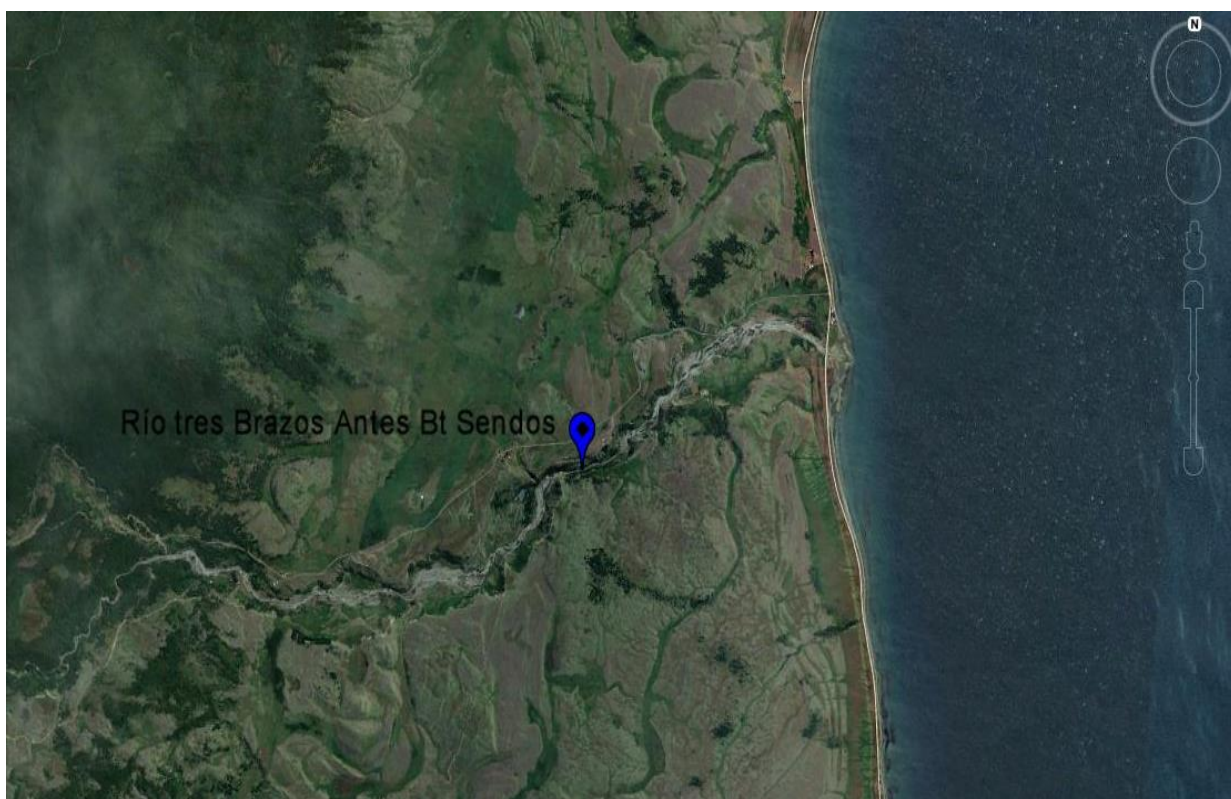


Figura 7.81 - Ubicación estación Río Tres Brazos antes de Bt. Sendos.

Antecedentes Básicos

a) Fluviométricos

Se dispone de datos de series de caudales medios diarios observados de la estación Río Tres Brazos antes de BT Sendos controlada por la Dirección General de Aguas del M.O.P para los periodos mostrados en la Tabla 7.81 siguiente:

Tabla 7.81 – Registros fluviométricos Río Tres Brazos antes de BT Sendos.

Nombre Estación	Periodo		Periodo	
	Desde	Hasta	Desde	Hasta
Río Tres Brazos antes de BT Sendos	06/1982	03/1984	10/1990	12/1994
	03/1985	06/1985	02/1995	05/1995
	10/1985	03/1986	07/1995	08/2006
	08/1986	05/1990	10/2006	10/2011

b) Sedimentométricos

Se dispone de los registros sedimentométricos de la estación Tres Brazos antes de BT Sendos. En la Tabla 7.82 se observan los tipos de muestreos realizados y los periodos de tiempo que abarcan los datos entregados por la D.G.A.

Tabla 7.82 – Registros sedimentométricos Río Tres Brazos antes de BT Sendos.

Nombre Estación	Muestreos		Muestreos	
	Rutinarios		Integrados	
Río Tres Brazos antes de BT Sendos	Desde	Hasta	Desde	Hasta
	02/1994	11/1994	01/1994	11/1994
	01/1995	12/1995	01/1995	04/2012
	03/1996	02/1998		
	04/1998	11/1999		
	01/2000	03/2003		
	05/2003	06/2003		

Utilizando la metodología señalada en el punto 7.1.1, se obtuvo el modelo:

$$C_i = 0.44 C_r^{1.19}$$

Donde:

C_i = concentración de muestreos integrados (mg/l).

C_r = concentración de muestreos rutinarios (mg/l).

Posteriormente en la Figura 7.82 se muestra de manera gráfica la relación que existe entre el caudal líquido y gasto sólido en suspensión.

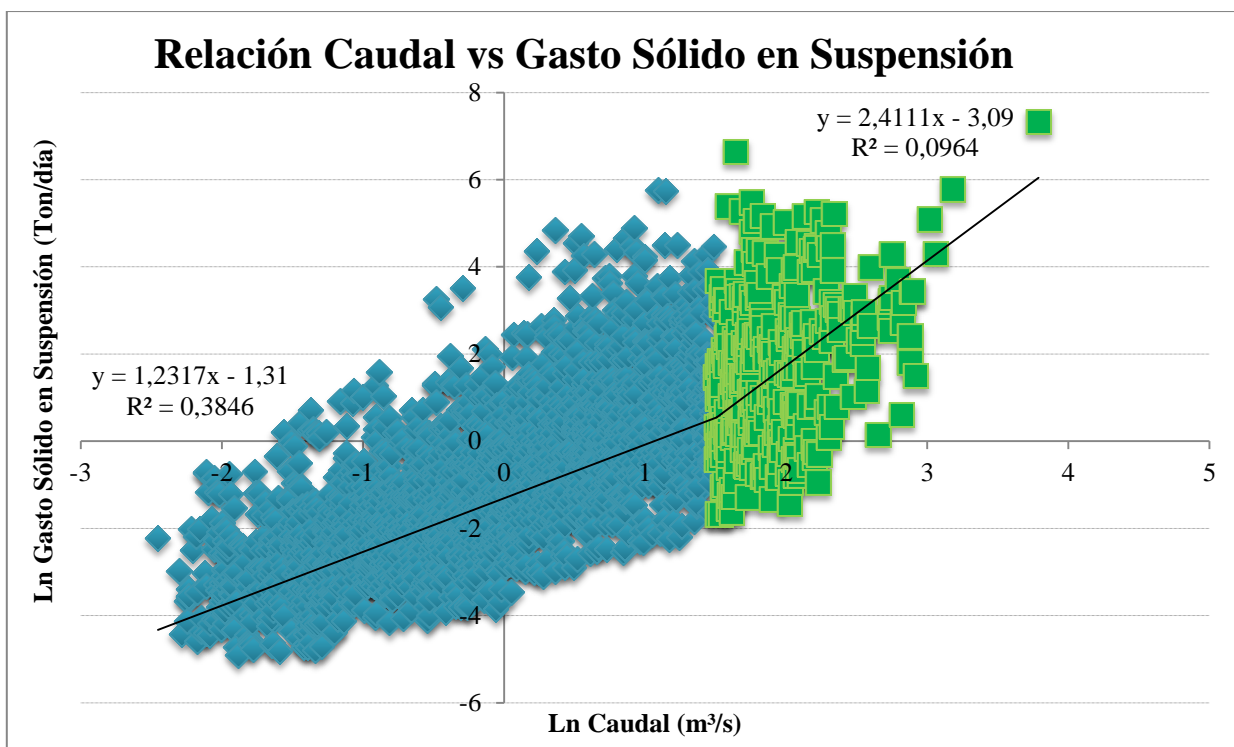


Figura 7.82 – Relación entre el caudal y gasto sólido en suspensión en la estación Río Tres Brazos antes de Bt. Sendos.

Los modelos de la Curva de gasto sólido en suspensión corresponden a:

$$\text{Para } Q < 4.51 \text{ (m}^3\text{/s)} \quad G_{sd} = 0.2698 Q_d^{1.231} \quad G_{sd} \text{ (Ton/día); } Q_d \text{ (m}^3\text{/s)}$$

$$\text{Para } Q > 4.51 \text{ (m}^3\text{/s)} \quad G_{sd} = 0.045 Q_d^{2.411} \quad G_{sd} \text{ (Ton/día); } Q_d \text{ (m}^3\text{/s)}$$

Finalmente, utilizando los caudales medios diarios de la estación, se construyó la curva general de duración de caudales, para posteriormente integrar de manera discreta (intervalos) la curva de duración de caudales, de esta manera se generó el gasto sólido en suspensión medio anual y el caudal medio anual, en el Anexo 2 digital se encuentran las tablas de la curva de duración de caudales mencionadas y en el Anexo 3 digital se muestra de manera gráfica dicha curva.

En función de los resultados obtenidos, el caudal medio anual afluente y el gasto sólido medio anual para la estación Río Tres Brazos antes de Bt. Sendos son:

$$\text{Caudal Medio Anual:} \quad 2,04 \text{ (m}^3\text{/s)}$$

$$\text{Gasto Sólido en Suspensión Medio Anual:} \quad 572 \text{ (Ton/año)}$$

Análisis Geomorfológico

Mediante la utilización del programa GrassGis, es posible realizar un análisis de la cuenca definida por la estación en estudio.

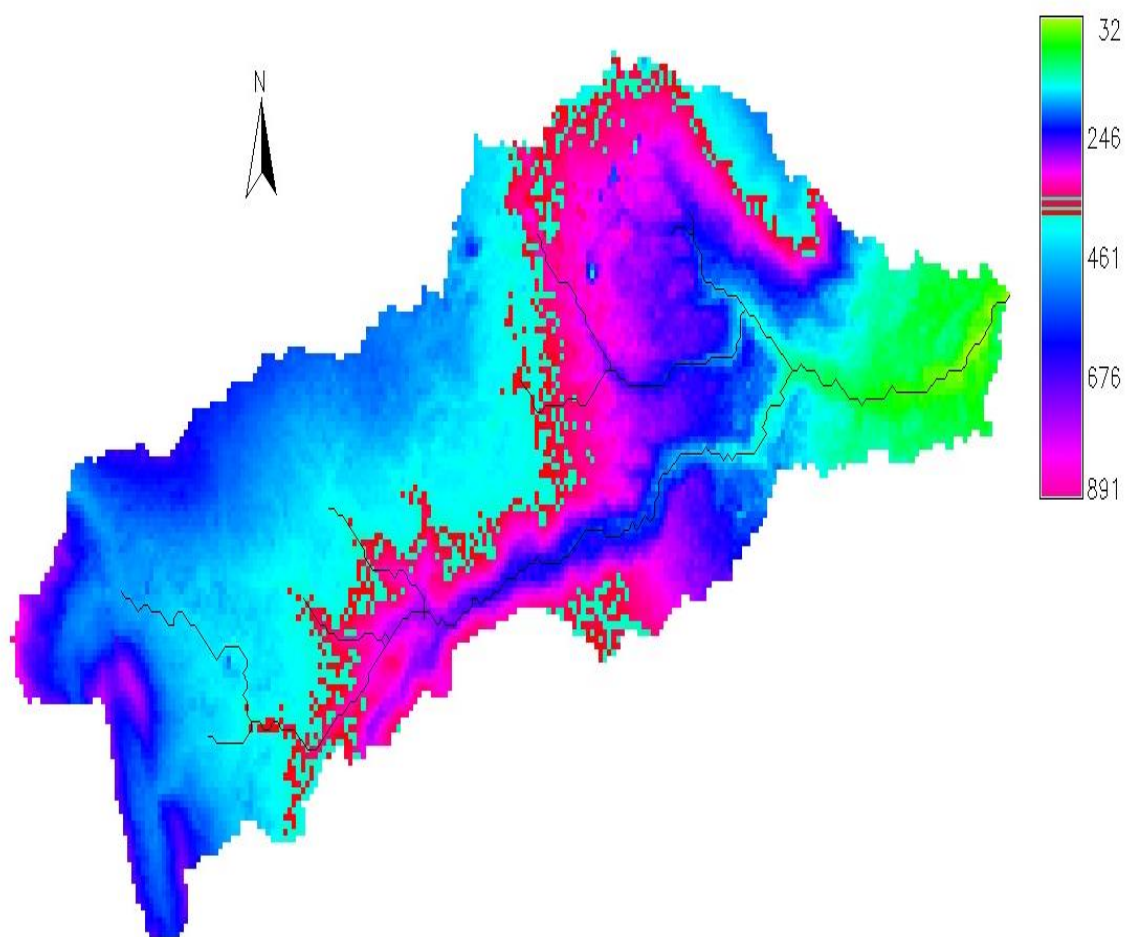


Figura 7.83 – Cuenca aportante de la estación Río Tres Brazos antes de Bt. Sendos.

En la Tabla 7.83 se presentan los resultados entregados mediante la utilización del programa.

Tabla 7.83 – Resultados entregados por GrassGis para la estación Río Tres Brazos antes de Bt. Sendos.

Área de la Cuenca	103 (Km ²)
Pendiente Media	12,47 (%)
Largo del Cauce	27,93 (Km)
Altura Máxima	891 (m)
Altura Mínima	32 (m)

7.1.28 Estación Río Grande en Tierra del Fuego.

Ubicación de la estación.

La estación se encuentra en el río Grande próxima al lago Blanco. Presenta los mayores caudales entre los meses de Septiembre y Noviembre, mientras que los menores caudales se observan entre los meses de Enero y Marzo. En la Figura 7.84, se puede observar la ubicación de la estación.

Coordenadas (UTM): 507568 E ; 4028384 S. Zona: 19 F

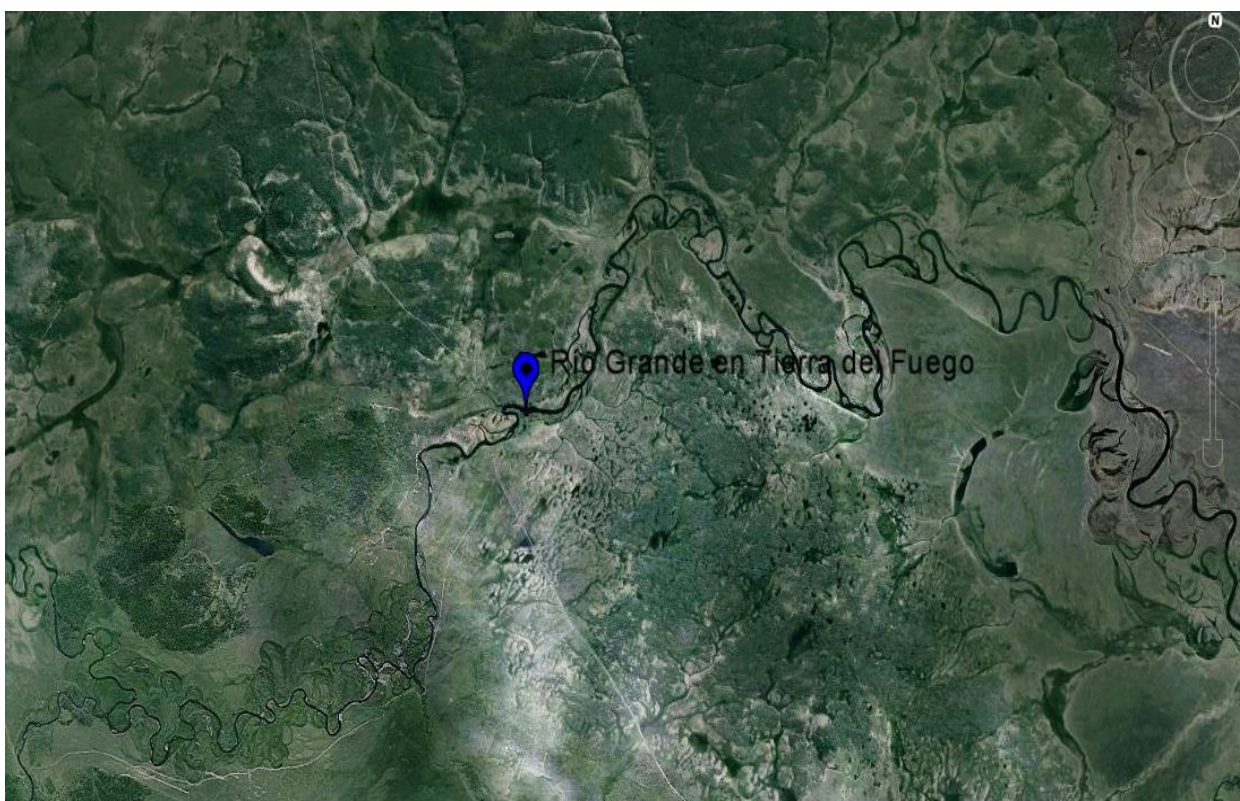


Figura 7.84 – Ubicación estación Río Grande en Tierra del Fuego.

Antecedentes Básicos

a) Fluviométricos

Se dispone de datos de series de caudales medios diarios observados de la estación Río Grande en Tierra del Fuego controlada por la Dirección General de Aguas del M.O.P para los periodos mostrados en la siguiente Tabla 7.84:

Tabla 7.84 – Registros fluviométricos Río Grande en Tierra del Fuego.

Nombre Estación	Periodo		Periodo	
	Desde	Hasta	Desde	Hasta
Río Grande en Tierra del Fuego	05/1981	06/1982	10/1995	06/2011
	08/1982	06/1984	08/2011	06/2012
	09/1984	07/1995		

b) Sedimentométricos

Se dispone de los registros sedimentométricos de la estación Río Grande en Tierra del Fuego. En la Tabla 7.85 se observan los tipos de muestreos realizados y los periodos de tiempo que abarcan los datos entregados por la D.G.A.

Tabla 7.85 – Registros sedimentométricos Río Grande en Tierra del Fuego.

Nombre Estación	Muestreos		Muestreos	
	Rutinarios		Integrados	
	Desde	Hasta	Desde	Hasta
Río Grande en Tierra del Fuego	07/1997	06/1998	06/1997	02/1998
	08/1998	03/2000	04/1998	03/2012
	05/2000	05/2001		
	07/2001	10/2002		
	02/2003	11/2009		

Utilizando la metodología señalada en el punto 7.1.1, se obtuvo el modelo:

$$C_i = 2.37 C_r^{0.66}$$

Donde:

C_i = concentración de muestreos integrados (mg/l).

C_r = concentración de muestreos rutinarios (mg/l).

Posteriormente en la Figura 7.85 se muestra de manera gráfica la relación que existe entre el caudal líquido y gasto sólido en suspensión.

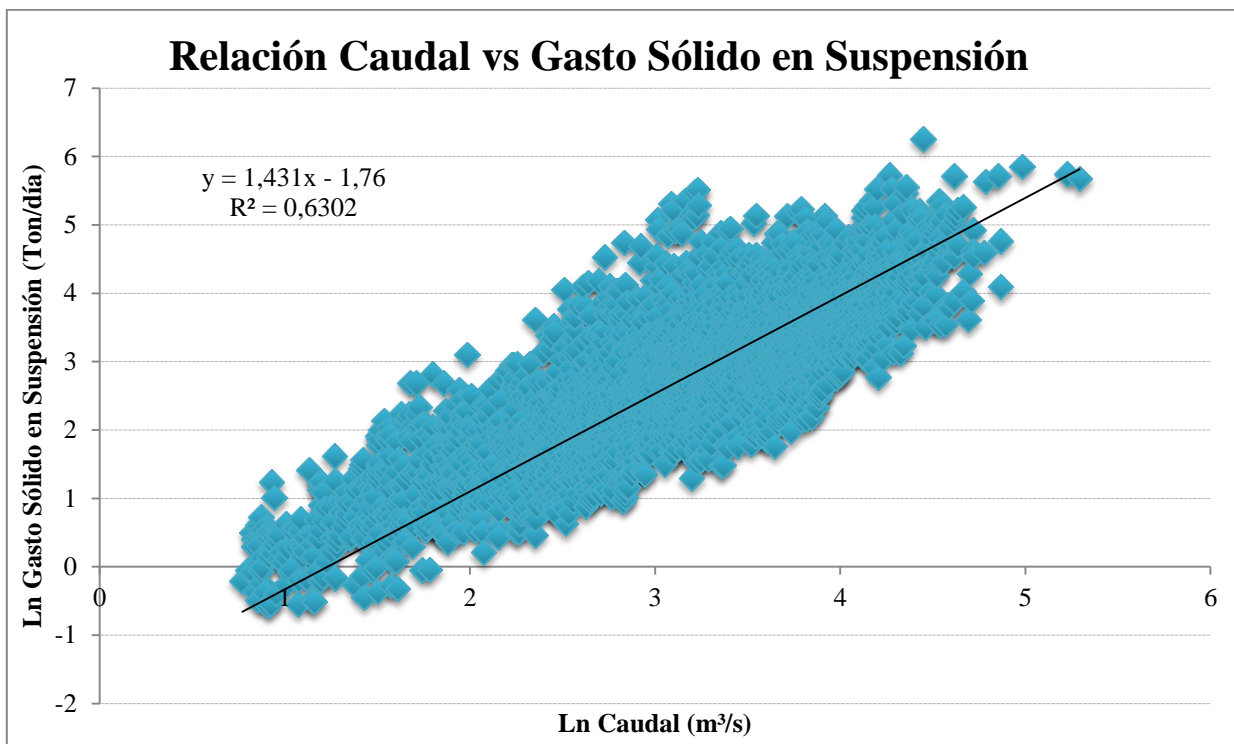


Figura 7.85 – Relación entre el caudal y gasto sólido en suspensión en la estación Río Grande en Tierra del Fuego.

El modelo de la Curva de gasto sólido en suspensión es:

$$G_{sd} = 0.172 Q_d^{1.431} \quad G_{sd} \text{ (Ton/día); } Q_d \text{ (m}^3\text{/s)}$$

Finalmente, utilizando los caudales medios diarios de la estación, se construyó la curva general de duración de caudales, para posteriormente integrar de manera discreta (intervalos) la curva de duración de caudales, de esta manera se generó el gasto sólido en suspensión medio anual y el caudal medio anual, en el Anexo 2 digital se encuentran las tablas de la curva de duración de caudales mencionadas y en el Anexo 3 digital se muestra de manera gráfica dicha curva.

En función de los análisis ejecutados, el caudal medio anual afluente y el gasto sólido medio anual para la estación Río Grande en Tierra del Fuego son:

Caudal Medio Anual: 28,30 (m³/s)

Gasto Sólido en Suspensión Medio Anual: 8.475 (Ton/año)

Análisis Geomorfológico

Mediante la utilización del programa GrassGis, es posible realizar un análisis de la cuenca definida por la estación en estudio.

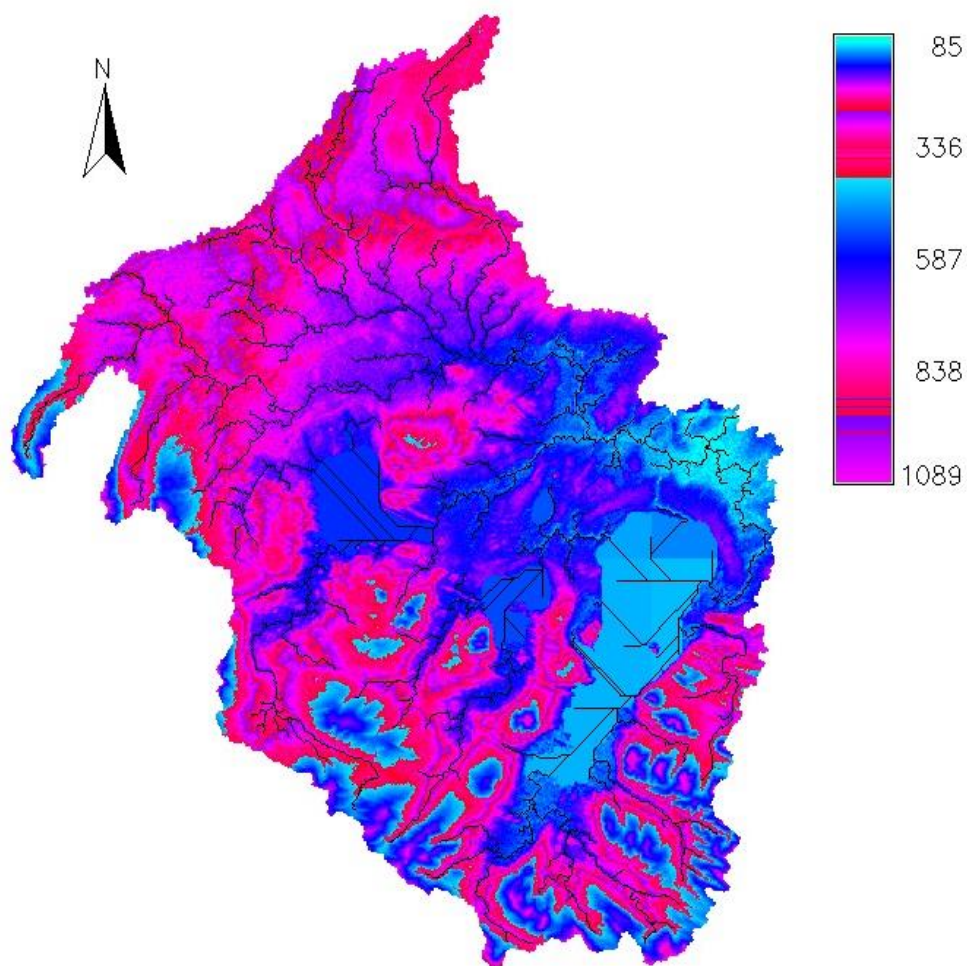


Figura 7.86 – Cuenca aportante de la estación Río Grande en Tierra del Fuego.

En la Tabla 7.86 se presentan los resultados entregados mediante la utilización del programa.

Tabla 7.86 – Resultados entregados por GrassGis para la estación Río Grande en Tierra del Fuego.

Área de la Cuenca	2808 (Km ²)
Pendiente Media	9,95 (%)
Largo del Cauce	139,14 (Km)
Altura Máxima	1.089 (m)
Altura Mínima	85 (m)

Resumen de Resultados.

En las siguientes tablas se señalan los resultados hidrológicos obtenidos de cada estación, a modo de sintetizar lo ya realizado.

Tabla 7.87 – Resumen de resultados hidrológicos en cada estación.

N°	ESTACIÓN	$G_{sd} = a Q_d^n$	CAUDAL LÍQUIDO MEDIO ANUAL (m ³ /s)	GASTO SÓLIDO MEDIO ANUAL (TON/AÑO)
1	RÍO TENO DESPUÉS JUNTA CON CLARO	$G_{sd} = 0.0015 Q_d^{2.924}$	56,87	432.368
2	RÍO LONCOMILLA EN LAS BRISAS	$G_{sd} = 0.357 Q_d^{1.29}$	272,15	246.608
3	RÍO PURAPEL EN SAUZAL	- Para $Q < 0.25$ (m ³ /s) $G_{sd} = 0.245 Q_d^{0.687}$ - Para $Q > 0.25$ (m ³ /s) $G_{sd} = 0.9 Q_d^{1.632}$	4,83	17.819
4	RÍO ÑUBLE EN SAN FABIÁN	- Para $Q < 96.8$ (m ³ /s) $G_{sd} = 0.846 Q_d^{0.723}$ - Para $Q > 96.8$ (m ³ /s) $G_{sd} = 0.0000078 Q_d^{3.248}$	111,50	218.634
5	RÍO CHILLAN EN CAMINO A CONFLUENCIA	- Para $Q < 24.0$ (m ³ /s) $G_{sd} = 1.2177 Q_d^{0.914}$ - Para $Q > 24.0$ (m ³ /s) $G_{sd} = 0.048 Q_d^{1.921}$	20,90	22.140
6	RÍO ITATA EN Balsa NUEVA ALDEA	$G_{sd} = 0.2133 Q_d^{1.332}$	135,39	72.641
7	RÍO DIGUILLIN EN SAN LORENZO (ATACALCO)	$G_{sd} = 0.0926 Q_d^{1.438}$	16,91	2.929
8	RÍO ITATA EN CHOLGUAN	$G_{sd} = 0.0629 Q_d^{1.667}$	44,71	20.518
9	RÍO VERGARA EN TIJERAL	$G_{sd} = 0.673 Q_d^{1.153}$	54,72	27.873

Tabla 7.88 – Resumen de resultados hidrológicos en cada estación. Continuación.

10	RÍO LUMACO EN LUMACO	- Para $Q < 32.0 \text{ (m}^3/\text{s)}$ $G_{sd} = 2.2344 Q_d^{0.988}$ - Para $Q > 32.0 \text{ (m}^3/\text{s)}$ $G_{sd} = 0.452 Q_d^{1.448}$	17,38	16.947
11	RÍO CAUTÍN EN RARI-RUCA	$G_{sd} = 0.0056 Q_d^{2.122}$	91,63	51.217
12	RÍO CHOLCHOL EN CHOLCHOL	$G_{sd} = 0.1676 Q_d^{1.369}$	131,79	64.754
13	RÍO CAUTÍN EN CAJÓN	$G_{sd} = 0.0322 Q_d^{1.650}$	140,05	60.185
14	RÍO QUEPE EN QUEPE	$G_{sd} = 0.0326 Q_d^{1.805}$	87,55	65.999
15	RÍO DONGUIL EN GORBEA	$G_{sd} = 0.1538 Q_d^{1.399}$	31,33	9.246
16	RÍO TRANCURA ANTES DE RÍO LLANFECO	- Para $Q < 200.0 \text{ (m}^3/\text{s)}$ $G_{sd} = 0.457 Q_d^{1.086}$ - Para $Q > 200.0 \text{ (m}^3/\text{s)}$ $G_{sd} = 0.00059 Q_d^{2.338}$	113,99	42.670
17	RÍO CRUCES EN RUCACO	$G_{sd} = 0.161 Q_d^{1.309}$	87,18	24.778
18	RÍO RAHUE EN FORRAHUE	- Para $Q < 270.0 \text{ (m}^3/\text{s)}$ $G_{sd} = 6.001 Q_d^{0.561}$ - Para $Q > 270.0 \text{ (m}^3/\text{s)}$ $G_{sd} = 0.000015 Q_d^{2.843}$	244,72	123.241
19	RÍO PALENA BAJO JUNTA ROSSELOT	$G_{sd} = 0.0000031 Q_d^{2.816}$	853,40	632.353
20	RÍO CISNES EN PUERTO CISNES	$G_{sd} = 0.00021 Q_d^{2.516}$	220,60	159.718

Tabla 7.89 – Resumen de resultados hidrológicos en cada estación. Continuación

21	RÍO AYSÉN EN PUERTO AYSÉN	$G_{sd} = 5.09 \times 10^{-7} Q_d^{3.355}$	547,76	1.428.571
22	RÍO IBÁÑEZ EN DESEMBOCADURA	$G_{sd} = 0.0011 Q_d^{2.738}$	147,78	907.015
23	RÍO MURTA EN DESEMBOCADURA	$G_{sd} = 0.0077 Q_d^{2.102}$	93,76	67.971
24	RÍO PENITENTE EN MORRO CHICO	$G_{sd} = 0.2836 Q_d^{1.413}$	13,93	5.475
25	RÍO PÉREZ EN DESEMBOCADURA	$G_{sd} = 0.2592 Q_d^{1.269}$	7,97	1.476
26	RÍO ORO EN BAHÍA SAN FELIPE	$G_{sd} = 0.4723 Q_d^{1.712}$	3,20	1.694
27	RÍO TRES BRAZOS ANTES DE BT. SENDOS	- Para $Q < 4.51 \text{ (m}^3/\text{s)}$ $G_{sd} = 0.2698 Q_d^{1.231}$ - Para $Q > 4.51 \text{ (m}^3/\text{s)}$ $G_{sd} = 0.045 Q_d^{2.411}$	2,04	572
28	RÍO GRANDE EN TIERRA DEL FUEGO	$G_{sd} = 0.172 Q_d^{1.431}$	28,30	8.475

En la siguiente tabla se señalan los resultados del estudio geomorfológico obtenido en cada estación, a modo de sintetizar lo realizado.

Tabla 7.90 – Resumen resultados estudio geomorfológico de cada estación.

N°	ESTACIÓN	ÁREA DE DRENAJE (KM ²)	PENDIENTE MEDIA (%)	LARGO DEL CAUCE (KM)
1	RÍO TENO DESPUÉS JUNTA CON CLARO	1.205	48,08	68,27
2	RÍO LONCOMILLA EN LAS BRISAS	10.336	16,32	301,18
3	RÍO PURAPEL EN SAUZAL	157	9,58	32,42
4	RÍO ÑUBLE EN SAN FABIÁN	1.659	43,14	120,91
5	RÍO CHILLAN EN CAMINO A CONFLUENCIA	750	12,24	133,49
6	RÍO ITATA EN Balsa Nueva Aldea	4.435	13,63	198,43
7	RÍO DIGUILLIN EN SAN LORENZO (ATACALCO)	207	43,54	33,73
8	RÍO ITATA EN CHOLGUAN	856	22,81	76,88
9	RÍO VERGARA EN TIJERAL	2.382	8,85	152,19
10	RÍO LUMACO EN LUMACO	1.035	17,56	106,03
11	RÍO CAUTÍN EN RARI-RUCA	1.306	13,42	87,50
12	RÍO CHOLCHOL EN CHOLCHOL	3.992	6,73	230,40
13	RÍO CAUTIN EN CAJÓN	3.332	8,96	194,23
14	RÍO QUEPE EN QUEPE	1.054	13,47	101,46
15	RÍO ALLIPEN EN LOS LAURELES	1.703	27,23	148,56
16	RÍO DONGUIL EN GORBEA	748	9,59	71,37
17	RÍO TRANCURA ANTES DE RÍO LLANFECO	1.406	33,82	106,32
18	RÍO CRUCES EN RUCACO	1.798	14,64	146,71
19	RÍO RAHUE EN FORRAHUE	5.571	10,18	206,36
20	RÍO PALENA BAJO JUNTA ROSSELOT	12.107	33,2	241,50
21	RÍO CISNES EN PUERTO CISNES	5.142	34,63	237,31
22	RÍO AYSÉN EN PUERTO AYSÉN	11.735	31,82	312,88
23	RÍO IBAÑEZ EN DESEMBOCADURA	2.446	37,32	146,11
24	RÍO MURTA EN DESEMBOCADURA	896	38,4	91,22
25	RÍO PENITENTE EN MORRO CHICO	1.495	9,84	117,45
26	RÍO PEREZ EN DESEMBOCADURA	341	15,83	62,33
27	RÍO ORO EN BAHÍA SAN FELIPE	618	9,97	110,73
28	RÍO TRES BRAZOS ANTES DE BT. SENDOS	103	12,47	27,93
29	RÍO GRANDE EN TIERRA DEL FUEGO	2.808	9,95	139,14

8. Análisis y comparación con expresiones empíricas

Antes de poder realizar una comparación entre los datos medidos y los valores obtenidos por las expresiones empíricas, es necesario conocer la relación existente entre el caudal medio anual medido y el gasto sólido en suspensión medio anual medido. La mejor forma de observar esta relación es mediante un gráfico en el cual los ejes se encuentren en escala logarítmica. En la tabla 8.1 se encuentran enumeradas las estaciones utilizadas, esta enumeración coincide con los puntos colocados en la Figura 8.1 que relaciona el caudal medio anual y el gasto sólido en suspensión medio anual medido.

Tabla 8.1 - Estaciones enumeradas.

NÚMERO	ESTACIÓN
1	RÍO TENO DESPUÉS JUNTA CON CLARO
2	RÍO LONCOMILLA EN LAS BRISAS
3	RÍO PURAPEL EN SAUZAL
4	RÍO ÑUBLE EN SAN FABIÁN
5	RÍO CHILLAN EN CAMINO A CONFLUENCIA
6	RÍO ITATA EN Balsa Nueva Aldea
7	RÍO DIGUILLIN EN SAN LORENZO (ATACALCO)
8	RÍO ITATA EN CHOLGUAN
9	RÍO VERGARA EN TIJERAL
10	RÍO LUMACO EN LUMACO
11	RÍO CAUTÍN EN RARI-RUCA
12	RÍO CHOLCHOL EN CHOLCHOL
13	RÍO CAUTIN EN CAJÓN
14	RÍO QUEPE EN QUEPE
15	RÍO DONGUIL EN GORBEA
16	RÍO TRANCURA ANTES DE RÍO LLANFECO
17	RÍO CRUCES EN RUCACO
18	RÍO RAHUE EN FORRAHUE
19	RÍO PALENA BAJO JUNTA ROSSELOT
20	RÍO CISNES EN PUERTO CISNES
21	RÍO AYSÉN EN PUERTO AYSÉN
22	RÍO IBAÑEZ EN DESEMBOCADURA
23	RÍO MURTA EN DESEMBOCADURA
24	RÍO PENITENTE EN MORRO CHICO
25	RÍO PÉREZ EN DESEMBOCADURA
26	RÍO ORO EN BAHÍA SAN FELIPE
27	RÍO TRES BRAZOS ANTES DE BT. SENDOS
28	RÍO GRANDE EN TIERRA DEL FUEGO

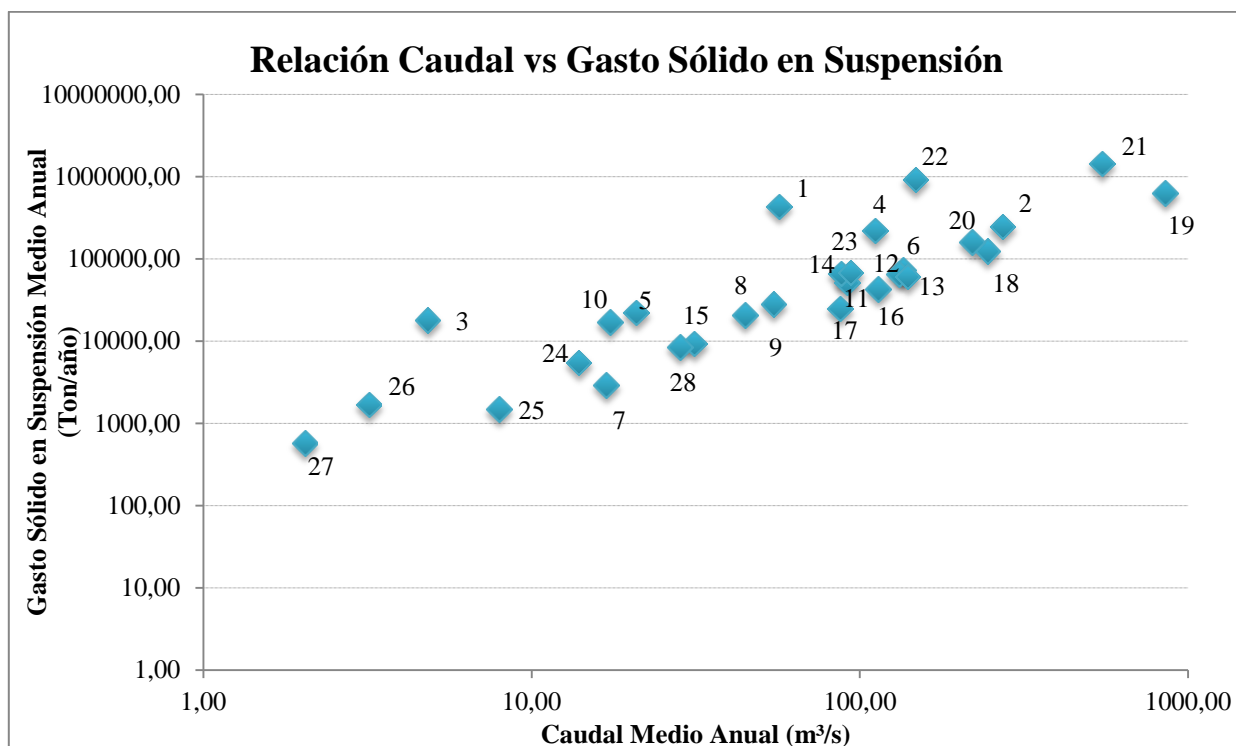


Figura 8.1 – Relación caudal medio anual y gasto sólido en suspensión medio anual medido.

8.1.- Análisis y comparación del gasto sólido en suspensión medido con las curvas de Fleming.

Fleming realizó el estudio de 250 cuencas ubicadas en distintas zonas del planeta mediante el cual estipuló que la producción de gasto sólido en suspensión se encuentra en función de la cobertura vegetal. Fleming construyó entonces cuatro expresiones empíricas en función de las variadas coberturas vegetales que observó.

Las cuatro expresiones empíricas de Fleming se encuentran en unidades inglesas, es por esto que ha sido necesario cambiar las unidades de dichas expresiones a las utilizadas en este trabajo de título. En la siguiente tabla se señalan los parámetros a utilizar en función de la cobertura vegetal en unidades comúnmente utilizadas en Chile.

Tabla 8.2 – Parámetros en base a la cobertura vegetal.

Cobertura Vegetal	n	a
		Para Qs en Ton.
Variada de hoja ancha y Coníferas	1,02	3,09
Floresta Conífer y Pastos Altos	0,82	189,05
Pastos Bajos y Arbustos	0,65	1898,8
Desierto y Arbustos	0,72	2898,4

Por lo tanto las expresiones empíricas de Fleming son las siguientes:

$$G_{sma} = 3,09 Q_{ma}^{1.02} \quad (8.1)$$

$$G_{sma} = 189,5 Q_{ma}^{0.82} \quad (8.2)$$

$$G_{sma} = 1898,8 Q_{ma}^{0.65} \quad (8.3)$$

$$G_{sma} = 2898,4 Q_{ma}^{0.72} \quad (8.4)$$

Para poder conocer si estas expresiones se acercan a la realidad de los cauces existentes en nuestro país, es necesario contrastar de manera gráfica el gasto sólido medido y el gasto sólido obtenido mediante la utilización de las expresiones empíricas propuestas por Fleming.

Para la obtención de las curvas de Fleming se ha debido remplazar el caudal medio anual medido de cada estación en cada una de las expresiones empíricas propuestas. El cálculo del gasto sólido obtenido para cada una de las estaciones en función de la curva utilizada se encuentra en el Anexo 4 digital.

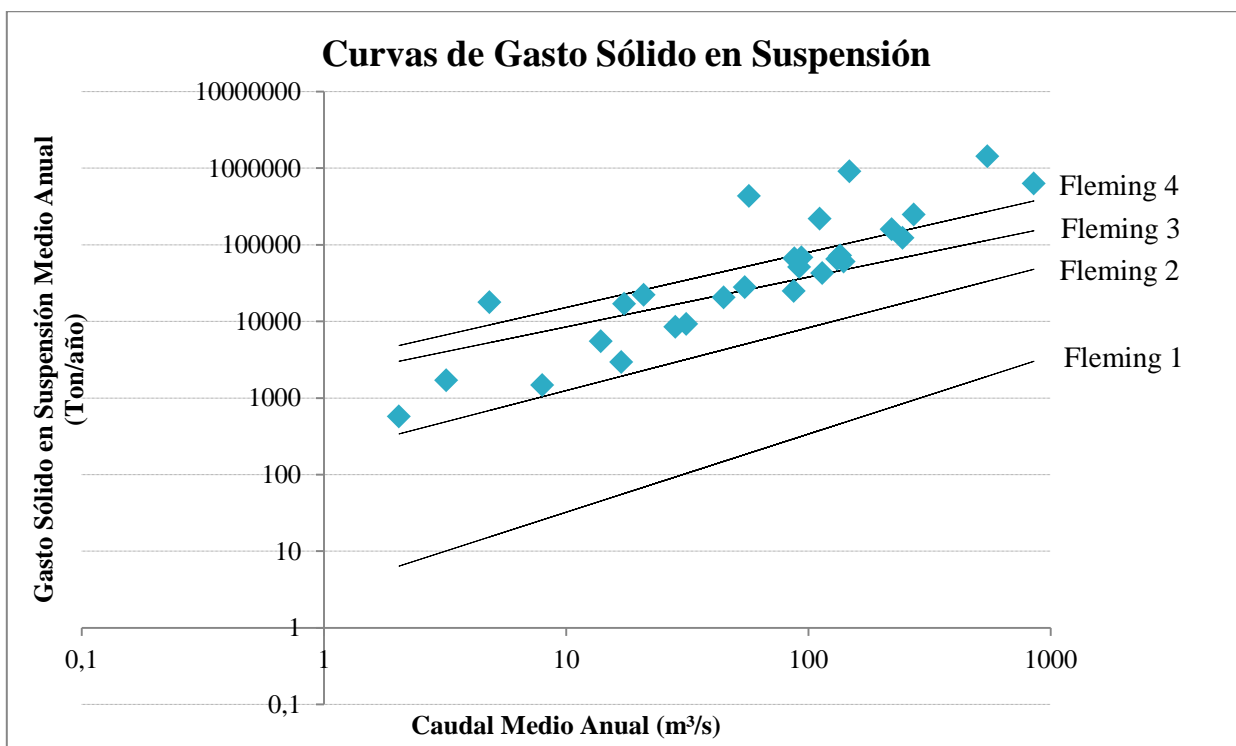


Figura 8.2 – Comparación entre el gasto sólido en suspensión medido y el gasto sólido en suspensión obtenido mediante las expresiones empíricas de Fleming.

En la Figura 8.2 se encuentran contrastadas las cuatro expresiones empíricas de Fleming con los valores de gasto sólido en suspensión medidos. Es notorio que las expresiones de Fleming que más se asimilan a la realidad de Chile son las curvas tres y cuatro, donde la curva tres es asociada a pastos bajos y arbustos, mientras que la curva cuatro se asocia a desierto y arbustos.

Debido a que las expresiones empíricas de Fleming correspondientes a las curvas tres y cuatro demuestran tener un mejor ajuste en relación a los resultados obtenidos del análisis en base a la información entregada por la D.G.A, las Figuras 8.3 y 8.4 demuestran de manera gráfica la comparación entre el gasto sólido en suspensión medido y el gasto sólido en suspensión empírico.

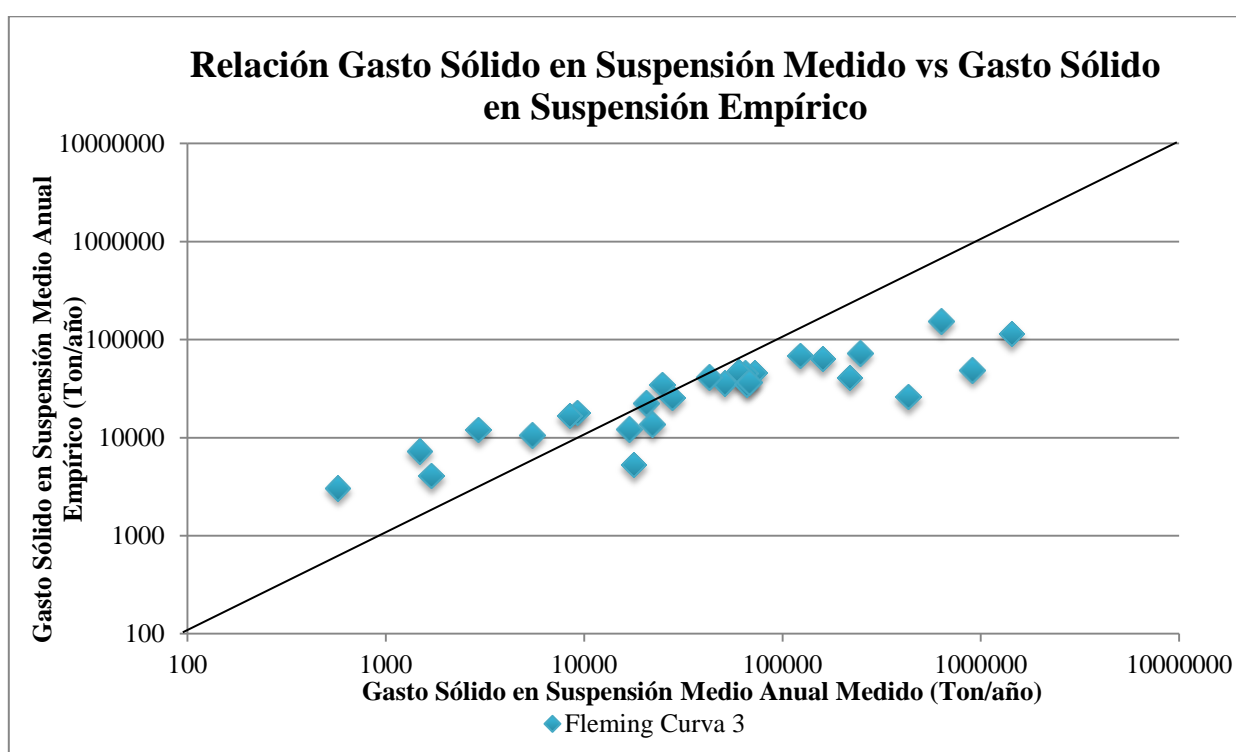


Figura 8.3 – Gasto sólido en suspensión empírico versus gasto sólido en suspensión empírico Fleming tres.

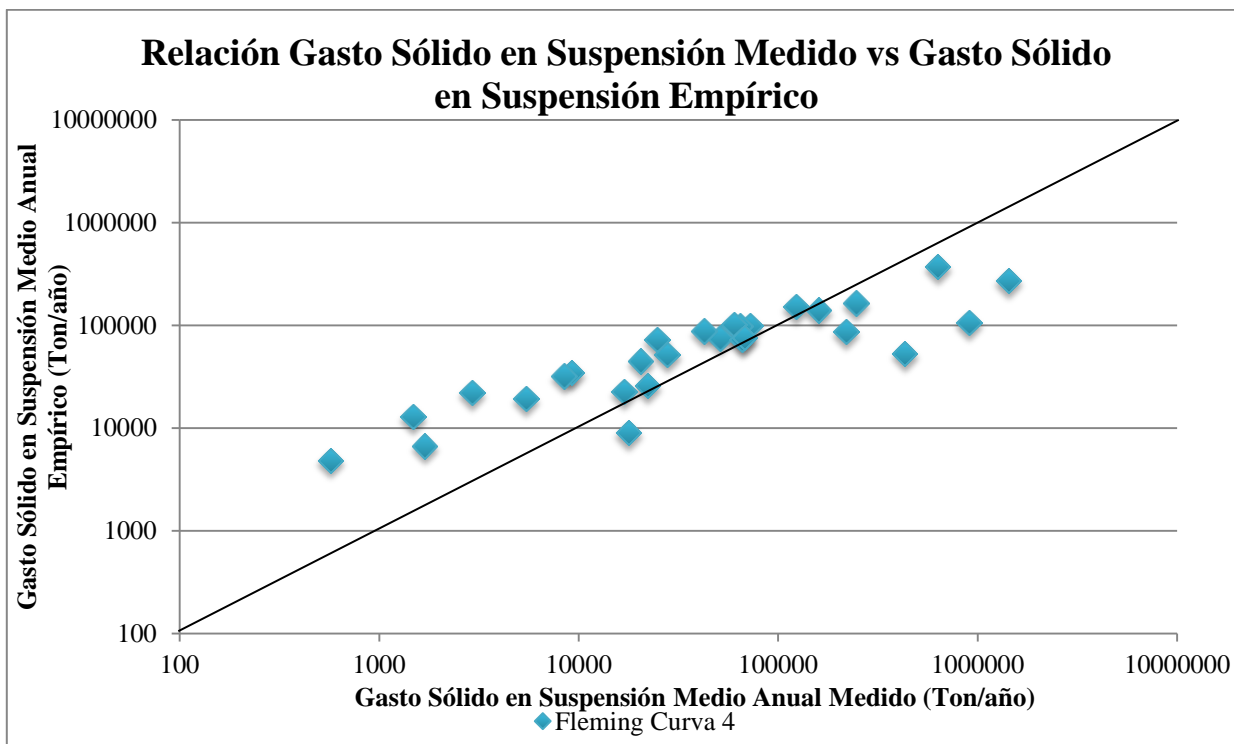


Figura 8.4 – Gasto sólido en suspensión empírico versus gasto sólido en suspensión empírico Fleming cuatro.

Una forma de determinar de manera cuantitativa la factibilidad de la aplicación de las expresiones empíricas de Fleming, es determinar el error existente entre el gasto sólido en suspensión medido y el gasto sólido en suspensión obtenido mediante las expresiones empíricas correspondientes a las curvas Fleming tres y cuatro. Los errores a determinar son el error cuadrático y el error relativo. El cálculo de los errores de las cuatro expresiones empíricas de Fleming se encuentra en el Anexo 4.

Error Cuadrático

$$e = \frac{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2}}{(n - 2)}$$

Tabla 8.3 – Resultados errores cuadráticos de Fleming 3 y 4.

Fleming 3	65.983 (Ton/año)
Fleming 4	57.485 (Ton/año)

Error Relativo

$$e_r = \left(\frac{e}{\bar{x}} \right) 100$$

Tabla 8.4 – Resultados errores relativos de Fleming 3 y 4.

Fleming 3	39,01 %
Fleming 4	33,98 %

En base a estos errores, es posible decir que la aplicación de las expresiones empíricas de Fleming en la zona centro-sur y sur de Chile no genera un elevado error, sin embargo es necesario disminuirlo ya que estas expresiones se utilizan para grandes obras hidráulicas, en donde pequeños errores pueden significar grandes costos.

8.2.- Análisis y comparación de gasto sólido en suspensión medido con método de Dendy y Bolton.

Dendy y Bolton generaron una cuenca referencial que relaciona el área de drenaje y la escorrentía. La cuenca referencial surge del estudio realizado a 800 cuencas ubicadas en Estados Unidos de América, la publicación asociada a este estudio se encuentra en el Anexo 5 digital.

Ya que se han obtenido las áreas delimitadas por las estaciones controladas por la D.G.A mediante el software GrassGis, éstas serán utilizadas para determinar el gasto sólido medido por kilómetro cuadrado. Después es necesario determinar la escorrentía anual existente en cada una de las estaciones, esto debido a que según lo señalado en la metodología Dendy y Bolton diferenciaron dos expresiones donde el punto de inflexión es la escorrentía de magnitud 50.8 (mm/año). Se determinó que la escorrentía en la totalidad de las estaciones es mayor a la magnitud del punto de inflexión, por lo cual sólo se utilizó la expresión empírica propuesta para escorrentías mayores a 50.8 (mm). Los cálculos de la escorrentía se encuentran en el Anexo 4 digital.

Para poder observar la diferencia o similitud entre el gasto sólido medido y el gasto sólido empírico utilizando la expresión desarrollada por Dendy y Bolton, se han graficado el gasto sólido específico en suspensión medido y empírico versus la escorrentía superficial media anual.

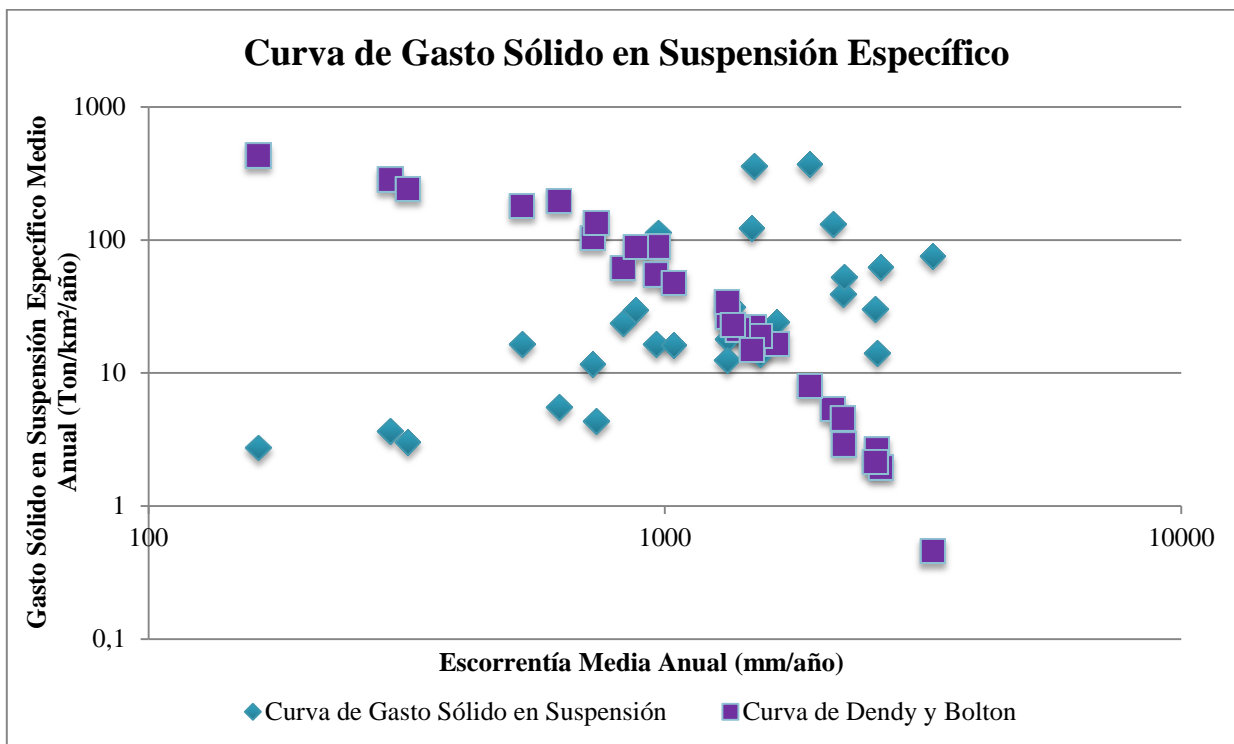


Figura 8.5 – Curvas de gasto sólido en suspensión específico medido y de Dendy y Bolton.

Observando la Figura 8.5 se puede ver que la curva de Dendy y Bolton con los datos medidos no presentan similitud, sin embargo a modo de corroborar de manera cuantitativa esto, se determinaron el error cuadrático y relativo.

Error Cuadrático

$$e = \frac{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2}}{(n - 2)}$$

Tabla 8.5 – Resultado error cuadrático método Dendy y Bolton.

Dendy y Bolton	79.263 (Ton/año)
----------------	------------------

Error Relativo

$$e_r = \left(\frac{e}{\bar{x}} \right) 100$$

Tabla 8.6 – Resultados error relativo método Dendy y Bolton.

Dendy y Bolton	46,86 (%)
----------------	-----------

El método empírico de Dendy y Bolton no tiene un buen ajuste a la realidad existente en la zona centro-sur y sur de nuestro país, pues gráficamente el modelo no se asemeja a los valores obtenidos en este trabajo de título y el error relativo que presenta el modelo supera el 40%.

9. Proposición de modelos

9.1.- Ajuste modelo tipo Fleming.

Algunos de los modelos empíricos propuestos por Fleming no presentan un mal ajuste a la realidad de la zona centro-sur y sur de Chile, sin embargo utilizando los resultados obtenidos en el análisis realizado a la información entregada por la D.G.A, es posible ajustar un modelo tipo Fleming, el cual estaría más cercano a la realidad de las cuencas ubicadas de la VII a la XII región del país.

La Figura 9.1 muestra un gráfico con los ejes en escala logarítmica, esto debido a que es más fácil la observación de los distintos puntos que representan cada una de las cuencas utilizadas.

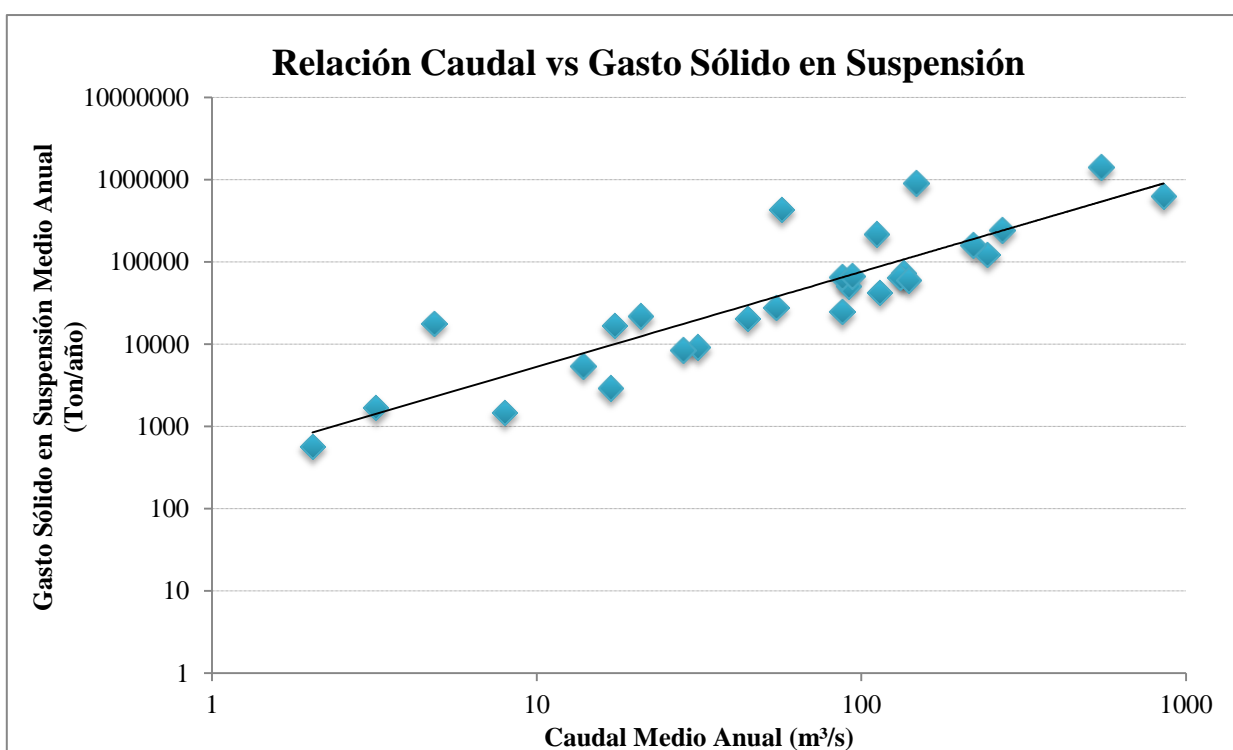


Figura 9.1 – Gráfico en escala logarítmica, de la relación caudal medio anual versus gasto sólido en suspensión medio anual.

Se puede observar que existe una tendencia media en los puntos, sin embargo es necesario para generar el modelo ajustado tipo Fleming, llevar el gráfico anterior a escala normal, pues de esta forma es posible observar y conocer el ajuste real existente entre el gasto sólido en suspensión anual y el caudal medio anual.

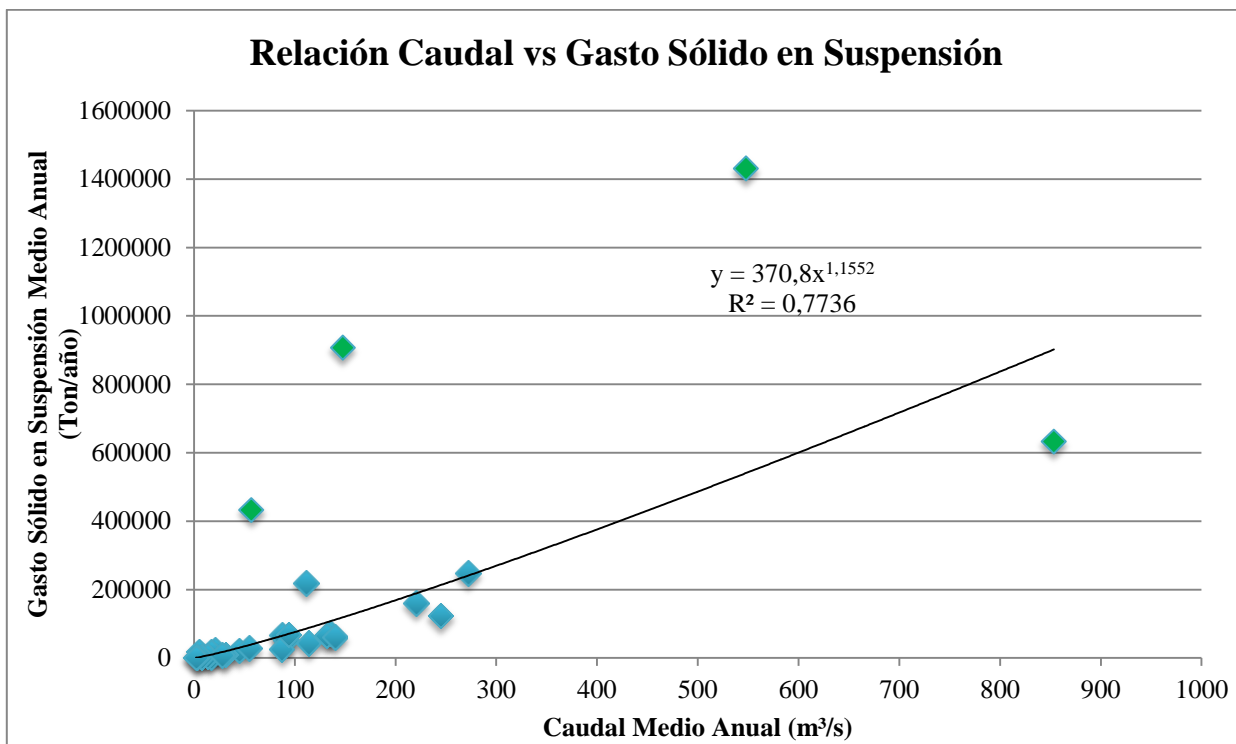


Figura 9.2 – Grafico en ejes normales, relación caudal medio anual versus gasto sólido en suspensión medio anual.

Por consiguiente el modelo obtenido en función de los análisis realizados a los datos entregados para cada una de las estaciones pertenecientes a la D.G.A es el siguiente:

$$G_{sma} = 370,8 Q_{ma}^{1,1552}$$

Donde:

G_{sma} = Gasto sólido medio anual (Ton/año).

Q_{ma} = Caudal medio anual (m^3/s).

Dentro de la gráfica que relaciona el caudal medio anual con el gasto sólido en suspensión medio anual, del cual se obtuvo el modelo antes mencionado, se puede observar que existen cuatro puntos pertenecientes a las siguientes estaciones: Río Teno después de junta con Río Claro, Río Palena bajo junta Rosselot, Río Aysén en Puerto Aysén y Río Ibáñez en Desembocadura. Para determinar de manera cuantitativa las diferencias entre el modelo ajustado tipo Fleming y los datos medidos originalmente, se determinarán el error cuadrático y relativo utilizando la totalidad de las estaciones y sustrayendo las ya mencionadas, así de esta forma es posible conocer el desajuste que estas estaciones proporcionan al modelo. El cálculo de los errores se encuentra en el Anexo 4.

Error Cuadrático

$$e = \frac{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2}}{(n - 2)}$$

Tabla 9.1 – Resultados errores cuadráticos modelo ajustado tipo Fleming.

Todas las estaciones	49.820 (Ton/año)
Sin: E. Teno, E.Palena, E. Aysén y E. Ibáñez	8.720 (Ton/año)

Error Relativo

$$e_r = \left(\frac{e}{\bar{x}}\right) \times 100$$

Tabla 9.2 – Resultados errores relativos modelo ajustado tipo Fleming.

Todas las estaciones	29,45 %
Sin: E. Teno, E.Palena, E. Aysén y E. Ibáñez	15, 69 %

Se demuestra de manera cuantitativa que el error que presenta el modelo ajustado tipo Fleming es bastante menor al otorgado por las expresiones empíricas que más se ajustan a la realidad de las cuencas ubicadas en las zonas centro-sur y sur del país, sin embargo es necesario poder visualizar de manera gráfica la similitud entre el gasto sólido en suspensión obtenido utilizando el modelo ajustado tipo Fleming y el gasto sólido en suspensión obtenido en cada una de las estaciones utilizadas, dicha relación se puede observar en la Figura 9.3.

En el punto 9.4 se hace un análisis de las condiciones geomorfológicas de las estaciones eliminadas para el modelo ajustado tipo Fleming que presentan un alto nivel de gasto sólido en suspensión medio anual.

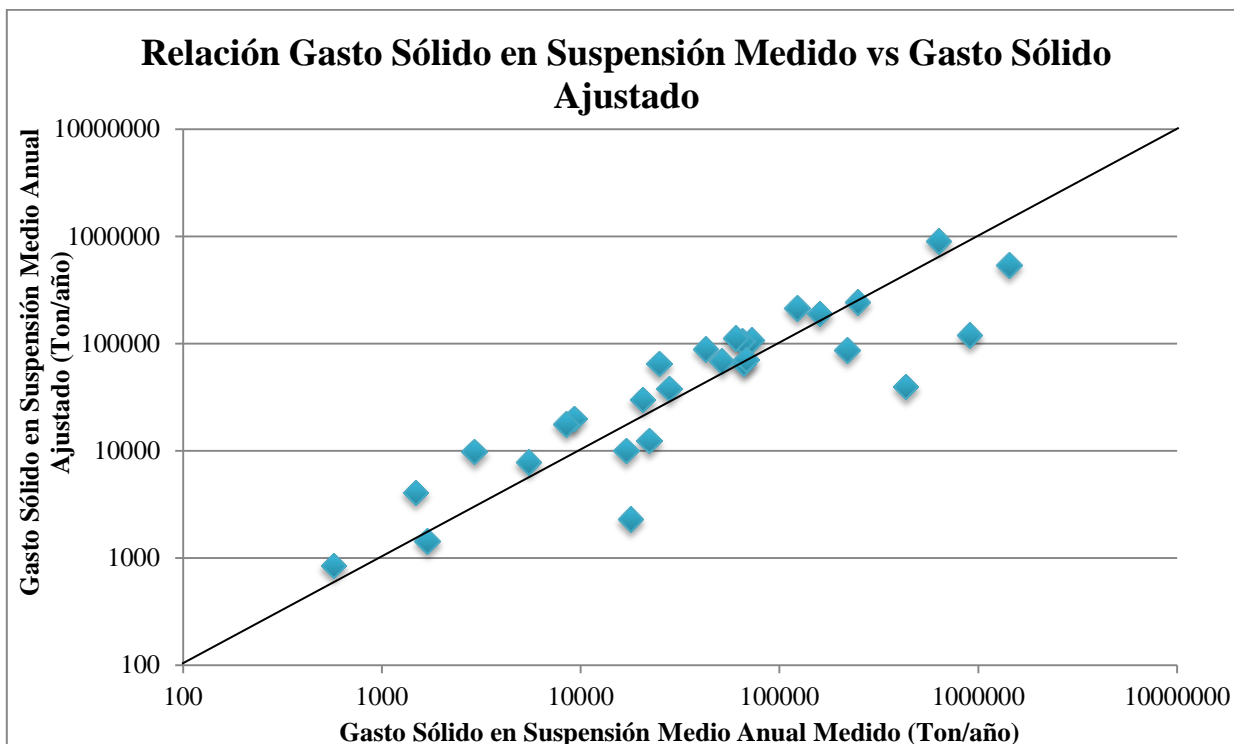


Figura 9.3 – Relación gasto sólido en suspensión medido versus gasto sólido en suspensión utilizando modelo ajustado tipo Fleming.

Al igual que la forma cuantitativa, la forma gráfica de comparación señala un buen ajuste entre los datos medidos y los resultados obtenidos mediante el uso del modelo ajustado tipo Fleming, esto es fácil de notar debido a que la gran mayoría de los puntos de la nube se acercan a la recta de 45° que refleja la igualdad en ambos datos.

9.2.- Ajuste modelo tipo Dendy y Bolton.

El modelo creado por Dendy y Bolton no tiene relación alguna con los datos obtenidos mediante el análisis de la información entregada por la D.G.A. Es por esto que es necesario realizar un ajuste al modelo creado por Dendy y Bolton. Para ello se utiliza la herramienta de análisis de datos Solver de Microsoft Excel, la cual permite cambiar las constantes señaladas por Dendy y Bolton.

Como ya se ha mencionado en el capítulo anterior, la totalidad de las cuencas utilizadas en el estudio presentan una escorrentía mayor a 50,8 (mm), es por esto que sólo se restablecerán las constantes del modelo propuesto para cuencas con escorrentía anual mayor a 50,8 (mm).

El modelo ajustado, es el siguiente:

Modelo ajustado tipo Dendy y Bolton:

$$\frac{S}{S_R} = 0,38e^{\left(\frac{0,014 \times Q}{Q_R}\right)} \left(0,081 + 0,02 \log\left(\frac{A}{A_R}\right)\right)$$

Con este modelo ajustado, es posible determinar el gasto sólido en suspensión por unidad de área. Por consiguiente es necesario multiplicar dichos datos por el área de la cuenca para cada una de las estaciones, así es posible realizar una comparación del gasto sólido en suspensión medio anual obtenido mediante la utilización de los datos entregados por la D.G.A y los valores obtenidos mediante la utilización del nuevo modelo ajustado tipo Dendy y Bolton. La Figura 9.4 señala la comparación antes mencionada mediante un gráfico con ejes logarítmicos, lo que permite una mejor visualización de los datos. La aplicación del modelo a cada estación, con la posterior multiplicación del área perteneciente a cada cuenca se encuentra en el Anexo 4 digital.

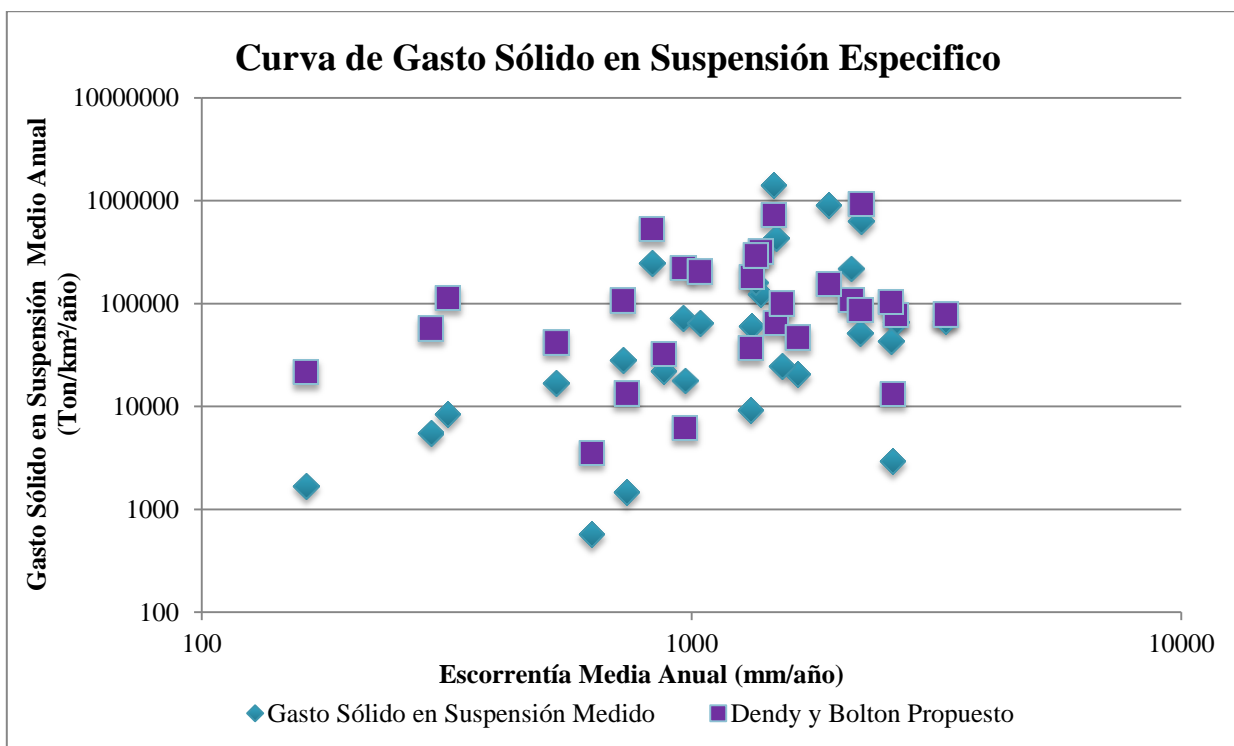


Figura 9.4 – Comparación gasto sólido medio anual medido versus gasto sólido obtenido utilizando modelo ajustado tipo Dendy y Bolton.

Se observa en la Figura 9.4 que el nuevo modelo ajustado tipo Dendy y Bolton presenta un mejor ajuste a los resultados obtenidos en base al análisis de los datos entregados por al D.G.A. Sin embargo, para que se pueda aseverar dicha afirmación, se calcula el error cuadrático y relativo asociado a este nuevo modelo. El cálculo de los errores se encuentra en el Anexo 4.

Error Cuadrático

$$e = \frac{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2}}{(n - 2)}$$

Tabla 9.3 – Resultado error cuadrático método ajustado tipo Dendy y Bolton.

Dendy y Bolton	49.404 (Ton/año)
----------------	------------------

Error Relativo

$$e_r = \left(\frac{e}{\bar{x}}\right) \times 100$$

Tabla 9.4 – Resultados errores relativo método ajustado tipo Dendy y Bolton.

Dendy y Bolton	29,21 (%)
----------------	-----------

Mediante los errores determinados, es posible afirmar tanto de manera cuantitativa como gráfica, que el modelo ajustado tipo Dendy y Bolton, presenta un mejor ajuste a la realidad de la zona centro-sur y sur del país en comparación con el modelo empírico de Dendy y Bolton original.

9.4.- Análisis de las condiciones geomorfológicas en las estaciones que presentan un alto nivel de gasto sólido en suspensión medio anual.

Esta investigación se ha realizado para el territorio chileno que abarca desde la VII región del Maule hasta la XII región de Magallanes. Al culminar el análisis de los datos de las estaciones en estudio, se ha observado que las estaciones río Teno después junta con Claro, río Palena bajo junta con Rosselot, río Aysén en puerto Aysén y río Ibáñez en desembocadura presentan un gasto de sólido que se aleja del rango promedio que señalan el resto de las estaciones. Debido a esto, se buscará encontrar la posible respuesta del por qué estos altos gastos ocurren. La estación del río Teno se ubica en la región del Maule, mientras que las otras tres estaciones nombradas se encuentran en la región de Aysén.

El relieve existente en nuestro país es muy variado, teniendo bruscos cambios a lo largo de todo el territorio. Factores fundamentales que condicionan la geografía del país son la Cordillera de la Costa y la Cordillera de los Andes.

Cordillera de la Costa.

La Cordillera de la Costa varía su forma a lo largo del terreno en estudio, es así como en las regiones más centrales presenta alturas que se encuentran en rangos de 300 a 700 (m.s.n.m), alturas que en comparación a las planicies litorales se encuentran bastante bajas. En la parte más austral del país, la Cordillera de la Costa va desapareciendo hasta hundirse y se ven sólo sus mayores alturas en formas de archipiélagos e islas.

Cordillera de los Andes.

La Cordillera de los Andes desde la VII a la XII región varía su altura. En la región del Maule presenta cordones montañosos que presentan una altitud cercana a los 3.500 (m.s.n.m). Avanzando hacia el sur, la cordillera va disminuyendo su altura, aunque esta realidad se ve bruscamente cambiada en la región de Aysén, donde nuevamente vuelve a resaltar la altura de las montañas que llegan a superar los 4.000 (m.s.n.m). Posteriormente en la región de Magallanes la cordillera vuelve a decrecer en altura debido a las erosiones glaciares que han ocurrido en esta zona.

Región de Aysén.

Como ya fue mencionado, en Aysén se encuentran tres de las estaciones que presentan un gasto sólido en suspensión alto. En esta región sucede un fenómeno único, pues aquí ocurre la conjunción de las placas tectónicas de Nazca, Antártica – Pacífico Sur, y Continente Sudamericano, esta conjunción de placas es la responsable de la elevación brusca de la Cordillera de los Andes y de la fragmentación de la corteza continental.

Esta región presenta los más grandes caudales registrados a lo largo de Chile, esto debido a la existencia de altura de la Cordillera de los Andes que genera el efecto llamado lluvia orográfica, lluvia que ocurre cuando las masas de nubes se ven interrumpidas en su desplazamiento debido a un obstáculo.

Por otra parte en la región se observan bloques de nieve en la cima de las montañas, es por esto que en las temporadas de verano los caudales no se ven tan disminuidos.

Otro factor a considerar es el uso de la vegetación, pues este factor puede disminuir en algunos casos la tasa de sedimentos. En el caso particular de la Cuenca del río Aysén la vegetación se ha visto alterada debido a los grandes incendios que han ocurrido [28], lo que ayuda a que esta estación tenga tanto gasto sólido en suspensión.

Los ríos en los cuales se encuentran las estaciones que presentan una gran cantidad de transporte de sólido en suspensión, calzan en la clasificación de meandros encajados. Este efecto de encajado puede deberse a la constante elevación de la Cordillera de los Andes, lo que causa que el río vaya erosionando constantemente la cuenca.

Región del Maule.

En esta región sólo se observa una estación que presenta un gasto sólido en suspensión alto, aquí la ubicación de la estación adquiere importancia, debido a que está a los pies del volcán El Planchón. Aguas arriba de la estación es posible observar que el río presenta una morfología trenzada, característica de ríos que presentan un gran gasto sólido en suspensión.

10. Análisis de la relación Pendiente – Gasto sólido en suspensión.

Mediante la utilización de los antecedentes entregados por la Dirección General de Aguas, se ha podido realizar un análisis, que permite obtener el gasto sólido en suspensión anual que se genera en cada una de las estaciones utilizadas en el presente trabajo de título. Una vez que se termina este proceso se continúa con la utilización del Software GrassGis. Este programa nos ha permitido ubicar de manera satelital la estación y generar la cuenca aportante y otorgar parámetros relevantes para el estudio, tales como el área y pendiente media de la cuenca, junto con el largo del cauce.

Los métodos utilizados anteriormente, se diferencian entre sí en los tipos de variables que se relacionan para la determinación del gasto sólido en suspensión anual. Es así como la expresión empírica tipo Fleming usa el caudal líquido, mientras que Dendy y Bolton diferencia dos tipos de expresiones en función de la escorrentía anual y el área de escurrimiento del cauce.

Es importante para el hidrólogo ir descubriendo relaciones o métodos que permitan un mayor entendimiento de la forma en que se genera el gasto sólido en suspensión y la influencia que tienen las distintas variables que influyen en dicho proceso.

En función de lo señalado anteriormente, se busca determinar si existe algún tipo de relación entre el gasto sólido en suspensión y la pendiente media de la cuenca a lo largo de la zona centro-sur y sur de Chile.

Los valores obtenidos de gasto sólido en suspensión anual y pendiente media de la cuenca, se exponen en la Tabla 10.1.

Tabla 10.1 – Resumen gasto sólido en suspensión medido y pendiente media de la cuenca.

ESTACIÓN	GASTO SÓLIDO EN SUSPENSIÓN MEDIDO (TON/AÑO)	PENDIENTE MEDIA (%)
RÍO TENO DESPUÉS JUNTA CON CLARO	432.368	48,08
RÍO LONCOMILLA EN LAS BRISAS	246.608	16,32
RÍO PURAPEL EN SAUZAL	17.819	9,59
RÍO ÑUBLE EN SAN FABIÁN	218.634	43,14
RÍO CHILLAN EN CAMINO A CONFLUENCIA	22.140	12,24
RÍO ITATA EN BALSA NUEVA ALDEA	72.641	13,63
RÍO DIGUILLIN EN SAN LORENZO (ATACALCO)	2.929	43,54
RÍO ITATA EN CHOLGUAN	20.518	22,81
RÍO VERGARA EN TIJERAL	27.873	8,85
RÍO LUMACO EN LUMACO	16.947	17,56
RÍO CAUTÍN EN RARI-RUCA	51.217	13,42
RÍO CHOLCHOL EN CHOLCHOL	64.754	6,73
RÍO CAUTIN EN CAJÓN	60.185	8,96
RÍO QUEPE EN QUEPE	65.999	13,47
RÍO DONGUIL EN GORBEA	9.246	9,589
RÍO TRANCURA ANTES DE RÍO LLANFECO	42.670	33,82
RÍO CRUCES EN RUCACO	24.778	14,64
RÍO RAHUE EN FORRAHUE	123.241	10,18
RÍO PALENA BAJO JUNTA ROSSELOT	632.353	33,2
RÍO CISNES EN PUERTO CISNES	159.718	34,63
RÍO AYSÉN EN PUERTO AYSÉN	1.430.951	31,82
RÍO IBAÑEZ EN DESEMBOCADURA	907.015	37,32
RÍO MURTA EN DESEMBOCADURA	67.971	38,4
RÍO PENITENTE EN MORRO CHICO	5.475	9,84
RÍO PEREZ EN DESEMBOCADURA	1.476	15,83
RÍO ORO EN BAHÍA SAN FELIPE	1.694	9,97
RÍO TRES BRAZOS ANTES DE BT. SENDOS	572	12,47
RÍO GRANDE EN TIERRA DEL FUEGO	8.475	9,95

En base al total de las estaciones disponibles que se observan en la Tabla 10.1 no es posible determinar un modelo que presente una correlación tolerable entre la pendiente media y el gasto sólido en suspensión, esto debido principalmente a que ciertas estaciones no presentan una relación entre la pendiente media de la cuenca y el gasto sólido en suspensión. Esto se debe a las demás variables que influyen en el proceso del arrastre de sedimentos en suspensión y que no han sido consideradas.

Sin embargo eliminando dichas estaciones (Río Diguillin en San Lorenzo (atacalco), Río Palena bajo junta Rosselot, Río Aysén en Puerto Aysén y Río Ibáñez en Desembocadura), es posible determinar un modelo que permita relacionar las dos variables. La relación encontrada, es de tipo polinómica, en la cual a medida que aumenta la pendiente aumenta también el gasto sólido en suspensión. El modelo polinomial se puede observar en la Figura 10.1.

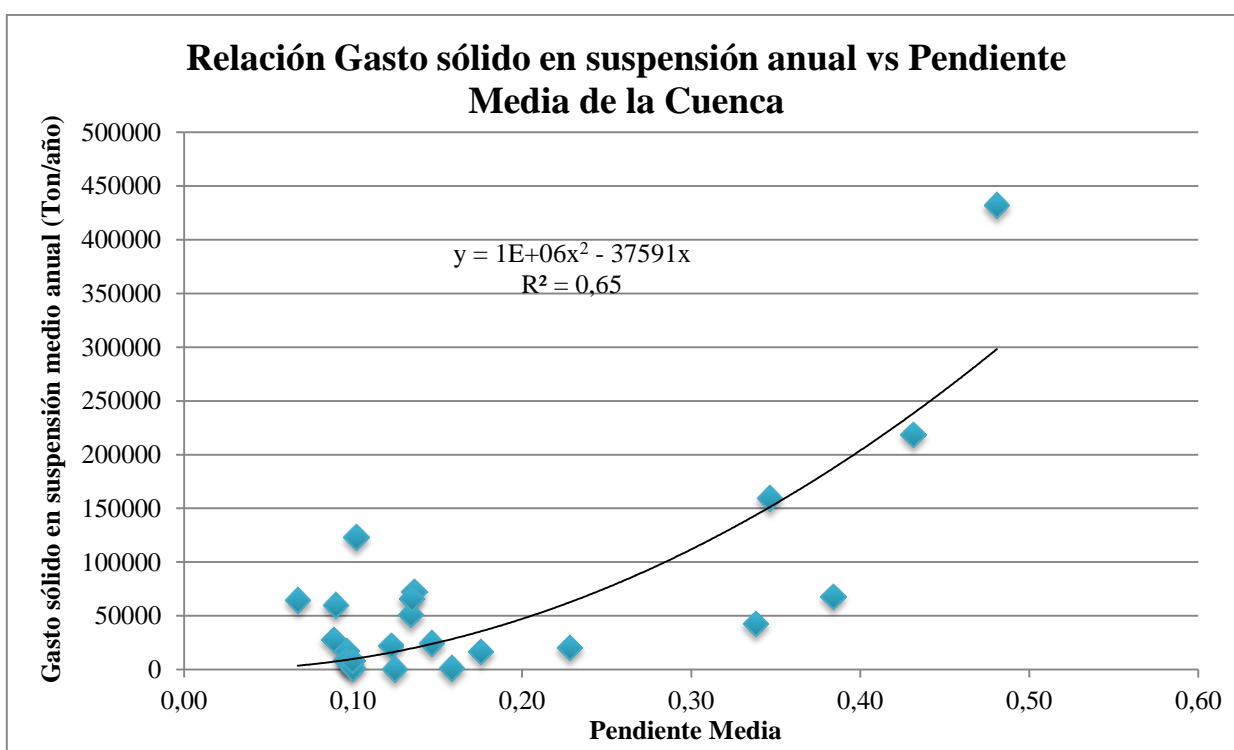


Figura 10.1 – Relación pendiente media y gasto sólido en suspensión medio anual.

Por lo tanto se asevera que sí existe una relación entre la pendiente media de la cuenca y el gasto sólido en suspensión que fluye en los cauces de la zona centro sur y sur de Chile.

No obstante, este trabajo tiene como uno de sus objetivos demostrar que existe una relación entre las variables caudal líquido, gasto sólido en suspensión y la pendiente media de la cuenca. Es por esto es necesario realizar un análisis dimensional.

10.1.- Análisis dimensional.

El análisis dimensional es una herramienta que permite simplificar cualquier fenómeno en que estén involucradas muchas variables físicas en forma de variables independientes. El resultado fundamental, el teorema de Vaschy-Buckingham (más conocido como teorema Π) permite cambiar el conjunto original de parámetros de entrada dimensionales de un problema físico por otro conjunto de parámetros de entrada adimensionales más reducido.

En general, todas las relaciones físicas pueden reducirse a una relación entre las magnitudes fundamentales, fuerza F, longitud L, y tiempo T (o bien la masa M, longitud L y tiempo T) [30]. Se utilizarán las últimas tres magnitudes para este análisis.

10.1.1.- Aplicación del Teorema Vaschy-Buckingham.

Variables físicas a considerar y sus unidades:

1. Área de la Cuenca (A): L^2
2. Caudal Líquido (Q_L): L^3T^{-1}
3. Caudal Sólido/Peso Específico (Q_s/γ_{esp}): L^3T^{-1}
4. Pendiente media de la cuenca (P): L/L
5. Densidad del caudal (ρ): ML^{-3}

$$F(\rho, A, Q_L, Q_s/\gamma_{esp}, P) = 0$$

Magnitudes físicas involucradas (n): 5.

Magnitudes físicas fundamentales (k): 3

$(n-k) = (5 - 3) =$ Existirán 2 números Π .

$$\Pi_1 = (\rho^x) (A^y) (Q_L^z) (Q_s/\gamma_{esp})$$

$\Pi_2 =$ Al ser la pendiente una magnitud física con las mismas dimensiones, su cociente será un número adimensional Π [30].

$\Pi_1:$

$$M^0 L^0 T^0 = (ML^{-3})^x (L^2)^y (L^3T^{-1})^z (L^3T^{-1})$$

Realizando la igualdad de exponentes:

$$(1) M: 0 = x,$$

$$(2) L: 0 = -3x + 2y + 3z + 3, \text{ remplazando (1) y ordenando: } 2y + 3z = -3,$$

$$(3) T: 0 = -z - 1, \text{ es decir } z = -1,$$

Remplazando (3) en (2) se obtiene $y = 0$.

Resumiendo las constantes quedan: $x = 0$, $y = 0$, y $z = -1$.

Remplazando las constantes en Π_1 :

$$\Pi_1 = (\rho^0) (A^0) (Q_1^{-1}) (Q_s/\gamma_{\text{esp}}); \text{ por lo tanto } \Pi_1 = [Q_s/\gamma_{\text{esp}}]/Q_1$$

Π_2 : $\Pi_2 = L/L$ (pendiente), por ser una variable adimensional es un número Π por sí solo [30].

Es posible escribir por lo tanto que:

$$\Pi_1 = \phi \Pi_2$$

$$[Q_s/\gamma_{\text{esp}}]/Q_1 = \phi (P)$$

Con la utilización de quince de las estaciones utilizadas en el desarrollo de este trabajo, que cumplen el requisito de abarcar la mayor franja del terreno de la zona centro-sur y sur de Chile, se determina un modelo que cumpla con la relación encontrada en el análisis dimensional. En la Figura 10.2 se puede ver el modelo generado que involucra las tres variables en estudio.

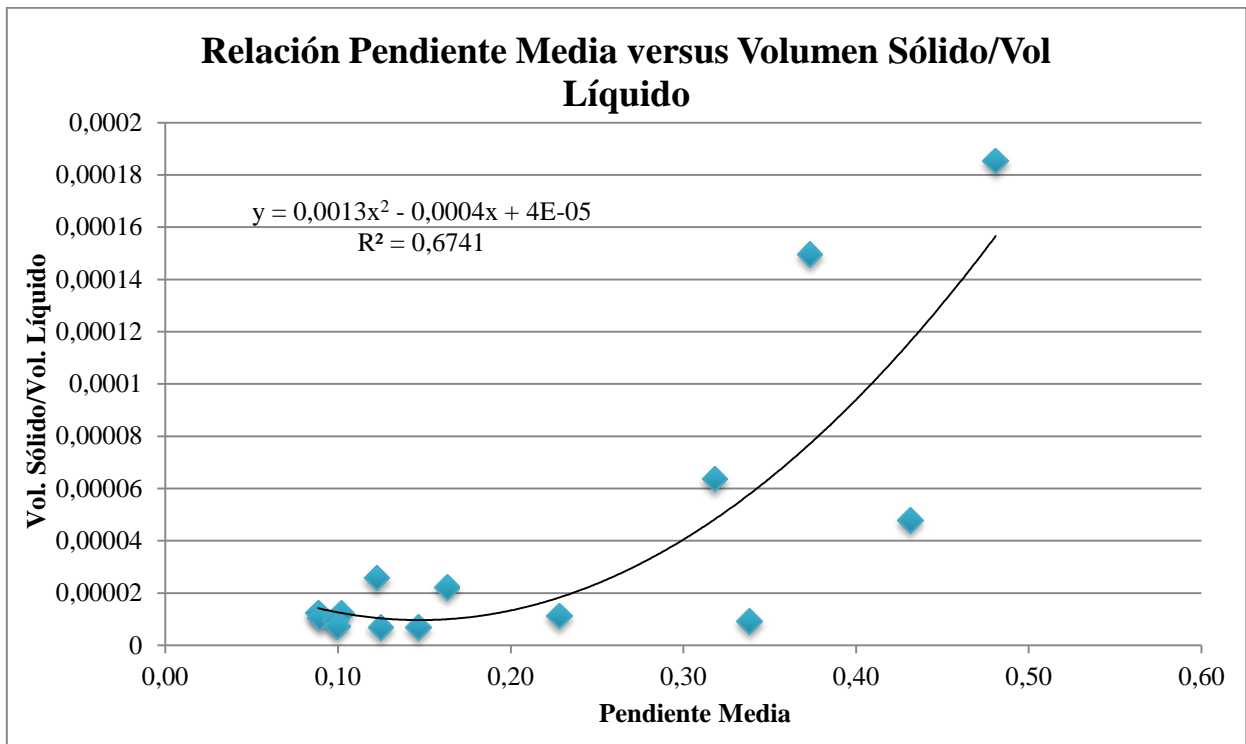


Figura 10.2 – Modelo tres variables generado con las estaciones en estudio.

Por lo tanto el modelo encontrado es el siguiente:

$$G_{sma} = (0,0013 P^2 - 0,0004 P + 4E-05) Q_{ma} \gamma_{esp} T$$

Donde:

G_{sma} = Gasto sólido medio anual (Ton/año)

P = Pendiente media de la cuenca (adimensional)

Q_{ma} = Caudal medio anual (m^3/s)

γ_{esp} = Peso específico estimado del sólido en suspensión (Ton/m^3)

T = Segundos en un año (s/año)

Sin embargo, es necesario validar si el modelo. Para ello se utilizan los datos con que se cuentan de aquellas estaciones no contempladas en la formulación del modelo de tres variables.

10.2.- Validación del Modelo de Tres Variables

La validación del modelo se realiza con las estaciones utilizadas en este trabajo de título que no han sido consideradas para la formulación del modelo de tres variables. A modo de conocer las diferencias existentes entre el gasto sólido en suspensión medido y el gasto sólido en suspensión entregado mediante la aplicación del modelo de tres variables, se calculan el error cuadrático y el error relativo. El cálculo de los errores se puede observar en el Anexo 4.

Error Cuadrático

$$e = \frac{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2}}{(n - 2)}$$

Tabla 10.2 – Resultado error cuadrático modelo tres variables.

Modelo Tres Variables	9.348 (Ton/año)
-----------------------	-----------------

Error Relativo

$$e_r = \left(\frac{e}{\bar{y}}\right) 100$$

Tabla 10.3 – Resultado error relativo modelo tres variables.

Modelo Tres Variables	26,33 (%)
-----------------------	-----------

En la Figura 10.3 se puede observar el error existente en la aplicación del modelo de manera gráfica.

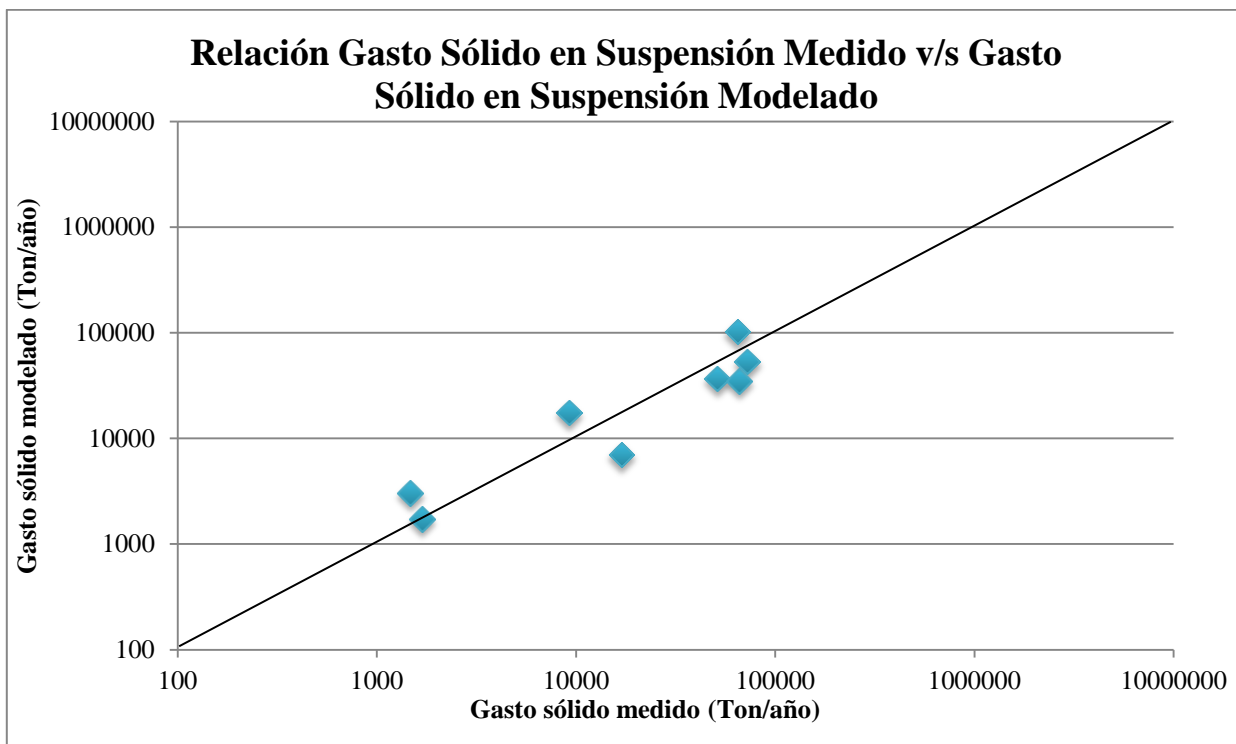


Figura 10.3 – Relación gasto sólido en suspensión medido versus gasto sólido en suspensión modelado.

Se observa que el modelo tres variables sí otorga una buena aproximación del valor de gasto sólido en suspensión medido para las estaciones distribuidas en la zona centro-sur y sur de Chile, ya que los puntos se encuentran cercanos a la línea de 45° que representa la igualdad entre el método de medición de gasto sólido en suspensión y el gasto sólido en suspensión medido.

11. Conclusiones

El presente trabajo de título ha permitido conocer el arrastre de sólidos en suspensión que presentan variados cauces. Conocer si las expresiones empíricas creadas en otros lugares del mundo son aplicables a la zona centro-sur y sur del país, y determinar el efecto que genera la geomorfología que rodea al cauce en el transporte de sedimentos en suspensión. Por lo tanto permite principalmente determinar volúmenes muertos de sedimentos en suspensión en futuros embalses y analizar el arrastre de sedimentos como una función dependiente del caudal líquido que escurre y la pendiente del terreno.

Las expresiones empíricas de Fleming que relacionan el caudal líquido con el gasto sólido en suspensión para distintas coberturas vegetales, otorgan valores aproximados utilizando las expresiones para coberturas de Pastos bajos y Arbustos (curva N° 3) y para coberturas de Desierto y Arbustos (curva N° 4).

La expresión de Dendy y Bolton utilizada en este trabajo fue la creada para escorrentías superficiales mayores a 50,8 (mm), ya que la totalidad de estaciones analizadas cuentan con escorrentías mayores a la nombrada. Esto se debe a que las zonas en estudio se ven afectadas frecuentemente por sistemas frontales que aportan gran cantidad de precipitaciones.

El modelo de Dendy y Bolton demostró no ser aplicable en la zona centro-sur y sur del país, debido a que los valores entregados por el modelo no presentan una aproximación a los valores de sedimentos en suspensión medidos.

El modelo ajustado tipo Fleming presenta un buen ajuste, sin embargo este modelo demuestra tener mejores resultados para cauces con cuencas aportantes medianas y pequeñas. Además se observa una disminución en el ajuste cuando se requiere conocer el gasto sólido en suspensión que transportan cauces que abarcan grandes cuencas y/o presentan pendientes medias altas.

El modelo ajustado tipo Dendy y Bolton, presenta un ajuste aproximado (pero en menor magnitud que el modelo ajustado tipo Fleming). Este modelo al ser creado en base a los datos medidos presenta un cambio en el exponente (modelo original presenta un exponente negativo), mientras que el modelo ajustado presenta un exponente positivo, lo que significa que el gasto sólido en suspensión medio anual por área de drenaje en vez de disminuir va aumentando con la escorrentía media anual de la cuenca.

Utilizando el software GrassGis se determina la pendiente media de la cuenca aportante de cada una de las estaciones controladas por la D.G.A. Utilizando estos datos y el gasto sólido en suspensión medido en las estaciones, se comprueba que sí existe una relación entre el gasto sólido en suspensión y la pendiente media de la cuenca, dicho modelo es de tipo polinómico.

Posteriormente, se realiza un análisis dimensional que permitió involucrar las variables caudal líquido, gasto sólido en suspensión (volumétrico), pendiente media de la cuenca, área de la cuenca y densidad del cauce, con el fin de determinar si existe alguna relación entre ellas y reducir el número de variables.

El análisis dimensional señala que las variables que demuestran tener una relación son el caudal líquido, el gasto sólido en suspensión (volumétrico) y la pendiente media de la cuenca. Como resultado del análisis dimensional se obtiene que el cociente adimensional entre el gasto sólido en suspensión (volumétrico) y el caudal líquido es una función de la pendiente media de la cuenca.

En base a la relación encontrada se creó un nuevo modelo de tres variables que permite entender el arrastre de sólidos en suspensión ya no sólo como una función del caudal líquido, sino que lleva el problema a una combinación entre el cauce (dígase disponibilidad de sedimentos) y la pendiente de la cuenca en que se desarrolla el cauce mismo (es decir de la diferencia de altura y la distribución de la altura en la cuenca).

El modelo generado demuestra tener un ajuste aproximado a los datos medidos. La aplicación de este modelo es recomendada para:

- i) Cuencas que presenten una pendiente media 0.10 a 0.5.
- ii) Caudales líquidos medios anuales entre 0.2 a 550 (m³/s).
- iii) Cuencas ubicadas entre la Séptima región y la Decimosegunda región del país.

Referencias bibliográficas

1. Ray K. Linsey; Max A. Kohler; Joseph L.H. Paulus; “Hidrología para Ingenieros”, Segunda Edición, McGraw-Hill, 1977.
2. Mariela Vicencio P.; “Estimación de curvas de sólido en suspensión y comparación con expresiones empíricas de Fleming; Dendy y Bolton”, Valparaíso, Chile 2012.
3. H. Garcia; “Sedimentation Engineering Manuals and reports on engineering practice”, ASCE.2008
4. Neiemyer; H. Cereceda; Pilar; “Cuenca hidrográficas y embalses principales”. Adaptación desde Instituto Geográfico Militar (IGM) de Geografía de Chile. Hidrografía. 1984
5. José Ramírez L, “Producción de Sedimentos en Cuencas: Revisión de Criterios y Aplicabilidad a la Cuenca del Río Apulco”, México, 2009.
6. N.W.Hudon; “Medición sobre el terreno de la erosión del suelo y de la escorrentía”, FAO, 1997.
7. Brooks. K. N; Ffolliott. P. F; Gregersen. H. M; DeBano.L F; “Hydrology and the Management of Watersheds”, Iowa, 1997.
8. Vanoni, V.A. “Sedimentation Engineering. Manuals and reports on engineering practice”, No.54. ASCE.pp 1-15,1977.
9. Juan José Victoria, “Sedimentos Fluviales”, Guatemala, Septiembre de 1999.
10. López Cárdenas. F. “La ingeniería en los procesos de desertificación”. Grupo TRAGSA, Ediciones Mundi-Prensa. 2003.
11. Juan Martín. V; “Ingeniería de Ríos”, Universitat Politècnica de Catalunya”, España.
12. Uyttendale, P.G.Y. “Procesos de transporte de sedimentos en área de montaña, comparación entre la cuenca del río Cordón (Alpes, Italia) y del estero Tres Arroyos (Andes, Chile)”. Tesis Doctorado en Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile, programa de co-tutela con Università degli Studi di Padova (Italia).2006.
13. Bogardi, J; “Sediment transport in alluvial streams”, Akadémiai Kiadó, Budapest, (1978).
14. Simons, B.D. y Sentürk, F. “Sediment transport technology”, Water Resources Publications, Fort Collins, Colorado, (1977).
15. Emmet W.W. “Bedload transport in two large gravel-bed rivers, Idaho and Washington”, In: Proceeding of Third Federal Interagency Sedimentation Conference, Sedimentation Committee of the Water Resource Council, Denver, Colorado, 4 (1976), 100-113.
16. Jackson W.L y Beschta R.L. “A model of two-phase bedload transport in an Oregon Coast Range stream”. Earth Surface Processes and Landforms, 7 (1982) 517-527.

17. Andrews E.D. "Bed-material entrainment and hydraulic geometry of gravel-bed rivers in Colorado. Geological Society of America Bulletin, 95 (1984) 371-378).
18. Andrews E.D. y Nankervis J.M., "Effective discharge and the design of channel maintenance flows for gravel-bed rivers". In: Natural and anthropogenic influences in fluvial geomorphology (Costa J.E., Miller A.J., Potter K.W. y Wilcock P.R. eds), American Geophysical Union Monograph Series, 89 (1995) 151-164.
19. Walling, D. E. y Webb, B.W., "Suspended load in gravel-bed rivers: UK Experience", In: Sediment transport in Gravel-Bed Rivers (Thorne C.R., Bathurst J.C. y Hey R.D. eds), Wiley, Chichester, (1987) 545-579.
20. Bathurst J.C., Graf W. H. y Cao H.H., "Bed load discharge equations for steep mountain rivers", In: Sediment transport in Gravel-Bed Rivers (Thorne C.R., Bathurst J.C. y Hey R.D. eds), Wiley, Chichester, (1987) 453-491.
21. Billi P., D'Agostino V., Lenzi M.A. y Marchi L., "bedload, slope and channel processes in a high-altitude Alpine torrent", In: Gravel-Bed Rivers in the Environment (Klingeman P., Beschta R., komar P. y Bradley J. eds), Water resources Publications, LLC, (1998) 15-38.
22. Simón E. Munro. "El río y la forma. Introducción a la Geomorfología fluvial", Santiago, 2010.
23. G. Fleming, Design Curves for Suspended Load Estimation, Proc. Inst. Civ. Eng., vol 43, 1969.
24. F. E. Dendy and G. C. Bolton, Sediment yield-runoff-drainage area relationships in the United State. Journal of soil and water Conservation. Vol 31 (6), 1976.
25. Montgomery, D.R., and J.M. Buffington, "Channel processes, classification, and response, in River Ecology and Management, New York, 1998.
26. Benda and Dune, "Stochastic forcing of sediment supply to channel networks from landsliding and debris flow", Water Resources Research, 1997.
27. Blench. T; "Mobile-Bed Fluviology", University of Alberta, Edmonton, Canada, 1969.
28. Cade – Idepe, "Cuenca del río Aysén", Diagnostico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad, Dirección General de Aguas, 2004.
29. Serplac XI; Gobierno regional de Aysén; Sociedad Alemana para la Cooperación Técnica, "Atlas región de Aysén", Chile, 2005.
30. Ranald V. Giles; Jack B. Evett; Cheng Liu; "Mecánica de los Fluidos e Hidráulica", Tercera Edición, McGraw-Hill, 1994.