



**Universidad Autónoma Metropolitana
Unidad Iztapalapa
División de Ciencias Básicas e Ingeniería**

Posgrado en Ciencias (Energía y Medio Ambiente)

**“Inclusión de las presas de almacenamiento existentes en una cuenca en la
aplicación de un modelo lluvia-escorrentía”**

Tesis para obtener el grado de:

Maestra en Ciencias (Energía y Medio Ambiente)

Presenta:

Adriana Díaz Calderón

Matricula:

2233803642

Correo de contacto personal:

ing.adriana.dc@gmail.com

Director:

Dra. Claudia Rojas Serna

Jurado:

Presidente Dr. Antonio Zoilo Marquez García

Secretario Dr. Francisco Javier Aparicio Mijares

Vocal Dr. Oscar Arturo Fuentes Mariles

Iztapalapa, Ciudad de México, 04 de diciembre del 2025

ÍNDICE DE CONTENIDO

1	CAPÍTULO 1.- Introducción	10
2	CAPÍTULO 2.- Antecedentes	16
3	CAPÍTULO 3.- Planteamiento del trabajo.....	18
3.1	Planteamiento del problema.....	19
3.2	Justificación	20
3.3	Pregunta de Investigación.....	21
3.4	Objetivo general	21
3.4.1	Objetivos específicos	22
3.5	Hipótesis	22
3.6	Materiales y Métodos	22
4	CAPÍTULO 4.- Metodología	23
4.1	Definición de la cuenca de la zona de estudio	24
4.1.1	Subcuencas	24
4.1.2	Modelos Digitales de Elevación (DEM)	26
4.1.3	Pendiente.....	27
4.2	Base de datos	27
4.2.1	Climatología.....	27
4.2.2	Hidrometría.....	28
4.2.2.1	Serie de lluvia / gasto	29
4.2.3	Sistema de Presas	29
4.3	Modelo Hidrológico	30
4.3.1	Clasificación de modelos	30
4.3.2	Modelo GR4J	30
4.3.2.1	Estructura y parámetros del Modelo GR4J.....	32
4.3.2.2	¿Cómo se incluyen las presas de almacenamiento en la estructura del modelo?	35
4.3.3	Radiación Extraterrestre	36
4.3.4	Evapotranspiración Potencial- ETP.....	37
4.4	Calibración y Validación	37
4.4.1	Simulación 1: lluvia-gasto registros totales.....	37
4.4.2	Simulación 2: lluvias totales	39
4.4.3	Simulación 3: Cuenca Balsas 1980-1982.....	39

4.4.4	Modelación Hidráulica.....	40
4.4.4.1	RiverGIS	40
4.4.4.2	HEC-RAS	42
4.4.4.3	Condiciones iniciales de elevación en los embalses para el modelo hidráulico	44
5	CAPITULO 5.- Resultados	45
5.1	Áreas de subcuencas, longitudes y pendientes de cauces principales	46
5.2	Perfiles del terreno del cauce principal y por subcuencas	47
5.3	Comparativas de características físicas de las subcuencas, variables climáticas y parámetros del modelo	55
5.4	Climatología	61
5.5	Hidrometeorología	61
5.6	Simulación 1: Modelo GR4J lluvia-gasto registros totales	62
5.7	Simulación 2: Modelo GR4J, lluvias totales.....	75
5.8	Simulación 3: Cuenca Balsas 1980 - 1982	87
5.9	Modelación Hidráulica	122
5.9.1	Secciones transversales por subcuencas.....	124
5.9.2	Perfiles de las Presas en la Modelación Hidráulica	129
6	CAPÍTULO 6.- Conclusiones y Recomendaciones	134
7	Bibliografía.....	136

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Figura ilustrativa de una cuenca con y sin presa (elaboración propia)	12
Figura 2.- Región Hidrológico-Administrativa IV Balsas (elaboración propia)	14
Figura 3. Mapa conceptual del planteamiento del problema (elaboración propia)	19
Figura 4. Plan de Modelo GR4J con inclusión de presas, X1=capacidad máxima de almacenamiento de agua de lluvia en el suelo (mm), X2= intercambio de agua superficial y subterránea (mm), X3= capacidad máxima del río (mm), X4= $\frac{1}{2}$ de tiempo base de hidrograma unitario (días), ETP= evapotranspiración potencial (mm/día), P= precipitación diaria (mm/día), Q= gasto diario (mm/día) (elaboración propia)	21
Figura 5. Zona de estudio, curvas de nivel, cauce principal y sistema de presas (elaboración propia).....	24
Figura 6. 26 Subcuenas obtenidas por escurrimiento al cauce principal, las letras y números incluidos se emplean como referencia visual para identificar y ubicar las subcuenas analizadas (elaboración propia)	25
Figura 7. Cauces principales de cada subcuenca (elaboración propia).....	26
Figura 8. 7 Subcuenas a partir de las hidrométricas con sus cauces principales que desembocan al río Balsas, las cruces indican la ubicación de las estaciones hidrométricas (elaboración propia)	28
Figura 9. Estructura del modelo lluvia-escurrimiento GR4J. Perrin (2000)	31
Figura 10.- Modelo RiverGIS , con la interpretación de las 11 subcuenas climatológicas que se ocuparon para la modelación hidráulica de la Cuenca Balsas (elaboración propia)	41
Figura 11.- Tabla de secciones con hidrogramas en HEC-RAS (elaboración propia)	42
Figura 12.- Condiciones iniciales HEC-RAS (elaboración propia)	43
Figura 13.- Perfil del terreno, Cauce de la Subcuenca RP (elaboración propia).....	47
Figura 14.- Perfil del terreno, Cauce de la Subcuenca A (elaboración propia)	47
Figura 15.- Perfil del terreno, Cauce de la Subcuenca Ba1(elaboración propia)	48
Figura 16.- Perfil del terreno, Cauce de la Subcuenca AfAg (elaboración propia)	48
Figura 17.- Perfil del terreno, Cauce de la Subcuenca H (elaboración propia)	48
Figura 18.- Perfil del terreno, Cauce de la Subcuenca Ba3 (elaboración propia)	49
Figura19.- Perfil del terreno, Cauce de la Subcuenca Ae (elaboración propia)	49
Figura 20.- Perfil del terreno, Cauce de la Subcuenca Ba2 (elaboración propia)	49
Figura 21.- Perfil del terreno, Cauce de la Subcuenca Ba4 (elaboración propia)	50
Figura 22.- Perfil del terreno, Cauce de la Subcuenca Bb1 (elaboración propia)	50
Figura 23.- Perfil del terreno, Cauce de la Subcuenca Bb3 (elaboración propia)	50
Figura 24.- Perfil del terreno, Cauce de la Subcuenca Bb2 (elaboración propia)	51
Figura 25.- Perfil del terreno, Cauce de la Subcuenca Bb4 (elaboración propia)	51
Figura 26.- Perfil del terreno, Cauce de la Subcuenca Bc (elaboración propia).....	51
Figura 27.- Perfil del terreno, Cauce de la Subcuenca Bg (elaboración propia)	52

Figura 28.- Perfil del terreno, Cauce de la Subcuenca CaCg (elaboración propia).....	52
Figura 29.- Perfil del terreno, Cauce de la Subcuenca CcCb (elaboración propia).....	52
Figura 30.- Perfil del terreno, Cauce de la Subcuenca Cd (elaboración propia)	53
Figura 31.- Perfil del terreno, Cauce de la Subcuenca Ce (elaboración propia)	53
Figura 32.- Perfil del terreno, Cauce de la Subcuenca Cf (elaboración propia)	53
Figura 33.- Perfil del terreno, Cauce de la Subcuenca Ch (elaboración propia)	54
Figura 34.- Perfil del terreno, Cauce de la Subcuenca E (elaboración propia)	54
Figura 35.- Perfil del terreno, Cauce de la Subcuenca F (elaboración propia)	54
Figura 36.- Perfil del terreno, Cauce de la Subcuenca G (elaboración propia).....	55
Figura 37.- Gráfico pendiente de las 6 subcuencas vs longitud de las 6 subcuencas (elaboración propia).....	55
Figura 38.- Gráfico área de las 6 subcuencas vs promedio de la precipitación (elaboración propia)	56
Figura 39.- Gráfico área de las 6 subcuencas vs el promedio de la evapotranspiración (elaboración propia).....	56
Figura 40.- Gráfico área de las 6 subcuencas vs el promedio del caudal observado (elaboración propia).....	57
Figura 41.- Gráfico área de las 5 subcuencas vs el promedio del caudal observado sin la cuenca Cd (elaboración propia)	57
Figura 42.- Gráfico área de las 6 subcuencas vs evapotranspiración sobre el caudal observado (elaboración propia)	58
Figura 43.- Gráfico parámetros X3 vs X4 de las 6 subcuencas (elaboración propia)	59
Figura 44.- Gráfico área de las 6 subcuencas vs parámetro X1 (elaboración propia).....	59
Figura 45.- Gráfico área de las 6 subcuencas vs parámetro X2 (elaboración propia).....	60
Figura 46.- Gráfico área de las 6 subcuencas vs parámetros X3 (elaboración propia).....	60
Figura 47.- Gráfico área de las 6 subcuencas vs parámetro X4 (elaboración propia).....	60
Figura 48.- Tasa de almacenamiento en el suelo y en el río, Subcuenca hidrométrica Z (elaboración propia).....	62
Figura 49.- Hidrograma Subcuenca Z (elaboración propia).....	63
Figura 50.- Gasto registrado vs Gasto simulado, Subcuenca Z. La línea roja de 45° es para indicar la relación 1:1 (elaboración propia).....	64
Figura 51.- Tasa de almacenamiento en el suelo y en el río, Subcuenca hidrométrica F (elaboración propia).....	65
Figura 52.- Hidrograma Subcuenca F (elaboración propia).....	66
Figura 53.- Gasto registrado vs Gasto simulado, Subcuenca F. La línea roja de 45° es para indicar la relación 1:1 (elaboración propia).....	66
Figura 54.- Tasa de almacenamiento en el suelo y en el río, Subcuenca hidrométrica L (elaboración propia).....	67
Figura 55.- Hidrograma Subcuenca L (elaboración propia).....	68

Figura 56.- Gasto registrado vs Gasto simulado, Subcuenca L. La línea roja de 45° es para indicar la relación 1:1 (elaboración propia).....	68
Figura 57.- Tasa de almacenamiento en el suelo y en el río, Subcuenca hidrométrica J (elaboración propia).....	69
Figura 58.- Hidrograma Subcuenca J (elaboración propia)	70
Figura 59.- Gasto registrado vs Gasto simulado, Subcuenca J. La línea roja de 45° es para indicar la relación 1:1 (elaboración propia).....	70
Figura 60.- Tasa de almacenamiento en el suelo y en el río, Subcuenca hidrométrica H (elaboración propia).....	71
Figura 61.- Hidrograma Subcuenca H (elaboración propia)	72
Figura 62.- Gasto registrado vs Gasto simulado, Subcuenca H. La línea roja de 45° es para indicar la relación 1:1 (elaboración propia).....	72
Figura 63.- Tasa de almacenamiento en el suelo y en el río, Subcuenca hidrométrica Cd (elaboración propia).....	73
Figura 64.- Hidrograma Subcuenca Cd (elaboración propia)	74
Figura 65.- Gasto registrado vs Gasto simulado, Subcuenca Cd. La línea roja de 45° es para indicar la relación 1:1 (elaboración propia).....	74
Figura 66.- Tasa de almacenamiento en el suelo y en el río, Subcuenca hidrométrica Z (elaboración propia).....	75
Figura 67.- Hidrograma Subcuenca Z (elaboración propia).....	76
Figura 68.- Tasa de almacenamiento en el suelo y en el río, Subcuenca hidrométrica F (elaboración propia).....	77
Figura 69.- Hidrograma Subcuenca F (elaboración propia).....	78
Figura 70.- Tasa de almacenamiento en el suelo y en el río, Subcuenca hidrométrica L (elaboración propia).....	79
Figura 71.- Hidrograma Subcuenca L (elaboración propia).....	80
Figura 72.- Tasa de almacenamiento en el suelo y en el río, Subcuenca hidrométrica J (elaboración propia).....	81
Figura 73.- Hidrograma Subcuenca J (elaboración propia)	82
Figura 74.- Tasa de almacenamiento en el suelo y en el río, Subcuenca hidrométrica H (elaboración propia).....	83
Figura 75.- Hidrograma Subcuenca H (elaboración propia)	84
Figura 76.- Tasa de almacenamiento en el suelo y en el río, Subcuenca hidrométrica Cd (elaboración propia).....	85
Figura 77.- Hidrograma Subcuenca Cd (elaboración propia)	86
Figura 78.- Tasa de almacenamiento en el suelo y en el río, Subcuenca Z, Cuenca Balsas 1980-1982 (elaboración propia)	87
Figura 79.- Hidrograma Subcuenca Z, Cuenca Balsas 1980-1982 (elaboración propia) ..	88
Figura 80.- Gasto registrado vs Gasto simulado, Subcuenca Z. La línea roja de 45° es para indicar la relación 1:1 (elaboración propia).....	88

Figura 81.- Tasa de almacenamiento en el suelo y en el río, Subcuenca F, Cuenca Balsas 1980-1982 (elaboración propia)	89
Figura 82.- Hidrograma Subcuenca F, Cuenca Balsas 1980-1982 (elaboración propia) ..	90
Figura 83.- Gasto registrado vs Gasto simulado, Subcuenca F. La línea roja de 45° es para indicar la relación 1:1 (elaboración propia).....	90
Figura 84.- Tasa de almacenamiento en el suelo y en el río, Subcuenca L, Cuenca Balsas 1980-1982 (elaboración propia)	91
Figura 85.- Hidrograma Subcuenca L, Cuenca Balsas 1980-1982 (elaboración propia) ..	92
Figura 86.- Gasto registrado vs Gasto simulado, Subcuenca L. La línea roja de 45° es para indicar la relación 1:1 (elaboración propia).....	92
Figura 87.- Tasa de almacenamiento en el suelo y en el río, Subcuenca J, Cuenca Balsas 1980-1982 (elaboración propia)	93
Figura 88.- Hidrograma Subcuenca J, Cuenca Balsas 1980-1982 (elaboración propia)...	94
Figura 89.- Gasto registrado vs Gasto simulado, Subcuenca J. La línea roja de 45° es para indicar la relación 1:1 (elaboración propia).....	94
Figura 90.- Tasa de almacenamiento en el suelo y en el río, Subcuenca H, Cuenca Balsas 1980-1982 (elaboración propia)	95
Figura 91.- Hidrograma Subcuenca H, Cuenca Balsas 1980-1982 (elaboración propia) ..	96
Figura 92.- Tasa de almacenamiento en el suelo y en el río, Subcuenca Cd, Cuenca Balsas 1980-1982 (elaboración propia)	97
Figura 93.- Hidrograma Subcuenca Cd, Cuenca Balsas 1980-1982 (elaboración propia)	98
Figura 94.- Tasa de almacenamiento en el suelo y en el río, Subcuenca Ba4, Cuenca Balsas 1980-1982 (elaboración propia)	99
Figura 95.- Hidrograma Subcuenca Ba4, Cuenca Balsas 1980-1982 (elaboración propia)	100
Figura 96.- Tasa de almacenamiento en el suelo y en el río, Subcuenca Bb1, Cuenca Balsas 1980-1982 (elaboración propia)	101
Figura 97.- Hidrograma Subcuenca Bb1, Cuenca Balsas 1980-1982 (elaboración propia)	102
Figura 98.- Tasa de almacenamiento en el suelo y en el río, Subcuenca Bb2b3b4Bc, Cuenca Balsas 1980-1982 (elaboración propia)	103
Figura 99.- Hidrograma Subcuenca Bb2b3b4Bc, Cuenca Balsas 1980-1982 (elaboración propia)	104
Figura 100.- Tasa de almacenamiento en el suelo y en el río, Subcuenca Bg, Cuenca Balsas 1980-1982 (elaboración propia)	105
Figura 101.- Hidrograma Subcuenca Bg, Cuenca Balsas 1980-1982 (elaboración propia)	106
Figura 102.- Tasa de almacenamiento en el suelo y en el río, Subcuenca CaCg, Cuenca Balsas 1980-1982 (elaboración propia)	107
Figura 103.- Hidrograma Subcuenca CaCg, Cuenca Balsas 1980-1982 (elaboración propia)	108

Figura 104.- Tasa de almacenamiento en el suelo y en el río, Subcuenca CbCc, Cuenca Balsas 1980-1982 (elaboración propia)	109
Figura 105.- Hidrograma Subcuenca CbCc, Cuenca Balsas 1980-1982 (elaboración propia)	110
Figura 106.- Tasa de almacenamiento en el suelo y en el río, Subcuenca CeCf, Cuenca Balsas 1980-1982 (elaboración propia)	111
Figura 107.- Hidrograma Subcuenca CeCf, Cuenca Balsas 1980-1982 (elaboración propia)	112
Figura 108.- Tasa de almacenamiento en el suelo y en el río, Subcuenca Ch, Cuenca Balsas 1980-1982 (elaboración propia)	113
Figura 109.- Hidrograma Subcuenca Ch, Cuenca Balsas 1980-1982 (elaboración propia)	114
Figura 110.- Tasa de almacenamiento en el suelo y en el río, Subcuenca D, Cuenca Balsas 1980-1982 (elaboración propia)	115
Figura 111.- Hidrograma Subcuenca D, Cuenca Balsas 1980-1982 (elaboración propia)	116
Figura 112.- Tasa de almacenamiento en el suelo y en el río, Subcuenca G, Cuenca Balsas 1980-1982 (elaboración propia)	117
Figura 113.- Hidrograma Subcuenca G, Cuenca Balsas 1980-1982 (elaboración propia)	118
Figura 114.- Geometría Cuenca Balsas 2D HEC-RAS (elaboración propia)	122
Figura 115.- Perfil del río Balsas (elaboración propia).....	123
Figura 116.- Subcuenca Z, Sección 507493.6 (elaboración propia)	124
Figura 117.- Subcuenca Ba4, Sección 494302.7 (elaboración propia).....	125
Figura 118.- Subcuenca Bb1, Sección 470310 (elaboración propia).....	125
Figura 119.- Subcuenca Ch, Sección 355907.6 (elaboración propia).....	126
Figura 120.- Subcuenca CaCg, Sección 337833.2 (elaboración propia)	126
Figura 121.- Subcuenca CeCf, Sección 304915.1 (elaboración propia)	127
Figura 122.- Subcuenca G, Sección 282152.6 (elaboración propia)	127
Figura 123.- Subcuenca CbCc, Sección 254837.8 (elaboración propia)	128
Figura 124.- Subcuenca Cd, Sección 231680 (elaboración propia).....	128
Figura 125.- Subcuenca H, Sección 213691.6 (elaboración propia).....	129
Figura 126.- Presa Ingeniero Carlos Ramírez Ulloa "El Caracol" (elaboración propia)...	130
Figura 127.- Presa Adolfo López Mateos "Infiernillo" (elaboración propia)	131
Figura 128.- Presa José María Morelos "La Villita" (elaboración propia)	132

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características físicas de las subcuencas (S es la pendiente, L es la longitud) y X1, X2, X3 y X4 son los parámetros obtenidos con el modelo en la simulación 1(elaboración propia).....	38
Tabla 2.- Secciones por subcuenca en geometría en HEC-RAS (elaboración propia)	43
Tabla 3. Áreas, longitudes y pendiente del cauce principal para cada subcuenca (elaboración propia).....	46
Tabla 4. Número de estaciones climatológicas analizadas por cada subcuenca hidrométrica (elaboración propia).....	61
Tabla 5. Número de estaciones climatológicas analizadas con coincidencia de lluvia/caudal, y clave de la estación hidrométrica correspondiente a cada subcuenca (elaboración propia).....	61
Tabla 6.- Rangos S/X1, R/X3 para las 6 subcuencas, Simulación 1	120
Tabla 7.- Rangos S/X1, R/X3 para las 6 subcuencas, Simulación 2	120
Tabla 8.- Rangos S/X1, R/X3 para las 6 subcuencas, Simulación 3	121

Resumen

En la presente investigación se desarrolló una metodología que considero, en la aplicación de un modelo lluvia-escorrentía, el impacto de los almacenamientos artificiales de agua sobre el comportamiento y régimen hidrológico de los ríos para estimar los caudales de salida en la cuenca.

El desarrollo de la investigación de este trabajo se dividió en tres etapas.

La primera etapa consistió en la realización de la cartografía. Se delimitó la región Hidrológico-Administrativa IV Balsas como la zona de estudio. Se determinaron las características físicas y climáticas de la región, tales como el tipo de suelo, tipo de acuífero, cauce principal y su pendiente, subcuencas, precipitación y temperatura, entre otras. El sistema de presas que se usaron son Adolfo López Mateos “Infiernillo”, José María Morelos “La Villita” e Ingeniero Carlos Ramírez Ulloa “El Caracol”. Se realizaron los modelos digitales de elevación de la región de estudio.

La segunda etapa consistió en obtener, calcular y analizar la base de datos de hidrometría y climatología que sirvieron de base para definir las series de tiempo de entrada al modelo hidrológico GR4J y para calcular con la ecuación de Oudin las series de evapotranspiración. La tercera etapa consistió en la modelación hidrológica programada en Microsoft Excel. Se realizaron tres simulaciones con el modelo GR4J, la primera simulación se realizó para cada subcuenca considerando como base el mismo periodo de registro de las variables de lluvia, gasto y evapotranspiración, lo que permitió calibrar el modelo para cada subcuenca y así obtener los parámetros del modelo. En la segunda simulación se ocuparon estos parámetros para estimar los gastos para los periodos en que no se tenían registros hidrométricos, y usando todo el periodo histórico de las series de tiempo de lluvias registradas de cada subcuenca. Por último, en la tercera simulación se estimaron los gastos para un periodo de dos años de toda la región y para cada una de las subcuencas. Este procedimiento permitió realizar la tercera simulación diaria del funcionamiento hidrológico e hidráulico para el mismo periodo de tiempo de dos años en toda la región del Balsas. La modelación hidráulica se realizó con la herramienta HEC-RAS, incluyendo para todas las subcuencas los hidrogramas diarios de dos años obtenidos y además incluyendo las presas del sistema en cascada existente en la región.

1 CAPÍTULO 1.-

Introducción

Los modelos hidrológicos globales consideran la relación lluvia-escorrentía en las cuencas naturales no obstante, al momento de construir una presa en dicha cuenca este proceso se ve afectado, haciendo que el modelo hidrológico disminuya su precisión. Se ha comparado un modelo sin presas *versus* uno con presas, encontrando diferencias importantes en gastos base y gastos pico, y se ha demostrado cómo los embalses pueden cambiar la dinámica de los flujos estacionales (menos pico durante lluvias, más descarga del embalse en estiaje) y cómo esto difiere de un modelo sin considerar presas. (Dang, T. D. et al, 2020). Mendieta *et al.* (2024) analizaron cómo diferentes modelos hidrológicos conceptuales afectan la predicción de caudales para la planificación de operación hidroeléctrica resaltando que la elección del modelo lluvia-escorrentía es crítica cuando se diseña o gestiona la operación de una presa hidroeléctrica. Telteu, C.-E. *et al.* (Telteu, C.-E. *et al.*, 2021) sugieren que la representación del almacenamiento de agua en presas en modelos hidrológicos a gran escala está brevemente incluida en la operación de presas (llenado, vertido, evaporación, recarga, etc.). Sin embargo, mucho de lo que se asume comúnmente en los modelos a gran escala, como parámetros estáticos para presas, subestiman la complejidad real de la operación de los embalses (Steyaert, JC et al., 2022).

Las evaluaciones de la seguridad hídrica y energética a lo largo del tiempo, tanto en el pasado como en el futuro, requieren modelos hidrológicos capaces de simular con precisión la operación de los embalses. Sin embargo, la escasez de datos operativos limita la precisión de las representaciones actuales para simular su comportamiento. Además, la fiabilidad de estas representaciones ante variaciones en el caudal de entrada sigue siendo incierta, lo que pone en entredicho su aplicación a largo plazo (Dong, N. *et al.*, 2023). Dado lo anterior, y sabiendo que los modelos lluvia-escorrentía permiten estimar el volumen de agua que escurre en un río a partir de la lluvia en la cuenca, se puede decir que, actualmente, a nivel mundial, los modelos lluvia-escorrentía están diseñados para estimar el escorrentía bajo condiciones naturales de la cuenca, esto es, sin intervención humana. Por lo que, en cuencas donde existen presas de almacenamiento para cualquier uso, no se recomienda usar indiscriminadamente los modelos disponibles en la literatura ya que su régimen hidrológico natural se altera por las actividades humanas. El planteamiento de cómo incorporar datos observados para mejorar los algoritmos de operación de presas en modelos globales o continentales continúa teniendo los desafíos de que muchos modelos actuales usan reglas simplificadas que no reflejan la operación histórica real de muchos embalses (Hosseini-Moghari, S.-M. and Döll, P., 2025).

Al construir una presa sobre el cauce del río se presentan modificaciones importantes como es la evaporación adicional que se tendrá al retener el agua, la infiltración adicional al estar ésta en estado de reposo, la retención artificial y las modificaciones de las transferencias de agua (Fig.1), sin olvidar la utilidad que se le dé a dicha presa, por ejemplo, abastecimiento de agua potable, irrigación, generación hidroeléctrica, entre otras.

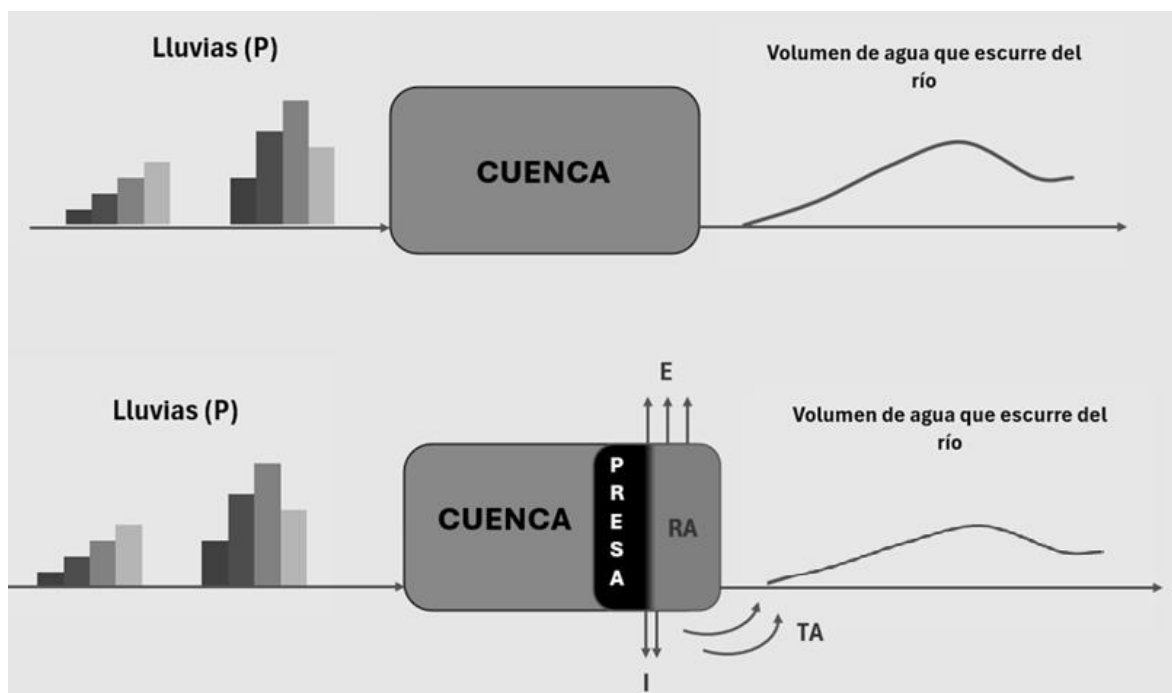


Figura 1. Figura ilustrativa de una cuenca con y sin presa (elaboración propia)

Para abordar la problemática mencionada, en esta tesis se usará el modelo GR4J, que es un modelo de lluvia-escorrimento desarrollado en Irstea-Antony, Francia (Edijatno *et al.*, 1999; Perrin, 2000). El modelo tiene cuatro parámetros en su estructura. Para la simulación de los escurrimientos superficiales diarios en una cuenca, se calibrará de acuerdo con sus características físicas y climáticas (Perrin, 2000).

El propósito de este trabajo es calibrar el modelo GR4J incluyendo en las simulaciones la existencia de las presas en la región. Para esto, el objetivo inicial de este trabajo era incluir un parámetro en la estructura del modelo para representar la operación del sistema de presas de la cuenca del Balsas. Sin embargo, fue imposible obtener la información oficial de las curvas elevación-área-volumen a través de la Comisión Federal de Electricidad y Comisión Nacional del Agua. Por lo que, se optó por cambiar la idea de incluir un nuevo parámetro por la información hidrométrica aguas abajo de las presas, y considerar así, que los registros de estos caudales incluyen la operación de las presas.

Para ello, se determina el error entre los caudales medidos y los calculados con el modelo, y se valida un protocolo que permita observar la afectación que tienen las actividades antropogénicas como lo son las infraestructuras hidráulicas en el escurrimiento de una cuenca.

Se obtienen los parámetros óptimos para que el modelo funcione con mayor eficiencia.

En el presente trabajo se usa la región hidrológica 18 Balsas que coincide con la cuenca hidrográfica del río Balsas en México.

La Región Hidrológica 18 Balsas comprende partes de los estados de Morelos, Tlaxcala, Puebla, Estado de México, Oaxaca, Guerrero, Michoacán, Jalisco, CDMX y Veracruz.

La Región Hidrológica 18 Balsas concuerda con la delimitación de la Región Hidrológico-Administrativa IV Balsas (Fig. 2), se localiza al suroeste del país, se limita al norte por la Región Hidrológica 19 Costa Grande de Guerrero y la Región Hidrológica 20 Costa Chica de Guerrero y al este por la Región Hidrológica 28 Papaloapan (CONAGUA, 2010).

La Región Hidrológica 18 Balsas cuenta con una superficie hidrológica de 117,405 km². Para su estudio de hidrología superficial la región está subdividida en 15 cuencas hidrológicas. Cuenta con 41 acuíferos que tienen una recarga media de volumen de 4.543 hm³/año.

El uso de suelo para la región se compone de un 27.5 % para bosque, un 26.3 % para uso agrícola, 23.1 % para selva, y el restante está dado por zonas urbanas, así como matorral y pastizal, entre otros tipos de vegetación.

El abasto de agua en la Región Hidrológica 18 Balsas es proveniente en su mayoría de agua superficial representando un 96.1 % y el resto es cubierto por el agua extraída de acuíferos representando un 3.9 %. Ambos suman un consumo total de 47,332.7 millones de m³ por año. El principal uso de agua es para la generación de energía eléctrica ocupando un total de 36,831.46 millones de m³ por año, seguido por el uso agrícola (CONAGUA, 2010).

En la región hidrológica número 18 Balsas existe un sistema en cascada de tres presas principales para la región y para el país, que son grandes generadoras de energía eléctrica.

El uso principal de agua superficial en la Región Hidrológica 18 Balsas es la generación de energía eléctrica con un total de 38,141.2 millones de m³ por año, la región cuenta con 12 plantas hidroeléctricas operando actualmente. El 75% de la generación de energía eléctrica se efectúa en las presas Adolfo López Mateos "Infiernillo", José María Morelos "La Villita" y Carlos Ramírez Ulloa "El Caracol" con un uso no consuntivo (CONAGUA, 2010).

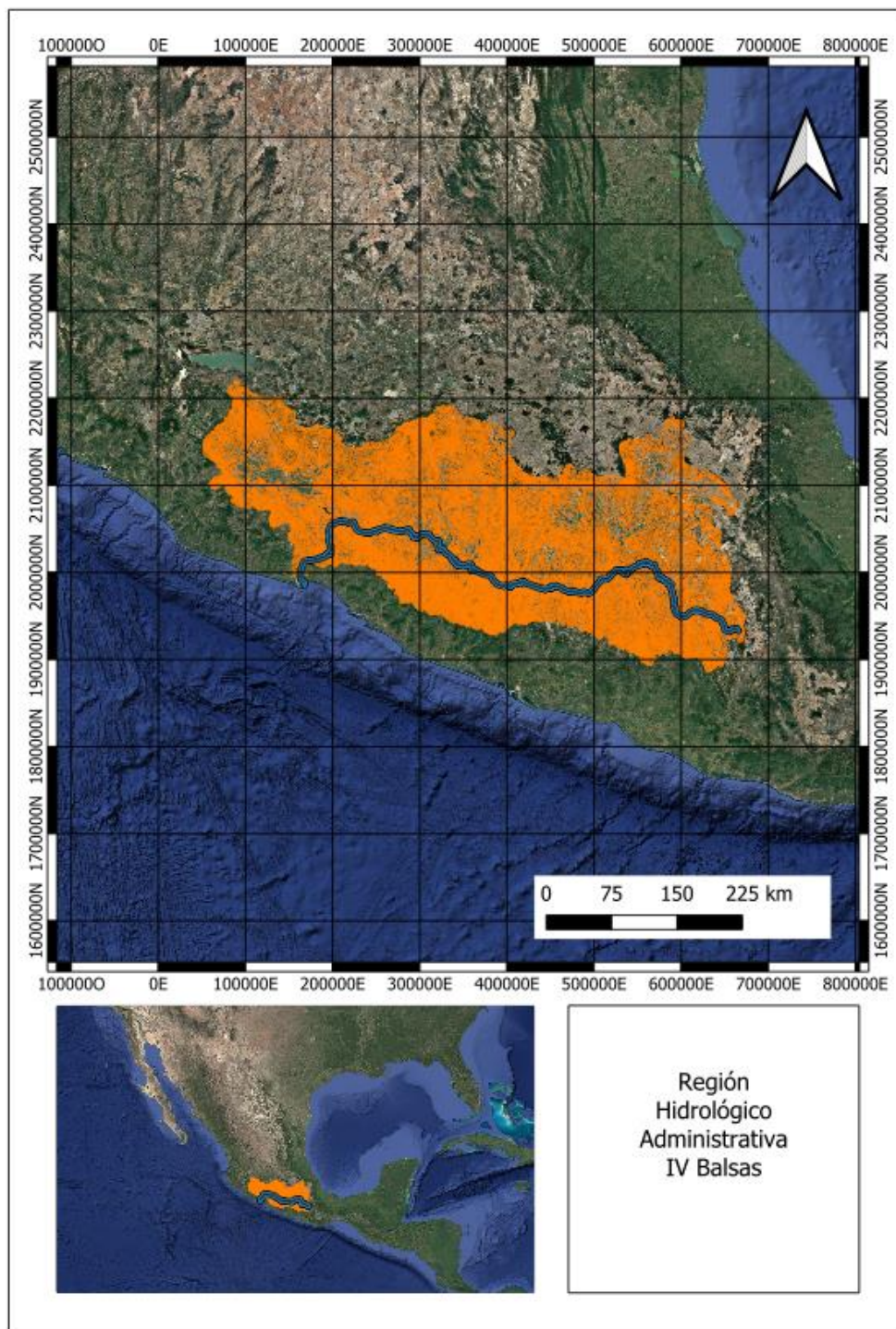


Figura 2.- Región Hidrológico-Administrativa IV Balsas (elaboración propia)

La investigación está dividida en seis capítulos más su respectiva bibliografía. En el Capítulo uno se encuentra la introducción que ayuda a entender lo que se llevó a cabo en el presente trabajo, y dar una primera idea de la investigación.

En el Capítulo dos se encuentran algunos de los antecedentes utilizados previos a este trabajo, y un poco de la historia de los modelos hidrológicos.

El Capítulo tres está enfocado al planteamiento del problema que se aborda y la importancia de éste en el medio ambiente. Encontrará un mapa conceptual que nos ayudará a comprender un poco mejor el por qué utilizar un modelo global y la importancia de considerar las presas en las simulaciones. La razón de este trabajo tiene bases sólidas que serán vistas en este capítulo, aunque ya se tuvo un pequeño avance en el capítulo anterior, también encontrará la pregunta de investigación, los objetivos tanto generales como específicos, la hipótesis y los materiales ocupados.

Para el Capítulo cuatro está la metodología en donde se localiza: la región de estudio, los mapas de localización, las subcuencas obtenidas por escurrimiento al cauce principal, la explicación de los modelos digitales de elevación creados, la pendiente y el procedimiento utilizado para cada subcuenca, las bases de datos de climatología e hidrometría que se ocuparon, las siete subcuencas que se identificaron a partir de las estaciones hidrométricas, el sistema de presas que se utilizó para la investigación, la clasificación de modelos hidrológicos, una breve pero precisa explicación sobre el Modelo GR4J, al igual que su estructura y sus parámetros, el método que se usó para estimar la radiación extraterrestre al igual que el método para la evapotranspiración potencial, la descripción de las tres simulaciones que se llevaron a cabo con el Modelo GR4J y por último pero no menos importante la modelación hidráulica de toda la región analizada.

En el Capítulo cinco se describen los resultados del modelo GR4J y de la modelación hidráulica.

Por último, en el Capítulo seis se presentan las conclusiones y las recomendaciones de la investigación.

2 CAPÍTULO 2.-

Antecedentes

Los modelos hidrológicos son parte de los modelos ambientales más importantes a nivel mundial. Estos son utilizados frecuentemente para la predicción de caudales fluviales (e.g. Arsenault *et al.*, 2016a; Day, 1985; Nash and Sutcliffe, 1970; Wood *et al.*, 2002), para estudios sobre el impacto del cambio climático (Bergström *et al.*, 2001; Chen *et al.*, 2011a; Chen *et al.*, 2011b; Jiang *et al.*, 2007; Middelkoop *et al.*, 2001; Minville *et al.*, 2008) y para conocer mejor los procesos a diferentes escalas en cuencas que abarcan una gran diversidad de tamaños, desde pequeñas parcelas urbanas hasta escalas continentales (Band *et al.*, 1993; Fatichi *et al.*, 2016; Gupta *et al.*, 2014; Singh and Woolhiser, 2002).

Varios estudios comparativos (Michaud y Sorooshian, 1994; Refsgaard y Knudsen, 1996) muestran que, en términos de restitución de caudales, los modelos conceptuales globales consiguen ofrecer eficiencias análogas a las de los modelos más realistas físicamente y distribuidos espacialmente, y ello con una complejidad inferior (Moulin *et al.*, 2005). Desde un punto de vista operativo, los modelos globales tienen la ventaja adicional de ser más robustos y de poder ser fácilmente utilizables después de un ajuste en un número reducido de datos de series de lluvias y caudales. (Perrin *et al.*, 2003).

Hoy en día, la mayoría de los modelos son el resultado de un proceso de desarrollo continuo: por ejemplo, Sugawara (1995) explica cómo el modelo de Tanque se desarrolló progresivamente, tras el fin de la Segunda Guerra Mundial, desde un único depósito construido como un ordenador analógico hasta la versión actual, con su estructura más compleja compuesta por una serie de depósitos lineales (Perrin *et al.*, 2003).

También se introdujeron varias modificaciones sucesivas en la estructura de otros modelos, como IHACRES (Ye *et al.*, 1997), HBV (Lindström *et al.*, 1997), SMAR (Tan y O'Connor, 1996), TOPMODEL (Beven, 1986) y Xinanjiang (Jayawardena y Zhou, 2000). En la mayoría de los casos, las modificaciones propuestas buscaban mejorar los subprocesos del modelo, pero las mejoras en el rendimiento del modelo no siempre fueron tan significativas como se esperaba (Perrin *et al.*, 2003).

En un estudio realizado por Perrin (Perrin *et al.* 2001) evaluaron 19 modelos diarios de precipitación-escorrentía existentes y sus resultados sugirieron que (1) la definición de la estructura del modelo juega un papel clave en su confiabilidad, (2) una complejidad de tres a cinco parámetros en el modelo es suficiente para obtener rendimientos satisfactorios en un paso de tiempo diario, (3) los ejercicios comparativos pueden abrir caminos para mejorar los modelos comenzando con estructuras muy simples y haciéndolos progresivamente más complejos. La siguiente etapa en su investigación fue tratar de mejorar la eficiencia del modelado del caudal. Un buen candidato para tal proceso de mejora fue el modelo GR3J de tres parámetros propuesto por Edijatno *et al.* (1999). Fue el modelo más simple probado por Perrin (Perrin *et al.* 2001) y demostró ser una buena base en términos de eficiencia (Perrin *et al.*, 2003).

GR4J es un modelo diario de lluvia-escorrentía de cuatro parámetros concentrados. Pertenece a la familia de modelos de contabilidad de la humedad del suelo. El modelo GR4J es la última versión modificada del modelo GR3J, propuesto originalmente por Edijatno y Michel (1989) y posteriormente mejorado por Nascimento (1995) y Edijatno (Edijatno *et al.* 1999) (Perrin *et al.*, 2003).

3 CAPÍTULO 3.-

Planteamiento del trabajo

3.1 Planteamiento del problema

La dificultad de tener en cuenta una presa en un modelo lluvia-escorrentía global está en gran parte relacionada con su representación en la estructura del modelo, ya que la cuenca se ve como una entidad individual, y es difícil incorporar un proceso que está fuera del ciclo hidrológico natural. A diferencia de un modelo distribuido donde la introducción de una presa equivale a parametrizar de forma diferente ciertas mallas del modelo, aquí no se sabe en qué componentes del modelo inicial hay que actuar para reproducir lo mejor posible el comportamiento hidrológico de la cuenca afectada. Así, surge la cuestión de cómo introducir matemáticamente la presencia de una presa en el modelo que representa globalmente a la cuenca. El método más sencillo es partir de la estructura del modelo y tratar de introducir un módulo o una herramienta matemática que permita dar cuenta del efecto de las presas de almacenamiento (Moulin *et al.* 2005).

En la Introducción se hizo el planteamiento de cómo incorporar datos observados para mejorar los algoritmos de operación de presas en modelos globales continúa teniendo los desafíos de que muchos modelos actuales usan reglas simplificadas que no reflejan la operación histórica real de muchos embalses (Hosseini-Moghari, S.-M. and Döll, P., 2025). Por lo que, al modelar los eventos lluvia-escorrentía sigue siendo un desafío considerar los grandes almacenamientos que existen en dichos cauces, causando una baja fiabilidad del modelo utilizado.

Para tener en cuenta la presencia de los almacenamientos de las presas en un modelo hidrológico, éste debe ser del tipo distribuido y se deben fijar las mallas correspondientes a la ubicación de la presa para poder plasmar los cambios en el comportamiento hidrológico a la salida de la cuenca; no obstante, esta parametrización no se pudo realizar en este trabajo, ya que, como se mencionó en el Capítulo uno, no se dispone de las curvas elevación-área-volumen de las presas, y por esta razón se utilizará la información de las estaciones hidrométricas aguas abajo de las presas cuya ubicación coincide con la salidas de la presa en el modelo global GR4J.

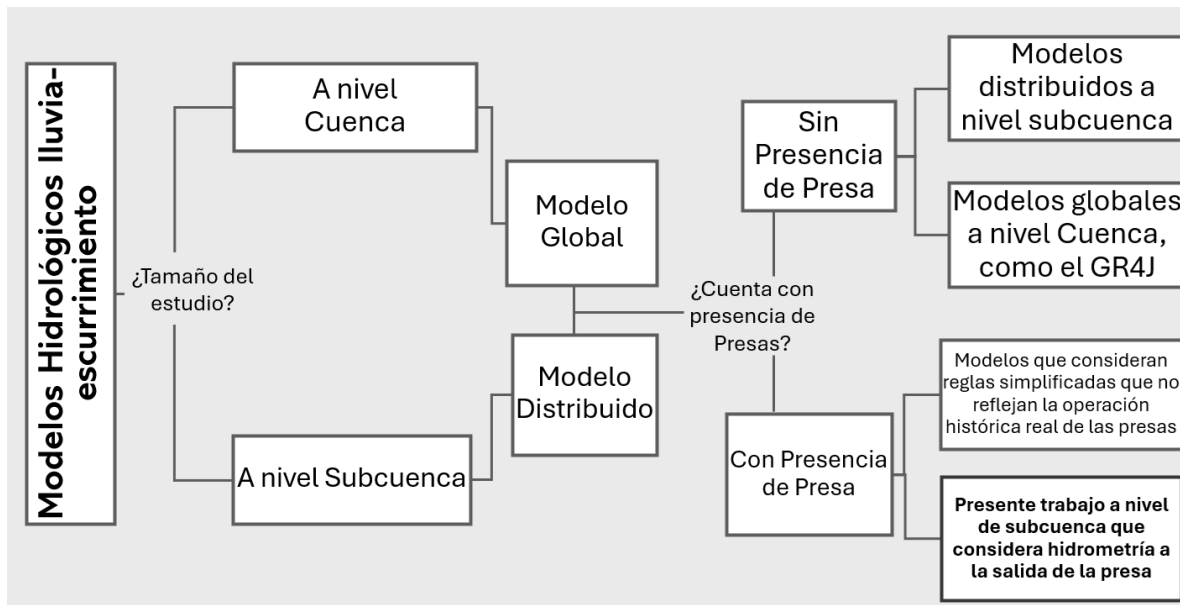


Figura 3. Mapa conceptual del planteamiento del problema (elaboración propia)

3.2 Justificación

Esta investigación tiene como objetivo estudiar las cuencas influenciadas por la presencia de presas de almacenamiento. El trabajo es innovador dado que ningún Modelo Hidrológico operativo lluvia-escorrentía funciona considerando las afectaciones por elementos antropogénicos, particularmente presas. El trabajo propone partir de un modelo lluvia-escorrentía simple y, sin modificarlo, buscar los elementos que permiten tomar en cuenta de manera explícita la acción de las presas de almacenamiento sobre el comportamiento hidrológico de una cuenca.

Se buscarán bases de datos para diferentes presas y subcuencas de la región hidrológica 18 Balsas, para considerarlas en la estructura de un modelo lluvia-escorrentía y con la simulación hidráulica se considerará la información de la evolución temporal de los volúmenes almacenados en las presas.

Se utilizará el modelo global GR4J en las cuencas de la región hidrológica 18 Balsas. El modelo GR4J es un modelo que trabaja a un intervalo de tiempo diario que tiene cuatro parámetros en su estructura y en el que se considerarán a partir de las simulaciones las presas de almacenamiento. Como resultado se busca obtener eficiencias satisfactorias del modelo en las cuencas de la región altamente influenciada por presas.

Se propone que al emplear el modelo GR4J (Fig.4) en conjunto con datos específicos de altura y de los túneles de las presas “El Infiernillo”, “El Caracol” y “La Villita”, se logre una mejora significativa en la capacidad predictiva del modelo, logrando una representación más nítida de la influencia de las presas en el régimen hidrológico de las cuencas estudiadas. Además, se anticipa que esta metodología innovadora proporcionará percepciones valiosas sobre el impacto de las presas en la disponibilidad y distribución del agua, así como en la gestión de riesgos asociados a eventos hidrometeorológicos extremos.

En particular, se espera que la inclusión de la presa Adolfo López Mateos “Infiernillo”, ubicada en el estado de Michoacán y utilizada para diversos fines como la generación de energía eléctrica, el riego y el control de avenidas, la presa José María Morelos “La Villita”, ubicada entre Michoacán y Guerrero y dedicada principalmente a la generación de energía eléctrica, así como la presa Ingeniero Carlos Ramírez Ulloa “El Caracol” ubicada en Guerrero, aporte datos relevantes sobre la influencia de las presas en el comportamiento hidrológico de la región.

Se prevé que los registros detallados de precipitaciones y volúmenes estimados de almacenamiento por estas presas enriquecerán el modelo GR4J y permitirán una mejor comprensión de los procesos hidrológicos en las cuencas estudiadas.

El enfoque de este proyecto no se ha generalizado en el ámbito mundial, dicho esto es de extrema relevancia su investigación.

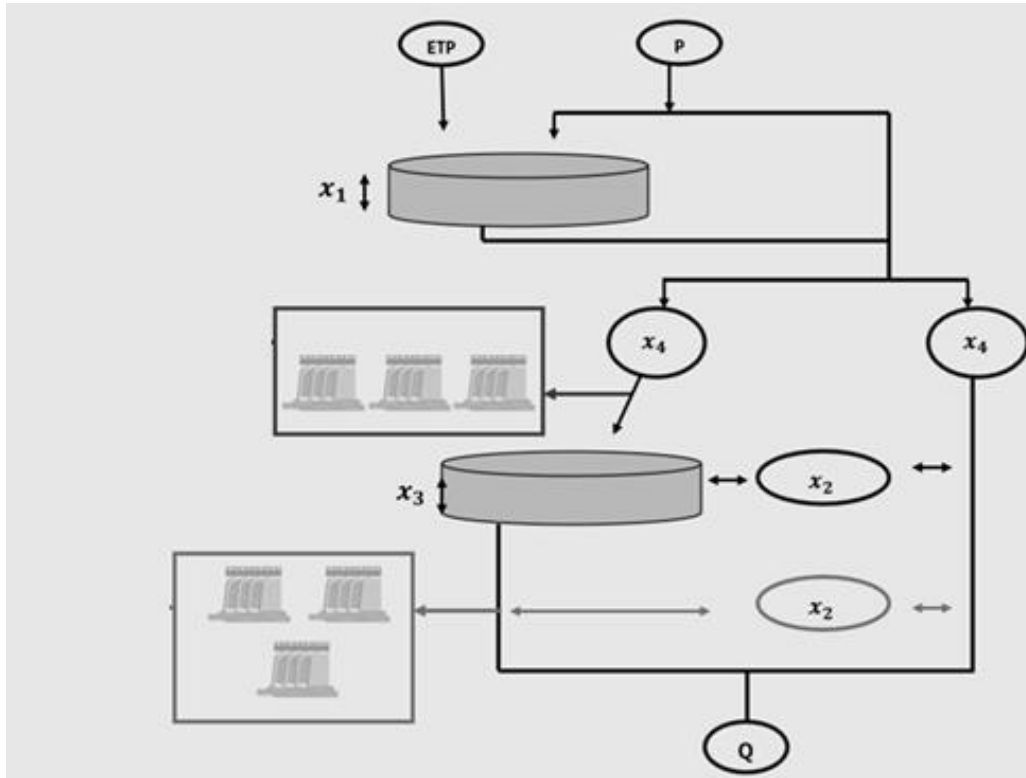


Figura 4. Plan de Modelo GR4J con inclusión de presas, X_1 =capacidad máxima de almacenamiento de agua de lluvia en el suelo (mm), X_2 = intercambio de agua superficial y subterránea (mm), X_3 = capacidad máxima del río (mm), X_4 = $\frac{1}{2}$ de tiempo base de hidrograma unitario (días), ETP= evapotranspiración potencial (mm/día), P = precipitación diaria (mm/día), Q = gasto diario (mm/día) (elaboración propia)

3.3 Pregunta de Investigación

¿Es posible aplicar un modelo lluvia-escorrentía en un intervalo de tiempo diario en cuencas donde su sistema hidrológico natural ha sido modificado por la presencia de infraestructura hidráulica?

3.4 Objetivo general

- Desarrollar una metodología que considere en la aplicación de un modelo lluvia-escorrentía, el impacto de los almacenamientos artificiales de agua sobre el comportamiento y régimen hidrológico de los ríos para estimar los caudales de salida en la cuenca.

3.4.1 Objetivos específicos

- Estudiar las cuencas influenciadas por la presencia de presas de almacenamiento de distintos usos.
- Integrar las presas existentes en una cuenca en la aplicación de un modelo lluvia-escurrimiento.
- Generalizar la propuesta metodológica aplicándola en diferentes cuencas de la región hidrológica 18 Balsas.

3.5 Hipótesis

Al expandir la aplicación del modelo GR4J para incluir la evolución temporal de los volúmenes almacenados en presas, se podrá conocer con mayor fidelidad el efecto de las presas en el escurrimiento.

3.6 Materiales y Métodos

- Sistema de Información Geográfica QGIS: Manejo de bases de datos: las capas vectoriales y las capas ráster necesarias para la investigación; además de crear, editar, visualizar y analizar la información geoespacial del proyecto.
- Archivos INEGI: Información de las capas necesarias de las ramas de topografía, hidrografía, climatología, hidrología y uso de suelo.
- Estaciones hidrométricas: Información oficial de los datos registrados de los caudales, para todas las estaciones de la región de estudio.
- Estaciones Climatológicas: Información oficial de precipitación y temperatura para todas las estaciones de la región de estudio.
- Modelo GR4J: Modelo lluvia-escurrimiento para el análisis hidrológico en la metodología.
- Microsoft Excel: Programación del modelo y su calibración y validación.
- *Software* Python: Gestión de datos y gráficas.
- *Software* HEC-RAS: Simulación del funcionamiento hidráulico para el sistema del río Balsas incluyendo la infraestructura hidráulica.

4 CAPÍTULO 4.-

Metodología

4.1 Definición de la cuenca de la zona de estudio

Para el trabajo se usaron todas las subcuencas que comprenden a la Región Hidrológica 18 Balsas, considerando la red hidrográfica y las curvas de nivel para toda la zona.

El cauce principal se trazó manualmente para obtener una mayor precisión, este cauce comprende las 3 principales presas que se trabajan en el estudio. En el mapa de la figura 5 se marcaron con rojo.

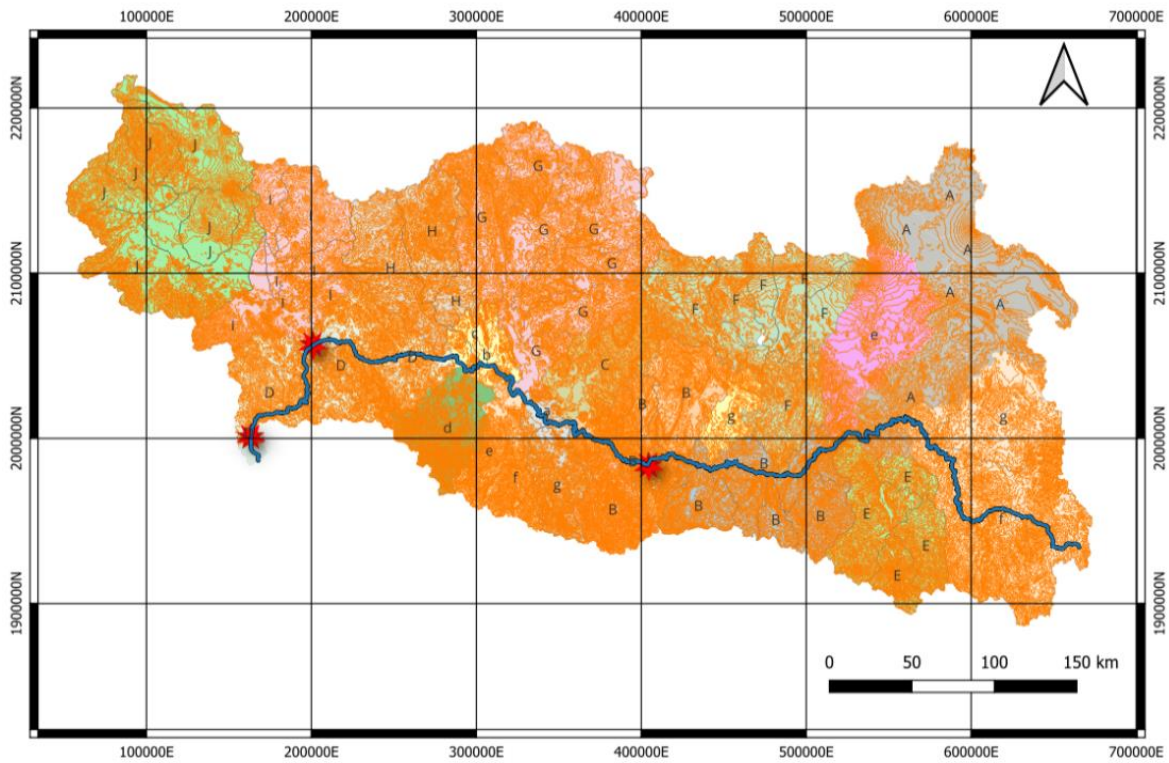


Figura 5. Zona de estudio, curvas de nivel, cauce principal y sistema de presas (elaboración propia)

4.1.1 Subcuencas

Para el manejo eficaz de la información y los cálculos, la región se dividió en un total de 26 subcuencas de elaboración propia con ayuda de las subcuencas establecidas en las capas descargadas de INEGI de acuerdo con el drenaje de éstas (Fig.6). Las subcuencas fueron delimitadas con el objetivo de tener una subcuenca por cada aportación de escurrimiento que se tenga al cauce principal que contiene las 3 presas de interés.

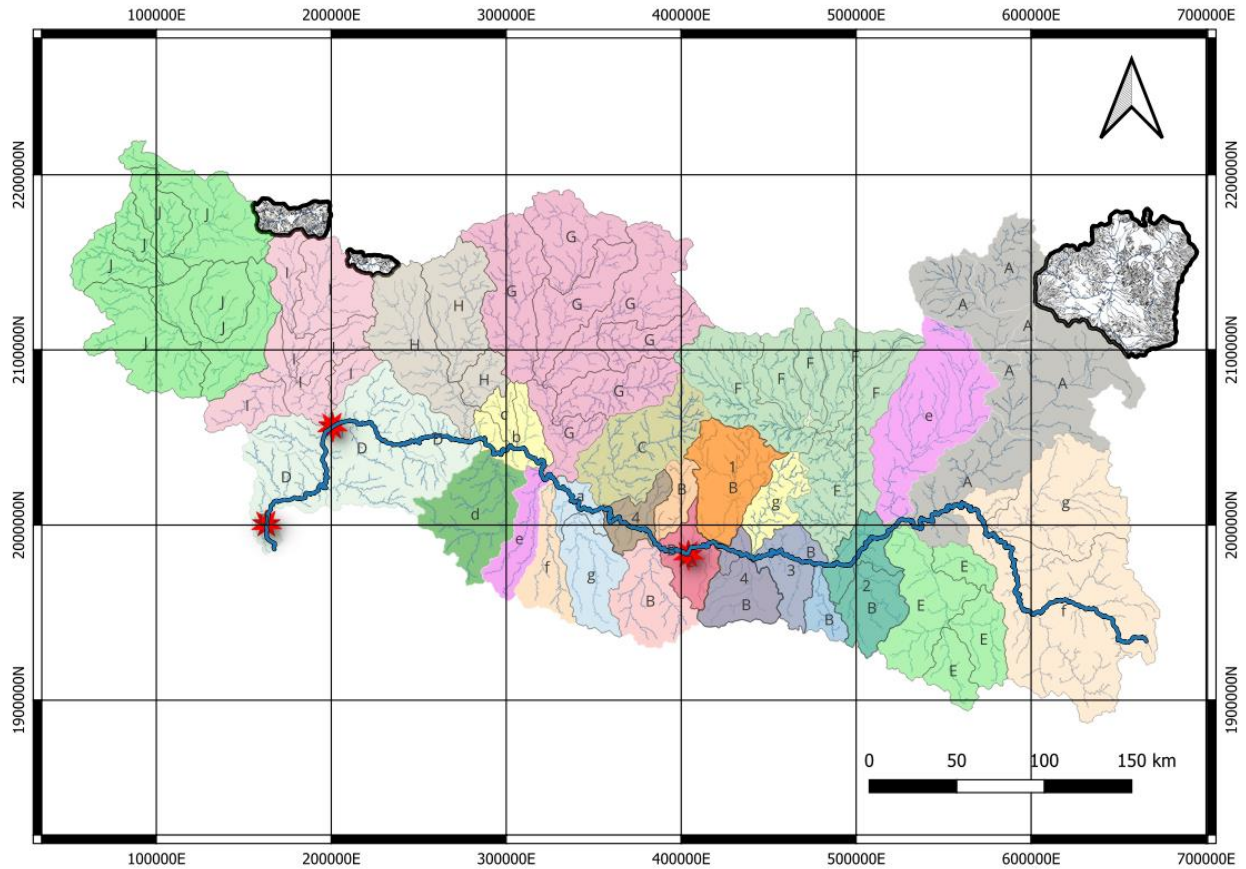


Figura 6. 26 Subcuencas obtenidas por escurrimiento al cauce principal, las letras y números incluidos se emplean como referencia visual para identificar y ubicar las subcuencas analizadas (elaboración propia)

Es importante mencionar que las tres subcuencas marcadas en color negro en la figura anterior no se tomaron en cuenta dado que son subcuencas cerradas y no contribuyen al escurrimiento superficial de la zona de estudio.

Para cada subcuenca se obtuvo su área total, al igual se trazó su cauce principal que lleva el escurrimiento al cauce del sistema de presas y se obtuvo su longitud (Fig. 7).

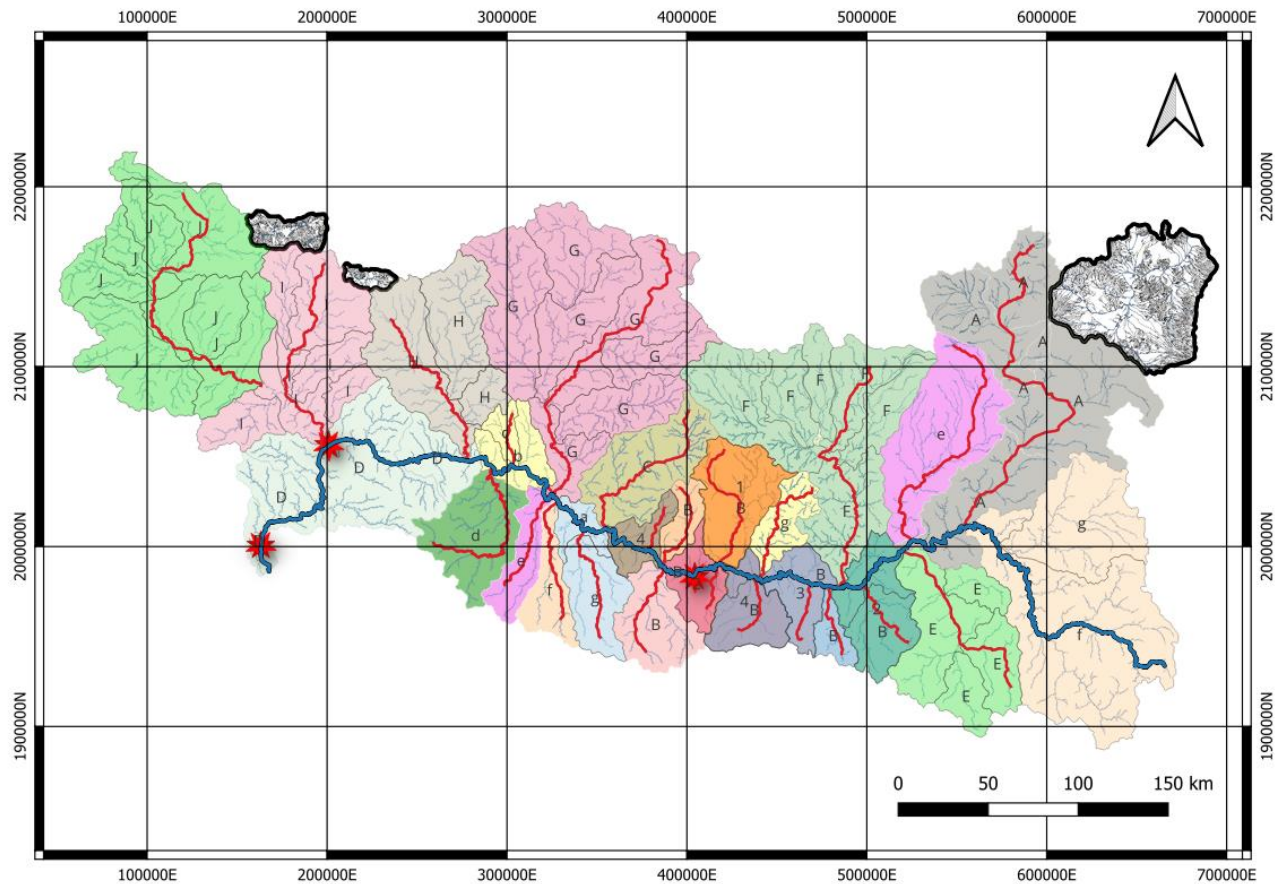


Figura 7. Cauces principales de cada subcuenca (elaboración propia)

4.1.2 Modelos Digitales de Elevación (DEM)

El Modelo Digital de Elevación del cauce principal del sistema de presas se realizó con el conjunto de todos los modelos digitales de elevación que se realizaron para cada carta topográfica a escala 1:50 000, lo que ayudó a obtener una mayor precisión.

Para los Modelos Digitales de Elevación de cada subcuenca se descargaron los relieves continentales del INEGI a una escala de 1:250 000, y se introdujeron junto con las curvas de nivel correspondientes a cada una de ellas.

Todos los Modelos Digitales de Elevación se usaron para realizar el perfil de terreno de cada subcuenca con la herramienta "Terrain Profile" del software QGIS.

Con los Modelos Digitales de Elevación se pudieron obtener las gráficas del perfil del terreno tanto para el cauce principal como para el cauce de cada subcuenca.

4.1.3 Pendiente

Para el cálculo de la pendiente media del cauce principal S en cada subcuenca trabajada, se escogió el método de la ecuación de Taylor y Schwarz, que divide al cauce principal en n tramos para así tener una pendiente uniforme de cada tramo.

Ecuación Taylor y Schwarz:

$$S = \left[\frac{n}{\frac{1}{\sqrt{S_1}} + \frac{1}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{S_n}}} \right]^2 \quad (1)$$

donde:

n = número de tramos del cauce principal dividido

$S_1, S_2, \dots, S_n$ = pendiente correspondiente a cada tramo del cauce dividido

4.2 Base de datos

4.2.1 Climatología

Se descargaron las capas de Información Estadística Climatológica del Servicio Meteorológico Nacional, dado que las estaciones presentes en cada una de las subcuencas eran excesivas, para el análisis se realizó el siguiente cálculo (Shaake *et. al.*, 2000)

$$N = 0.6 A^{0.3} \quad (2)$$

donde:

N = número de estaciones mínimas a contemplar

A = área total de la subcuenca (km^2)

Una vez obtenido el número de estaciones mínimas a contemplar, se optó por trabajar el doble de estas para cada subcuenca, dado que con esto se tendría mayor precisión en los cálculos futuros y mejor ajuste para mayor cantidad de años. En la tabla 2 del capítulo de resultados se tiene la cantidad de estaciones que fueron descargadas de acuerdo con el área correspondiente a cada una de ellas.

Ya teniendo la cantidad de estaciones, se realizó la descarga de los datos históricos por cada subcuenca, tratando de cubrir toda su área y se obtuvieron los datos de precipitación, evaporación, temperatura mínima y temperatura máxima, todos estos para intervalos de tiempo diarios.

4.2.2 Hidrometría

Se realizó la capa de las estaciones hidrométricas con los datos obtenidos de los catálogos del Sistema de Información Hidrológica (SIH) de Conagua, con el fin de tener los datos actuales hasta el momento de la creación de este trabajo.

Analizando la capa en el software Qgis con nuestro mapa de sitio, se crearon subcuencas de acuerdo a la ubicación de las estaciones hidrométricas, esto quiere decir que las estaciones hidrométricas ubicadas en la desembocadura de tributarios al cauce principal del río Balsas, y que por ende, escurrieran al cauce principal del río Balsas eran el punto de salida de la nueva subcuenca. Este análisis también se hizo con la ayuda de las fichas descriptivas de las estaciones hidrométricas, seleccionando las estaciones que contenían su área de drenado, obteniendo así 7 subcuencas hidrométricas para toda el área de estudio.

De estas 7 subcuencas hidrométricas se hizo la selección de las estaciones climatológicas a estudiar. Como ya fue mencionado en el apartado anterior, se seleccionó el doble de N para cada subcuenca hidrométrica para realizar la serie de lluvia total para cada subcuenca.

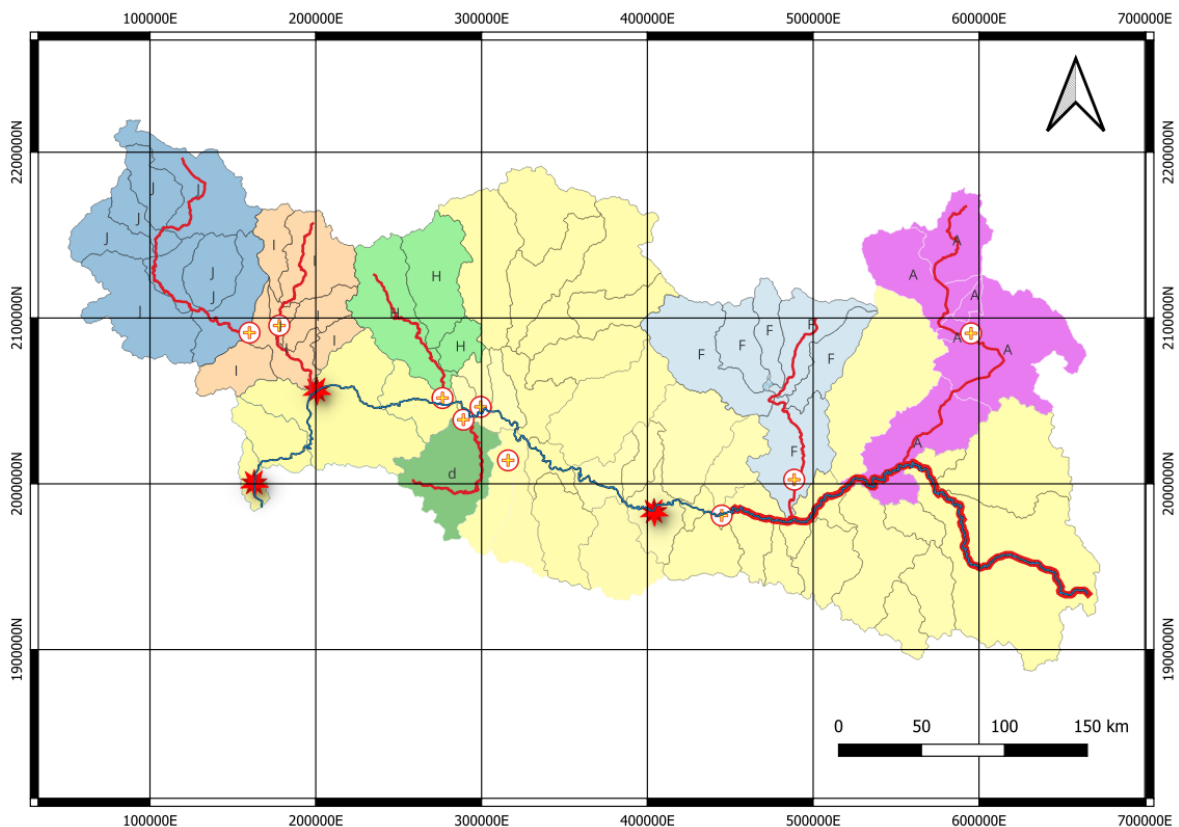


Figura 8. 7 Subcuencas a partir de las hidrométricas con sus cauces principales que desembocan al río Balsas, las cruces indican la ubicación de las estaciones hidrométricas (elaboración propia)

4.2.2.1 Serie de lluvia / gasto

Para el análisis de las series de lluvia-caudal en las 7 subcuencas a partir de las hidrométricas, se tuvo que mantener el N definido con la ecuación (2), dado que el propósito era encontrar los años de coincidencia entre lluvia, temperatura y caudal; estos tres obtenidos de los datos de las estaciones climatológicas ya analizadas y explicadas anteriormente, y de los datos de las estaciones hidrométricas. El análisis se llevó a cabo con ayuda de Python por la enorme cantidad de datos que se tenían, ya que fueron demasiados años los que se debieron analizar para encontrar la coincidencia de las tres variables ya mencionadas. En la tabla 1 (pág. 38) se presentan los valores del área, longitud y pendiente del cauce para estas subcuencas.

En el caso de la lluvia se utilizaron los datos de la precipitación promedio diaria y en el caso de temperatura se realizó el promedio de temperatura máxima con temperatura mínima diaria.

La Subcuenca A tuvo que ser descartada dado que no contaba con registros de los años a evaluar climatológicamente, por el área de dicha subcuenca el mínimo de estaciones climatológicas era de 7 y para los años de registro en la estación hidrométrica que eran de 1944 a 1949 y en esos años las estaciones climatológicas eran menor a 7, por tal razón esta subcuenca no aportaba los datos necesarios para el estudio, siendo que la información del caudal se requiere para calibrar el modelo.

4.2.3 Sistema de Presas

Se realizó la capa de las presas de todo el país con los datos obtenidos de los catálogos del Sistema de Información Hidrológica (SIH) de Conagua, esto con el fin de tener los datos más actuales hasta el momento de este trabajo. Posteriormente, se cortó la capa para considerar sólo la región del Balsas.

Como ya fue mencionado se seleccionaron las tres presas con mayor influencia hidroeléctrica en la cuenca del río Balsas, la presa Adolfo López Mateos "Infiernillo", la presa José María Morelos "La Villita" y la presa Carlos Ramírez Ulloa "El Caracol".

La presa "Infiernillo" se encuentra en el estado de Michoacán, esta presa es considerada una de las más importantes de México, su territorio ocupado es de un aproximado de 265,117 ha, fue construida por la Secretaría de Recursos Hidráulicos, su tipo de clima se considera cálido con lluvias en verano. La presa el "Infiernillo" posee una cortina con altura de 149 m y 350 m de longitud de la corona. Cuenta con tres vertedores de 13 m de diámetro y su capacidad de descarga es de 13,800 m³/seg. El régimen de lluvias se localiza en los meses de junio y agosto y la precipitación media registrada es de 546.5 mm. Cuenta con una capacidad hidroeléctrica de 1120 MW (DIGAOHM, 2007).

La presa hidroeléctrica "El Caracol" está en el estado de Guerrero, en la parte media del río Balsas. Cuenta con una capacidad de 570,000 KW, su cortina tiene 134 m de altura y un volumen de almacenamiento al NAMO de 1057.290 hm³ (CONAGUA, 2025), cuenta con 2 canales y una capacidad total de descarga de 17,000 m³/seg (ICA, 1982).

La presa “La Villita” se encuentra a 55 km aguas abajo de la presa “Infiernillo” y aguas arriba a 15 km de la desembocadura al Océano Pacífico, tiene una capacidad hidroeléctrica de 304,000 KW. Su cortina tiene 60 m de altura y 420 m de longitud en la corona (ICA,1982).

4.3 Modelo Hidrológico

Los modelos hidrológicos son utilizados para poder responder a preguntas sobre el transporte ambiental donde el exceso, la escasez o la calidad del agua son de gran importancia (Burgess, 1986). Debido a la naturaleza de las predicciones ambientales no existe un solo modelo óptimo. Existen numerosas soluciones según el propósito y la complejidad necesarias. Por esta y muchas razones, la práctica de los modelos hidrológicos ha incluido una dependencia excesiva de las matemáticas y del conocimiento verdadero para una evaluación más rigurosa de su pertinencia (Klemes, 1997). La práctica de los modelos hidrológicos se ve afectada en su mayoría por las incertidumbres del proceso y la influencia de las heterogeneidades (Troch *et al.*, 2019) y algunos fenómenos naturales. Por lo que algunos modelos hidrológicos son inadecuados para algunas situaciones.

4.3.1 Clasificación de modelos

Los modelos hidrológicos se clasifican de acuerdo con las técnicas matemáticas para construirlos, la discretización espacial del sistema y su grado de complejidad.

Los modelos son los de naturaleza determinista o estocástica. La cuenca en estudio puede ser utilizada como un todo global o se puede dividir en subcuencas a manera de ser útiles para el estudio distribuido o semidistribuido.

Cuando el modelo requiere de una representación de alto nivel del proceso esto implica mayor cantidad de parámetros y su respectiva calibración, lo que conlleva una mayor incertidumbre de dicho modelo. Para obtener un modelo más adecuado se sugiere utilizar el menor número de parámetros deseables, sin olvidar que estos deben ser suficientes para proporcionar simulaciones comparables con datos de observación (Beven, 2012).

4.3.2 Modelo GR4J

El modelo empírico lluvia-escurrimiento GR4J transforma la información de la precipitación en escurrimiento en procesos llevados a cabo de forma global. Los procesos se encuentran en modo de almacenamientos que se llenan y se vacían en periodos de tiempo, logrando así que el sistema pueda tener memoria de las condiciones pasadas. El modelo GR4J está formado a manera de esquema por captaciones interconectadas que garantizan la modificación de la precipitación en escurrimiento.

El modelo GR4J comienza su ciclo con la presencia de la precipitación del área de estudio, a dicha precipitación se le efectúa el proceso de evapotranspiración lo que nos hace perder parte de esta y obtener así la precipitación neta. Una fracción de la precipitación neta pasa a la alimentación de la captación del suelo, el sobrante de la precipitación neta circula hacia el punto de salida de la cuenca. Cuando esta es totalmente interrumpida por el medio ambiente, el agua que se encontraba en el suelo comienza a evaporarse. El volumen de escurrimiento hacia la salida de la cuenca es retrasado en función del tiempo base del hidrograma unitario, esto refiere a la respuesta de la cuenca a la lluvia, la lluvia es dividida en dos secciones de escurrimiento, por un lado, se tiene el escurrimiento semidirecto y por otro lado el escurrimiento directo. El tiempo base del hidrograma unitario proporciona la

información del tiempo que transcurre desde que comienza a aumentar el caudal debido a una tormenta hasta que el caudal regresa de nuevo al caudal previo a la lluvia, representa la duración de la respuesta de la cuenca a la lluvia. Esto nos ayuda para representar al 90% de la lluvia efectiva, y el hidrograma unitario simula el tiempo de pico, refiriéndose a este como el tiempo en que se produce el gasto máximo de la tormenta, transitando por la zona de captación del cauce del río hasta llegar a la desembocadura de la cuenca. El otro 10% de la lluvia eficaz está relacionada al escurrimiento semidirecto y el tiempo base del hidrograma unitario es dos veces el tiempo pico del escurrimiento directo, conduciéndose de forma directa al punto de salida de la cuenca. A la salida de la cuenca el gasto puede ser afectado por la infiltración superficial o profunda que está determinada por los intercambios de aguas superficiales o subterráneas, esto es conocido como coeficiente de intercambio.

En la configuración del modelo se tienen dos elementos fundamentales: el primero es el módulo de producción, que se encarga de la determinación del agua de lluvia que contribuye a la humedad del suelo y la que se convierte en escurrimiento, esto quiere decir, distribuir la lluvia bruta en lluvia neta que contribuye al gasto, teniendo en cuenta tanto la evaporación como el almacenamiento de agua, así como una función de intercambio de agua que posibilita simular las pérdidas hacia el exterior y las aportaciones del exterior.

Como segundo elemento se tiene el módulo de transferencia, cuya función es asegurar la repartición temporal de la cantidad de agua que transita en el río (Rojas,2023).

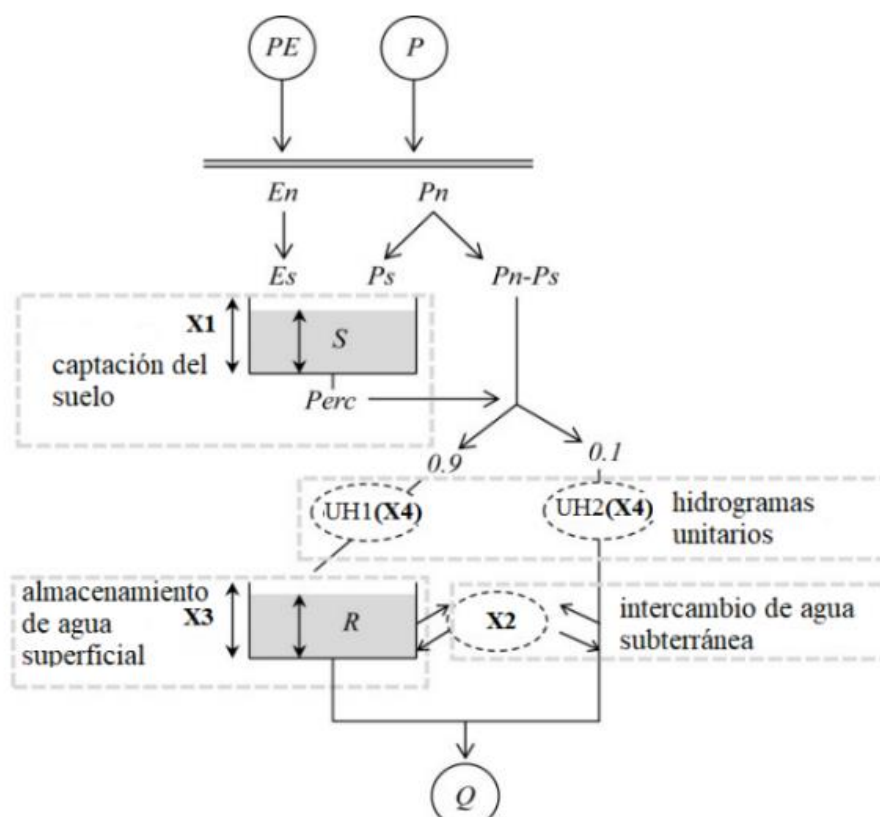


Figura 9. Estructura del modelo lluvia-escurrimiento GR4J. Perrin (2000)

4.3.2.1 Estructura y parámetros del Modelo GR4J

Balance inicial lluvia-evapotranspiración

Si $P \geq E$:

$$P_n = P - E, \quad E_n = 0 \quad (3)$$

Si $P < E$:

$$P_n = 0, \quad E_n = E - P \quad (4)$$

donde:

P_n = precipitación neta (mm)

E_n = Evapotranspiración neta $\left(\frac{mm}{día}\right)$

P = precipitación (mm)

E = Evapotranspiración potencial $\left(\frac{mm}{día}\right)$

Almacenamiento del suelo X1

- Ingreso por lluvia:

$$P_s = \frac{X1(1 - \left(\frac{S}{X1}\right)^2) \tanh\left(\frac{P_n}{X1}\right)}{1 + \frac{S}{X1} \tanh\left(\frac{P_n}{X1}\right)} \quad (5)$$

- Pérdidas por evapotranspiración real:

$$E_s = \frac{S \left(2 - \frac{S}{X1}\right) \tanh\left(\frac{E_n}{X1}\right)}{1 + \left(1 - \frac{S}{X1}\right) \tanh\left(\frac{E_n}{X1}\right)} \quad (6)$$

- Actualización del almacenamiento:

$$S_{t+1} = S_t - E_s + P_s \quad (7)$$

- Percolación:

$$Perc = S \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{4S}{9X1} \right)^4 \right]^{\frac{-1}{4}} \right\} \quad (8)$$

donde

$$P_s = \text{Lluvia infiltrada (mm)}$$

$$E_s = \text{Evapotranspiración } \left(\frac{\text{mm}}{\text{día}} \right)$$

$$S = \text{capacidad actual de almacenamiento subterráneo (mm)}$$

Precipitación efectiva

$$P_r = Perc + (P_n - P_s) \quad (9)$$

Hidrogramas unitarios UH1 y UH2; X4

$$UH1 \text{ corresponde al } 90 \% \text{ de } P_r$$

$$UH2 \text{ corresponde al } 10 \% \text{ restante de } P_r$$

- Los porcentajes de UH se obtienen derivando las siguientes ecuaciones

$$\text{Si } 0 < t < X4$$

$$SH1(t) = \left(\frac{t}{X4} \right)^{\frac{5}{2}} \quad (10)$$

$$\text{Si } 0 < t \leq X4$$

$$SH2(t) = \frac{1}{2} \left(\frac{t}{X4} \right)^{\frac{5}{2}} \quad (11)$$

Agua subterránea X_2

$$F = X_2 \left(\frac{R}{X_3} \right)^{\frac{7}{2}} \quad (12)$$

Si $X_2 > 0$, se tiene aporte de aguas subterráneas

Si $X_2 < 0$, se tienen pérdidas

donde

$R = \text{tirante (mm)}$

Almacenamiento en el río X_3

- Entrada

$$R = \max(0; R + Q \cdot 9 + F) \quad (13)$$

$$Q_r = R \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{R}{X_3} \right)^4 \right]^{\frac{-1}{4}} \right\} \quad (14)$$

- Estado final

$$R = R - Q_r \quad (15)$$

donde

$$Q_r = \text{caudal de retraso} \left(\frac{\text{mm}}{\text{día}} \right)$$

Caudal total

$$Q = Q_r + Q_d \quad (16)$$

donde

$$Q_d = \text{escurrimiento directo} \left(\frac{\text{mm}}{\text{día}} \right)$$

4.3.2.2 ¿Cómo se incluyen las presas de almacenamiento en la estructura del modelo?

Como se comentó en la introducción, la idea inicial para considerar las presas de almacenamiento en el modelo lluvia-escurrimiento era de proponer la inclusión de un quinto parámetro en su estructura. Sin embargo, dado que fue imposible obtener la información oficial de los almacenamientos de las presas del sistema del río Balsas, tal como, los volúmenes de entrada, almacenados y de salida, incluso las curvas elevación-área-volumen que se solicitaron a la Comisión Federal de Electricidad y Comisión Nacional del Agua no se pudieron obtener.

Dado lo anterior, el parámetro inicialmente considerado para esta investigación se sustituyó con la búsqueda de información hidrométrica situada aguas abajo de las presas, para considerar de esta forma la operación de las mismas, y por lo tanto, que las curvas elevación-área-volumen se consideraran implícitamente en el modelo. Esto ya que, como la calibración del modelo requiere los gastos registrados en la cuenca de análisis, si consideramos los gastos de salida de las presas, la información de operación estaría incluida en las estaciones hidrométricas consideradas.

Parámetros (Rojas-Serna, 2006)

$$X1 = 416 \text{ (mm)} \quad (17)$$

$$X2 = -0.59 \text{ (mm)} \quad (18)$$

$$X3 = 0.43 (Pmx - Pmn)^{1.07} \text{ (mm)} \quad (19)$$

$$X4 = 0.5 + 1.26 \frac{S^{0.16}}{P^{0.64}} \text{ (días)} \quad (20)$$

donde:

$X1 = \text{Capacidad máxima de almacenamiento de agua de lluvia en el suelo (mm)}$

$X2 = \text{Intercambio de agua subterránea (mm)}$

$X3 = \text{Capacidad máxima del río (mm)}$

$X4 = \frac{1}{2} \text{ de tiempo base de hidrograma unitario (días)}$

$Pmx = \text{Precipitación diaria máxima (mm)}$

$Pmn = \text{Precipitación diaria mínima (mm)}$

$S = \text{Área de la cuenca (km}^2\text{)}$

$P = \text{Precipitación promedio de todo el registro (mm)}$

4.3.3 Radiación Extraterrestre

Se calculó la radiación extraterrestre para periodos diarios (R_a) de acuerdo con el Estudio FAO Riego y Drenaje (FAO,2006).

La radiación extraterrestre para periodos diarios se estima con ayuda de la siguiente ecuación:

$$R_a = \frac{24 * 60}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)] \quad (21)$$

$$d_r = 1 + 0.033 * \cos\left(\frac{2\pi}{365}J\right) \quad (22)$$

$$\delta = 0.409 * \sin\left(\frac{2\pi}{365}J - 1.39\right) \quad (23)$$

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi) \tan(\delta)] \quad (24)$$

donde

$$R_a = \text{radiación extraterrestre} \left(\frac{MJ}{m^2 \text{ día}} \right)$$

$$G_{sc} = \text{constante solar} = 0.082 \frac{MJ}{m^2 \text{ min}}$$

$$d_r = \text{distancia relativa inversa Tierra - Sol}$$

$$\omega_s = \text{ángulo de radiación a la puesta del sol (rad)}$$

$$\varphi = \text{latitud (rad)}$$

$$\delta = \text{declinación solar (rad)}$$

4.3.4 Evapotranspiración Potencial- ETP

Para el cálculo de la evapotranspiración potencial fue utilizada la ecuación de Oudin (Oudin *et al.*, 2004):

$$PE = \frac{Ra}{\lambda \rho} \frac{Ta + 5}{100} \quad (25)$$

donde

$$Ra = \text{radiación extraterrestre} \left(\frac{MJ}{m^2 \text{ día}} \right)$$

$$\lambda = \text{flujo de calor latente} = 2.45 \frac{MJ}{kg}$$

$$\rho = \text{densidad del agua} \left(\frac{kg}{m^3} \right)$$

$$Ta = \text{temperatura media diaria} (^{\circ}C)$$

El cálculo se hizo para 1 año de cada subcuenca hidrométrica, dicho año debió tener completa la información de Ra y que cumpliera con el N mínimo de la subcuenca. En los sucesivos se denotará PE del modelo como ETP.

De la figura 37 a la 41 se presenta la relación entre el área de cada subcuenca y sus series climáticas correspondientes, así como la relación con los gastos observados.

4.4 Calibración y Validación

Ya que se contaba con los datos de precipitación en milímetros, de gasto en metros cúbicos por segundo y de evapotranspiración potencial en milímetros, se procedió a la realización de la primera simulación con el modelo GR4J.

4.4.1 Simulación 1: lluvia-gasto registros totales

Para la primera simulación se usaron cuatro series de tiempo para cada subcuenca, de lluvia, gasto, temperatura y evapotranspiración potencial, cuyos datos coincidían todos los días de todos los años. Con los datos de temperatura se hizo el cálculo de la evapotranspiración potencial; dado que estas tres variables: lluvia, evapotranspiración potencial y gasto, son las entradas del modelo para la simulación.

Esto se hizo a través del software Python dada la gran cantidad de datos a analizar y lograr que coincidieran en los periodos de tiempo, esta simulación fue realizada de manera propia para las 6 subcuencas a partir de las hidrométricas; la subcuenca F, la subcuenca Z, la subcuenca H, la subcuenca L, la subcuenca J y la subcuenca Cd.

Los periodos que se analizaron para la subcuenca F fueron de 1977 a 2005, para la subcuenca Z de 1957 a 1985, para la subcuenca H de 1969 a 1976, para la subcuenca L de 1969 a 1988, para la subcuenca J 1969 a 2006 y para la subcuenca Cd de 1995~2010 con falta de datos dentro del periodo.

Para lograr que el modelo corra de la forma correcta se debe ingresar el área correspondiente de cada subcuenca, la fecha de inicio del periodo completo que se está analizando, la fecha final de todo el periodo, el número de días del análisis, el promedio de la precipitación de todo el periodo en milímetros por día, el promedio de la evapotranspiración potencial en milímetros por día, el promedio del gasto transformado para expresarlo en milímetros por día, y los parámetros X1, X2, X3 y X4; para estos parámetros se ocuparon las funciones inversas que venían en el Excel junto con los parámetros ya antes mencionados, como se demuestra a continuación (Rojas-Serna, 2006):

$$X1: \ln(416) \quad (26)$$

$$X2 : \ln (-0.59 + \sqrt{-0.59^2 + 1}) \quad (27)$$

$$X3 : \ln [0.43 (Pmx - Pmn)^{1.07}] \quad (28)$$

$$X4 = \ln \left[\left(0.5 + 1.26 \frac{S^{0.16}}{P^{0.64}} \right) - 0.5 \right] \quad (29)$$

Como resultados de la primera simulación para cada subcuenca, se obtuvo el gasto simulado para el periodo de tiempo analizado, el hidrograma con comparativa entre el gasto registrado, el gasto simulado y la lluvia; el índice de almacenamiento S/X1, el índice de almacenamiento R/X3 y la gráfica de dispersión comparativa entre el gasto simulado y el gasto registrado.

Tabla 1. Características físicas de las subcuencas (S es la pendiente, L es la longitud) y X1, X2, X3 y X4 son los parámetros obtenidos con el modelo en la simulación 1 (elaboración propia)

Subcuenca	S %	L (Km)	Área(km²)	X1	X2	X3	X4
Cd	4.68	170.67	2628.52	6.03	-0.56	3.43	0.29
F	4.35	172.59	9507.79	6.03	-0.56	3.15	1.05
H	4.98	135.81	5525.9	6.03	-0.56	3.85	0.80
I	4.04	154.26	2684	6.03	-0.56	4.14	0.69
J	5.56	234.98	11660.8	6.03	-0.56	3.85	1.21
Z	6.21	365.34	45361.7	6.03	-0.56	2.98	1.40

Subcuenca	Prec. Prom (mm/día)	ETP (mm)	Q obs (mm/día)	Q cal (mm/día)	Período de registro inicio	Período de registro final	ETP/Qobs (día)
Cd	6.531	3.876	9.081	2.144	12/08/1995	11/10/2010	0.426
F	2.759	3.795	0.449	0.307	01/07/1977	31/12/2007	8.440
H	3.529	3.791	0.541	0.680	01/01/1969	31/07/1981	7.004
I	3.531	3.715	0.748	0.716	01/01/1969	22/03/1988	4.962
J	2.242	4.053	0.319	0.135	01/12/1969	30/04/2006	12.680
Z	2.351	3.626	0.243	0.148	01/03/1957	31/12/2007	14.879

Con los datos obtenidos de la primer simulación se realizó la tabla 1, con ésta se procedió a realizar los comparativos de pendiente vs longitud, área de la subcuenca vs (ETP/Q obs), área de la subcuenca vs precipitación promedio, área de la subcuenca vs ETP, área de la subcuenca vs Qobs, Qobs vs Qcal, X3 vs X4, área de la subcuenca vs X1, área de la subcuenca vs X2, área de la subcuenca vs X3, área de la subcuenca vs X4.

4.4.2 Simulación 2: lluvias totales

Para la segunda simulación del modelo GR4J, se utilizaron todos los datos completos de precipitación de cada subcuenca, esto quiere decir que solo se consideraron los datos de precipitación y evapotranspiración, sin tener gasto registrado, pero sí se obtuvo un gasto simulado. El proceso fue de la misma manera que el mencionado para la primera simulación, solo quitando el proceso del gasto registrado, los parámetros fueron obtenidos de la misma manera con las ecuaciones 26, 27, 28 y 29.

Como resultados se obtuvieron los índices de almacenamiento R/X3 y S/X1 al igual que el hidrograma de cada subcuenca con el contenido de gasto simulado y lluvia.

4.4.3 Simulación 3: Cuenca Balsas 1980-1982

Para la tercera simulación del modelo se tuvo que buscar entre las 6 subcuencas hidrométricas una serie de tiempo que coincidiera para todas, esta serie de tiempo debía incluir ciertas características; mínimo deberían ser dos años de coincidencia, debería tener todos los días de precipitación para esos mismos años, al igual que debían coincidir todos los días de gasto; respecto al número de N en cada subcuenca éste debía ser el mínimo para cada subcuenca.

Se encontraron tres posibles series de tiempo, la primera fue para los años de 1975 a 1976, pero esta serie de tiempo no contaba con todos los datos de las subcuencas F y L, la segunda serie de tiempo fue para los años de 1980 a 1982, sin embargo esta serie no contaba con todos los datos para la subcuenca H, la última serie de tiempo fue para los años 2018 a 2019, pero esta serie no contaba con los datos para las subcuencas H, Cd, y L. Dado que la primera y la última serie de tiempo solo contaban con un año de registro y con mayor falta de datos para las subcuencas se decidió trabajar con la serie de tiempo 1980-1982.

Para los datos faltantes de la subcuenca H en la serie de tiempo 1980-1982 se realizaron dos gráficas, el parámetro X4 de las subcuencas L, H, F y J vs el área de estas mismas, también se realizó la gráfica del parámetro X3 de las subcuencas H, L y J vs el área de estas mismas, con estas se pudo concluir que la subcuenca H es homogénea a las subcuencas L, F y J por que X4 es muy cercano a H, para el promedio de los valores de H se escogen los valores de L y de J porque el parámetro X4 para la subcuenca L es muy cercano al de H y X3 de J es muy cercano al de H.

Para las subcuencas F, Z, L y J el proceso de simulación fue igual que el primer proceso, agregando las mismas variables y obteniendo los resultados, pero en esta ocasión solo para la serie de tiempo 1980-1982.

Para tener toda la cuenca Balsas cubierta para el análisis faltaba obtener los datos de 11 subcuencas más, éstas eran las subcuencas que no contaban con estaciones hidrométricas, más la subcuenca hidrométrica H de la que ya se tenían los datos, pero solo de lluvia.

Para las otras 11 subcuencas que solo disponen de estaciones climatológicas se obtuvo su promedio diario de precipitación para la serie de tiempo de 1980-1982, y para obtener sus parámetros X1, X2, X3, X4 se hizo a través de las ecuaciones 17, 18, 19 y 20. Para el cálculo de la radiación extraterrestre se toma la tabla Allen (Allen *et al.*, 1998) en $\frac{mm}{día}$ para 18° Norte, y para la temperatura se toma de la estación más central de la subcuenca climatológica. Posteriormente se realizó el cálculo de la Evapotranspiración potencial con el mismo procedimiento que ya fue explicado en el punto 4.3.4.

Para este punto ya se tiene cubierta toda la cuenca Balsas con un total de 16 subcuencas.

En estas 16 subcuencas se aplica el modelo GR4J, teniendo para 4 de ellas resultados con los índices de almacenamiento S/X1 y R/X3, al igual que el hidrograma de cada subcuenca con el gasto simulado, gasto registrado y lluvia; para las 12 restantes se obtienen los resultados de los índices de almacenamiento S/X1 y R/X3, al igual que el hidrograma de cada subcuenca con el gasto simulado y lluvia.

4.4.4 Modelación Hidráulica

4.4.4.1 RiverGIS

Se realizó la descarga del sistema de gestión de base de datos PostgreSQL, de acuerdo con el sistema operativo con el que se estuvo trabajando, para realizar la modelación hidráulica junto con los softwares QGIS y HEC-RAS.

En PostgreSQL se creó una base de datos, y de esta se crearon dos extensiones para conectar con el software QGIS, al igual se creó la extensión de topología.

En el software QGIS se utilizó el complemento RiverGIS, en este complemento se conectó la base de datos de PostgreSQL, posteriormente se creó un nuevo esquema para la zona de trabajo.

Para crear en RiverGIS el modelo que se utilizó en HEC-RAS, se utilizó el mapa base con el que ya se contaba anteriormente de la cuenca Balsas, incluidas sus curvas de nivel y su modelo digital de elevación.

En este esquema se creó la base de datos del río principal y su tributario, esta base incluye, la capas de "StreamCenterLine" refiriéndose al cauce principal de del río desde aguas arriba hacia aguas abajo, las capas de "BankLines" indicando las márgenes derecha e izquierda del río, de la misma manera que la anterior de aguas arriba hacia aguas abajo, la capa de "Flowpaths" refiriéndose a las posibles llanuras de inundación del río para ambas márgenes, y por último la capa de "XSCutLines" que contiene las secciones transversales como líneas de corte del río realizadas de margen izquierda a margen derecha a una distancia de 20 km, de la misma manera que las anteriores de aguas arriba hacia aguas abajo. Todo el proceso se repitió para añadir el río tributario al río principal Balsas.

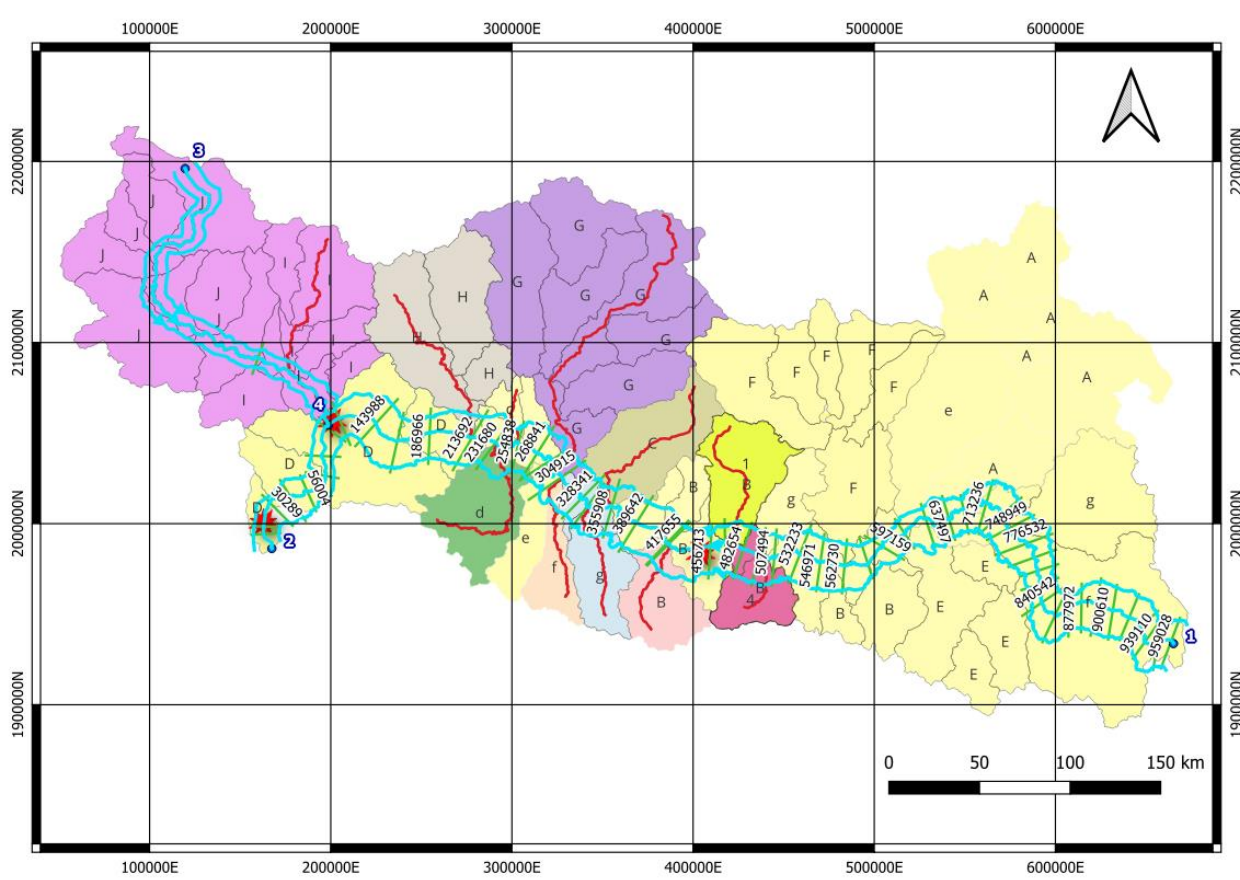


Figura 10.- Modelo RiverGIS , con la interpretación de las 11 subcuencas climatológicas que se ocuparon para la modelación hidráulica de la Cuenca Balsas (elaboración propia)

El modelo se exportó para poderlo trabajar en HEC-RAS.

4.4.4.2 HEC-RAS

Se cargó el modelo creado en RiverGIS, y se importó la geometría del río Balsas junto con el río tributario, de esta manera se obtuvo el cauce principal, las líneas de las márgenes y las secciones. Por cada sección se tienen las márgenes y su elevación, al igual que su coeficiente de Manning.

Para el modelo se creó el área 2D y se agregó RAS Mapper.

Se agregaron los hidrogramas unitarios aguas arriba y aguas abajo tanto para el río Balsas como para el río tributario, en los datos de flujo no estacionario, en las demás secciones se agregaron los hidrogramas de entrada lateral y como condición inicial se consideró que la profundidad del río era de 5 metros.

Para las once subcuencas faltantes de la Cuenca Balsas se agregaron los hidrogramas que se obtuvieron en la simulación 2 del Modelo GR4J, en la cual se ocuparon los errores de la simulación 1 para así poder completar toda la Cuenca del río Balsas, estos hidrogramas se agregaron en HEC-RAS, se aclara para no tener confusiones. Los hidrogramas de las subcuencas Bg y F ya no fueron agregados ya que estas ya están incluidas en la subcuenca Z.

Unsteady Flow Data - HUprincipal

FileOptionsHelp

Description:

Boundary ConditionsInitial ConditionsMeteorological DataObserved Data

Boundary Condition Types

Stage Hydrograph	Flow Hydrograph	Stage/Flow Hydr.	Rating Curve
Normal Depth	Lateral Inflow Hydr.	Uniform Lateral Inflow	Groundwater Interflow
T.S. Gate Openings	Elev Controlled Gates	Navigation Dams	IB Stage/Flow
Rules	Precipitation		

Add Boundary Condition Location

Add RS ...	Add SA/2D Flow Area ...	Add Conn ...	Add Pump Sta ...	Add Pipe Node ...
------------	-------------------------	--------------	------------------	-------------------

Select Location in table then select Boundary Condition Type

River	Reach	RS	Boundary Condition
1 rio	balsas	959028.2	Flow Hydrograph
2 rio	balsas	507493.6	Lateral Inflow Hydr.
3 rio	balsas	494302.7	Lateral Inflow Hydr.
4 rio	balsas	470310.0	Lateral Inflow Hydr.
5 rio	balsas	435141.2	T.S. Gate Openings
6 rio	balsas	416466.7	Lateral Inflow Hydr.
7 rio	balsas	355907.6	Lateral Inflow Hydr.
8 rio	balsas	337833.2	Lateral Inflow Hydr.
9 rio	balsas	304915.1	Lateral Inflow Hydr.
10 rio	balsas	282152.6	Lateral Inflow Hydr.
11 rio	balsas	254837.8	Lateral Inflow Hydr.
12 rio	balsas	231680.0	Lateral Inflow Hydr.
13 rio	balsas	213691.6	Lateral Inflow Hydr.
14 rio	balsas	143987.9	Lateral Inflow Hydr.
15 rio	balsas	15603.87	T.S. Gate Openings
16 rio	balsas	11201.72	Flow Hydrograph
17 tributario	infiernillo	70729.51	Flow Hydrograph
18 tributario	infiernillo	43190.92	Flow Hydrograph

Storage/2D Flow Areas	Boundary Condition
1 2DFLOWAREA BCLine: AAT	Normal Depth
2 2DFLOWAREA BCLine: AAB	Normal Depth
3 2DFLOWAREA BCLine: AA	Normal Depth

Figura 11.- Tabla de secciones con hidrogramas en HEC-RAS (elaboración propia)

Unsteady Flow Data - HUprincipal

File Options Help

Description:

Boundary Conditions Initial Conditions Meteorological Data Observed Data

Initial Flow Distribution Method

☐ Restart Filename:

☐ Prior WS Filename:

Profile:

☒ Enter Initial flow distribution (Optional - leave blank to use boundary condnions)

Add RS...

User specified fixed flows (Optional)				
	River	Reach	RS	Initial Flow
1	rio	balsas	959028.2	3.605769E-02
2	tributario	infernillo	70729.51	1.462729E-02

Initial Elevation of Storage Areas/2D Flow Areas (Optional) Import Min SA Elevation(s)

☐ Keep initial elevations constant during warmup

	Storage Area/2D Flow Area	Initial Elevation
1	2D: 2DFLOWAREA	5

Figura 12.- Condiciones iniciales HEC-RAS (elaboración propia)

Tabla 2.- Secciones por subcuenca en geometría en HEC-RAS (elaboración propia)

Subcuenca	Sección
Z	507494
Ba4	494303
D	143988
H	213692
CaCg	337833
CbCc	254838
Bb1	470310
Bb2b3b4Bc	416467
CeCf	304015
Ch	355908
G	282153
Cd	231680

4.4.4.3 Condiciones iniciales de elevación en los embalses para el modelo hidráulico

Presa José María Morelos “La Villita”

Para la presa “La Villita” se introdujeron los datos de su cortina los cuales fueron de 420 metros de longitud y 60 metros de altura, para el vertedero 116 metros de longitud, esta se encuentra en la sección 15603.87.

Presa Carlos Ramírez Ulloa “El Caracol”

Para la presa “El Caracol” se introdujeron los datos de su cortina los cuales fueron 126 metros de altura y 180 metros de longitud, esta se encuentra en la sección 416466.7.

Presa Adolfo López Mateos “Infiernillo”

Para la presa “Infiernillo” se introdujeron los datos de su cortina los cuales fueron 149 metros de altura y 350 metros de longitud, se le incluyeron sus tres vertederos de descarga que cuentan con un diámetro de 13 metros, se encuentra en la sección 67126.91.

5 CAPITULO 5.- Resultados

5.1 Áreas de subcuencas, longitudes y pendientes de cauces principales

En la tabla siguiente se presentan las áreas totales de cada subcuenca que se obtuvo del análisis del escurrimiento al cauce principal del sistema de presas, de la misma forma se encuentran las longitudes del cauce principal de cada subcuenca.

Tabla 3. Áreas, longitudes y pendiente del cauce principal para cada subcuenca (elaboración propia)

Subcuenca	Área total (km ²)	Longitud de cauce principal (km)	Pendiente media
Río Balsas	117405.45	1113.94	7 %
A	10943.39	256.65	5 %
D	7503.18	215.59	6 %
H	5525.90	135.81	5 %
J	11660.84	234.97	4 %
L	6216.36	154.25	5 %
F	9507.79	172.59	4 %
E	5057.82	122.95	7 %
G	13347.88	226.91	6 %
Cf	1235.33	116.15	6 %
Ch	2951.49	115.06	5 %
Af, g	11177.88	244.05	5 %
Cb, c	1486.41	43.21	2 %
Ca, g	2322.29	93.39	4 %
Ce	1199.84	80.61	5 %
Cd	2628.52	170.67	5 %
Ae	4440.54	183.56	3 %
Bc	1905.77	82.66	5 %
Bg	1125.82	88.47	5 %
Ba1	560.04	54.97	6 %
Ba2	2417.29	61.43	6 %
Ba3	1364.47	41.39	5 %
Ba4	1595.33	48.06	5 %
Bb1	2371.13	91.01	5 %
Bb2	1148.26	33.71	9 %
Bb3	701.73	65.75	4 %
Bb4	908.06	32.85	7 %

5.2 Perfiles del terreno del cauce principal y por subcuencas

De la Figura 13 a la 36 se muestran los perfiles de terreno tanto del cauce principal como de las subcuencas analizadas.

Las contrapendientes que se observan en las siguientes Figuras se corrigieron ajustando una línea de tendencia que coincidió con la pendiente del cauce.

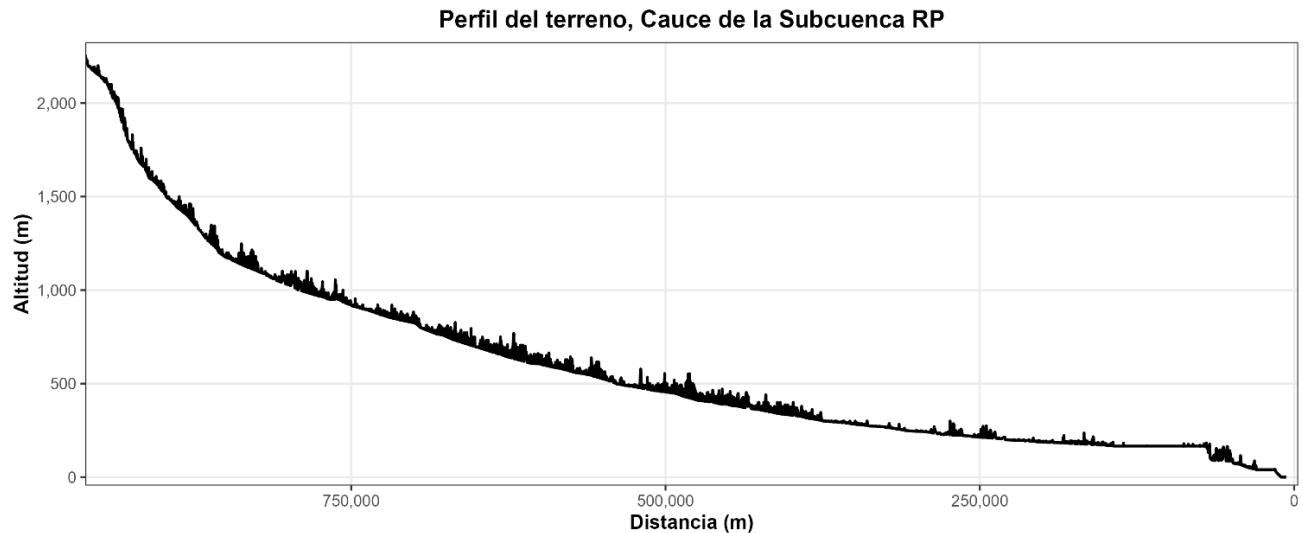


Figura 13.- Perfil del terreno, Cauce de la Subcuenca RP (elaboración propia)

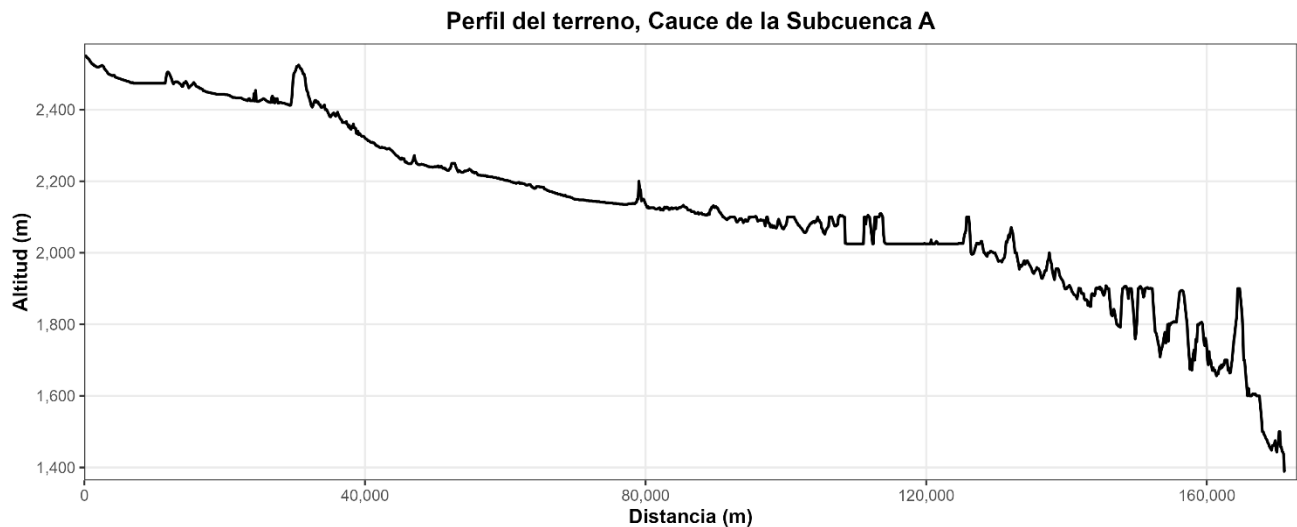


Figura 14.- Perfil del terreno, Cauce de la Subcuenca A (elaboración propia)

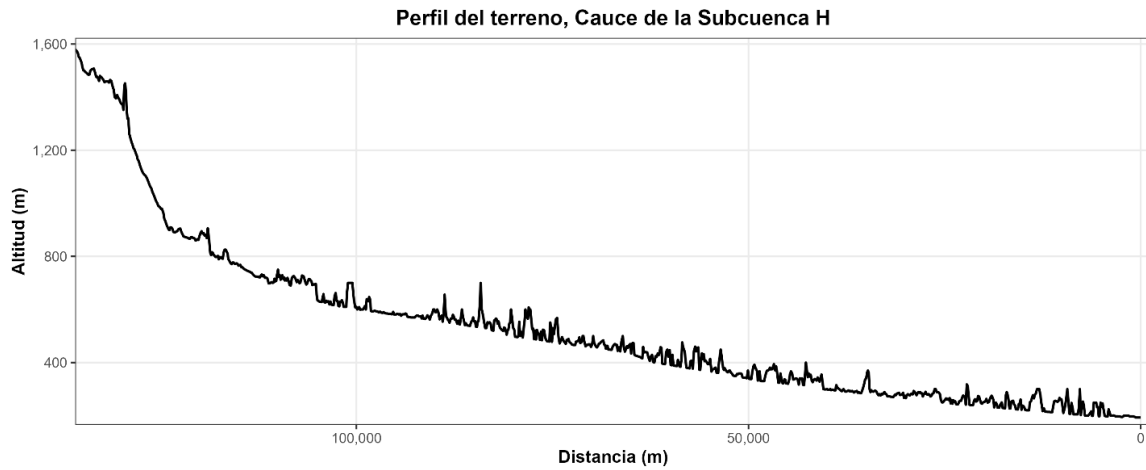


Figura 15.- Perfil del terreno, Cauce de la Subcuenca Ba1(elaboración propia)

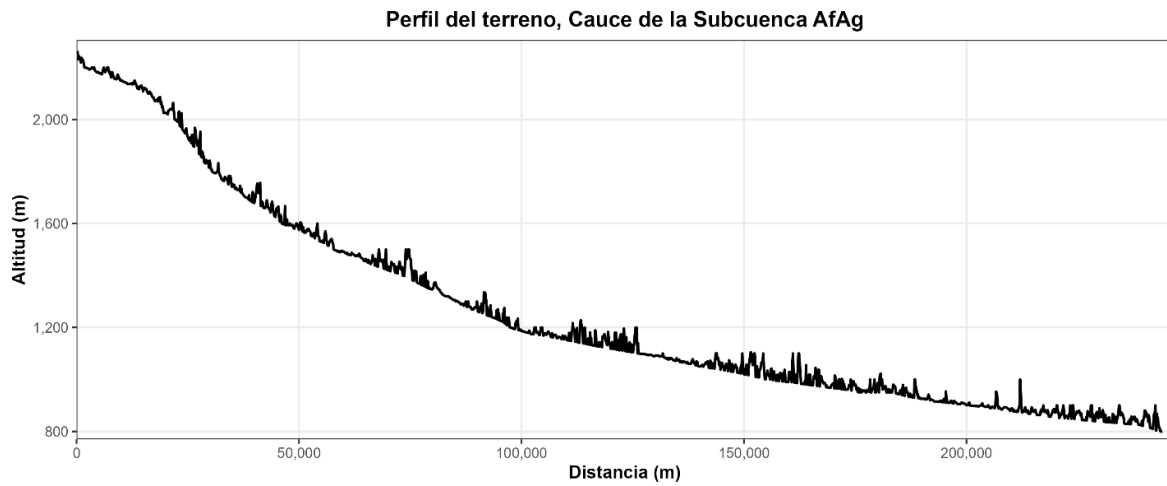


Figura 16.- Perfil del terreno, Cauce de la Subcuenca AfAg (elaboración propia)

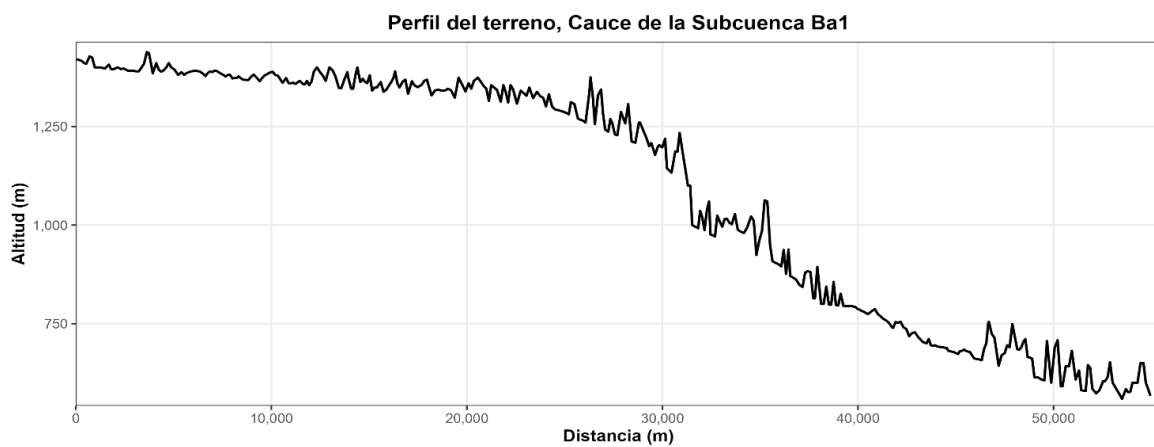


Figura 17.- Perfil del terreno, Cauce de la Subcuenca H (elaboración propia)

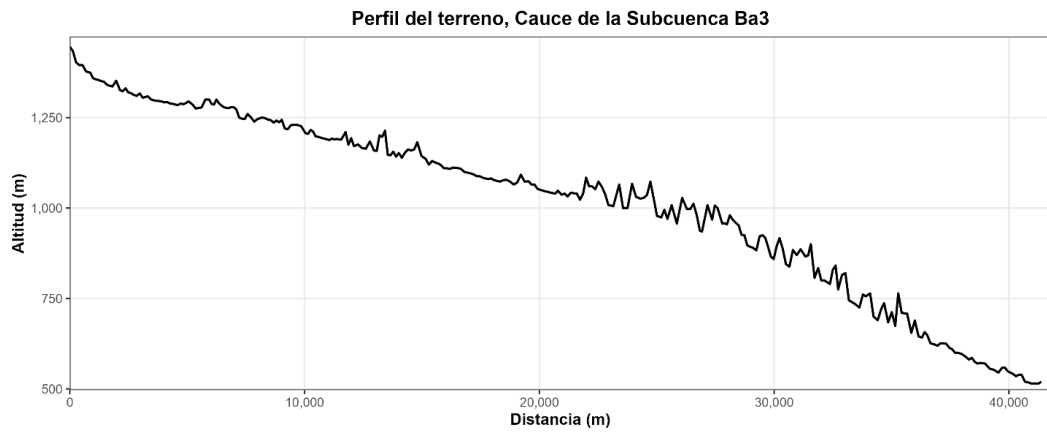


Figura 18.- Perfil del terreno, Cauce de la Subcuenca Ba3 (elaboración propia)

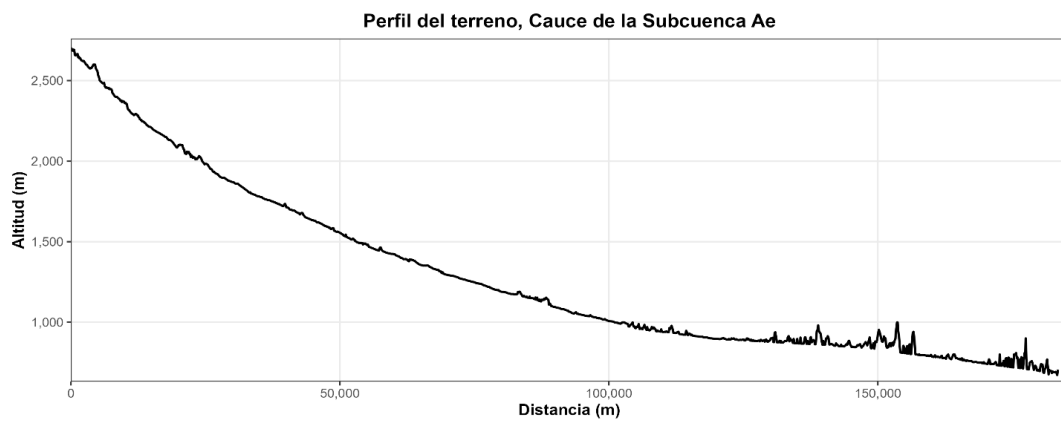


Figura19.- Perfil del terreno, Cauce de la Subcuenca Ae (elaboración propia)

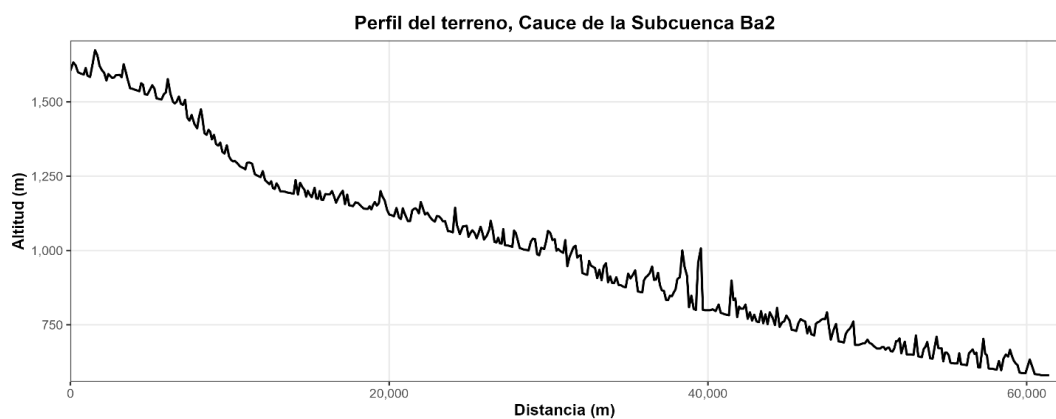


Figura 20.- Perfil del terreno, Cauce de la Subcuenca Ba2 (elaboración propia)

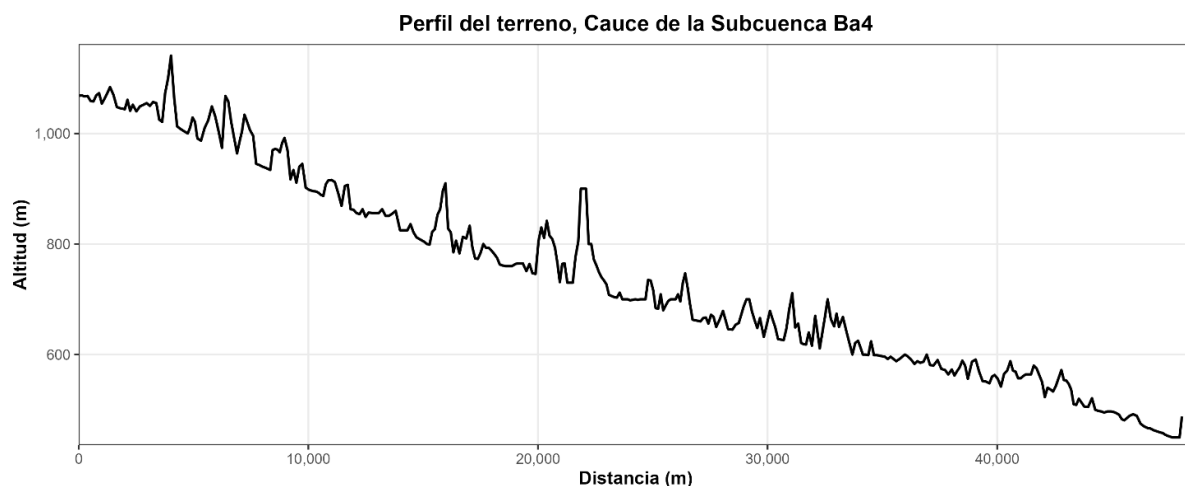


Figura 21.- Perfil del terreno, Cauce de la Subcuenca Ba4 (elaboración propia)

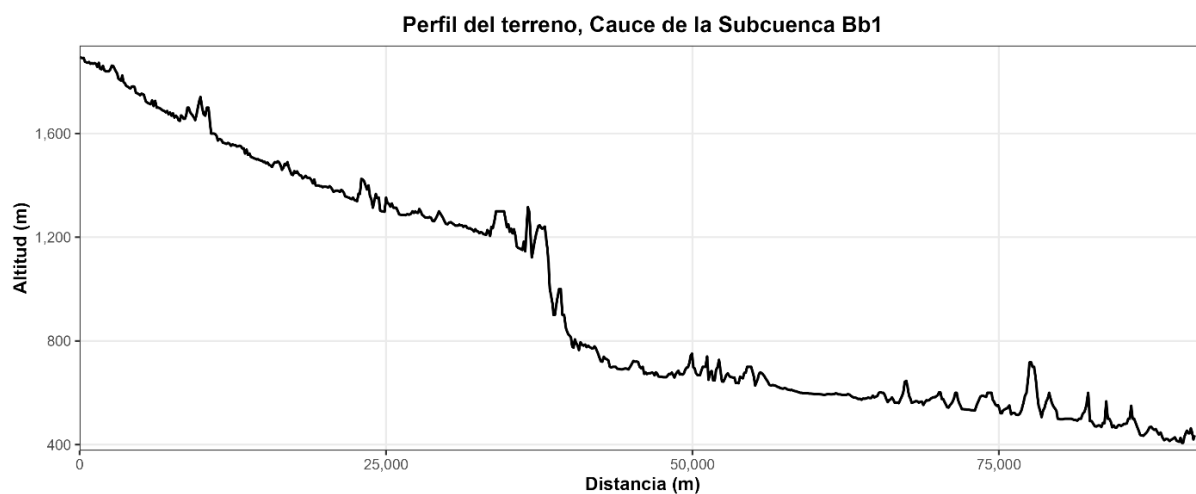


Figura 22.- Perfil del terreno, Cauce de la Subcuenca Bb1 (elaboración propia)

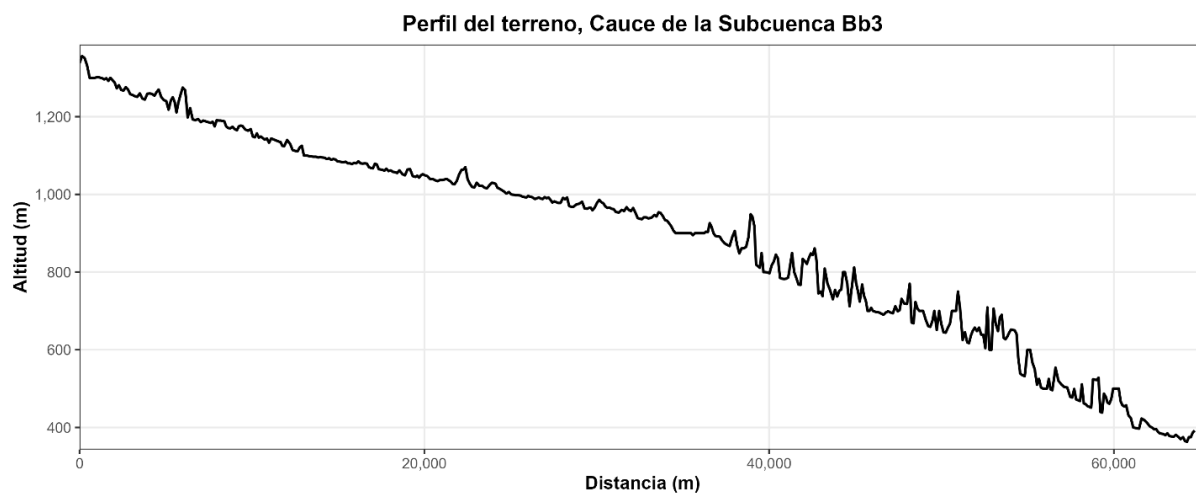


Figura 23.- Perfil del terreno, Cauce de la Subcuenca Bb3 (elaboración propia)

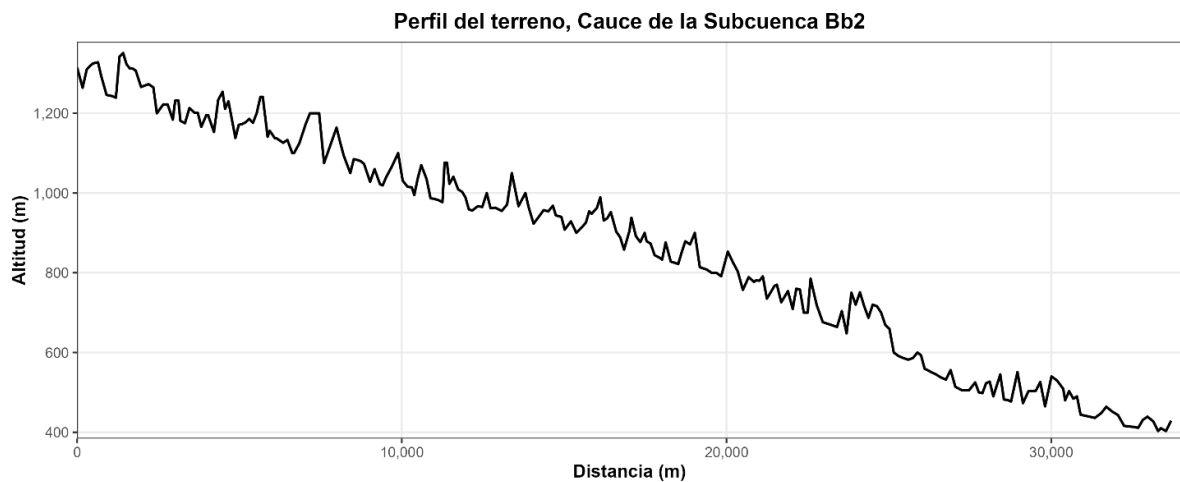


Figura 24.- Perfil del terreno, Cauce de la Subcuenca Bb2 (elaboración propia)

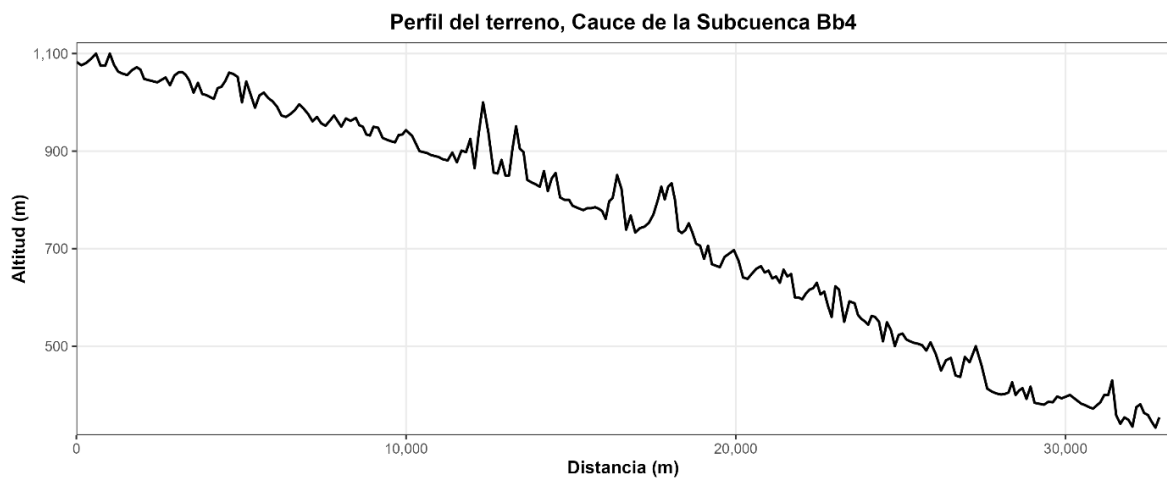


Figura 25.- Perfil del terreno, Cauce de la Subcuenca Bb4 (elaboración propia)

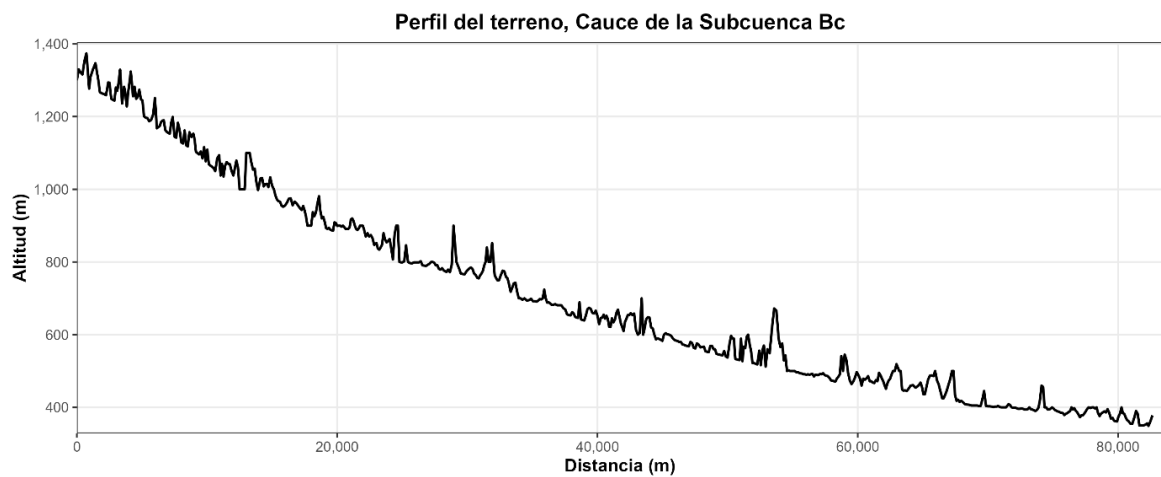


Figura 26.- Perfil del terreno, Cauce de la Subcuenca Bc (elaboración propia)

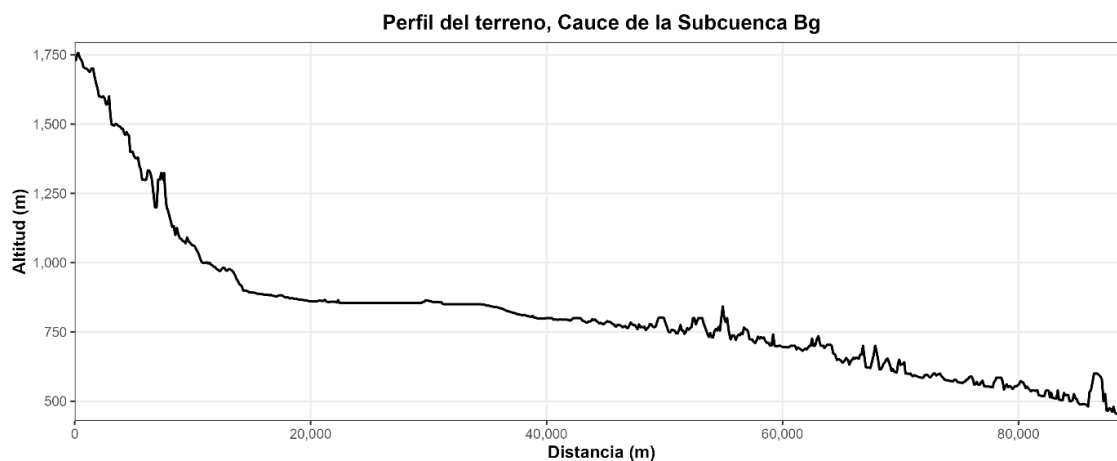


Figura 27.- Perfil del terreno, Cauce de la Subcuenca Bg (elaboración propia)

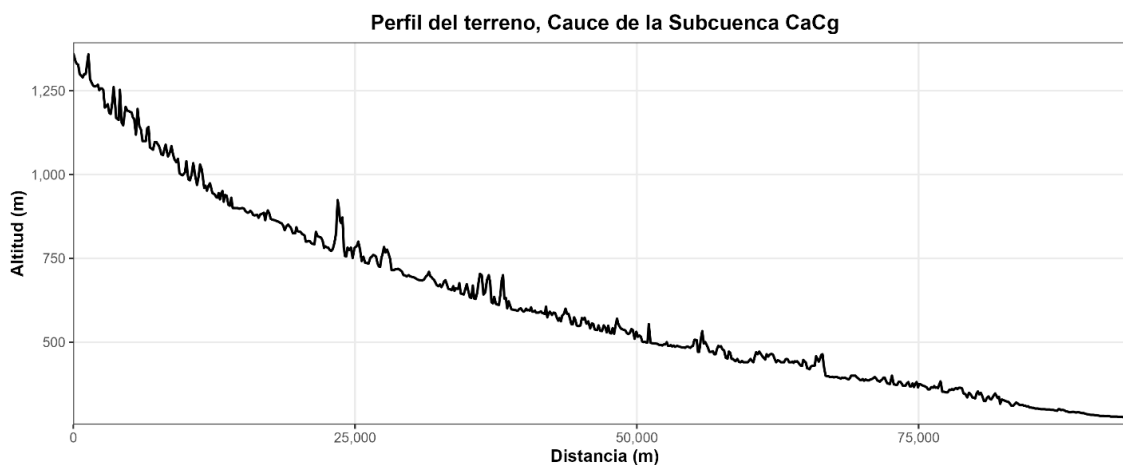


Figura 28.- Perfil del terreno, Cauce de la Subcuenca CaCg (elaboración propia)

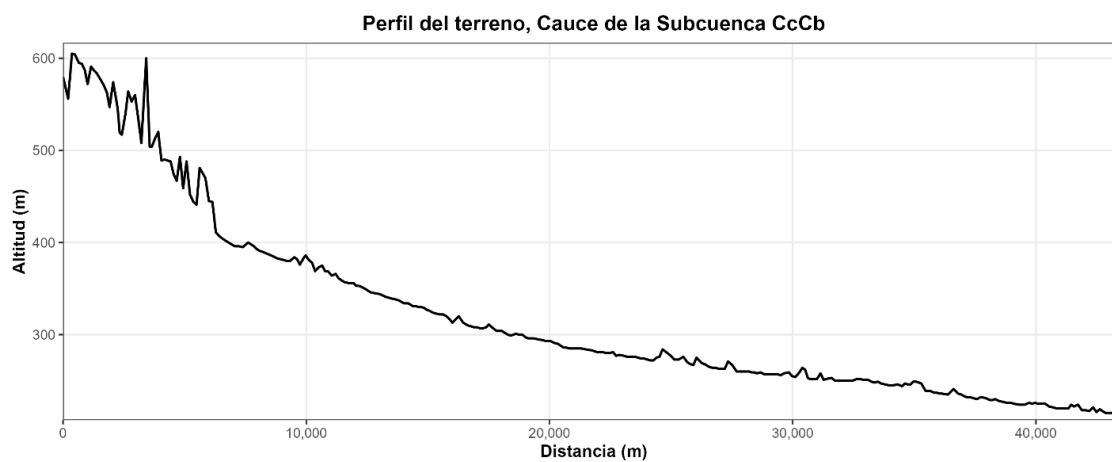


Figura 29.- Perfil del terreno, Cauce de la Subcuenca CcCb (elaboración propia)

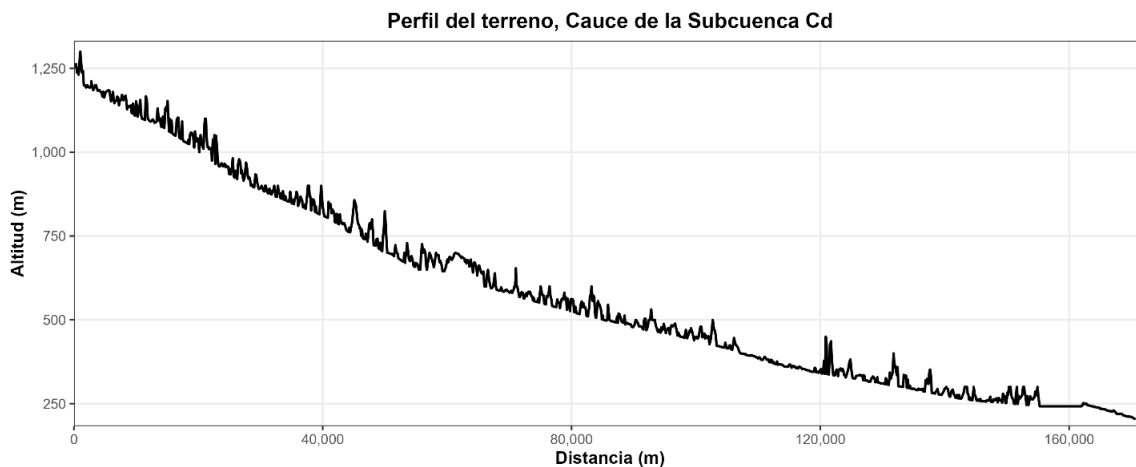


Figura 30.- Perfil del terreno, Cauce de la Subcuenca Cd (elaboración propia)

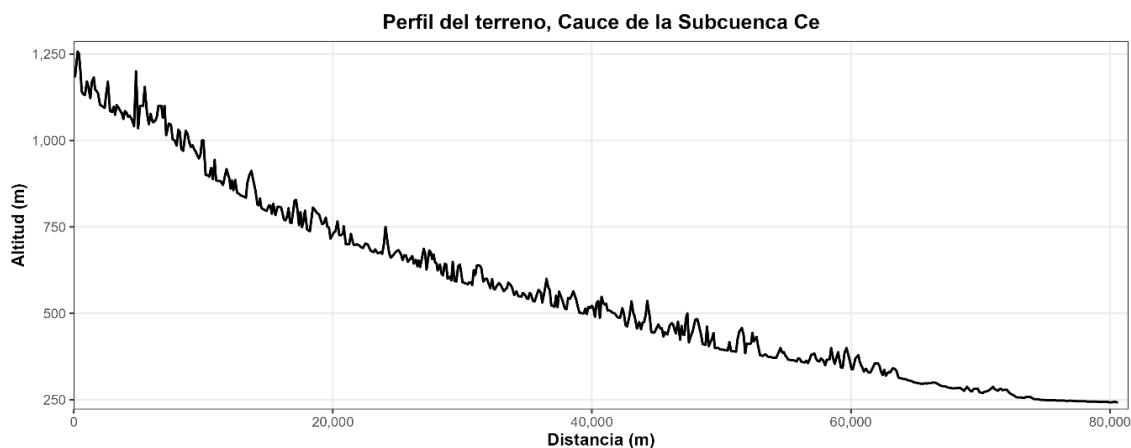


Figura 31.- Perfil del terreno, Cauce de la Subcuenca Ce (elaboración propia)

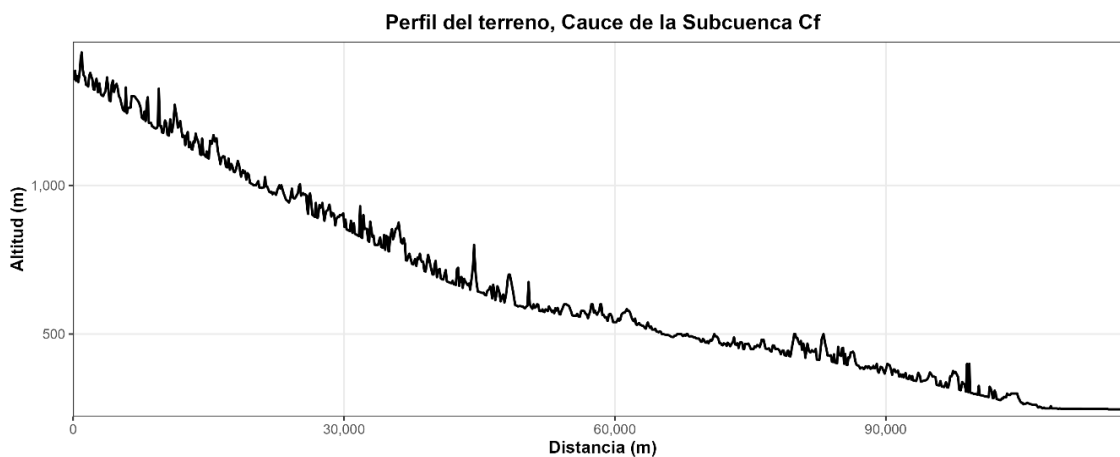


Figura 32.- Perfil del terreno, Cauce de la Subcuenca Cf (elaboración propia)

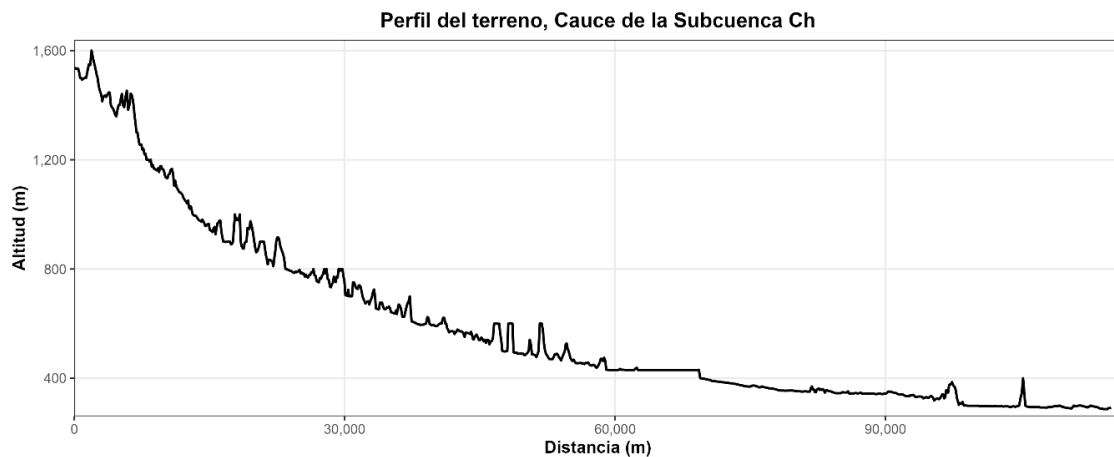


Figura 33.- Perfil del terreno, Cauce de la Subcuenca Ch (elaboración propia)

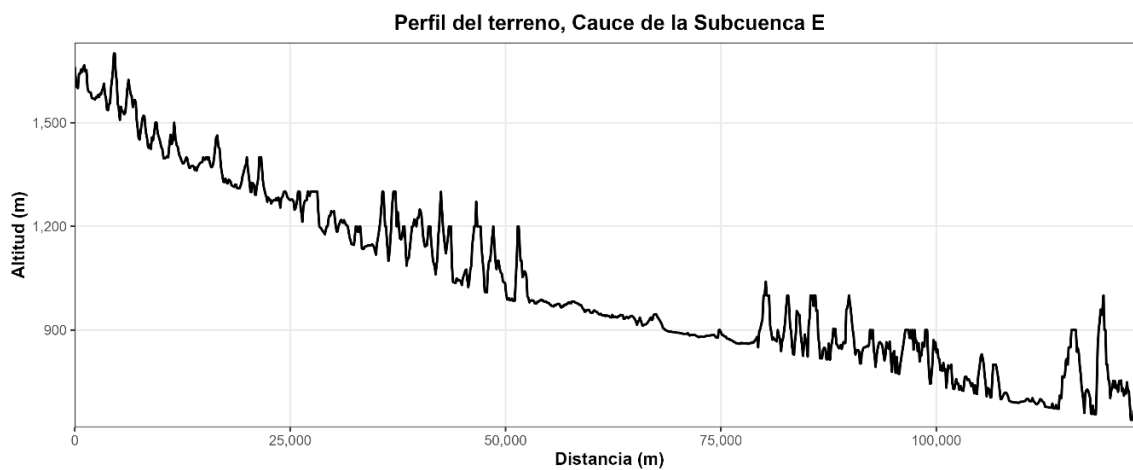


Figura 34.- Perfil del terreno, Cauce de la Subcuenca E (elaboración propia)

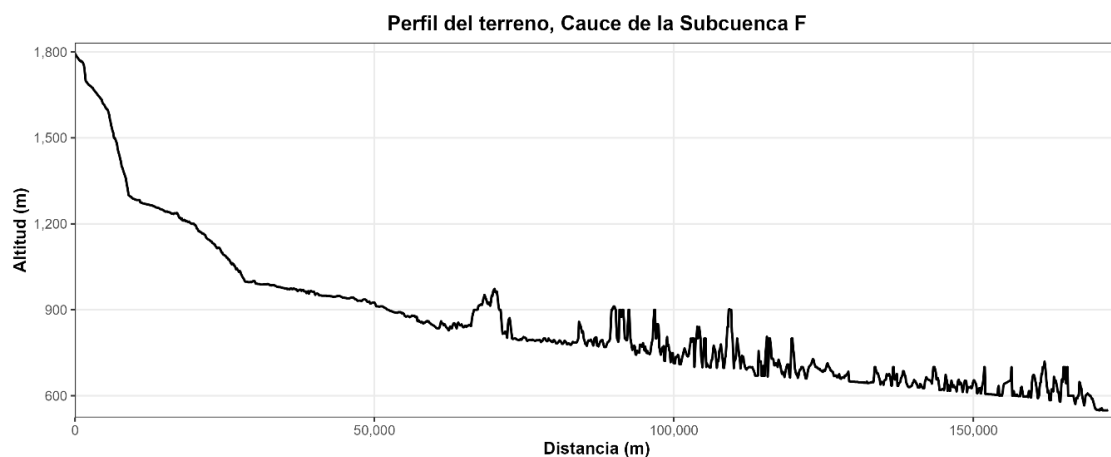


Figura 35.- Perfil del terreno, Cauce de la Subcuenca F (elaboración propia)

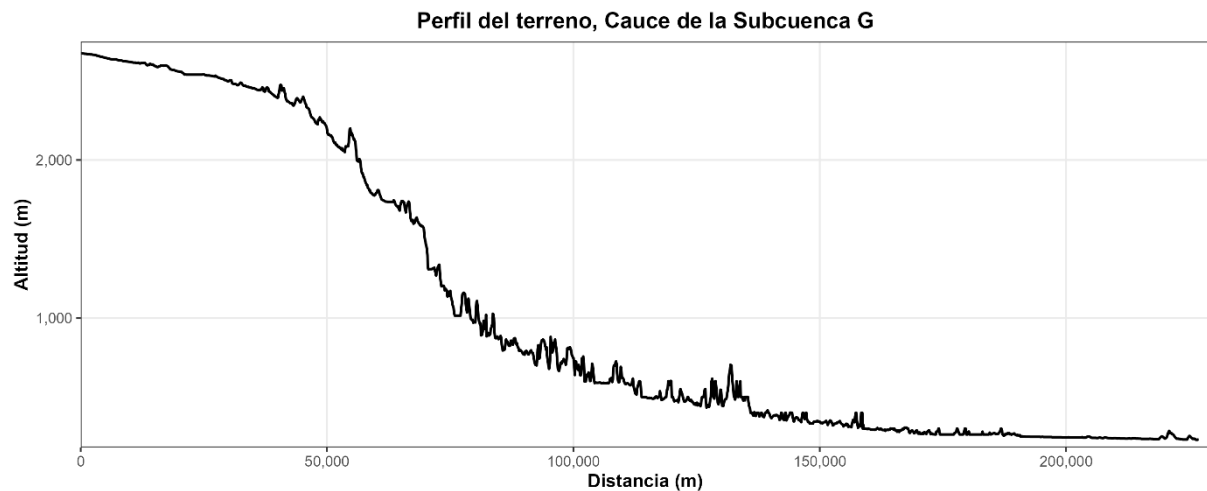


Figura 36.- Perfil del terreno, Cauce de la Subcuenca G (elaboración propia)

5.3 Comparativas de características físicas de las subcuencas, variables climáticas y parámetros del modelo

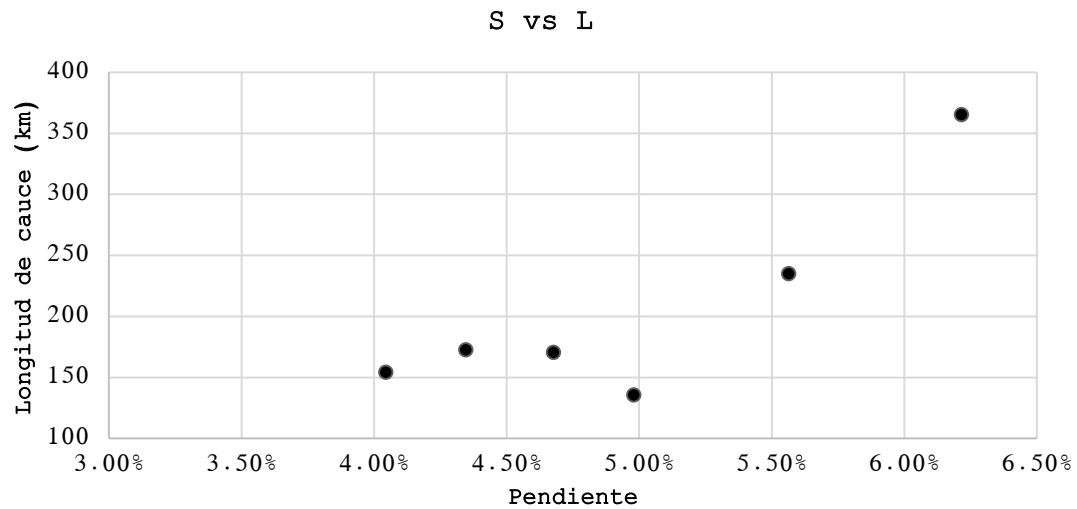


Figura 37.- Gráfico pendiente de las 6 subcuencas vs longitud de las 6 subcuencas (elaboración propia)

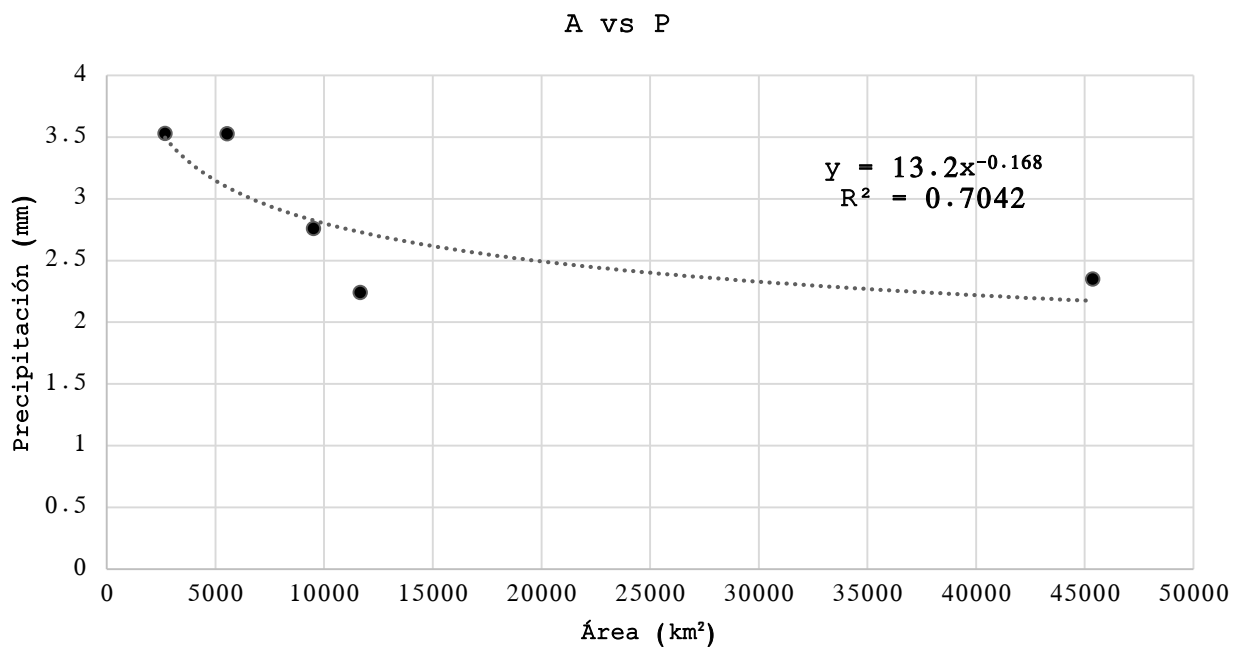


Figura 38.- Gráfico área de las 6 subcuencas vs promedio de la precipitación (elaboración propia)

En la región Balsas llueve en promedio diariamente 2.88 mm a excepción de la subcuenca Cd en donde llueve el doble con 6.55 mm.

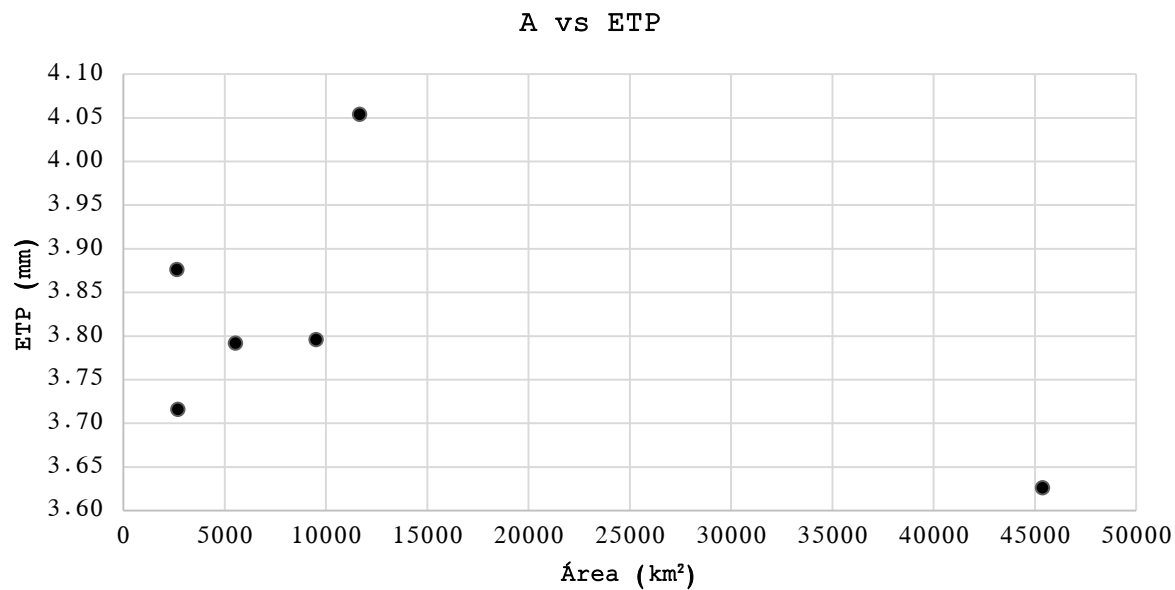


Figura 39.- Gráfico área de las 6 subcuencas vs el promedio de la evapotranspiración (elaboración propia)

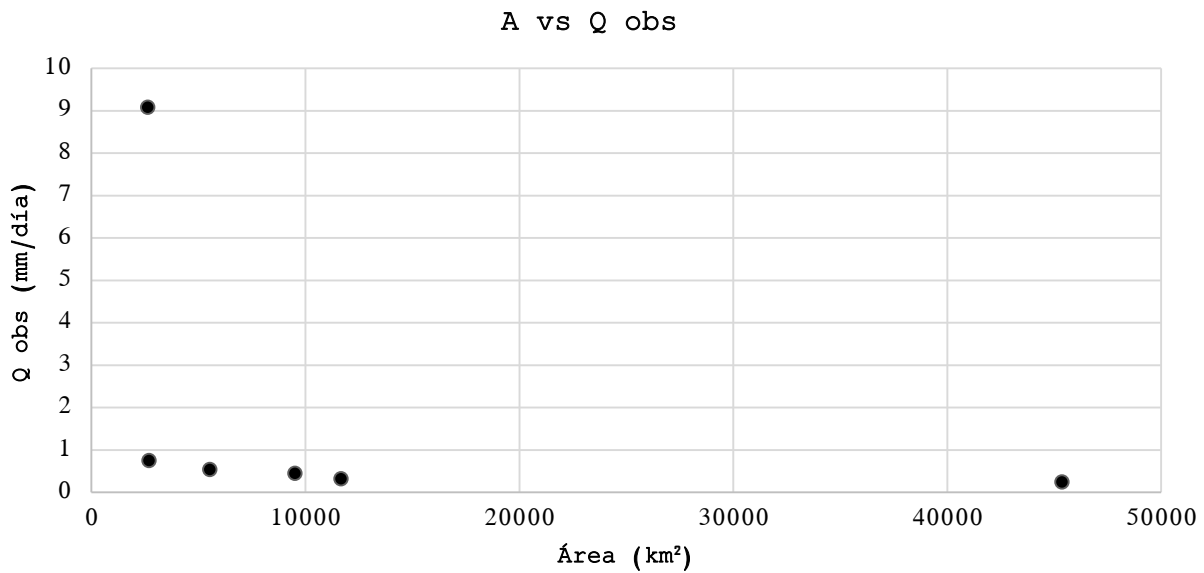


Figura 40.- Gráfico área de las 6 subcuencas vs el promedio del caudal observado (elaboración propia)

El promedio del caudal observado es de 0.46 mm/día excepto en la subcuenca Cd cuyo promedio de caudal observado es de 9.08 mm/día, esto significa que, aunque llueve el doble que el resto de la región escurre 20 veces más proporcionalmente al área de la cuenca.

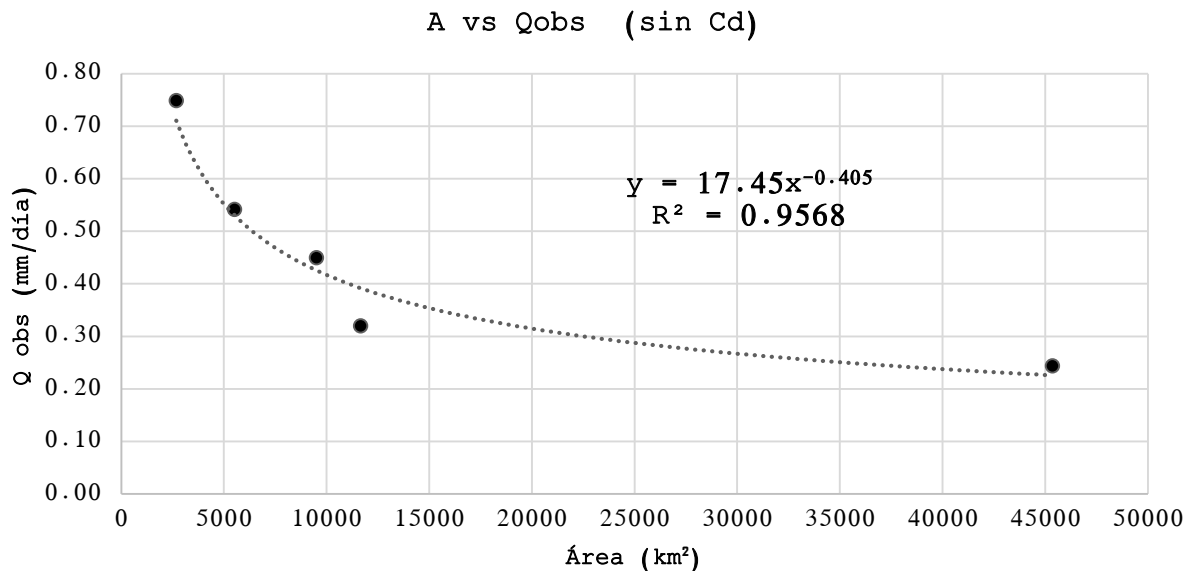


Figura 41.- Gráfico área de las 5 subcuencas vs el promedio del caudal observado sin la cuenca Cd (elaboración propia)

Se pone la línea de tendencia potencial y se obtiene la fórmula para obtener el caudal observado teniendo solo el área con un error del 5%.

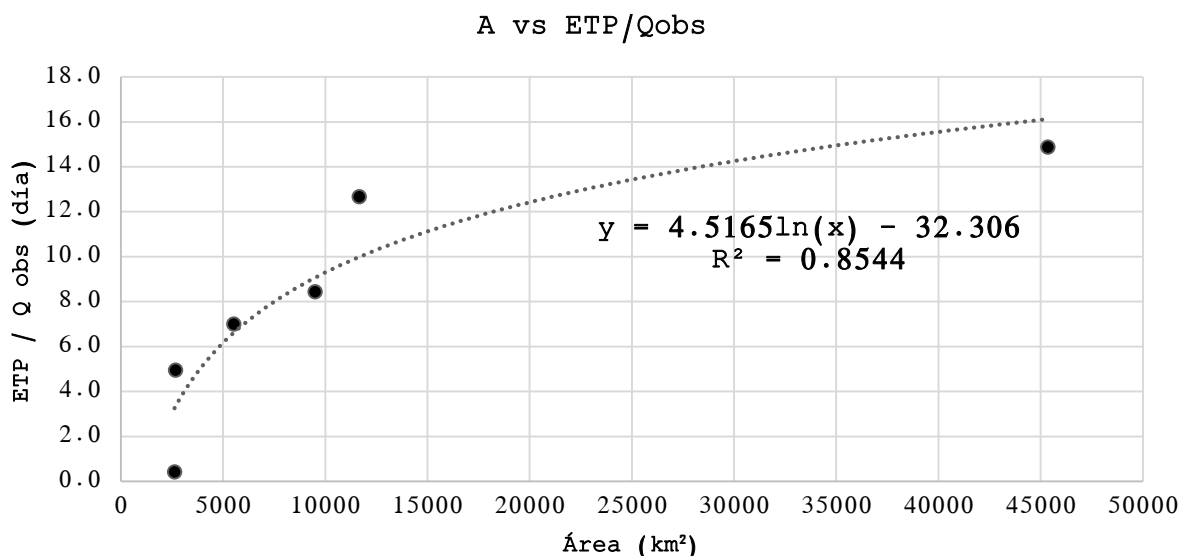


Figura 42.- Gráfico área de las 6 subcuencas vs evapotranspiración sobre el caudal observado (elaboración propia)

En la relación ETP/Qobs, si esta es mayor a 1 la evapotranspiración es mayor que el caudal, pero si la evapotranspiración es igual al caudal observado significa que la cantidad que se evapotranspira es la misma cantidad que se escurre, en la situación en que la relación ETP/Qobs sea menor a 1 significa que el escurrimiento es mayor que la evapotranspiración.

Con la ecuación que se obtuvo en el gráfico de la Figura 41 se llegó a la conclusión que en caso futuro de tener solo el área a trabajar se podría hacer el despeje de la evapotranspiración, dato que se puede conseguir sin hidrometría y así ya se tendría el caudal observado de la zona de interés.

Se obtuvo la línea de tendencia logarítmica al igual que el coeficiente de determinación R^2 de 0.85, lo cual nos indica que se tiene el 15% de error que es bastante bueno para trabajar.

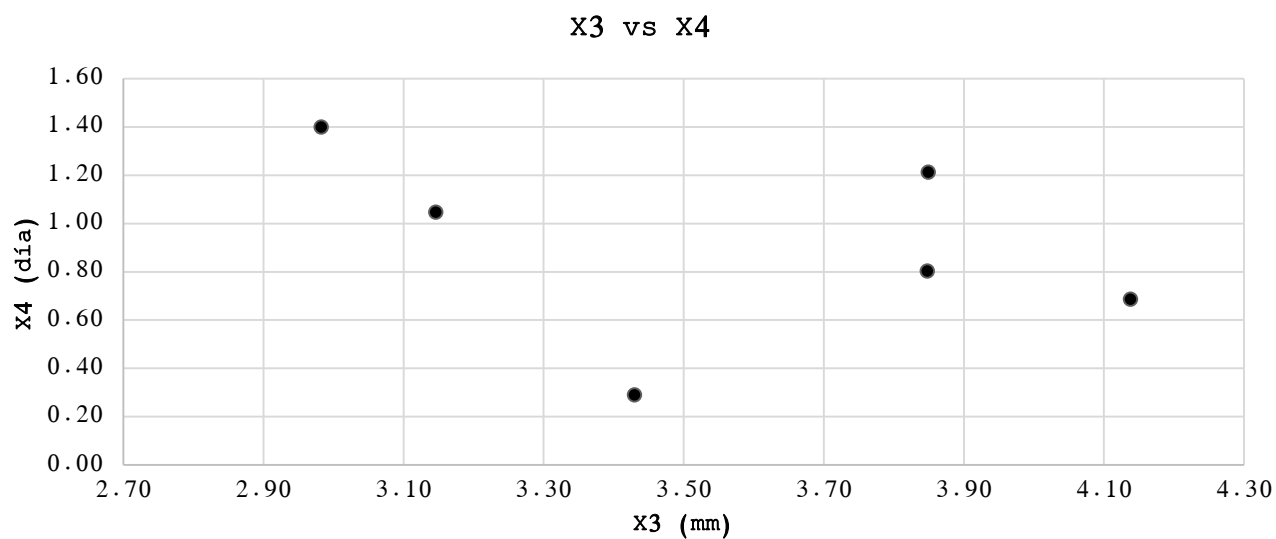


Figura 43.- Gráfico parámetros X3 vs X4 de las 6 subcuencas (elaboración propia)

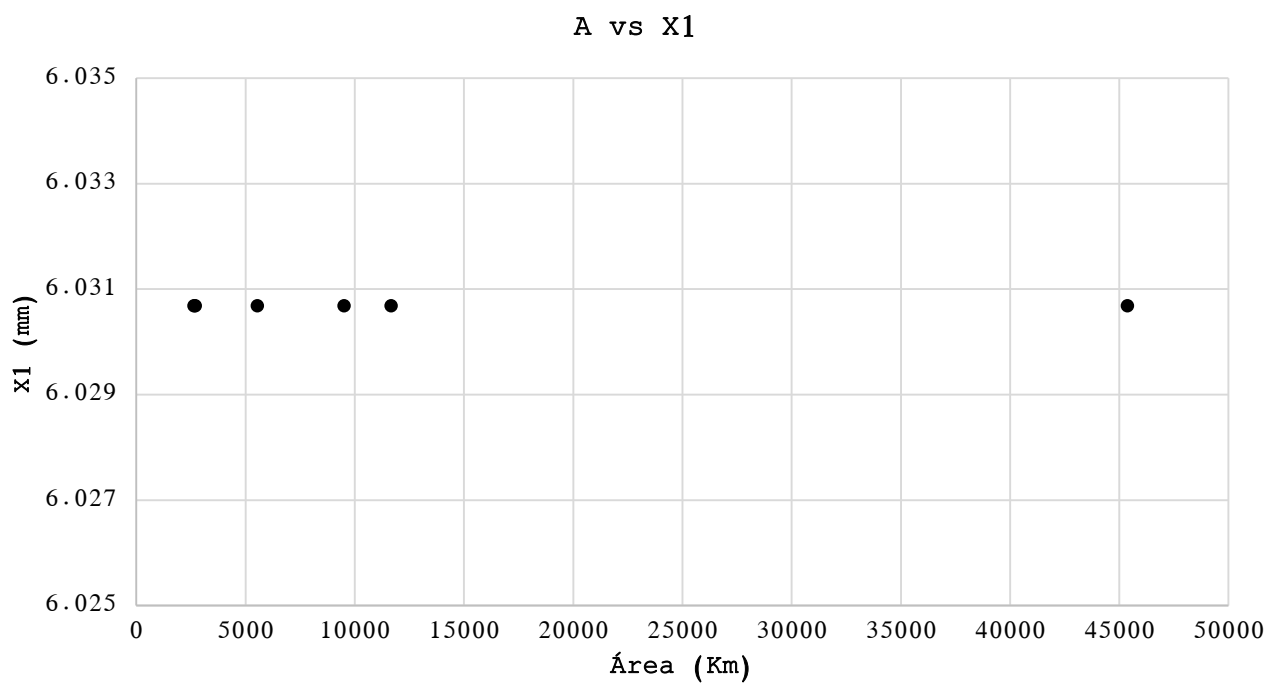


Figura 44.- Gráfico área de las 6 subcuencas vs parámetro X1 (elaboración propia)

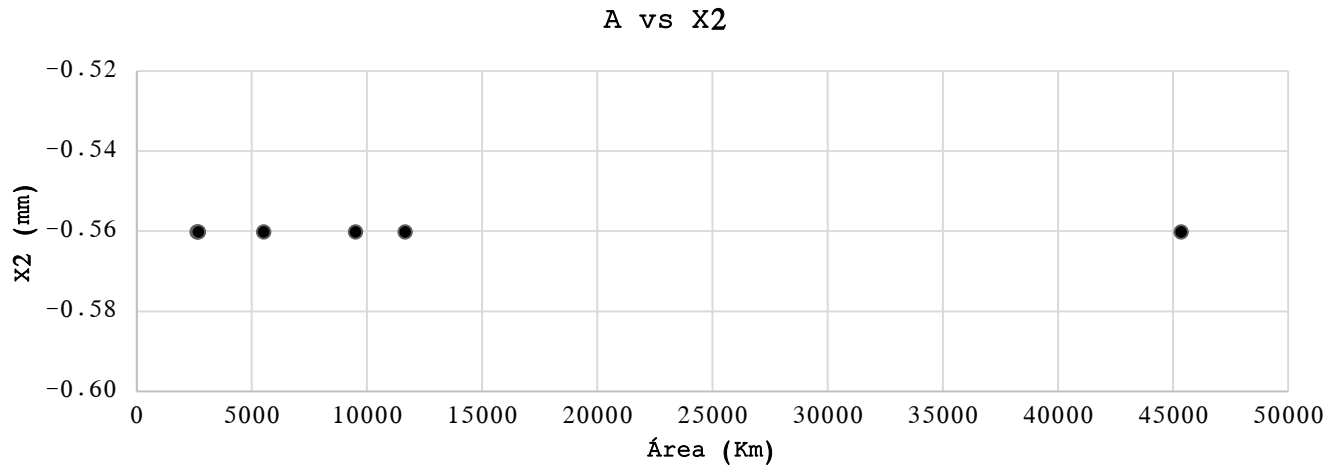


Figura 45.- Gráfico área de las 6 subcuencas vs parámetro X2 (elaboración propia)

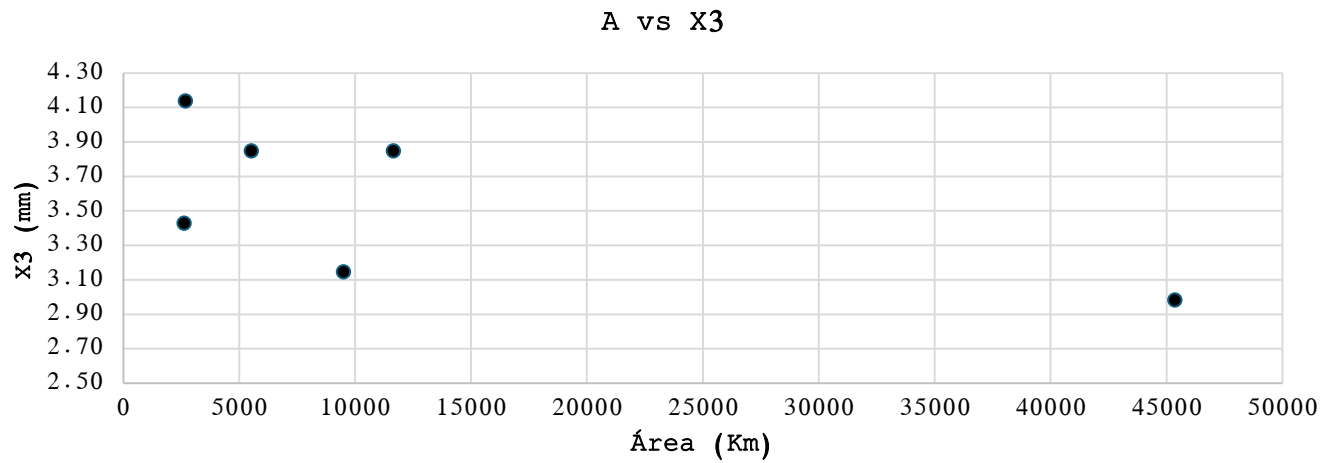


Figura 46.- Gráfico área de las 6 subcuencas vs parámetros X3 (elaboración propia)

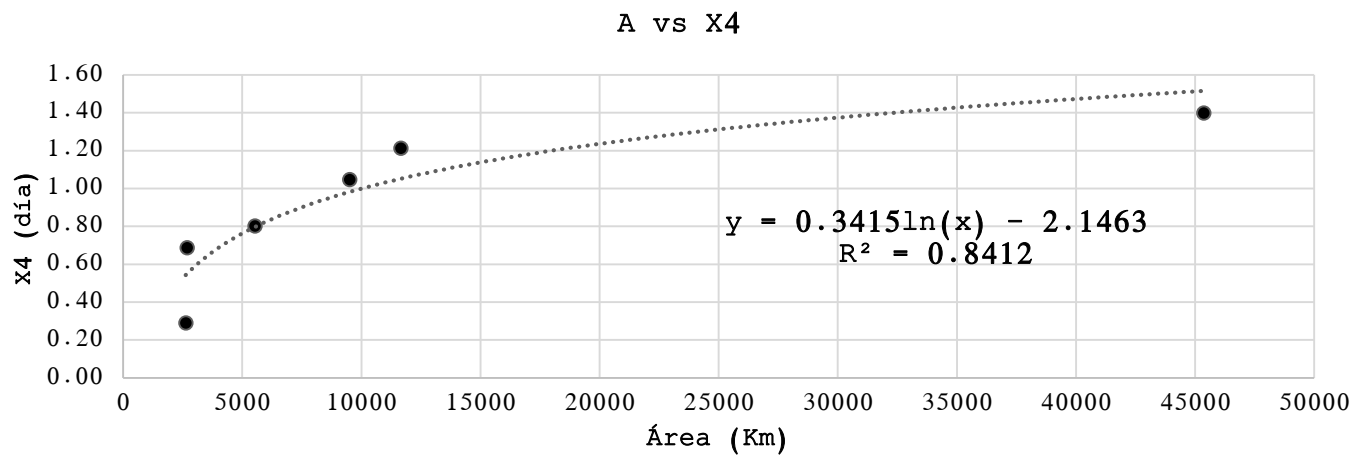


Figura 47.- Gráfico área de las 6 subcuencas vs parámetro X4 (elaboración propia)

5.4 Climatología

En la siguiente tabla (4) se encuentran el número de estaciones climatológicas analizadas para cada subcuenca hidrométrica, se seleccionó el doble o más de N (calculado con ayuda del área de cada subcuenca) para así tener mayor precisión.

Tabla 4. Número de estaciones climatológicas analizadas por cada subcuenca hidrométrica (elaboración propia)

Subcuenca	Número de estaciones a analizar (N)
A	16
Z	56
F	20
Cd	8
H	10
L	12
J	13

5.5 Hidrometeorología

En la tabla número 5, de manera similar se encuentran el número de estaciones climatológicas usadas para el análisis de las series de lluvias, solo que este número es el mínimo de cada subcuenca dado que se debe cumplir con que los años de registro de lluvia sean los mismos de los años de registro con caudal, recordemos que la subcuenca A fue descartada dado que no cumplía con la regla anterior.

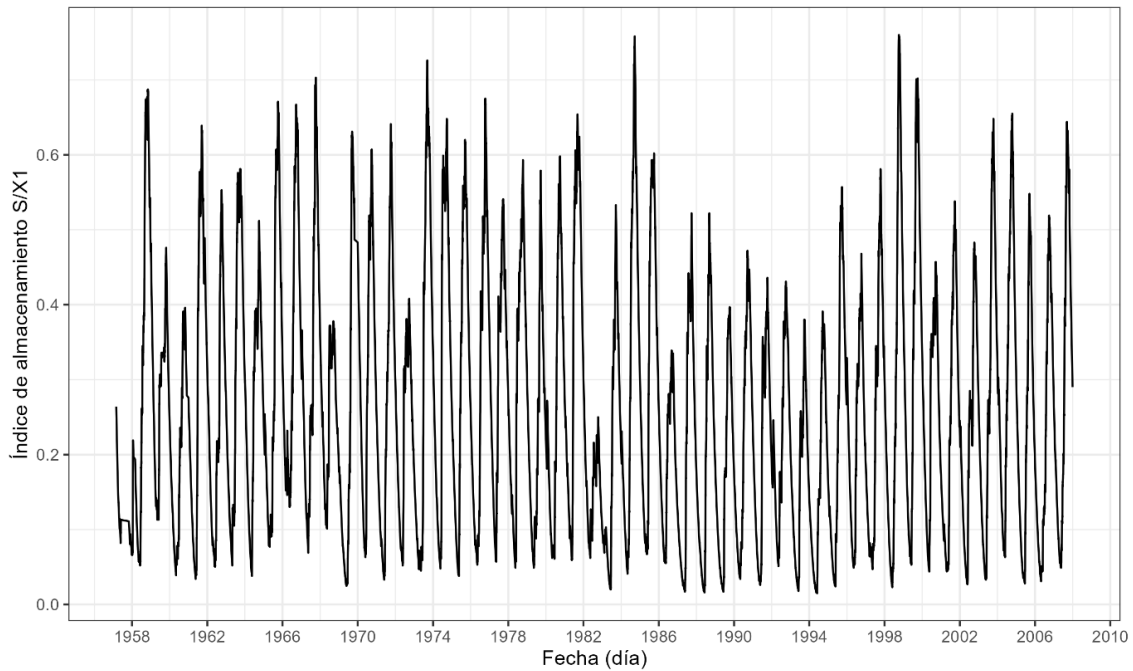
Tabla 5. Número de estaciones climatológicas analizadas con coincidencia de lluvia/caudal, y clave de la estación hidrométrica correspondiente a cada subcuenca (elaboración propia)

Subcuenca	Número de estaciones climatológicas a analizar (N)	Estación Hidrométrica correspondiente
A	Descartada	18153
Z	15	18439
F	10	18436
Cd	5	LCAMC
H	8	18487
L	7	18495
J	10	18494

5.6 Simulación 1: Modelo GR4J lluvia-gasto registros totales

Subcuenca hidrométrica Z

Tasa de almacenamiento en el suelo



Tasa de almacenamiento en el río

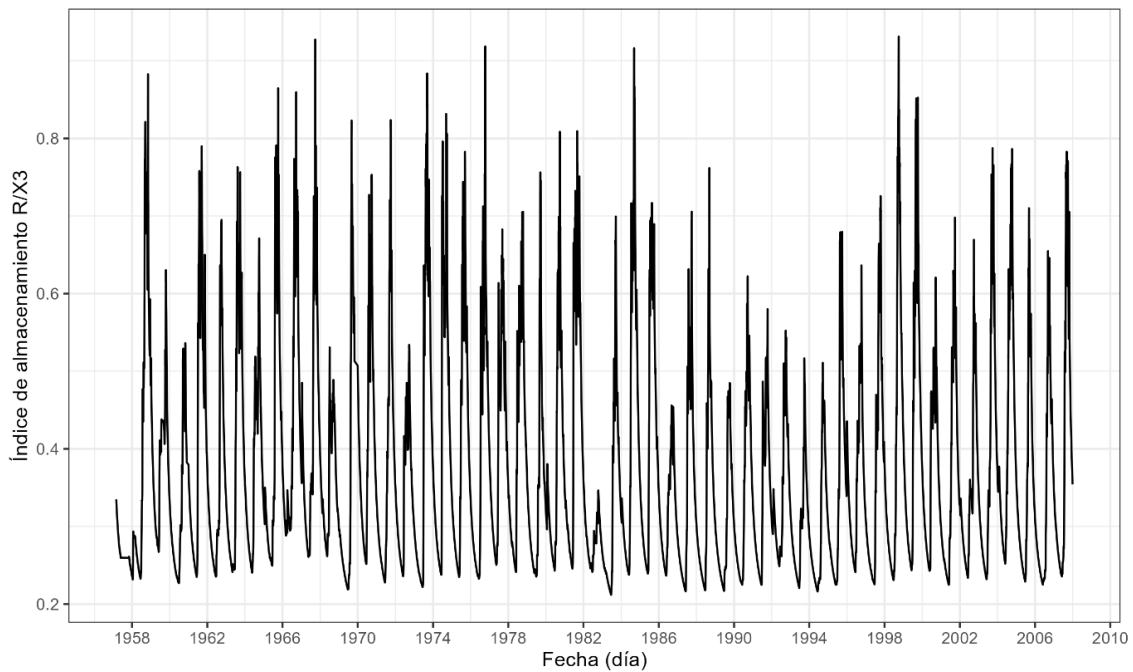


Figura 48.- Tasa de almacenamiento en el suelo y en el río, Subcuenca hidrométrica Z (elaboración propia)

Hidrograma Subcuenca Z

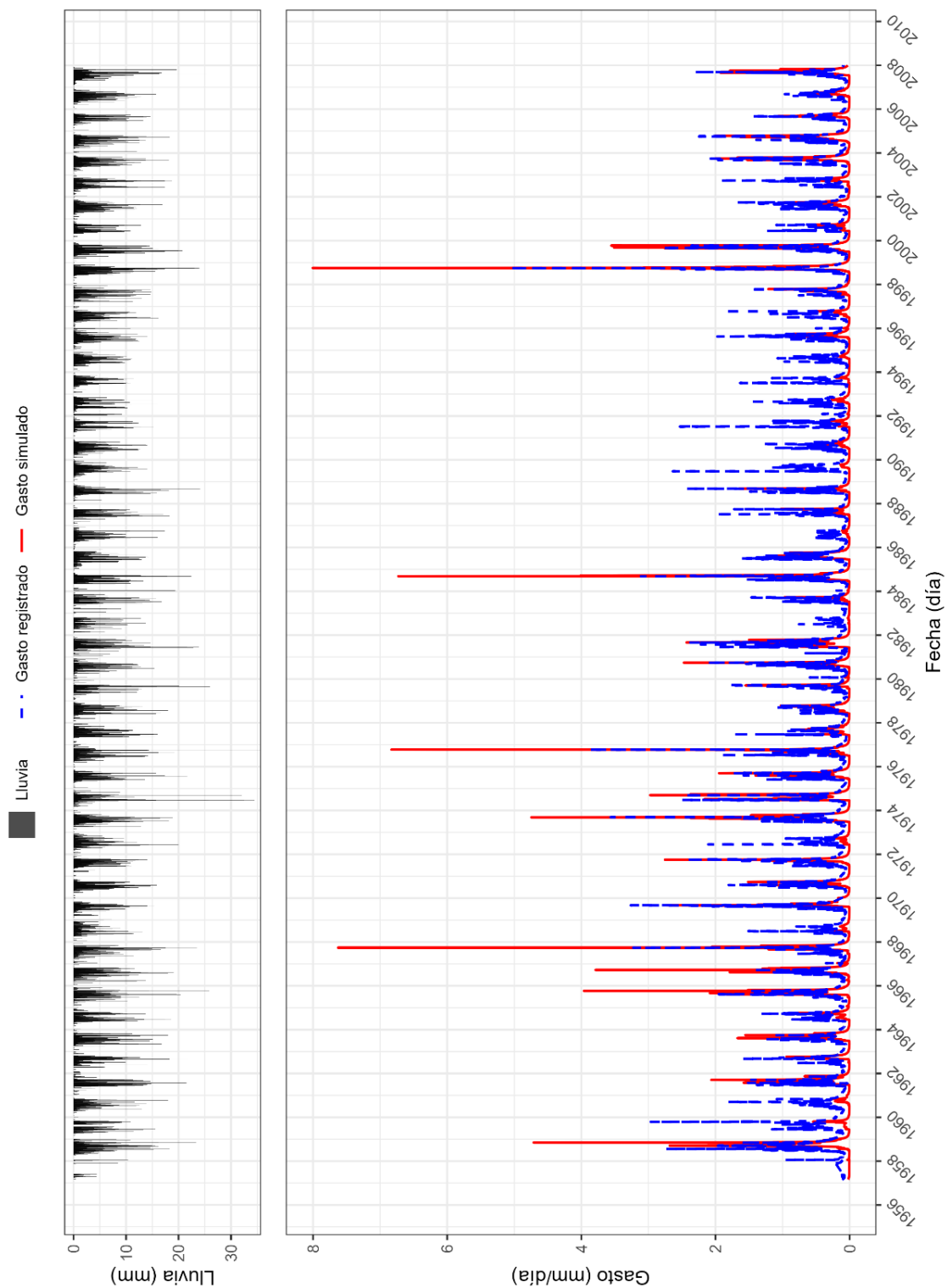


Figura 49.- Hidrograma Subcuenca Z (elaboración propia)

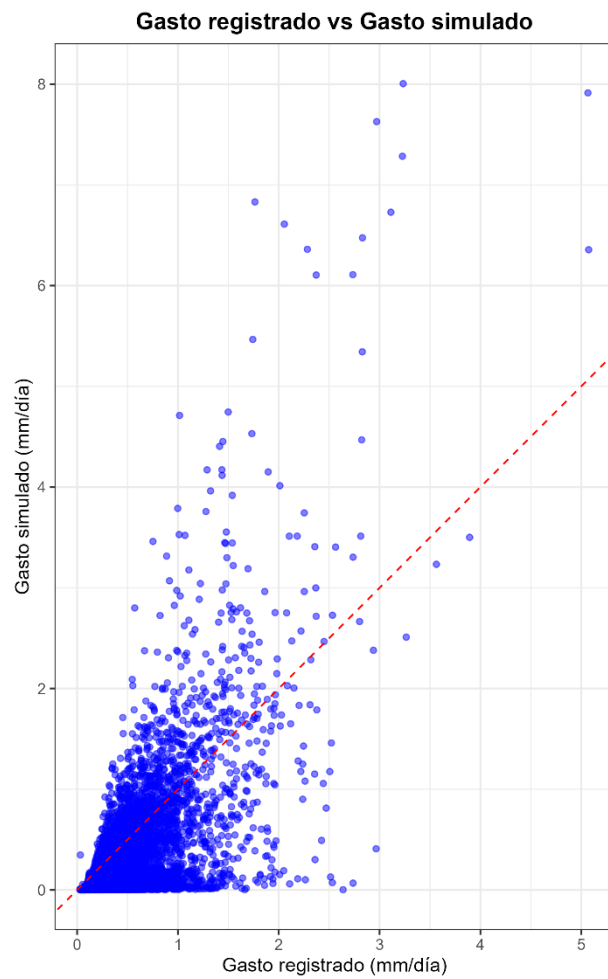


Figura 50.- Gasto registrado vs Gasto simulado, Subcuenca Z. La línea roja de 45° es para indicar la relación 1:1 (elaboración propia)

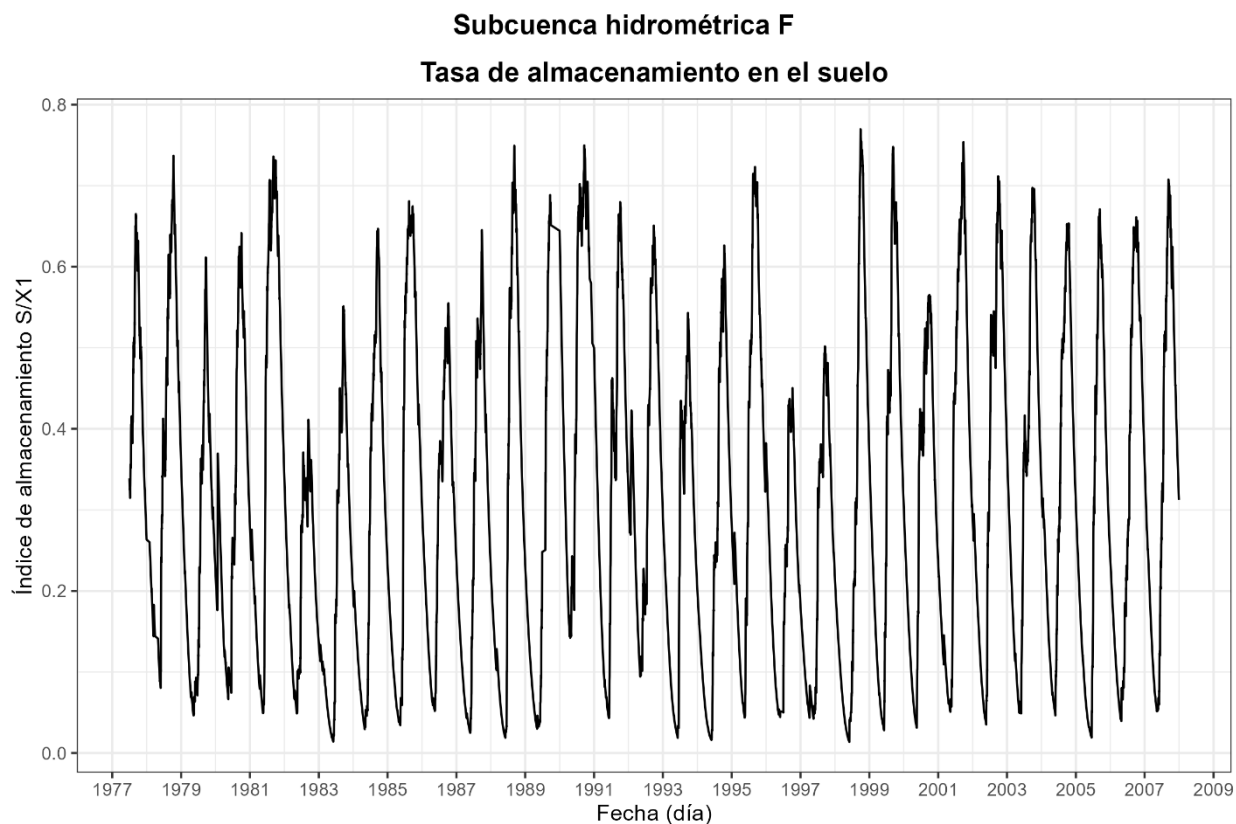
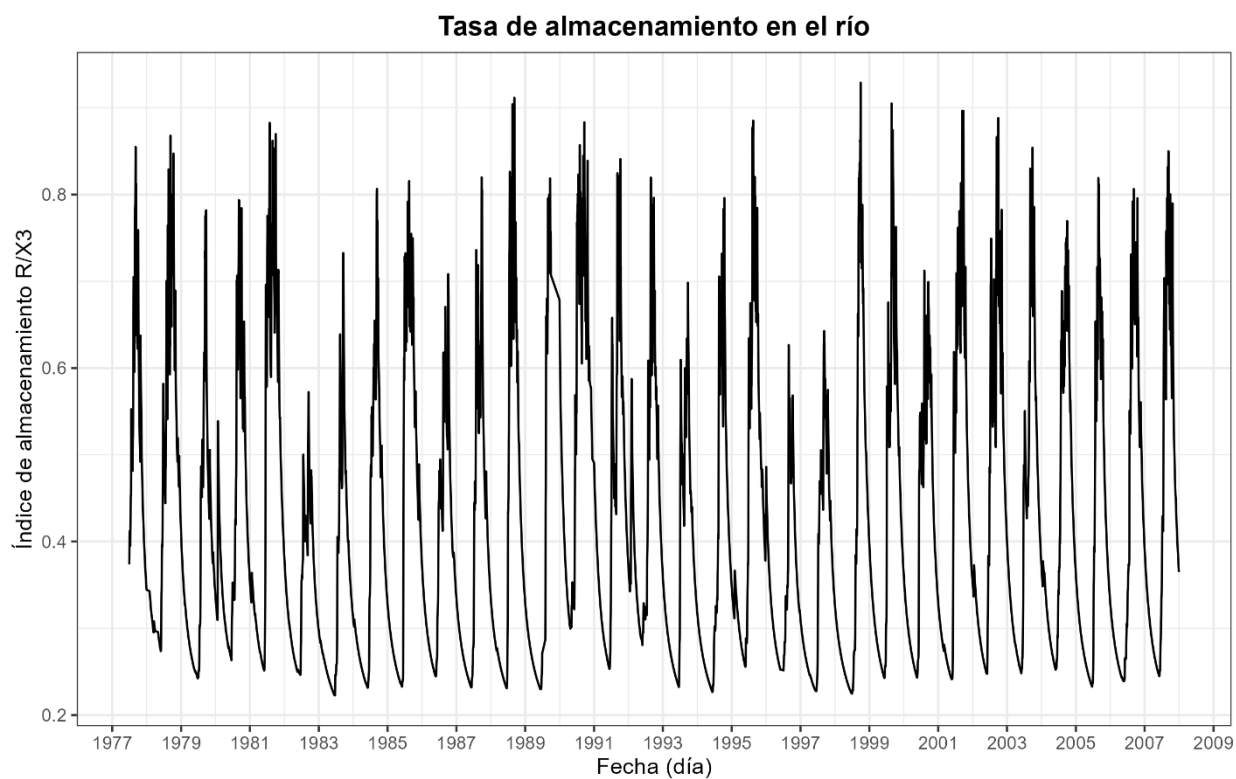


Figura 51.- Tasa de almacenamiento en el suelo y en el río, Subcuenca hidrométrica F (elaboración propia)

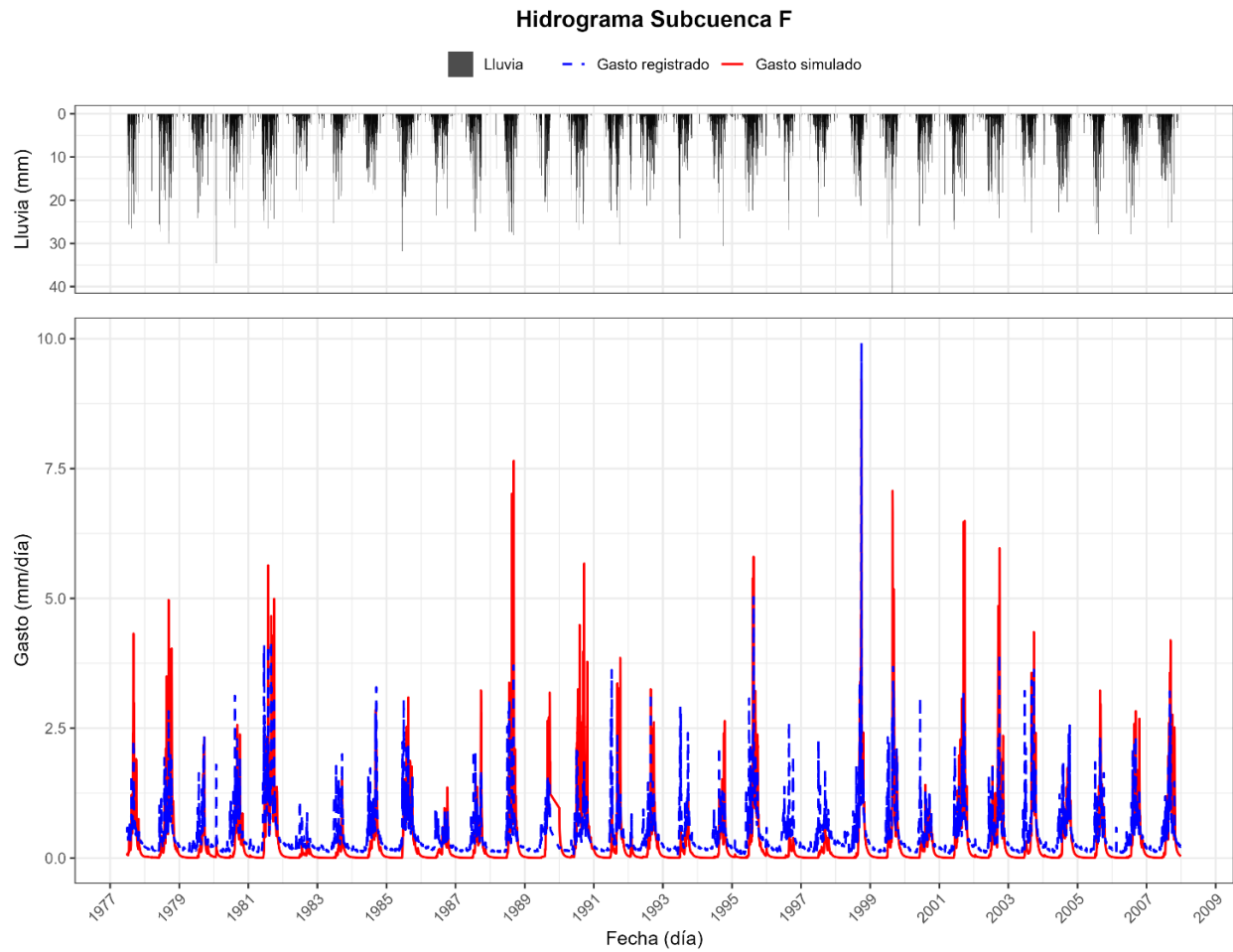


Figura 52.- Hidrograma Subcuenca F (elaboración propia)

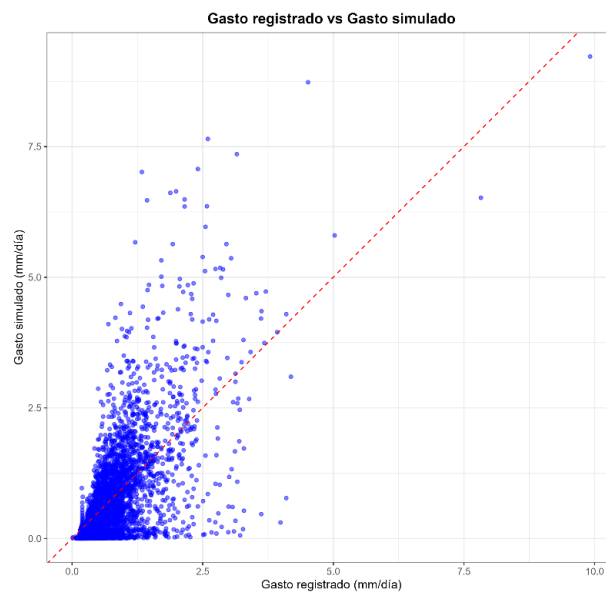


Figura 53.- Gasto registrado vs Gasto simulado, Subcuenca F. La línea roja de 45° es para indicar la relación 1:1 (elaboración propia)

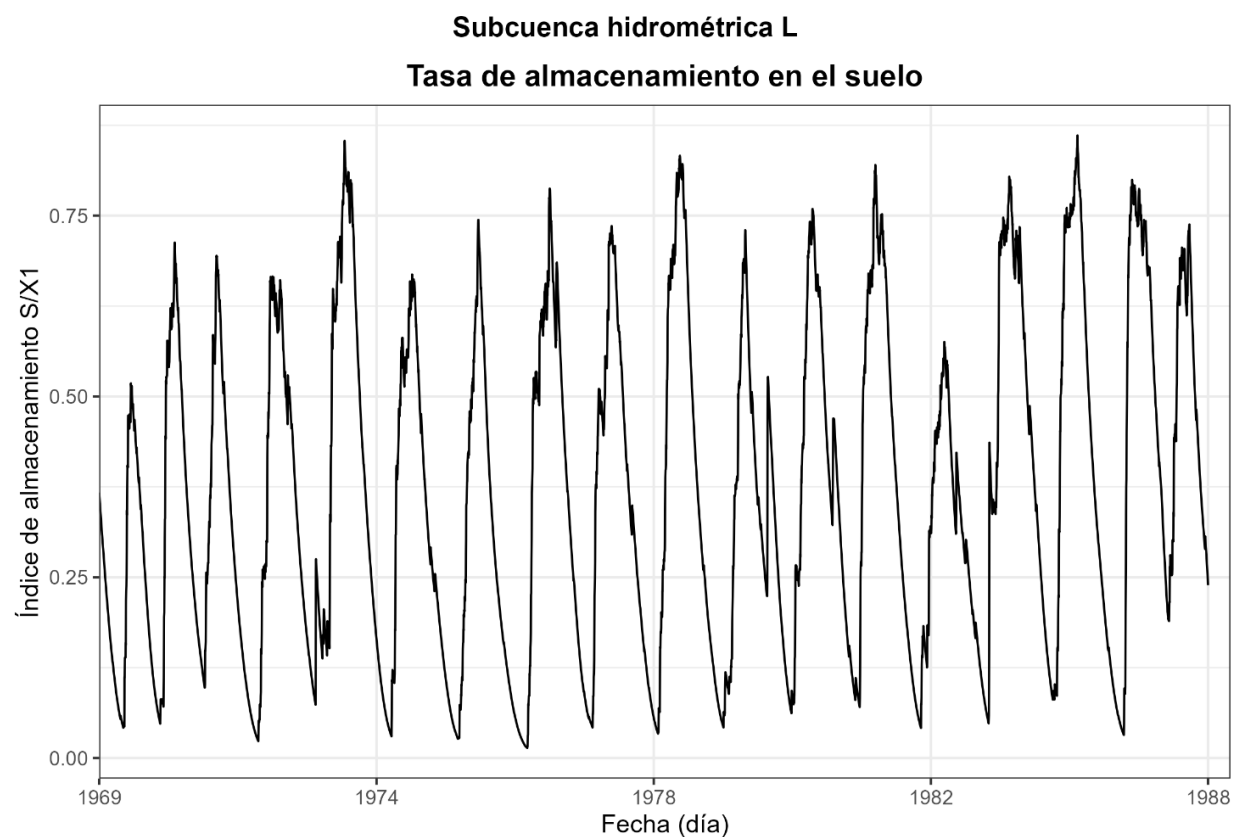
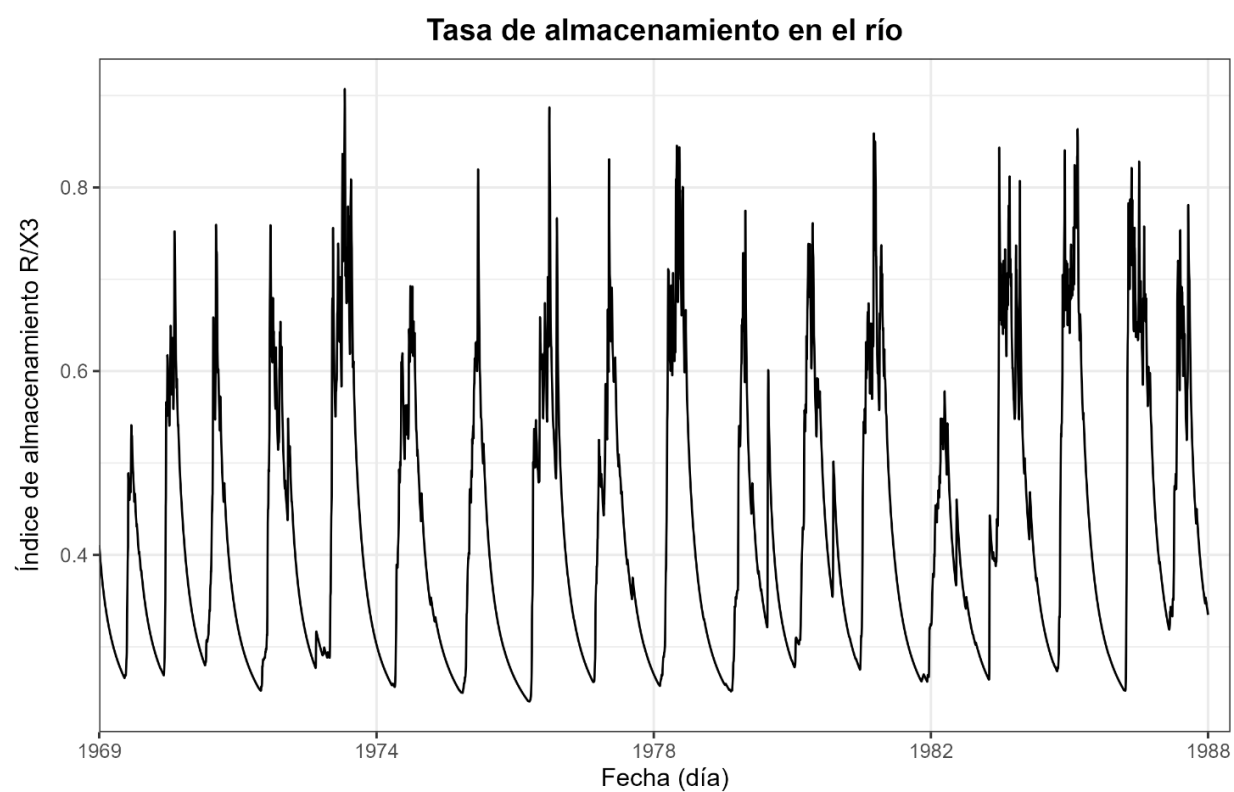


Figura 54.- Tasa de almacenamiento en el suelo y en el río, Subcuenca hidrométrica L (elaboración propia)

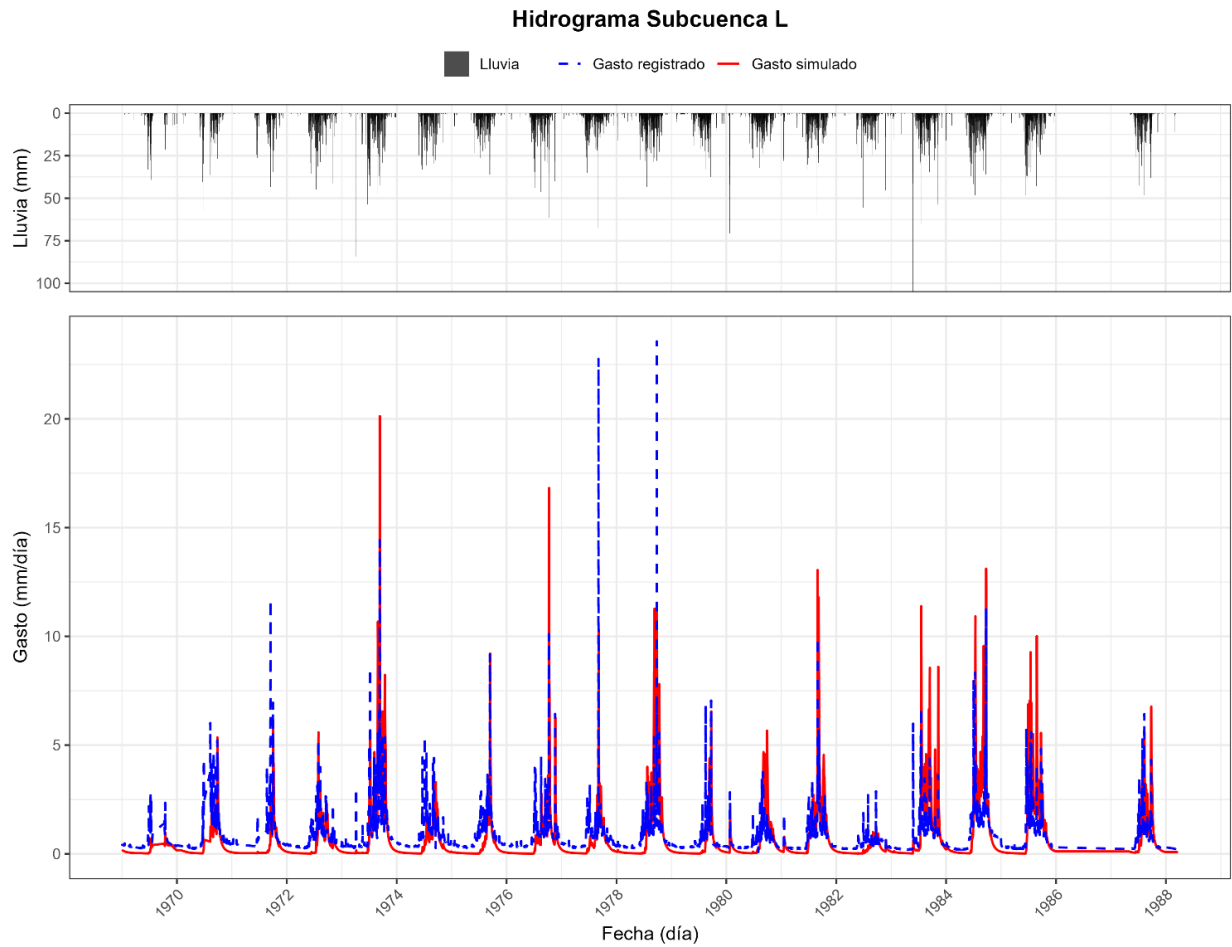


Figura 55.- Hidrograma Subcuenca L (elaboración propia)

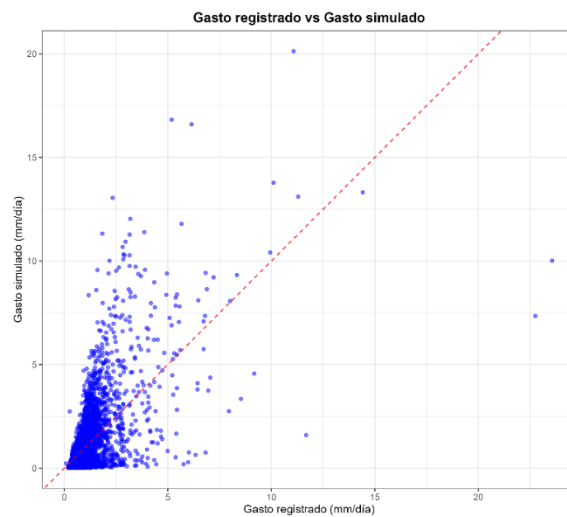


Figura 56.- Gasto registrado vs Gasto simulado, Subcuenca L. La línea roja de 45° es para indicar la relación 1:1 (elaboración propia)

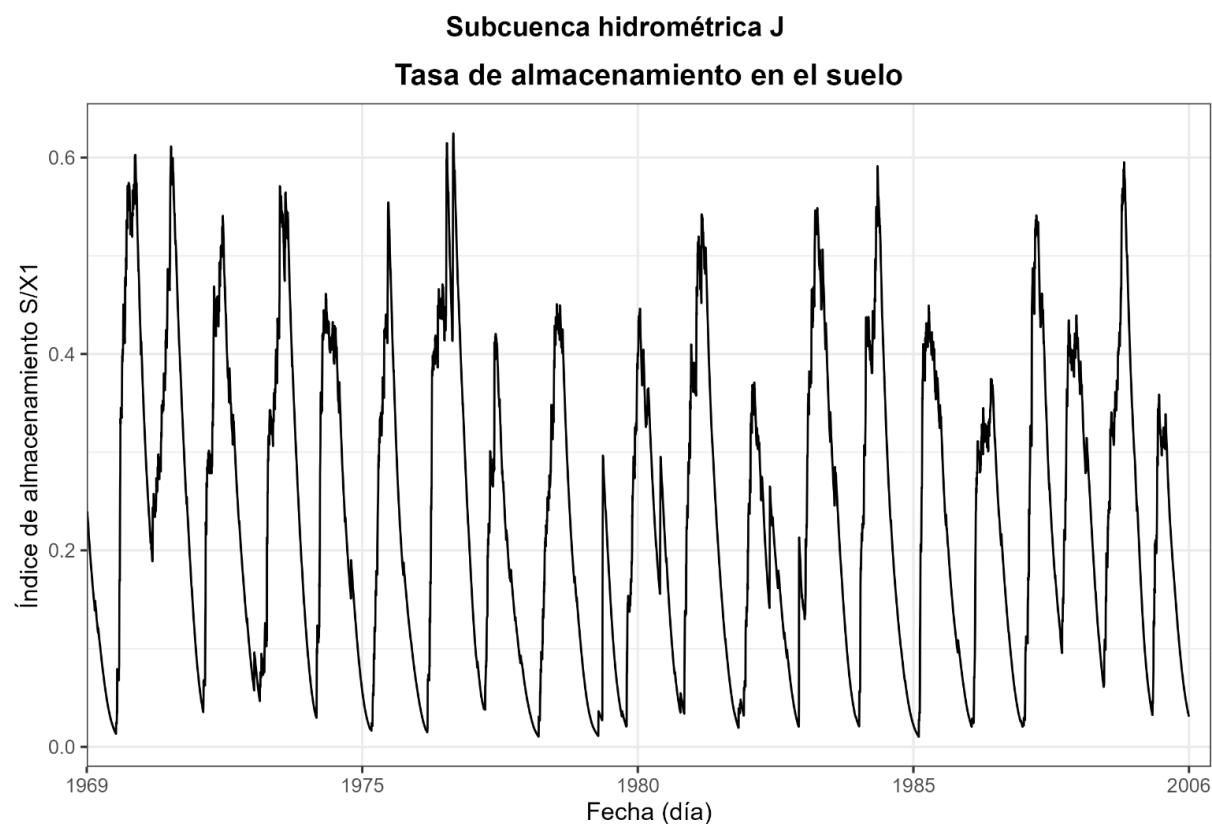
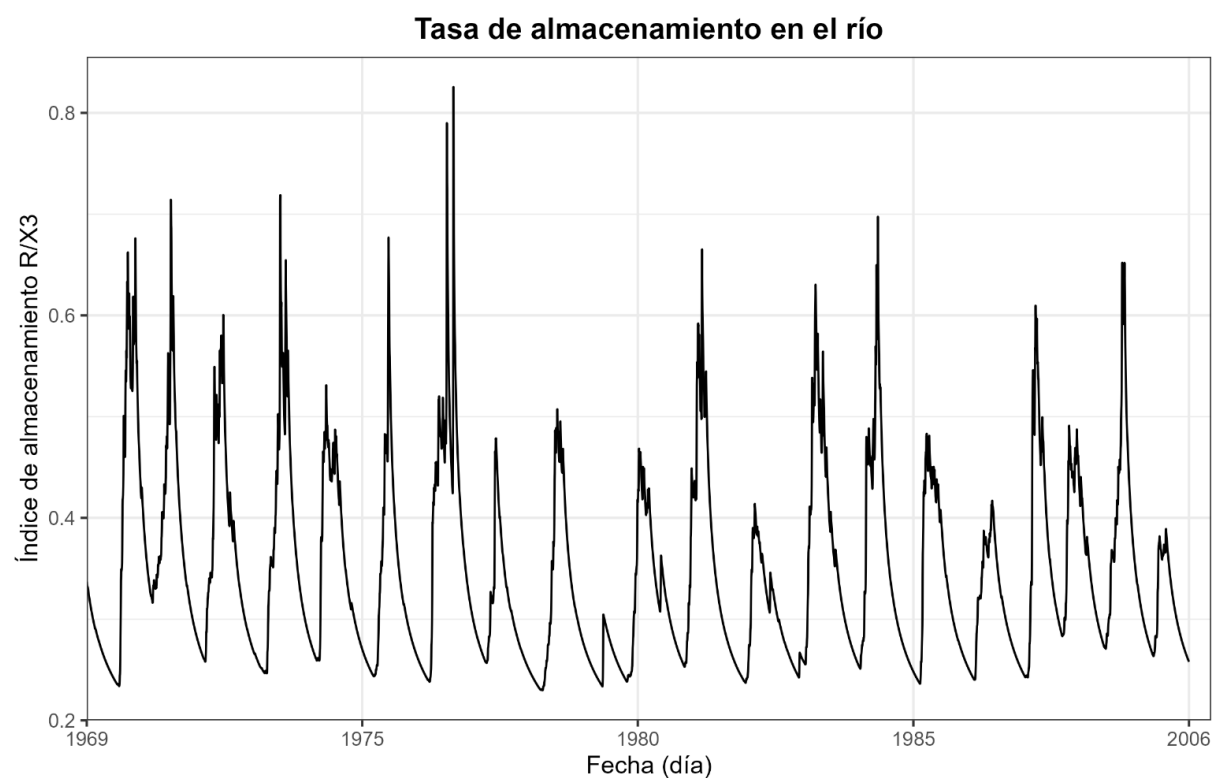


Figura 57.- Tasa de almacenamiento en el suelo y en el río, Subcuenca hidrométrica J (elaboración propia)

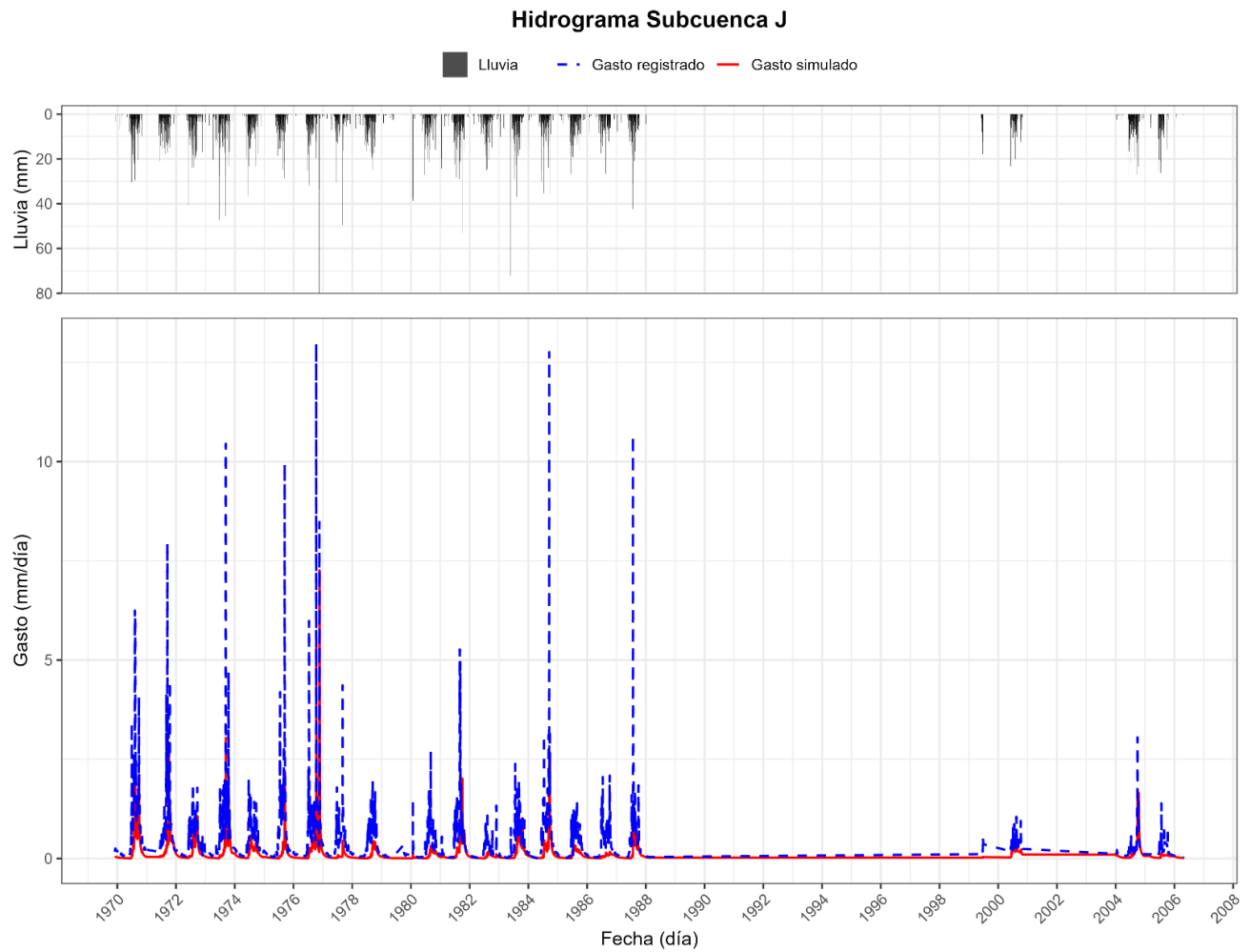


Figura 58.- Hidrograma Subcuenca J (elaboración propia)

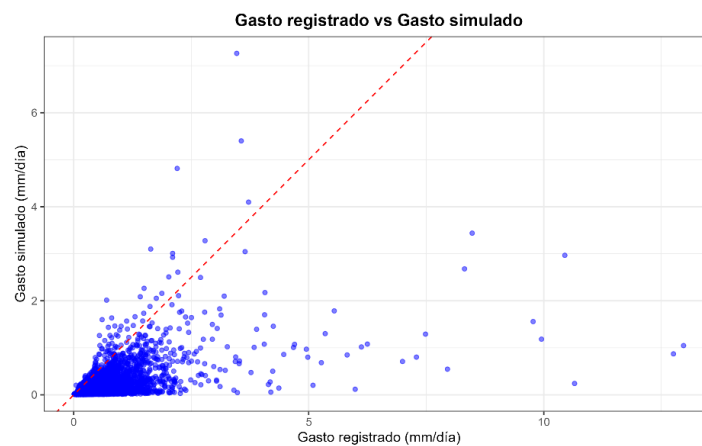


Figura 59.- Gasto registrado vs Gasto simulado, Subcuenca J. La línea roja de 45° es para indicar la relación 1:1 (elaboración propia)

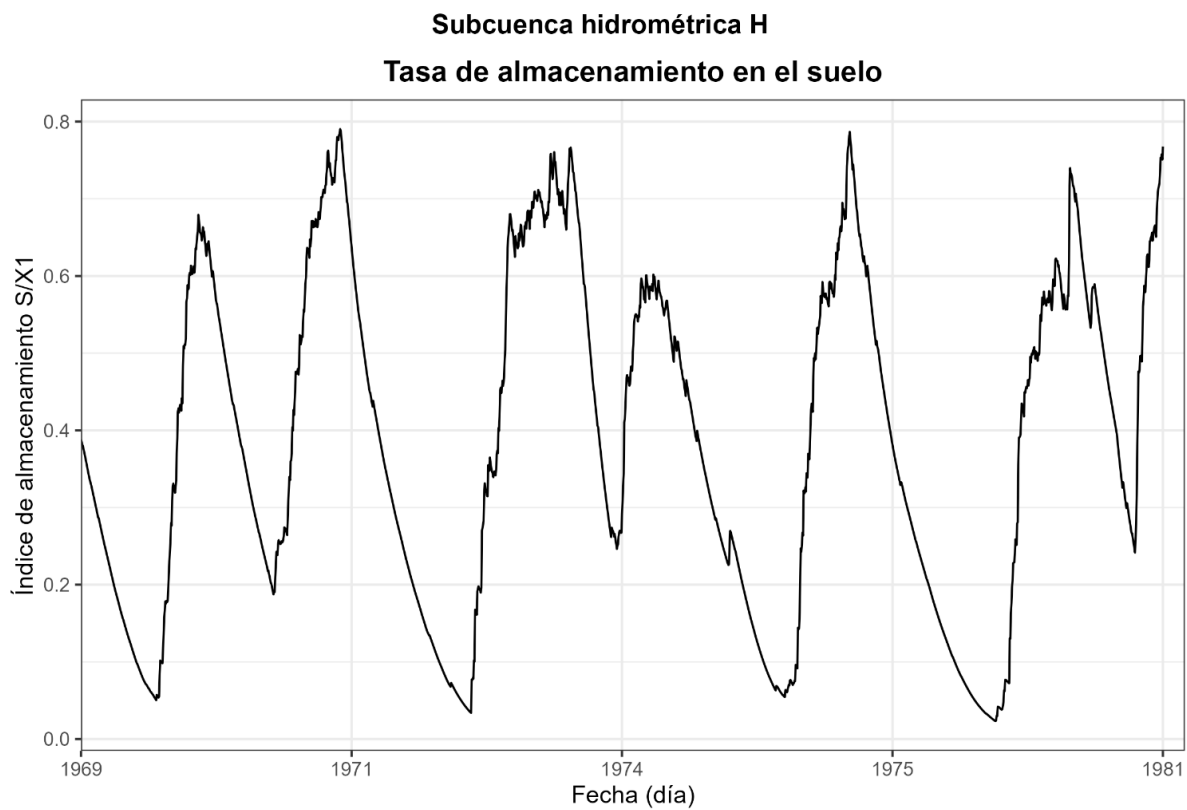
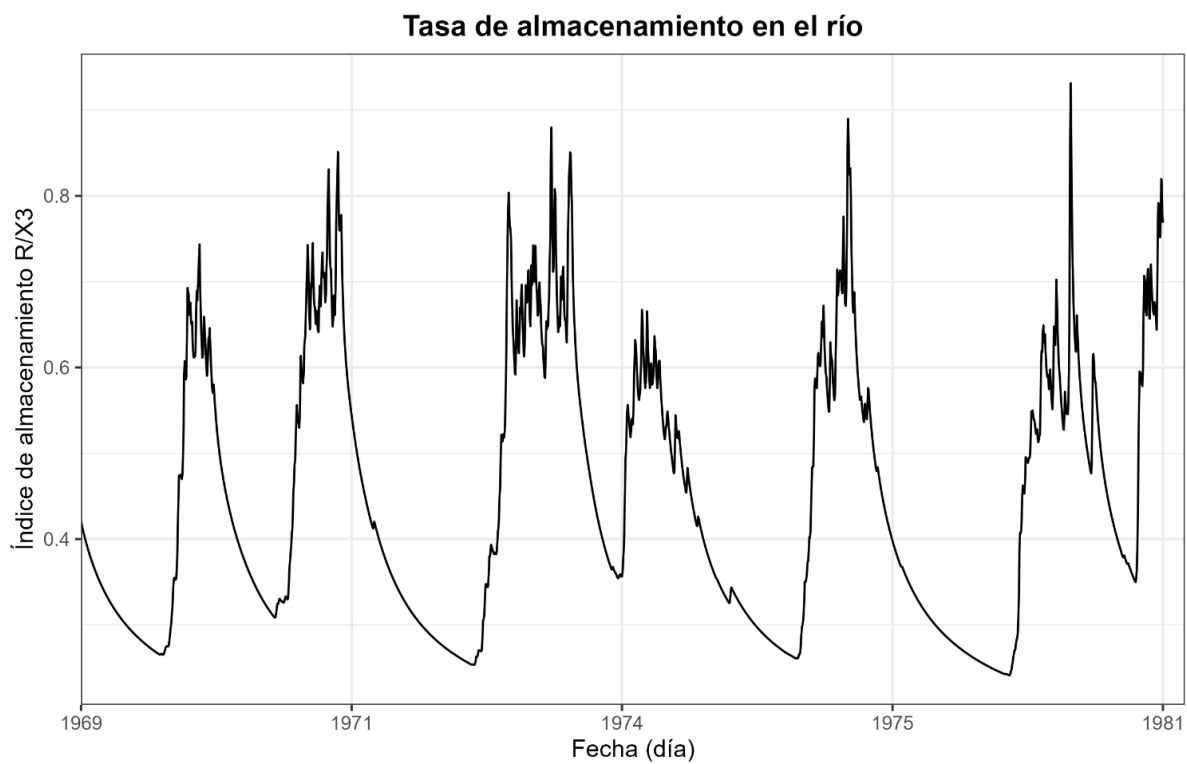


Figura 60.- Tasa de almacenamiento en el suelo y en el río, Subcuenca hidrométrica H (elaboración propia)

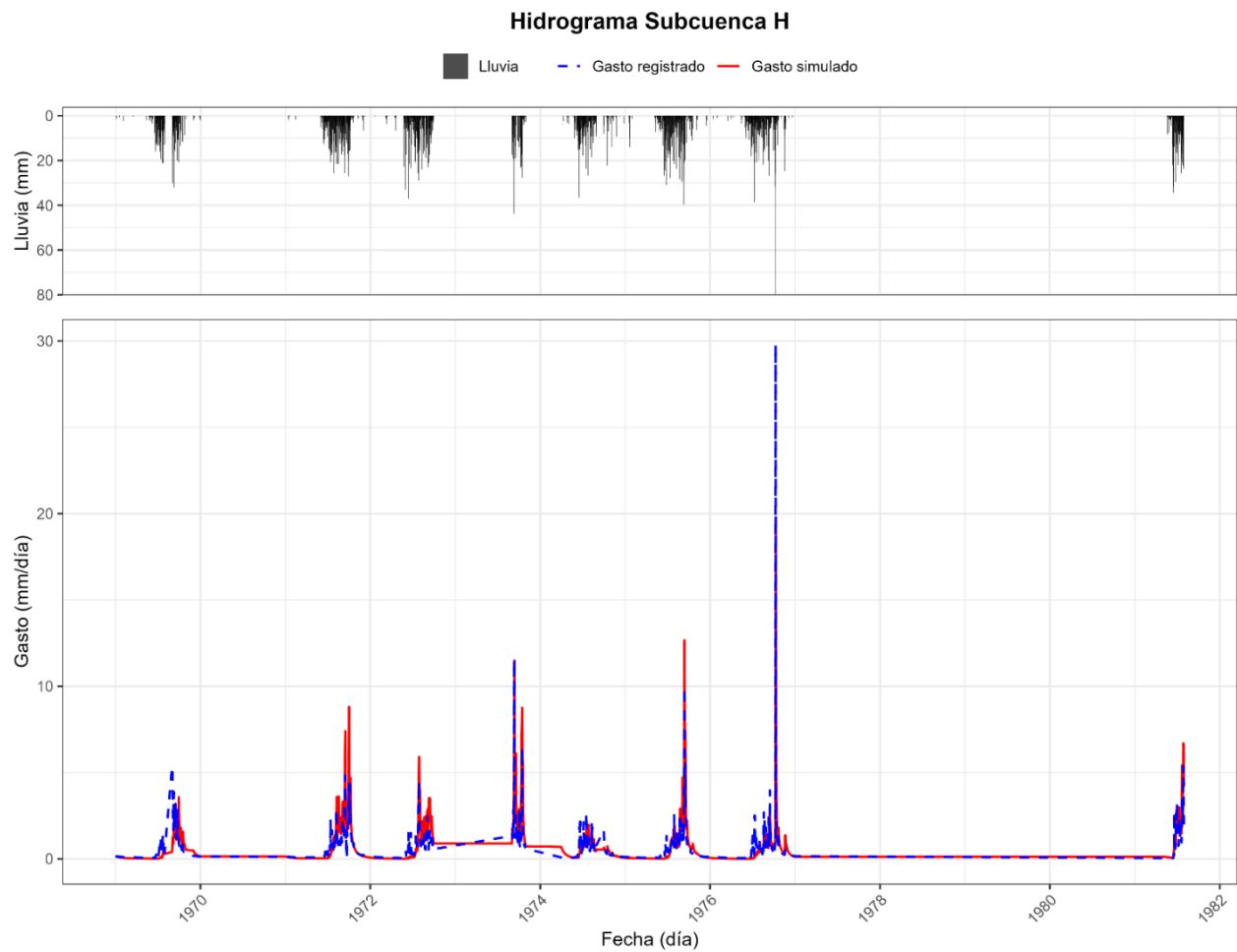


Figura 61.- Hidrograma Subcuenca H (elaboración propia)

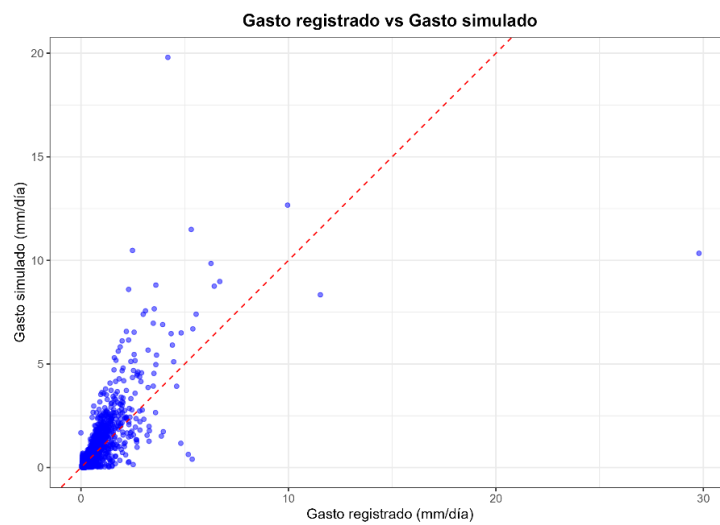


Figura 62.- Gasto registrado vs Gasto simulado, Subcuenca H. La línea roja de 45° es para indicar la relación 1:1 (elaboración propia)

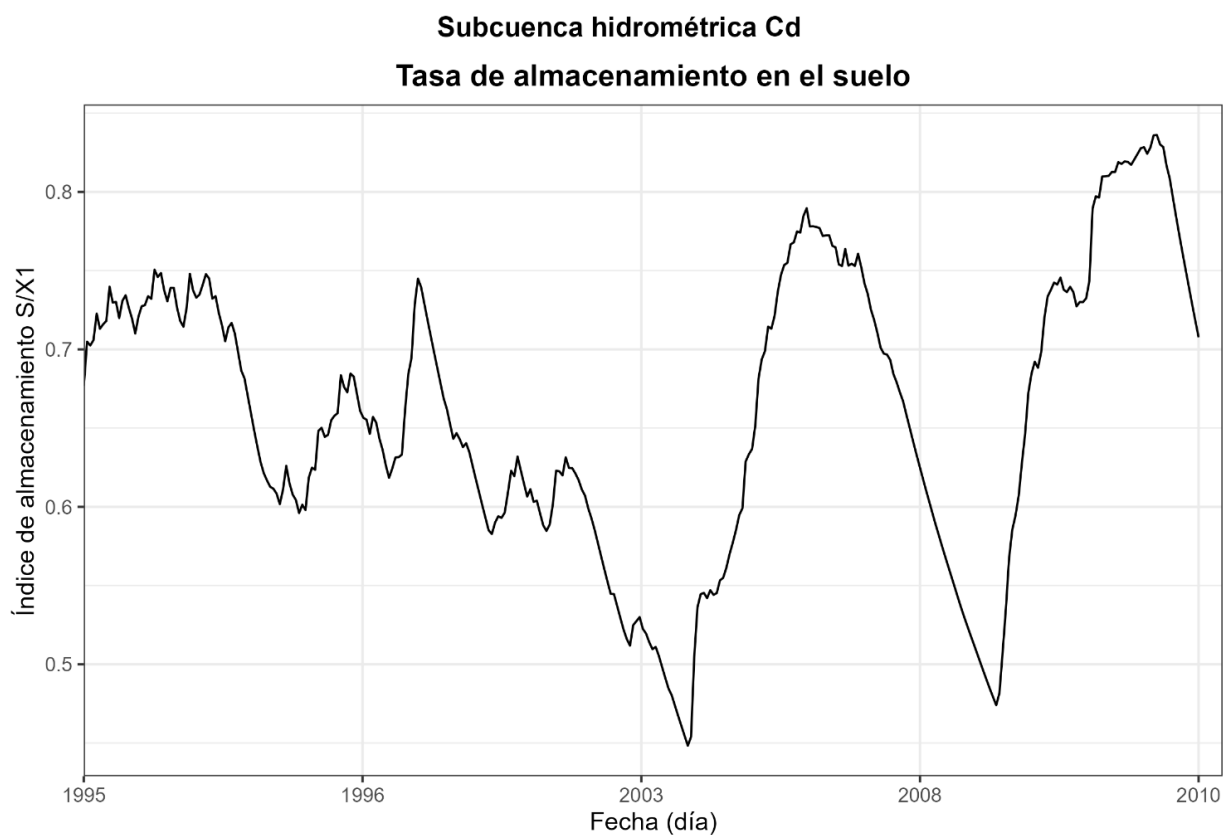
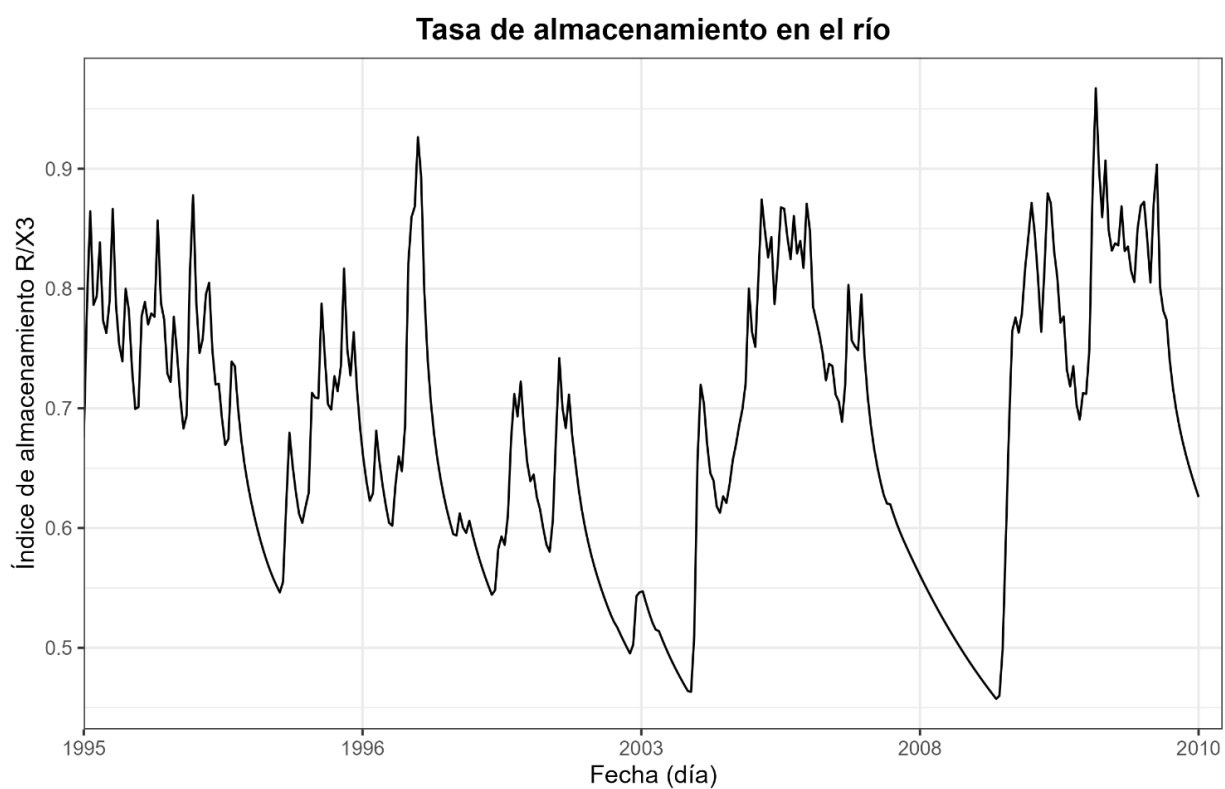


Figura 63.- Tasa de almacenamiento en el suelo y en el río, Subcuenca hidrométrica Cd (elaboración propia)

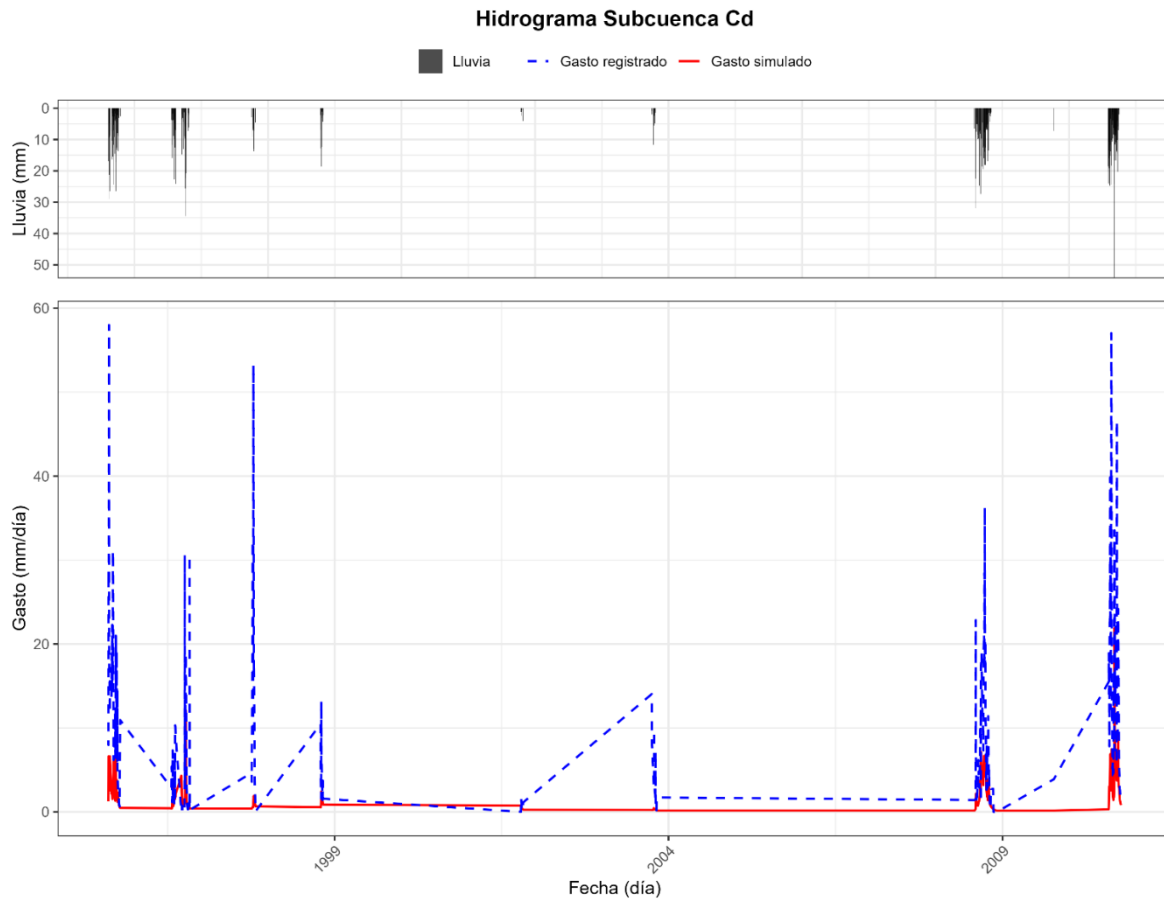


Figura 64.- Hidrograma Subcuenca Cd (elaboración propia)

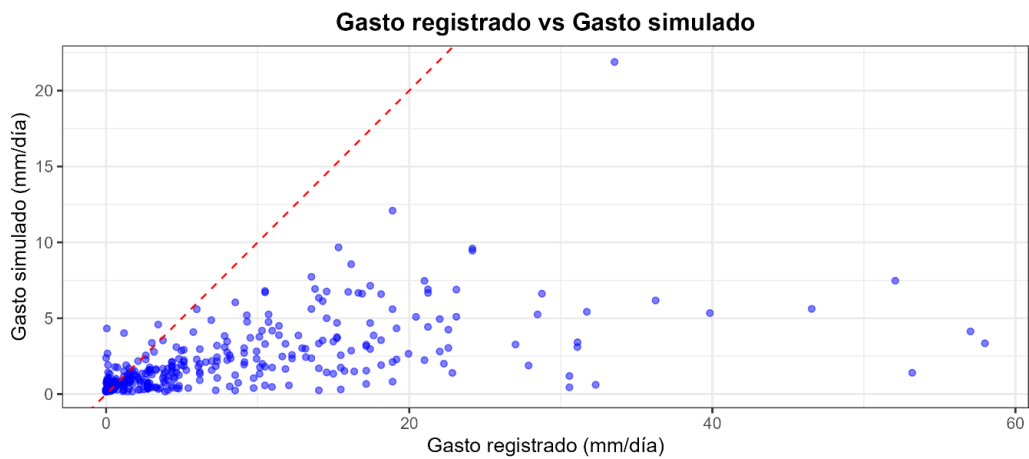


Figura 65.- Gasto registrado vs Gasto simulado, Subcuenca Cd. La línea roja de 45° es para indicar la relación 1:1 (elaboración propia)

5.7 Simulación 2: Modelo GR4J, lluvias totales

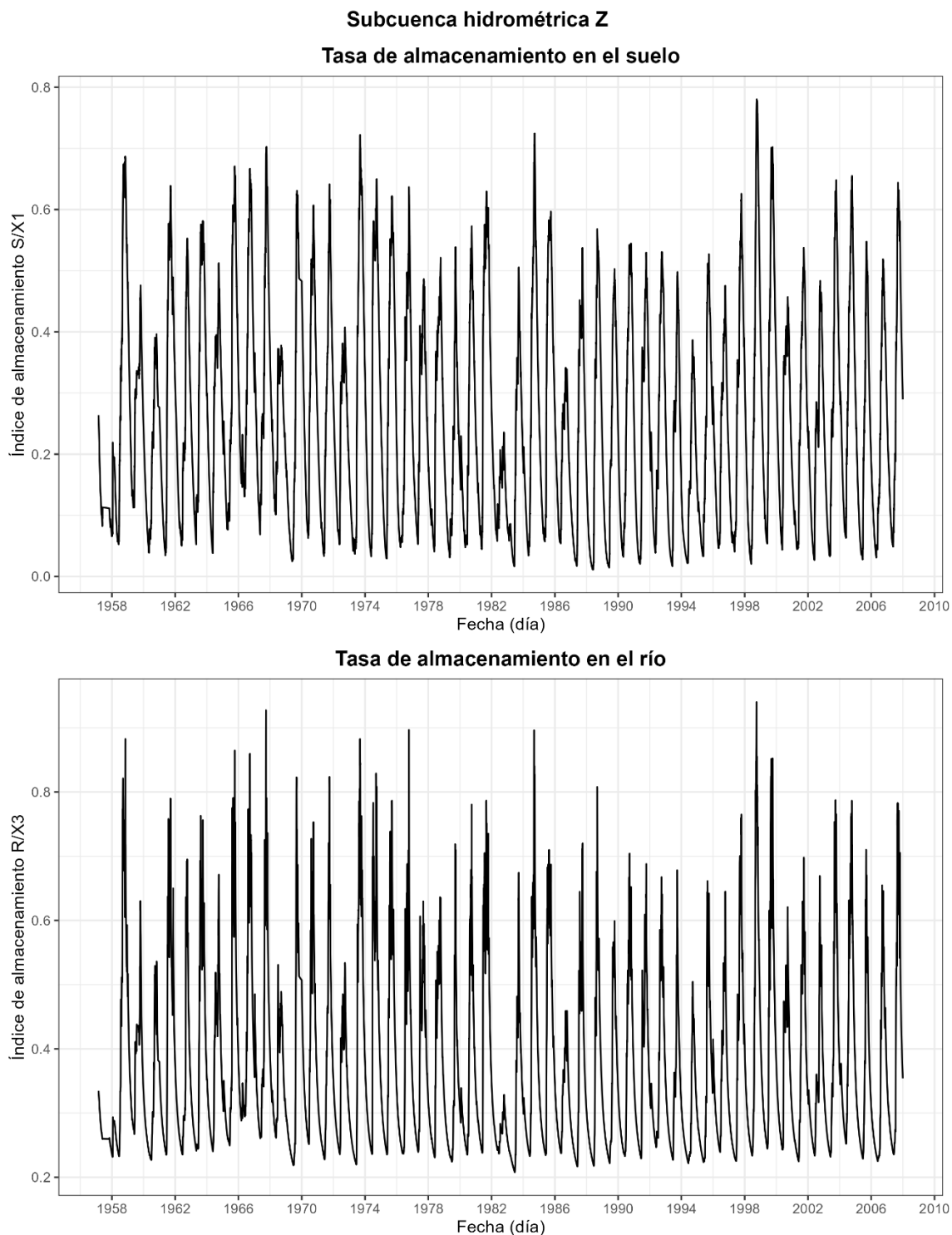


Figura 66.- Tasa de almacenamiento en el suelo y en el río, Subcuenca hidrométrica Z
(elaboración propia)

Hidrograma Subcuenca Z

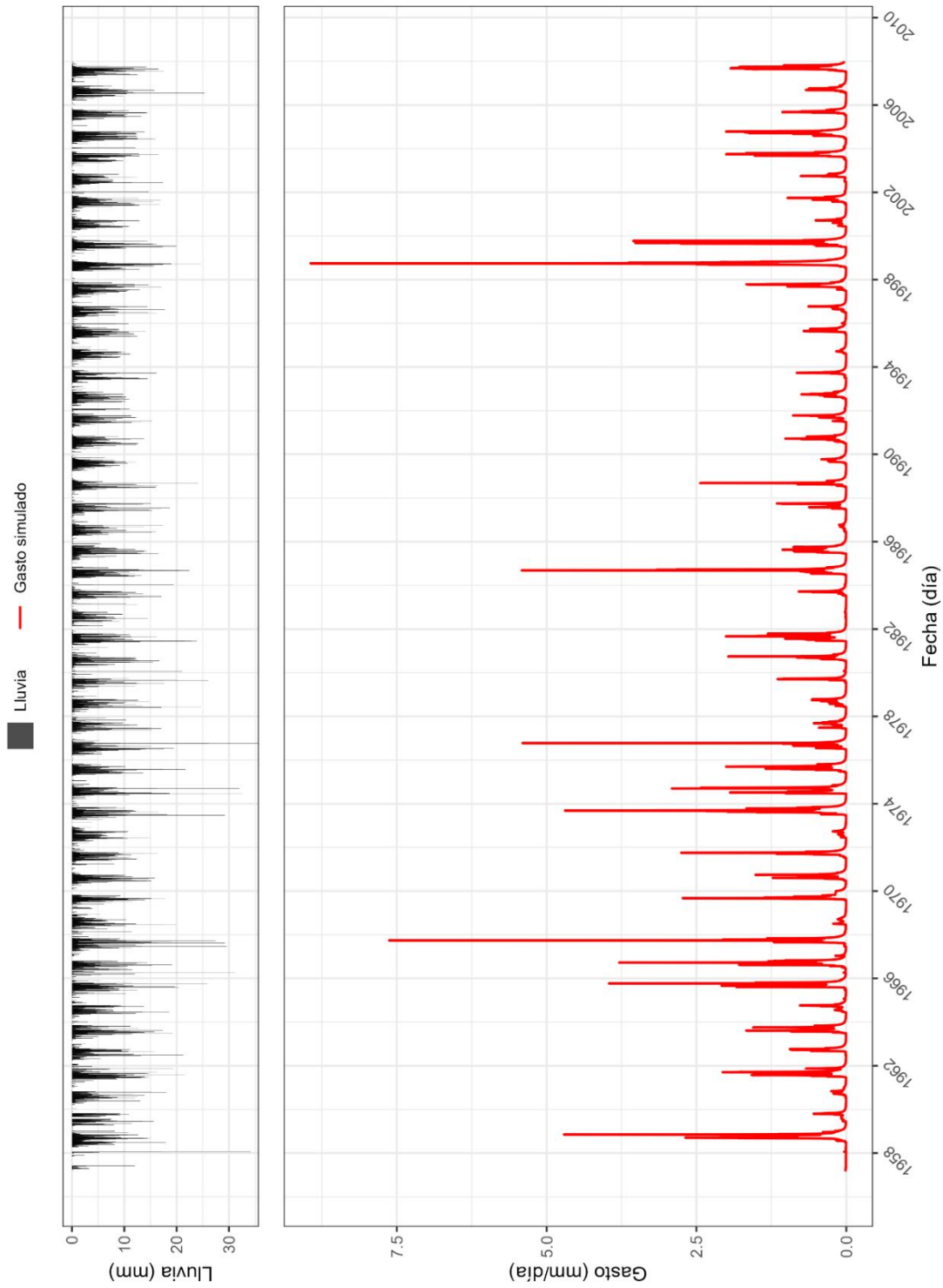


Figura 67.- Hidrograma Subcuenca Z (elaboración propia)

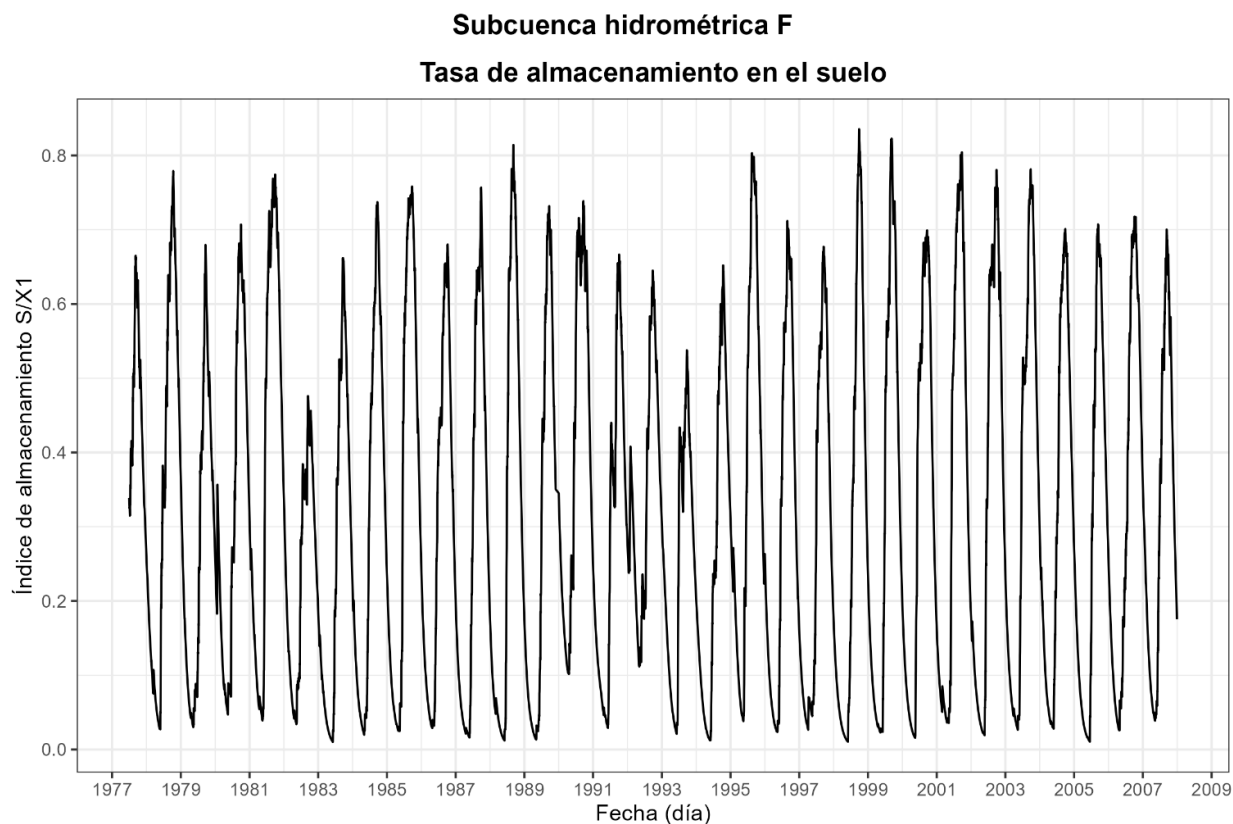
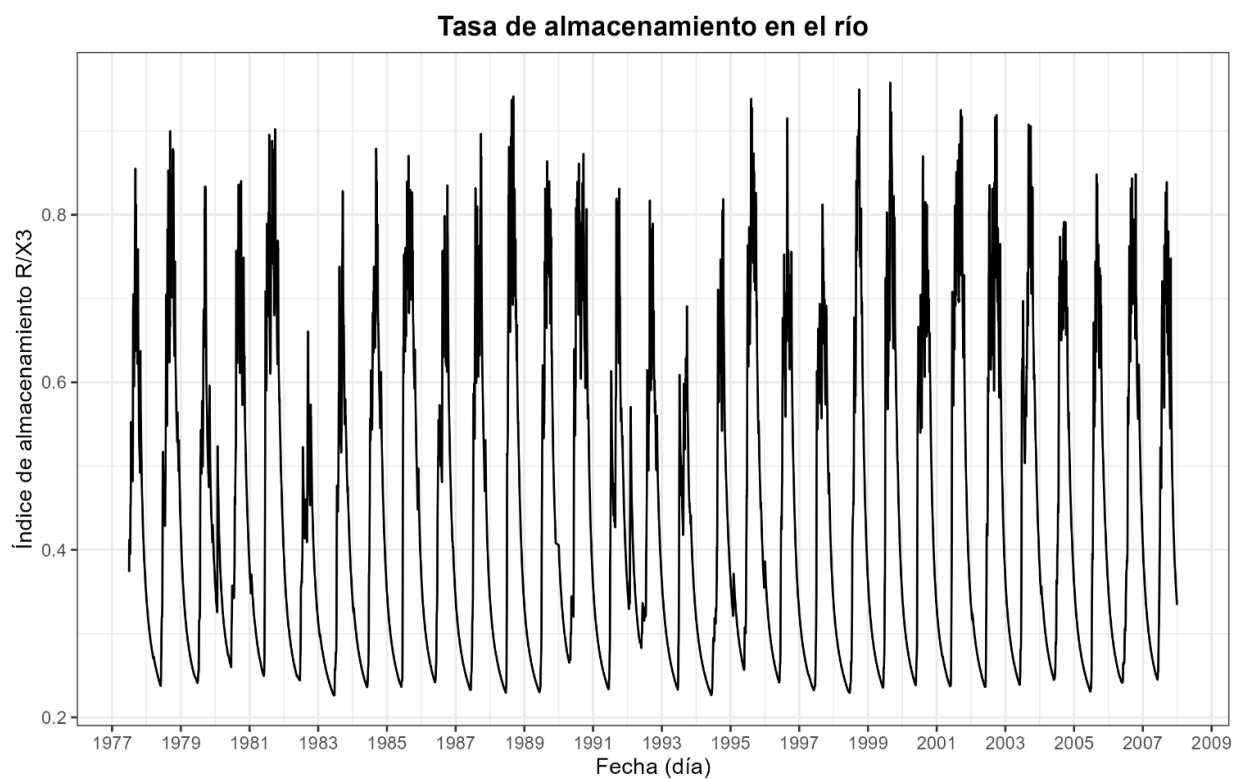


Figura 68.- Tasa de almacenamiento en el suelo y en el río, Subcuenca hidrométrica F (elaboración propia)

Hidrograma Subcuenca F

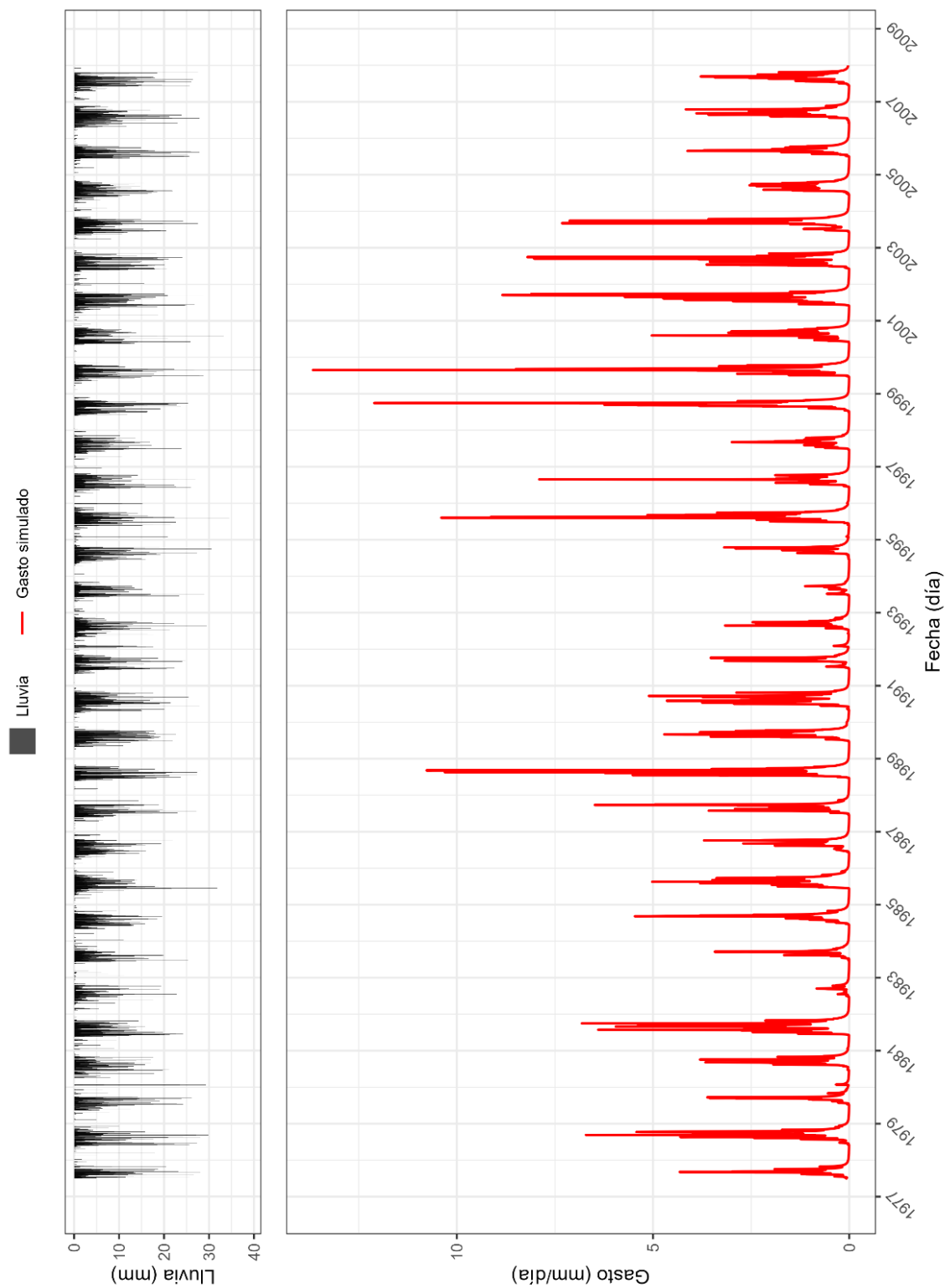


Figura 69.- Hidrograma Subcuenca F (elaboración propia)

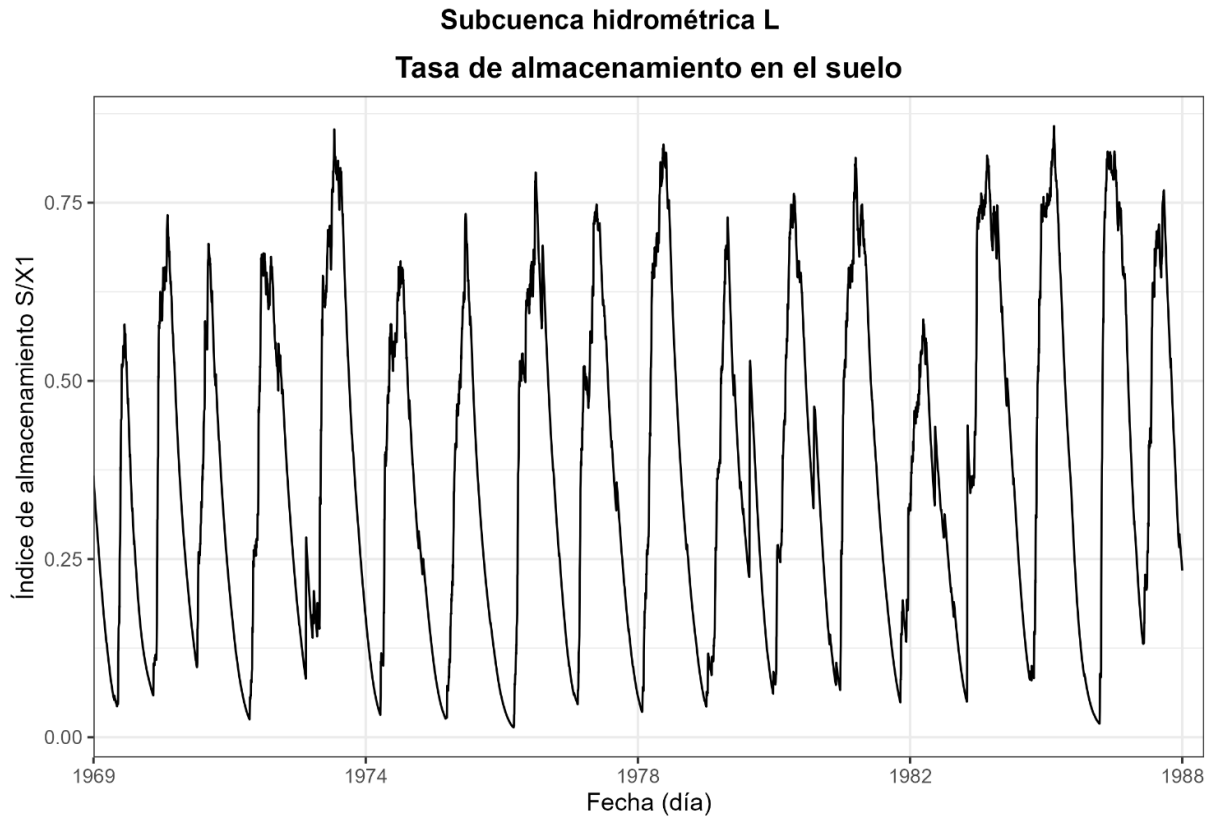
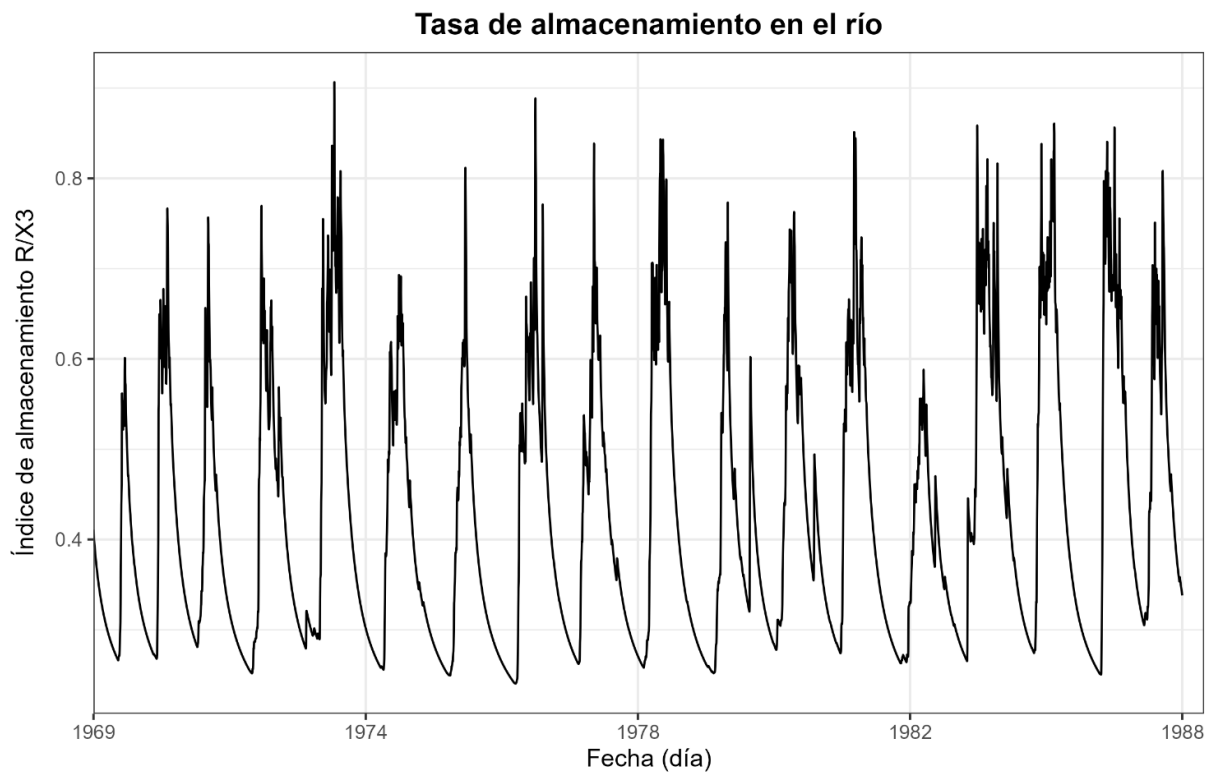


Figura 70.- Tasa de almacenamiento en el suelo y en el río, Subcuenca hidrométrica L (elaboración propia)

Hidrograma Subcuenca L

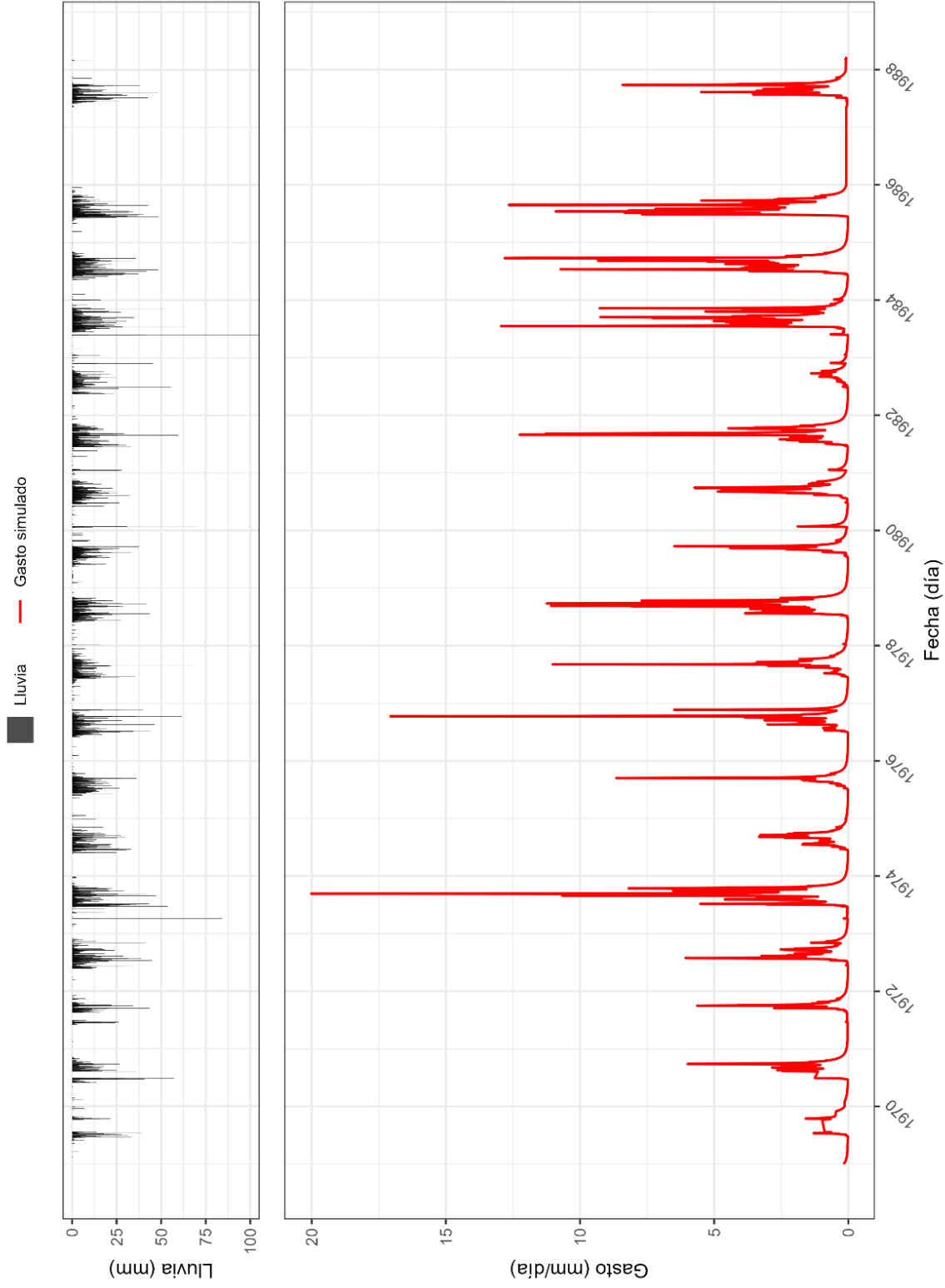


Figura 71.- Hidrograma Subcuenca L (elaboración propia)

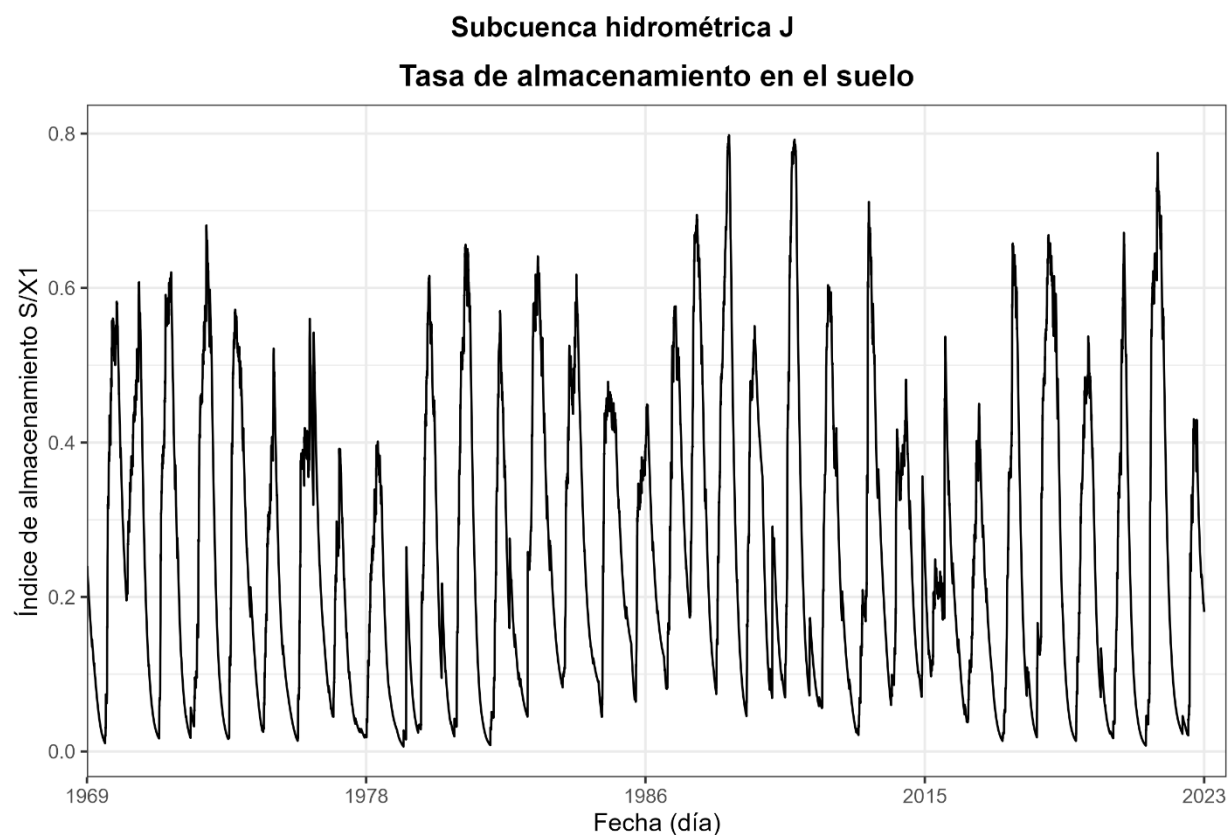
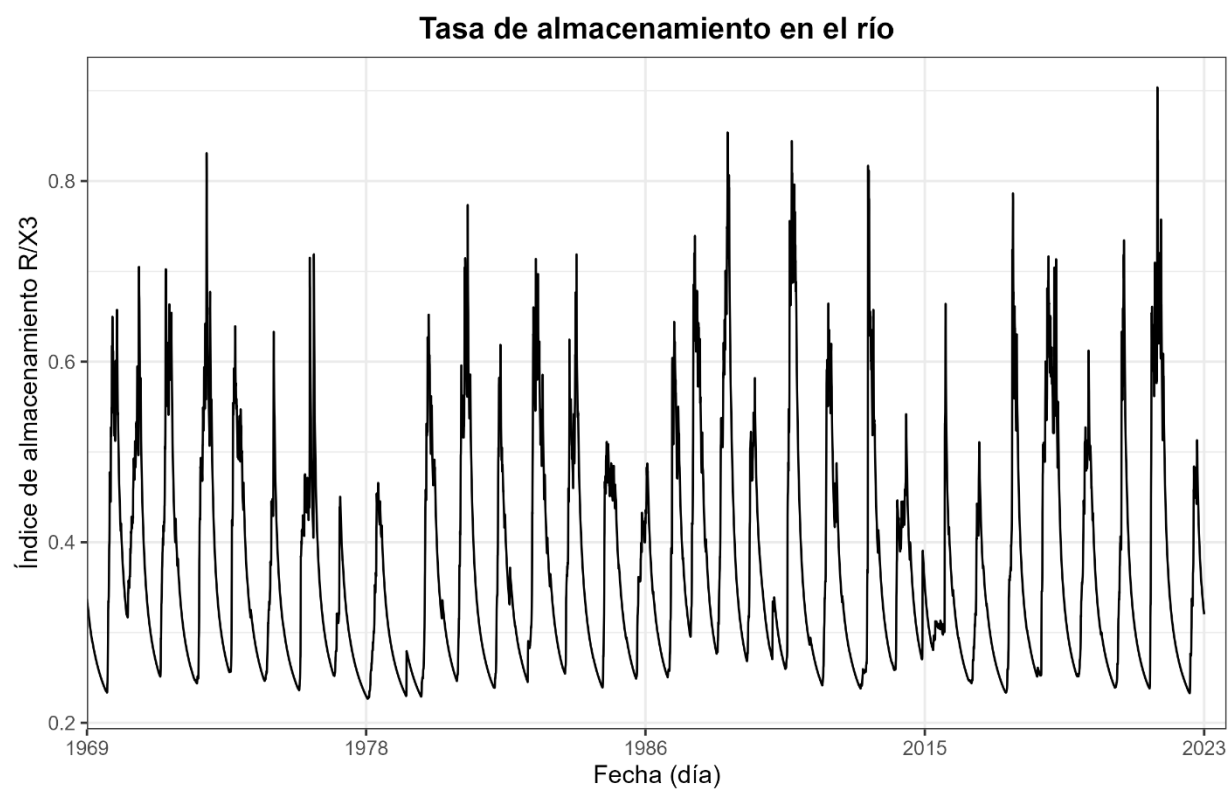


Figura 72.- Tasa de almacenamiento en el suelo y en el río, Subcuenca hidrométrica J (elaboración propia)

Hidrograma Subcuenca J

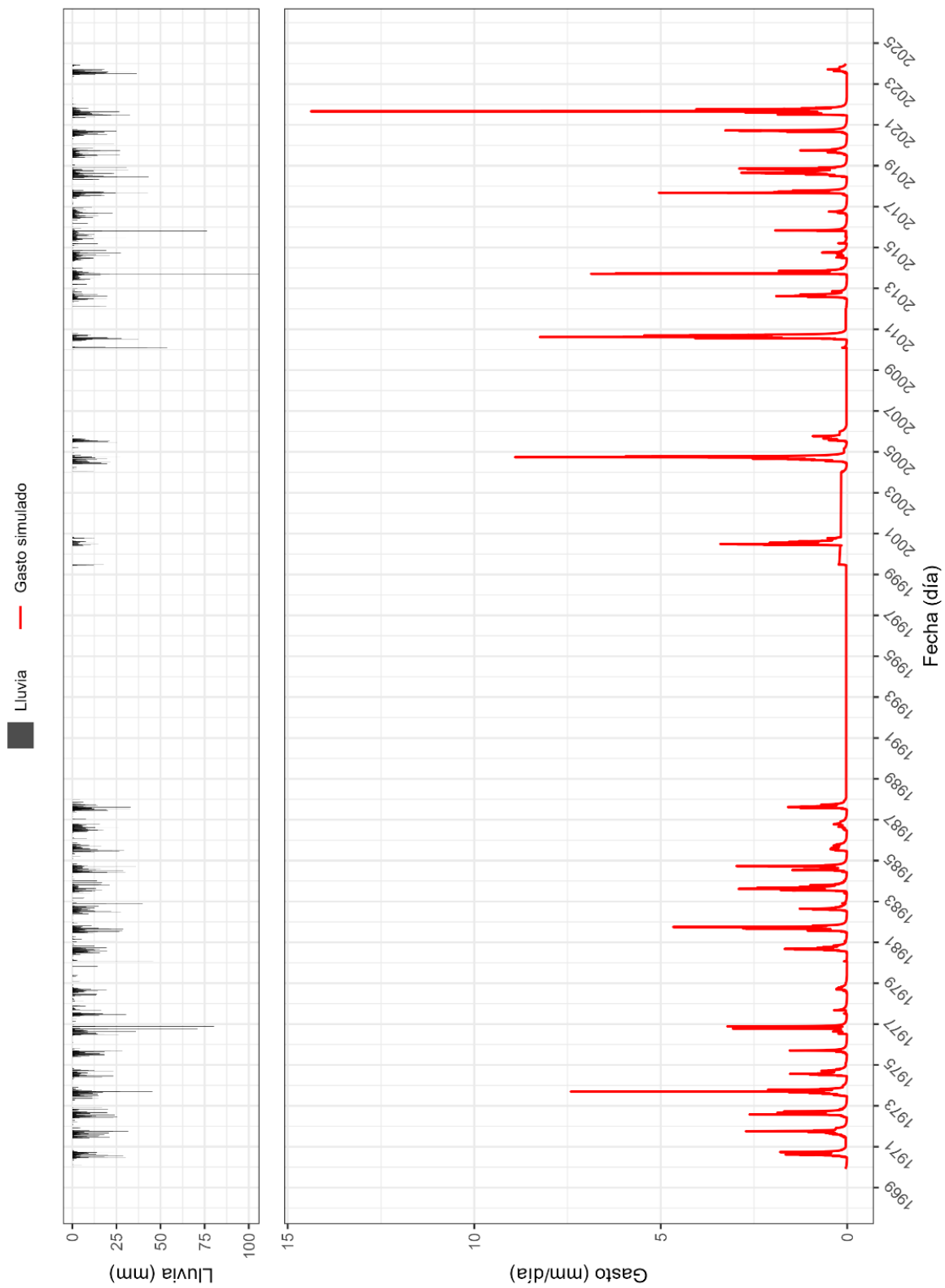


Figura 73.- Hidrograma Subcuenca J (elaboración propia)

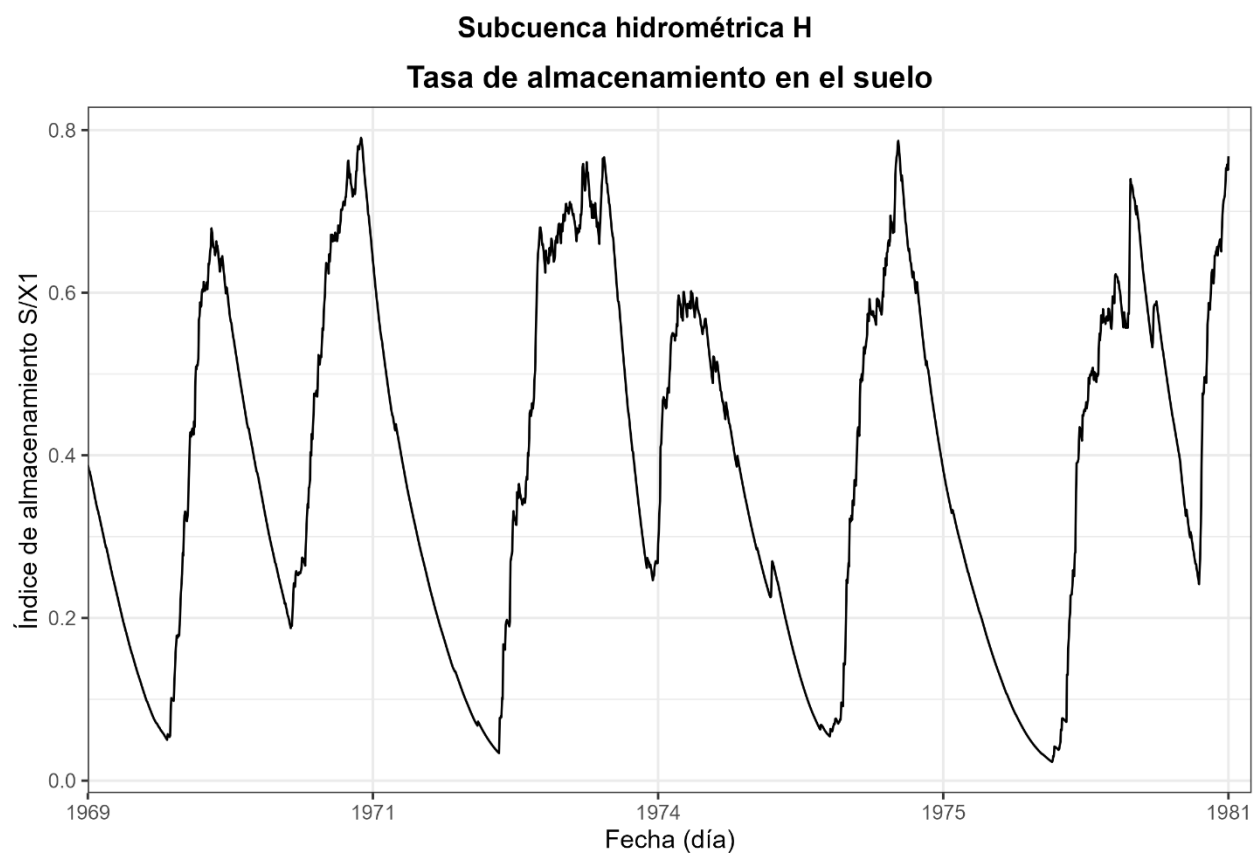
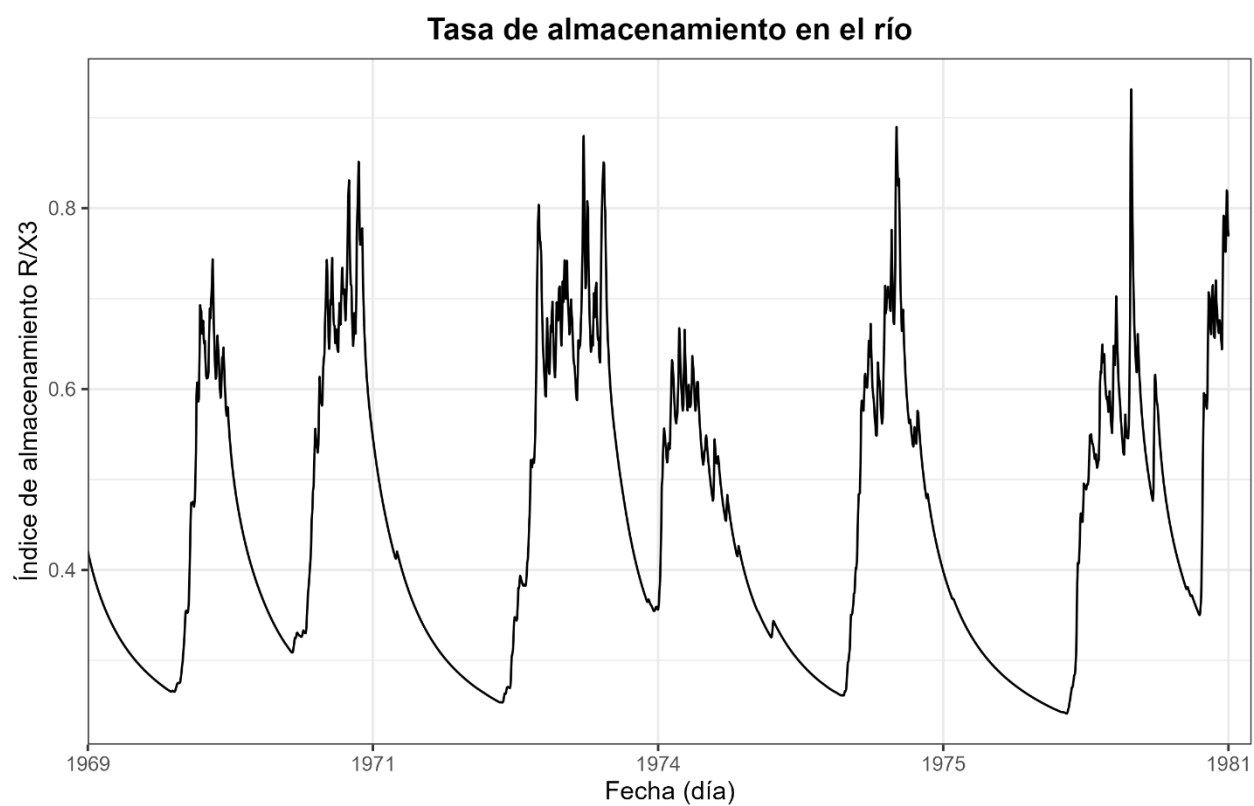


Figura 74.- Tasa de almacenamiento en el suelo y en el río, Subcuenca hidrométrica H (elaboración propia)

Hidrograma Subcuenca H

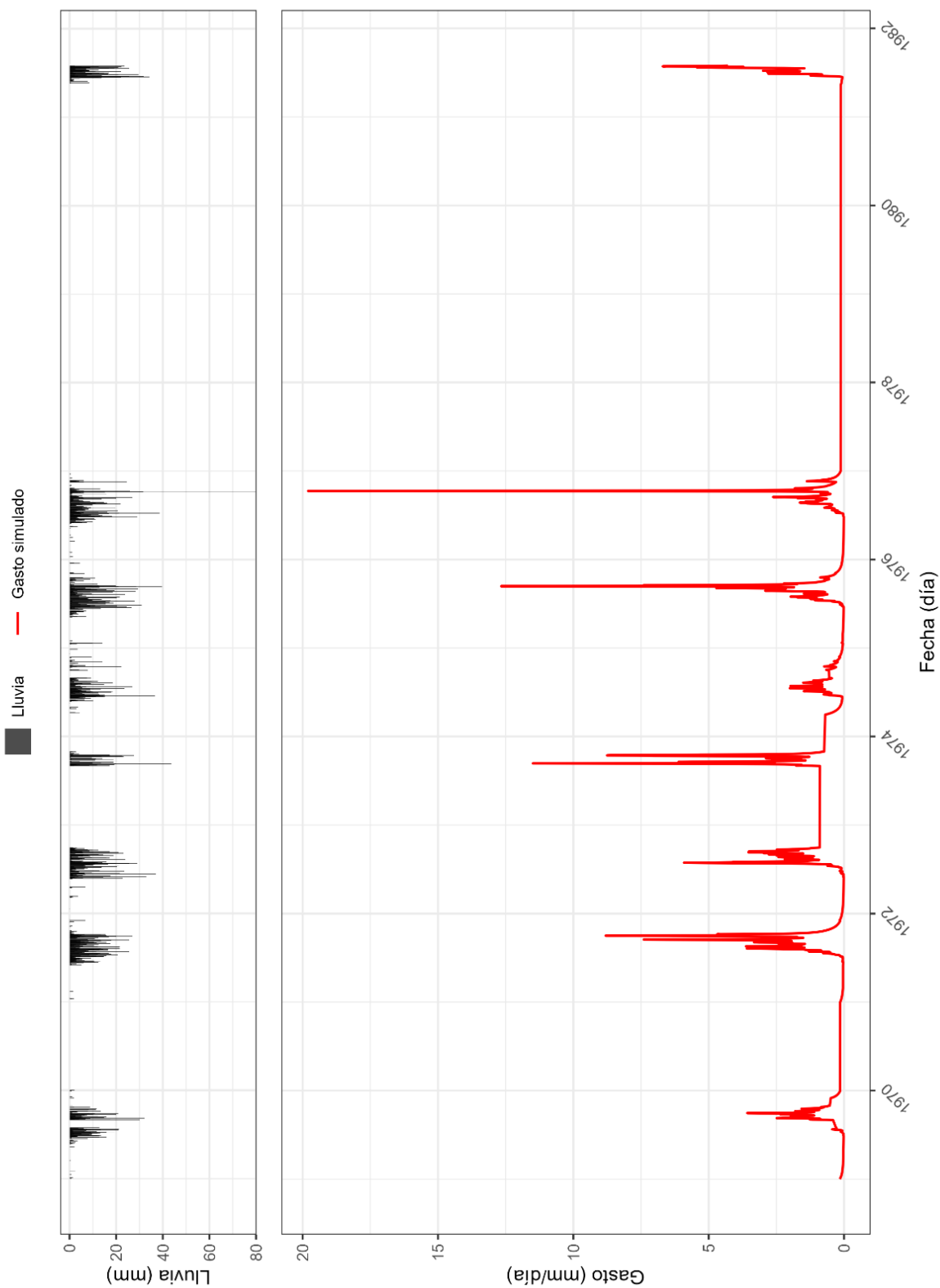


Figura 75.- Hidrograma Subcuenca H (elaboración propia)

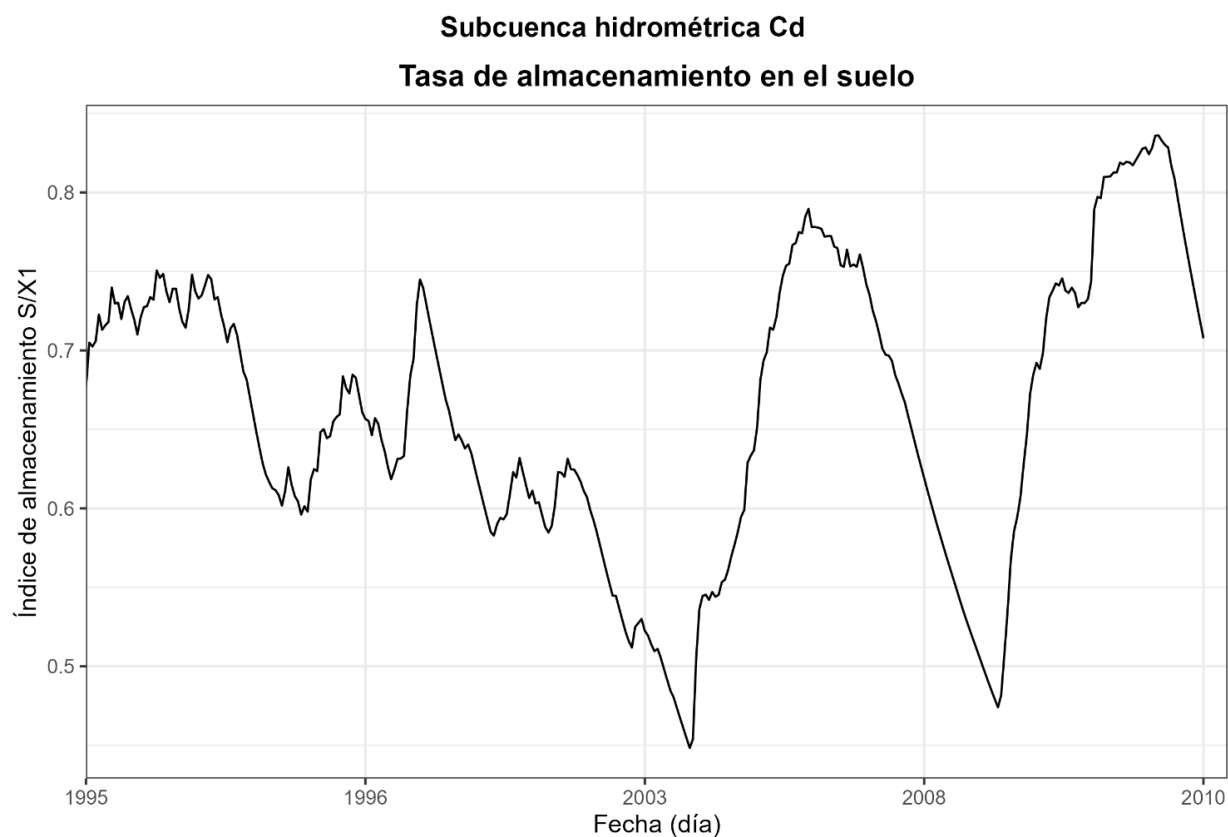
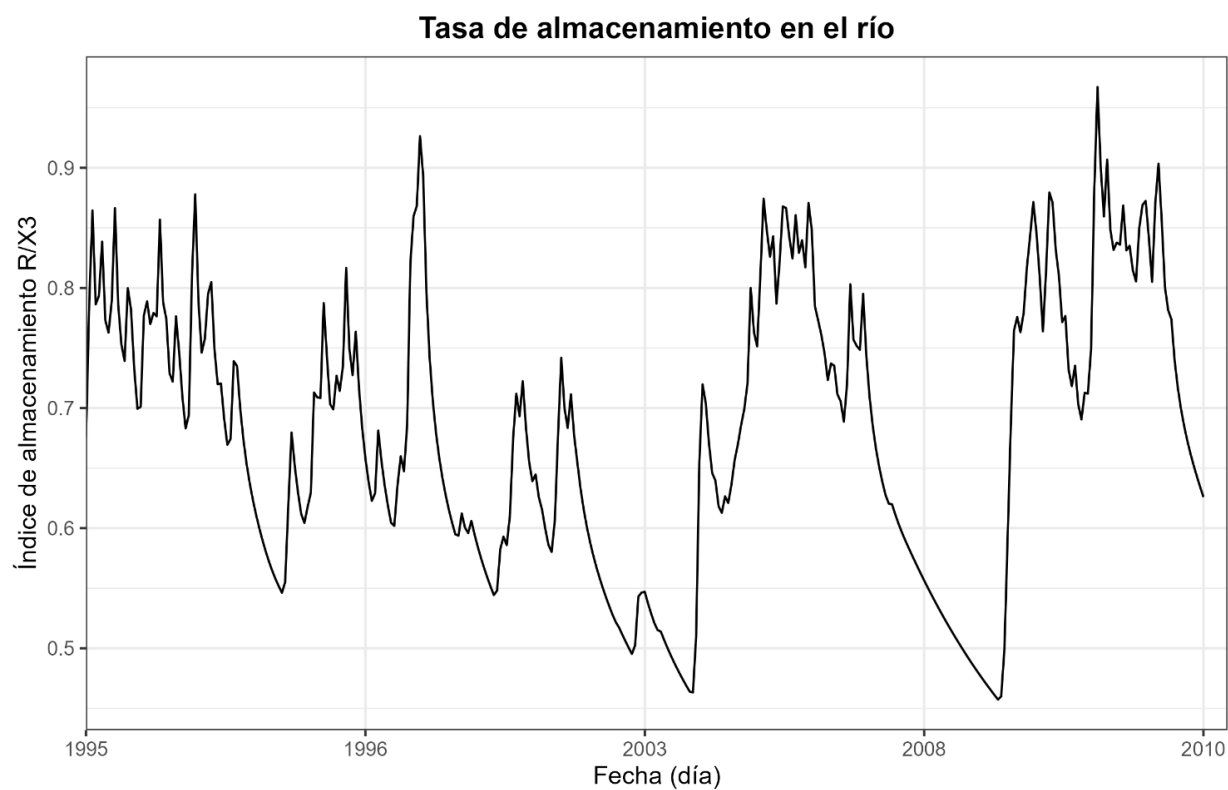


Figura 76.- Tasa de almacenamiento en el suelo y en el río, Subcuenca hidrométrica Cd (elaboración propia)

Hidrograma Subcuenca Cd

■ Lluvia — Gasto simulado

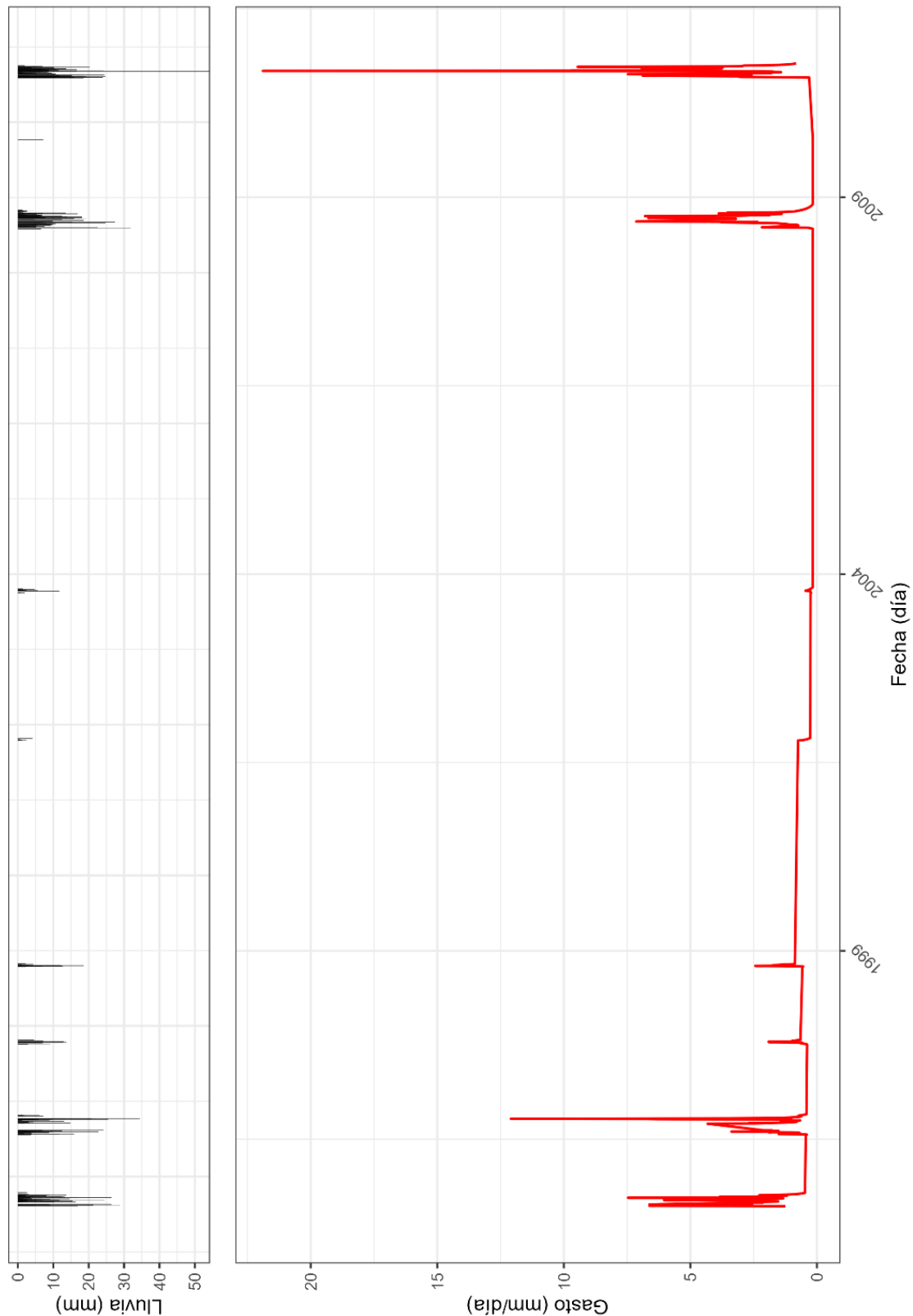
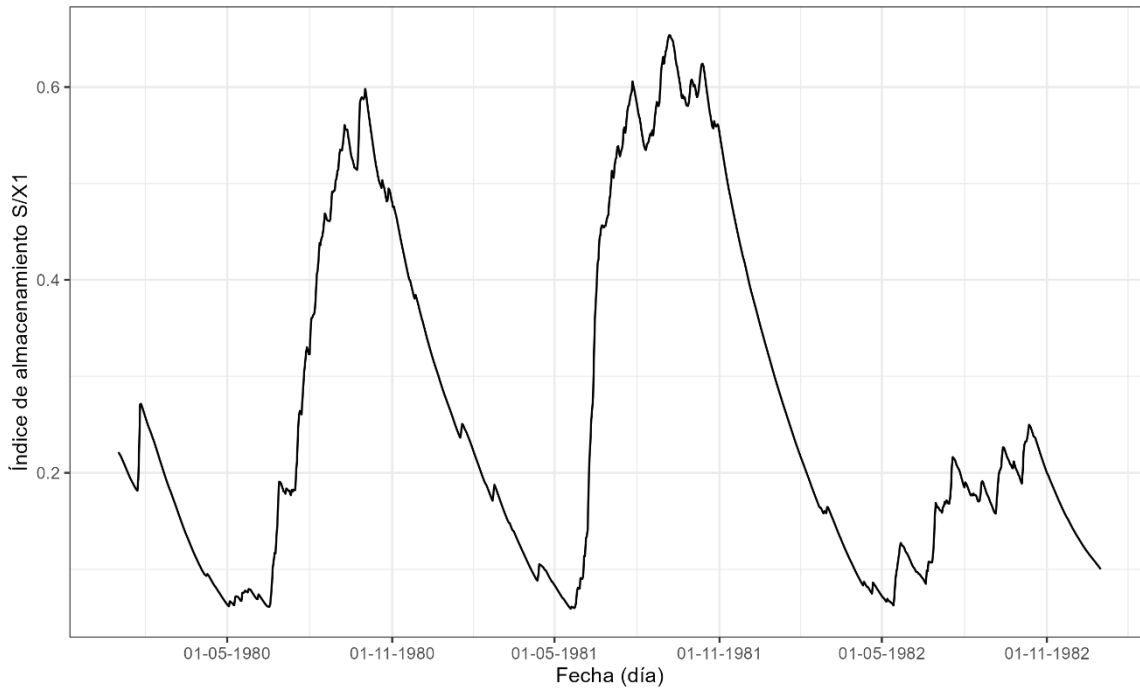


Figura 77.- Hidrograma Subcuenca Cd (elaboración propia)

5.8 Simulación 3: Cuenca Balsas 1980 - 1982

Subcuenca Z

Tasa de almacenamiento en el suelo



Tasa de almacenamiento en el río

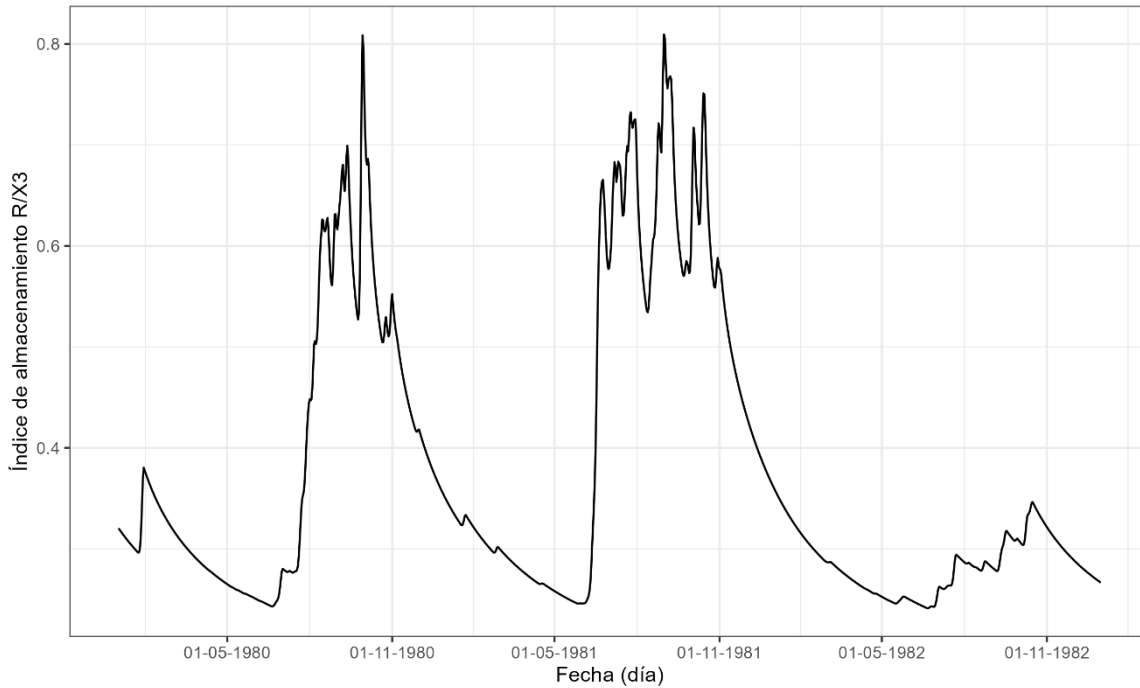


Figura 78.- Tasa de almacenamiento en el suelo y en el río, Subcuenca Z, Cuenca Balsas 1980-1982 (elaboración propia)

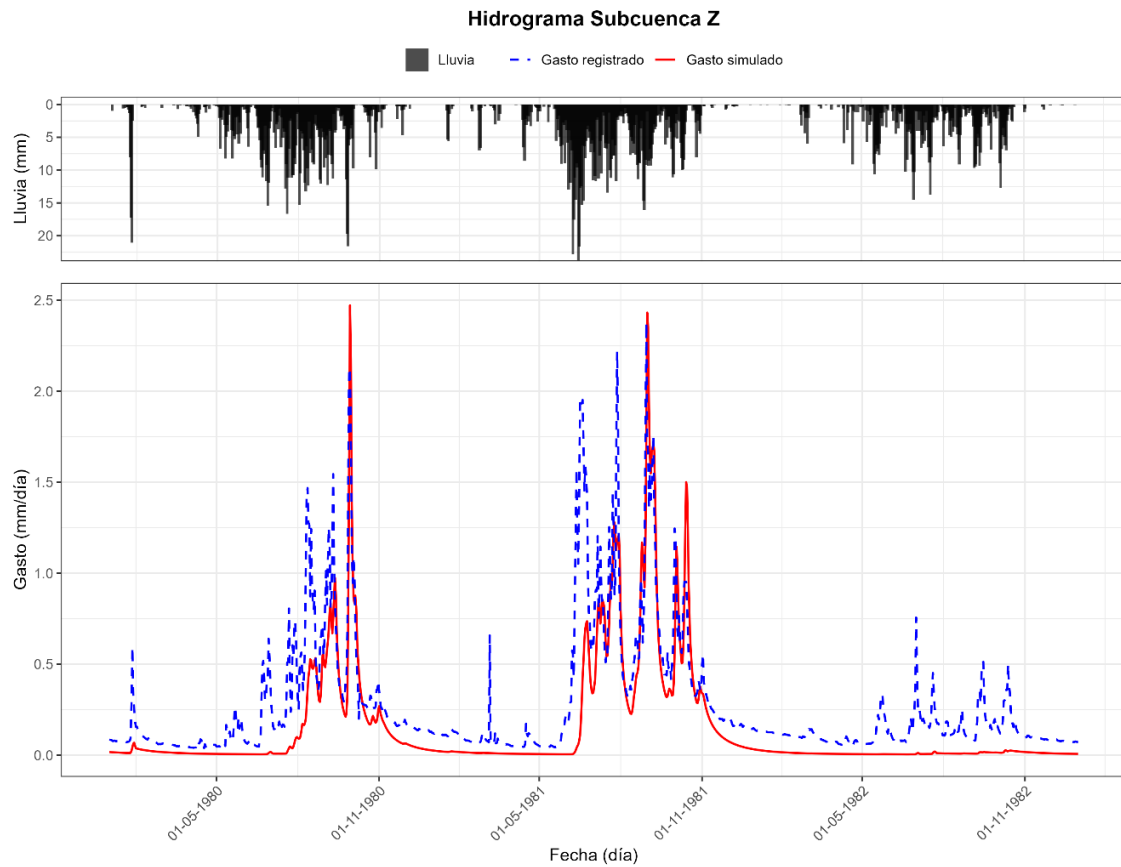


Figura 79.- Hidrograma Subcuenca Z, Cuenca Balsas 1980-1982 (elaboración propia)

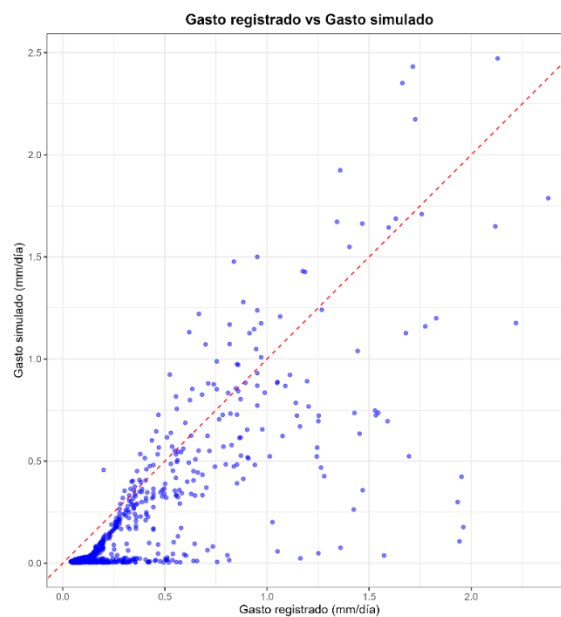


Figura 80.- Gasto registrado vs Gasto simulado, Subcuenca Z. La línea roja de 45° es para indicar la relación 1:1 (elaboración propia)

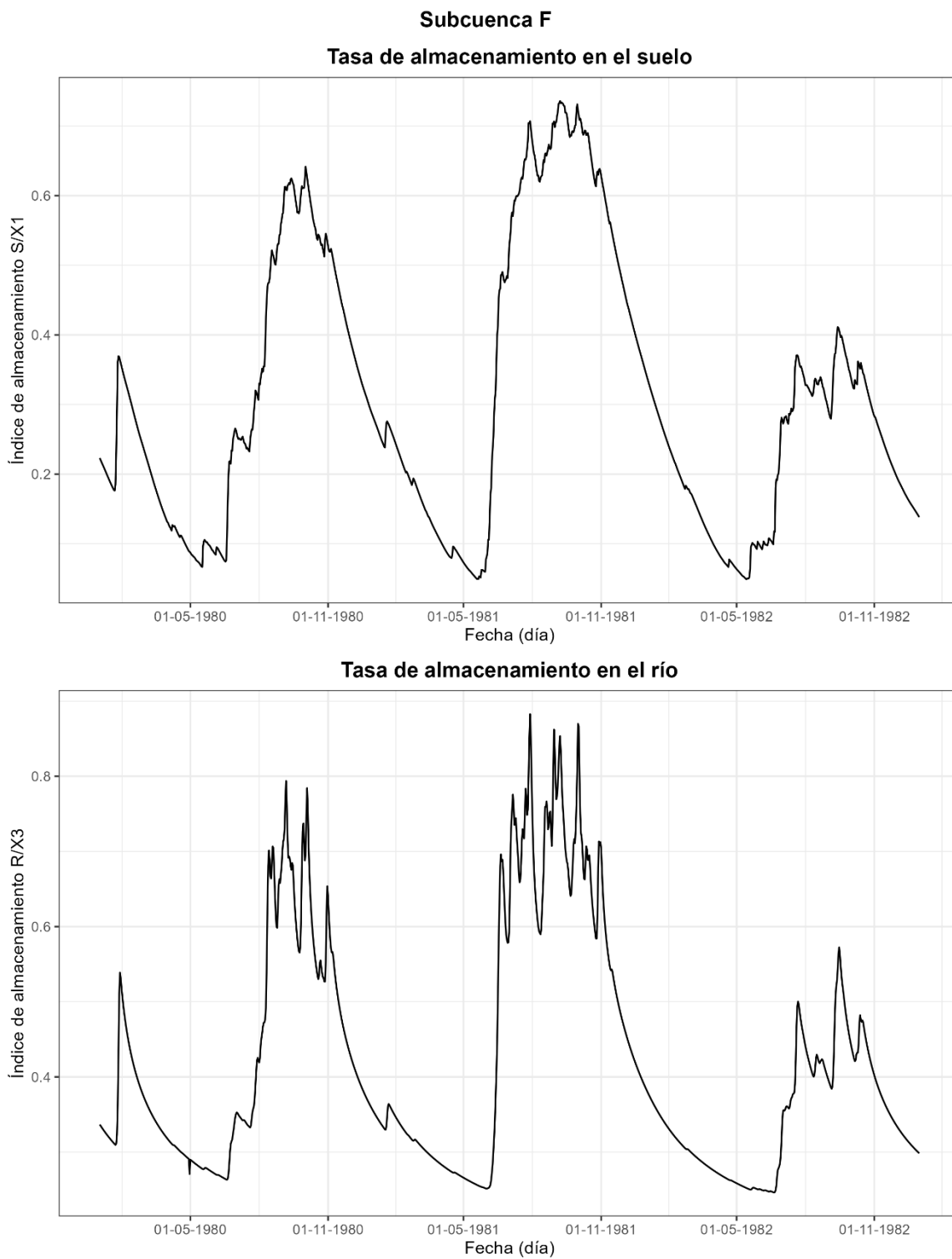


Figura 81.- Tasa de almacenamiento en el suelo y en el río, Subcuenca F, Cuenca Balsas 1980-1982 (elaboración propia)

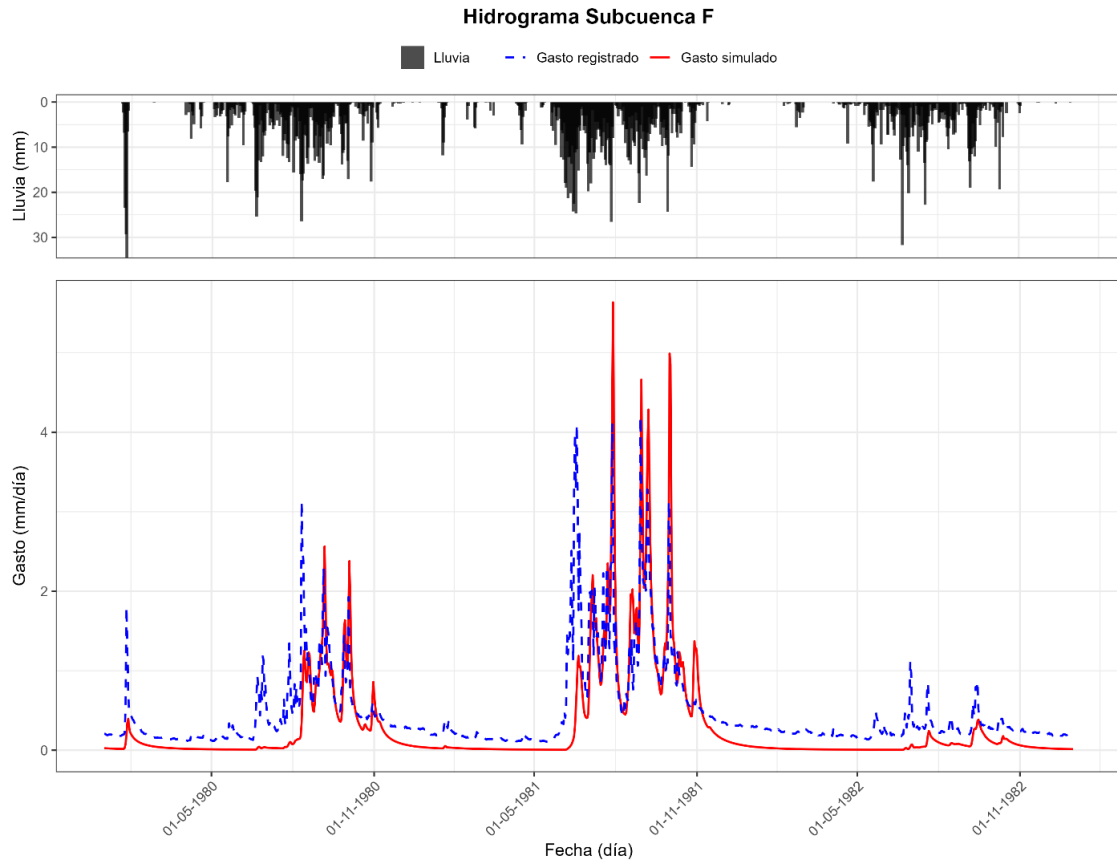


Figura 82.- Hidrograma Subcuenca F, Cuenca Balsas 1980-1982 (elaboración propia)

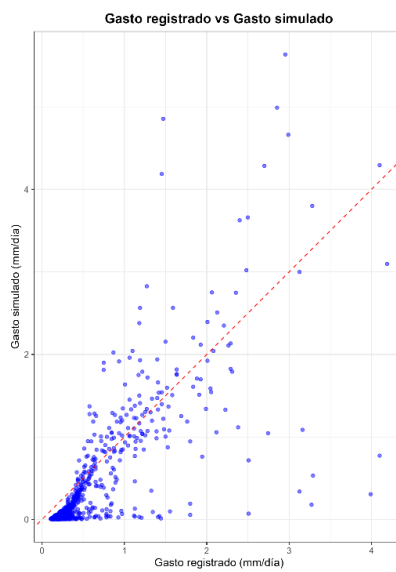


Figura 83.- Gasto registrado vs Gasto simulado, Subcuenca F. La línea roja de 45° es para indicar la relación 1:1 (elaboración propia)

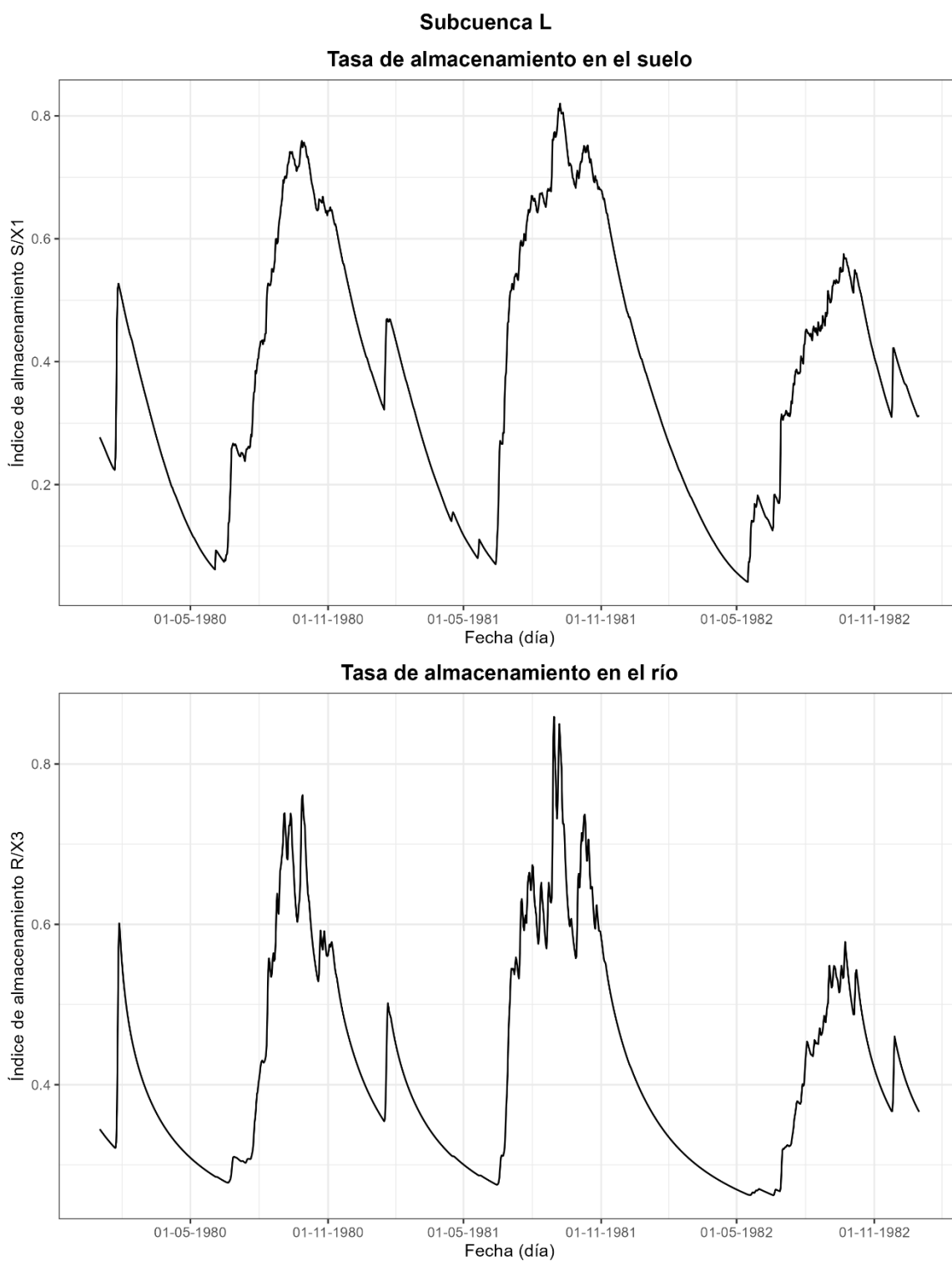


Figura 84.- Tasa de almacenamiento en el suelo y en el río, Subcuenca L, Cuenca Balsas 1980-1982 (elaboración propia)

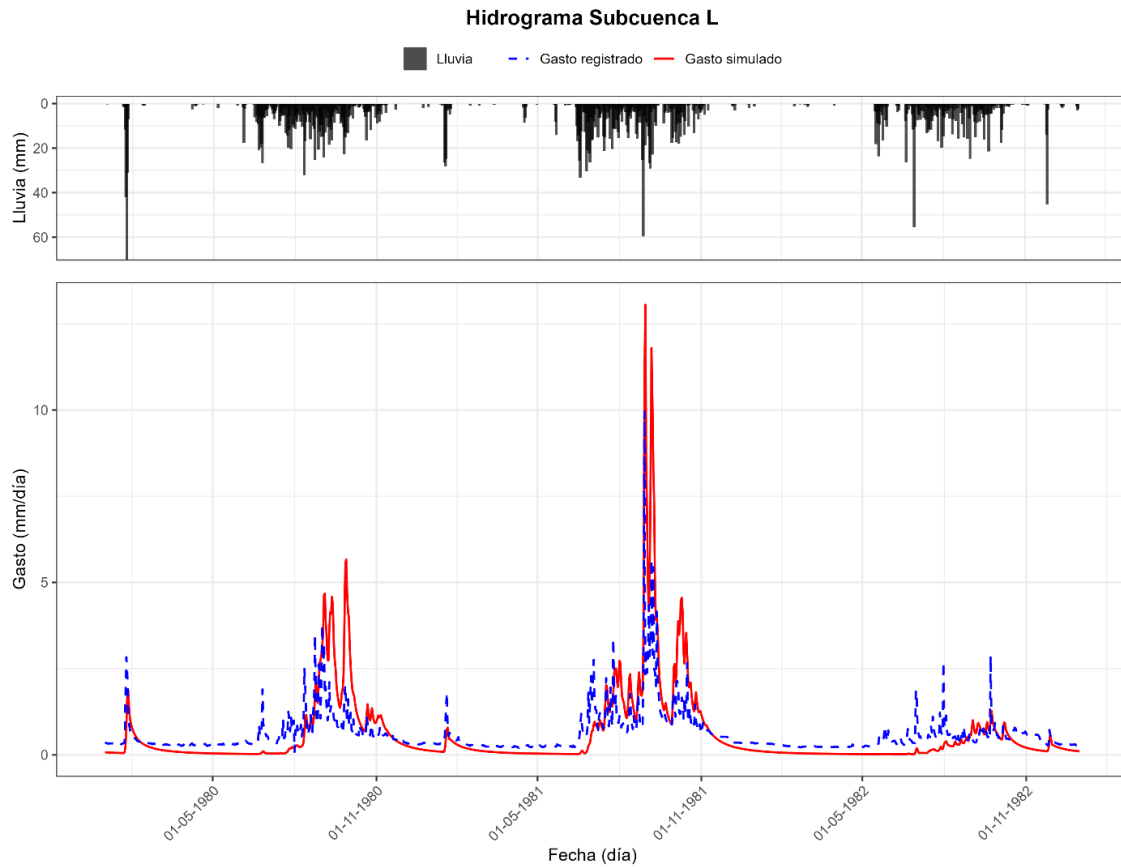


Figura 85.- Hidrograma Subcuenca L, Cuenca Balsas 1980-1982 (elaboración propia)

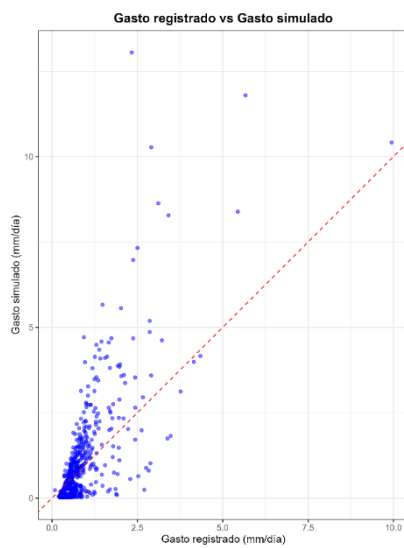


Figura 86.- Gasto registrado vs Gasto simulado, Subcuenca L. La línea roja de 45° es para indicar la relación 1:1 (elaboración propia)

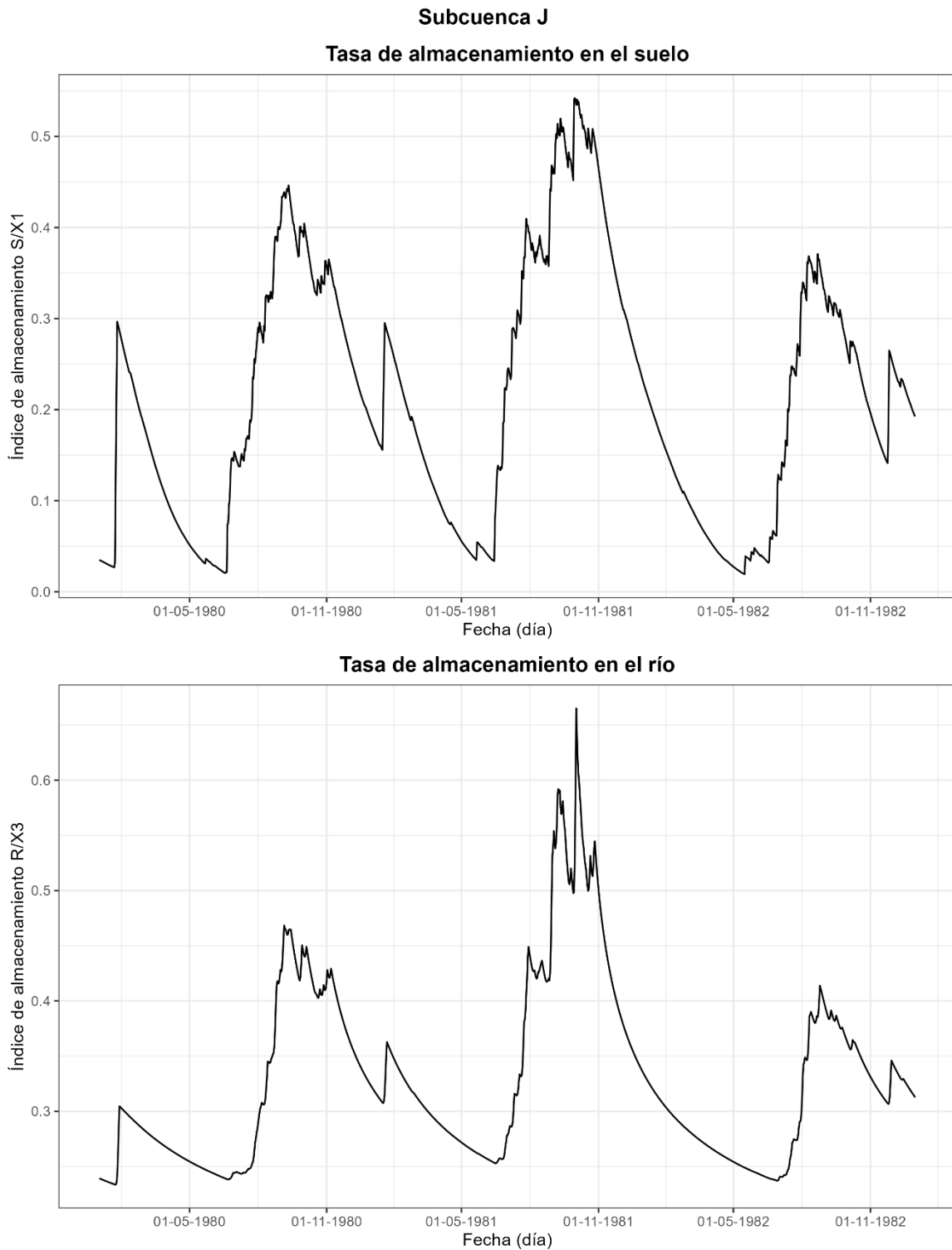


Figura 87.- Tasa de almacenamiento en el suelo y en el río, Subcuenca J, Cuenca Balsas 1980-1982 (elaboración propia)

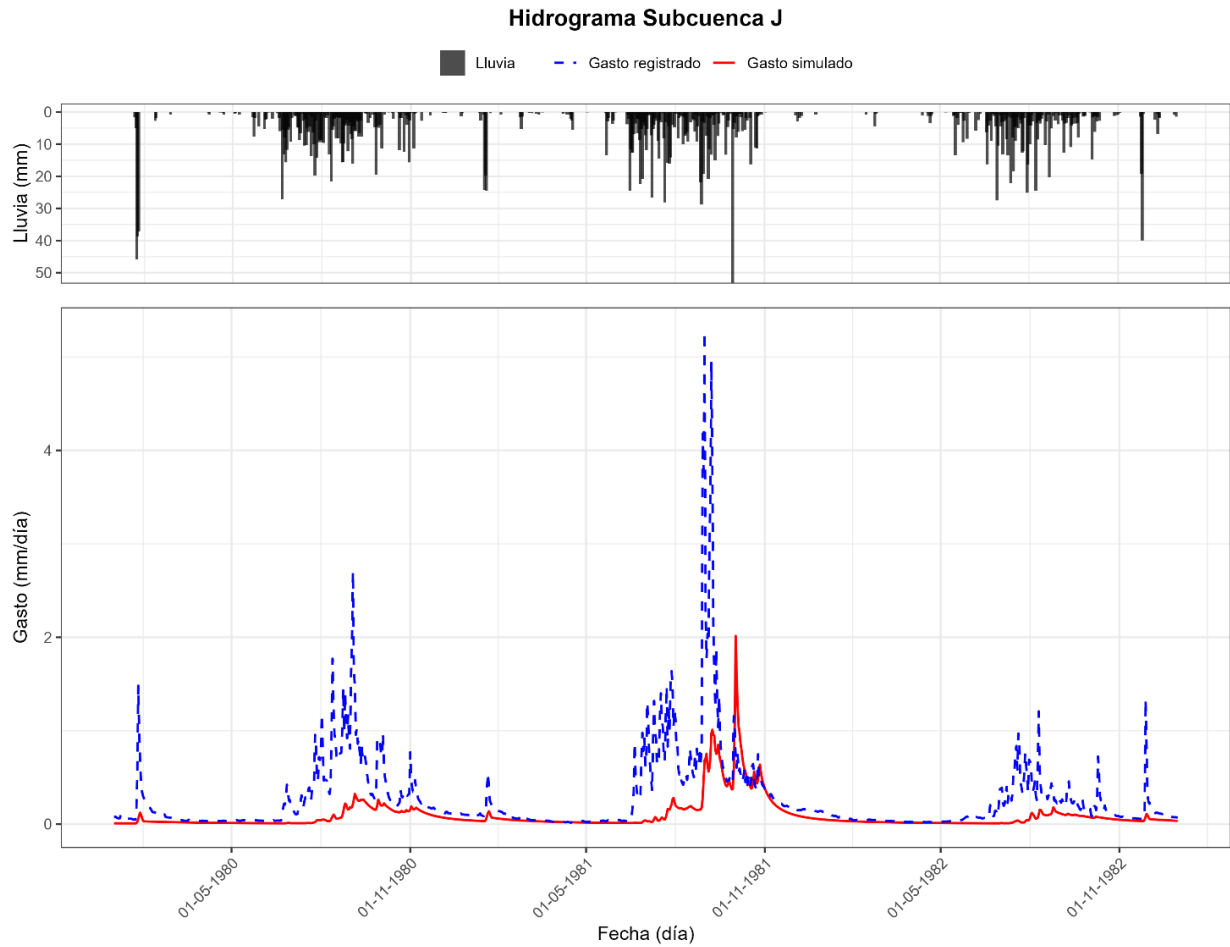


Figura 88.- Hidrograma Subcuenca J, Cuenca Balsas 1980-1982 (elaboración propia)

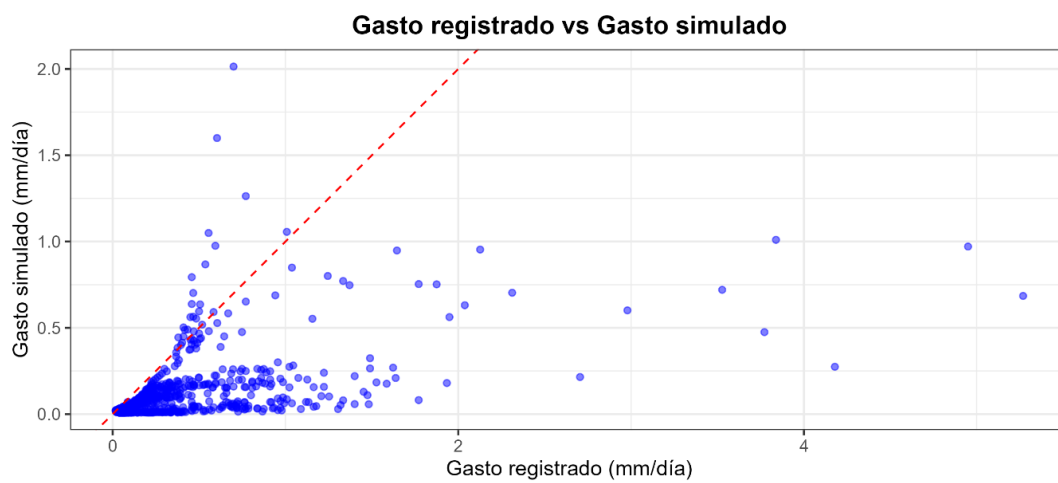


Figura 89.- Gasto registrado vs Gasto simulado, Subcuenca J. La línea roja de 45° es para indicar la relación 1:1 (elaboración propia)

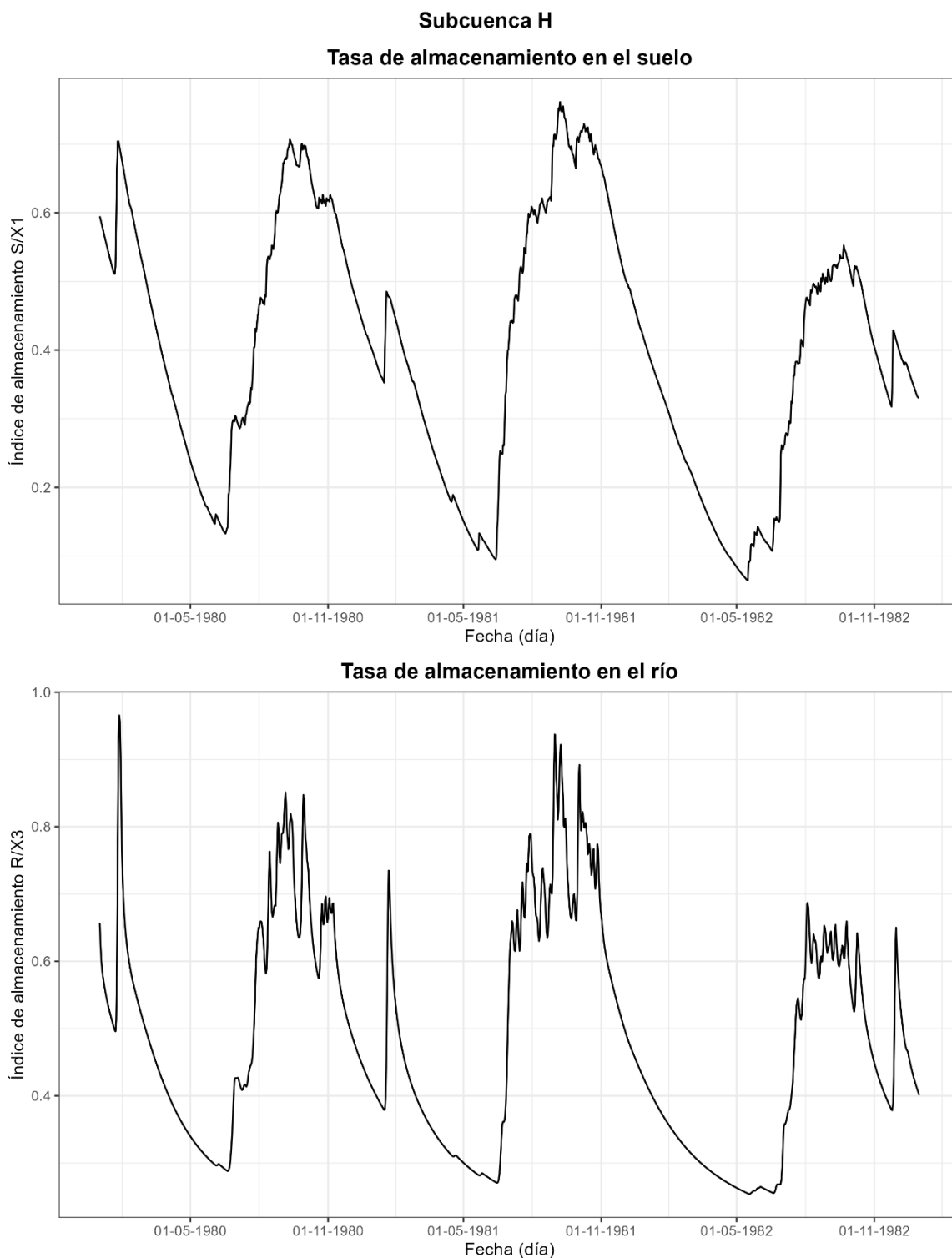


Figura 90.- Tasa de almacenamiento en el suelo y en el río, Subcuenca H, Cuenca Balsas 1980-1982 (elaboración propia)

Hidrograma Subcuenca H

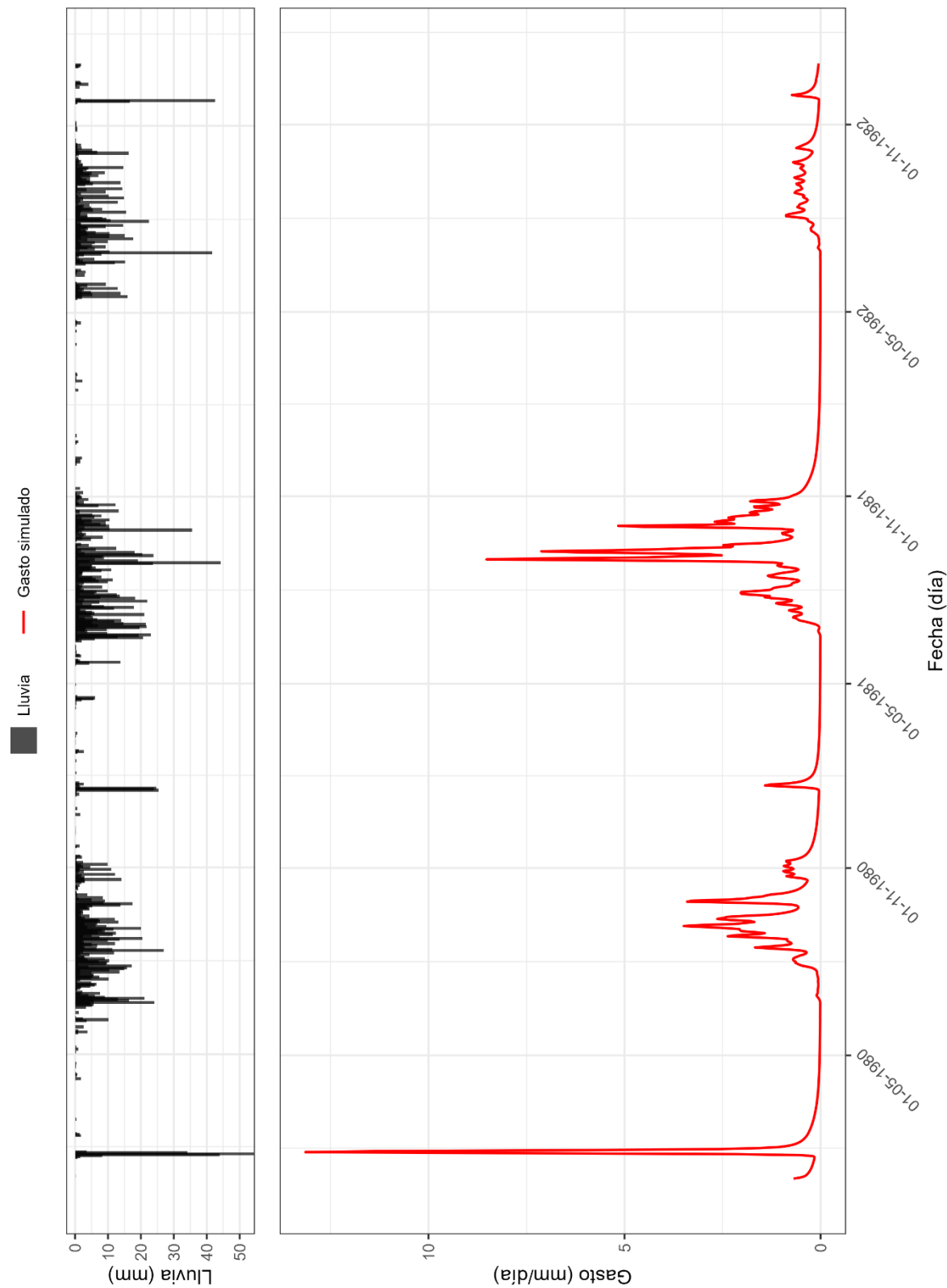


Figura 91. - Hidrograma Subcuenca H, Cuenca Balsas 1980-1982 (elaboración propia)

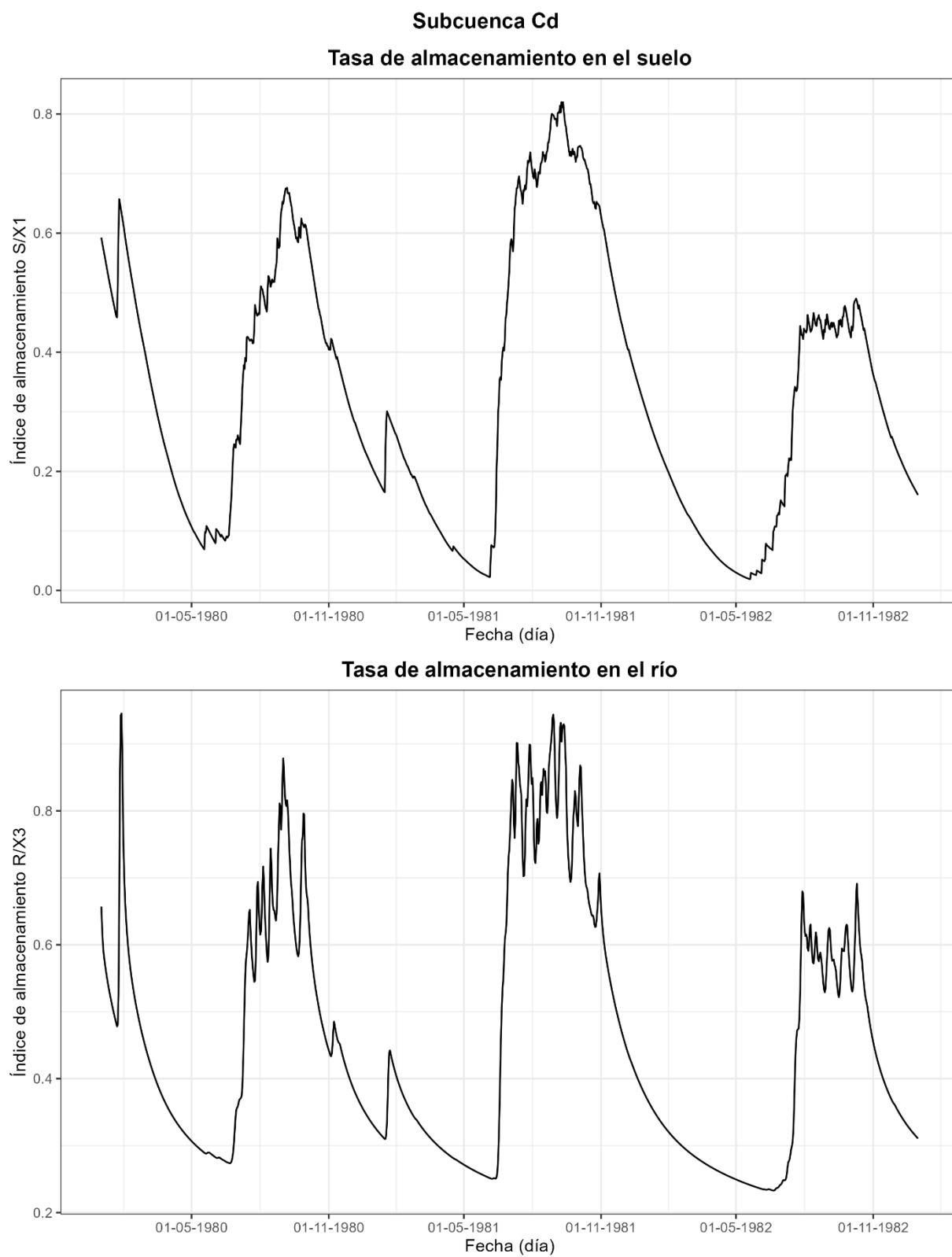


*Figura 92.- Tasa de almacenamiento en el suelo y en el río, Subcuenca Cd, Cuenca Balsas 1980-1982
(elaboración propia)*

Hidrograma Subcuenca Cd

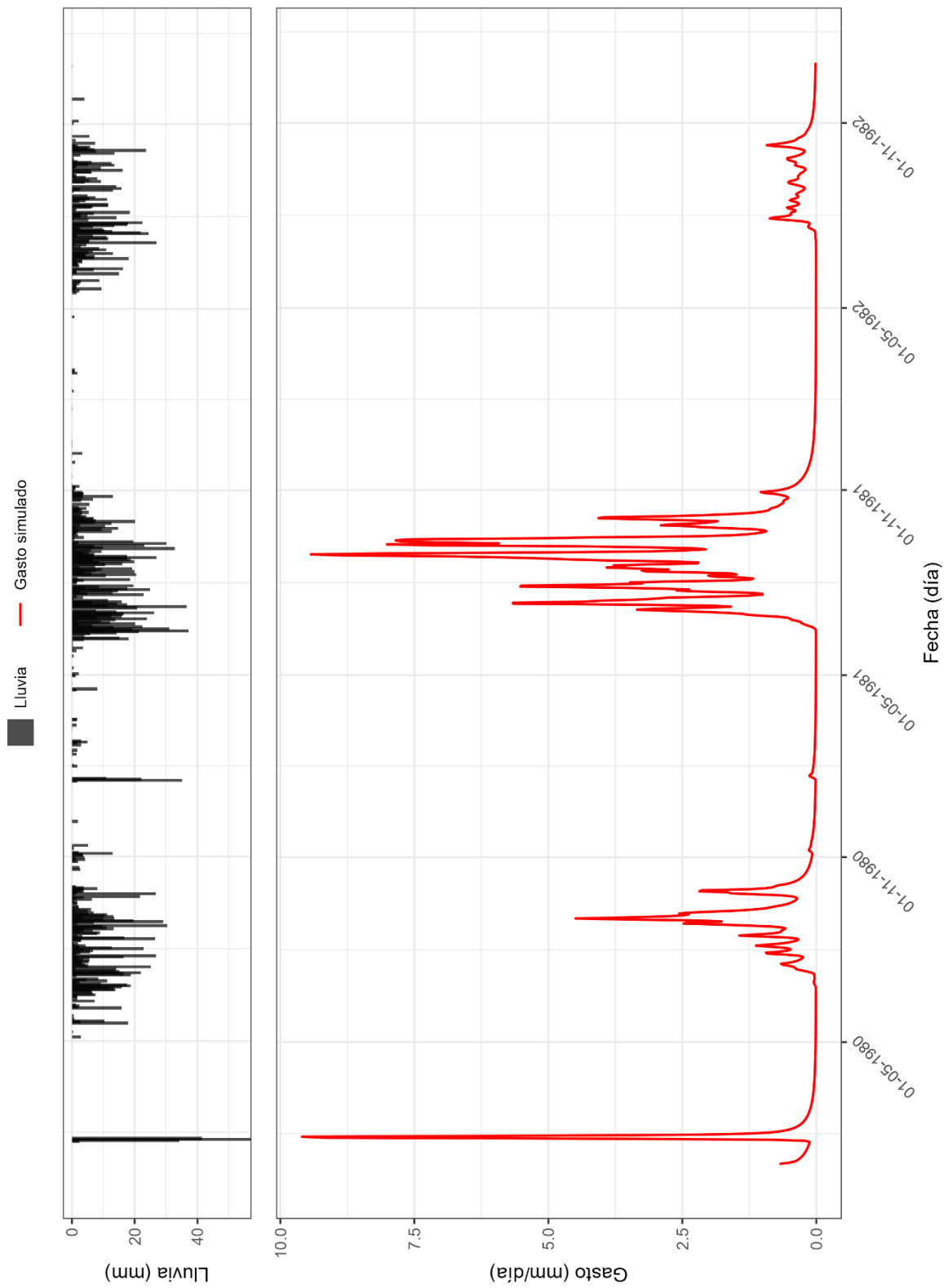


Figura 93.- Hidrograma Subcuenca Cd, Cuenca Balsas 1980-1982 (elaboración propia)

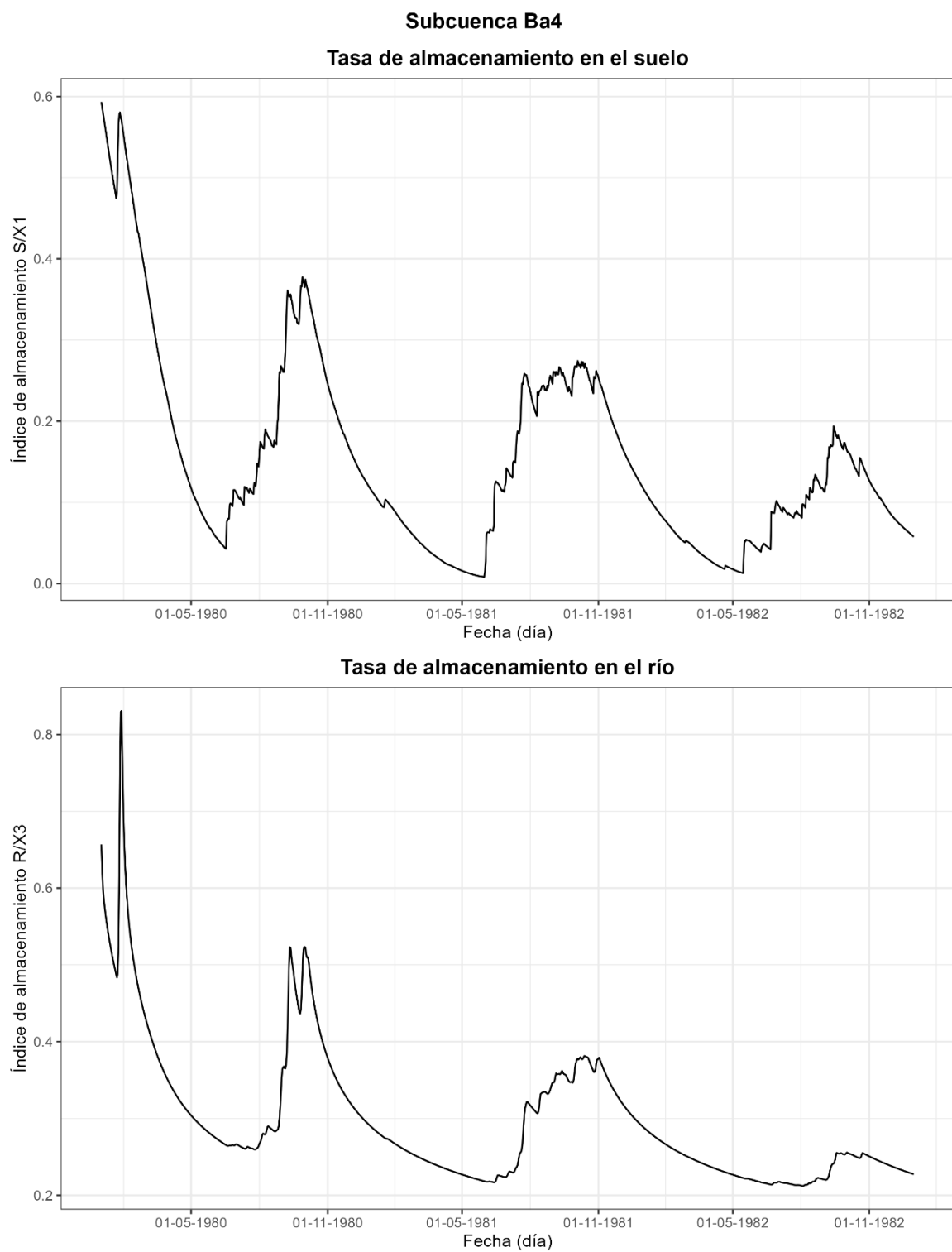


Figura 94.- Tasa de almacenamiento en el suelo y en el río, Subcuenca Ba4, Cuenca Balsas 1980-1982 (elaboración propia)

Hidrograma Subcuenca Ba4

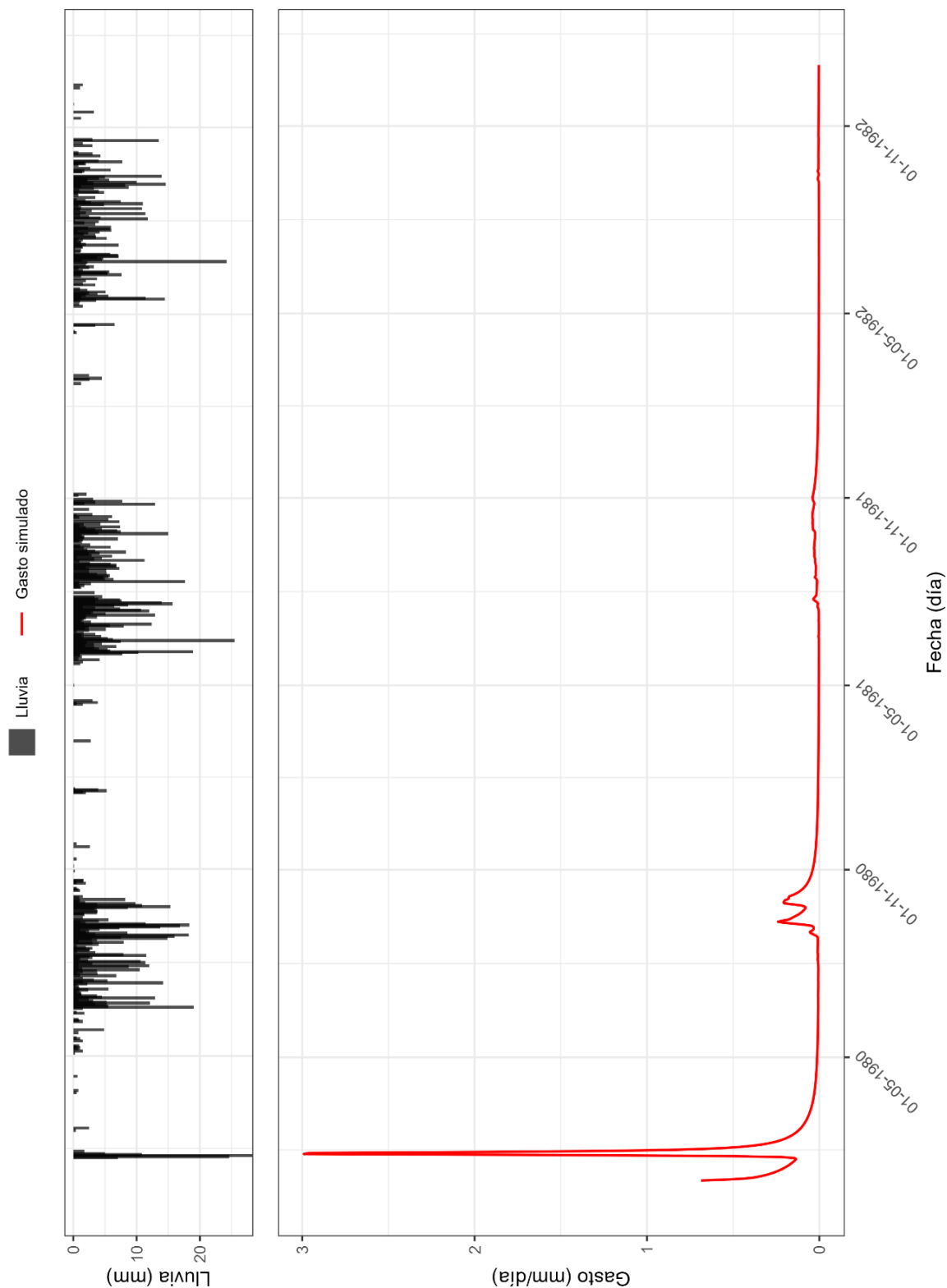


Figura 95.- Hidrograma Subcuenca Ba4, Cuenca Balsas 1980-1982 (elaboración propia)

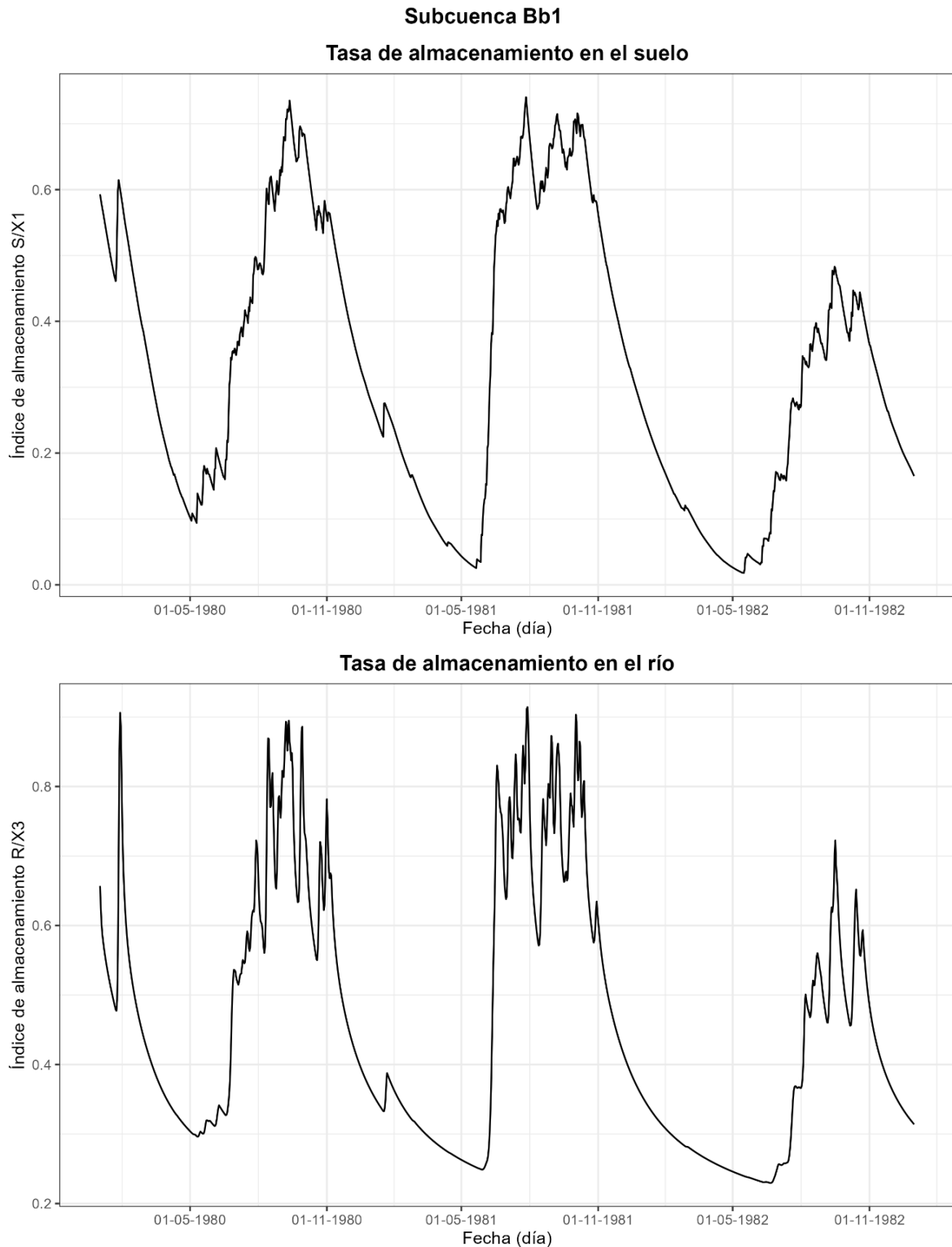


Figura 96.- Tasa de almacenamiento en el suelo y en el río, Subcuenca Bb1, Cuenca Balsas 1980-1982 (elaboración propia)

Hidrograma Subcuenca Bb1

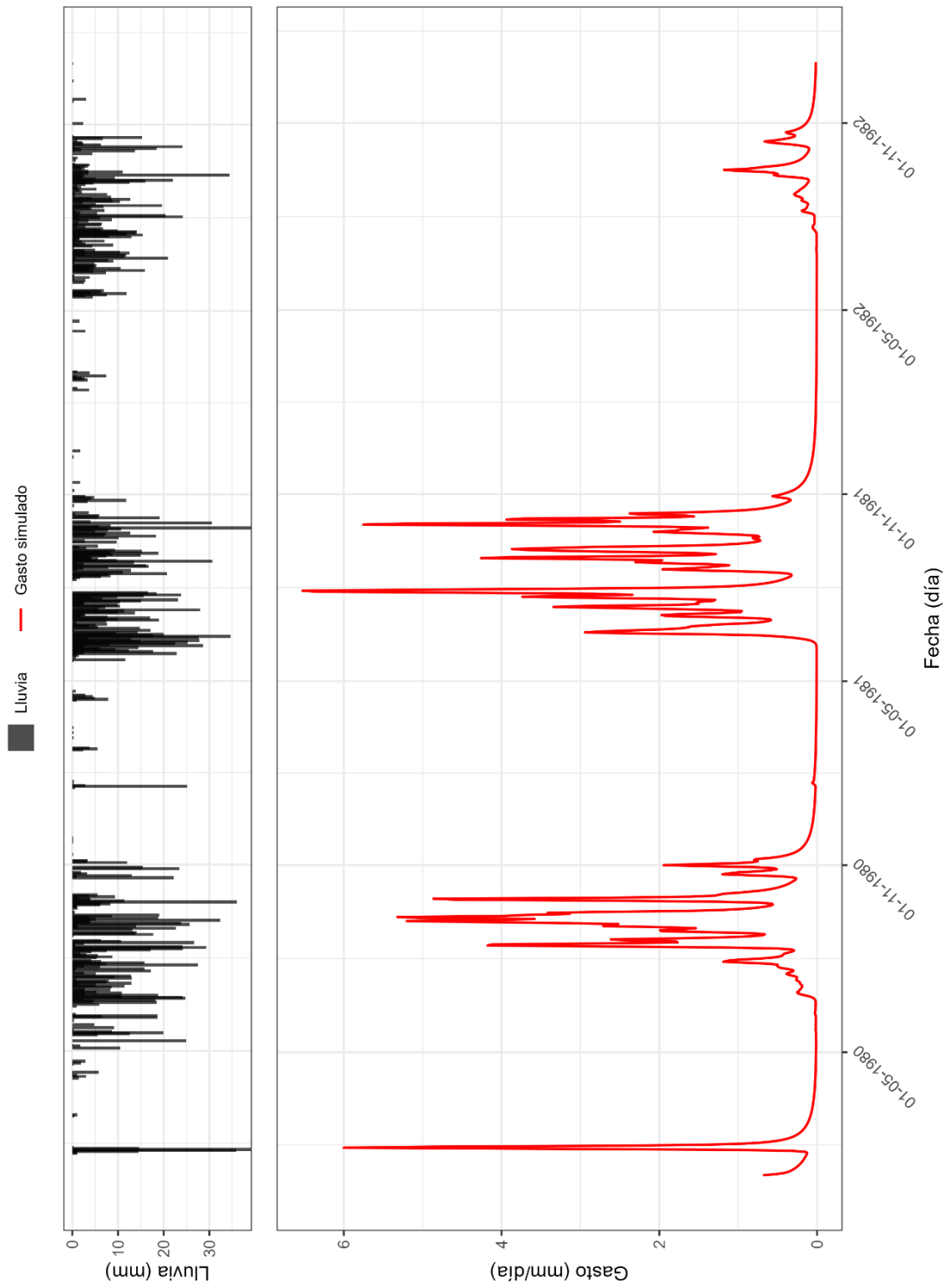


Figura 97.- Hidrograma Subcuenca Bb1, Cuenca Balsas 1980-1982 (elaboración propia)

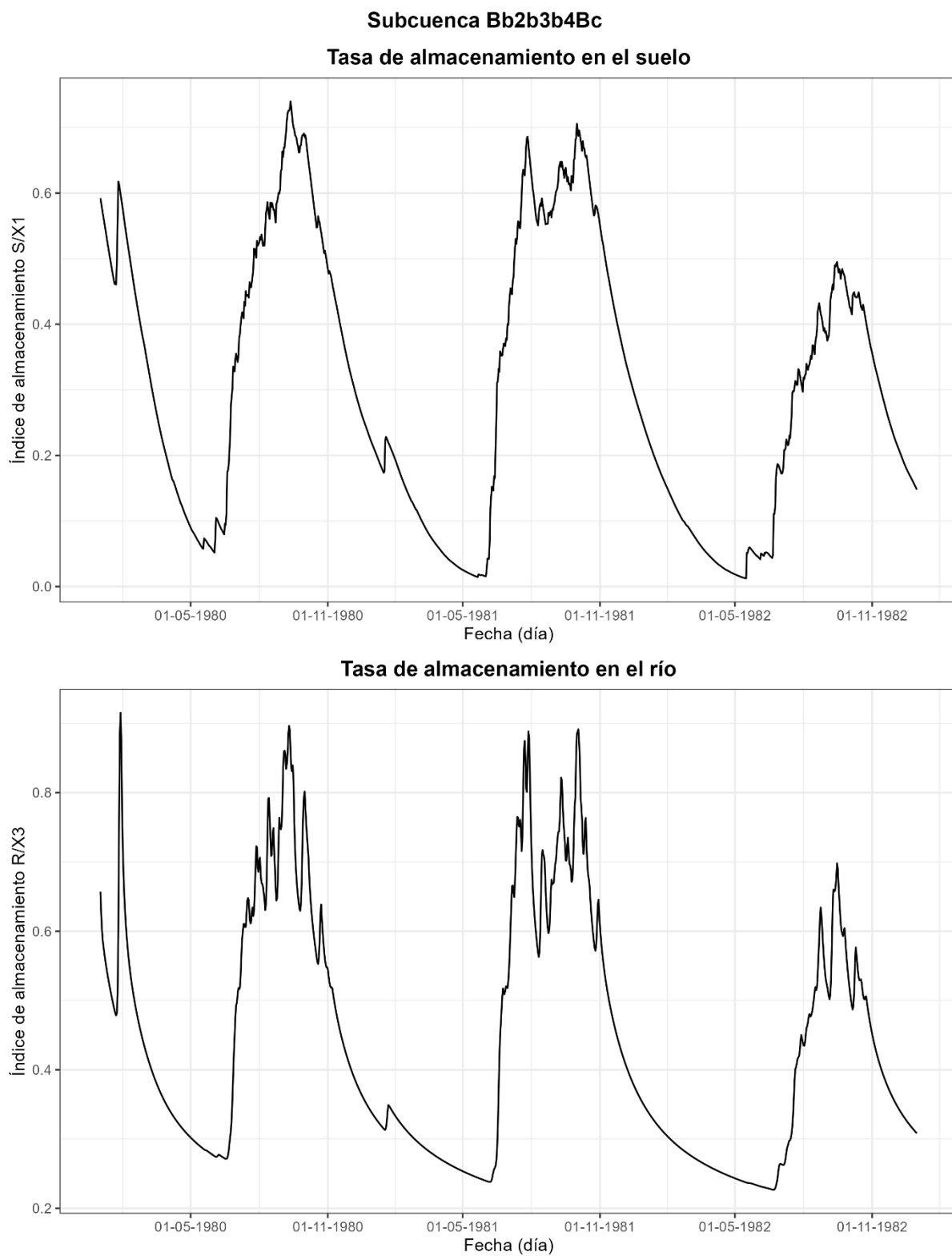


Figura 98.- Tasa de almacenamiento en el suelo y en el río, Subcuenca Bb2b3b4Bc, Cuenca Balsas 1980-1982 (elaboración propia)

Hidrograma Subcuenca Bb2b3b4Bc

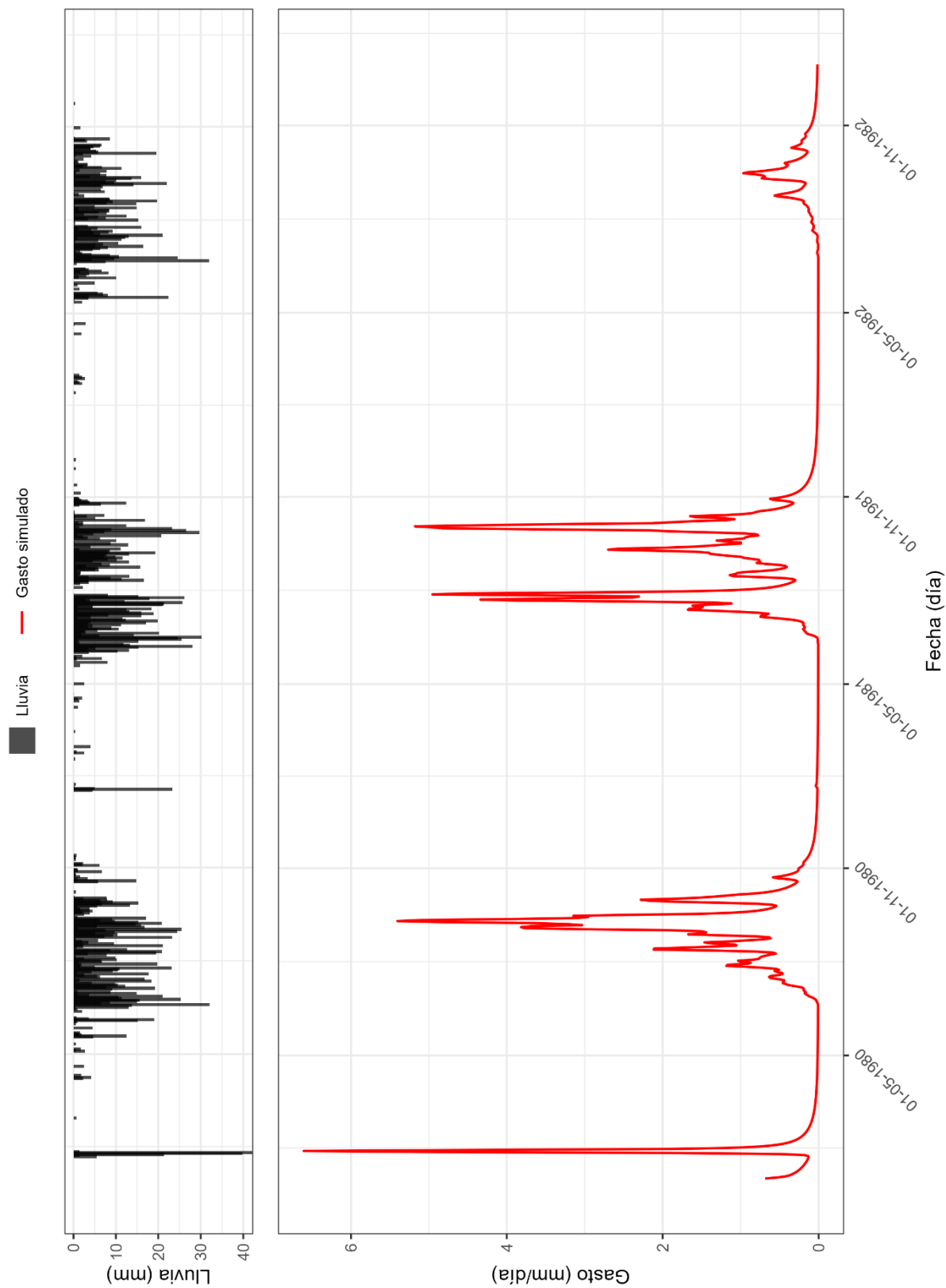


Figura 99.- Hidrograma Subcuenca Bb2b3b4Bc, Cuenca Balsas 1980-1982 (elaboración propia)

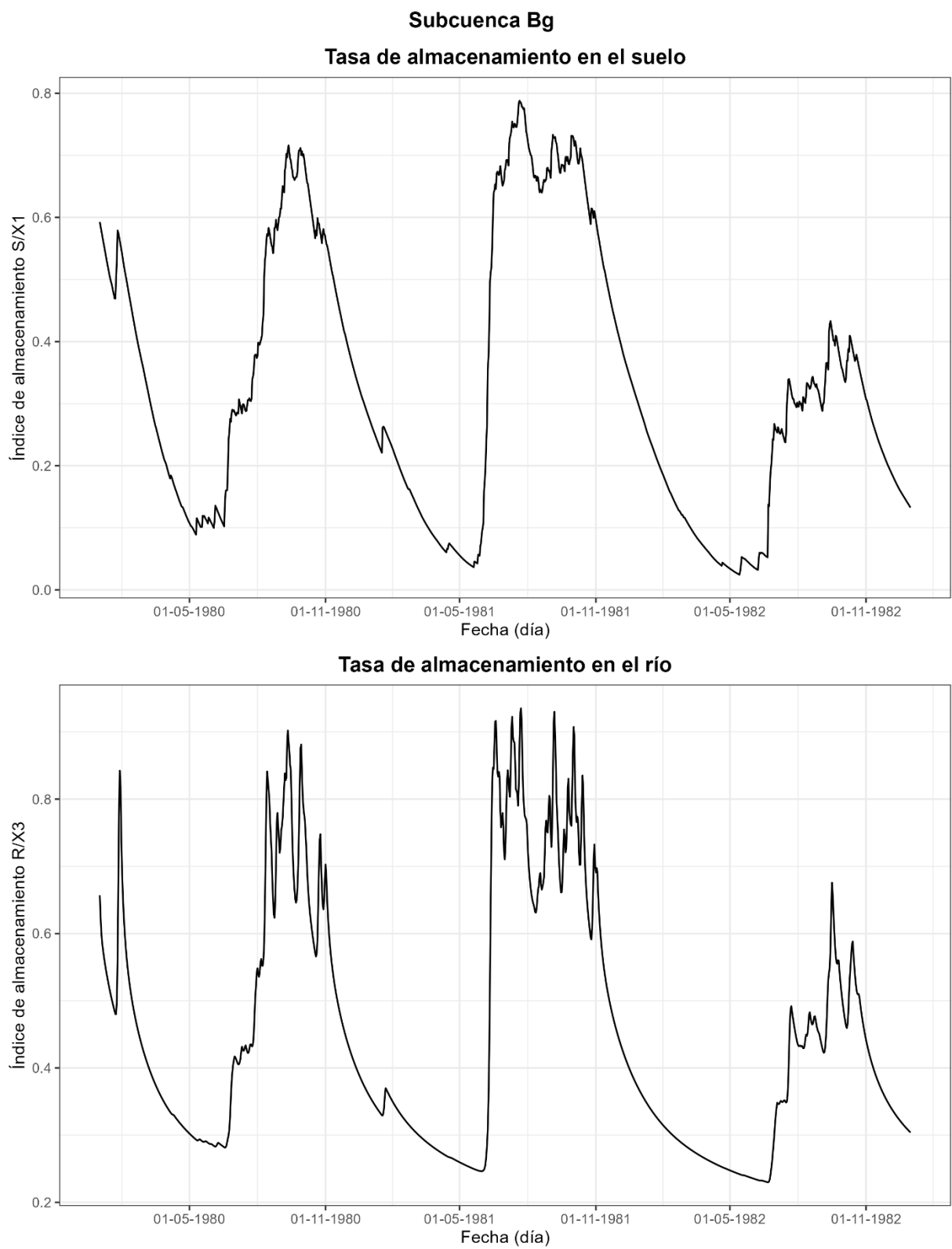


Figura 100.- Tasa de almacenamiento en el suelo y en el río, Subcuenca Bg, Cuenca Balsas 1980-1982 (elaboración propia)

Hidrograma Subcuenca Bg

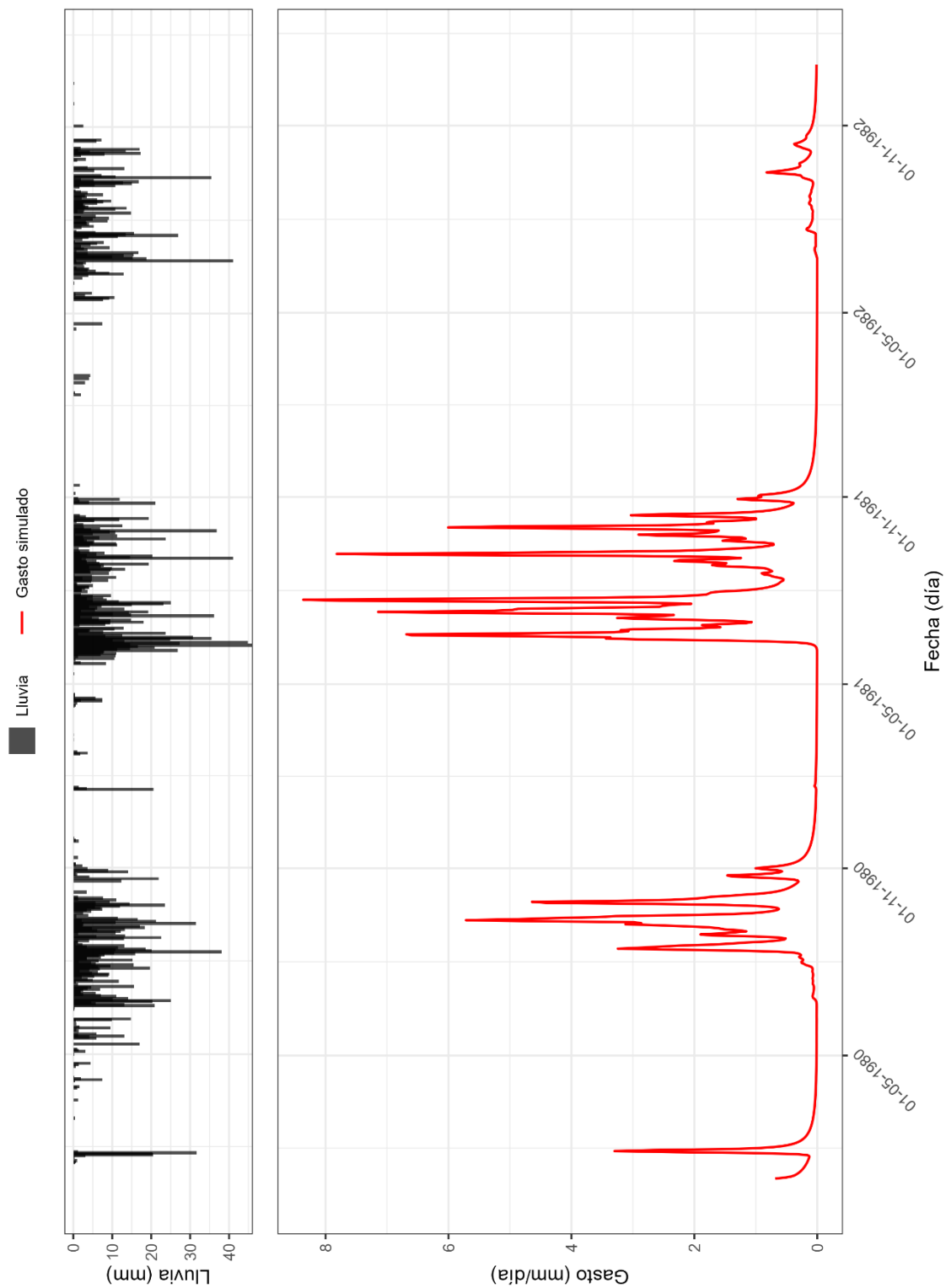


Figura 101.- Hidrograma Subcuenca Bg, Cuenca Balsas 1980-1982 (elaboración propia)

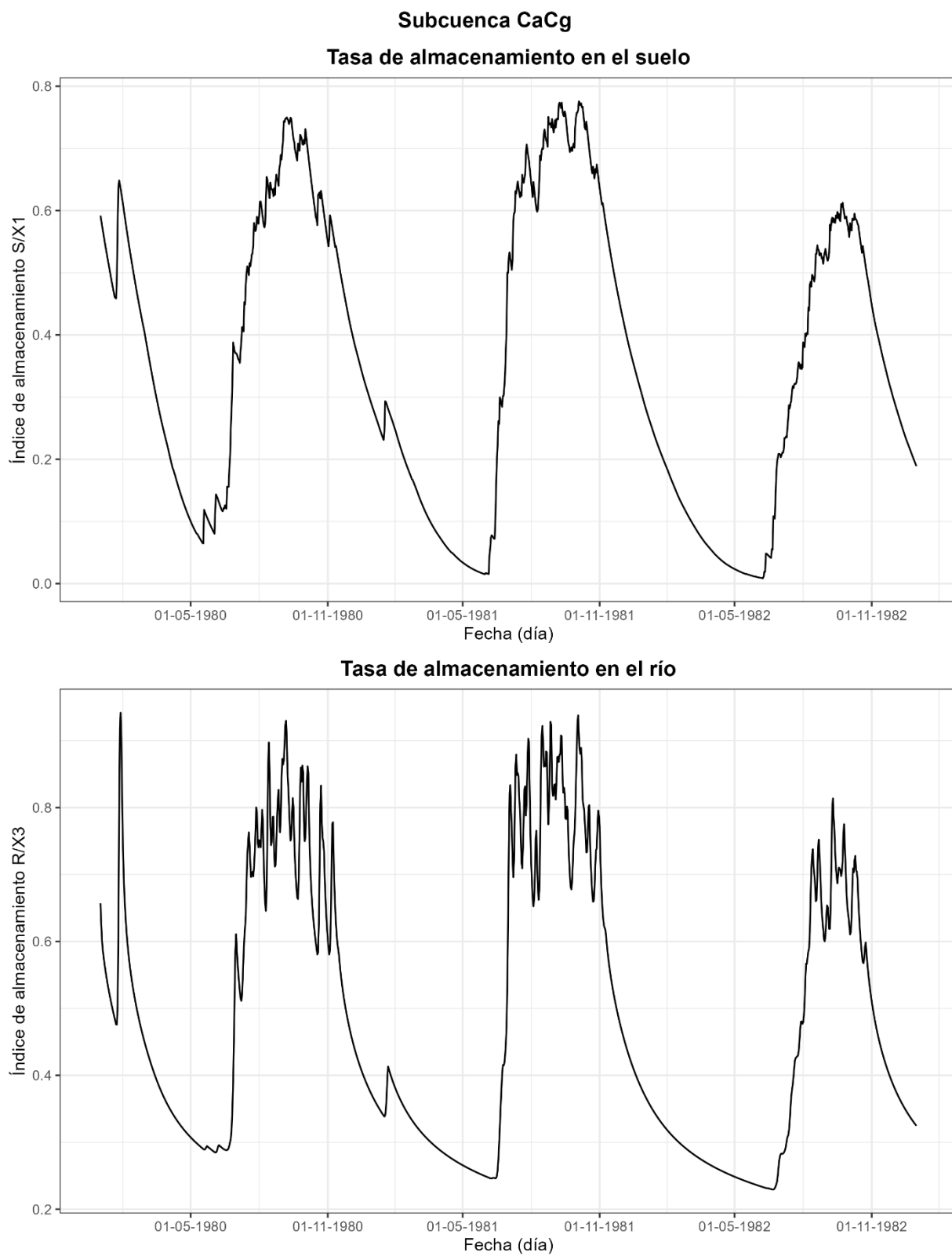


Figura 102.- Tasa de almacenamiento en el suelo y en el río, Subcuenca CaCg, Cuenca Balsas 1980-1982 (elaboración propia)

Hidrograma Subcuenca CaCg

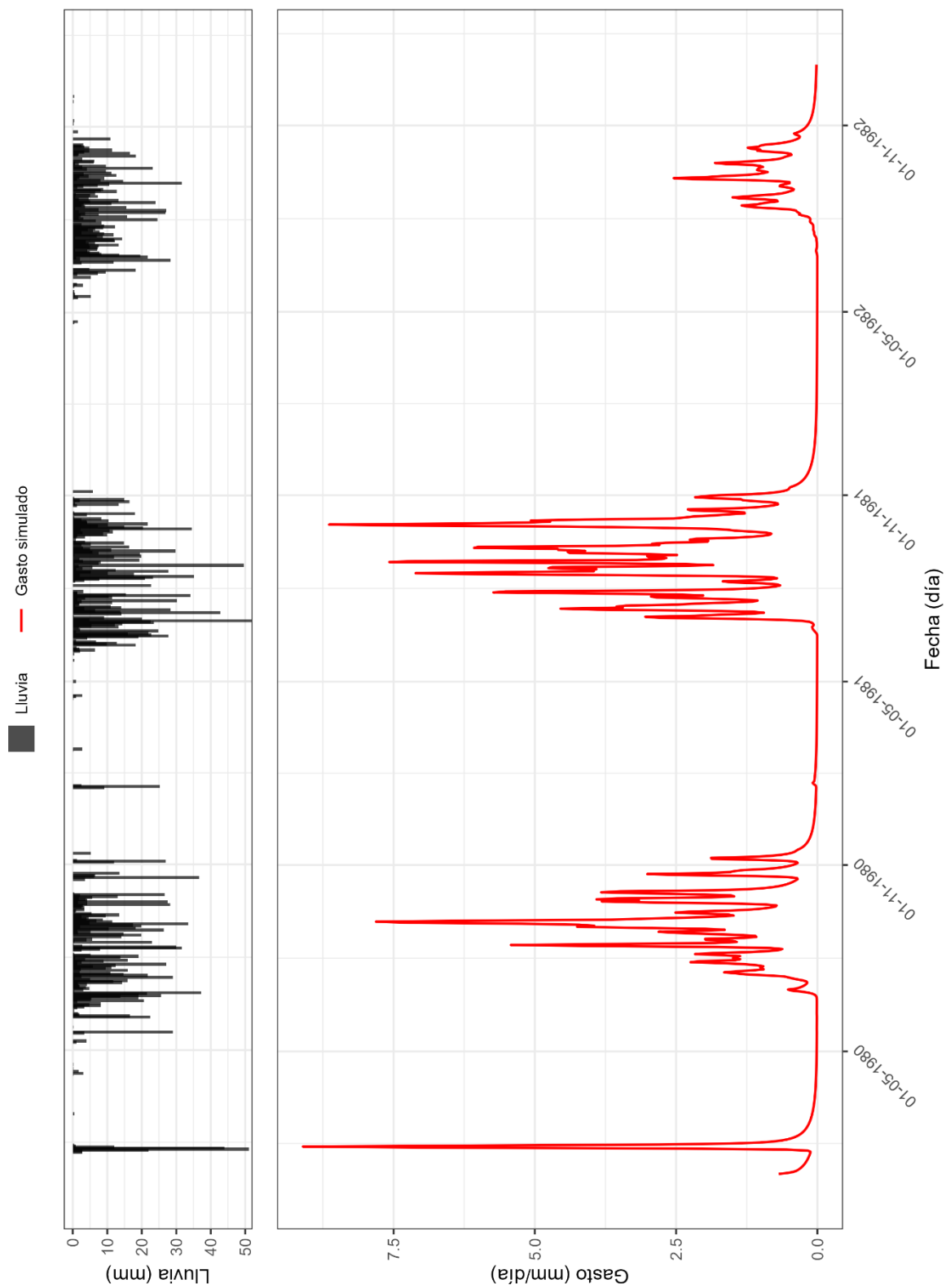


Figura 103.- Hidrograma Subcuenca CaCg, Cuenca Balsas 1980-1982 (elaboración propia)

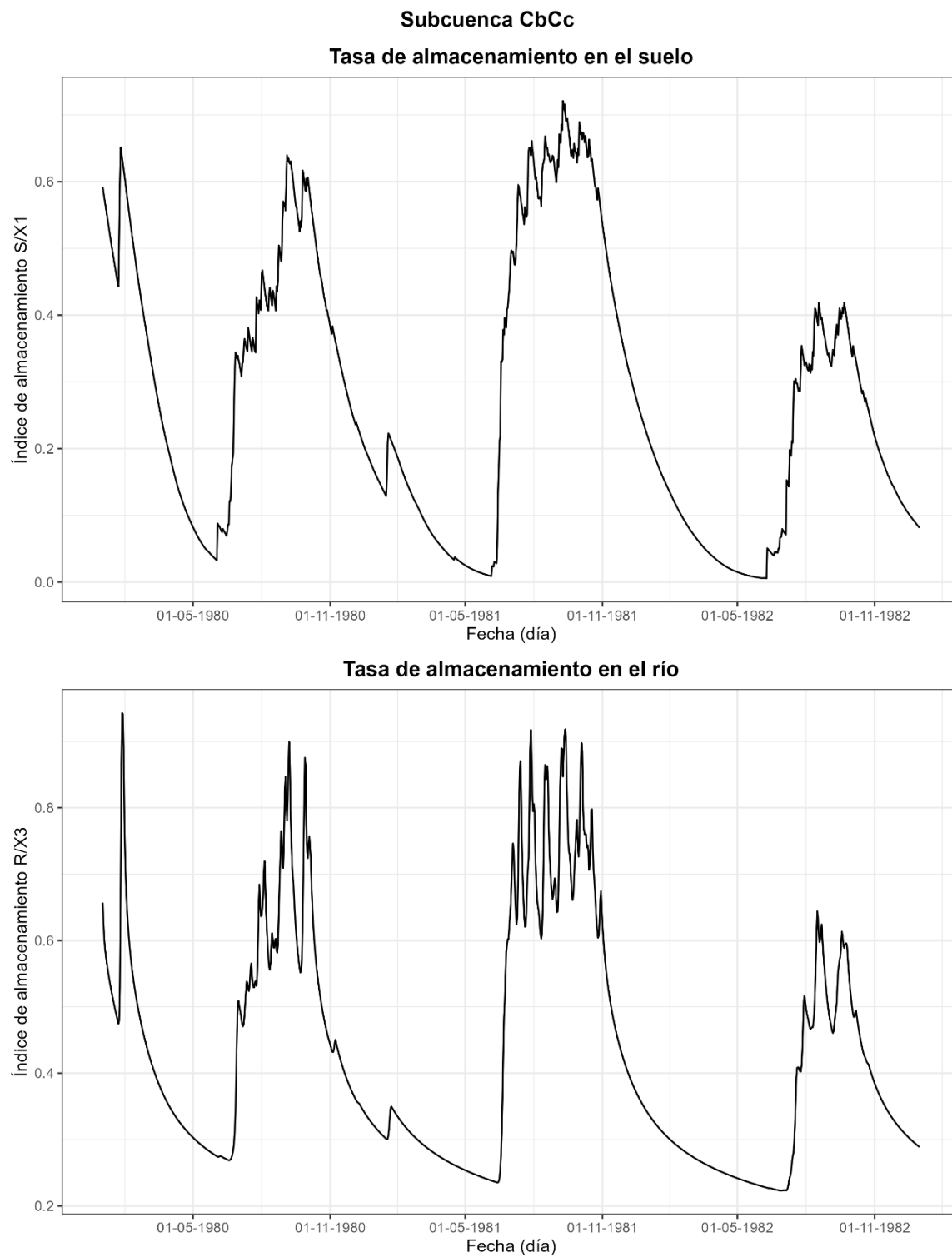


Figura 104.- Tasa de almacenamiento en el suelo y en el río, Subcuenca CbCc, Cuenca Balsas 1980-1982 (elaboración propia)

Hidrograma Subcuenca CbCc

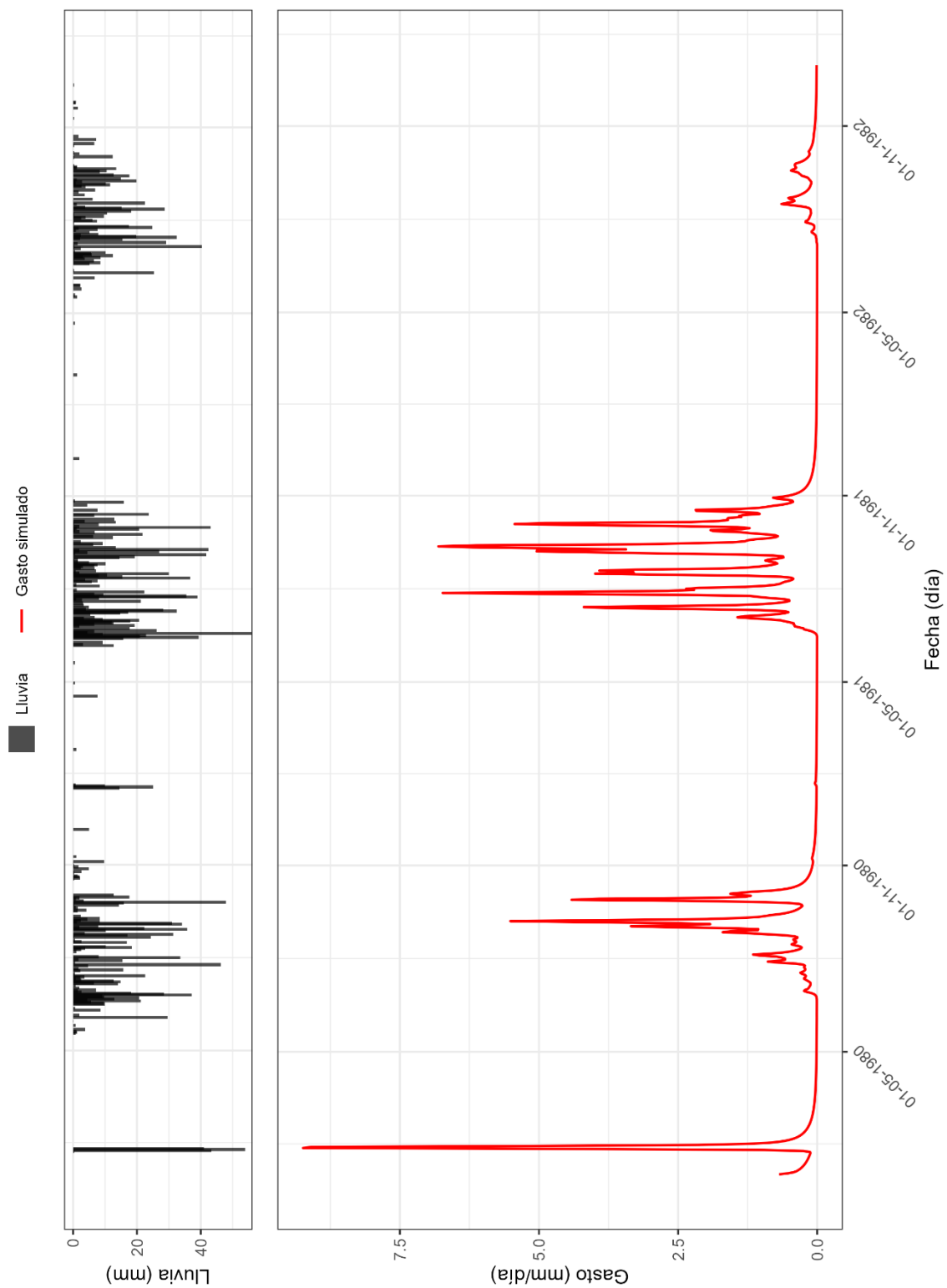


Figura 105.- Hidrograma Subcuenca CbCc, Cuenca Balsas 1980-1982 (elaboración propia)

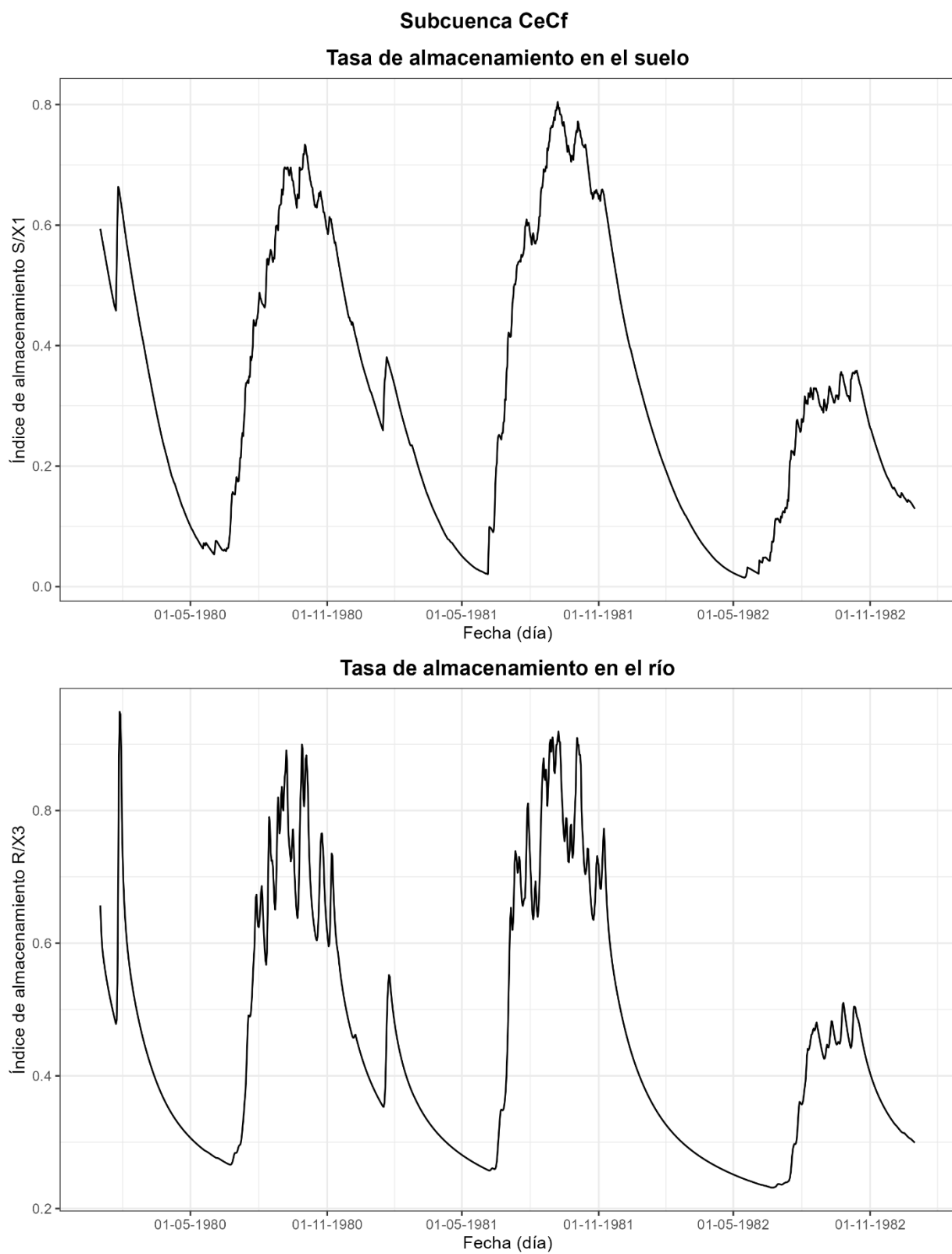


Figura 106.- Tasa de almacenamiento en el suelo y en el río, Subcuenca CeCf, Cuenca Balsas 1980-1982 (elaboración propia)

Hidrograma Subcuenca CeCf

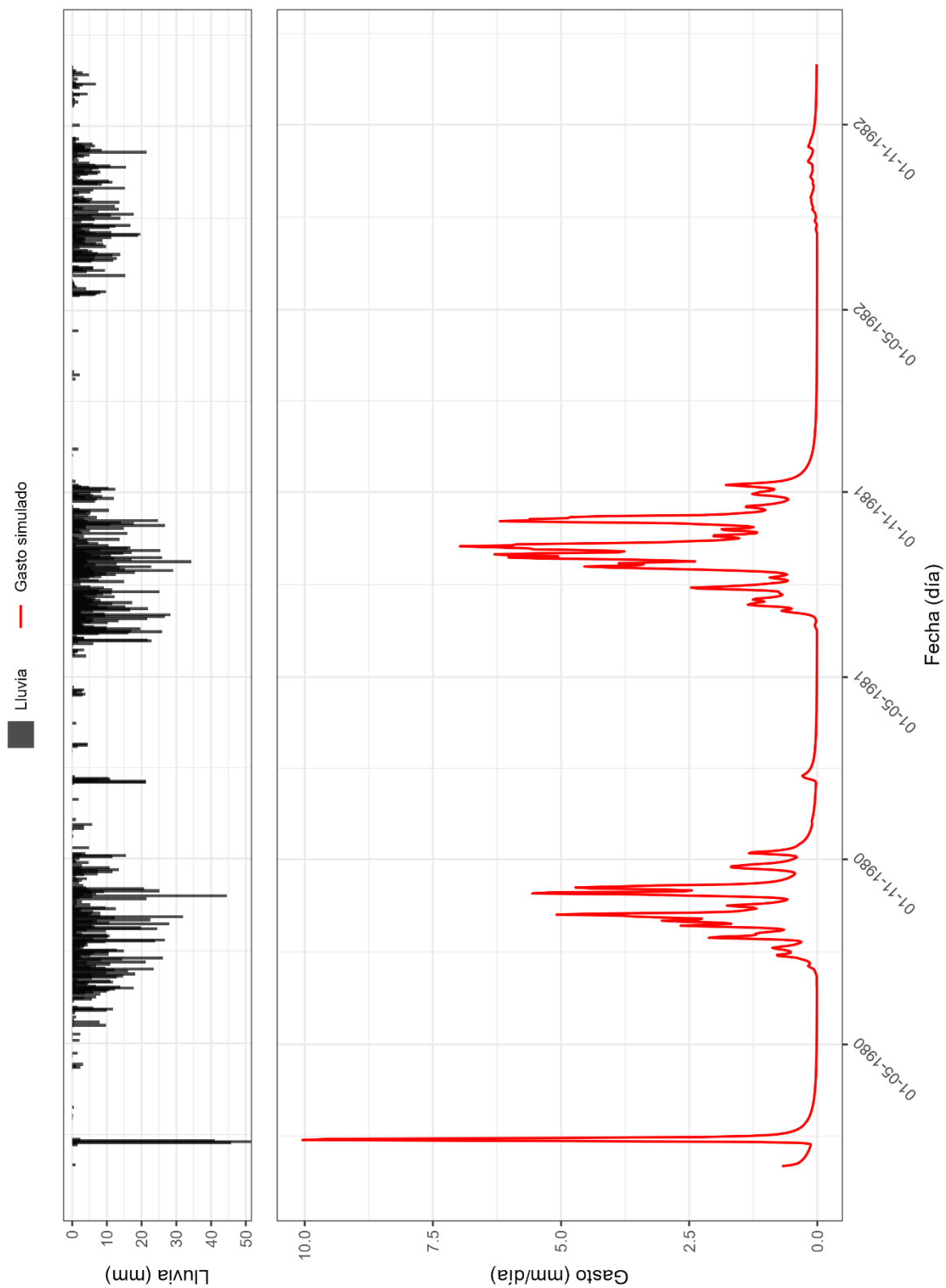


Figura 107.- Hidrograma Subcuenca CeCf, Cuenca Balsas 1980-1982 (elaboración propia)

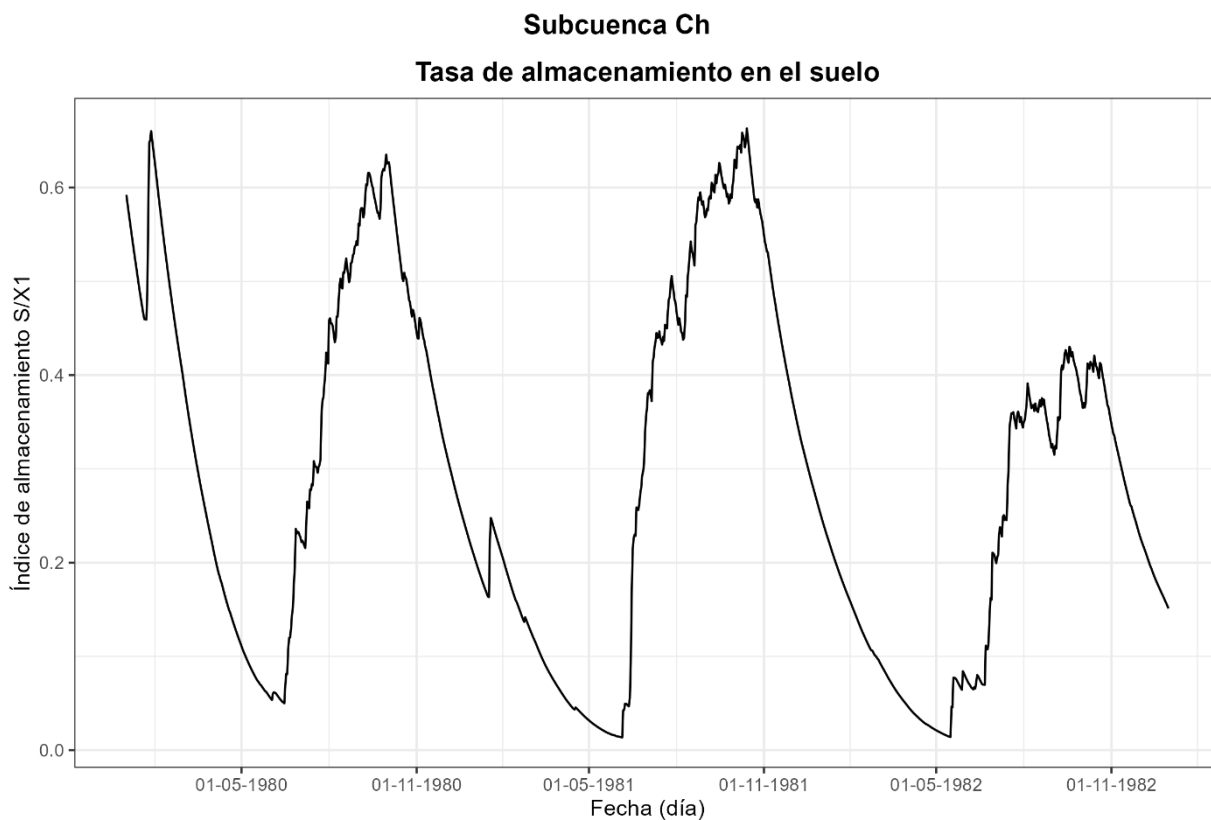
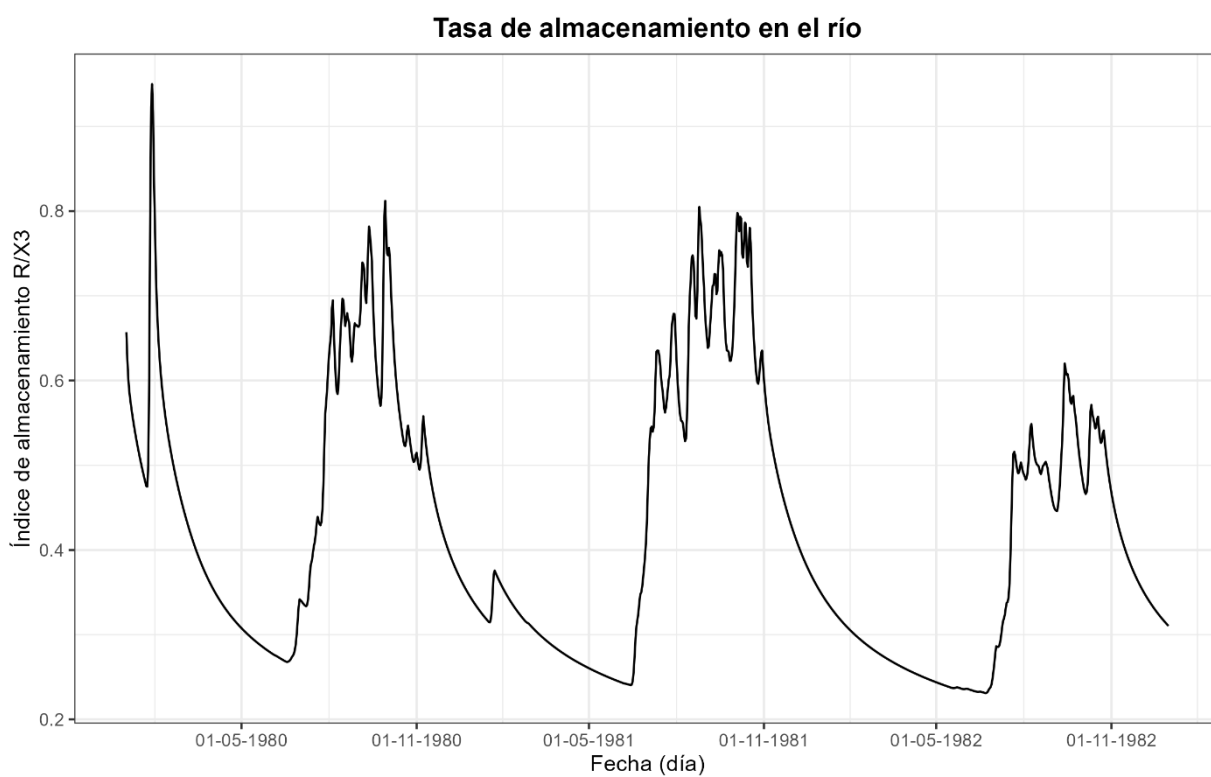


Figura 108.- Tasa de almacenamiento en el suelo y en el río, Subcuenca Ch, Cuenca Balsas 1980-1982 (elaboración propia)

Hidrograma Subcuenca Ch

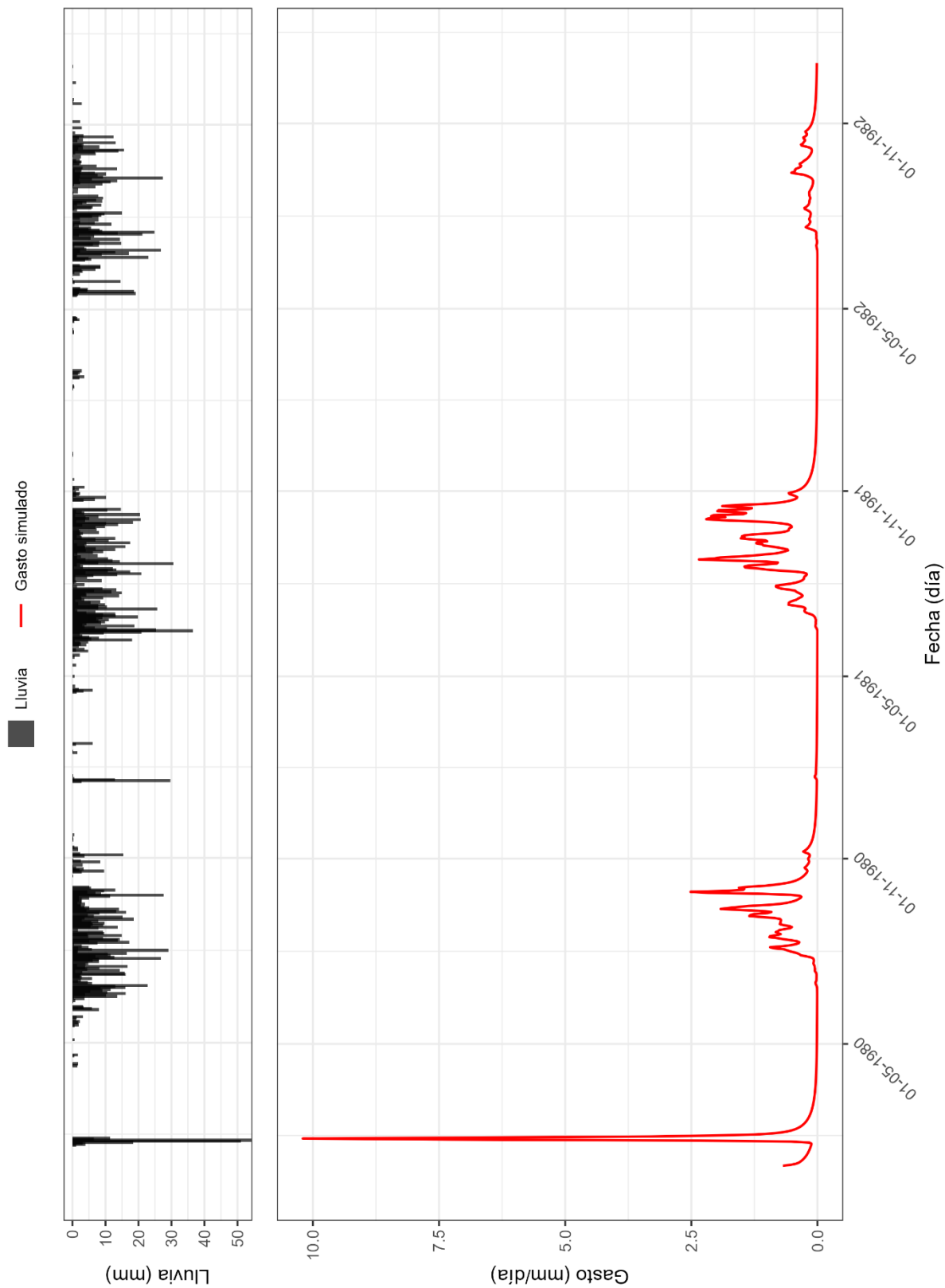


Figura 109.- Hidrograma Subcuenca Ch, Cuenca Balsas 1980-1982 (elaboración propia)

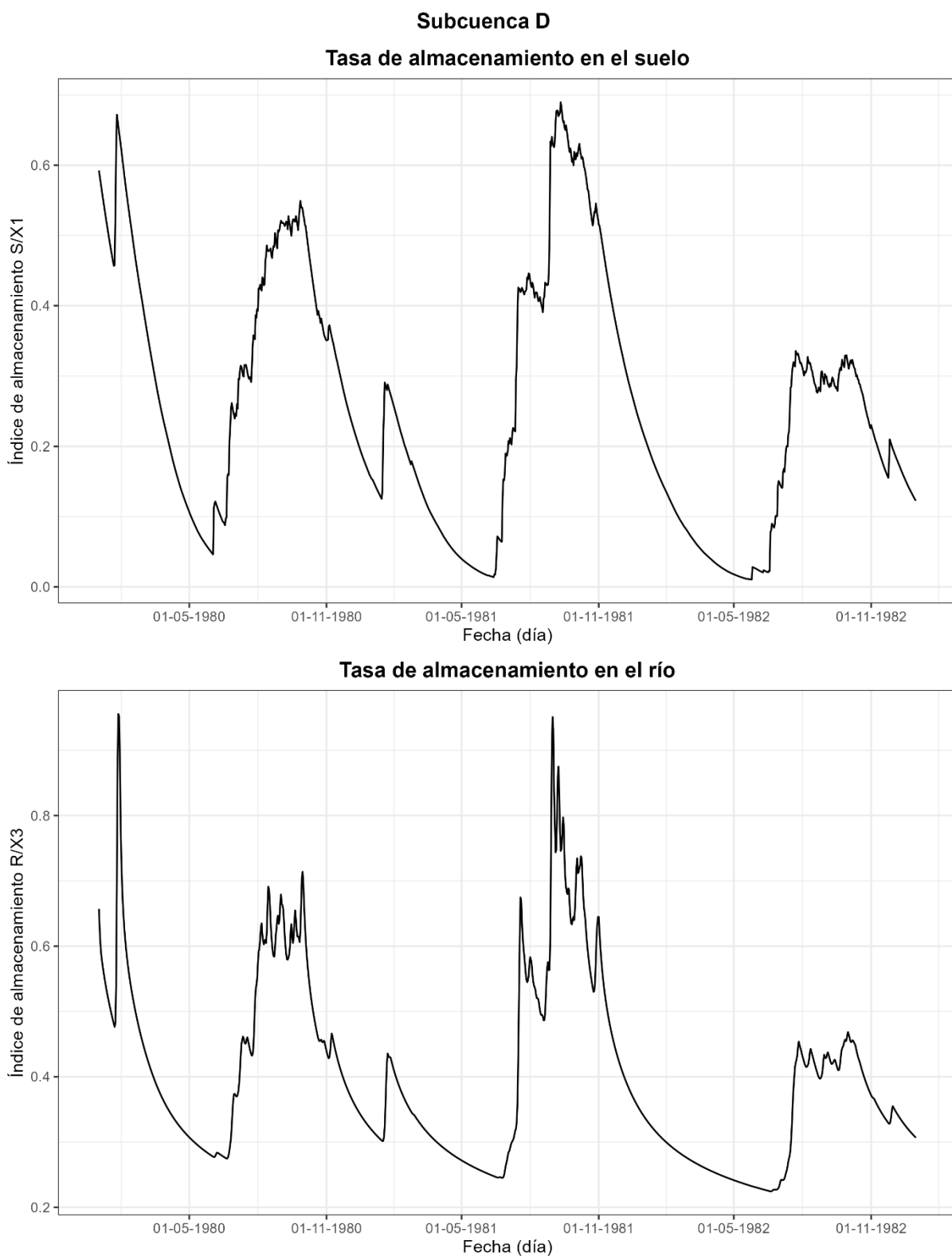


Figura 110.- Tasa de almacenamiento en el suelo y en el río, Subcuenca D, Cuenca Balsas 1980-1982 (elaboración propia)

Hidrograma Subcuenca D

Lluvia
 Gasto simulado

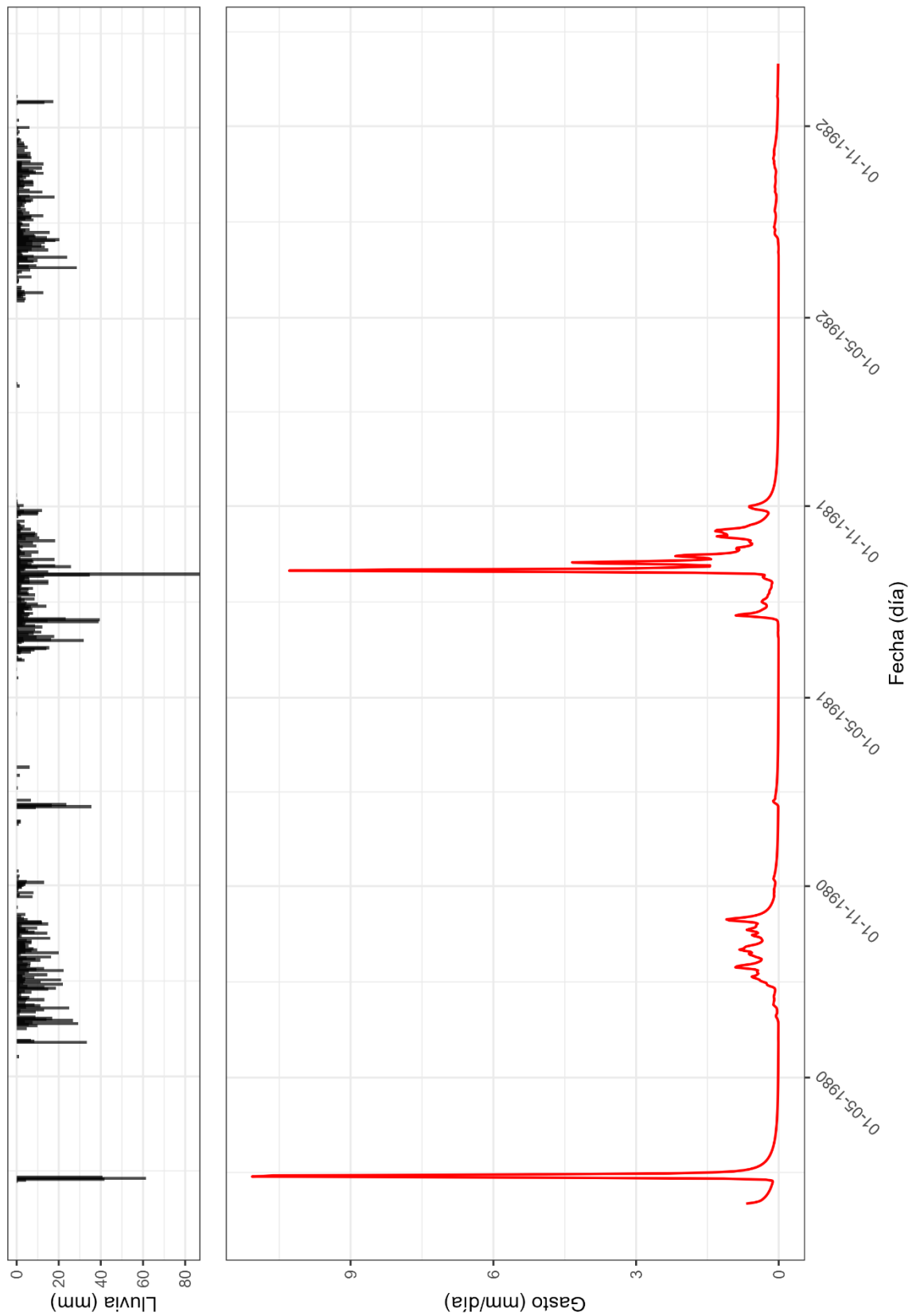


Figura 111.- Hidrograma Subcuenca D, Cuenca Balsas 1980-1982 (elaboración propia)

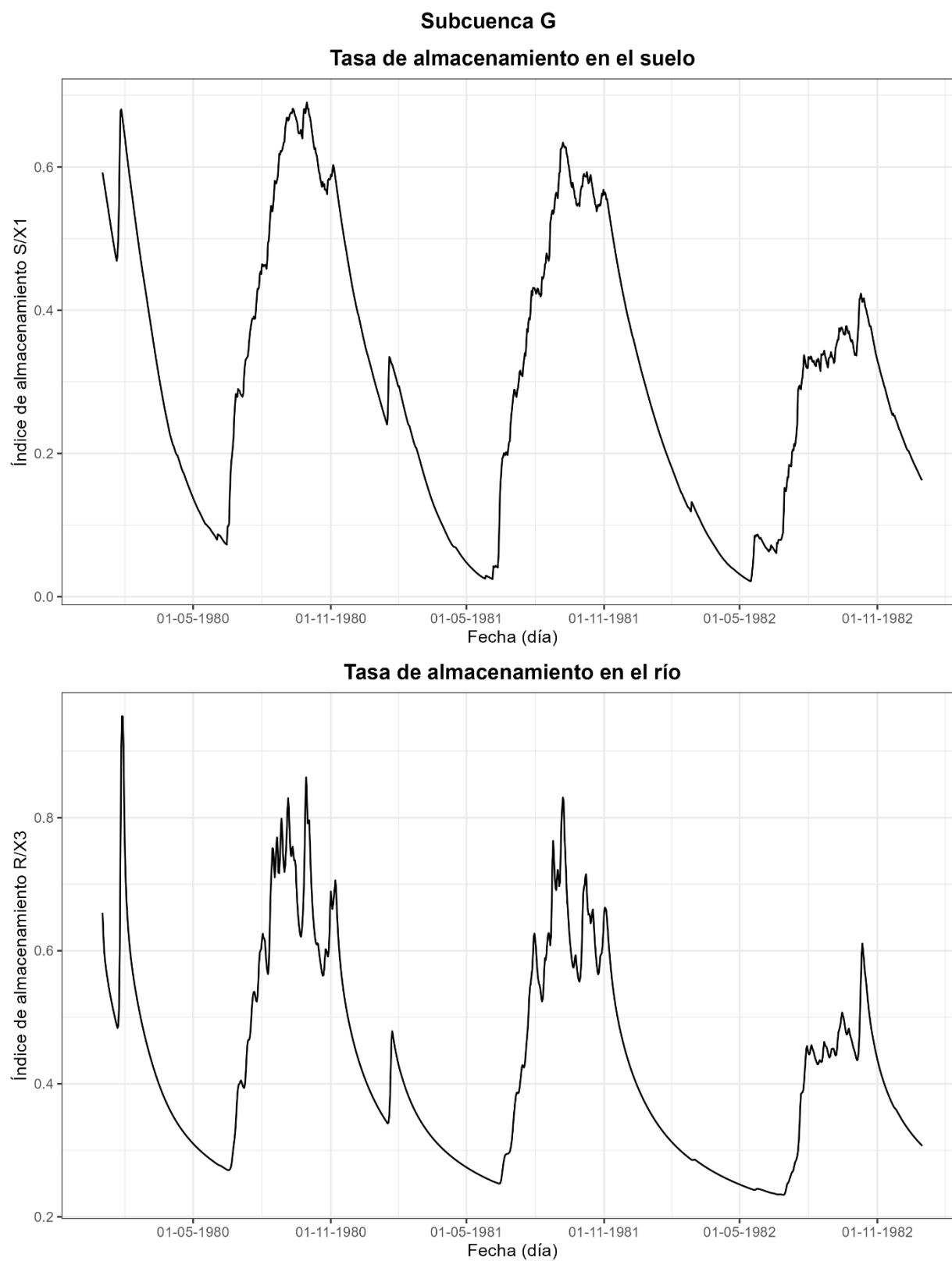


Figura 112.- Tasa de almacenamiento en el suelo y en el río, Subcuenca G, Cuenca Balsas 1980-1982 (elaboración propia)

Hidrograma Subcuenca G

■ Lluvia — Gasto simulado

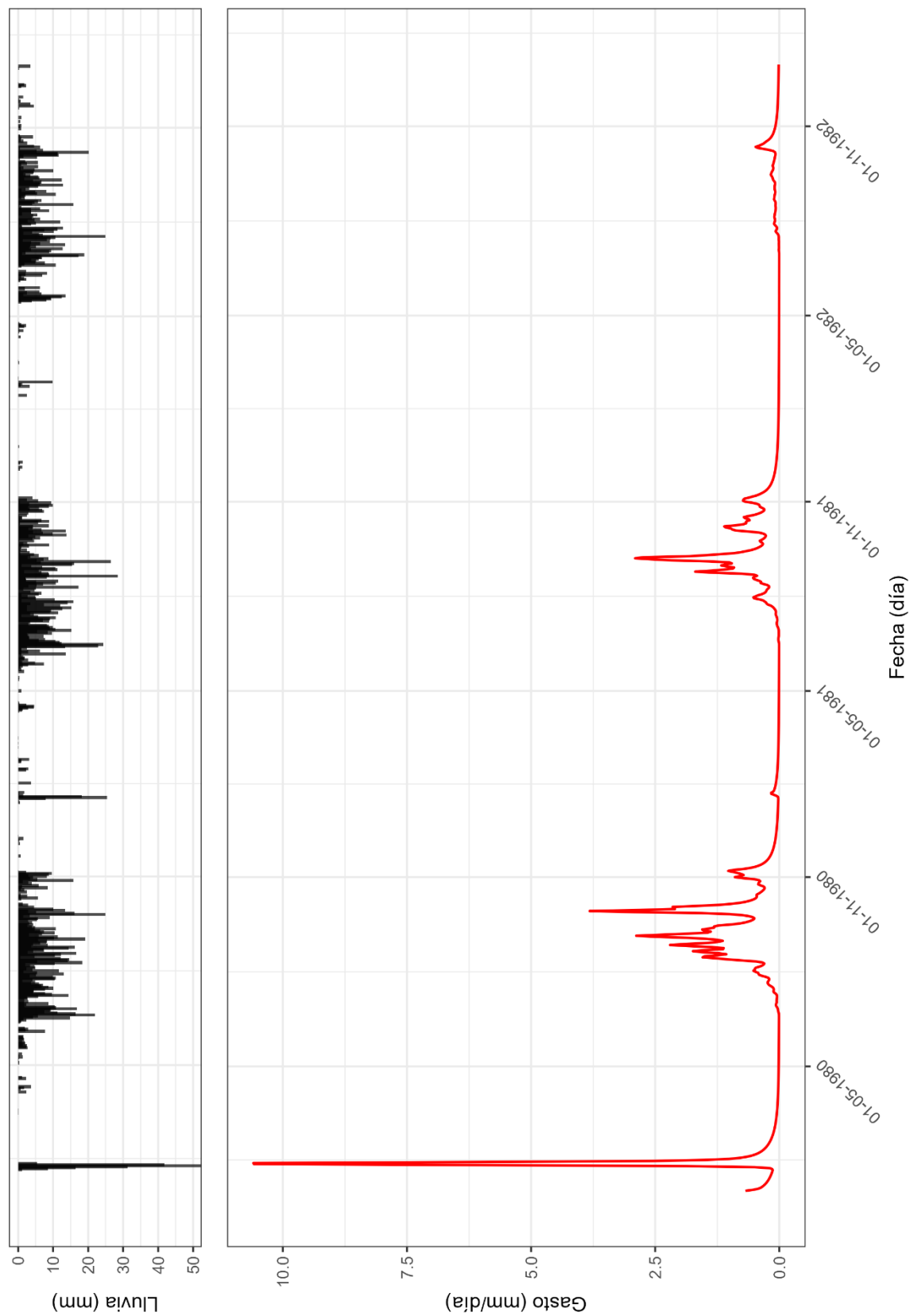


Figura 113.- Hidrograma Subcuenca G, Cuenca Balsas 1980-1982 (elaboración propia)

De la Tabla 3 se observa que la subcuenca con mayores superficie, y longitud y pendiente del cauce es la subcuenca G con 117,405.45 km² y 1,13.94 km, respectivamente. Mientras que la subcuenca Ba1 tiene un área de 560 km² y una longitud del cauce de 54.97 km. El promedio de las subcuencas analizadas es de 8,470. 7 km², longitud y pendiente media de cauce de 158.54 km² y 5%, respectivamente. Los perfiles de los cauces principales de cada subcuenca, así como sus pendientes se pueden observar de las Figuras 13 a 36. En estas figuras se observan pequeños “saltos” o “escalones” en la elevación de la longitud, lo que se debe a posibles depósitos de sedimentos que con los años han creado islas en el centro del cauce, o en algunos casos, esto sugiere que el trazo del fondo del cauce principal debe corregirse ya que posiblemente se trazó ligeramente sobre el inicio de alguna de las márgenes.

La gráfica de la Figura 37 muestra la relación entre la longitud del cauce y su pendiente de las subcuencas con estación hidrométrica, en general se observa un incremento de pendiente cuando también se incrementa la longitud.

En la gráfica de la Figura 38 se observa la relación potencial entre el área de las subcuencas y la precipitación media diaria, teniendo un coeficiente de determinación de 0.7. Esta ecuación potencial nos permite estimar la precipitación media diaria en alguna de las cuencas de la región del río Balsas, si se conoce el área de la cuenca y no se tienen registros de lluvia.

De manera general, a partir de la Figura 39, la relación entre el área de las subcuencas y la evapotranspiración potencial muestra que mayor superficie expuesta a la atmósfera, la evapotranspiración es mayor.

La Figura 41 permite conocer el gasto diario en cualquier cuenca de la región del Balsas si conocemos su área. En este caso el coeficiente de determinación es muy bueno ($R^2=0.96$). Esta gráfica es muy útil en diferentes escenarios, por ejemplo, de disponibilidad del recurso hídrico o de operación de la infraestructura hidráulica.

Las gráficas de las Figuras 43 a 46 permiten conocer la relación entre los cuatro parámetros del modelo GR4J en las subcuencas de la región del Balsas. Se observa que el parámetro X4 del tiempo base del hidrograma unitario en las subcuencas, disminuye cuando el parámetro X3 de capacidad de lluvia máxima en el río se incrementa. Por otro lado, el parámetro X1 es constante en la región, con un valor de 6.03 mm de agua de lluvia que se infiltra, esto sucede también con el parámetro de intercambio de agua subterránea y superficial.

Simulación 1. Lluvia-gasto.

Para las 6 subcuencas, en las Figuras 48, 51, 54, 57, 60 y 63 se presentan las gráficas de la variación diaria para los periodos disponibles y calculados del almacenamiento de agua de lluvia en el suelo $\frac{S}{X1}$ y en el río $\frac{R}{X3}$, teniendo los siguientes rangos:

Tabla 6.- Rangos S/X_1 , R/X_3 para las 6 subcuencas, Simulación 1

Subcuenca	Periodo	$\frac{S}{X_1}$	$\frac{R}{X_3}$
Z	1957 - 2008	(0.02,0.77)	(0.22,0.95)
F	1978 - 2008	(0.02,0.77)	(0.22,0.95)
L	1969 - 1988	(0.02,0.85)	(0.23,0.91)
J	1969 - 2006	(0.01,0.62)	(0.23,0.83)
H	1969 - 1981	(0.02,0.79)	(0.23,0.94)
Cd	1995 - 2010	(0.45,0.83)	(0.46,0.97)

En las Figuras 49, 50, 52, 53, 55, 56, 58, 59, 61, 62, 64 y 65 se presentan las gráficas con las series de lluvia, gasto registrado y simulado, así como, la relación entre el gasto registrado y el simulado en donde la línea roja de 45° permite visualizar mejor esta relación. Particularmente, para la subcuenca Cd, los registros del gasto registrado presentan grandes picos que son difíciles de simular por el modelo.

Simulación 2. Lluvias totales.

Para las 6 subcuencas, en las Figuras 66, 68, 70, 72, 74 y 76 se presentan las gráficas de la variación diaria para los periodos disponibles y calculados del almacenamiento de agua de lluvia en el suelo $\frac{S}{X_1}$ y en el río $\frac{R}{X_3}$, donde los rangos son los siguientes:

Tabla 7.- Rangos S/X_1 , R/X_3 para las 6 subcuencas, Simulación 2

Subcuenca	Periodo	$\frac{S}{X_1}$	$\frac{R}{X_3}$
Z	1957 - 2008	(0.02,0.78)	(0.22,0.95)
F	1978 - 2008	(0.02,0.85)	(0.22,0.95)
L	1969 - 1988	(0.02,0.85)	(0.22,0.91)
J	1969 - 2023	(0.01,0.80)	(0.23,0.91)
H	1969 - 1981	(0.02,0.79)	(0.23,0.94)
Cd	1995 - 2010	(0.45,0.83)	(0.46,0.97)

En las Figuras 67, 69, 71, 73, 75 y 77 se presentan las gráficas con las series de lluvia y gasto simulado.

Simulación 3. Cuenca Balsas 1980-1982.

Para las 6 subcuencas, en las Figuras 78, 81, 84, 87, 90 y 92 se presenta la variación diaria para el mismo periodo de tres años, del almacenamiento de agua de lluvia en el suelo $\frac{S}{X_1}$ y en el río $\frac{R}{X_3}$, donde los rangos son los siguientes:

Tabla 8.- Rangos $S/X1$, $R/X3$ para las 6 subcuencas, Simulación 3

Subcuenca	Periodo	$\frac{S}{X1}$	$\frac{R}{X3}$
Z	1980 - 1982	(0.05,0.64)	(0.23,0.81)
F	1980 - 1982	(0.06,0.74)	(0.22,0.89)
L	1980 - 1982	(0.04,0.81)	(0.25,0.87)
J	1980 - 1982	(0.03,0.54)	(0.23,0.67)
H	1980 - 1982	(0.06,0.76)	(0.27,0.97)
Cd	1980 - 1982	(0.02,0.83)	(0.22,0.96)

Cuencas con información hidrométrica disponible para el periodo 1980-1982:

En las Figuras 79 y 80, 82 y 83, 85 y 86, 88 y 89 se presenta las gráficas para las cuencas Z, F, L, J con las series de lluvia, gasto registrado y simulado, así como, la relación entre el gasto registrado y el simulado en donde la línea roja de 45° permite visualizar mejor esta relación.

Cuencas sin información hidrométrica disponible para el periodo 1980-1982:

En las Figuras 91, 93, 95, 97, 99, 101, 103, 105, 107, 109, 111 y 113 se presentan las gráficas con las series de lluvia y gasto calculado para la Subcuencas H, Cd, Ba4, Bb1, Bb2b3b4Bc, Bg, CaCg, CbCc, CeCf, Ch, D y G, respectivamente. En estos casos, los parámetros del modelo que se consideraron fueron los que se definieron de acuerdo con lo descrito en el apartado 7.4.3.; donde, por ejemplo, se explica que la cuenca H es homogénea a las cuencas L, F y J.

5.9 Modelación Hidráulica

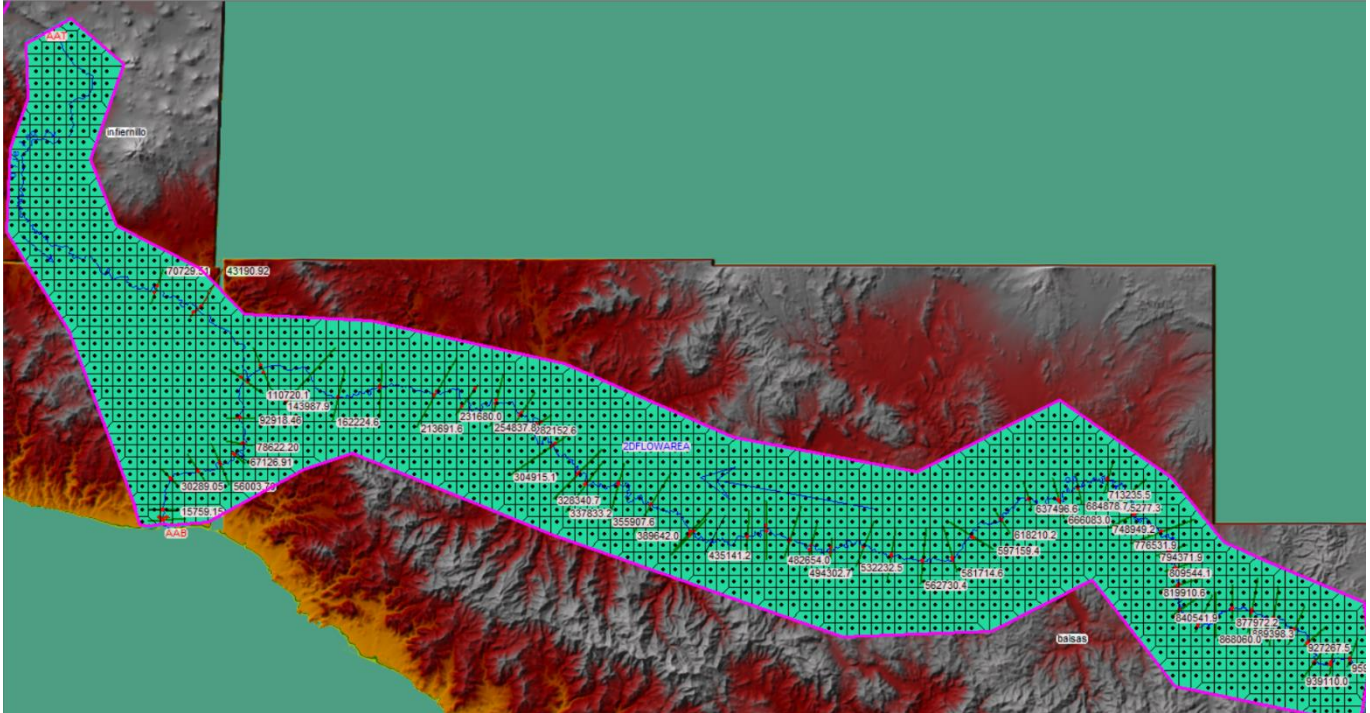


Figura 114.- Geometría Cuenca Balsas 2D HEC-RAS (elaboración propia)

En la Figura 114 se muestra la cuenca del río Balsas creada con ayuda de RiverGIS y exportada a HEC-RAS realizada con su correspondiente 2D y su respectivo Mapper. En ella se muestran todas las secciones creadas y las presas “El Caracol”, “Infiernillo” y “La Villita”, dado que el software traza las presas de la misma forma que las secciones transversales del río esto dificulta la vista ilustrativa de la Figura 114.

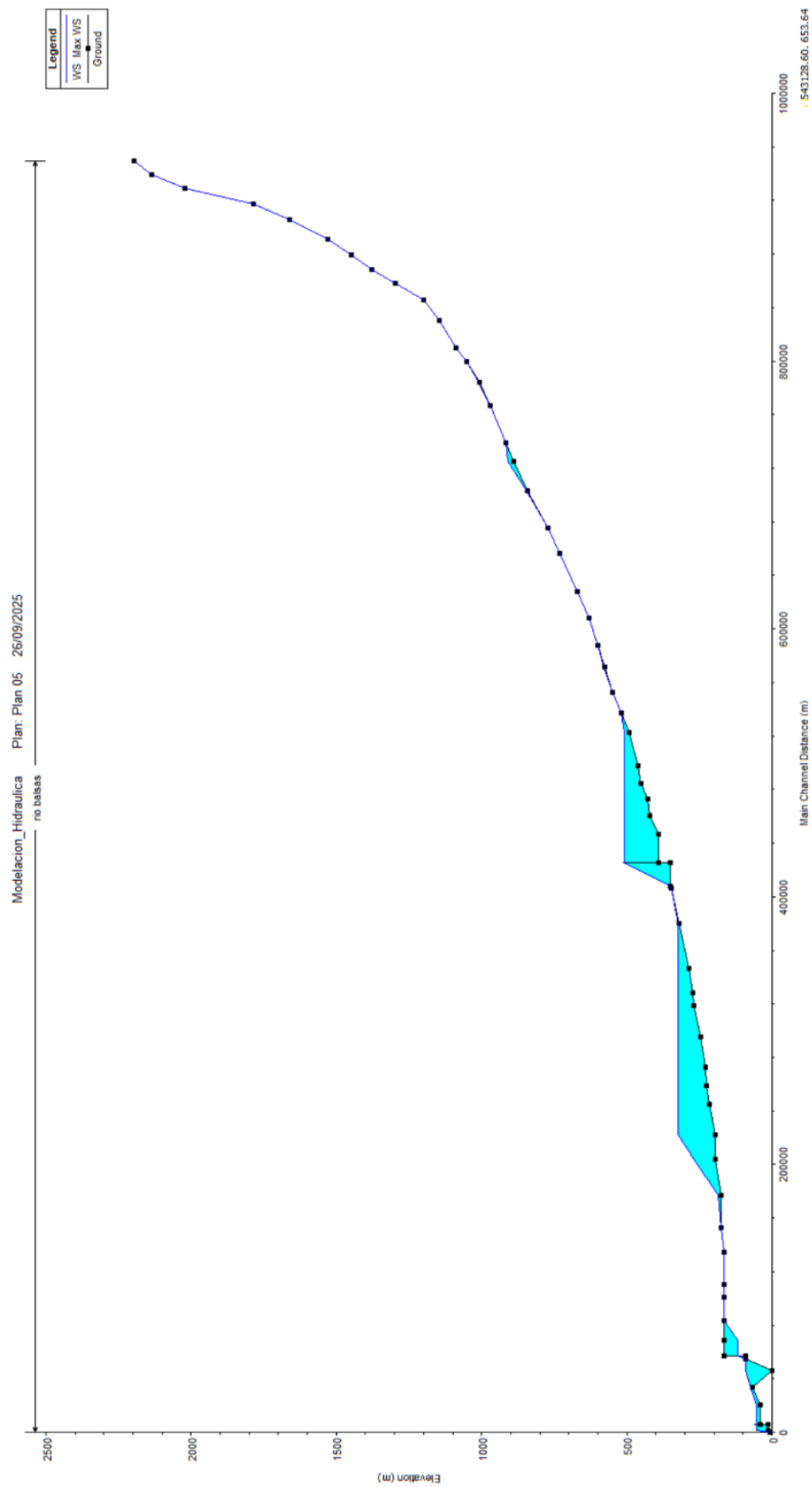


Figura 25.- Perfil del río Balsas (elaboración propia)

5.9.1 Secciones transversales por subcuencas

A continuación, se muestran las secciones transversales de las subcuencas que no contaban con estación hidrométrica y que sus gastos fueron calculados a través del modelo GR4J, cuyos hidrogramas obtenidos del modelo fueron ingresados a la modelación hidráulica, a excepción de la subcuenca Z que si fueron extraídos de la estación hidrométrica.

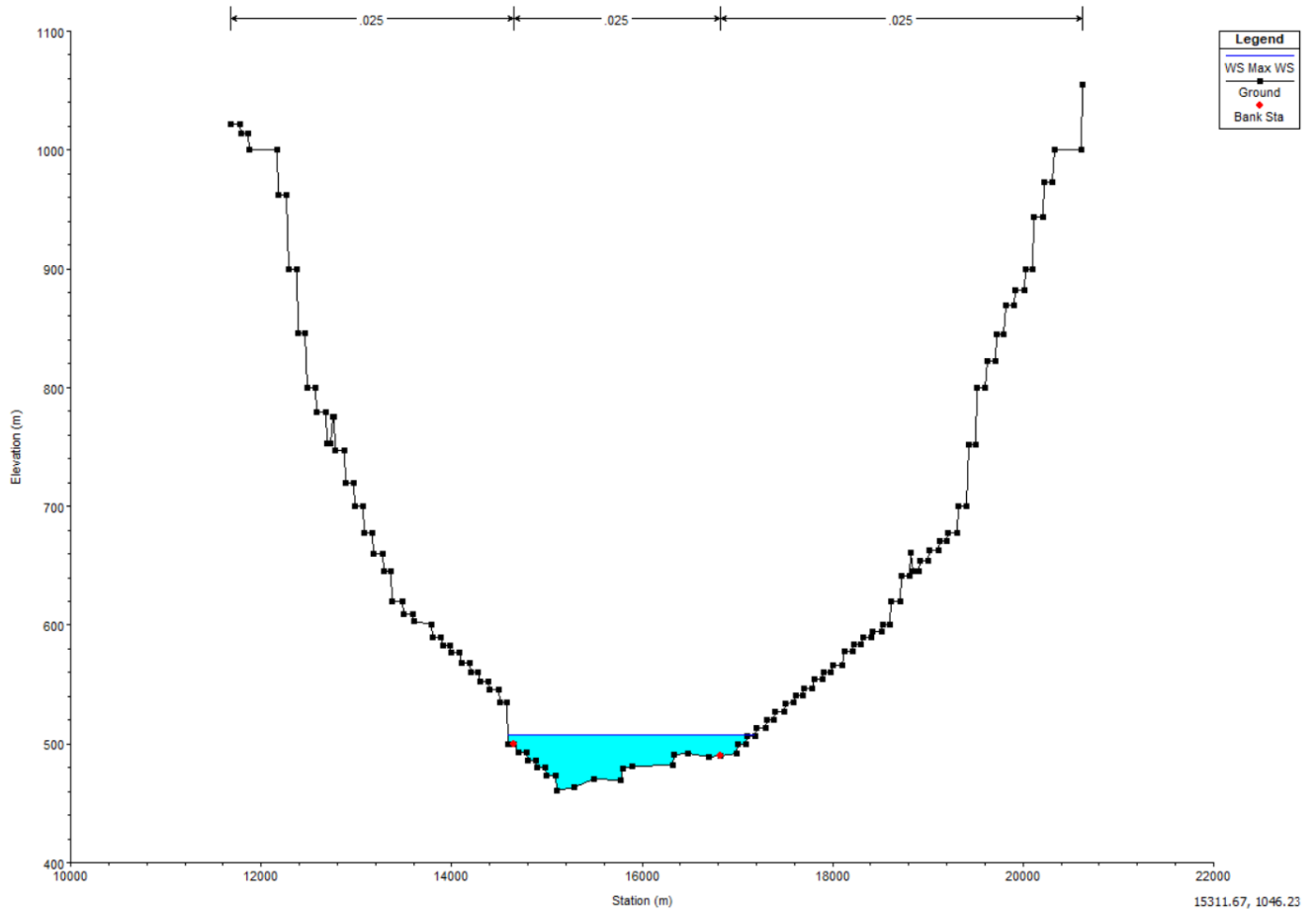


Figura 116.- Subcuenca Z, Sección 507493.6 (elaboración propia)

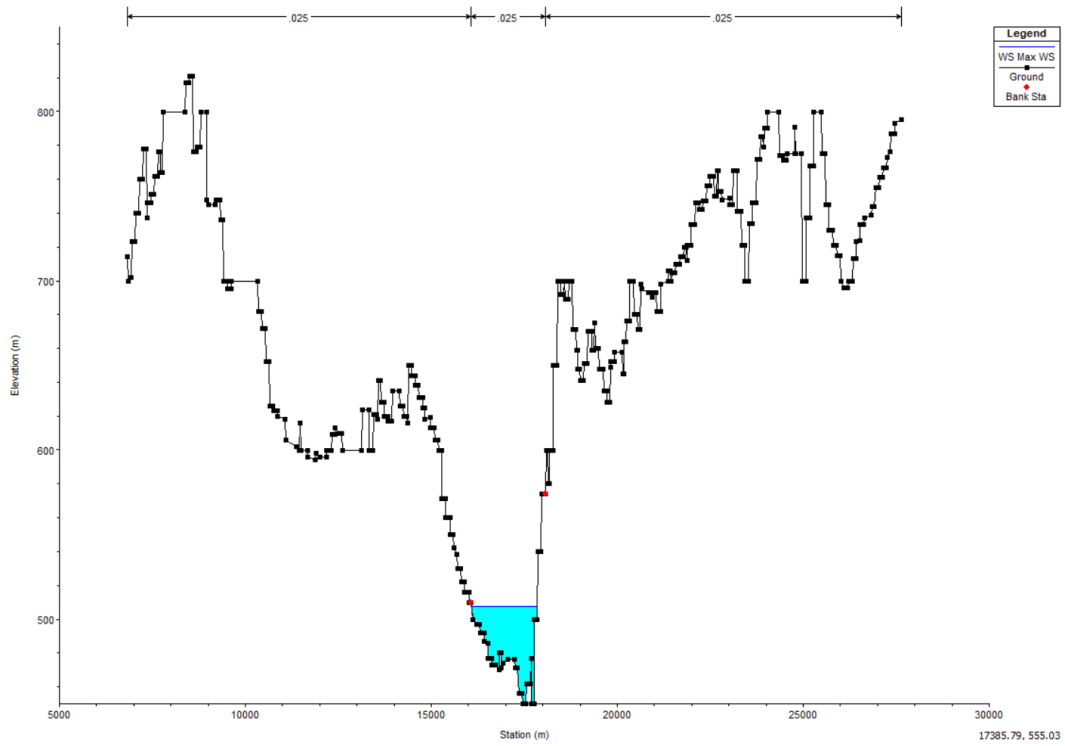


Figura 117.- Subcuenca Ba4, Sección 494302.7 (elaboración propia)

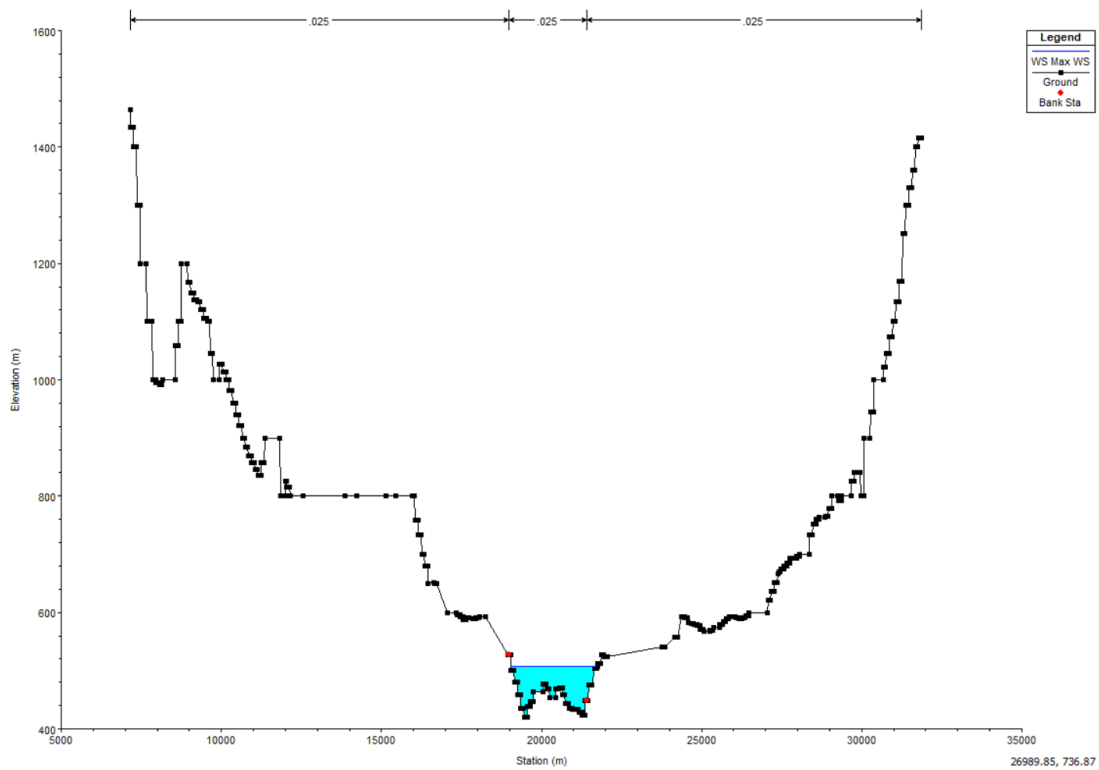


Figura 118.- Subcuenca Bb1, Sección 470310 (elaboración propia)

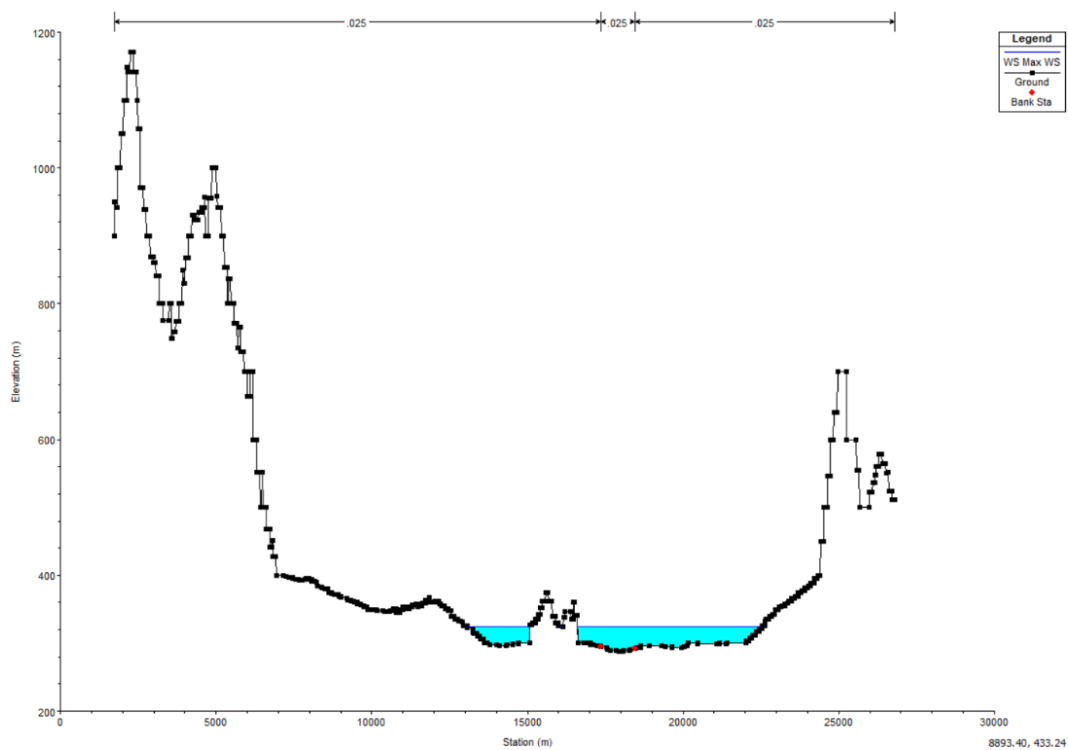


Figura 119.- Subcuenca Ch, Sección 355907.6 (elaboración propia)

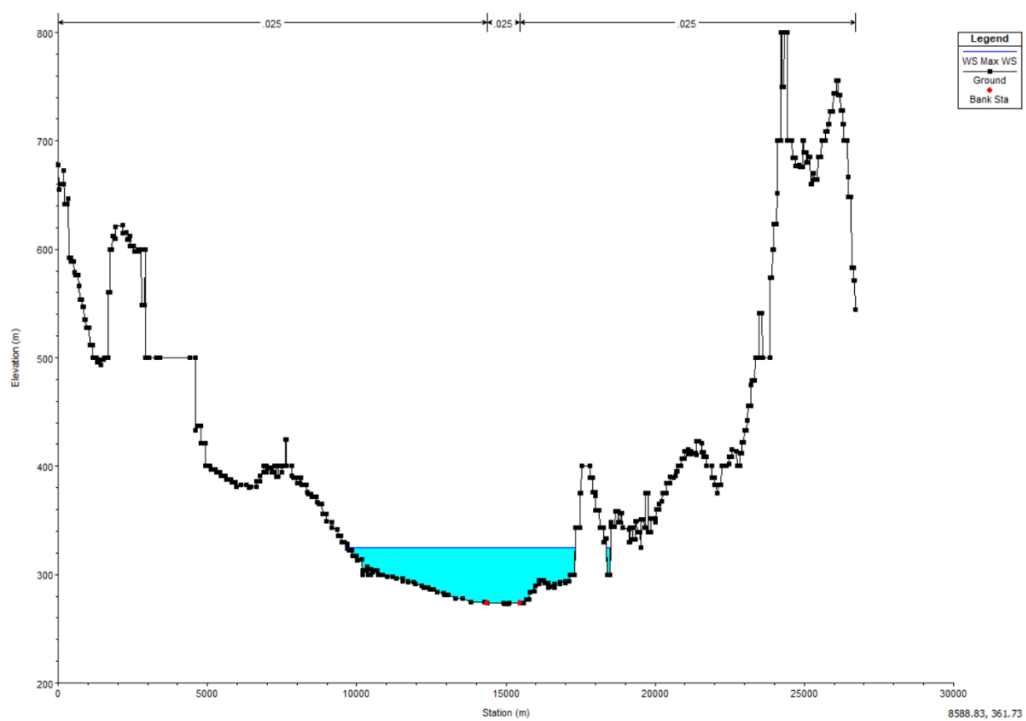


Figura 120.- Subcuenca CaCg, Sección 337833.2 (elaboración propia)

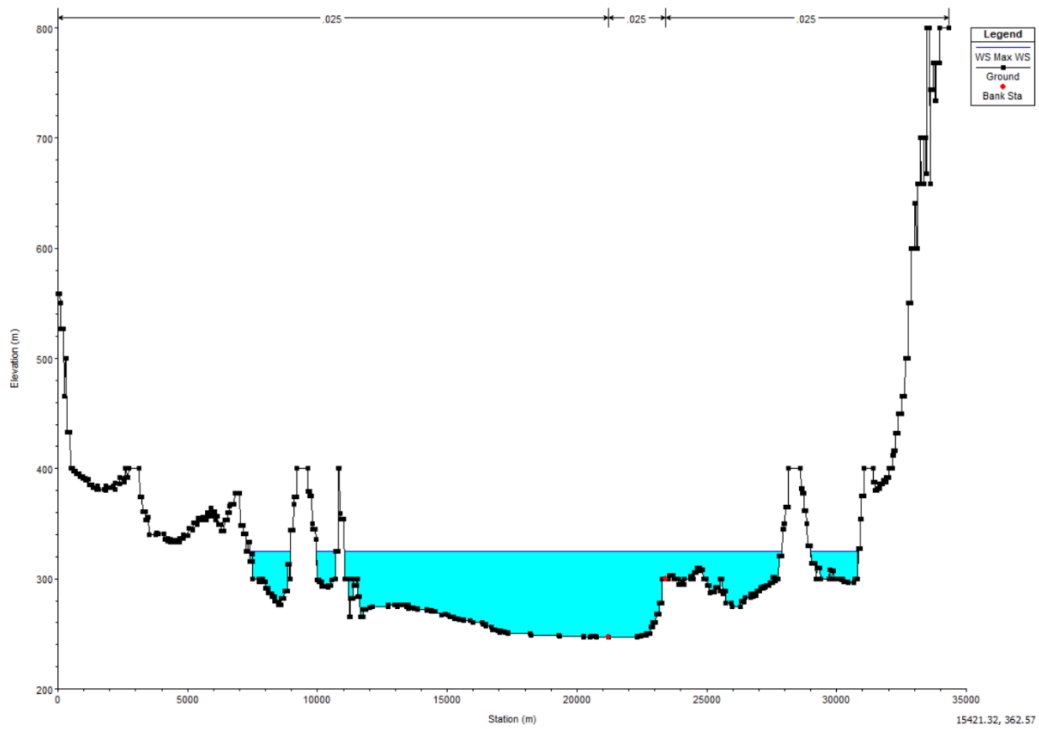


Figura 121.- Subcuenca CeCf, Sección 304915.1 (elaboración propia)

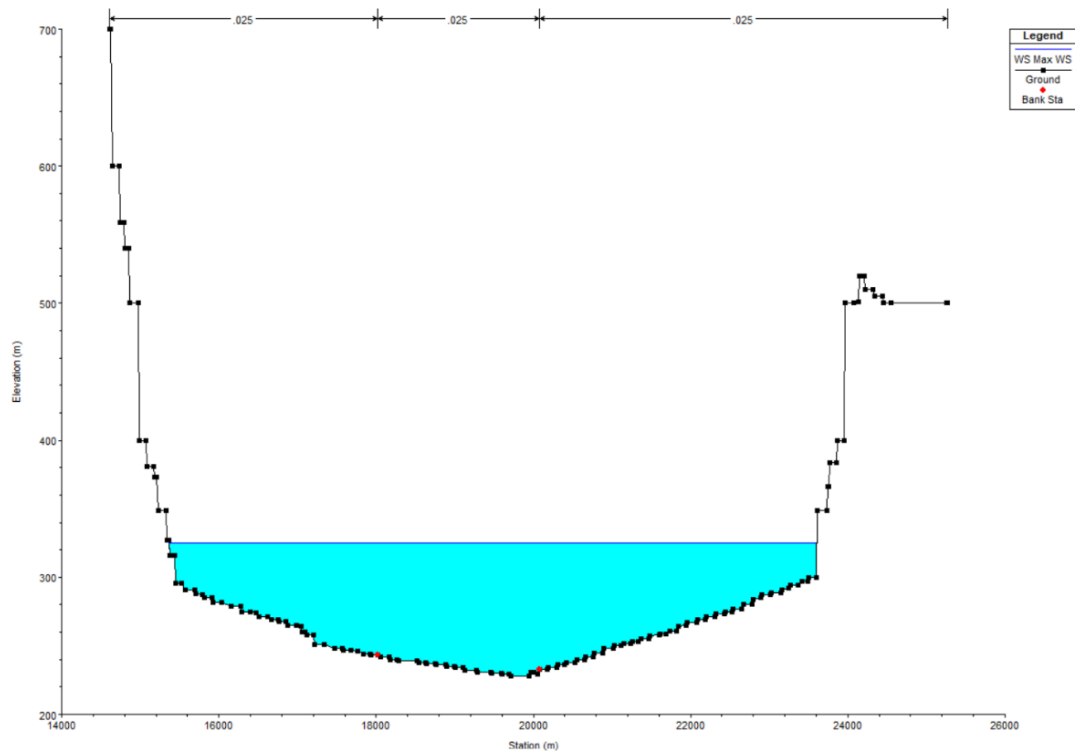


Figura 122.- Subcuenca G, Sección 282152.6 (elaboración propia)

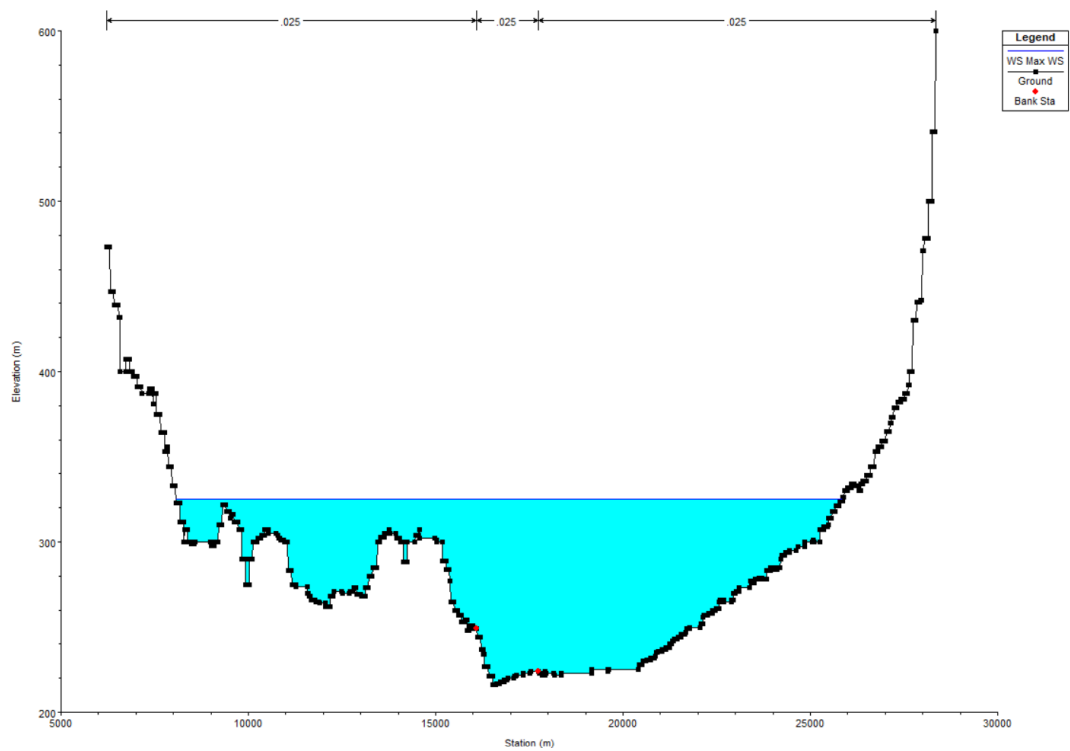


Figura123.- Subcuenca CbCc, Sección 254837.8 (elaboración propia)

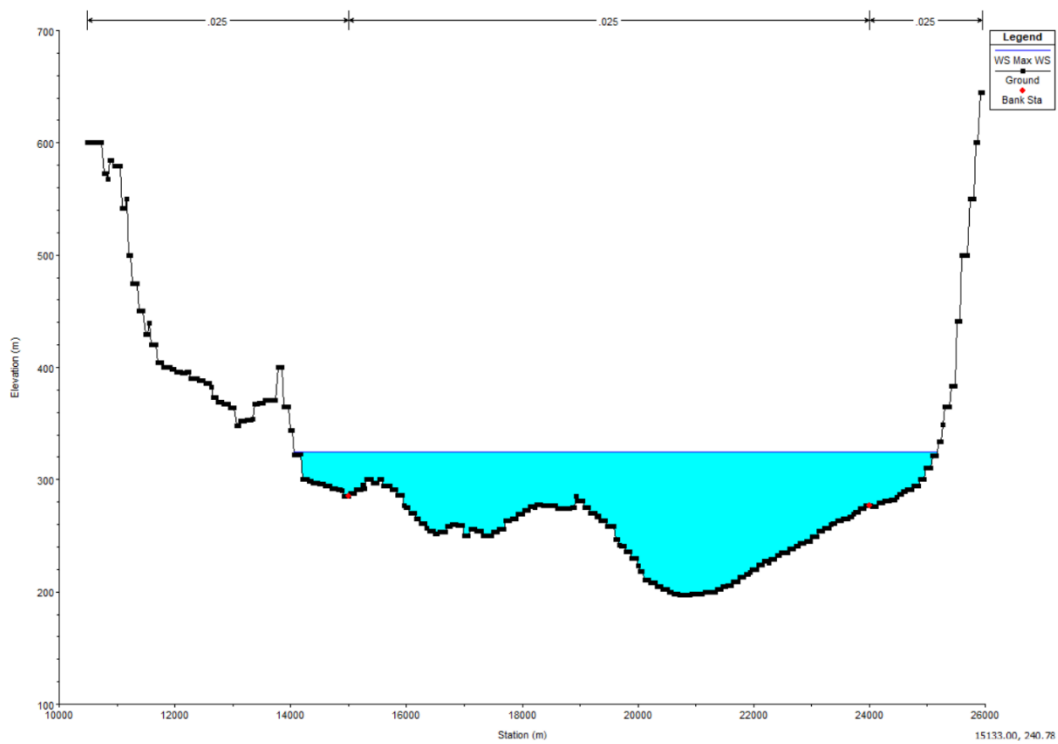


Figura124.- Subcuenca Cd, Sección 231680 (elaboración propia)

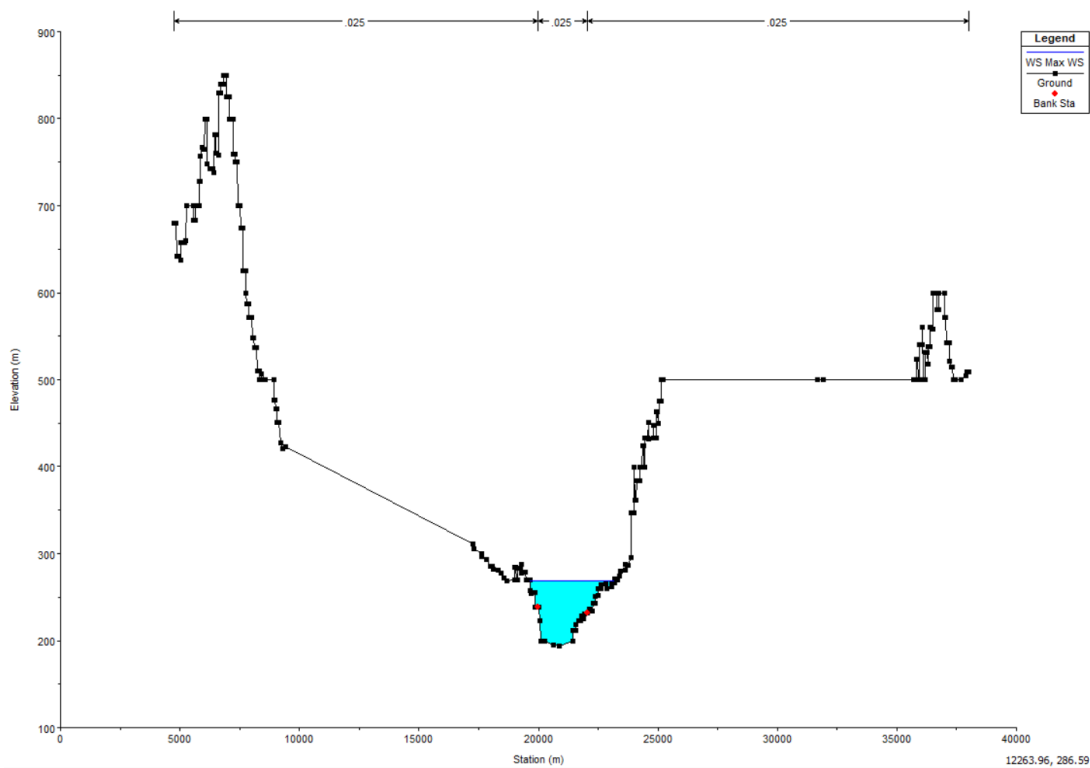


Figura 125.- Subcuenca H, Sección 213691.6 (elaboración propia)

5.9.2 Perfiles de las Presas en la Modelación Hidráulica

A continuación, se muestran los perfiles de las presas “El Caracol”, “El Infiernillo” y “La Villita” que fueron ingresados para la modelación hidráulica en el software HEC-RAS, con las características que ya fueron mencionadas en la parte de metodología.

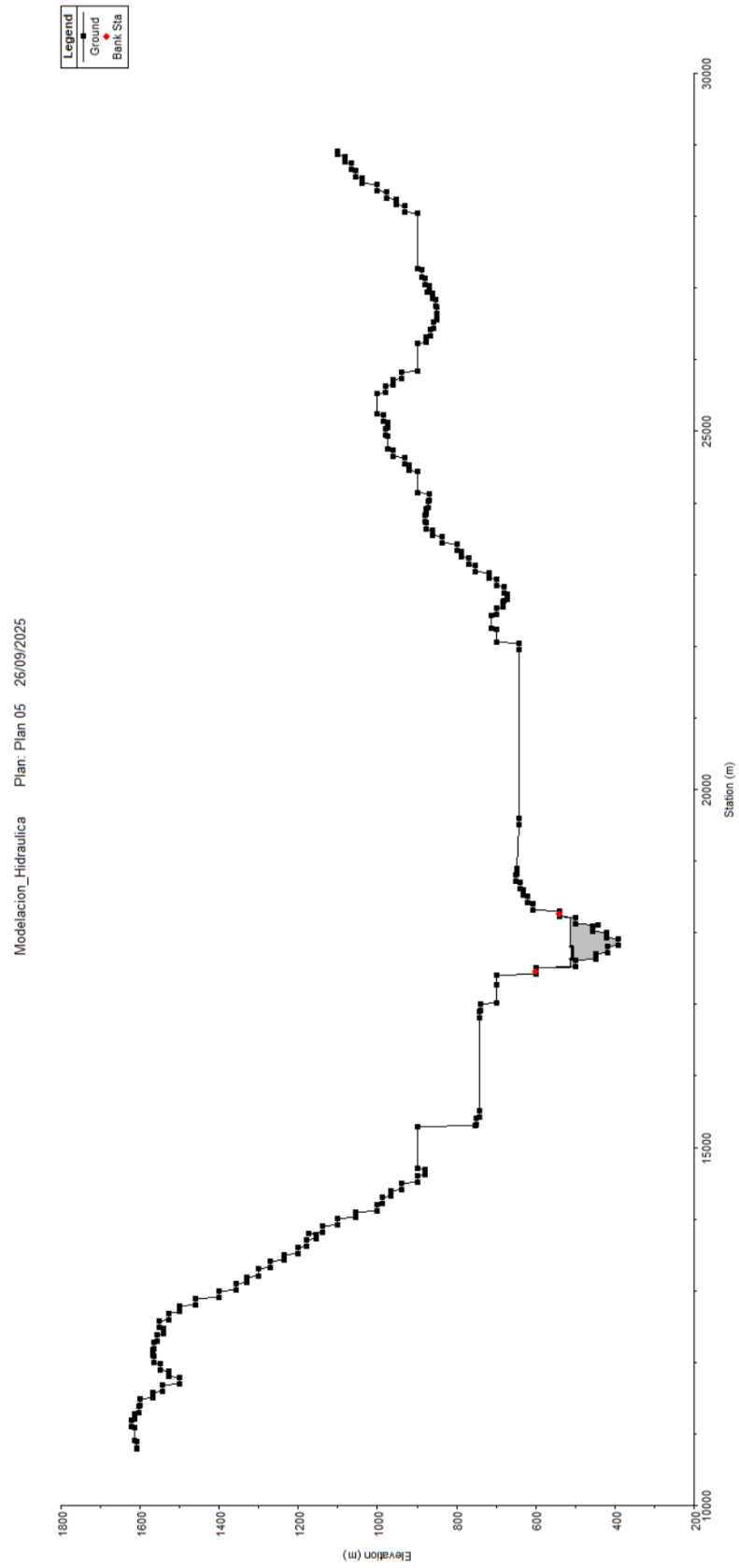


Figura 126.- Presa Ingeniero Carlos Ramírez Ulloa "El Caracol" (elaboración propia)

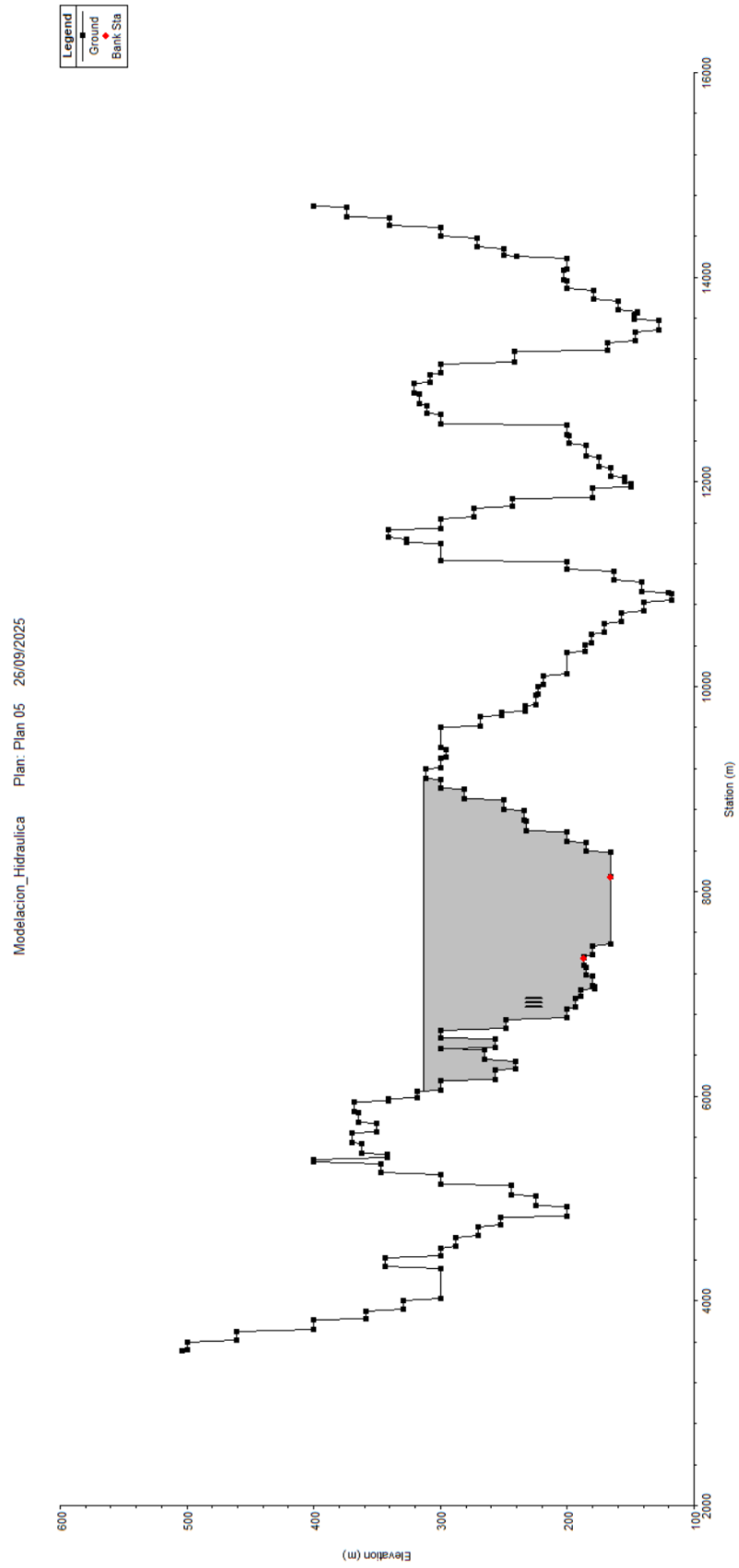


Figura 127.- Presa Adolfo López Mateos "Infiernillo" (elaboración propia)

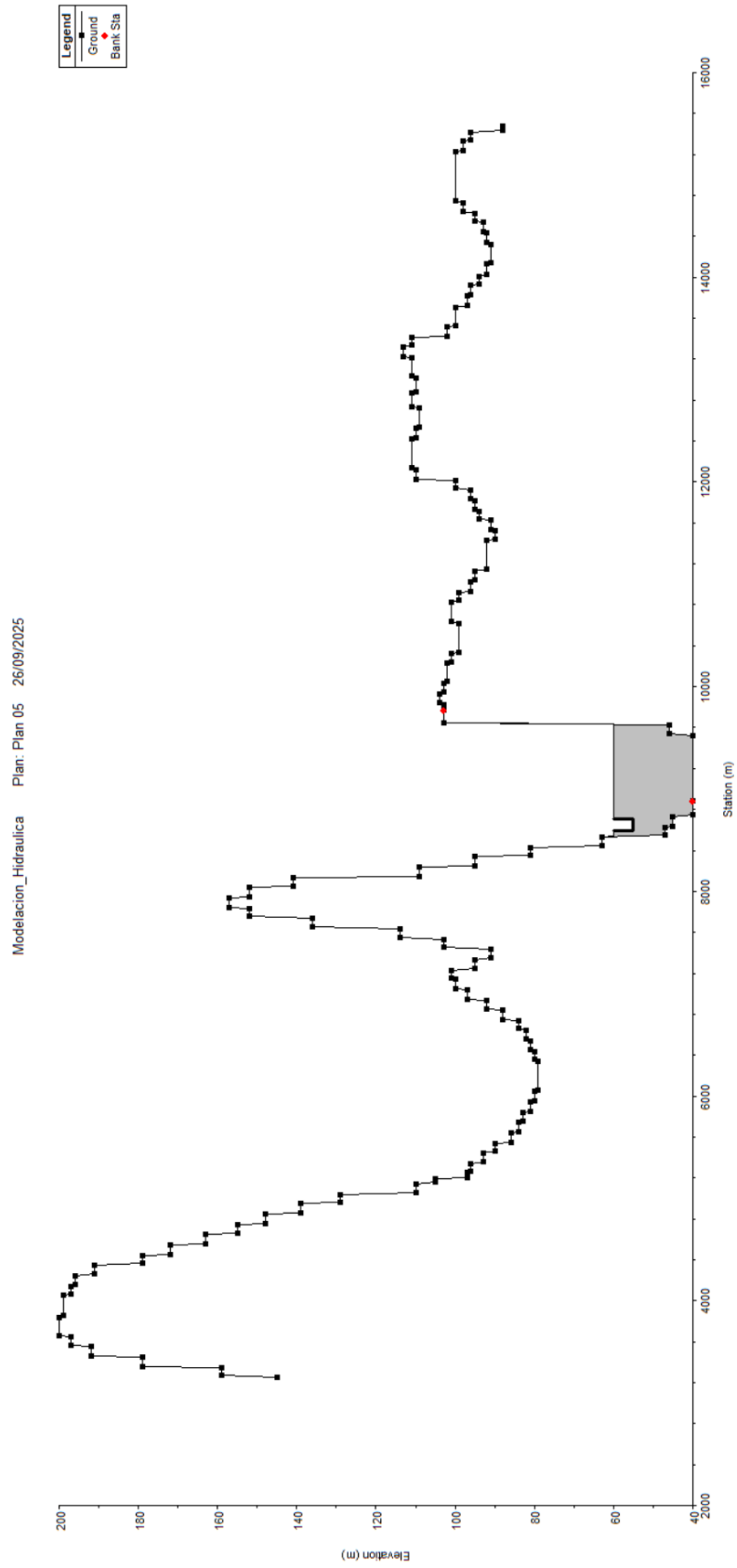


Figura 128.- Presa José María Morelos "La Villita" (elaboración propia)

Análisis de Resultados

El modelo hidrológico GR4J (modèle du Génie Rural à 4 paramètres Journalier) fue implementado con el objetivo de reconstituir series de caudal diario en varias cuencas de la región hidrológica Balsas, caracterizadas por la ausencia de registros históricos de caudal. Este modelo, de tipo lluvia–escurrimiento y estructura conceptual diaria, ha demostrado una buena capacidad de simulación en el contexto hidrológico de las subcuencas de la región Balsas.

Para la calibración del modelo se utilizaron datos de cuencas hidrológicamente similares, con registros históricos disponibles y condiciones climáticas comparables. Se aplicó un enfoque de transferencia regional de parámetros, ajustando los valores mediante técnicas de optimización con el fin de maximizar los coeficientes de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) y minimizar el error absoluto medio.

Los resultados de la calibración mostraron valores de NSE superiores a 0.70 en la mayoría de las cuencas utilizadas como referencia, lo que indica una buena capacidad predictiva del modelo. En la fase de validación cruzada, se mantuvieron niveles aceptables de desempeño, lo que refuerza la robustez de los parámetros calibrados para su aplicación en cuencas no instrumentadas.

Aplicando el modelo GR4J con los parámetros transferidos, se generaron series sintéticas de caudal para las cuencas sin registros. Los resultados obtenidos presentan una coherencia hidrológica con el comportamiento esperado en función del régimen pluviométrico, las características fisiográficas y el uso del suelo en cada cuenca.

Se observó una adecuada representación de los eventos de escurrimiento, tanto en términos de magnitud como de respuesta temporal. Los caudales base también fueron reproducidos de manera satisfactoria, lo que sugiere que el modelo logró capturar de forma razonable los procesos de almacenamiento y liberación de agua en el sistema.

La modelación hidráulica realizada con la herramienta HEC-RAS permitió considerar en la configuración del sistema hidrológico de la región Balsas, el sistema de presas en cascada existente El Caracol-Infiernillo-La Villita. Los hidrogramas determinados con el modelo GR4J se incorporaron a la simulación permitiendo el tránsito de las avenidas diarias de tres años consecutivos para toda la región. La sustitución de un nuevo parámetro en la estructura del modelo por la información hidrométrica aguas abajo de las presas, para considerar que los registros de estos caudales incluyen la operación de las presas nos permite decir que los hidrogramas obtenidos consideran implícitamente las presas del sistema ya que en las subcuencas las estaciones hidrométricas que se consideraron se ubican aguas abajo de las presas, por lo que han registrado la operación del sistema en cascada.

Aunque los resultados obtenidos son satisfactorios, es importante señalar que la incertidumbre asociada a la ausencia de datos observados en las cuencas de estudio limita la posibilidad de realizar una validación rigurosa.

6 CAPÍTULO 6.- Conclusiones y Recomendaciones

La implementación del modelo hidrológico GR4J demostró ser adecuada para la reconstitución de caudales en cuencas con datos históricos insuficientes. Su estructura conceptual simple, pero efectiva, permitió simular con realismo el comportamiento hidrológico diario a partir de datos climáticos y características fisiográficas básicas.

La calibración realizada en cuencas con registros y condiciones hidrológicas similares permitió obtener parámetros representativos, que al ser transferidos a cuencas vecinas no instrumentadas mantuvieron un desempeño aceptable. Esto valida el uso de técnicas de regionalización de parámetros como estrategia práctica en contextos de escasa información.

Las series de caudal simuladas presentaron una evolución temporal coherente con el régimen pluviométrico regional y reflejaron adecuadamente tanto los eventos de escorrentía como los caudales base.

En conjunto, los resultados obtenidos validan el uso del modelo GR4J como alternativa técnica viable para enfrentar el desafío de la escasez de datos en estudios hidrológicos regionales, aportando información valiosa para una gestión sostenible del agua.

A corto plazo, se sugiere implementar campañas de medición directa de caudales en distintas épocas del año, lo que permitiría validar indirectamente las simulaciones realizadas y ajustar parámetros del modelo con mayor certeza.

Para futuros estudios, es recomendable incorporar análisis de sensibilidad y propagación de incertidumbres (por ejemplo, mediante métodos Monte Carlo o GLUE), lo que permitirá identificar la robustez del modelo y cuantificar el grado de confianza de las simulaciones.

Para asegurar una adecuada interpretación y aplicación de los resultados, es fundamental capacitar a algunos miembros del personal técnico de instituciones locales o regionales en el uso, calibración e interpretación de modelos como GR4J.

Finalmente, se recomienda incorporar las series de caudal simuladas en estudios de disponibilidad hídrica, planificación de obras hidráulicas, diseño de planes de gestión del recurso y evaluación de escenarios de cambio climático, siempre considerando los márgenes de incertidumbre asociados.

7 Bibliografía

Alvarado Mendoza, C. (2021). Modelación de máximas avenidas a paso diario (1964-2014), con enfoque semidistribuido usando GR4J, en la cuenca del río Camaná, Arequipa-Perú. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. <https://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/20.500.12672/17145?Show=full>

Astorayme Valenzuela, M. A., García Hernández, J., Suarez, W., Felipe, O., Huggel, C., & Molina, W. (2015). Modelización Hidrológica con un enfoque semidistribuido en la cuenca del río Chillón, Perú. *Revista Peruana Geo-Atmosférica (RPGA)*, 4, 109-124. https://www.researchgate.net/profile/miguelastorayme/publication/306542080_Modelizacion_hidrologica_con_un_enfoque_semidistribuido_en_la_cuenca_del_rio_Chillon_Peru/inks/57bf160e08aed246b0f7b6b2/Modelizacion-hidrologica-con-un-enfoque-semidistribuido-en-la-cuenca-del-rio-Chillon-Peru.pdf

CONAGUA. (2010, 31 diciembre). Acuerdo por el que se dan a conocer los estudios técnicos de aguas nacionales superficiales de la región hidrológica número 18 balsas. Diario Oficial de la Federación. https://dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?Codigo=5175730

CONAGUA. (2025). Sistema Nacional de Información del Agua Monitoreo de las principales presas de México. <https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/Presas/>

Dang, T. D. et al. (2020). On the representation of water reservoir storage and operations in large-scale hydrological models: implications on model parameterization and climate change impact assessments, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 24, 397–416, <https://doi.org/10.5194/hess-24-397-2020>.

Dong, N. et al. (2023). Toward improved parameterizations of reservoir operation in ungauged basins: A synergistic framework coupling satellite remote sensing, hydrologic modeling, and conceptual operation schemes. *Water Resources Research*, 59, e2022WR033026. <https://doi.org/10.1029/2022WR033026>

FAO. Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. En estudio de riego y drenaje (SSN 0254-5293). <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/f3660258-d07f487eb3c101661c83cb16/content>

GRUPO ICA. (1982, agosto). REVISTA 24, 24, https://almacenfica.blob.core.windows.net/imagenes-fundacion-ica-org-mx/FICA-IMAGENES/Libro_Digitales/Revista%20ICA/REVISTA_NUM%2024.pdf.

Hosseini-Moghari, S.-M. and Döll, P. (2025). The value of observed reservoir storage anomalies for improving the simulation of reservoir dynamics in large-scale hydrological

models, Hydrol. Earth Syst. Sci., 29, 4073–4092, <https://doi.org/10.5194/hess-29-4073-2025>.

Hydrological Modeling. (2022). ScienceDirect. <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/hydrological-modeling>

ICA. (s. f.). La Villita.

https://bnah.inah.gob.mx/bnah_lazaro_cardenas/uploads/E6_D76_FF1_9.pdf

Kodja, D. J., Akognongbé, A. J. S., Amoussou, E., Mahé, G., Vissin, E. W., Paturel, J. E., & Houndénou, C. (2020). Calibration of the hydrological model GR4J from potential evapotranspiration estimates by the Penman-Monteith and Oudin methods in the Ouémé watershed (West Africa). *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 383, 163-169. <https://piahs.copernicus.org/articles/383/163/2020/>

Mendieta J. D. *et al.* (2024). Impact of different hydrological models on hydroelectric operation planning, *Renewable Energy*, Volume 232, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120975>

Moulin, L., Perrin, C., Michel, C., & Andréassian, V. (2005). Prise en compte de barrages réservoirs dans un modèle pluie-débit global : application au cas du bassin de la Seine amont. *La Houille Blanche*, 91(5), 79–88. <https://doi.org/10.1051/lhb:200505008>

Rodríguez, F. S. S., Toto, R. M. C., & Rojas, S. C. (2023). Sequía en México. Universidad Autónoma Metropolitana (ed.). <http://dcsh.xoc.uam.mx/repdig/index.php/libros-dcsh/dcsh/item/570-sequia-en-mexico>

SEMARNAT. (2007). Presa de infiernillo, Michoacán. DIGAOHM. <https://digaohm.semar.gob.mx/cuestionarios/cnarioinfiernillo.pdf>

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (2012). Modelamiento Hidrológico de la cuenca del río Vilcanota usándolos modelos GR4J y TANKE. SENAMHI-Institucional. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/SEAM_a4187a81a8815678d77622841b6fd90b/Details

SIH. <https://sih.conagua.gob.mx/>

Steyaert, JC *et al.* (2022). ResOpsUS, un conjunto de datos históricos sobre operaciones de embalses en los Estados Unidos contiguos. *Sci Data* 9, 34 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01134-7>

Telteu, C.-E. *et al.* (2021). Understanding each other's models: an introduction and a standard representation of 16 global water models to support intercomparison, improvement, and communication, *Geosci. Model Dev.*, 14, 3843–3878, <https://doi.org/10.5194/gmd-14-3843-2021>.

Traore, V. B., Sambou, S., Tamba, S., Fall, S., Diaw, A. T., & Cisse, M. T. (2014). Calibrating the rainfall-runoff model GR4J and GR2M on the Koulountou river basin, a tributary of the Gambia river. *America Journal of Environmental Protection*, 3(1), 36-44. <https://www.sciencepublishinggroup.com/article/10.11648/j.ajep.20140301.15>

Vilaseca, F., Narbondo, S., Chreties, C., Castro, A., & Gorgoglione, A. (2023). Simulación del proceso precipitación-escurrimiento con paso diario: comparación de los modelos GR4J, SWAT y random forest. *Ribagua*, 10(1), 31-47. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/23863781.2023.2238127>



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

ACTA DE EXAMEN DE GRADO

No. 00133

Matrícula: 2233803642

Inclusión de las presas de almacenamiento existentes en una cuenca en la aplicación de un modelo lluvia-escurrimiento.

En la Ciudad de México, se presentaron a las 13:00 horas del día 4 del mes de diciembre del año 2025 en la Unidad Iztapalapa de la Universidad Autónoma Metropolitana, los suscritos miembros del jurado:

DR. ANTONIO ZOILO MARQUEZ GARCIA
DR. OSCAR ARTURO FUENTES MARILES
DR. FRANCISCO JAVIER APARICIO MIJARES

Bajo la Presidencia del primero y con carácter de Secretario el último, se reunieron para proceder al Examen de Grado cuya denominación aparece al margen, para la obtención del grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS (ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE)

DE: ADRIANA DIAZ CALDERON



ADRIANA DIAZ CALDERON
ALUMNA

y de acuerdo con el artículo 78 fracción III del Reglamento de Estudios Superiores de la Universidad Autónoma Metropolitana, los miembros del jurado resolvieron:

Aprobar

Acto continuo, el presidente del jurado comunicó a la interesada el resultado de la evaluación y, en caso aprobatorio, le fue tomada la protesta.

REVISÓ

MTRA. ROSALÍA SERRANO DE LA PAZ
DIRECTORA DE SISTEMAS ESCOLARES

DIRECTOR DE LA DIVISIÓN DE CBI

Roman Linares Romero

DR. ROMAN LINARES ROMERO

PRESIDENTE

DR. ANTONIO ZOILO MARQUEZ GARCIA

DR. ANTONIO ZOILO MARQUEZ GARCIA

VOCAL

DR. OSCAR ARTURO FUENTES MARILES

DR. OSCAR ARTURO FUENTES MARILES

SECRETARIO

DR. FRANCISCO JAVIER APARICIO MIJARES

DR. FRANCISCO JAVIER APARICIO MIJARES