



Universidad de Concepción
Facultad de Ciencias Ambientales
Ingeniería Ambiental

Restauración de bosque nativo para la recuperación de procesos hidrológicos en la Cuenca del Río Duqueco

Habilitación presentada para optar al título de

Ingeniera Ambiental

Constanza Vanessa Millán Alveal

Profesores Guía:

Dr. Mauricio Aguayo A.

Dr. Víctor Parra R.

CONCEPCIÓN (Chile), 2025

Restauración de bosque nativo para la recuperación de procesos hidrológicos en la Cuenca del Río Duqueco

Habilitación presentada para optar al título de
Ingeniera Ambiental

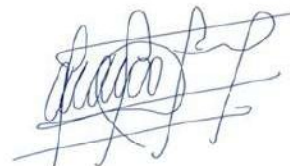
Alumna: Constanza Millán Alveal

Profesores Guía: Mauricio Aguayo A. y Víctor Parra R.

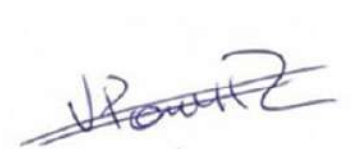
CONCEPCIÓN (Chile), 2025

“RESTAURACIÓN DE BOSQUE NATIVO PARA LA RECUPERACIÓN DE PROCESOS HIDROLÓGICOS EN LA CUENCA DEL RÍO DUQUECO”

Profesor Guía: Dr. Mauricio Aguayo Arias



Profesor Guía: Dr. Victor Parra Ramírez



Profesor Comisión: Dr. Pedro Arriagada Sanhueza



Profesor Comisión: Dr. Octavio Rojas Vilches



CONCEPTO: APROBADO CON DISTINCIÓN MAXIMA

Conceptos que se indica en el Título

- ✓ Aprobado por Unanimidad : (En Escala de 4,0 a 4,9)
- ✓ Aprobado con Distinción (En Escala de 5,0 a 5,6)
- ✓ Aprobado con Distinción Máxima (En Escala de 5,7 a 7,0)

Concepción, julio 2025

Dedicatoria

A la mujer que me hizo entender que para ser feliz hay que luchar por lo que uno cree justo.

A mi abuela, que con su ejemplo me convirtió en la persona que hoy soy.

Agradecimientos

Primeramente, quiero agradecer a mi madre Vanessa, la mujer fuerte y amable que me apoyó y que nunca dejó de creer en mí y me brida su amor incondicional día a día.

Quiero agradecer a mi familia, principalmente, a mi papá Roberto, a Nachito y a mis hermanos, la Javi, la Anto, la Fran y el Diego por siempre estar ahí con sus cálidas palabras, apoyo incondicional y sus risas.

A mi abuela Rosa, la persona que me enseñó la importancia de luchar por lo que uno cree, a levantarme aun cuando todo parece cuesta arriba y a nunca dejar de intentarlo, aunque ya no tengas más fuerzas.

A Vicho, que me acompañó en cada paso que di y que me demostró su amor sin estar presente. Y que me enseñó lo que es sentirse amado incluso estando lejos de tus seres queridos.

Quiero agradecerles a mis profesores, especialmente a mis profesores en especial a mis profesores guías Mauricio y Víctor, que me acompañaron durante este largo camino, por su confianza, apoyo y sus enseñanzas que estoy segura son lecciones que servirán toda la vida. A Marieta que me aconsejó, me ayudó y respondió cada una de las dudas que me iban surgiendo.

A mis amigos y amigas, Romi, Valo, Marco, Cristóbal, Tomi, Carlos, Vale, Thiare y las Javis, por acompañarme en esta etapa y hacer de la vida universitaria muchísimo más fácil, agradable y bonita. También a mi amiga de la infancia Victoria que más que una amiga se convirtió en una hermana a la que agradezco de haber conocido.

Quiero agradecer también a mi pololo Fabián, mi amable compañero de vida, que me ayudó, apoyó y me entregó su amor incondicional, que me acompaña en mis momentos más difíciles sin pedir nada a cambio, que me brinda su amor y sus cálidos abrazos en los días que más lo necesito y que siempre está orgulloso de mí.

Además, quisiera agradecer al Proyecto FONDECYT Regular 1231382 “*Linking landscape patterns and water availability. Towards Nature-Based Solutions to integrated river basin management and climate change adaptation*” por la oportunidad que me brindaron para realizar la investigación.

Índice

1.	Resumen	13
2.	Introducción.....	14
2.1	Cambio de uso de suelo en cuencas hidrográficas.....	14
2.2	Bosque ribereño, funciones ecológicas y su relación con la hidrología.....	15
2.3	Soluciones para la gestión del agua basadas en la naturaleza	16
2.4	Diferencias entre restauración, revegetación, reforestación y rehabilitación ecológica 17	
2.5	Modelación hidrológica	18
3.	Pregunta de investigación.....	19
4.	Objetivos.....	19
4.1	Objetivo general	19
4.2	Objetivos específicos	19
5.	Metodología	19
5.1	Área de estudio	20
5.1.1	Clima	21
5.1.2	Hidrología	22
5.2	Modelación hidrológica de la cuenca empleando TETIS	24
5.2.1	Datos climáticos e hidrológicos iniciales	26
5.2.2	Variables espaciales	27
5.2.3	Estimación de parámetros espaciales	34
5.3	Calibración y validación del modelo.....	44
5.4	Elaboración de escenarios de restauración	46
6.	Resultados	54
6.1.	Obtención de parámetros espaciales para modelo TETIS	54
6.1.1.	Mapas derivados del DEM.....	54
6.1.2.	Estimación de parámetros derivados del uso de suelo.....	57
6.1.3.	Estimación de parámetros derivados de tipo de suelo y geología	61
6.2.	Calibración y validación del modelo.....	65
6.3.	Condición basal de la cuenca	69

6.4.	Variabilidad de parámetros hidrológicos ante cambios en la cobertura vegetal	72
7.	Discusión y conclusiones	117
8.	Línea Futura de investigación	119
9.	Objetivos de desarrollo sostenible (ods)	119
10.	REFERENCIAS	121
11.	ANEXOS.....	127

Índice de figuras

Figura 1.	Metodología en función a objetivos específicos	20
Figura 2.	Cuenca del Río Duqueco, Región del Biobío	21
Figura 3.	Climatograma de la estación Quileco	22
Figura 4.	Caudal promedio período 1990-1999	23
Figura 5.	Caudal promedio período 2000-2009	23
Figura 6.	Esquema conceptual a escala de celda del modelo distribuido TETIS	24
Figura 7.	Movimiento vertical y horizontal propuesto por modelo TETIS.....	25
Figura 8.	Modelo de Elevación Digital de la Cuenca del Río Duqueco	28
Figura 9.	Cobertura de uso de suelo cuenca de Río Duqueco (CONAF, 2015).....	30
Figura 10.	Tipo de suelo de la cuenca del Río Duqueco	31
Figura 11.	Unidades geológicas Río Duqueco	34
Figura 12.	Parámetros espaciales estimados y bases de datos	35
Figura 13.	Condición de contorno del suelo	42
Figura 14.	Permeabilidad según litología	43
Figura 15.	Reclasificación de usos de suelo	47
Figura 16.	Escenario de restauración 1, pendientes de 0 a 5°	47
Figura 17.	Escenario de restauración 2, pendientes de 5 a 15°	49
Figura 18.	Escenario de restauración 3, pendientes de 15 a 25°	50
Figura 19.	Escenario de restauración 4, pendientes de 25 a 35°	51
Figura 20.	Escenario de restauración 5, pendientes de 35 a 45°	52
Figura 21.	Escenario de restauración 6, pendientes mayores a 45°	53
Figura 22.	Mapa de dirección de flujo de la cuenca del río Duqueco	54
Figura 23.	Mapa de acumulación de flujo de la cuenca del río Duqueco.....	55
Figura 24.	Mapa de pendientes de la cuenca del río Duqueco	56
Figura 25.	Mapa de velocidad de flujo de ladera en cuenca de río Duqueco	57
Figura 26.	Intercepción de la precipitación por la cubierta vegetal en la cuenca del río Duqueco	58
Figura 27.	Almacenamiento superficial producto de cobertura.....	59
Figura 28.	Almacenamiento superficial producto a pendientes	60
Figura 29.	Almacenamiento estático de la cuenca del río Duqueco.....	62
Figura 30.	Capacidad de infiltración del suelo en la cuenca del río Duqueco.....	63
Figura 31.	Permeabilidad del sustrato rocoso	65
Figura 32.	Hidrograma resultante de simulación en el periodo de calibración.....	67
Figura 33.	Hidrograma resultante de simulación en el periodo de validación	68
Figura 34.	Cobertura cuenca río Duqueco.....	70
Figura 35.	Distribución de usos de suelo en cuenca del río Duqueco.....	71
Figura 36.	Distribución de uso de suelo escenario 1.....	73

Figura 37. Distribución de uso de suelo escenario 2.....	75
Figura 38. Distribución de uso de suelo escenario 3.....	76
Figura 39. Distribución de uso de suelo escenario 4.....	77
Figura 40. Distribución de uso de suelo escenario 5.....	79
Figura 41. Distribución de uso de suelo escenario 6.....	80
Figura 42. Variación de parámetro de intercepción en base a los escenarios en periodo de 2010 – 2019	82
Figura 43.	83
Figura 44. Variación de parámetro de intercepción en base a los escenarios en temporada de verano e invierno	83
Figura 45. Variación de parámetro de evaporación en base a los escenarios	85
Figura 46. Variación de parámetro de evaporación en base a los escenarios (promedio anual).....	86
Figura 47. Variación de parámetro de evaporación en base a los escenarios en temporada de verano e invierno	86
Figura 48. Variación de parámetro de almacenamiento estático en base a los escenarios.....	88
Figura 49. Variación de parámetro de almacenamiento estático en base a los escenarios (promedio anual).....	89
Figura 50. Variación de parámetro de almacenamiento estático en base a los escenarios en temporada de verano e invierno	89
Figura 51. Variación de parámetro de lluvia directa en base a los escenarios	91
Figura 52. Variación de parámetro de Lluvia directa en base a los escenarios (promedio anual).....	92
Figura 53. Variación de parámetro lluvia directa en base a los escenarios en temporada de verano e invierno	92
Figura 54. Variación de parámetro de evapotranspiración en base a los escenarios	94
Figura 55. Variación de parámetro de evapotranspiración en base a los escenarios (promedio anual)....	95
Figura 56. Variación de parámetro evapotranspiración en base a los escenarios en temporada de verano e invierno.....	95
Figura 57. Variación de parámetro de excedente en base a los escenarios	97
Figura 58. Variación de parámetro de excedente en base a los escenarios (promedio anual).....	98
Figura 59.	98
Figura 60. Variación de parámetro de evapotranspiración en base a los escenarios	100
Figura 61. Variación de parámetro de escorrentía en base a los escenarios (promedio anual)	100
Figura 62. Variación de parámetro escorrentía en base a los escenarios en temporada de verano e invierno	101
Figura 63. Variación de parámetro Almacenamiento gravitacional en base a los escenarios	102
Figura 64. Variación de parámetro de Almacenamiento gravitacional en base a los escenarios (promedio anual).....	103
Figura 65. Variación de parámetro Almacenamiento gravitacional en base a los escenarios en temporada de verano e invierno.....	103
Figura 66. Variación de parámetro Infiltración en base a los escenarios.....	105
Figura 67. Variación de parámetro de infiltración en base a los escenarios (promedio anual)	106
Figura 68. Variación de parámetro infiltración en base a los escenarios en temporada de verano e invierno	106
Figura 69. Variación de parámetro Interflujo en base a los escenarios.....	108
Figura 70. Variación de parámetro de interflujo en base a los escenarios (promedio anual)	108
Figura 71. Variación de parámetro interflujo en base a los escenarios en temporada de verano e invierno	109
Figura 72. Variación de parámetro Percolación en base a los escenarios	111
Figura 73. Variación de parámetro de percolación en base a los escenarios (promedio anual)	111

Figura 74. Variación de parámetro percolación en base a los escenarios en temporada de verano e invierno	112
Figura 75. Variación de parámetro flujo subterráneo en base a los escenarios	113
Figura 76. Variación de parámetro de flujo subterráneo en base a los escenarios (promedio anual).....	113
Figura 77. Variación de parámetro flujo subterráneo en base a los escenarios en temporada de verano e invierno	114
Figura 78. Variación de caudal de salida en base a los escenarios	115
Figura 79. Variación de parámetro de caudal de salida en base a los escenarios (promedio anual).....	116
Figura 80. Variación de parámetro caudal de salida en base a los escenarios en temporada de verano e invierno	116
Figura 81. Intercepción anual por escenario de restauración	127
Figura 82. Intercepción temporada de verano por escenario de restauración	128
Figura 83. Intercepción temporada de invierno por escenario de restauración	129
Figura 84. Intercepción temporada de invierno por escenario de restauración	130
Figura 85. Evaporación temporada de verano por escenario de restauración (mm/tem. verano)	131
Figura 86. Evaporación temporada de invierno por escenario de restauración (mm/tem. invierno).....	132
Figura 87. Almacenamiento estático Anual por escenario de restauración (mm/año)	133
Figura 88. Almacenamiento Estático temporada de verano por escenario de restauración (mm/temporada de verano)	134
Figura 89. Almacenamiento Estático temporada de invierno por escenario de restauración (mm/temporada de invierno)	135
Figura 90. Lluvia directa anual por escenario de restauración (mm/anual)	136
Figura 91. Lluvia directa temporada de verano por escenario de restauración (mm/temperatura de verano)	137
Figura 92. Lluvia directa temporada de invierno por escenario de restauración (mm/temporada de invierno).....	138
Figura 93. Evapotranspiración anual por escenario de restauración (mm/año)	139
Figura 94. Evapotranspiración temporada de invierno por escenario de restauración (mm/temporada de invierno).....	140
Figura 95. Evapotranspiración temporada de invierno por escenario de restauración (mm/temporada de invierno).....	141
Figura 96. Almacenamiento superficial anual por escenario de restauración (mm/anual)	142
Figura 97. Almacenamiento superficial temporada de verano por escenario de restauración (mm/temporada de verano).....	143
Figura 98. Almacenamiento superficial temporada de invierno por escenario de restauración (mm/temporada de invierno)	144
Figura 99. Excedente anual por escenario de restauración (mm/anual).....	145
Figura 100. Excedente temporada de verano por escenario de restauración (mm/temporada de verano)	146
Figura 101. Excedente temporada de invierno por escenario de restauración (mm/temporada de invierno).....	147
Figura 102. Escorrentía anual por escenario de restauración (mm/anual)	148
Figura 103. Escorrentía temporada de verano por escenario de restauración (mm/temporada de verano)	149
Figura 104. Escorrentía temporada de invierno por escenario de restauración (mm/temporada de invierno).....	150
Figura 105. Almacenamiento gravitacional anual por escenario de restauración (mm/anual)	151
Figura 106. Almacenamiento gravitacional temporada de verano por escenario de restauración (mm/temporada de verano).....	152

Figura 107. Almacenamiento gravitacional temporada de invierno por escenario de restauración (mm/temporada de invierno)	153
Figura 108. Infiltración anual por escenario de restauración (mm/anual)	154
Figura 109. Infiltración temporada de verano por escenario de restauración (mm/temporada de verano)	155
Figura 110. Infiltración temporada de invierno por escenario de restauración (mm/temporada de invierno).....	156
Figura 111. Interflujo anual por escenario de restauración (mm/anual)	157
Figura 112. Interflujo temporada de verano por escenario de restauración (mm/temporada de verano)	158
Figura 113. Interflujo temporada de invierno por escenario de restauración (mm/temporada de invierno)	159
Figura 114. Percolación anual por escenario de restauración (mm/anual).....	160
Figura 115. Percolación temporada de verano por escenario de restauración (mm/temporada de verano)	161
Figura 116. Percolación temporada de invierno por escenario de restauración (mm/temporada de invierno).....	162
Figura 117. Flujo subterráneo anual por escenario de restauración (mm/anual).....	163
Figura 118. Flujo subterráneo temporada de verano por escenario de restauración (mm/temporada de verano)	164
Figura 119. Flujo subterráneo temporada de invierno por escenario de restauración (mm/temporada de invierno).....	165
Figura 120. Caudal de salida anual por escenario de restauración (mm/anual).....	166
Figura 121. Caudal de salida temporada de verano por escenario de restauración (mm/temporada de verano)	167
Figura 122. Caudal de salida temporada de invierno por escenario de restauración (mm/temporada de invierno).....	168

Índice de tablas

Tabla 1. Enfoques de las SbN	17
Tabla 2. Usos de suelo de la cuenca del río Duqueco	29
Tabla 3. Series de suelo de cuenca del río Duqueco	32
Tabla 4. Unidades geológicas presentes en cuenca Río Duqueco	33
Tabla 5. Parámetros obtenidos del mapa de uso de suelo para cuenca del Río Duqueco	37
Tabla 6. Factor de vegetación	39
Tabla 7. Almacenamiento en charcos (almacenamiento en superficie).....	40
Tabla 8. Litología identificada en área de estudio	44
Tabla 9. Parámetros de producción de escorrentía del modelo TETIS	45
Tabla 10. Clasificación de rendimiento general del índice NSE	46
Tabla 11. Rangos de pendientes en grados	47
Tabla 12. Valores de permeabilidad adaptados para diferentes categorías cualitativas de permeabilidad del sustrato rocoso	64
Tabla 13. Factores correctores resultantes de la calibración automática	66
Tabla 14. Principales características del evento.....	67
Tabla 15. Principales características del evento.....	69
Tabla 16. Superficie ocupada por usos de suelo en cuenca del río Duqueco	70
Tabla 17. Resumen de balance hídrico de condición base	72

Tabla 18.	Cambios en la superficie escenario 1 (pendientes 0 a 5°)	73
Tabla 19.	Cambios en la superficie escenario 2 (pendientes 5 a 15°)	74
Tabla 20.	Cambios en la superficie escenario 3 (pendientes 15 a 25°)	76
Tabla 21.	Cambios en la superficie escenario 4 (pendientes 25 a 35°)	77
Tabla 22.	Cambios en la superficie escenario 5 (pendientes de 35 a 45°)	78
Tabla 23.	Cambios en la superficie escenario 6 (pendientes mayores a 45°)	80
Tabla 24.	Variación de parámetro de intercepción en base a los escenarios	81
Tabla 25.	Variación de parámetro de evaporación en base a los escenarios	84
Tabla 26.	Variación de parámetro de almacenamiento estático en base a los escenarios	87
Tabla 27.	Variación de parámetro de lluvia directa en base a los escenarios	90
Tabla 28.	Variación de parámetro de evapotranspiración en base a los escenarios	93
Tabla 29.	Variación de parámetro del excedente en base a los escenarios	96
Tabla 30.	Variación de parámetro de la escorrentía en base a los escenarios	99
Tabla 31.	Variación de parámetro almacenamiento gravitacional en base a los escenarios	102
Tabla 32.	Variación de parámetro infiltración en base a los escenarios	104
Tabla 33.	Variación de parámetro interflujo en base a los escenarios	107
Tabla 34.	Variación de parámetro Percolación en base a los escenarios	110
Tabla 35.	Variación de parámetro Flujo subterráneo en base a los escenarios	112
Tabla 36.	Variación de caudal de salida en base a los escenarios	115
Tabla 37.	Intercepción Anual por escenario de restauración (mm/año)	127
Tabla 38.	Intercepción temporada de verano por escenario de restauración (mm/tem. verano)	128
Tabla 39.	Intercepción temporada de invierno por escenario de restauración (mm/tem. invierno)	129
Tabla 40.	Evaporación Anual por escenario de restauración (mm/año)	130
Tabla 41.	Evaporación temporada de verano por escenario de restauración (mm/tem. verano)	131
Tabla 42.	Evaporación temporada de invierno por escenario de restauración (mm/tem. invierno)	132
Tabla 43.	Almacenamiento Estático anual por escenario de restauración (mm/año)	133
Tabla 44.	Almacenamiento Estático temporada de verano por escenario de restauración (mm/temporada de verano)	134
Tabla 45.	Almacenamiento Estático temporada de invierno por escenario de restauración (mm/temporada de invierno)	135
Tabla 46.	Lluvia directa anual por escenario de restauración (mm/año)	136
Tabla 47.	Lluvia directa temporada de invierno por escenario de restauración (mm/temporada de verano)	137
Tabla 48.	Lluvia directa temporada de invierno por escenario de restauración (mm/temporada de invierno)	138
Tabla 49.	Evapotranspiración anual por escenario de restauración (mm/año)	139
Tabla 50.	Evapotranspiración temporada de verano por escenario de restauración (mm/temporada de verano)	140
Tabla 51.	Evapotranspiración temporada de invierno por escenario de restauración (mm/temporada de invierno)	141
Tabla 52.	Almacenamiento superficial anual por escenario de restauración (mm/anual)	142
Tabla 53.	Almacenamiento superficial temporada de verano por escenario de restauración (mm/temporada de verano)	143
Tabla 54.	Almacenamiento superficial temporada de invierno por escenario de restauración (mm/temporada de invierno)	144
Tabla 55.	Excedente anual por escenario de restauración (mm/anual)	145
Tabla 56.	Excedente temporada de verano por escenario de restauración (mm/temporada de verano)	146
Tabla 57.	Excedente temporada de invierno por escenario de restauración (mm/temporada de invierno)	147

Tabla 58. Escorrentía anual por escenario de restauración (mm/año)	148
Tabla 59. Escorrentía temporada de verano por escenario de restauración (mm/temporada de verano)	149
Tabla 60. Escorrentía temporada de invierno por escenario de restauración (mm/temporada de invierno)	150
Tabla 61. Almacenamiento gravitacional anual por escenario de restauración (mm/año)	151
Tabla 62. Almacenamiento gravitacional temporada de verano por escenario de restauración (mm/temporada de verano)	152
Tabla 63. Almacenamiento gravitacional temporada de invierno por escenario de restauración (mm/temporada de invierno)	153
Tabla 64. Infiltración anual por escenario de restauración (mm/año)	154
Tabla 65. Infiltración temporada de verano por escenario de restauración (mm/temporada de verano)	155
Tabla 66. Infiltración temporada de invierno por escenario de restauración (mm/temporada de invierno)	156
Tabla 67. Interflujo anual por escenario de restauración (mm/año)	157
Tabla 68. Interflujo temporada de verano por escenario de restauración (mm/temporada de verano)	158
Tabla 69. Interflujo temporada de invierno por escenario de restauración (mm/temporada de invierno)	159
Tabla 70. Percolación anual por escenario de restauración (mm/año)	160
Tabla 71. Percolación temporada de verano por escenario de restauración (mm/temporada de verano)	161
Tabla 72. Percolación temporada de invierno por escenario de restauración (mm/temporada de invierno)	162
Tabla 73. Flujo subterráneo anual por escenario de restauración (mm/año)	163
Tabla 74. Flujo subterráneo temporada de verano por escenario de restauración (mm/temporada de verano)	164
Tabla 75. Flujo subterráneo temporada de invierno por escenario de restauración (mm/temporada de invierno)	165
Tabla 76. Caudal de salida anual por escenario de restauración (mm/año)	166
Tabla 77. Caudal de salida temporada de verano por escenario de restauración (mm/temporada de verano)	167
Tabla 78. Caudal de salida temporada de invierno por escenario de restauración (mm/temporada de invierno)	168

1. RESUMEN

El aumento de las necesidades de la población ha llevado a una fuerte modificación de la cobertura vegetal en los últimos tiempos. Grandes ecosistemas boscosos y praderas naturales han sido reemplazados por plantaciones forestales.

En algunas regiones de Chile, las plantaciones forestales han aumentado significativamente, modificando el bosque nativo predominante y reduciendo su superficie en un tercio en 20 años. Estos cambios han afectado los ciclos hídricos de las cuencas, deteriorando la calidad del agua y aumentando la vulnerabilidad de las comunidades humanas.

Los bosques ribereños, son zonas boscosas ubicadas cerca de cursos de agua, que desempeñan un papel vital en la conservación de funciones ecosistémicas, como el control de erosión y la regulación de la temperatura del agua. Sin embargo, a pesar de su gran importancia, estos bosques se encuentran amenazados debido a la transformación de suelos para fines económicos y de desarrollo humano.

Ante esta situación, se buscan Soluciones basadas en la Naturaleza (SBN) para enfrentar los problemas ambientales y sociales crecientes. Estas soluciones se centran en imitar o utilizar los procesos naturales para abordar desafíos. Asimismo, las SBN pueden incluir la protección, restauración y manejo de bosques.

La modelación hidrológica corresponde al uso de modelos conceptuales o basados en procesos físicos, los cuales son utilizados para simular el comportamiento del ciclo del agua en cuencas y sistemas hidrológicos. Estos modelos ocupan datos de entrada (precipitación, características geomorfológicas de las cuencas, caudal observado, temperatura, etc.) para predecir variables de salida (escorrentía, caudal de salida, etc.)

Los modelos hidrológicos son herramientas que permiten el predecir y comprender las interacciones entre los sistemas hidrológicos y los distintos factores que influyen en ellos.

En un estudio realizado en la cuenca del río Duqueco, se evaluaron distintos escenarios (buffers) de restauración de bosque nativo, los cuales fueron diseñados para recuperar procesos hidrológicos. Se encontró que el aumento de la cobertura de bosque nativo alrededor del cauce mejoró la intercepción y la infiltración, reduciendo la escorrentía. Por tanto, en este estudio, se busca reconocer la importancia de la restauración en distintos escenarios en la cuenca del río Duqueco, utilizando herramientas como la modelación hidrológica, acompañada de un enfoque de SBN para alcanzar la sostenibilidad de los ecosistemas.

2. INTRODUCCIÓN

2.1 Cambio de uso de suelo en cuencas hidrográficas

En los últimos tiempos, la cobertura vegetal ha sido fuertemente modificada por el aumento de las necesidades de la población. La tala de bosques, las prácticas agrícolas de subsistencia, la intensificación de la producción agrícola y la expansión de los centros urbanos han cambiado drásticamente el paisaje (Aguayo et al. 2009). Grandes ecosistemas boscosos y praderas naturales han sido remplazadas por plantaciones forestales. Durante los últimos cincuenta años, se observa una paulatina penetración, en sentido de norte-sur, de las plantaciones forestales sobre sectores tradicionalmente ocupados por remanentes nativos. (Cisterna et al., 1999). Según Aguayo et al., (2009). Las plantaciones en las regiones del Biobío y la Araucanía aumentaron ocho veces la superficie registrada para el año 1979, modificando el bosque nativo que predominaba. Asimismo, la cobertura de bosque nativo registró una disminución en un tercio de su superficie en un periodo de 20 años. Esta situación se recalca en el informe presentado por la FAO en el que se expone el estado de los bosques a nivel mundial, mencionando que, “la superficie utilizada por la actividad forestal en Chile ha aumentado en 57.000 y 40.000 ha anuales durante las décadas 1990 – 2000 y 2000 - 2010, respectivamente” (FAO, 2011).

Estos grandes cambios han alterado los ciclos hídricos de las cuencas, han deteriorado la calidad de agua de los cauces e incrementado la vulnerabilidad de grupos humanos (Reyes, et al., 2006). Los cambios de uso de suelo provocan eventos de riesgo, como el aumento de la escorrentía superficial, especialmente durante episodios de fuertes precipitaciones ocasionando anegamientos, erosión, difusión de contaminantes, entre otros. (Goudie, 1990; Weng, 2001). Además, se asocian con impactos ecológicos en prácticamente todas las escalas (Bocco et al., 2001). En el informe de Lara et al., (2011) “Lecciones, desafíos y recomendaciones de política para el manejo, conservación y restauración de bosque nativo en Chile” se menciona que un aumento en el 10% de las plantaciones forestales de rápido crecimiento en pequeñas cuencas (140 - 1900 ha) reducen en un 20,4% los caudales de verano y este número puede aumentar dependiendo si estas plantaciones se encuentran en zonas de déficit hídrico, esto en comparación a otros tipos de uso de suelo (Farley et al. 2005).

La realidad del país es que, debido a la constante pérdida de la cobertura vegetal natural en ecosistemas, se ha originado una disminución en la disponibilidad de agua y un aumento en el estrés de las cuencas (Fuentes et al., 2021). Haciendo indispensable la búsqueda de nuevas soluciones para afrontar estas problemáticas que solo van en aumento.

2.2 Bosque ribereño, funciones ecológicas y su relación con la hidrología

Los bosques ribereños, también conocidos como bosques riparianos son áreas de vegetación forestal natural cercanas a cursos de aguas, lo que los hace altamente dependientes de la humedad para su crecimiento. Son reconocidos por su rol vital en la conservación de múltiples funciones ecosistémicas de los cauces. Tales como el control de erosión, regulación de la temperatura de las aguas, también permiten la filtración y retención de nutrientes, ya que actúan como buffers biológicos en donde los nutrientes y productos químicos que ingresan son transformados en formas menos dañinas para los ecosistemas, lo que permite mejorar la calidad de las aguas y la biodiversidad (Méndez et al. 2014).

Los sistemas ribereños se caracterizan por su diversidad, dinamismo y complejidad. Son zonas frecuentemente fértiles y productivas, esto se debe a su cercanía a los depósitos aluviales los que les permiten contar con un suelo rico en nutrientes y materia orgánica (Granados *et al.* 2006). Son sistemas que funcionan como fuentes que sustentan la biodiversidad y reservorios genéticos de especies que requieren de hábitats y microhábitats especiales, tales como especies acuáticas, anfibios, algunas especies terrestres y también para aves migratorias (Naiman et al. 1993).

Sumado a eso, debido a su naturaleza lineal, los bosques ribereños cumplen funciones de corredores biológicos que conectan bosques que por razones naturales o antrópicas se encuentran aisladas, reduciendo el efecto “isla”¹ (Naiman et al. 1993).

Por otra parte, entendiendo el funcionamiento del ciclo hidrológico y todos los componentes que interactúan con este, los bosques ribereños son relevantes debido a que están estrechamente relacionados con los procesos hidrológicos cumpliendo funciones de regulación tales como control de erosión de las riberas, reciclaje de nutrientes y circulación materia orgánica (Toribio et al. 2014).

A pesar de su gran importancia ecológica, los bosques ribereños corresponden a uno de los ecosistemas que se encuentran mayormente amenazados por las transformaciones desde su forma natural a nuevos usos de suelo debido a las presiones ejercidas con las actividades productivas y al aumento de las necesidades de la población, provocando desequilibrio en todas las escalas, favorecido la disminución en la disposición y calidad de los recursos hídricos (Valdés et al., 2018)

¹ Hace alusión a la fragmentación y aislamiento de áreas boscosas rodeadas de otro tipo de paisaje antrópico.

2.3 Soluciones para la gestión del agua basadas en la naturaleza

Las Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN) están diseñadas para hacer frente a las problemáticas de la sociedad que han incrementado de manera paralela al aumento de las necesidades de esta misma, tales como como la seguridad alimentaria, seguridad del agua, salud humana, riesgo de desastres, entre otros. (CONAMA 2018). Estas iniciativas operan mediante a la utilización o imitación de procesos naturales, los cuales son gestionados estratégicamente para alcanzar objetivos específicos.

Una SbN puede corresponder a la conservación o la rehabilitación de ecosistemas naturales, la mejora o creación de procesos naturales en ecosistemas modificados o artificiales (UNESCO, 2018).

Las SbN pueden clasificarse en tres grandes grupos: 1) aquellas relacionadas con masas forestales, 2) las asociadas a tierras agrícolas y pastizales, y 3) las vinculadas a humedales y sistemas acuáticos (Arauz et al., 2021).

Dentro de las soluciones más comunes encontramos:

- Soluciones relacionadas con la protección, restauración y manejo de los ecosistemas de bosques: como manejo del fuego, el manejo de nutrientes para limitar las emisiones producidas por la adición de fertilizantes nitrogenados, entre otros.
- Soluciones relacionadas con la restauración y protección de humedales.
- Utilización de infraestructura verde para sustituir, aumentar o trabajar en conjunto de las infraestructuras grises.
- Reutilización de aguas lluvias.
- Reforestación dentro de las ciudades.

(Comité científico de cambio climático, 2021).

En el contexto de la gestión de los recursos hídricos y el cumplimiento de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible (Comité Científico de Cambio Climático, 2021), las SbN resultan indispensables para asegurar un uso adecuado de estos recursos.

Al actuar en armonía con la naturaleza y no en su contra, las SbN ofrecen un marco propicio para superar enfoques tradicionales, integrando diversos actores y factores que contribuyen a una gestión más eficiente (CONAMA, 2018).

Las SbN se clasifican también dependiendo del enfoque, los cuales se presentan en la tabla 1.

Tabla 1.

Enfoques de las SbN

Categorías de enfoques de las SbN	Ejemplos
Restauración de ecosistemas	Ingeniería ecológica, restauración de bosque nativo en cuencas.
Enfoques relacionados con ecosistemas con problemáticas específicas	Servicios de adaptación climática, reducción del riesgo de desastres basadas en los ecosistemas.
Infraestructura	Infraestructura natural o infraestructura verde.
Gestión basados en la naturaleza	Manejo integrado de la zona costera, gestión integrada de los recursos hídricos.
Protección del ecosistema	Conservación en áreas que incluyen el manejo de áreas protegidas.

Fuente: Soluciones basadas en la naturaleza, 2021.

Las Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN) juegan un rol importante en el fortalecimiento de la Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH). La Gestión Integrada de Recursos Hídricos trata de un proceso que busca promover el manejo y desarrollo coordinado del agua, la tierra y los recursos relacionados, a través de la elaboración de políticas públicas (en torno a los recursos hídricos) para así maximizar el bienestar social y económico de forma equitativa, sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas. Si bien, este es un concepto que ha ido evolucionando, sigue pendiente a la elaboración de una propuesta.

2.4 Diferencias entre restauración, revegetación, reforestación y rehabilitación ecológica

Dentro de la búsqueda de soluciones para enfrentar los problemas del mundo actual, encontramos una serie de conceptos similares, como restauración, revegetación, reforestación y rehabilitación ecológica. Para ello, en este acápite se presenta la definición de cada uno de estos conceptos.

El concepto de reforestación hace alusión a la acción de recuperar la cobertura de bosques nativos degradados en zonas que han sido deforestadas (Vergara et al., 2019).

La revegetación consiste en el establecimiento de una o unas pocas especies en un área determinada (McDonald et al., 2016).

Rehabilitación, es la acción de recuperar las funciones de un ecosistema degradado y además incrementar la capacidad de este para proveer bienes y servicios ecosistémicos. Sin embargo,

no considera necesariamente una recuperación de la estructura, composición y diversidad del ecosistema original (McDonald et al., 2016).

Por último, el concepto de restauración es más amplio y significa la recuperación de un ecosistema que ha sido degradado, dañado o destruido para conseguir que este se vuelva un ecosistema autosustentable a largo plazo. La restauración ecológica tiene varios objetivos fundamentales, tales como, detener las causas que iniciaron la degradación, recuperar vegetación y fauna propia del área, facilitar y acelerar el proceso de sucesión ecológica (McDonald et al., 2016).

2.5 Modelación hidrológica

El ciclo hidrológico “supone un movimiento o transferencia de masas de agua de forma continua como consecuencia de un flujo energético” (Pulido-Bosch, 2007). Corresponde a un conjunto de procesos que ocurren de manera simultánea y que están interrelacionados. Está determinado por la climatología, topografía, suelos y cobertura vegetal (Ocampo et al. 2013). Dichos patrones climáticos se encuentran en un constante cambio debido al desarrollo de las actividades humanas. Esto ha provocado un desequilibrio en los procesos de almacenamiento y flujos de agua de los sistemas (Allen et al., 2011).

Debido a la importancia de estos ecosistemas es que nace la necesidad de predecir y comprender las interacciones de estos con distintos factores, que podrían resultar una amenaza. Sin embargo, estos procesos ocurren en un sistema natural y son altamente complejos, es por esta razón que se utilizan los modelos hidrológicos. La modelación hidrológica consiste en la utilización de esquemas para ayudar al estudio y la comprensión de los procesos hidrológicos que componen al ciclo hidrológico intentando imitarlo o bien partes de este y sus respuestas con relación a la cobertura vegetal, el clima o acciones antrópicas (Pizarro et al., 2005).

Actualmente, existen diversas formas de clasificar los modelos según sus características. En el caso de la modelación hidrológica, se pueden identificar tres características fundamentales:

- Con respecto a la conceptualización de procesos básicos: empíricos, conceptuales o basados en procesos
- Según la naturaleza de los algoritmos básicos: determinísticos o estocásticos
- De acuerdo con su representación espacial: agrupados o distribuidos

Ahora bien, dentro de la clasificación dependiendo de los algoritmos básicos podemos encontrar los modelos determinísticos y los estocásticos. Siendo los primeros los mayormente utilizados y pudiendo ser subdivididos en modelos agregados, semi-distribuidos y distribuidos.

3. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

Asumiendo distintos escenarios de restauración con bosque nativo en diversas zonas de la cuenca, ¿cuál de estos escenarios ofrecerá una mejor respuesta en la recuperación de los procesos hidrológicos en la cuenca del río Duqueco?

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo general

Evaluar el efecto de distintos escenarios de restauración de bosque nativo sobre la recuperación de procesos hidrológicos dentro de la cuenca del río Duqueco.

4.2 Objetivos específicos

- Realizar la modelación hidrológica de la cuenca del río Duqueco bajo el escenario actual de uso de suelo.
- Diseñar y analizar escenarios de restauración de bosque nativo basados en las actuales políticas, planes, normas u otros cuerpos legislativos que promuevan estas acciones.

5. METODOLOGÍA

La metodología se organiza en torno a tres ítems, correspondientes a cada uno de los objetivos específicos. En una primera etapa, se llevó a cabo la recopilación de datos, seleccionando las estaciones pluviométricas relevantes para la cuenca de estudio, a partir de las cuales se obtuvieron registros de precipitaciones diarias y temperaturas. Además, se recopiló información proveniente de modelos de elevación digital y de diversos mapas temáticos (como mapas de dirección y acumulación de flujo, velocidad del flujo en laderas y pendiente del terreno), con el objetivo de calcular los tiempos de concentración y otros parámetros necesarios para el desarrollo del estudio. Posteriormente, se obtuvo información hidrológica relacionada con la medición de caudales, lo que permitió caracterizar la condición actual de la cuenca mediante la aplicación de un modelo hidrológico, el cual fue calibrado y validado para obtener el comportamiento de la condición actual de la cuenca del río Duqueco.

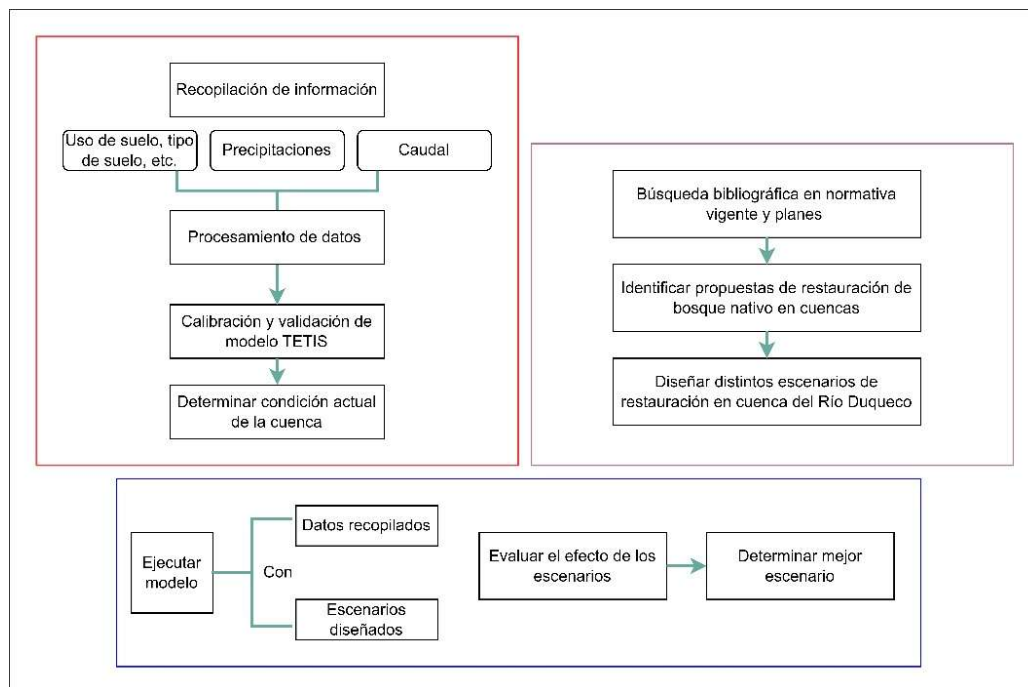
Con la condición actual de la cuenca determinada se realizó una búsqueda bibliográfica para identificar aquellas normativas vigentes o propuestas nacionales e internacionales que promuevan la incorporación de soluciones basadas en la naturaleza con el fin de proteger y

restaurar ecosistemas que han sido degradados para realizar un diseño de distintos escenarios de restauración correspondientes a distintas áreas dentro del área de estudio.

Finalmente, con el modelo validado se realizaron simulaciones de los escenarios diseñados, con el objetivo de determinar el escenario que presente una mejor respuesta en la recuperación de los procesos hidrológicos.

Figura 1.

Metodología en función a objetivos específicos

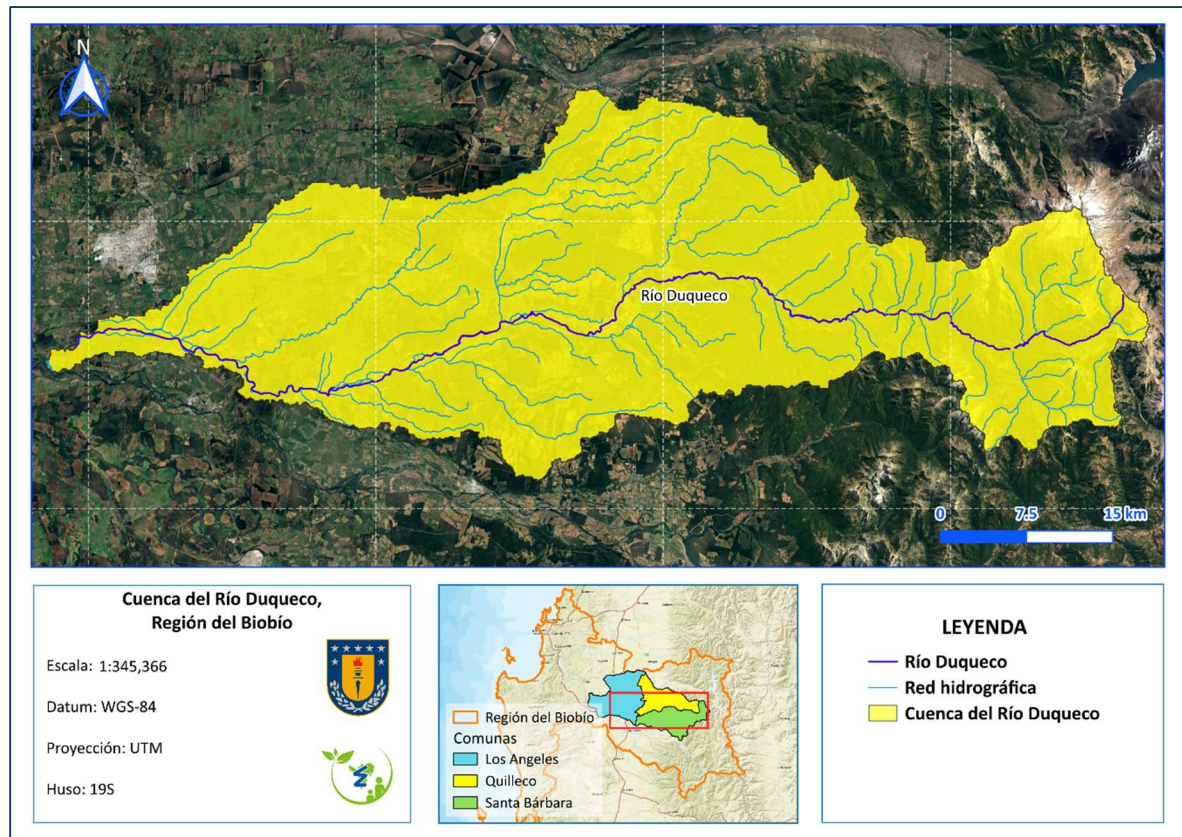


5.1 Área de estudio

El área de estudio comprende a la cuenca del río Duqueco. Es un río que nace de la vertiente poniente Sierra Velluda y desemboca en el río Biobío. Administrativamente se ubica en la región del Biobío, entre las comunas de Quilleco, Santa Bárbara y los Ángeles y cuenta con una superficie de 1710 km². Corresponde a una subcuenca del río Biobío, ocupando aproximadamente un 7% de la superficie total de este.

Figura 2.

Cuenca del Río Duqueco, Región del Biobío



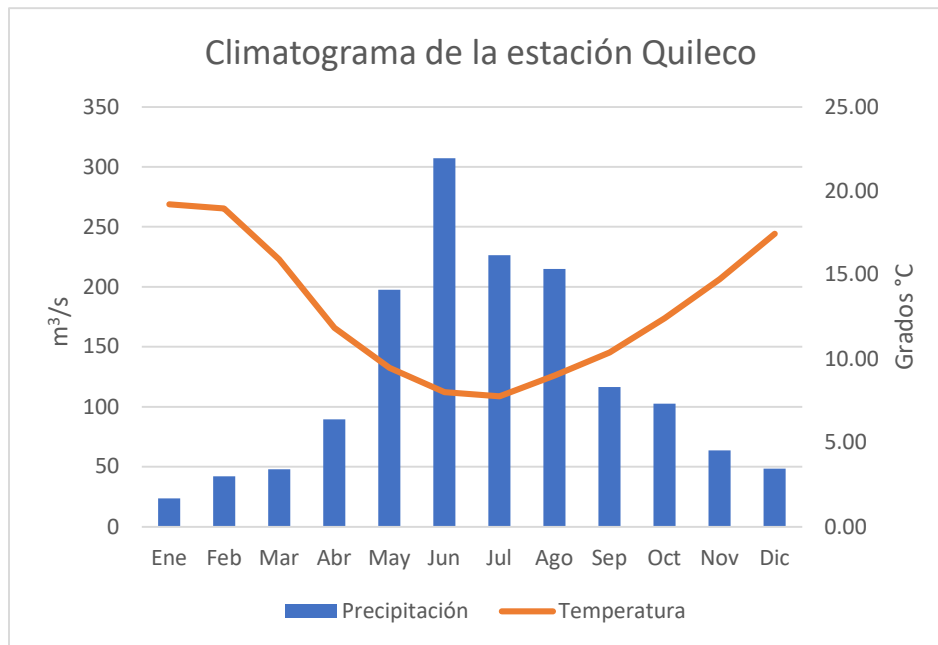
Su longitud es cercana a 120 km, y registra un caudal medio anual de $60 \text{ m}^3/\text{s}$. La mayor cantidad de tributarios de este son registrados por su ribera norte como el estero Renegado, El Boqui, Rocacura, Quillaco, etc. Sin embargo, su principal corresponde al río Coreo que ingresa por la parte baja de la cuenca. (Niemeyer, 1980)

5.1.1 Clima

Según la clasificación de Köppen la cuenca del río Duqueco presenta un clima templado con lluvia en todas las estaciones (Csb). Para obtener el registro meteorológico de la cuenca, se utilizó la estación con datos más cercana a esta, en este caso corresponde a la estación Río Duqueco en Villucura. De donde se obtuvo una temperatura máxima de 20°C en verano y una mínima de $7,7^\circ\text{C}$ entre los meses de junio y julio, a su vez una precipitación mensual promedio de 300 mm para el mes de junio como se puede observar en la siguiente figura.

Figura 3.

Climatograma de la estación Quileco



5.1.2 Hidrología

La cuenca del río Duqueco presenta un régimen hidrológico pluvial, esto quiere decir que los mayores caudales se registran en la estación de invierno cuando las precipitaciones aumentan y, por tanto, los menores caudales se presentan en verano (figura 4 y 5).

Como se puede observar, los mayores caudales registrados se presentan en la estación Río Duqueco en Cerrillos. Lo que coincide con los registros históricos, donde el caudal en dicha estación desde el año 1980 presenta un caudal medio anual de 60,07 m^3/s mientras que la estación Río Duqueco en Villucura alcanza un caudal medio de 48,64 m^3/s .

Figura 4.

Caudal promedio período 1990-1999

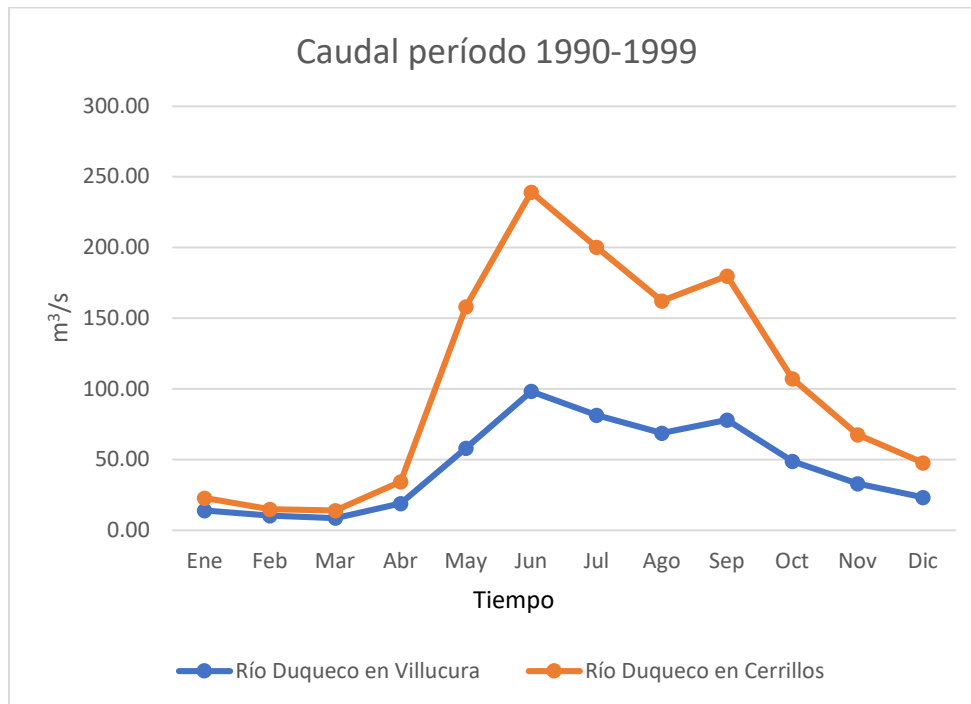
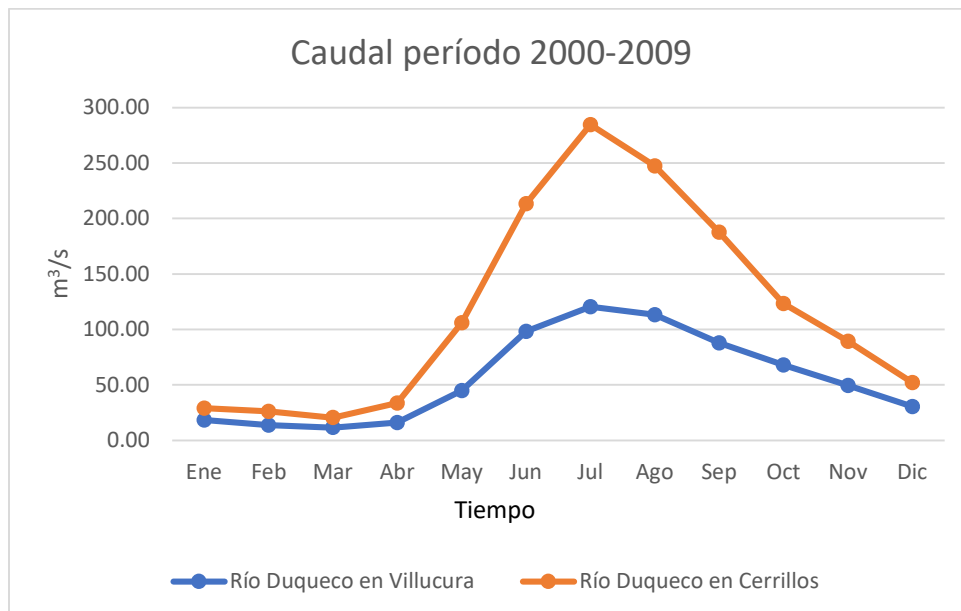


Figura 5.

Caudal promedio período 2000-2009



5.2 Modelación hidrológica de la cuenca empleando TETIS

El modelo de distribución hidrológica distribuida TETIS es un instrumento desarrollo por el Instituto de Ingeniería Del Agua y Medio Ambiente (IIAMA) de la Universidad Politécnica de Valencia. Tiene como finalidad la obtención de una respuesta hidrológica producida por la precipitación de lluvia y/o derretimiento de nieve dentro de las cuencas considerando los diferentes procesos físicos involucrados que ocurren dentro de ellas.

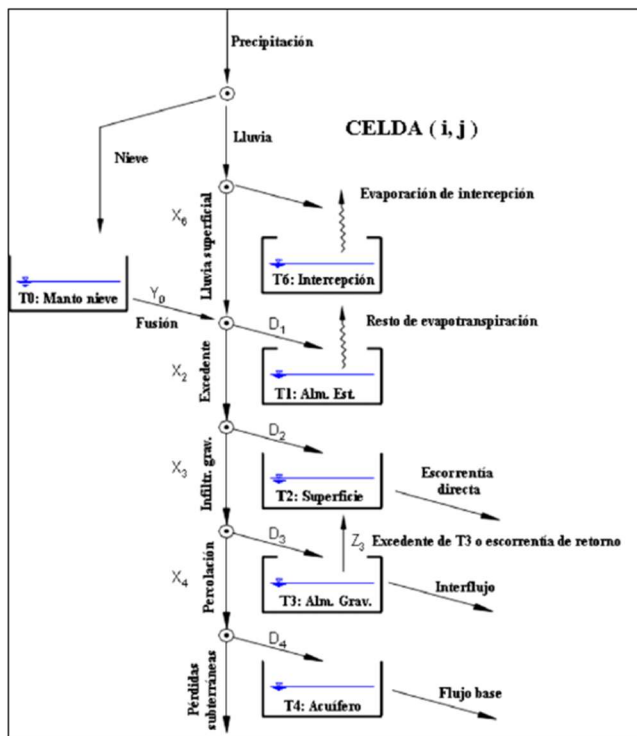
El modelo representa la cuenca en una malla de celdas que se conectan entre sí mediante a una distribución topográfica, con el fin de obtener de cada celda tenga un valor afiliado para cada uno de los parámetros necesarios.

El modelo TETIS representa la producción de escorrentía en forma de esquemas conceptuales inspirándose en un tipo de balance hídrico en cada celda, asumiendo que el agua se distribuye por 6 tanques de almacenamientos que se conectan entre sí, como se observa en la

. El flujo entre los tanques es función del agua que se almacena en ellos, y por consecuencia las variables de estado corresponden a los volúmenes almacenados en ellos.

Figura 6.

Esquema conceptual a escala de celda del modelo distribuido TETIS



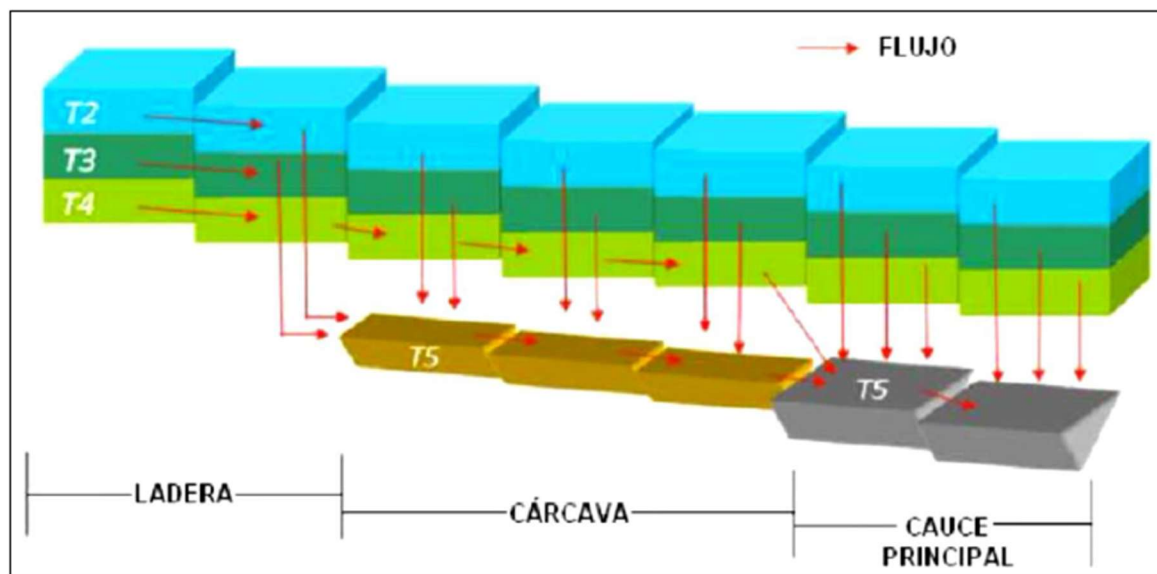
Fuente: Descripción del modelo conceptual distribuido TETIS, DIHMA, UPV.

Los flujos verticales entre cada tanque representan cada uno de los procesos hidrológicos: lluvia, nieve, lluvia directa, excedente, infiltración, percolación y pérdidas subterráneas, mientras que los horizontales corresponden a volumen de agua que componen la escorrentía total: escorrentía directa, interflujo y flujo base. Por lo demás, el modelo considera dos flujos de salida: evapotranspiración y evaporación del agua interceptada.

Conceptualmente el Modelo funciona como una malla interconectada en tres direcciones, donde los tres tanques inferiores drenan hacia los tanques aguas abajo siguiendo las direcciones del flujo entregadas por el Modelo de Elevación Digital (DEM) hasta conseguir una red de drenaje formada por cárcavas, laderas y cauces. (Figura 7)

Figura 7.

Movimiento vertical y horizontal propuesto por modelo TETIS



Fuente: Descripción del modelo conceptual distribuido TETIS, DIHMA, UPV.

Por último, las posibles salidas de agua para cada celda son:

- Escorrentía directa
- Interflujo
- Flujo Base

5.2.1 Datos climáticos e hidrológicos iniciales

Para el funcionamiento del modelo se requiere del ingreso de datos climáticos e hidrológicos que permitan determinar las condiciones iniciales de la cuenca.

Para ello, se recopilaron datos relacionados con precipitaciones diarias, que se obtuvieron de datos grillados de precipitación (estos datos corresponden a interpolaciones de datos registrados de precipitaciones por estaciones existentes, en un periodo de tiempo determinado) disponibles en Centro de Ciencia del clima y la Resiliencia (CR²). De esta misma plataforma se obtuvieron los valores de temperatura máxima, mínima y promedio registrados en la cuenca. Mientras que los datos de caudal correspondieron a los registros de la Dirección General de Aguas (DGA) en la estación Río Duqueco en Villucura.

Los datos de temperaturas fueron utilizados para calcular la evapotranspiración potencial por mes, utilizando la fórmula de Hargreaves (1985):

$$ET_0 = 0,0135 (t_{med} + 17,78)R_s \quad (1)$$

Donde:

ET_0 = Evapotranspiración potencial diaria (mm/día)

t_{med} = Temperatura media (°C)

R_s = Radiación solar incidente (mm/día)

Para la obtención de la radiación solar incidente se utilizó la radiación solar extraterrestre, que corresponden a datos tabulados que varían dependiendo del mes, la latitud y el hemisferio en donde se esté evaluando.

$$R_s = R_0 * KT (t_{max} - t_{min})^{0.5} \quad (2)$$

Donde:

R_0 = Radiación solar extraterrestre

KT= Coeficiente²

t_{max} = Temperatura diaria máxima

t_{min} = Temperatura diaria mínima

5.2.2 Variables espaciales

Un segundo insumo relevante corresponde a las variables espaciales disponibles, que permiten caracterizar las condiciones iniciales del área de estudio (por ejemplo, cobertura vegetal, mapas geológicos, entre otros). Estos factores inciden directamente en los procesos hidrológicos, determinando valores de escorrentía, percolación, infiltración, entre otros.

Se verificó la coherencia entre los distintos datos espaciales utilizados, a fin de garantizar que la calibración del modelo representara un escenario realista del área de estudio. Una vez reunida la información necesaria, se emplearon herramientas de Sistemas de Información Geográfica para elaborar cartografías pertinentes al análisis.

5.2.2.1. Modelo de elevación digital

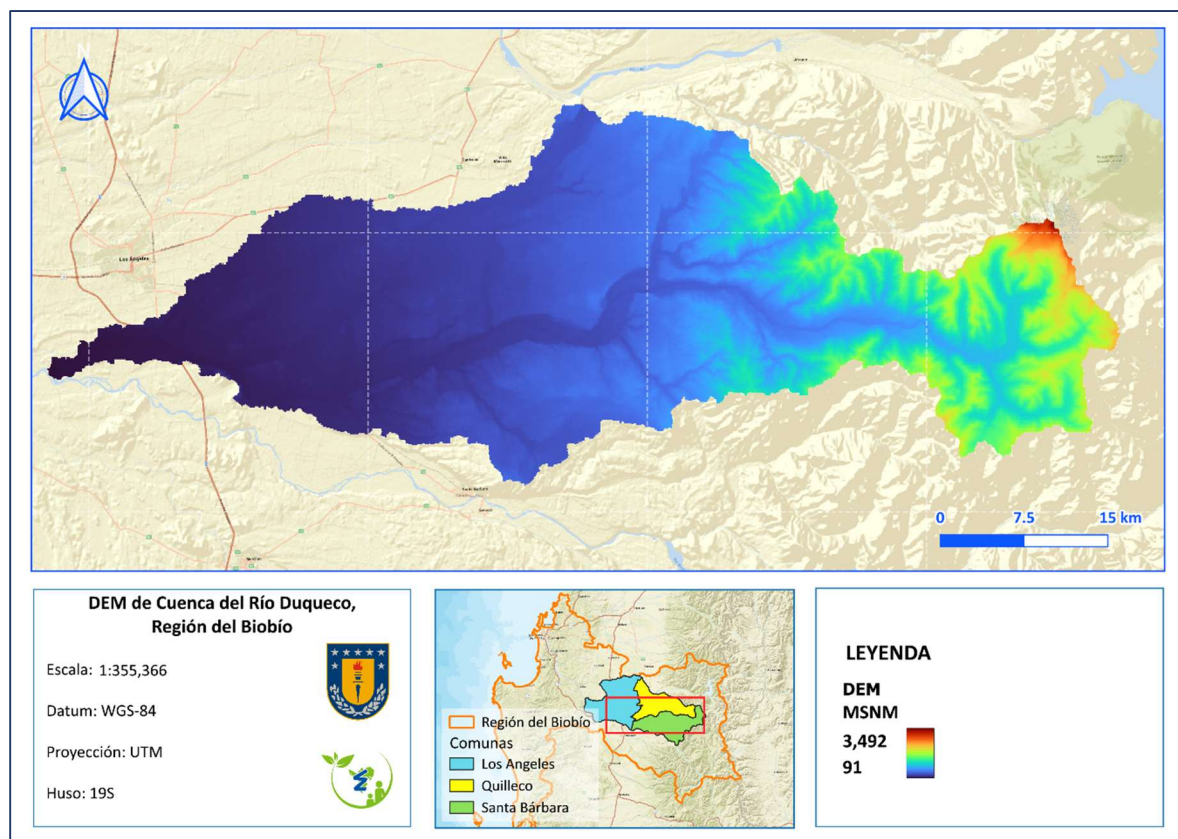
El Modelo Digital de Elevación (DEM) utilizado corresponde a ALOS PALSAR para la Región del Biobío, obtenido de la base de datos gratuita IDE. Este DEM, originalmente posee un tamaño de celda de 28,5 metros, por lo que, fue reajustado a una resolución de 100×100 metros, dado que el modelo escogido requería de una resolución menor para su correcto funcionamiento.

A continuación, en la figura 8 se presenta el modelo de elevación digital de la cuenca del río Duqueco.

² El coeficiente KT es un coeficiente empírico que se puede calcular a partir de datos de presión atmosférica, pero Hargreaves recomienda KT= 0,162 para regiones del interior y KT= 0,19 para regiones costeras. Para este estudio se empleó el valor 0,162.

Figura 8.

Modelo de Elevación Digital de la Cuenca del Río Duqueco



5.2.2.2. Uso de suelo

Para la caracterización del uso de suelo de la zona de estudio se recurrió al Catastro y Evaluación de los Recursos Vegetacionales Nativos de Chile de la Corporación Nacional Forestal (CONAF) del año 2015 de la Región del Biobío. Las coberturas de uso de suelo fueron reclasificadas en valores numéricos que iban del 1 al 10 en base a opinión de expertos. Estos valores se presentan a continuación en la siguiente tabla.

Tabla 2.

Usos de suelo de la cuenca del río Duqueco

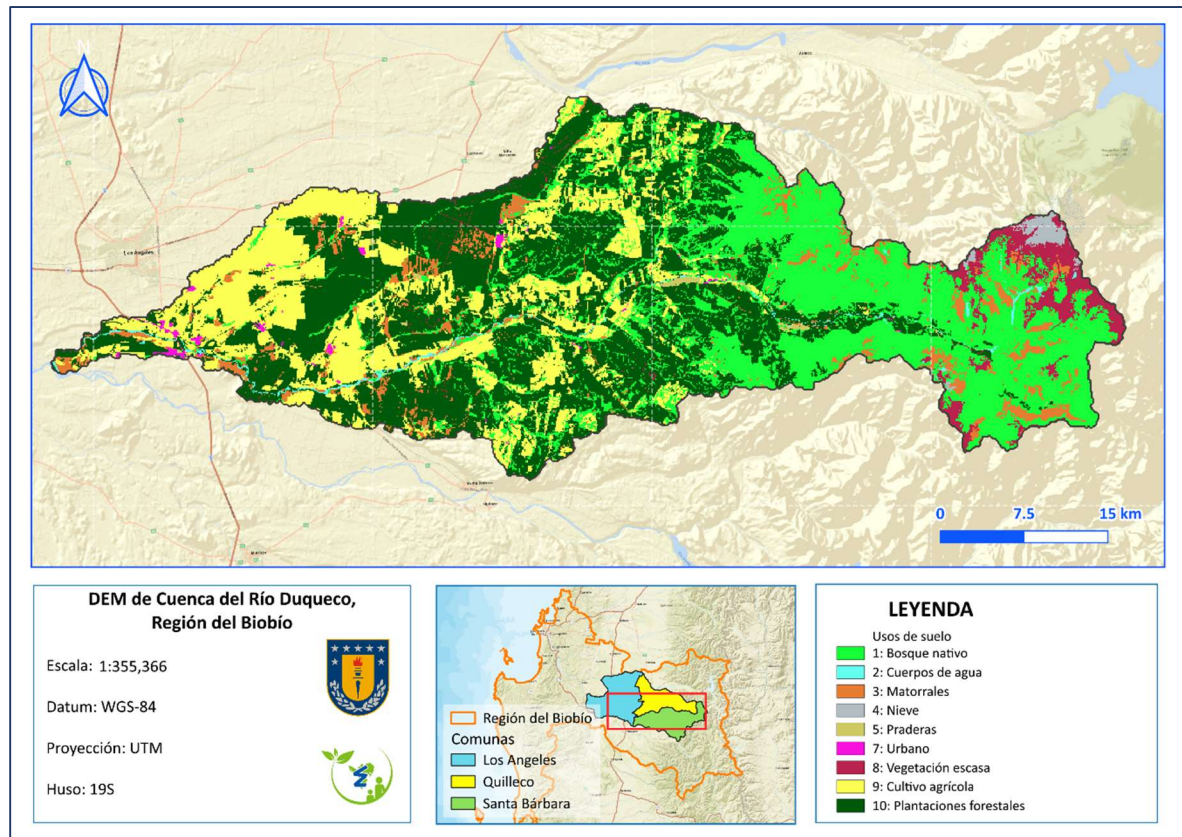
Numeración	Categoría
1	Bosque Nativo
2	Cuerpos y cursos de agua
3	Matorrales
4	Nieve
5	Praderas
6	Terrenos húmedos
7	Urbanos
8	Vegetación escasa
9	Cultivos agrícolas
10	Plantaciones forestales

Fuente: Cepeda, 2021.

El uso de suelo predominante actualmente en la cuenca del río Duqueco corresponde a las plantaciones forestales, en donde la superficie que abarca este uso de suelo corresponde a 64.208 Ha aproximadamente. A continuación, en Figura 9 se visualizan los tipos de suelo presentes en la cuenca del río.

Figura 9.

Cobertura de uso de suelo cuenca de Río Duqueco (CONAF, 2015)

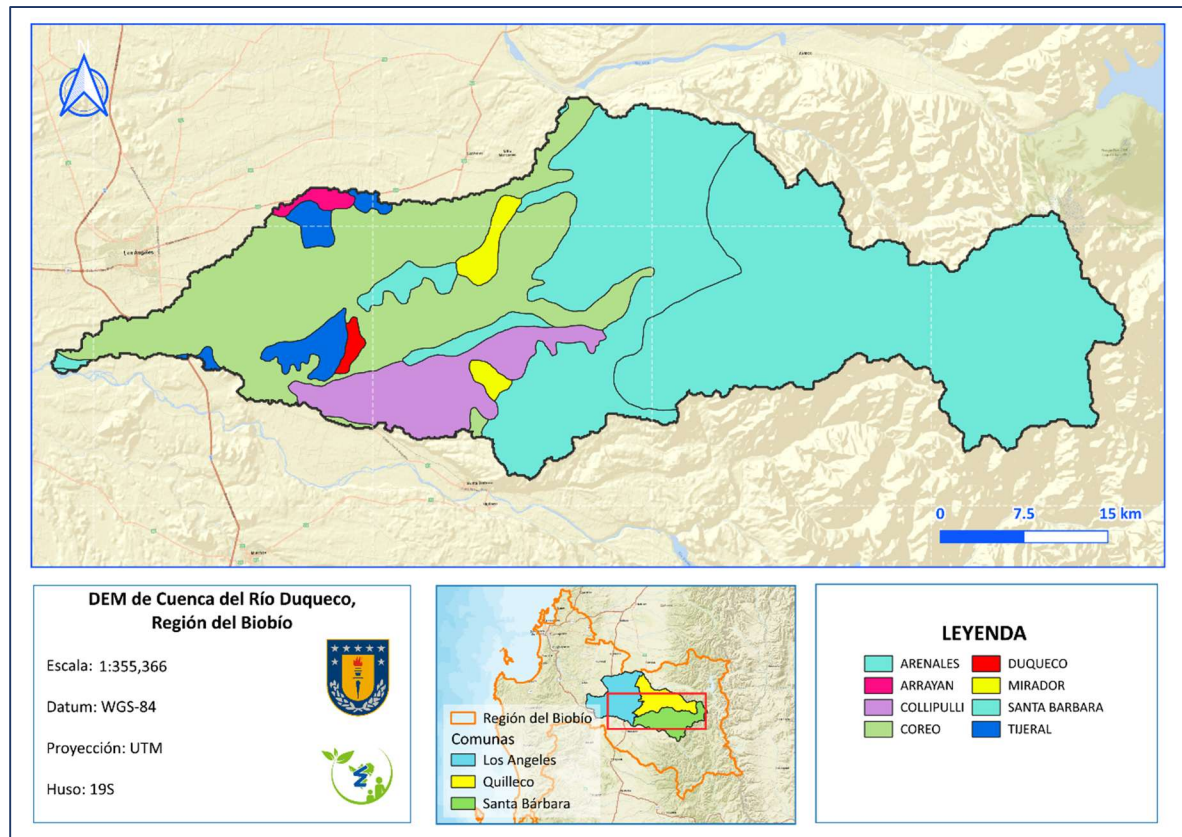


5.2.2.3. Tipo de suelo

Como fuente de datos se utilizó el Estudio Agrológico de la Región del Biobío, desarrollado en 1999 por el Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN). A esta información se sumaron los datos obtenidos del estudio “Permeabilidad del suelo de la cuenca del río Chillán, entre Estero Peladillas y río Ñuble, Chile” (Loyola, Rivas y Gacitúa, 2014), los cuales fueron clasificados de acuerdo con la estructura del suelo. A continuación, en Figura 10 se presenta el tipo de suelo de la cuenca.

Figura 10.

Tipo de suelo de la cuenca del Río Duqueco



A partir de la Tabla 3, se identifica a la Serie Santa Bárbara como la de mayor extensión superficial dentro de la cuenca, alcanzando aproximadamente 97.147 hectáreas (60,01%). Esta serie se distribuye principalmente en las zonas medias y altas de la cuenca.

Los suelos de esta serie se caracterizan por ser poco evolucionados, formados a partir de cenizas volcánicas post-glaciales. Son suelos poco profundos, de textura media, bien estructurados, con buen drenaje, permeabilidad moderada, alta porosidad y sin presencia de gravas.

Tabla 3.*Serie de suelo de cuenca del río Duqueco*

<i>Serie</i>	<i>Textura</i>	<i>Permeabilidad</i>	<i>Drenaje</i>	<i>Superficie (ha)</i>	<i>Superficie (%)</i>
<i>Arenales</i>	Arenosa	Rápida a muy rápida	Bueno	3.311,98	2,05%
<i>Arrayán</i>	Franco limosa	Lenta	Bueno	840.87	0,52%
<i>Collipulli</i>	Franco arcillo limosa	Moderada	Bueno e imperfecto	11.255,26	6,95%
<i>Coreo</i>	Arenosa	Muy rápida	Bueno	42.648,76	26,34%
<i>Duqueco</i>	Areno francosa	Rápida a muy rápida	Moderado	601.71	0,37%
<i>Mirador</i>	Franco limosa	Moderada lenta	Moderado a imperfecto	2.410,36	1,49%
<i>Santa Bárbara</i>	Franco limosa	Moderada	Bueno	97.174,47	60,01%
<i>Tijeral</i>	Franca	Moderada	Bueno	3.704,68	2,29%
Total				161.918,091	100%

5.2.2.4. Geología

Para la parametrización del modelo TETIS, se utilizó el mapa de características geológicas a escala 1:1.000.000 desarrollado por el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN).

Se identificaron 9 formaciones geológicas para la cuenca del Río Duqueco. A continuación, en la tabla 4 y Figura 11 se presentan las unidades geológicas presentes en cuenca río Duqueco.

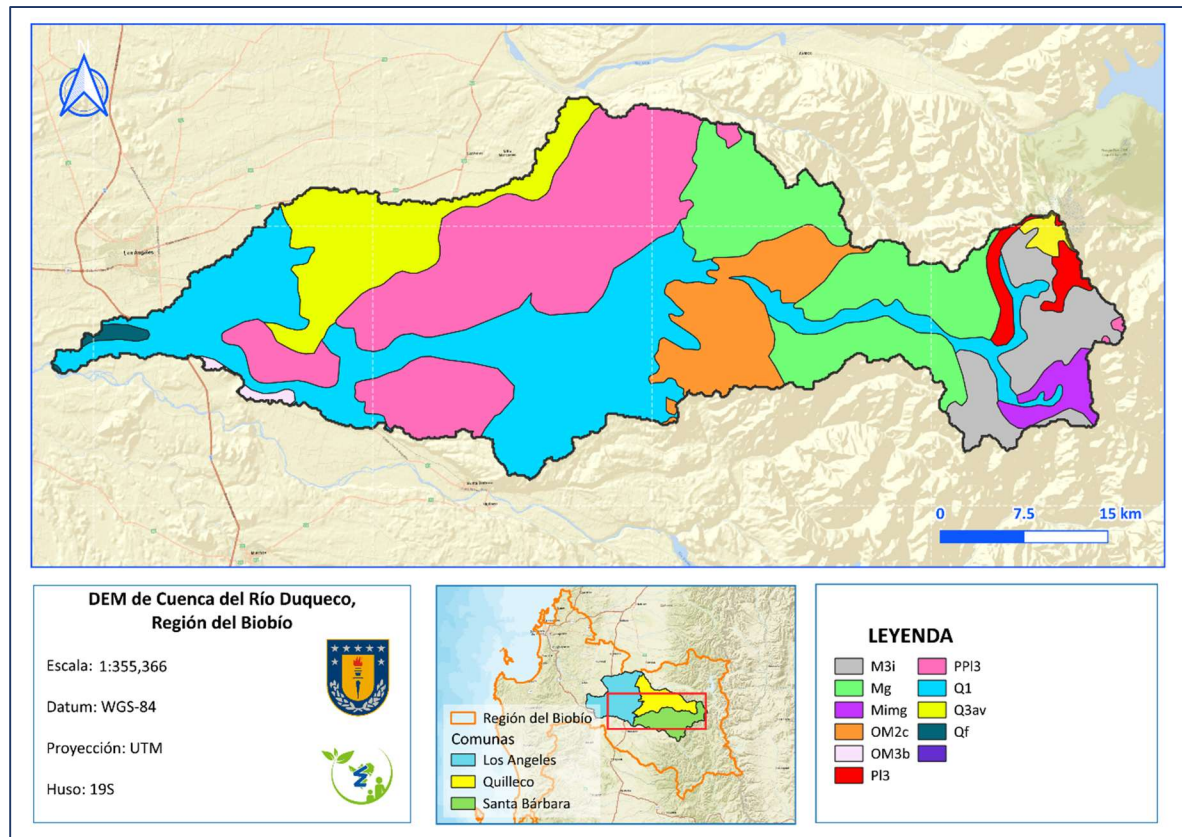
Tabla 4.*Unidades geológicas presentes en cuenca Río Duqueco*

Unidades geológicas	Descripción
M3i	Corresponde a secuencias volcánicas (lavas, brechas, domos y rocas piroclásticas andesítico-basálticas a dacíticas).
Mg	Rocas intrusivas (grandioritas, dioritas y tonalitas).
Mimg	Rocas intrusivas (grandioritas, monzogranitos, monzodioritas, monzonitas y dioritas de biotita y hornblenda)
OM2c	Son secuencias volcanosedimentarias (lavas basálticas a dacíticas, rocas epiclásticas y piroclásticas).
OM3b	Corresponde a secuencias y centros volcánicos básicos (lavas, brechas y rocas piroclásticas).
PI3	Son secuencias lávicas y centros volcánicos básicos e intermedios (depósitos piroclásticos andesítico-basálticos)
PPI3	Secuencias y centros volcánicos parcialmente erodados (lavas basálticas con intercaladas de tobas y conglomerados).
Q1	Corresponden a secuencias sedimentarias (depósitos aluviales, coluviales y de remoción en masa)
Q3av	Secuencias volcánicas (depósitos de avalancha volcánica, asociados a colapso parcial de edificios volcánicos).

Fuente: SERNAGEOMIN, (2003).

Figura 11.

Unidades geológicas Río Duqueco

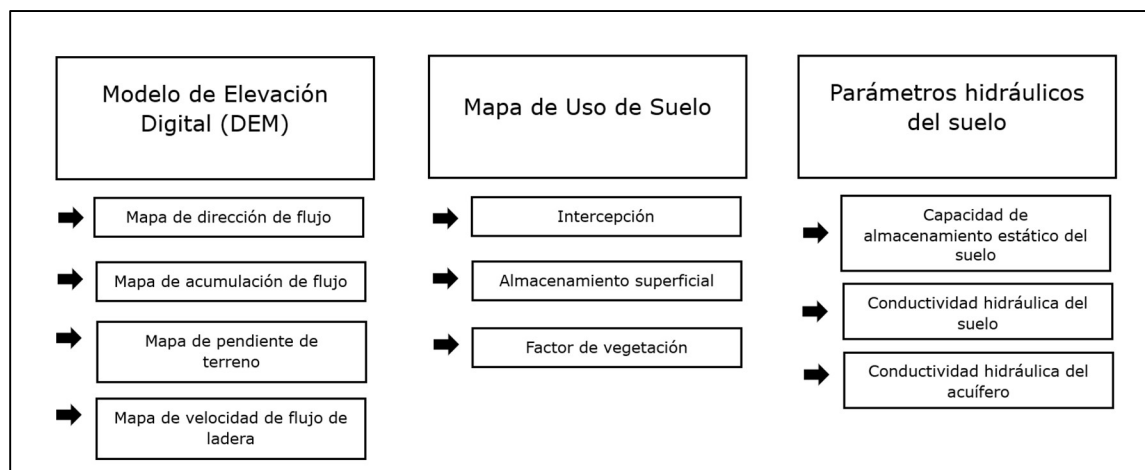


5.2.3 Estimación de parámetros espaciales

Posterior a la recopilación de información de las bases de datos disponibles, se requiere de la estimación de ciertos parámetros en base a dicha información mediante a la utilización de softwares SIG u otros métodos de estimación. En los siguientes apartados se indica el procedimiento para la obtención de cada parámetro y en Figura 12 se presentan los parámetros espaciales estimados y las bases de datos.

Figura 12.

Parámetros espaciales estimados y bases de datos



5.2.3.1. Datos provenientes de DEM

A partir del modelo de elevación digital se obtuvieron los siguientes mapas:

- Mapa de dirección de flujo.
- Mapa de acumulación.
- Mapa de pendientes de terreno.

Esto con el fin de representar las características geomorfológicas de la cuenca, tales como la red hidrográfica, el cauce principal, etc. Para ello, se utilizan las herramientas hidrológicas disponibles en los programas de SIG.

- Para la dirección de flujo utilizamos herramientas de relleno de depresiones (fill) y Flow direction, que permite determinar la dirección en la que el agua fluye desde cada celda, en función de la pendiente.
- La acumulación de flujo se calculó utilizando el mapa creado para la dirección de flujo y además utilizando una herramienta llamada Flow Accumulation, la cual calcula la cantidad de flujo que pasa por cada celda.
- Finalmente, para el cálculo de la pendiente utilizamos el DEM relleno previamente y utilizamos la herramienta Slope en grados, que calcula la inclinación de cada celda del DEM con respecto a las celdas vecinas.

Por otra parte, el DEM también permitió calcular el mapa de velocidad de flujo en ladera, utilizando el mapa de pendientes del terreno obtenido previamente y aplicando la siguiente ecuación simplificada en la calculadora raster:

$$V = 1,4 \times Slope^{0,5} \quad (3)$$

Donde,

- V= Velocidad de flujo en ladera (m/s)
- Slope= Pendiente del terreno (m/m)

5.2.3.2. Datos obtenidos del mapa de uso de suelo

A partir de la información obtenida del mapa de uso de suelo, se elaboraron mapas que representan los procesos de pérdidas iniciales, es decir, la porción de lluvia precipitada que no escurre superficialmente ni se infiltra en el suelo.

Se identificaron dos procesos principales, ambos dependientes de la cobertura vegetal y de la composición de la superficie:

- Intercepción: que se define como cantidad de agua que es retenida por las plantas (cubierta vegetal), y que es luego evaporada o bien absorbida por las plantas.
- Almacenamiento Superficial: Es el agua en el suelo a la máxima cantidad de agua retenida de forma instantánea por la superficie del suelo, en una determinada pendiente del terreno.

A continuación, se presentan los valores estimados de intercepción, almacenamiento superficial para cada uso de suelo y profundidad de raíces por autor Ramírez (2012) en función a la clasificación del Proyecto Corine Land Cover (CLC), los cuales fueron utilizados para caracterizar la condición actual de la cuenca del río Duqueco. (Tabla 5).

Tabla 5.

Parámetros obtenidos del mapa de uso de suelo para cuenca del Río Duqueco

Código	Clasificación de uso de suelo (CLC 2006)			Prof. De raíces (m)	Almacenamiento superficial (mm)	Intercepción (mm)
1	Artificial Surface	Urban fabric	Continuouns urban fabric	0,06	0	0
			Discontinuos urban fabric	0,01	0	0
		Industrial, comercial and transport units	Industrial or comercial units	0,06	0	0
2	Agricultural areas	Heterogeneous agricultural areas	Land principally occupied by agricultura	0,75	6	5
3	Forest and semi – natural areas	Forest	Broad-leaves forest	1	4	9
			Coniferous forest	1,25	4	9
			Mixed forest	1	4	9
		Shrub and/or herbaceous vegetation associations	Natural grassland	0,6	6	3
			Moors and heathland	0,7	6	3
			Sclerophyllous vegetation	0,7	6	4
			Transitional woodland shrub	0,7	5	5
		Open spaces with Little or no vegetation	Beaches, dunes and sand plains	0	0	0
			Bare Rock	0,02	0	0
			Sparsey vegetated áreas	0,02	3	0

			Bumt áreas	0	0	0
			Glaciers and perpetual snow	0	0	0
5	Water bodies	Inland waters	Water bodies	0	0	0

Fuente: Ramírez (2012).

Asimismo, se obtuvo el factor de vegetación para el cálculo de evapotranspiración, esto se calcula en base a la dinámica propia de las coberturas vegetales, representando la distribución temporal de la evapotranspiración.

Los valores expuestos en la Tabla 6 corresponden a los obtenidos por Cepeda en el año 2021 en su estudio de “Efecto de la restauración ribereña en los procesos hidrológicos en la cuenca del río Duqueco” donde se estimaron los valores en base a conocimientos de expertos. Para ello primero, se determinaron índices de cobertura vegetal que se representan del 1 al 10 (Tabla 2). Estos índices se ingresan al modelo TETIS en forma de mapa.

Tabla 6.*Factor de vegetación*

Cob	Meses											
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,5	0,5	0,3
2	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
3	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
4	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
5	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
6	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
7	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
8	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
9	0,6	0,6	0,6	0,6	0,4	0,2	0,2	0,2	0,4	0,6	0,6	0,6
10	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Fuente: Cepeda (2021).

Los valores se ingresan en forma de fichero de 14 columnas, donde la primera indica el índice de cobertura vegetal asignado y las siguientes columnas representan los doce meses del año. Finalmente se agrega una columna donde se integra el valor de intercepción para cada uso de suelo.

5.2.3.3. Datos obtenidos de los mapas de tipo de suelo y geológico

Para la obtención de los parámetros hidráulicos del suelo, se utilizó la información disponible del área de estudio.

5.2.3.3.1. Capacidad de almacenamiento estático del suelo (HU)

El almacenamiento estático del suelo corresponde a la detención de aguas producto a los charcos, el agua interceptada por la vegetación y el agua que retiene el suelo por las fuerzas capilares.

Por lo tanto, el almacenamiento estático del suelo es la suma del almacenamiento capilar del suelo y los almacenamientos superficiales (almacenamiento superficial producto de las pendientes y almacenamiento superficial producto al uso del suelo). Tal como se puede observar en la siguiente ecuación.

$$Hu = A_s + A_{cap} \quad (4)$$

Donde,

A_s = Almacenamiento superficial

A_{cap} = Almacenamiento capilar

- Almacenamiento superficial (A_s)

Para la obtención del almacenamiento superficial, se necesita conocer el agua que es almacenada en charcos, esto depende directamente del tipo de cobertura de suelo. Así también, se requiere conocer el almacenamiento de agua en depresiones (depende directamente del mapa de pendiente del terreno). La ecuación que se utiliza es la siguiente:

$$A_s = A_c + A_D \quad (5)$$

Donde,

A_c = Almacenamiento en charcos

A_D = Almacenamiento en depresiones

El almacenamiento en charcos (A_c) se obtuvo a través de bibliografía y varía dependiendo del uso de suelo. A continuación, en Tabla 7 se presenta el almacenamiento en superficie de agua respecto a los usos de suelos presentes en cuenca del río Duqueco.

Tabla 7.

Almacenamiento en charcos (almacenamiento en superficie)

Numeración	Categoría	Almacenamiento sup (mm)
1	Bosque Nativo	4
2	Cuerpos y cursos de agua	0
3	Matorrales	5
4	Nieve	0
5	Praderas	6
6	Terrenos húmedos	0
7	Urbanos	0
8	Vegetación escasa	0

9	Cultivos agrícolas	6
10	Plantaciones forestales	4

Fuente: Ramírez (2012).

Por otra parte, para el obtener el almacenamiento en depresiones, se utilizó el mapa de pendientes y la siguiente ecuación.

$$A_D = 1,3 * Slope (\%) \quad (6)$$

Donde,

Slope (%) = pendientes presentadas en porcentaje.

- Almacenamiento capilar (A_{cap})

El Almacenamiento capilar del suelo es la cantidad de agua que es agregada a una columna de suelo muy seca hasta alcanzar su mayor almacenamiento sin que el agua escurra.

Para la obtención del almacenamiento capilar se utilizan los datos del Estudio Agrológico de la Región del Biobío desarrollado por el CIREN en el año 1999, donde se definen series de suelos para toda la región con las características propias de cada una de estas series de suelo.

Las características de las series de suelo fueron ingresadas en el software Soil Water Characteristics para calcular el contenido de agua disponible en el suelo (A_t)

$$A_{cap} = A_t * \min (P_r; ROO) \quad (7)$$

Donde,

A_t = Contenido de agua disponible en el suelo (mm/mm)

Min = Condición de contorno del suelo

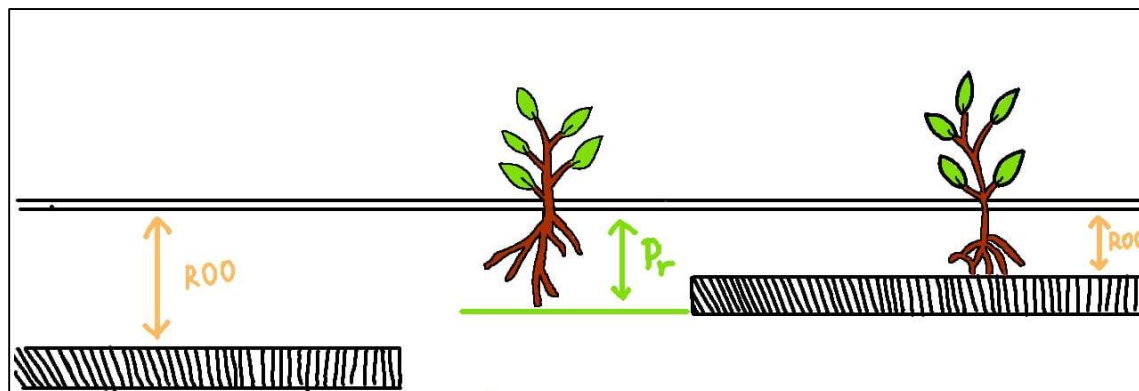
P_r = Profundidad alcanzada por las raíces sin obstáculos (mm)

ROO = Profundidad del primer obstáculo significativo para el desarrollo de raíces (mm)

La profundidad a utilizar en la ecuación vendrá dada por la condición de contorno del suelo, en aquellas coberturas en donde la profundidad de las raíces pueda alcanzar un crecimiento sin obstáculo se utilizará esa distancia, en cambio, en coberturas en donde se identifique un obstáculo significativo para el desarrollo de raíces se utilizará esa profundidad determina. Tal como se logra apreciar en Figura 13.

Figura 13.

Condición de contorno del suelo



Y

$$A_t = FC - WP \quad (8)$$

Donde,

FC = Capacidad de campo

WP = Punto de marchitez permanente

5.2.3.3.2. Conductividad hidráulica del suelo (K_s)

La conductividad hidráulica del suelo, K_s , corresponde la capacidad de infiltración que posee la cuenca.

A nivel de celda, la capa superior de la cobertura de suelo posee una conductividad hidráulica representativa, la cual viene asociada al tipo y la estructura del suelo, que a su vez se relaciona con la posición de la celda y la cobertura vegetal.

Para poder determinar este parámetro se recurrió a la descripción detallada del CIREN (1999) de las series de suelo presentes en la cuenca del río Duqueco y también al software Soil Water Characteristic.

5.2.3.3.3. Conductividad hidráulica del acuífero (K_p)

Representa las características hidrodinámicas de las capas inferiores del suelo (capacidad de percolación).

Se empleó el mapa geológico de Chile escala 1:1.000.000 del año 2003 desarrollado por el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN, 2003). De donde se obtuvo la información litológica de la cuenca (Figura 11), los cuales en conjunto de la información de los tipos de suelo (Figura 10) se logró determinar las categorías para cada tipo de acuífero según

los procesos de formación de cada permeabilidad en función a las clasificaciones desarrolladas por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME).

Se identifican 5 tipo de permeabilidad: Muy alta, alta, media, baja y muy baja, donde cada uno de estos tipos de permeabilidad se relacionan a las distintas litologías (carbonatadas, detríticas (cuaternario), detríticas, volcánicas (piroclásticas y lávicas), meta-ditríticas, ígneas, evaporíticas). (Figura 14)

Figura 14.

Permeabilidad según litología

LITOLOGÍAS		PERMEABILIDAD					
		MUY ALTA	ALTA	MEDIA	BAJA	MUY BAJA	
CON AGUAS UTILIZABLES	FISURABLES Y SOLUBLES	CARBONATADAS	C-MA	C-A	C-M	C-B	C-MB
		DETRÍTICAS (Cuaternario)	Q-MA	Q-A	Q-M	Q-B	Q-MB
		DETRÍTICAS	D-MA	D-A	D-M	D-B	D-MB
		VOLCÁNICAS (Piroclásticas y lávicas)	V-MA	V-A	V-M	V-B	V-MB
		META-DETRÍTICAS	M-MA	M-A	M-M	M-B	M-MB
	POROSAS	ÍGNEAS	I-MA	I-A	I-M	I-B	I-MB
CON AGUAS NO UTILIZABLES O DE MUY BAJA CALIDAD		SOLUBLES	EVAPORÍTICAS	E-MA	E-A	E-M	E-B

Fuente: Instituto Geológico y Minero de España

Dentro del área de estudio se determinaron 4 tipos de litologías, tal como se presenta a continuación.

Tabla 8.

Litología identificada en área de estudio

Litología	Grupo
M3i	Volcánica
Mg	Ígnea
Mimg	Ígnea
OM2c	Volcánica
OM3b	Volcánica
PPI3	Volcánica
PI3	Volcánica
Q1	Metadetrítica
Q3av	Detrítica

Fuente: SERNAGEOMIN, 2003.

5.3 Calibración y validación del modelo

La calibración de los modelos hidrológicos busca lograr una estimación precisa del comportamiento del agua en el medio ambiente.

La calibración es una técnica que se utiliza para ajustar modelos hidrológicos a las condiciones específicas en un área determinada, en este caso la cuenca del río Duqueco.

Para la etapa de calibración del modelo, se utilizaron los valores de caudal, precipitación y evapotranspiración de un periodo de 3 años, el cual comprendía desde el año 2012 al 2014, en el cual se incluyó, además, un periodo de calentamiento del modelo, ya que esto permitió estabilizar el modelo, permitiendo que alcance el estado de equilibrio antes de comenzar a ajustar los parámetros.

El proceso de validación, por otro lado, según Refsgaard y Knudsen (1996) corresponde a “el proceso de demostración que el modelo es capaz de hacer predicciones en un lugar específico determinado para periodos fuera del periodo de calibración” (Refsgaard & Knudsen, 1996 como se citó en Cabrera, s.f). Para la validación del modelo se realizó una validación temporal, es decir, se utilizó información hidrológica y meteorológica de la misma estación de caudal que se empleó para la calibración del modelo en un periodo de tiempo distinto al de calibración, un periodo de tiempo de 5 años (2015 – 2019).

Para evaluar la eficiencia del modelo primero se realizó un análisis de sensibilidad previo a la calibración, de los 9 factores correctores y tanques de almacenamiento que posee el programa.

Esto con el objetivo de filtrar aquellos parámetros más sensibles numéricamente y así facilitar el proceso.

Tabla 9.

Parámetros de producción de escorrentía del modelo TETIS

Parámetros	FC	Expresión
Almacenamiento capilar del suelo	FC ₁	$H_u^* = FC_1 \cdot Hu$
Índice de cubierta vegetal	FC ₂	$\Lambda^* = FC_2 \cdot \lambda v$
Capacidad de infiltración	FC ₃	$K^*s = FC_3 \cdot ks$
Velocidad en ladera	FC ₄	$U^* = FC_4 \cdot u$
Capacidad de percolación	FC ₅	$K^*p = FC_5 \cdot kp$
Conductividad hidráulica del interflujo	FC ₆	$K^*ss = FC_6 \cdot kss$
Capacidad de pérdidas del acuífero	FC ₇	$K^*pp = FC_7 \cdot ksa$
Conductividad hidráulica del acuífero	FC ₈	$K^*b = FC_8 \cdot kps$
Velocidad del cauce	FC ₉	$V(t)^* = FC_9 \cdot v(t)$

Fuente: Francés et al. (2007).

El modelo presenta un sistema de tanques de almacenamientos (6 tanques) que representan: Altura equivalente de agua para la nieve (H₀); Almacenamiento estático (H₁); Almacenamiento superficial (H₂); Almacenamiento gravitacional (H₃), Estado inicial del acuífero (H₄); Estado de cauces (H₅) y la intercepción por vegetación (H₆). El valor asignado para todos estos tanques al inicio de la calibración fue cero.

La calibración se realizó de forma automática con el algoritmo de optimización incluida en el modelo “Shuffled Complex Evolution”, el cual fue desarrollado por la Universidad de Arizona (SCE-UA) de Estados Unidos propuesto por Duan (1992) y modificado en el año 1993 por Sorooshian. Para este estudio se empleó el índice de Nash y Sutcliffe (NSE) como función objetivo para la calibración y la expresión en la siguiente:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Q}_i - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2} \quad 9$$

Donde,

$\hat{Q}_i$ = caudal simulado

Q_i = caudal observado

$\bar{Q}_i$ = valor medio de los caudales observados

n = número de observaciones

El índice de Nash – Sutcliffe mide cuanto de la variabilidad de las observaciones es explicada por la simulación. Si la simulación es perfecta el valor del índice es igual a 1. (Cabrera, s.f)

En la siguiente tabla se presentan algunos rangos del índice y sus respectivas clasificaciones.

Tabla 10.

Clasificación de rendimiento general del índice NSE

Clasificación	NSE
Insuficiente	<0,2
Satisfactorio	0,2 – 0,4
Bueno	0,4 – 0,6
Muy bueno	0,6 – 0,8
Excelente	>0,8

Fuente: Molnar, (2011).

Finalmente, se realizó una modelación hidrológica a escala diaria en base a los datos ingresados de condiciones meteorológicas registradas y los niveles de caudal de la cuenca y considerando los parámetros hidráulicos de la cuenca.

5.4 Elaboración de escenarios de restauración

Los escenarios de restauración se realizaron a partir del mapa base de cobertura y el mapa de pendientes de la cuenca.

En primera instancia, se identificaron aquellas coberturas de suelo que fueron modificadas por las actividades humanas, los cuales serían modificados por bosque nativo. Se les asignó un valor de 1, utilizando la herramienta de reclasificar en los programas SIG. Mientras que, a las coberturas propias del lugar se les asignó un valor de 0, ya que, estas no requieren ser modificadas. Tal como se puede apreciar a continuación en Figura 15

Figura 15.

Reclasificación de usos de suelo

1	0	1 = Plantaciones forestales, cultivos agrícolas, suelos urbanos y vegetación escasa
0	1	0 = Bosque nativo, matorrales, cuerpos de agua y nieve

Por otra parte, las pendientes de la cuenca se clasificaron en 6 rangos, los cuales se describen a continuación en Tabla 11.

Tabla 11.

Rangos de pendientes en grados

Rango de pendiente en grados	Relieve
0 – 5°	Plano, plano cóncavo y ligeramente plano
5 – 15°	Ondulado, inclinado
15 – 25°	Fuertemente ondulado, fuertemente inclinado
25 – 35°	Fuertemente ondulado
35 – 45°	Escarpado
>45°	Muy escarpado

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. Consorcio Vino Tinto y Oro, (2017).

En base a esos 6 rangos identificados se plantearon los 6 escenarios de restauración, el mapa de pendientes se reclasificó del mismo modo que el mapa de cobertura.

En donde, para el primer rango, las pendientes de 0 a 5 grados, se les asignó un valor 100, mientras que las demás pendientes se les asignó un valor de 0.

Posterior a la reclasificación, se sumaron ambos mapas resultantes y se identificaron aquellas coberturas que cumplieran con ambas características, ser usos antropizados y dentro del rango de pendientes establecido.

Finalmente, esos suelos identificados fueron modificados con bosque nativo creando así los escenarios de restauración que se presentan a continuación.

Figura 16.

Escenario de restauración 1, pendientes de 0 a 5°

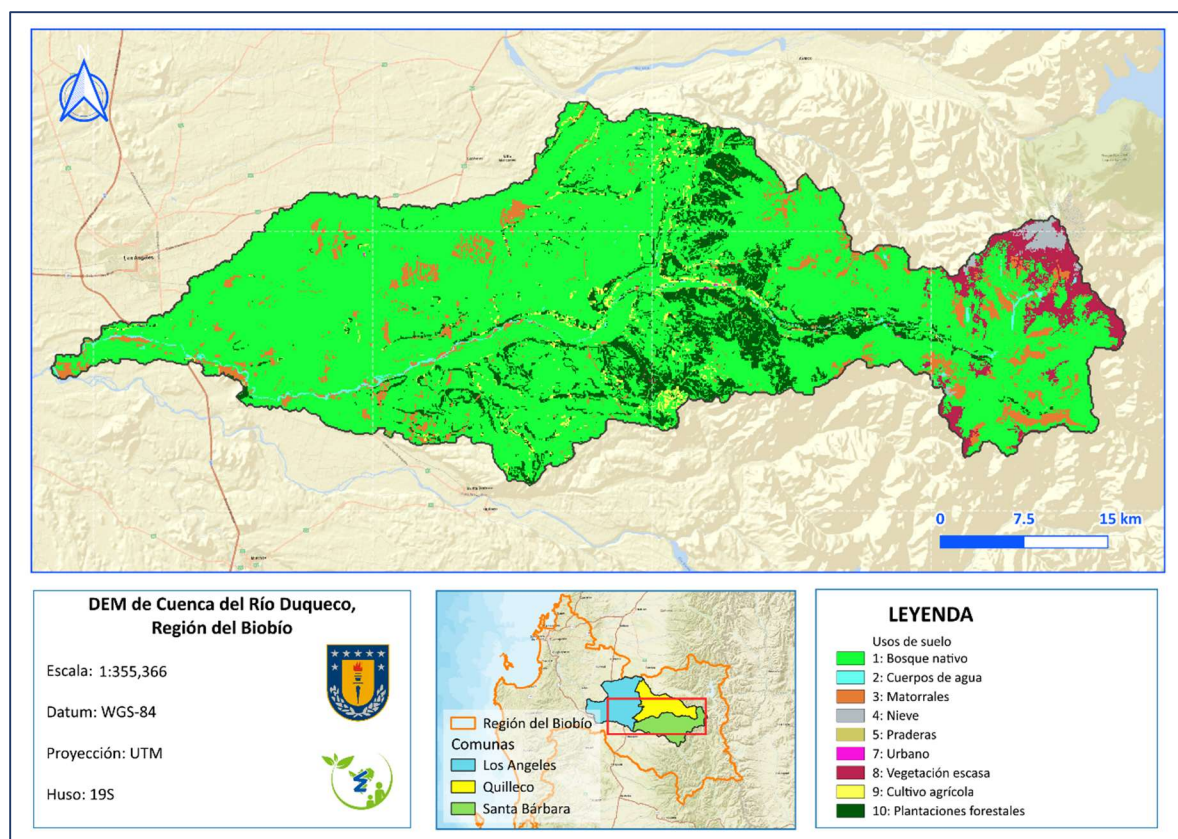


Figura 17.

Escenario de restauración 2, pendientes de 5 a 15°

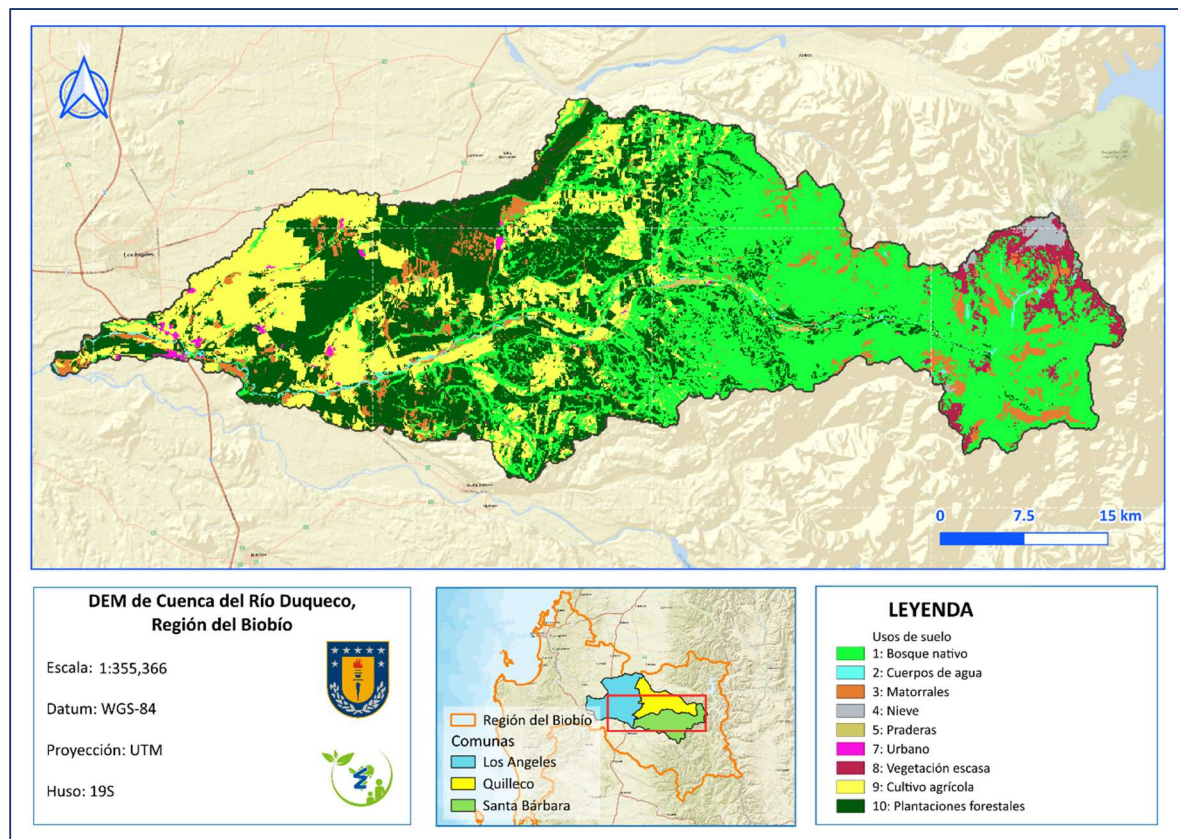


Figura 18.

Escenario de restauración 3, pendientes de 15 a 25°

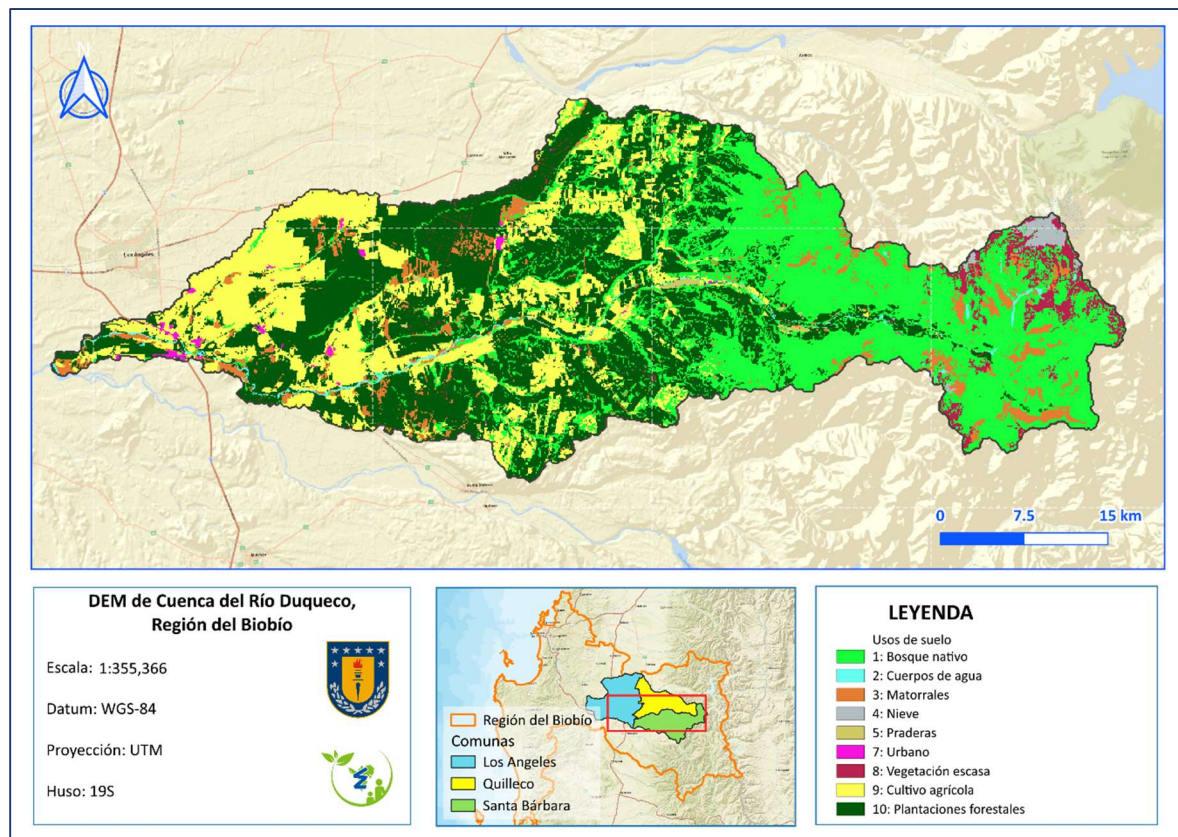


Figura 19.

Escenario de restauración 4, pendientes de 25 a 35°

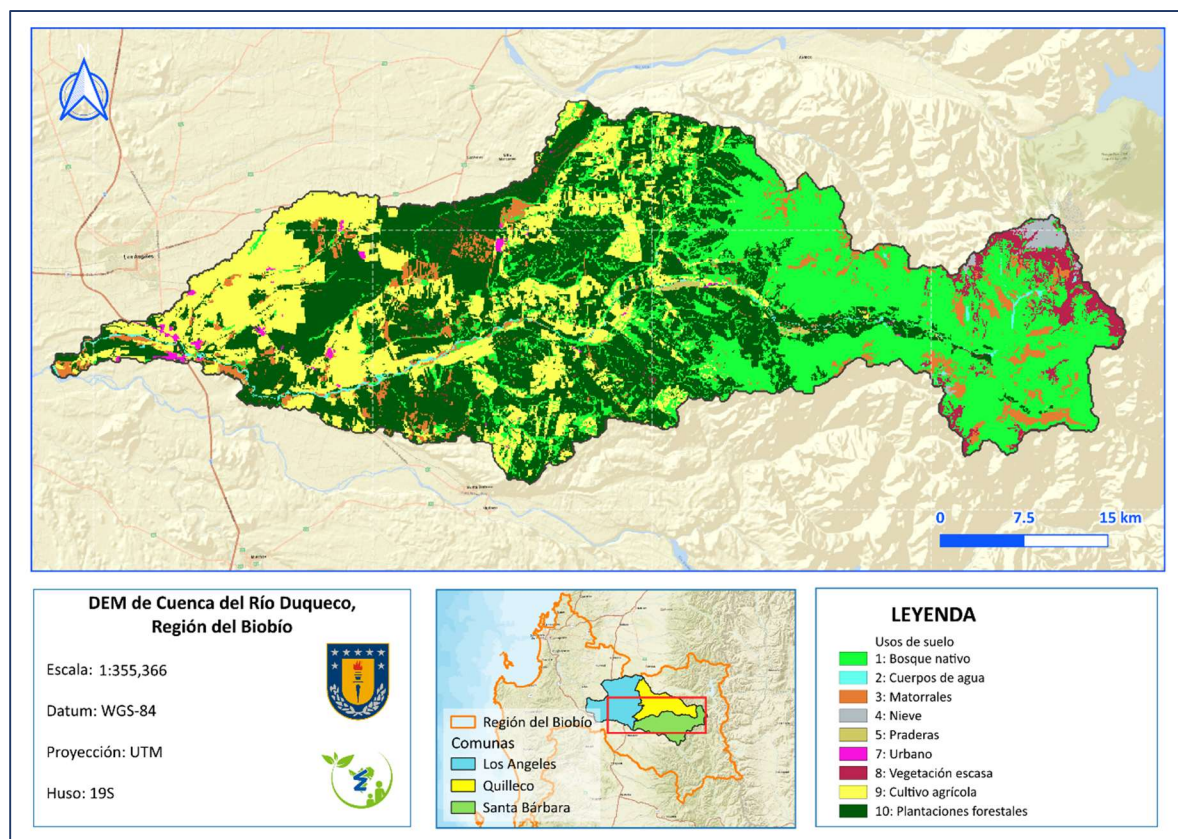


Figura 20.

Escenario de restauración 5, pendientes de 35 a 45°

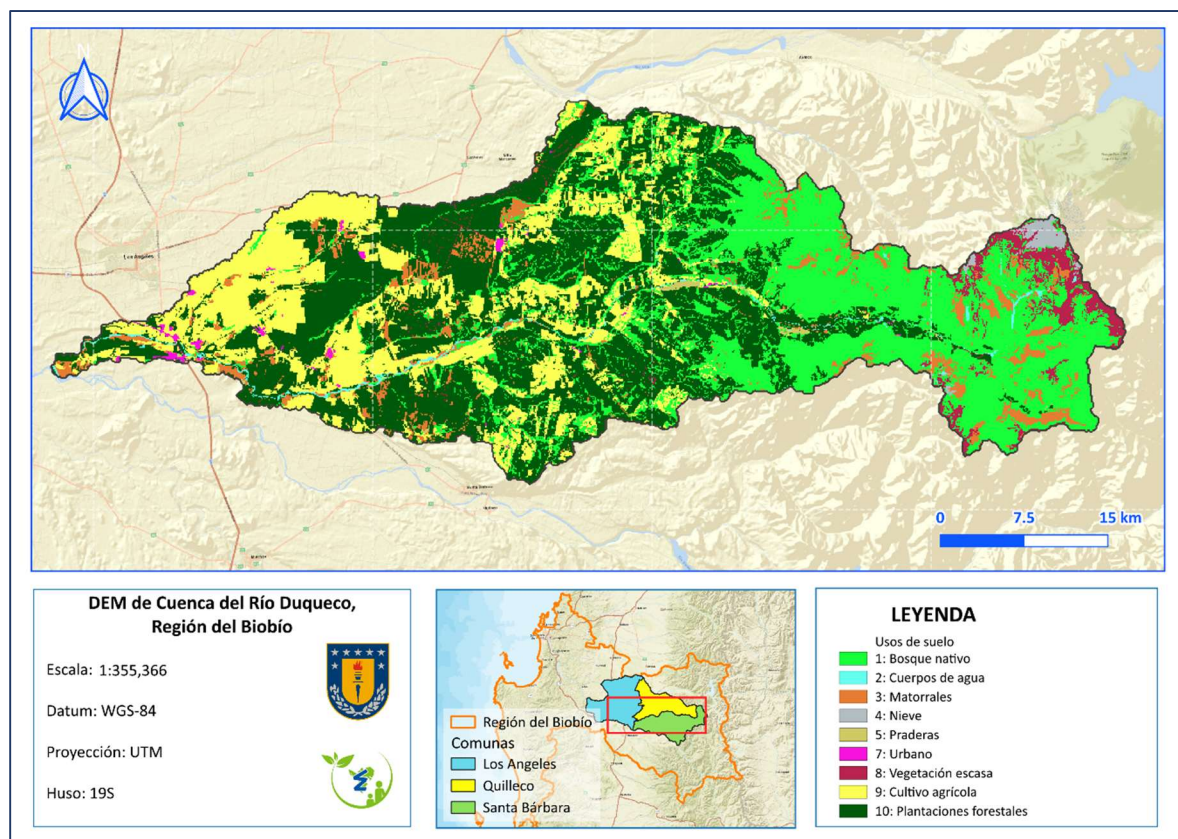
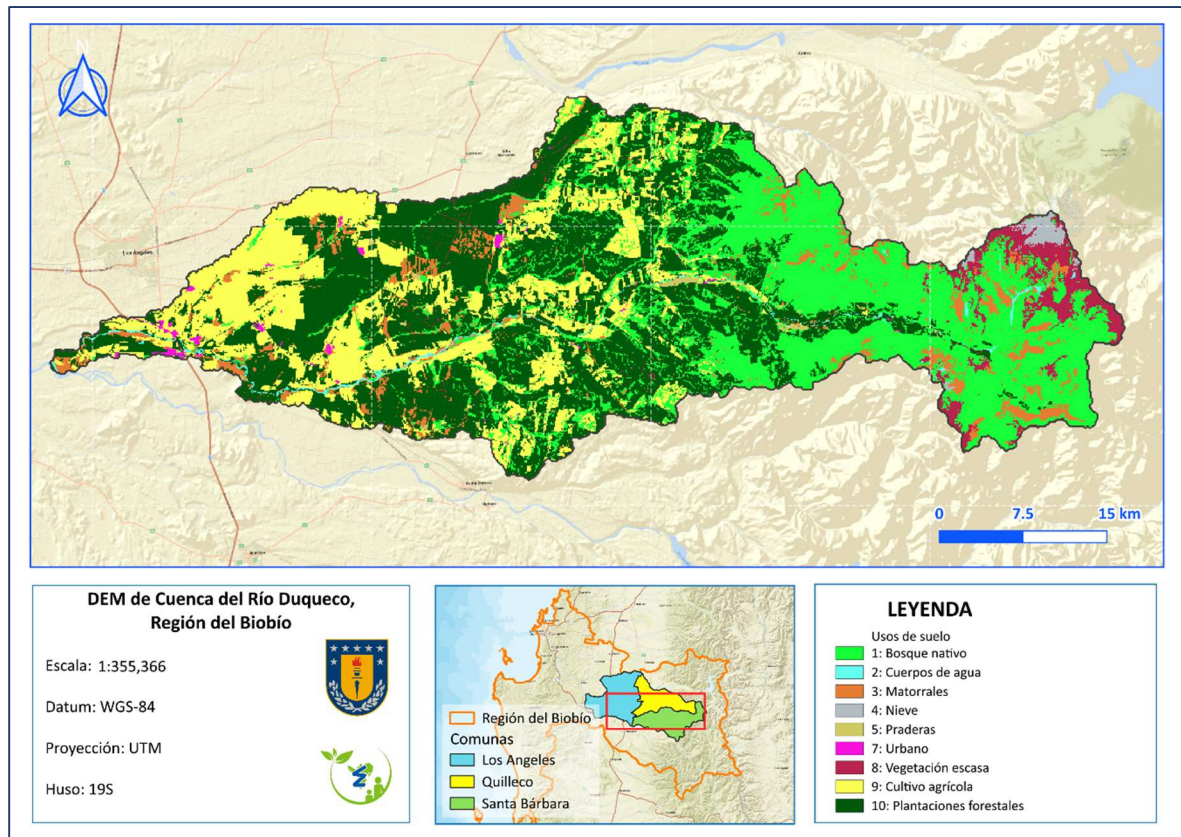


Figura 21.

Escenario de restauración 6, pendientes mayores a 45°



Para objeto de este análisis, las variables hidrológicas que se evaluaron son las siguientes: la interceptación, evaporación, almacenamiento estático, evapotranspiración, almacenamiento superficial, escorrentía, infiltración, percolación, flujo subterráneo y caudal de salida de la cuenca, en cada uno de los escenarios presentados, utilizando como situación basal el mapa inicial de cobertura de suelo.

6. RESULTADOS

6.1. Obtención de parámetros espaciales para modelo TETIS

6.1.1. Mapas derivados del DEM

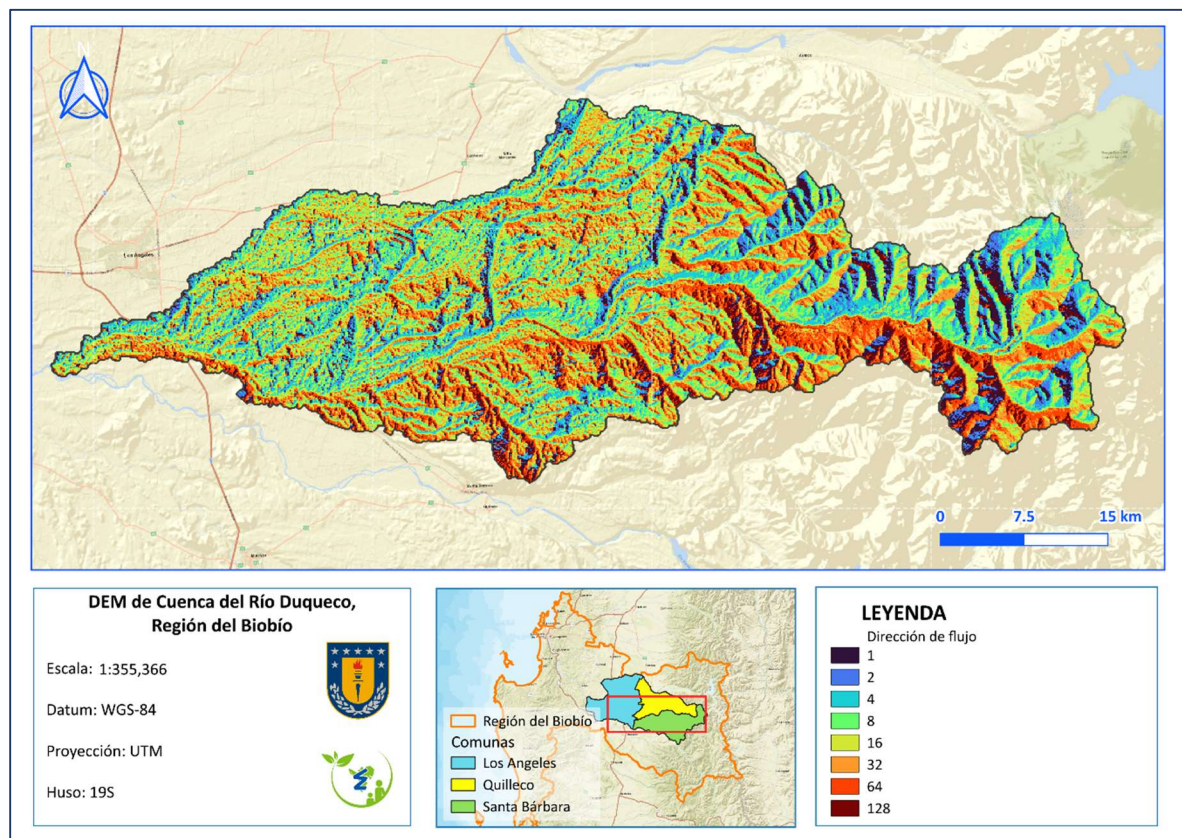
A continuación, se presentan los mapas derivados del Modelo de Elevación Digital para delimitar la cuenca del río Duqueco.

En Figura 22 se presenta el mapa de dirección de flujo de la cuenca del río Duqueco, el cual fue obtenido a través del DEM original.

El mapa de dirección de flujo nos presenta hacia donde se dirige el flujo de agua respecto a las pendientes de la cuenca, donde las aguas tienden a incorporarse al flujo principal hacia la zona baja de la cuenca.

Figura 22.

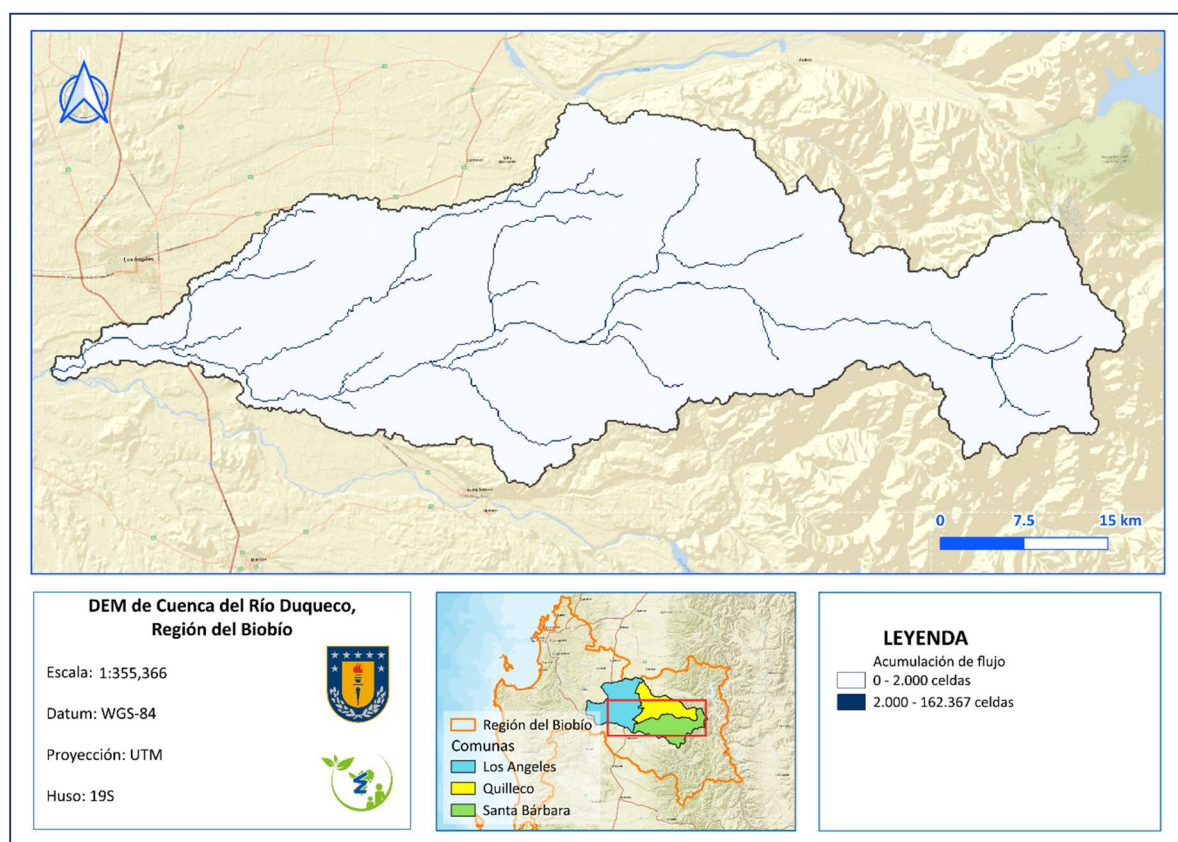
Mapa de dirección de flujo de la cuenca del río Duqueco



En Figura 23 se presenta el mapa de acumulación de flujo de la cuenca del río Duqueco, el cual fue obtenido a través del DEM original y el mapa de dirección de flujo. Este mapa permite identificar aquellas áreas en donde se va acumulando el flujo de agua. Principalmente este flujo se acumula en el cauce principal y en tributarios.

Figura 23.

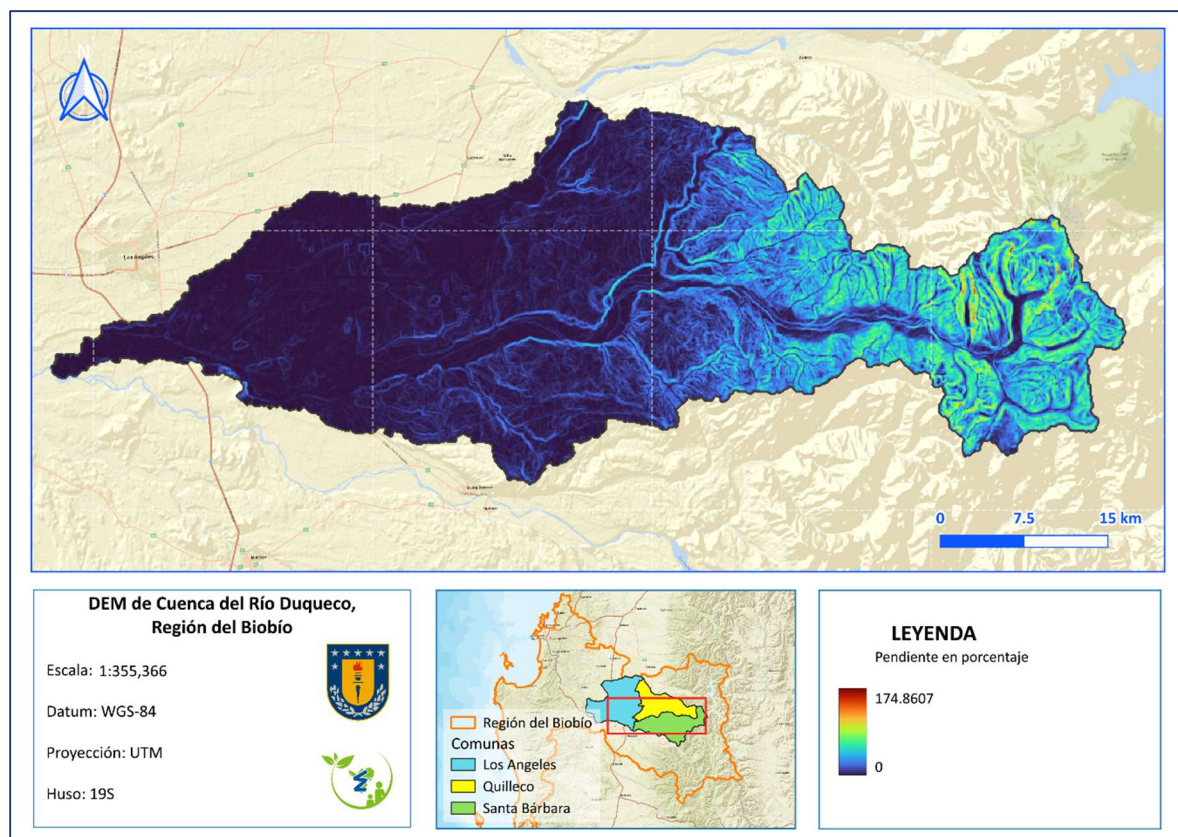
Mapa de acumulación de flujo de la cuenca del río Duqueco



En Figura 24 se presenta el mapa de pendientes de la cuenca del río Duqueco, en donde se puede observar que las pendientes oscilan entre los 0 grados que abarcan la mayor cantidad de superficie de la cuenca, y los 174 grados en pequeñas zonas de la cuenca.

Figura 24.

Mapa de pendientes de la cuenca del río Duqueco

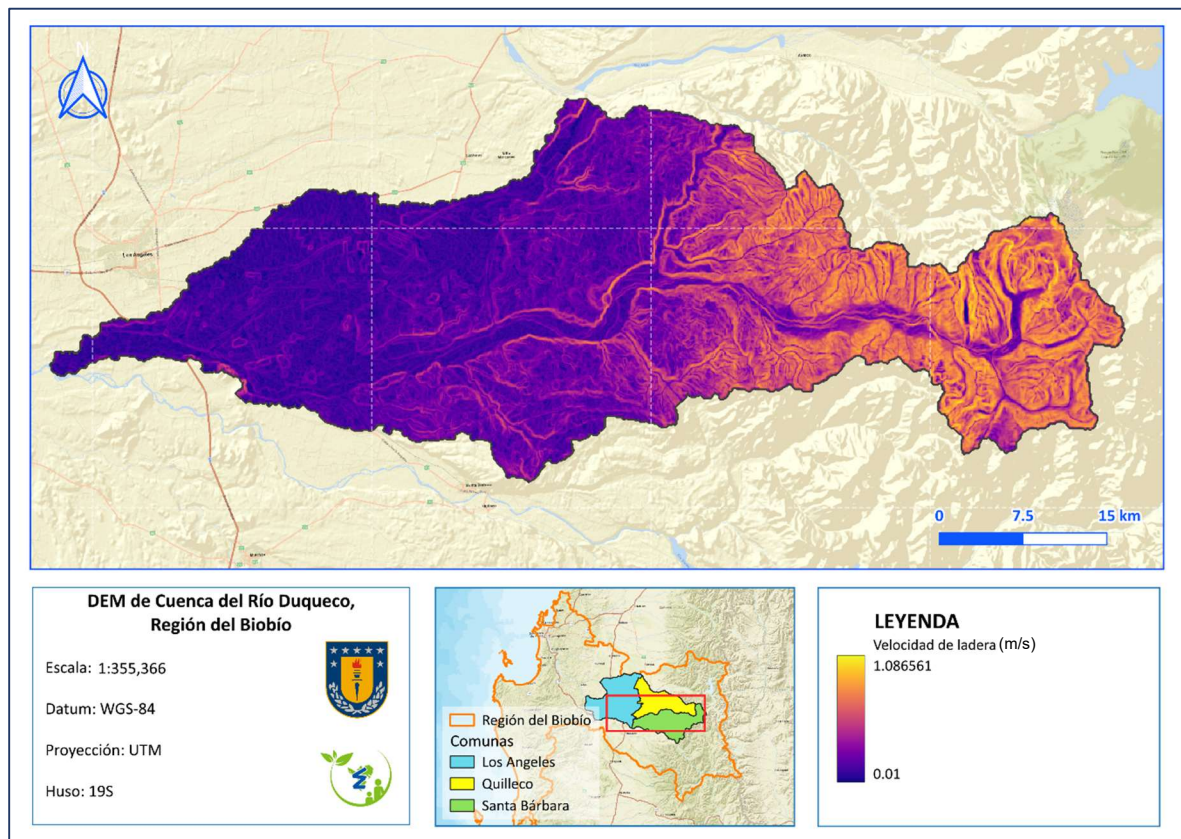


En figura 2

Figura 25 se presenta el mapa de velocidad de flujo de ladera de la cuenca del río Duqueco, en donde se puede observar que el flujo presenta una mayor velocidad en aquellas áreas en donde las pendientes mayores.

Figura 25.

Mapa de velocidad de flujo de ladera en cuenca de río Duqueco



6.1.2. Estimación de parámetros derivados del uso de suelo

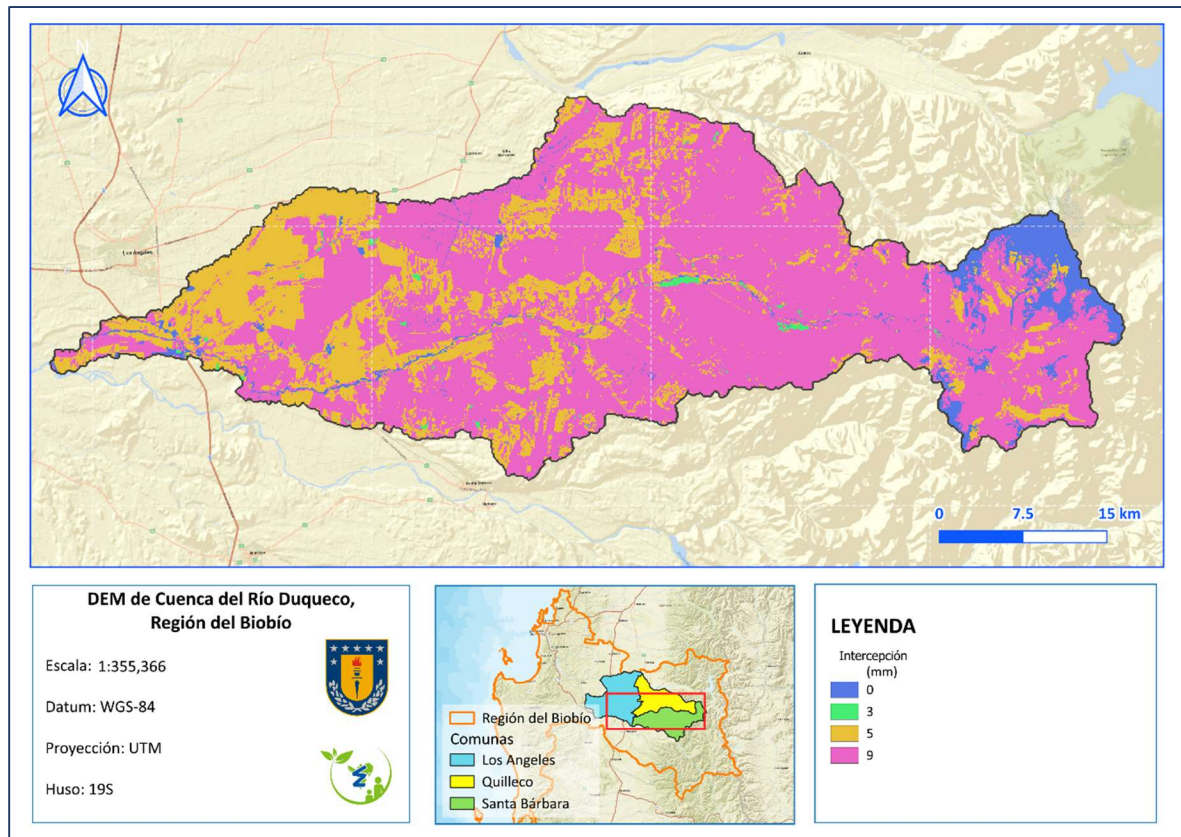
- Intercepción

La intercepción se determinó mediante a información bibliográfica y se le asignó valor a cada uso de suelo presente en la cuenca.

Este parámetro corresponde a la cantidad de agua que las hojas de las plantas pueden contener sin que estas lleguen a la superficie del suelo, puesto que posteriormente el agua se evapora directamente desde las hojas de las plantas.

Figura 26.

Intercepción de la precipitación por la cubierta vegetal en la cuenca del río Duqueco



La intercepción es alta para aquellas superficies que cuentan con una cubierta de plantaciones forestales, esto debido a la densidad de la vegetación que alcanza unos 9 mm.

Los cultivos agrícolas poseen una intercepción media (5 mm) y los matorrales una intercepción media a baja con 3 mm.

- Almacenamiento superficial

Por otra parte, el almacenamiento superficial se obtuvo desde el mapa de uso de suelo y el mapa de pendientes. A continuación, en figuras 27 y 28, se presentan los mapas de almacenamiento superficial.

Figura 27.

Almacenamiento superficial producto de cobertura

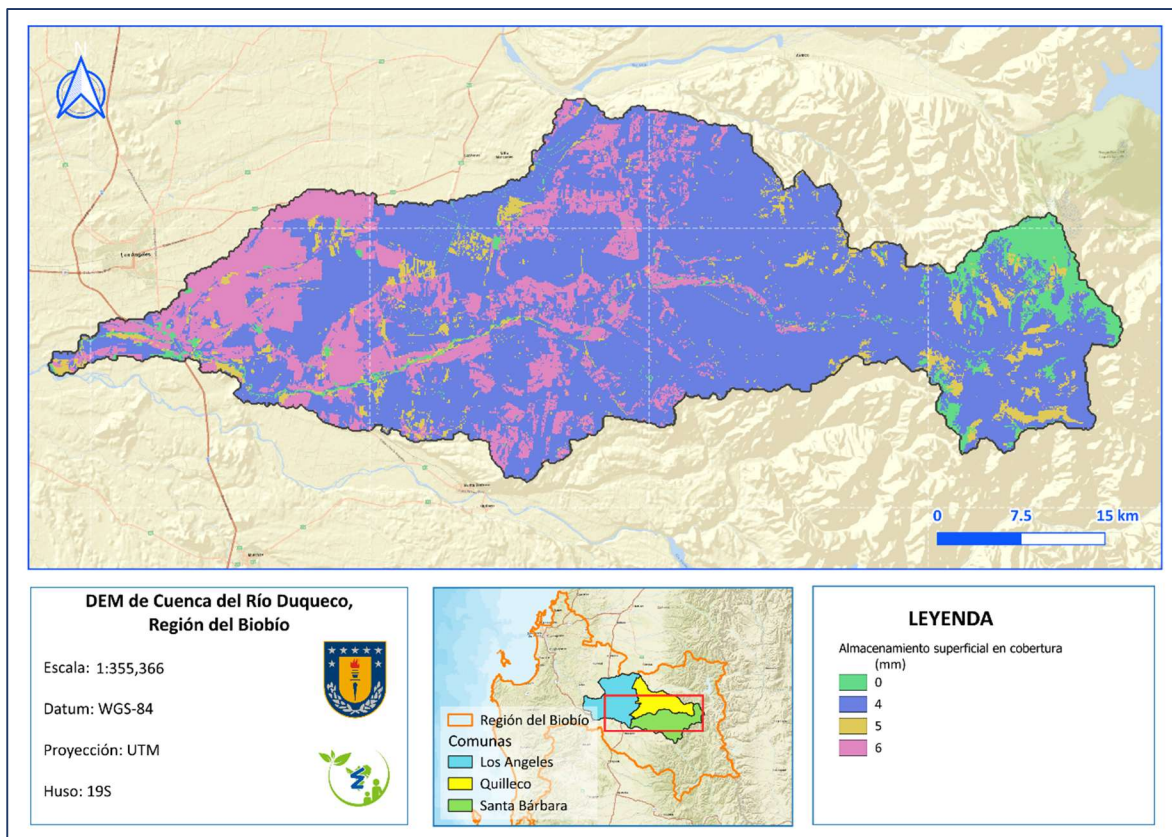
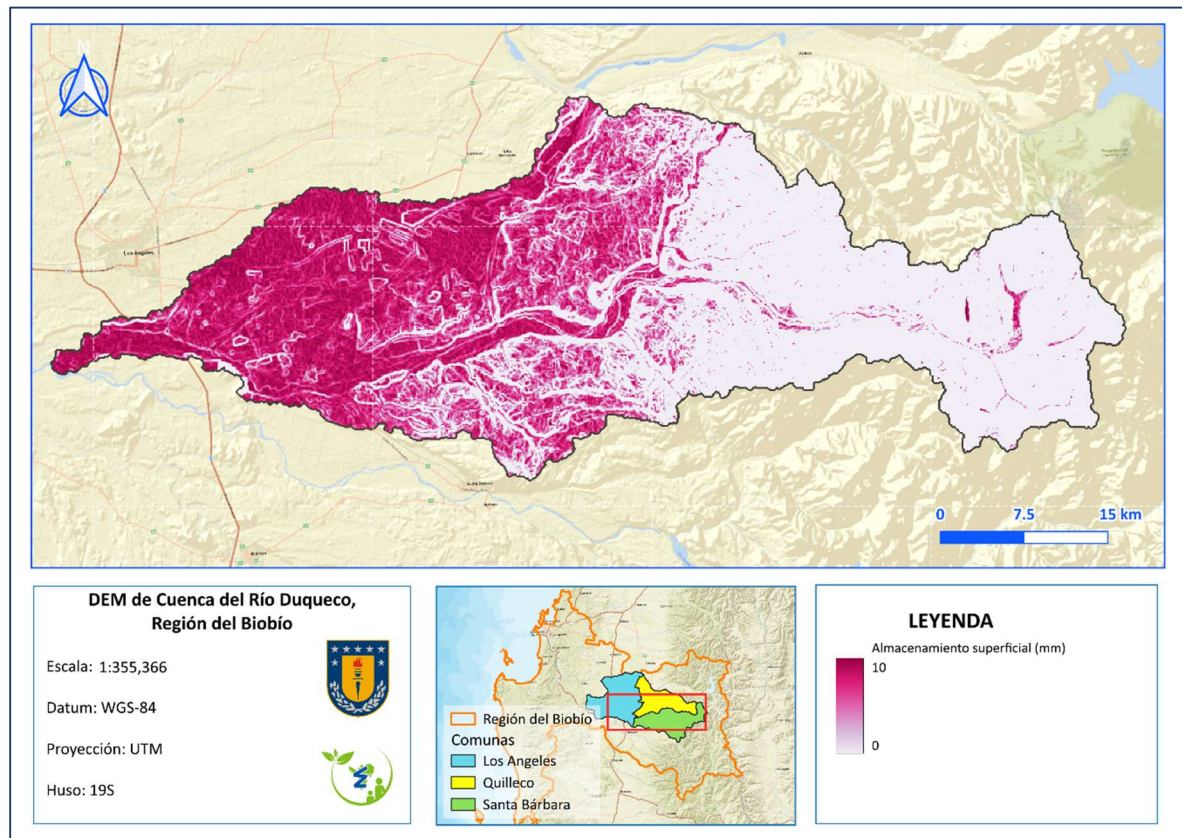


Figura 28.

Almacenamiento superficial producto a pendientes



El almacenamiento superficial producto de la cobertura vegetal demuestra que el mayor almacenamiento de agua en las áreas donde predominan los cultivos agrícolas, praderas (6 mm) y matorrales (5 mm), las cuales se localizan principalmente en la parte baja de la cuenca. Por otra parte, el bosque nativo y las plantaciones forestales se ubican principalmente en las zonas medias de la cuenca y alcanzan un almacenamiento superficial de 4 mm.

El almacenamiento superficial del agua producto de la pendiente, está influenciado en primera instancia por la pendiente terreno y segundo, por la rugosidad de la cobertura.

Por lo tanto, a medida que la pendiente aumenta, la capacidad del agua para acumularse en las depresiones presentes en el terreno disminuye, esto debido a que, en este punto, el escurrimiento se ve favorecido.

En este caso, tal como se aprecia en la Figura 28 la mayor parte del agua se acumula principalmente en la zona baja de la cuenca, no obstante, se puede observar que existe almacenamiento de agua en menor medida en la zona media de la cuenca.

6.1.3. Estimación de parámetros derivados de tipo de suelo y geología

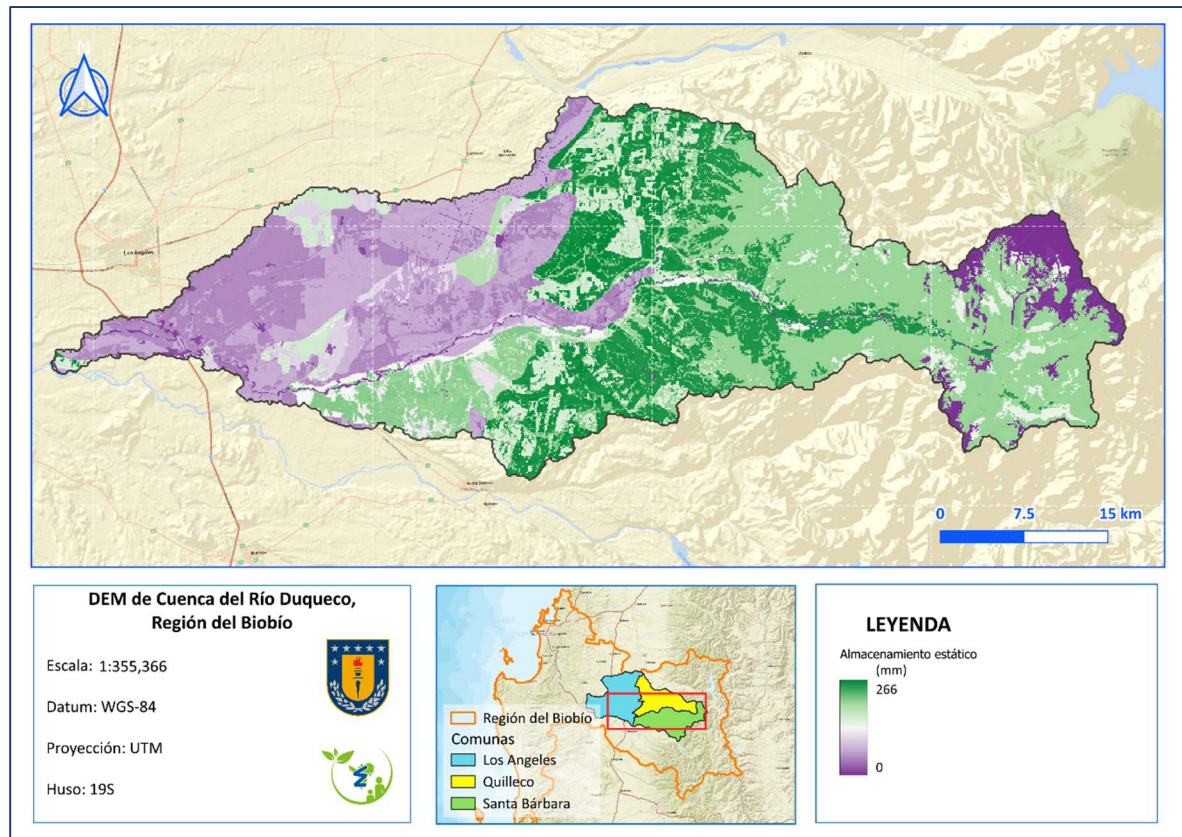
- Estimación de almacenamiento estático (H_u)

El almacenamiento estático, tal como se menciona anteriormente corresponde a la detención de aguas producto a los charcos, el agua interceptada por la vegetación y el agua que retiene el suelo por las fuerzas capilares.

Por lo tanto, el almacenamiento estático del suelo es la suma del almacenamiento capilar del suelo y los almacenamientos superficiales. A continuación, en Figura 29 se muestran los resultados de almacenamiento estático para cada serie de suelo en la cuenca de estudio.

Figura 29.

Almacenamiento estático de la cuenca del río Duqueco



En la figura anterior se visualiza que la mayor cantidad de agua almacenada en el suelo corresponde al zona media - alta de la cuenca que corresponde principalmente a la serie de suelo Santa Bárbara, con 215 mm. A diferencia de la zona baja de la cuenca donde el almacenamiento es menor. Esto puede deberse al tipo de suelo que presenta la serie de suelo Santa Bárbara que corresponden a suelos más secos y por lo tanto requieren de altos niveles de agua para llegar a un punto de saturación y que el agua escurra. Presenta un buen drenaje y tiene una textura franco-limosa, cuyo porcentaje de agua disponible varía entre 16 a 33%.

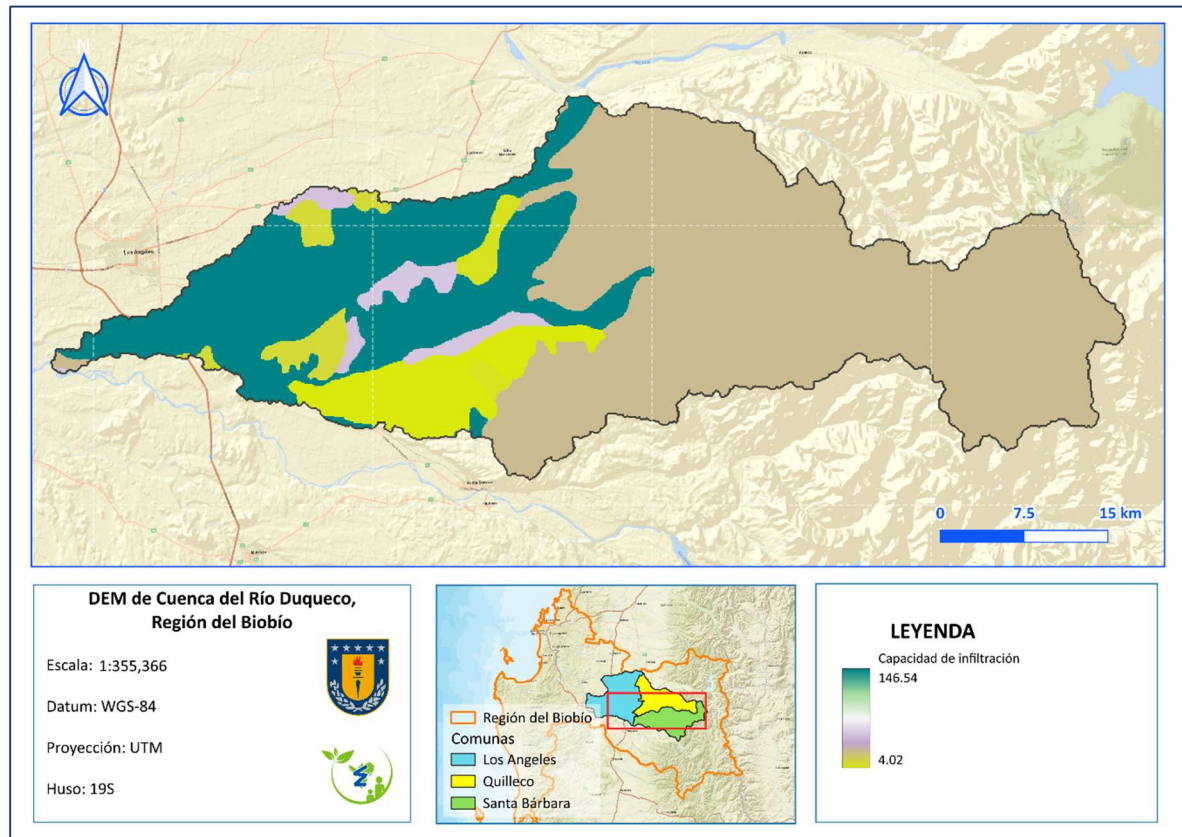
- Estimación de la conductividad hidráulica saturada del suelo

El Ks o conductividad hidráulica del suelo, es la capacidad de infiltración. A nivel de celda, la capa superior de la cobertura de suelo posee una conductividad hidráulica representativa, la cual viene asociada al tipo y la estructura del suelo, que a su vez se relaciona con la posición de la celda y la cobertura vegetal.

A continuación, en Figura 30 se presentan los resultados de conductividad hidráulica saturada del suelo, la cual fue calculada mediante el software Soil Water Characteristics.

Figura 30.

Capacidad de infiltración del suelo en la cuenca del río Duqueco



La mayor capacidad de infiltración corresponde principalmente a la zona baja – media de la cuenca, en donde se localizan las series Coreo con 146,54 mm/h y Arenales 54,28 mm/h, ambas son de textura arenosa y con suelos menos compactos, manteniendo la porosidad de suelo lo cual facilita la infiltración con una mayor velocidad.

- Estimación de la conductividad hidráulica del acuífero

Para estimar la permeabilidad del substrato rocoso, requerida para procesos de percolación, pérdidas subterráneas y la estimación de flujo base, se ha recorrido a bibliografía relacionada con rangos típicos de permeabilidad en función de las características de cada unidad litológica y los tipos de suelo, en donde se clasifican en 14 categorías cualitativas la permeabilidad. A continuación, en Tabla 12 se presentan algunos valores de permeabilidad dependiendo de su categoría, la categoría viene dado tanto por la litología (D= Dentríticas, Q= Dentríticas

(cuaternarias), V= Volcánicas, M= Metadentríticas, I= Ígneas), como por su permeabilidad que va desde muy alta a muy baja (MA, A, M, B y MB).

Tabla 12.

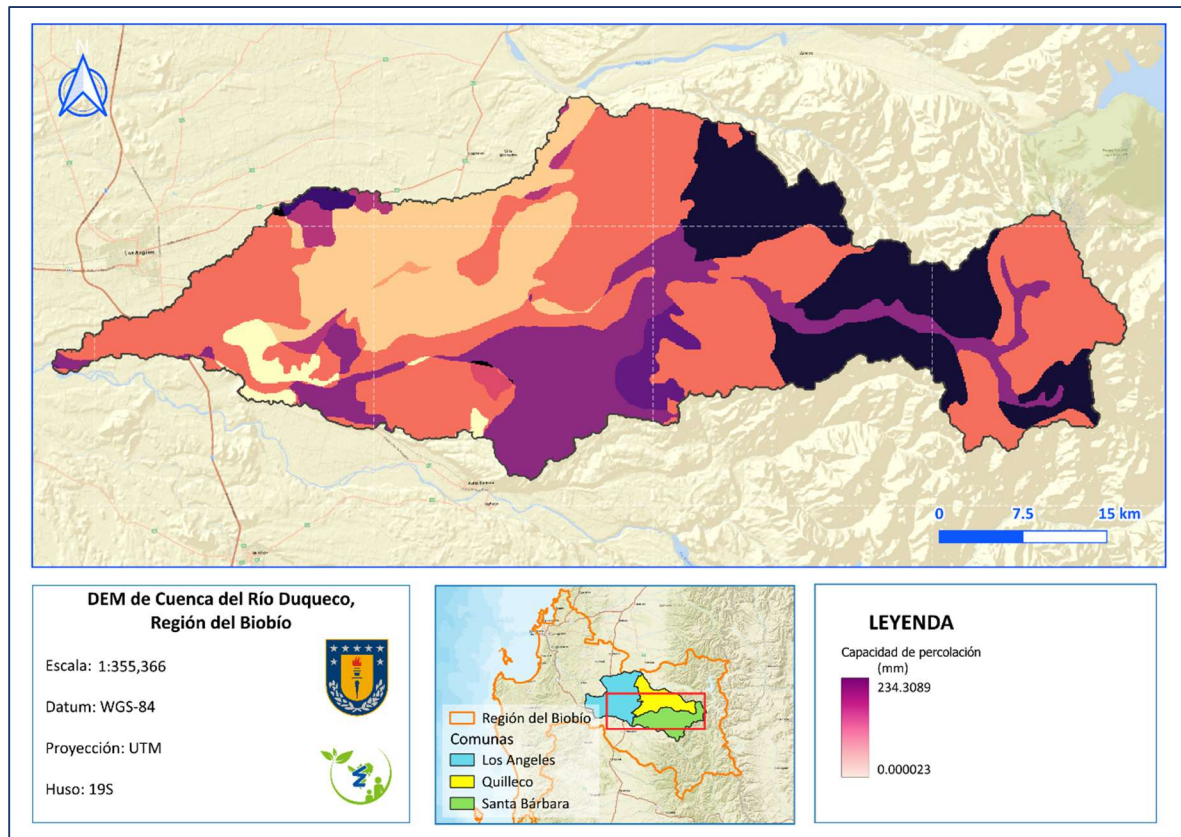
Valores de permeabilidad adaptados para diferentes categorías cualitativas de permeabilidad del sustrato rocoso

Categoría cualitativa de permeabilidad	Kp (mm/hr)
D-MB	4.16667E-06
D-B	0.000416667
D-M	0.041666667
D-A	4.166666667
D-MA	416.6666667
M-MB	4.16667E-07
M-B	2.34309E-05
M-M	0.001317616
Q-B	0.007409498
Q-M	1.317615692
Q-A	234.3088855
Q-MA	41666.66667
V-MB	0.36
V-B	1.138419958
I-MB	0.00000036
I-B	0.000036

(Ramírez, 2012)

Figura 31.

Permeabilidad del sustrato rocoso



6.2. Calibración y validación del modelo

Para la calibración del modelo se utilizó un periodo de 3 años y la cobertura de uso de suelo registrada más antigua que registraba el uso de suelo en ese periodo.

Se realizó un análisis de sensibilidad a los nueve factores correctores del programa para visualizar aquellos que tenían una mayor influencia sobre el comportamiento del modelo, correspondientes a:

- FC₁: Almacenamiento estático.
- FC₂: Evapotranspiración.
- FC₃: Infiltración.
- FC₄: Escorrentía directa
- FC₅: Percolación
- FC₆: Interflujo.

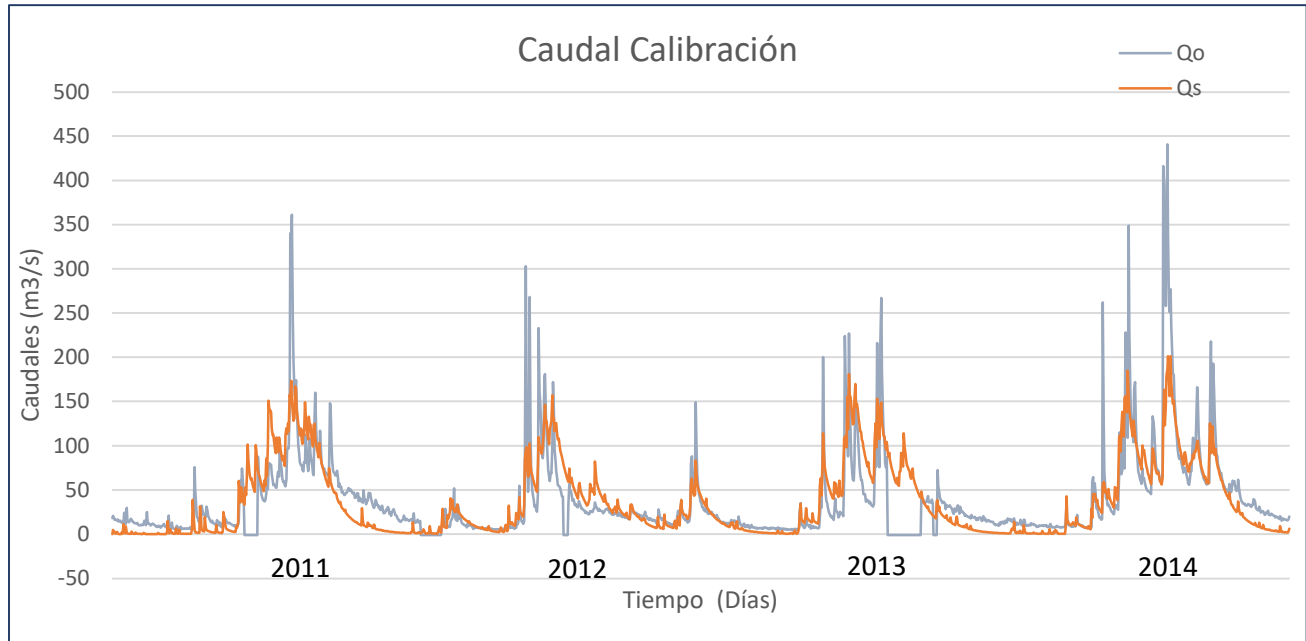
Debido a lo anterior, se realizó una calibración automática del modelo utilizando el algoritmo de optimización SCE-UA tomando en cuenta los 6 factores correctores (que son adimensionales). En la siguiente tabla se presentan los factores correctores resultantes, indicados en negrita aquellos parámetros que fueron calibrados automáticamente.

Tabla 13.

Factores correctores resultantes de la calibración automática

Factores correctores	Calibración automática
FC ₁ Almacenamiento estático	1.748
FC ₂ Evaporación	0.779
FC ₃ Infiltración	0.721
FC ₄ Escorrentía directa	1.506
FC ₅ Percolación	0.0001
FC ₆ Interflujo	7.186
FC ₇ Flujo subterráneo profundo	0.550
FC ₈ Flujo base	200
FC ₉ Velocidad en red fluvial	1.000

Los resultados obtenidos de la calibración para el periodo 2011 – 2014 se presentan a continuación. Como se puede observar, los Caudales registrados presentan datos faltantes, los cuales para objeto del modelo fueron ingresados con un valor (-1).

Figura 32.*Hidrograma resultante de simulación en el periodo de calibración***Tabla 14.***Principales características del evento*

Caudal máx. obs (m3/s)	441
Caudal max. Sim (m3/s)	203.728
RMSE	31.61
Tiempo al pico obs	01-08-2014
Tiempo al pico sim	01-08-2014
Error tiempo al pico (dt)	0
Volumen obs (Hm3)	4801.293
Volumen sim (Hm3)	4286.174
Error en volumen (%)	-10.729
índice de Nash - Sut (NSE)	0.6123
Área acumulada (km2)	883.44
Índice RSR	0.6223

Los resultados obtenidos con el modelo calibrado demuestran que los caudales simulados se asemejan a los caudales observados, no obstante, el modelo no fue capaz de simular los caudales máximos y los caudales bajos en especial en el periodo de calentamiento (año 2011) no logra ajustarse a la realidad.

Por su parte, el índice NSE obtenido (0.6123) corrobora que el modelo representa de buena manera los procesos caracterizados.

Para la validación, se utilizó un periodo de 5 años (2015 – 2019) y el catastro de uso de suelo del año 2015 para evaluar si la calibración realizada representa de buena manera distintas condiciones a las utilizadas en la calibración.

Figura 33.

Hidrograma resultante de simulación en el periodo de validación

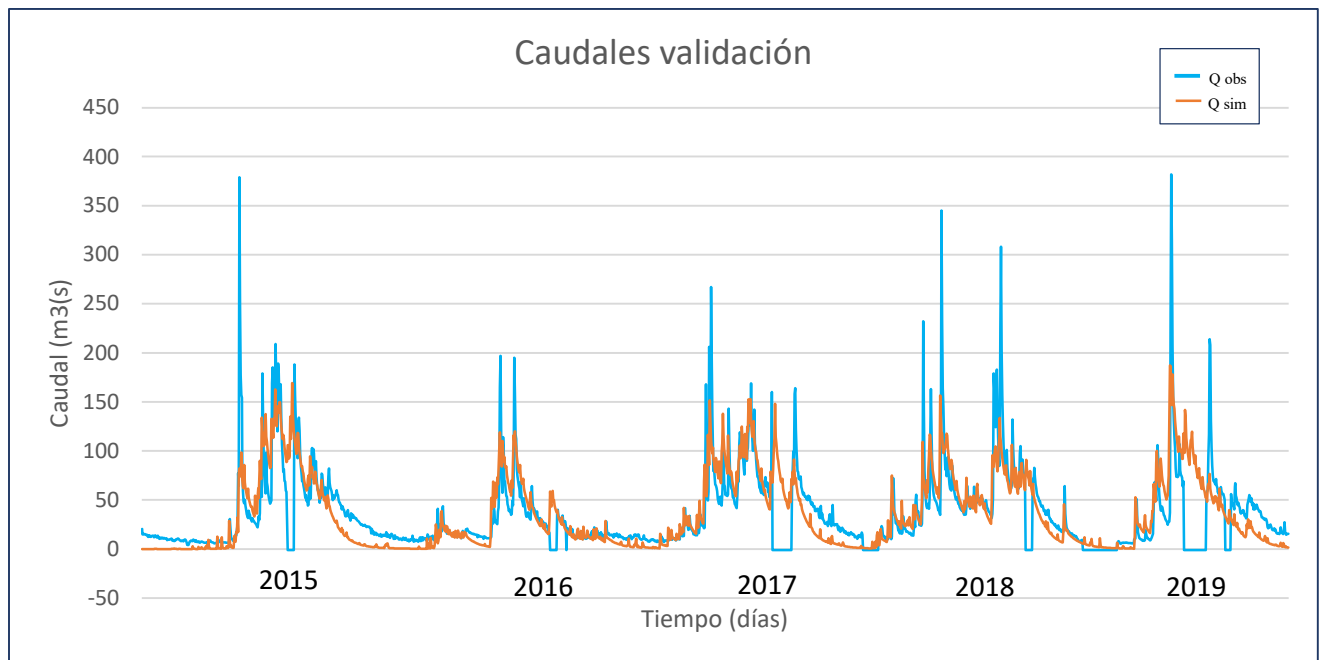


Tabla 15.*Principales características del evento*

Caudal máx. obs (m3/s)	382
Caudal max. Sim (m3/s)	187.36
RMSE	26.279
Tiempo al pico obs	27-06-2019
Tiempo al pico sim	25-06-2019
Error tiempo al pico (dt)	2
Volumen obs (Hm3)	5661.612
Volumen sim (Hm3)	4877.804
Error en volumen (%)	-13.844
índice de Nash - Sut (NSE)	0.6002
Área acumulada (km2)	883.44
Índice RSR	0.6323

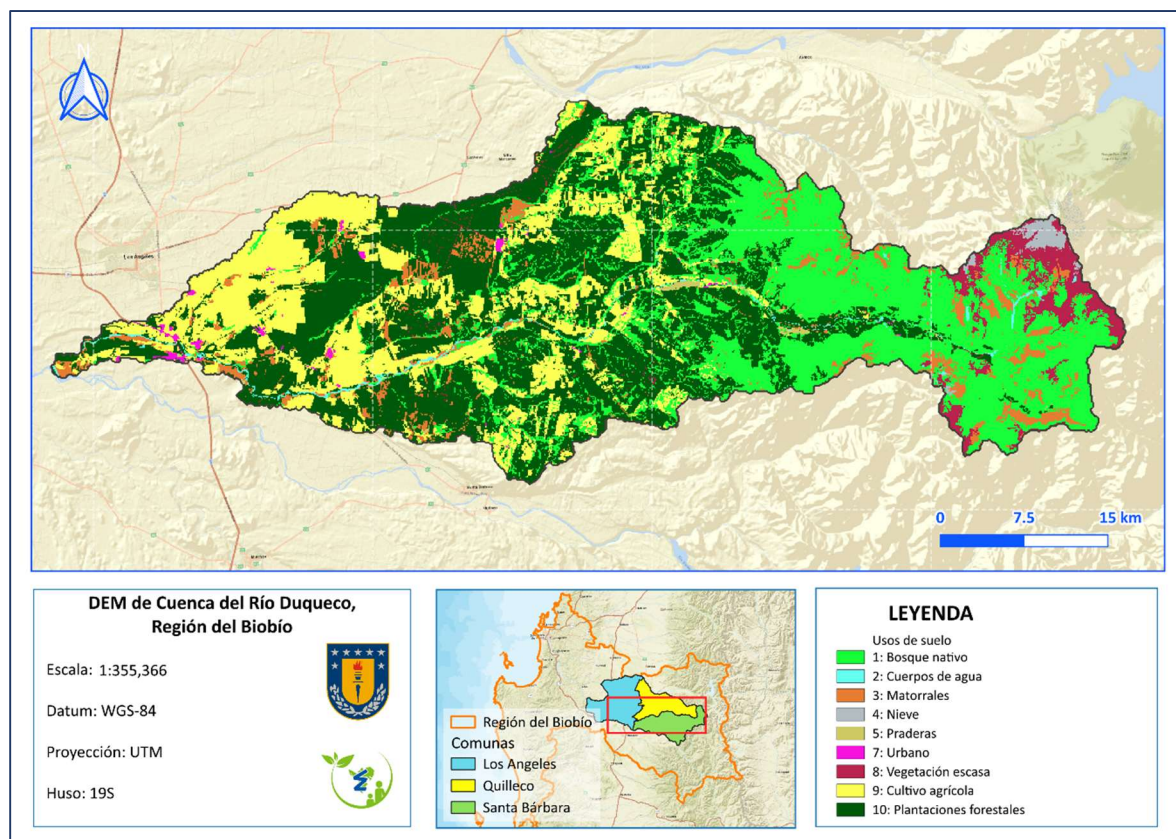
El hidrograma obtenido al igual que las principales características del periodo de validación se comportan de forma parecida al periodo de calibración, donde se indicaba que, si bien el modelo no logra simular correctamente los caudales máximos, presenta un índice NSE 0,60 lo que indica que el modelo logra adecuarse de manera satisfactoria a los procesos caracterizados.

6.3. Condición basal de la cuenca

Para evaluar la variación de los parámetros hidrológicos en la cuenca se definió una condición basal respecto al catastro del año 2015 (Figura 34) y también un periodo de tiempo de 10 años, que comprendía desde el año 2010 al 2019.

Figura 34.

Cobertura cuenca río Duqueco



La superficie ocupada por los distintos usos de suelo presentes en la cuenca del río Duqueco se presentan a continuación.

Tabla 16.

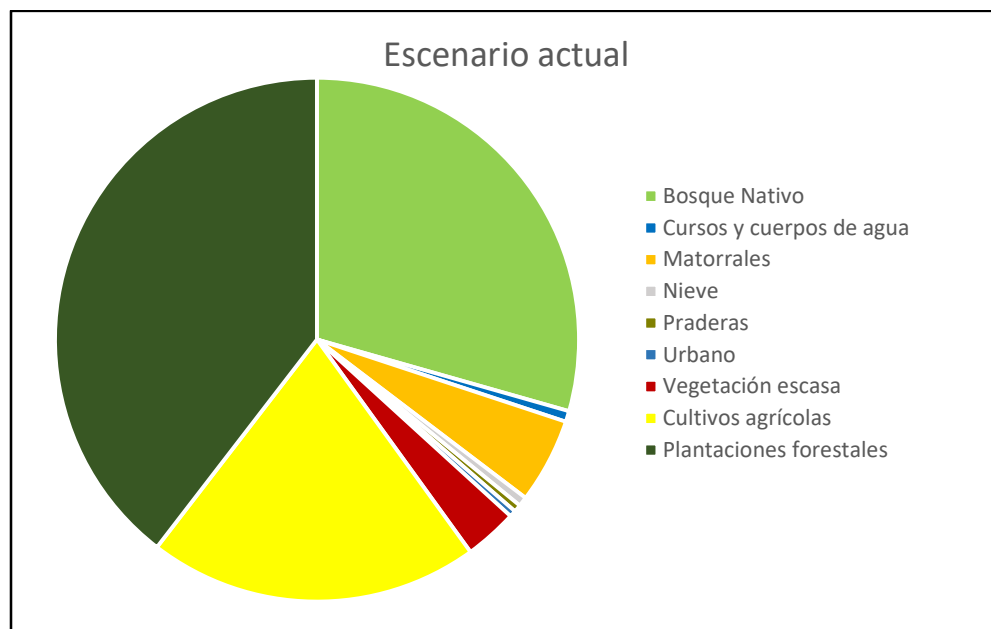
Superficie ocupada por usos de suelo en cuenca del río Duqueco

Uso de suelo	Superficie (km ²)
Bosque Nativo	477.38
Cursos y cuerpos de agua	11.10
Matorrales	85.24
Nieve	9.51
Praderas	7.34
Urbano	6.47
Vegetación escasa	52.98
Cultivos agrícolas	331.56

Plantaciones forestales	642.09
-------------------------	--------

Figura 35.

Distribución de usos de suelo en cuenca del río Duqueco



La cobertura actual está predominada por plantaciones forestales, donde cuya superficie alcanza 642 km² del total de la cuenca, lo cual corresponde casi un 40% de la cuenca.

El bosque nativo corresponde al segundo uso predominante de la cuenca y se localiza principalmente en la zona media y alta de la cuenca. Mientras que las plantaciones forestales y cultivos agrícolas se concentran en la zona baja de la cuenca.

El balance hídrico que se presenta a continuación en tabla 17, se realizó en un periodo total de 10 años, por lo tanto, se consideró una precipitación de 18228,64 mm/periodo de ingreso.

Tabla 17.*Resumen de balance hídrico de condición base*

Parámetro	Valor (mm/periodo)
Agua interceptada por la vegetación	
Intercepción	1.05351
Entrada por lluvia	18228.64
Salida por evaporación	2224.20
Agua capilar en el suelo	
Almacenamiento estático	255.76
Entrada por lluvia directa	16004.76
Salida por evapotranspiración	3137.88
Agua en superficie	
Almacenamiento superficial	0.00
Excedente	12651.61
Escurrimiento directo	1593.27
Almacenamiento gravitacional	
Almacenamiento gravitacional	62.82
Infiltración	12651.17
Interflujo	11209.98
Nivel del acuífero	
Acuífero	0.00
Percolación	173.83
Flujo base	0.00
Flujo subterráneo profundo	173.83
Desagüe final	
Salida por desagüe	12803.40

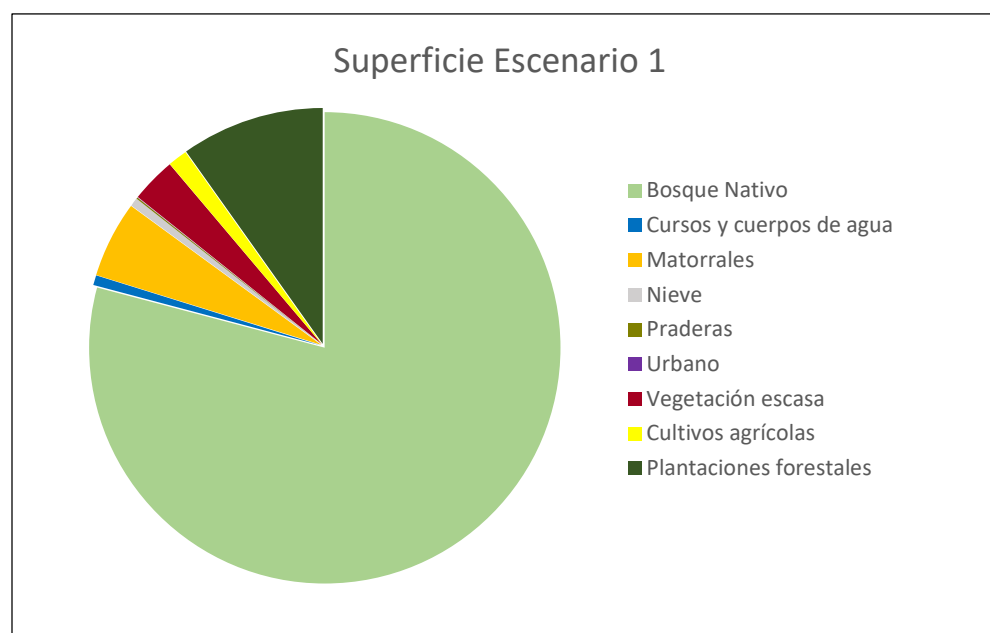
6.4. Variabilidad de parámetros hidrológicos ante cambios en la cobertura vegetal

Para evaluar la variabilidad de parámetros hidrológicos se realizó una modelación de cada uno de los escenarios en un periodo de tiempo de 10 años. A continuación, se presentan los cambios de cobertura con respecto a la condición basal, en donde la cuenca se ve predominada por usos de suelos antrópicos como plantaciones forestales y cultivos agrícolas.

- Cambios en las coberturas

Tabla 18.*Cambios en la superficie escenario 1 (pendientes 0 a 5°)*

Uso de suelo	Condición base (km ²)	Escenario 1 (km ²)	Variación (km ²)	% de variación
Bosque Nativo	477.38	1285.63	808.25	169.31
Cursos y cuerpos de agua	11.10	11.10	0.00	0.00
Matorrales	85.24	85.24	0.00	0.00
Nieve	9.51	9.51	0.00	0.00
Praderas	7.34	1.42	-5.92	-80.66
Urbano	6.47	0.35	-6.12	-94.55
Vegetación escasa	52.98	50.32	-2.67	-5.04
Cultivos agrícolas	331.56	21.59	-309.97	-93.49
Plantaciones forestales	642.09	159.82	-482.26	-75.11

Figura 36.*Distribución de uso de suelo escenario 1*

En el escenario 1, pendientes entre 0 y 5° la cobertura de suelo que es mayormente modificada corresponde al uso urbano, alcanzado un 94,55% de modificación con respecto a la condición inicial. Sin embargo, los usos de suelo que sufrieron una mayor disminución en cuanto a superficie utilizada corresponden, en primer lugar, a las plantaciones forestales las cuales

disminuyeron de 600 km² a 159 km², lo que consiste en una disminución de 482 km² aproximadamente respecto a la base, seguido por los cultivos agrícolas, los cuales disminuyen en 310 km² de superficie aproximadamente.

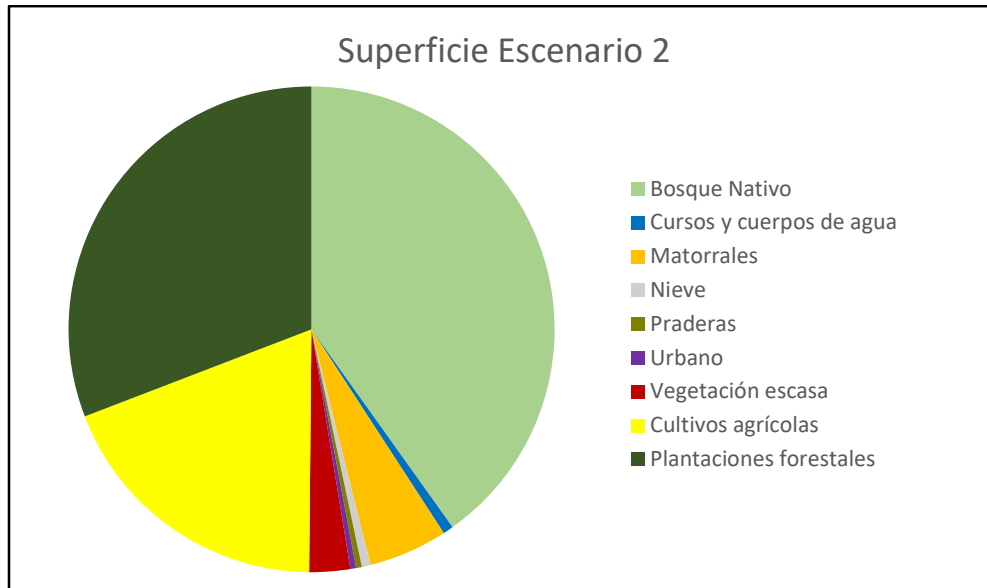
Tabla 19.

Cambios en la superficie escenario 2 (pendientes 5 a 15°)

Uso de suelo	Condición base (km ²)	Escenario 2 (km ²)	Variación (km ²)	% de variación
Bosque Nativo	477.38	651.90	174.51	36.56
Cursos y cuerpos de agua	11.10	11.10	0.00	0.00
Matorrales	85.24	85.24	0.00	0.00
Nieve	9.51	9.51	0.00	0.00
Praderas	7.34	6.07	-1.27	-17.27
Urbano	6.47	6.23	-0.24	-3.74
Vegetación escasa	52.98	44.08	-8.90	-16.81
Cultivos agrícolas	331.56	308.80	-22.76	-6.86
Plantaciones forestales	642.09	500.52	-141.57	-22.05

Figura 37.

Distribución de uso de suelo escenario 2



Respecto al escenario 2, la mayor variación del uso de suelo consiste en las plantaciones forestales, en donde la superficie utilizada por estas coberturas disminuye en 28 km², en este escenario existe una disminución de los usos de suelo con vegetación escasa (23,87% de variación), cultivos agrícolas (0,50% de variación), usos urbanos (0,83% de variación) y praderas (1,78% de variación).

Tabla 20.*Cambios en la superficie escenario 3 (pendientes 15 a 25°)*

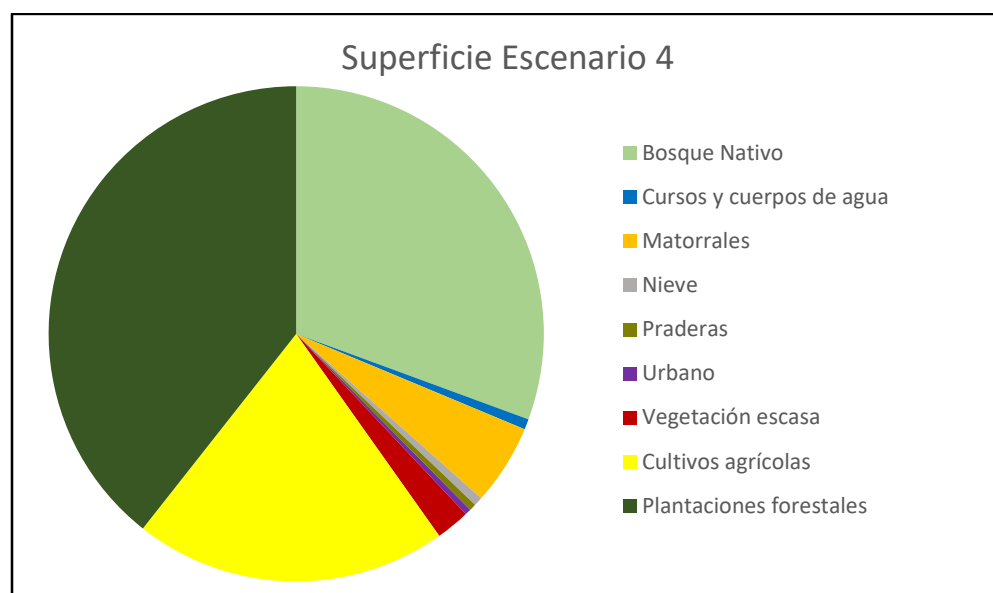
Uso de suelo	Condición base (km ²)	Escenario 3 (km ²)	Variación (km ²)	% de variación
Bosque Nativo	477.38	520.07	42.69	8.94
Cursos y cuerpos de agua	11.10	11.10	0.00	0.00
Matorrales	85.24	85.24	0.00	0.00
Nieve	9.51	9.51	0.00	0.00
Praderas	7.34	7.21	-0.13	-1.78
Urbano	6.47	6.42	-0.05	-0.83
Vegetación escasa	52.98	40.34	-12.65	-23.87
Cultivos agrícolas	331.56	329.91	-1.65	-0.50
Plantaciones forestales	642.09	613.70	-28.38	-4.42

Figura 38.*Distribución de uso de suelo escenario 3*

En el escenario 3, los usos de suelo mayormente reemplazado por bosque nativo corresponden a plantaciones forestales (4,42% de variación) y vegetación escasa (23,87% de variación) y en menor medida, se modifican los usos de suelo urbano (0,83%), praderas (1,78%) y cultivos agrícolas (0,50%).

Tabla 21.*Cambios en la superficie escenario 4 (pendientes 25 a 35°)*

Uso de suelo	Condición base (km ²)	Escenario 4 (km ²)	Variación (km ²)	% de variación
Bosque Nativo	477.38	497.16	19.78	4.14
Cursos y cuerpos de agua	11.10	11.10	0.00	0.00
Matorrales	85.24	85.24	0.00	0.00
Nieve	9.51	9.51	0.00	0.00
Praderas	7.34	7.25	-0.09	-1.21
Urbano	6.47	6.42	-0.05	-0.77
Vegetación escasa	52.98	35.98	-17.01	-32.10
Cultivos agrícolas	331.56	331.46	-0.10	-0.03
Plantaciones forestales	642.09	639.38	-2.71	-0.42

Figura 39.*Distribución de uso de suelo escenario 4*

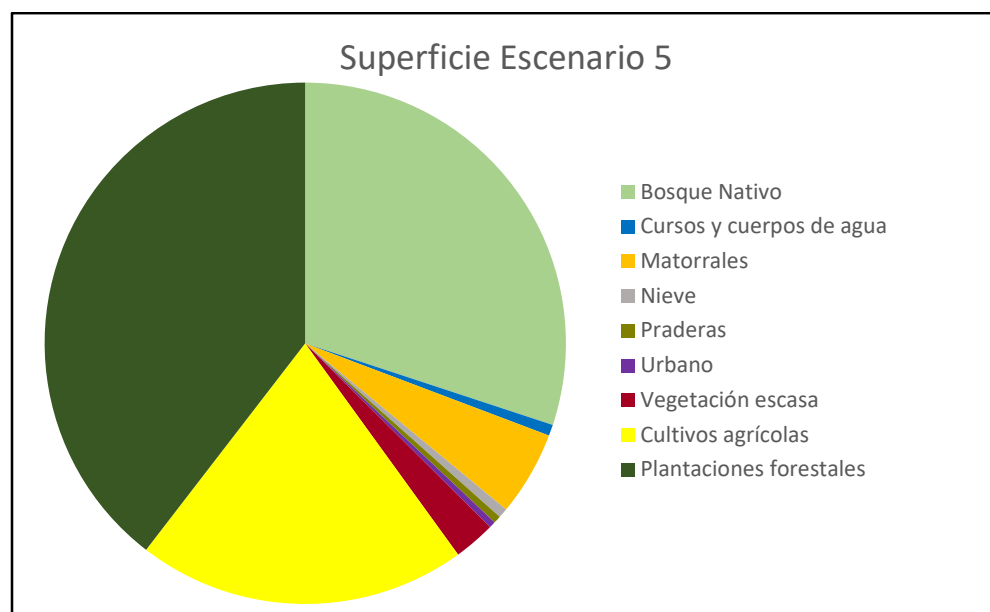
Para el escenario 4 (pendientes entre 25 a 35°), podemos observar que el principal uso de suelo reemplazado por la cobertura de bosque nativo corresponde a vegetación escasa, alcanzando un 32% de modificación y en menor proporción podemos encontrar praderas (1,21%), urbanos (0,77%), plantaciones forestales (0,42%) y cultivos agrícolas (0,03%)

Tabla 22.*Cambios en la superficie escenario 5 (pendientes de 35 a 45°)*

Uso de suelo	Condición base (km ²)	Escenario 5 (km ²)	Variación (km ²)	% de variación
Bosque Nativo	477.38	488.30	10.92	2.29
Cursos y cuerpos de agua	11.10	11.10	0.00	0.00
Matorrales	85.24	85.24	0.00	0.00
Nieve	9.51	9.51	0.00	0.00
Praderas	7.34	7.33	-0.01	-0.09
Urbano	6.47	6.47	0.00	0.00
Vegetación escasa	52.98	41.96	-11.02	-20.80
Cultivos agrícolas	331.56	331.56	0.00	0.00
Plantaciones forestales	642.09	642.07	-0.02	0.00

Figura 40.

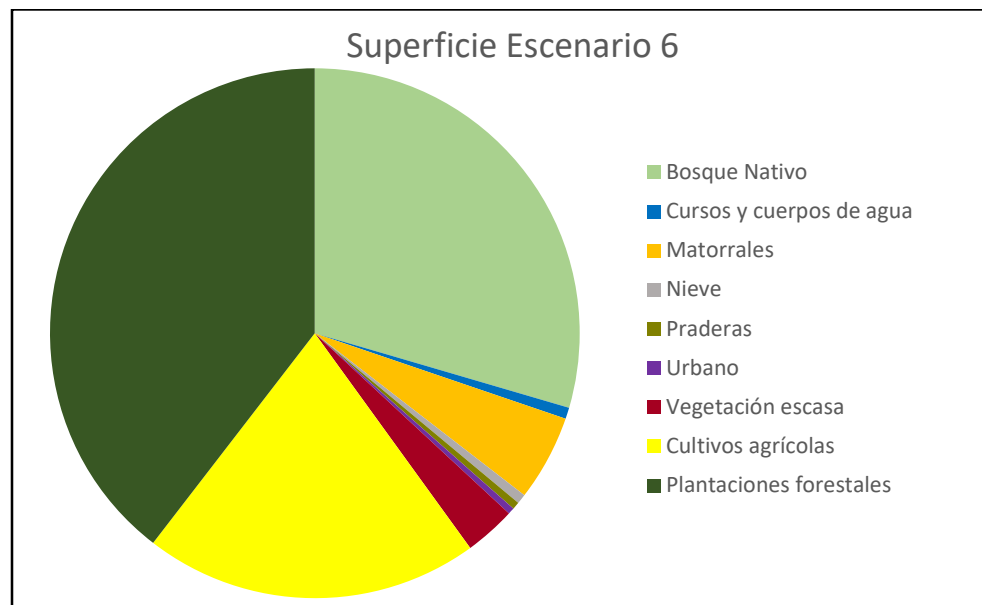
Distribución de uso de suelo escenario 5



Para el escenario 5, pendientes entre 35 y 45° es posible indicar que, el uso de suelo que es principalmente modificado consiste en vegetación escasa con 20,80% de disminución y en menor medida usos de suelo pertenecientes a praderas (0,09).

Tabla 23.*Cambios en la superficie escenario 6 (pendientes mayores a 45°)*

Uso de suelo	Condición base (km ²)	Escenario 6 (km ²)	Variación (km ²)	% de variación
Bosque Nativo	477.38	479.74	2.36	0.49
Cursos y cuerpos de agua	11.10	11.10	0.00	0.00
Matorrales	85.24	85.24	0.00	0.00
Nieve	9.51	9.51	0.00	0.00
Praderas	7.34	7.34	0.00	0.00
Urbano	6.47	6.47	0.00	0.00
Vegetación escasa	52.98	50.56	-2.42	-4.57
Cultivos agrícolas	331.56	331.56	0.00	0.00
Plantaciones forestales	642.09	642.09	0.00	0.00

Figura 41.*Distribución de uso de suelo escenario 6*

Finalmente, en el escenario 6 (pendientes mayores a 45°), es posible indicar que el único uso de suelo que sufre alguna modificación por los escenarios de restauración corresponde a áreas de vegetación escasa alcanzando un 4,57% de disminución.

- Variación de parámetros hidrológicos

Intercepción

La evaluación de los escenarios evidenció una reducción en el parámetro de intercepción cuando la principal modificación implicó la sustitución de plantaciones forestales por bosque nativo, correspondiente a los escenarios 1 y 2.

Esta disminución se atribuye a las características propias del bosque nativo: su follaje, disposición espacial y diversidad de tamaños que generan una menor capacidad de intercepción en comparación a plantaciones, lo que a su vez permite un mayor ingreso de agua hacia el suelo para ser almacenada.

Las plantaciones forestales, por otra parte, corresponden a plantas de hojas perennes, esto quiere decir que conservan su follaje durante las temporadas de otoño e invierno, lo que contrasta con la dinámica del bosque nativo, por lo tanto, la intercepción puede variar estacionalmente.

No obstante, en aquellos escenarios caracterizados por pendientes elevadas se visualiza un ligero aumento en el volumen interceptado (escenarios 5 y 6) en comparación con la condición basal, esto viene dado principalmente a la conservación de áreas con una intercepción escasa o nula a usos de suelo con bosque nativo, lo que provoca un aumento en el valor de este parámetro.

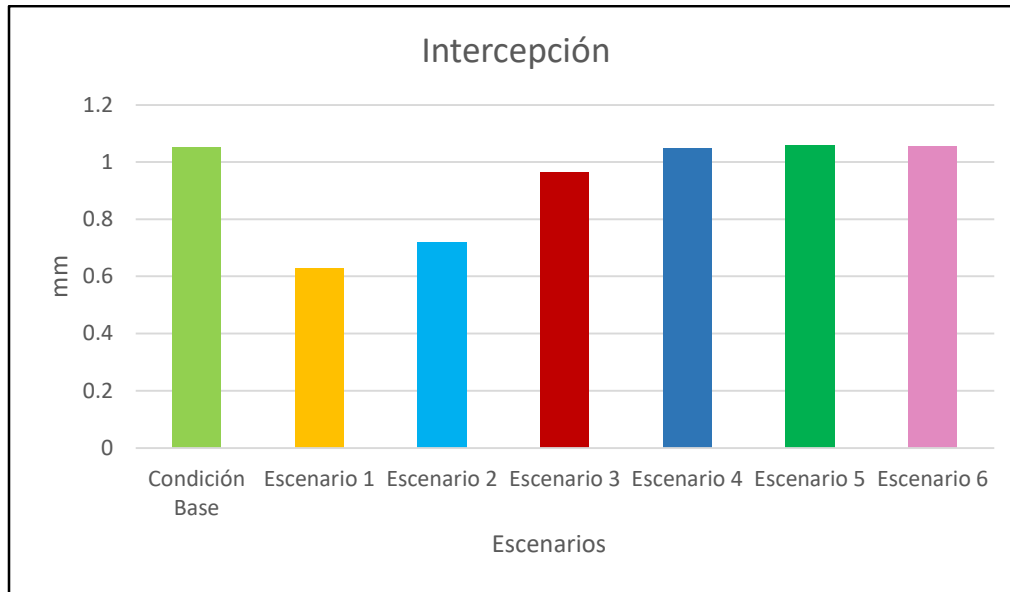
Tabla 24.

Variación de parámetro de intercepción en base a los escenarios

Escenarios	mm			
	Periodo de 10 años	Promedio anual	Verano	Invierno
Condición Base	1.05	1.07	0.18	1.95
Escenario 1	0.63	0.66	0.10	1.12
Escenario 2	0.72	0.75	0.11	1.31
Escenario 3	0.97	0.98	0.17	1.74
Escenario 4	1.06	1.07	0.18	1.94
Escenario 5	1.06	1.08	0.19	1.95
Escenario 6	1.05	1.08	0.19	1.95

Figura 42.

Variación de parámetro de intercepción en base a los escenarios en periodo de 2010 – 2019



A continuación, en las siguientes figuras se presenta la variación del parámetro intercepción en cada escenario evaluado respecto a la condición inicial, en promedio anual (figura 43), temporada de verano e invierno. (figura 44), en donde se puede comprobar la tendencia, en escenarios en donde la cobertura mayormente reemplazada corresponde a plantaciones forestales la intercepción disminuye, mientras, en escenarios donde la cobertura reemplazada corresponde a áreas de escasa vegetación la intercepción aumenta.

Figura 43.

Variación de parámetro de intercepción en base a los escenarios (promedio anual)

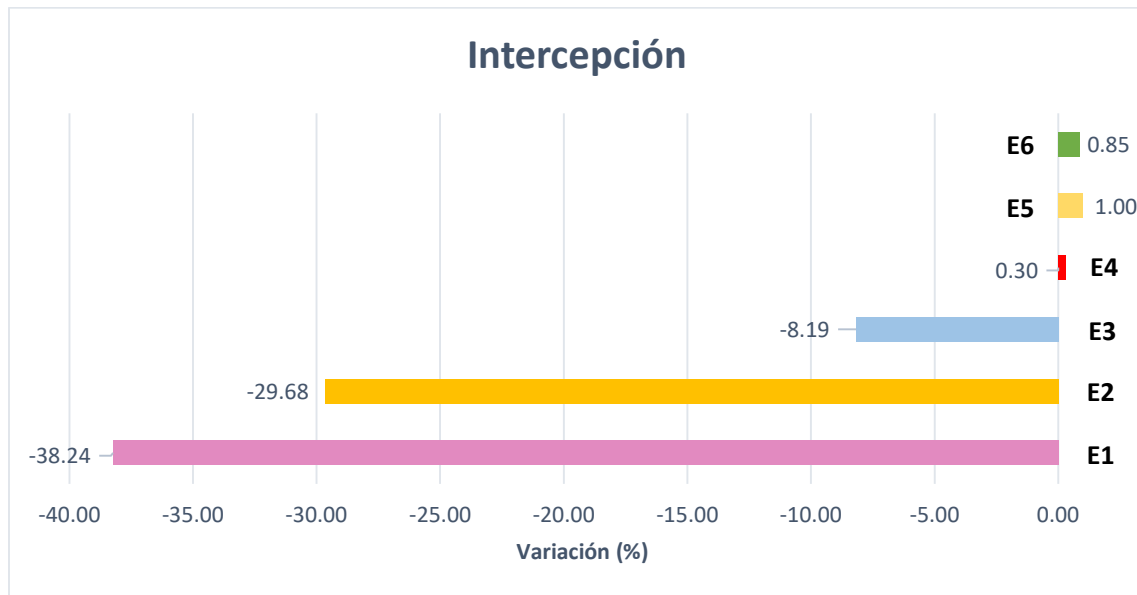
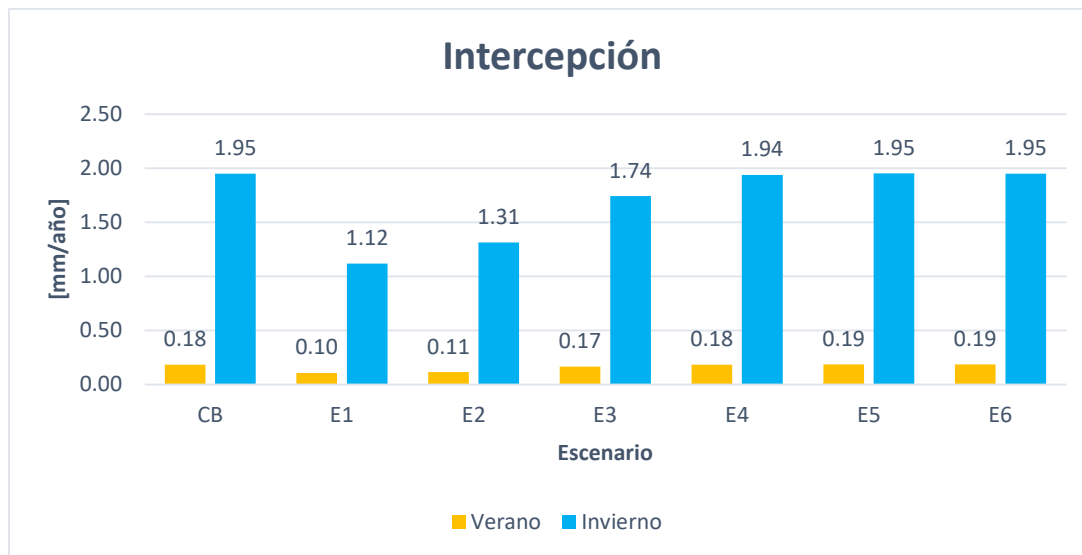


Figura 44.

Variación de parámetro de intercepción en base a los escenarios en temporada de verano e invierno



Evaporación

La evaporación se comporta de manera similar al parámetro de intercepción, ya que, si bien la evaporación del agua desde la superficie del suelo viene dada por factores abióticos como la radiación solar, la temperatura del aire, etc., el bosque nativo ejerce una influencia en las condiciones del microclima, ya que reduce la temperatura de los suelos, aumenta la humedad relativa cerca del suelo y además, aporta en la retención del agua, debido a que presenta un mayor contenido de materia orgánica, una mejor estructura de los suelos, reduciendo también la compactación de estos. En consecuencia, en aquellos escenarios en donde existe un mayor porcentaje de cobertura de bosque nativo por sobre usos de suelo como cultivos agrícolas y plantaciones forestales, como se logra observar en los escenarios 1 y 2, se promueve una menor pérdida de agua por evaporación de los suelos, preservando así la humedad almacenada de manera más eficiente.

Por otra parte, se puede visualizar que en los escenarios 4, 5 y 6 existe un leve aumento en los valores de evaporación, esto impulsado principalmente porque el uso de suelo reemplazado con bosque nativo consistía a suelos libres de vegetación que tienen un valor de intercepción casi cero y en donde, además, las pendientes eran superiores a 25° por lo que el almacenamiento estático también disminuye debido a que existe una menor infiltración de las aguas. Permitiendo que exista una mayor evaporación a la identificada en la condición inicial.

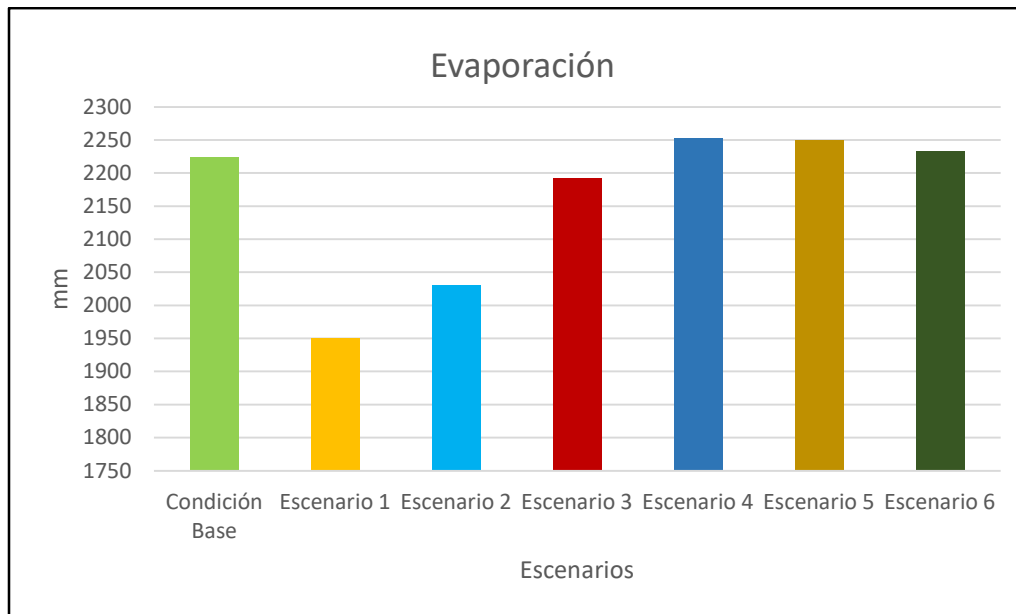
Tabla 25.

Variación de parámetro de evaporación en base a los escenarios

Escenarios	Mm			
	Periodo de 10 años	Promedio anual	Verano	Invierno
Condición Base	2224.20	229.58	39.98	53.78
Escenario 1	1950.74	204.68	34.75	46.22
Escenario 2	2030.00	211.59	35.96	49.05
Escenario 3	2192.76	226.52	39.00	52.94
Escenario 4	2252.78	232.45	40.11	54.65
Escenario 5	2250.09	231.64	39.98	54.20
Escenario 6	2232.90	229.79	39.66	53.90

Figura 45.

Variación de parámetro de evaporación en base a los escenarios



A continuación, en las siguientes figuras se presenta la variación del parámetro evaporación en cada escenario evaluado respecto a la condición inicial, en promedio anual (figura 46), temporada de verano e invierno. (Figura 47), donde se puede observar que existe una disminución en los valores de evapotranspiración en los escenarios 1, 2 y 3, mientras que en los escenarios 4, 5 y 6 existe un aumento respecto a la condición basal.

Figura 46.

Variación de parámetro de evaporación en base a los escenarios (promedio anual)

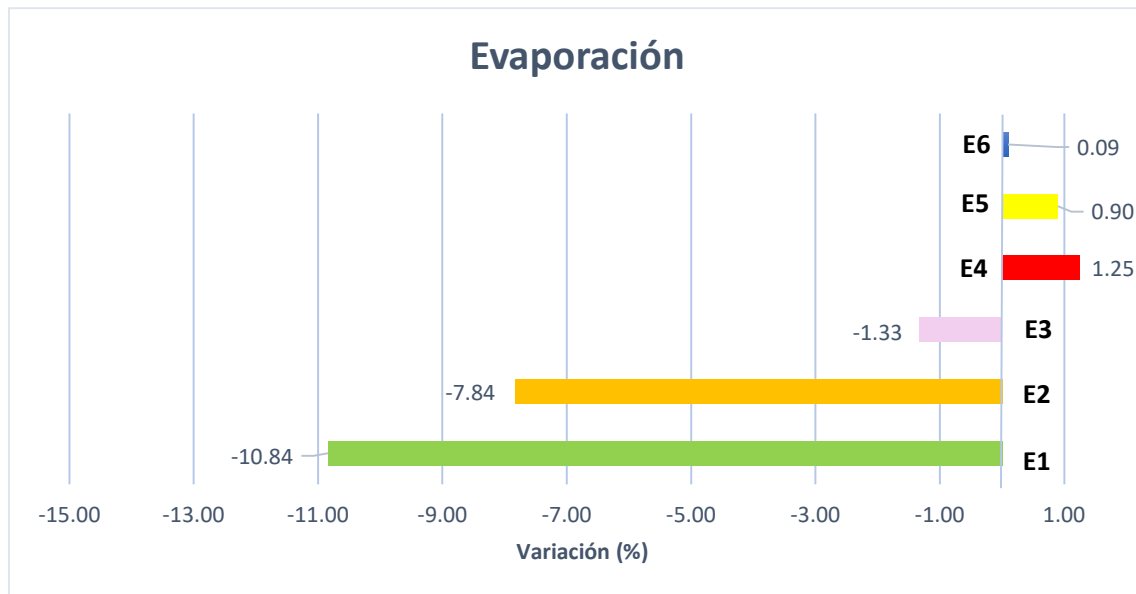
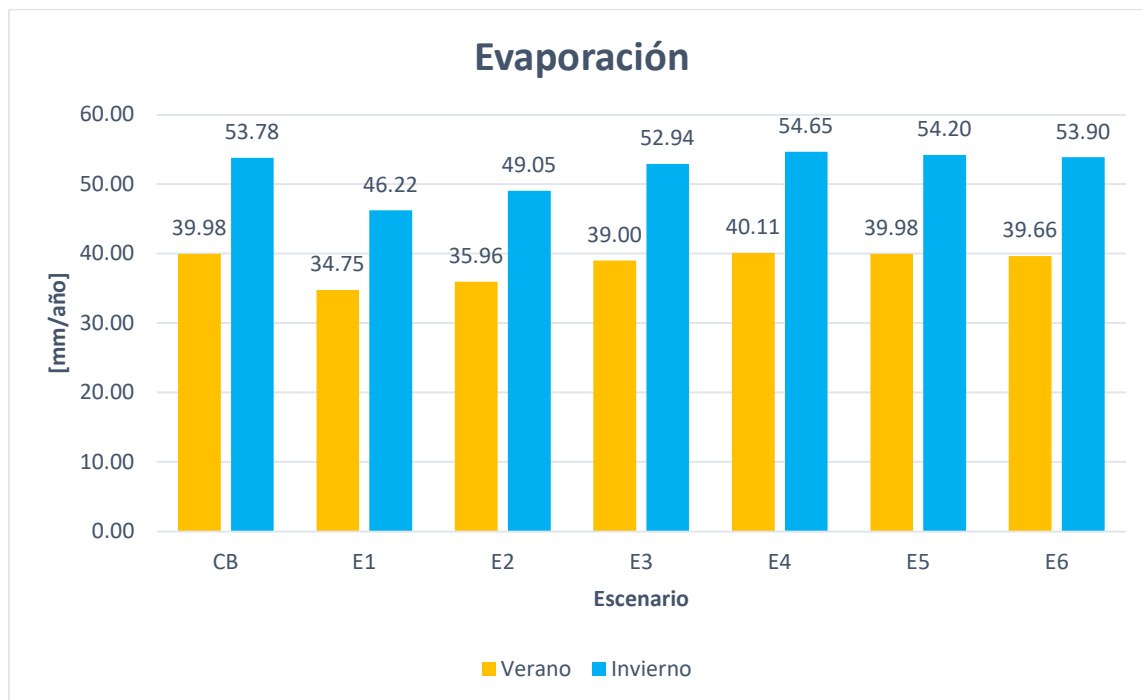


Figura 47.

Variación de parámetro de evaporación en base a los escenarios en temporada de verano e invierno



Almacenamiento estático del suelo

En cuanto al agua almacenada en los suelos, se visualiza un aumento en todos los escenarios con respecto a la condición basal, no obstante, existe un aumento significativo en los escenarios 1 y 2, en donde el uso de suelo principalmente modificado corresponde a plantaciones forestales, que interceptan una mayor cantidad de agua que los bosques nativos. Asimismo, las plantaciones forestales utilizan y evaporan el agua de manera más activa, por lo que, el volumen de agua almacenada en el suelo es bastante más bajo en la condición basal que en los escenarios proyectados.

Mientras que el bosque nativo tal como se menciona anteriormente ayuda a la reducción de la intercepción de la precipitación producida por las plantas y favorece el almacenamiento de agua en los suelos, aportándole mayor humedad, esto debido a que el consumo de agua de los bosques se produce de forma controlada y en un mayor periodo de tiempo.

También, se puede observar en el gráfico (figura 48) que el almacenamiento de agua en el suelo tiende a aproximarse más a la condición inicial a medida que las pendientes aumentan, lo que puede suceder debido a que escenarios con pendientes más pronunciadas favorecen la escorrentía superficial por sobre la infiltración de la precipitación, lo que conllevaría a una disminución del almacenamiento de agua en el suelo.

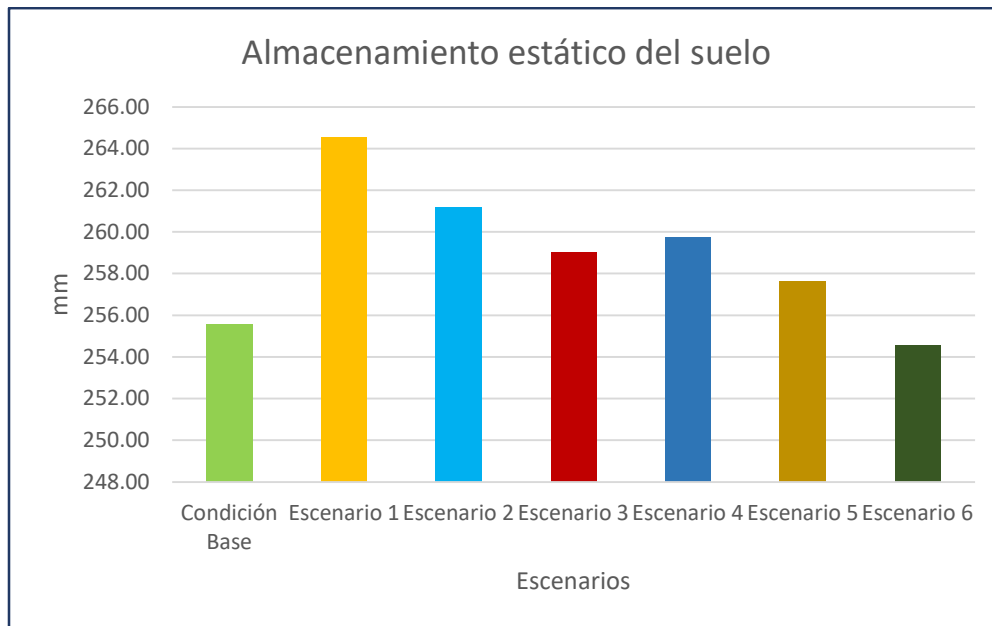
Tabla 26.

Variación de parámetro de almacenamiento estático en base a los escenarios

Escenarios	mm			
	Periodo de 10 años	Promedio anual	Verano	Invierno
Condición Base	255.56	202.20	17.75	252.06
Escenario 1	264.54	208.08	20.88	258.51
Escenario 2	261.16	204.41	19.83	256.91
Escenario 3	259.02	203.70	18.64	256.07
Escenario 4	259.77	203.03	18.34	255.60
Escenario 5	257.63	203.24	18.06	254.61
Escenario 6	254.58	202.19	17.75	252.93

Figura 48.

Variación de parámetro de almacenamiento estático en base a los escenarios



En las siguientes figuras se presenta la variación del parámetro almacenamiento estático en cada escenario evaluado respecto a la condición inicial, en promedio anual (Figura 49), donde se observa que el escenario 1 es aquel que favorece en mayor medida el almacenamiento estático del suelo, mientras que, en el gráfico de temporada de verano e invierno. (Figura 50), se logra identificar que existe un aumento en el almacenamiento en los escenarios 1, no obstante, este aumento no es tan visible como en el promedio anual.

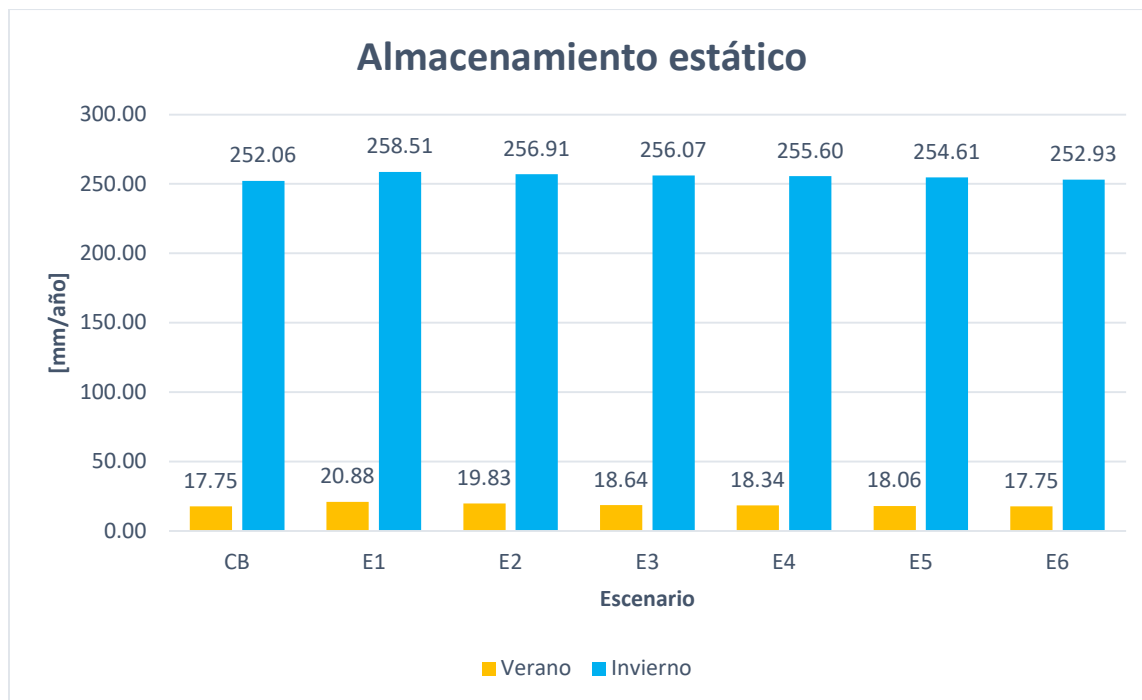
Figura 49.

Variación de parámetro de almacenamiento estático en base a los escenarios (promedio anual)



Figura 50.

Variación de parámetro de almacenamiento estático en base a los escenarios en temporada de verano e invierno



Lluvia directa

El parámetro lluvia directa, hace referencia al agua que va directamente a generar escorrentía superficial casi instantáneamente.

En los escenarios 1, 2 y 3 como se visualiza en el gráfico (figura 51) se ve un aumento en el agua que cae directamente al suelo, esto se debe principalmente a que la intercepción y evaporación de agua es menor, por lo tanto, este valor aumenta.

En el caso de los escenarios 4, 5 y 6 este valor disminuye y esto se debe a que el uso de suelo reemplazado por bosque nativo consistía en áreas libres de vegetación, praderas y usos urbanos, donde la intercepción era mucho menor a la de los bosques nativos e inclusive 0, lo que provoca una intercepción mayor a la condición basal y por ende una disminución en la lluvia directa que cae sobre el suelo y el cauce.

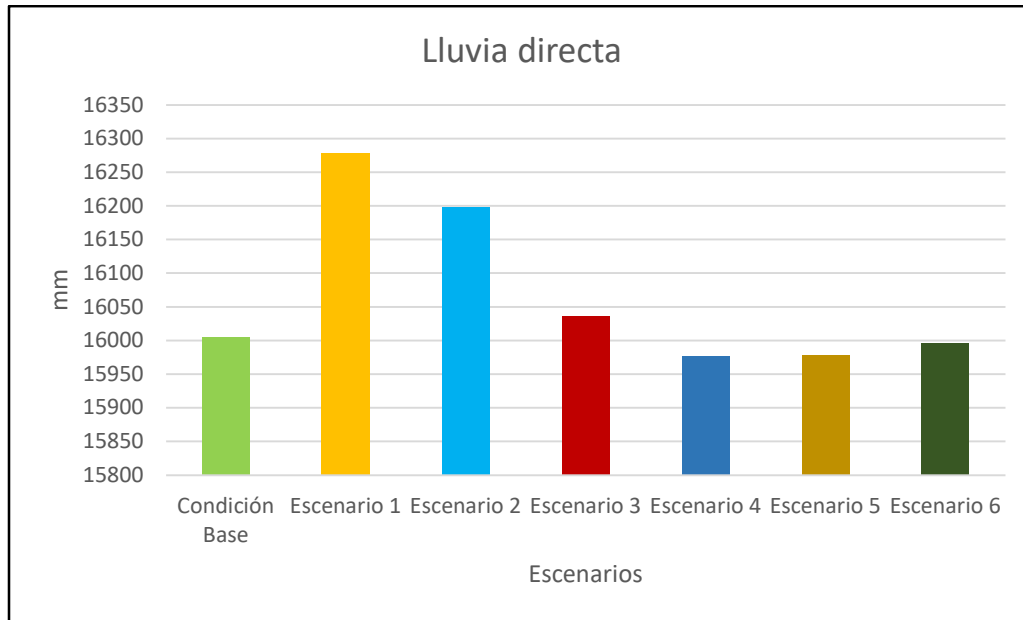
Tabla 27.

Variación de parámetro de lluvia directa en base a los escenarios

Escenarios	mm			
	Periodo de 10 años	Promedio anual	Verano	Invierno
Condición Base	16004.76	1591.29	94.81	725.15
Escenario 1	16278.29	1625.87	100.32	787.61
Escenario 2	16199.00	1611.99	99.11	779.54
Escenario 3	16036.21	1596.99	95.97	735.74
Escenario 4	15976.17	1592.58	95.02	730.21
Escenario 5	15978.85	1590.82	95.00	728.78
Escenario 6	15996.05	1591.00	94.78	725.50

Figura 51.

Variación de parámetro de lluvia directa en base a los escenarios



En las siguientes figuras se presenta la variación del parámetro de lluvia directa en cada escenario evaluado respecto a la condición inicial, en promedio anual (figura 52), donde se observa que el escenario 1 presenta mayor cantidad de precipitación que cae sobre la cuenca sin ser interceptada por las plantas. Lo mismo ocurre durante las temporadas de verano e invierno en figura 53, no obstante, este aumento no es tan visible como en el promedio anual.

Figura 52.

Variación de parámetro de Lluvia directa en base a los escenarios (promedio anual)

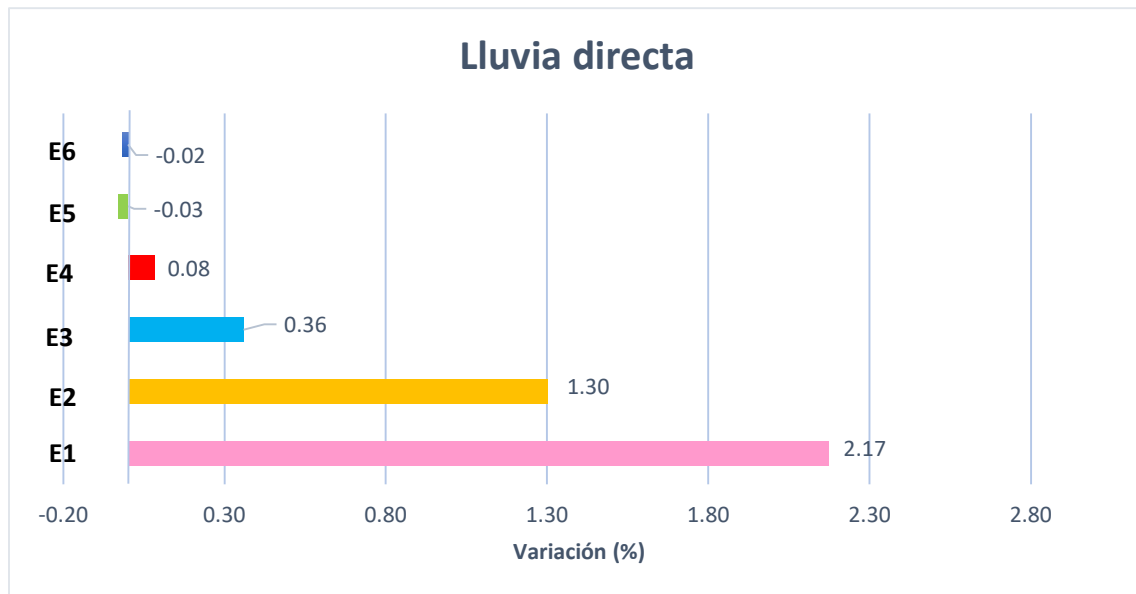
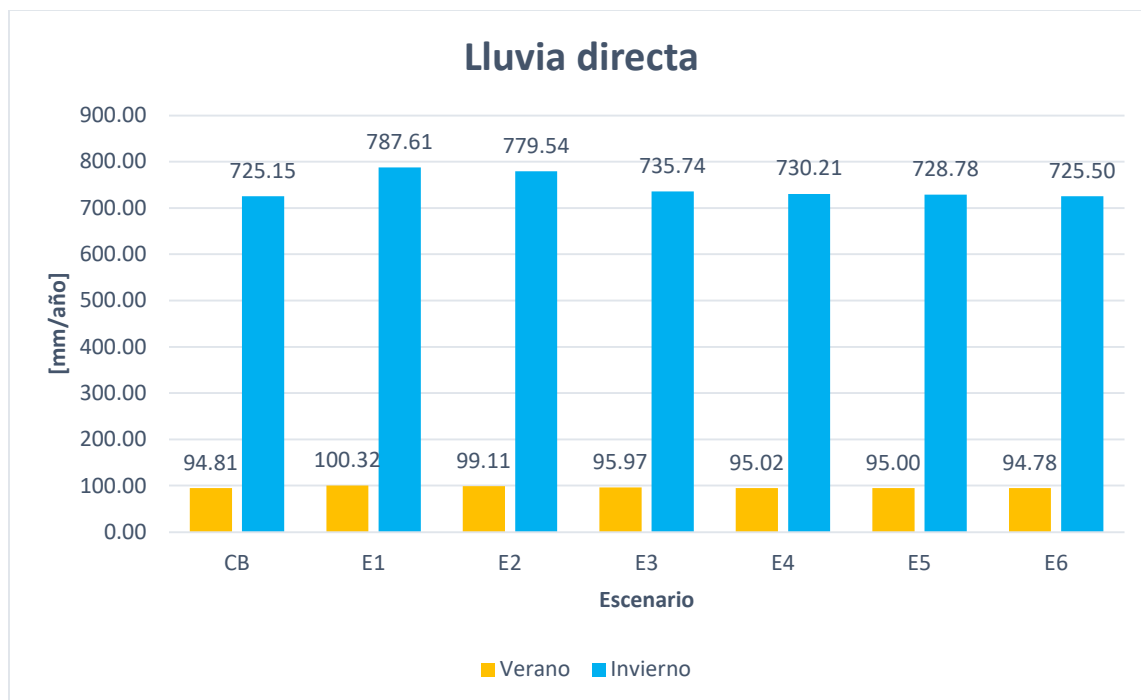


Figura 53.

Variación de parámetro lluvia directa en base a los escenarios en temporada de verano e invierno



Evapotranspiración

La evapotranspiración por su parte responde a dos procesos importantes, uno es la evaporación desde el suelo y desde la cubierta de las plantas, y el segundo corresponde a la transpiración desde las hojas de las plantas.

La evapotranspiración sigue el mismo escenario que la evaporación, en los escenarios 1, 2 y 3 existe una disminución en la evapotranspiración, esto se debe principalmente a que la transpiración y la evaporación del bosque nativo fluctúa entre 0,1 y 0,5 mm dependiendo de la temporada, a diferencia de las plantaciones forestales donde el valor se mantiene constante en 1 mm/mes durante todo el año.

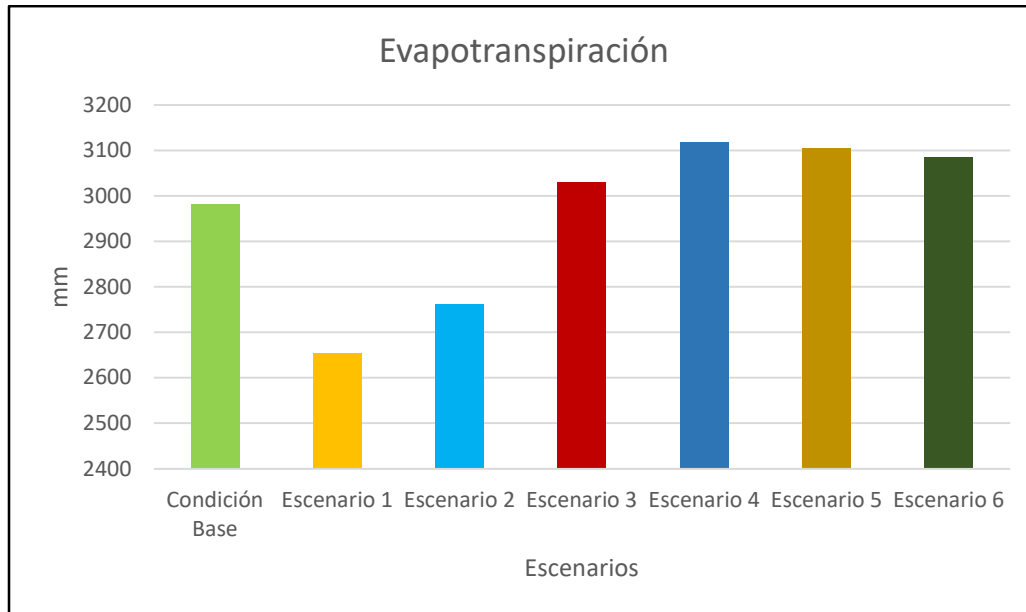
Tabla 28.

Variación de parámetro de evapotranspiración en base a los escenarios

Escenarios	mm			
	Periodo de 10 años	Promedio anual	Verano	Invierno
Condición Base	2981.66	228.55	49.41	16.76
Escenario 1	2654.98	204.11	41.78	12.75
Escenario 2	2762.52	215.26	42.32	13.90
Escenario 3	3029.65	227.07	46.79	14.35
Escenario 4	3117.75	231.07	47.60	15.17
Escenario 5	3105.18	230.27	48.26	15.99
Escenario 6	3084.83	228.55	50.82	16.83

Figura 54.

Variación de parámetro de evapotranspiración en base a los escenarios



A continuación, en las siguientes figuras se presenta la variación del parámetro evapotranspiración en cada escenario evaluado respecto a la condición inicial, en promedio anual (figura 55) y temporada de verano e invierno. (figura 56). Donde se puede observar la misma tendencia, en donde la evapotranspiración disminuye con el aumento de cobertura de bosque nativo por sobre las plantaciones forestales (escenario 1, 2 y 3), mientras que disminuye en aquellos escenarios en donde el bosque nativo reemplaza zonas sin vegetación.

Figura 55.

Variación de parámetro de evapotranspiración en base a los escenarios (promedio anual)

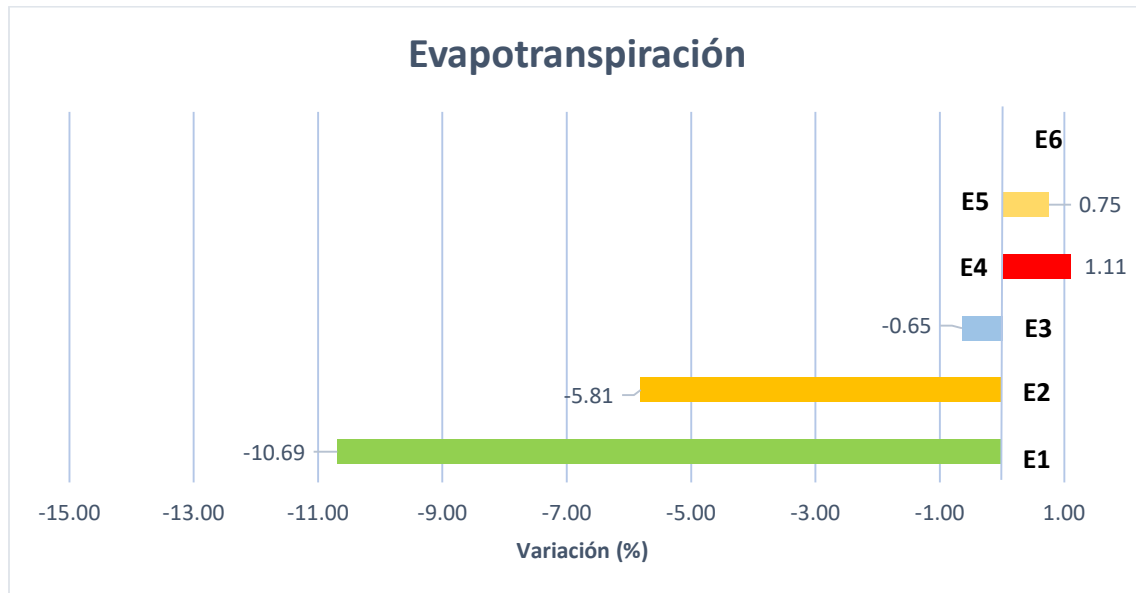
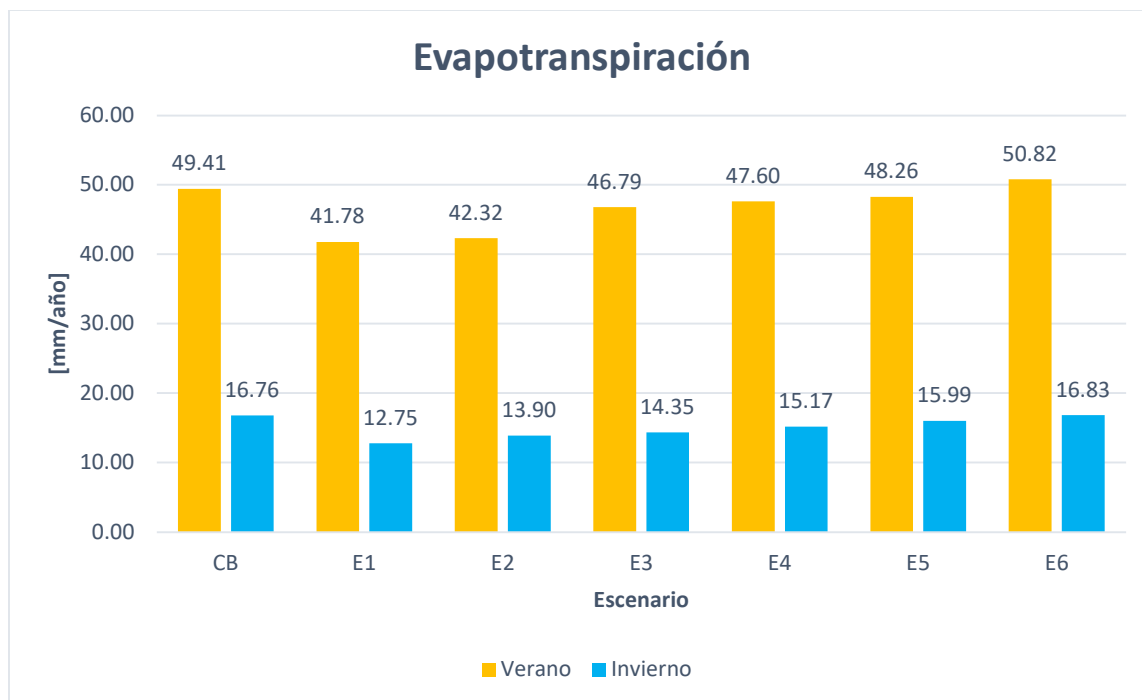


Figura 56.

Variación de parámetro evapotranspiración en base a los escenarios en temporada de verano e invierno



Excedente

El excedente hidrológico en el modelo hidrológico TETIS viene dado por el agua que queda disponible para generar escorrentía, después de que han satisfecho las demandas de los procesos de pérdida. Se reparte entre la escorrentía superficial, interflujo y el flujo base.

En este contexto, los resultados obtenidos indican que existe un aumento en el volumen de excedente en aquellos escenarios en donde disminuyen las pérdidas por cobertura vegetal. Específicamente, una menor interceptación, evaporación y evapotranspiración producto al aumento de bosque nativo permite que más agua se mantenga disponible para escurrir.

Por otro lado, en los escenarios 4 y 5 en donde la interceptación vegetal, evaporación y evapotranspiración el excedente disminuye, como ocurre en el escenario 4, el cual presenta el volumen de agua de excedente que alcanza a ingresar al sistema de escorrentía.

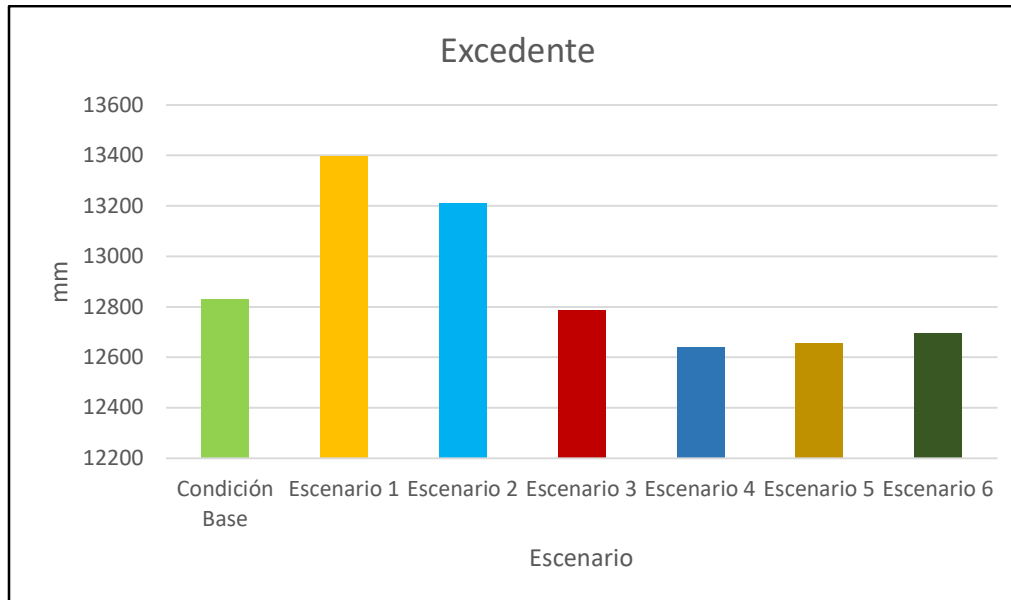
Tabla 29.

Variación de parámetro del excedente en base a los escenarios

Escenarios	mm			
	Periodo de 10 años	Promedio anual	Verano	Invierno
Condición Base	12829.34	1105.42	10.43	433.94
Escenario 1	13395.54	1166.22	12.18	458.50
Escenario 2	13211.40	1110.84	10.62	454.62
Escenario 3	12787.12	1101.43	9.88	435.76
Escenario 4	12639.23	1095.34	9.24	430.23
Escenario 5	12656.05	1080.73	9.68	428.31
Escenario 6	12696.55	1076.43	10.14	424.24

Figura 57.

Variación de parámetro de excedente en base a los escenarios



A continuación, en las siguientes figuras se presenta la variación del parámetro excedente en cada escenario evaluado respecto a la condición inicial, en promedio anual (figura 58) y temporada de verano e invierno. (figura 59). Donde se puede observar que el flujo de excedente tiende a aumentar en los escenarios 1 y 2, mientras disminuye a medida que las pendientes son más pronunciadas.

Figura 58.

Variación de parámetro de excedente en base a los escenarios (promedio anual)

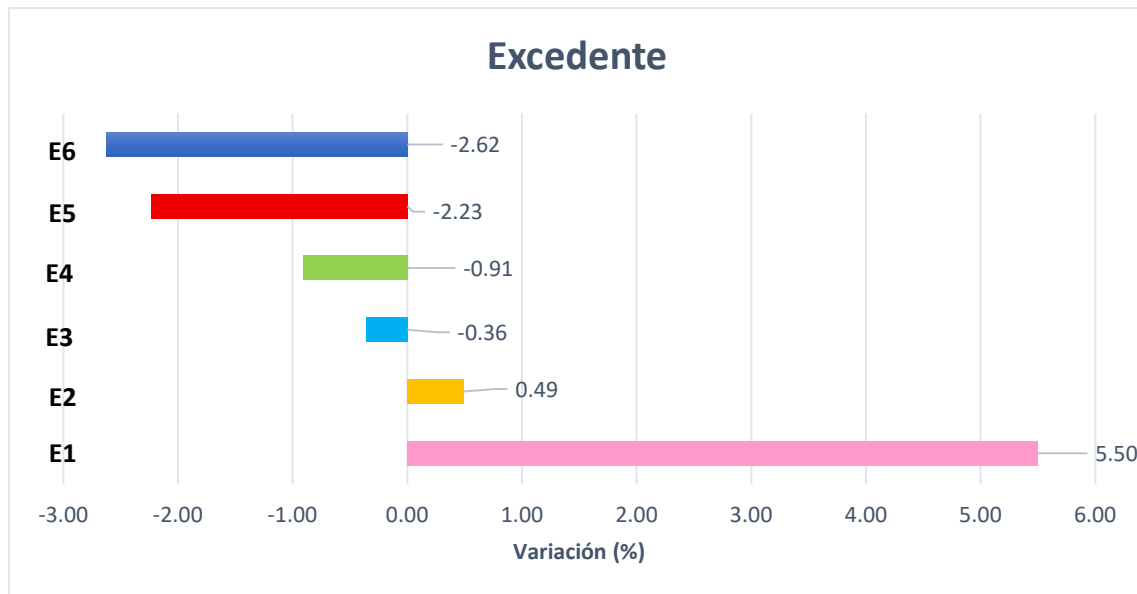
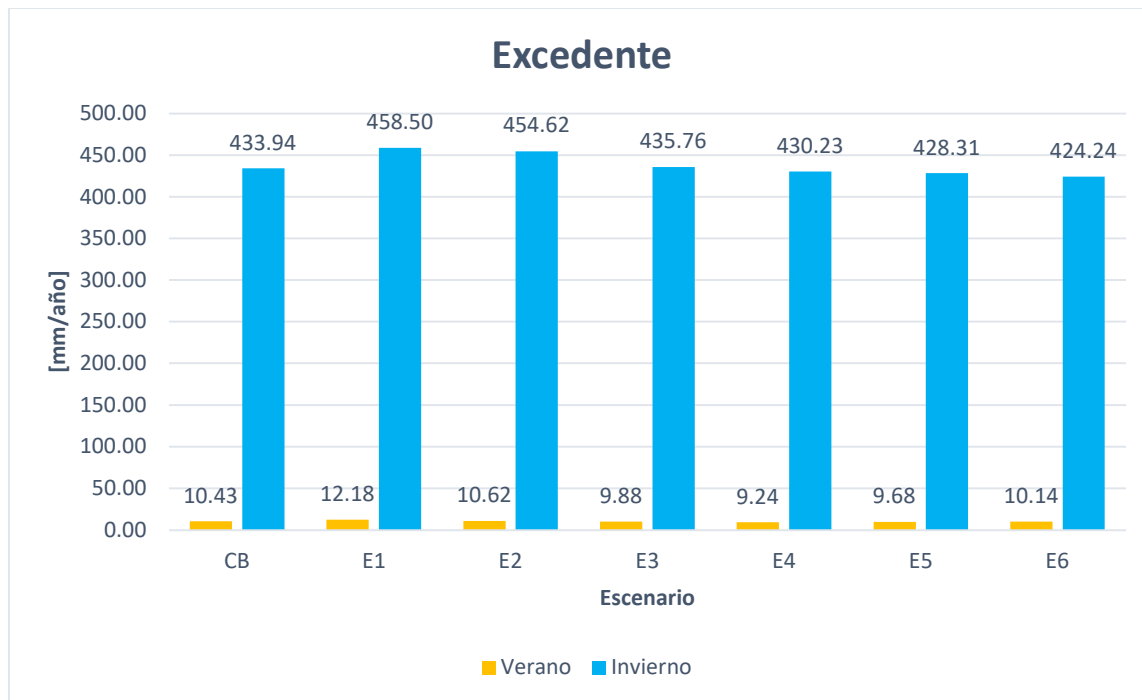


Figura 59.

Variación de parámetro excedente en base a los escenarios en temporada de verano e invierno



Escorrentía directa

La escorrentía directa, es la porción de lluvia que no es interceptada, evaporada o percolada y fluye sobre las laderas. En el modelo hidrológico TETIS, la escorrentía directa está fuertemente relacionada con los parámetros de infiltración y de la humedad del suelo.

En los resultados obtenidos para los distintos escenarios, se puede visualizar en el gráfico anterior que en cada uno de los escenarios evaluados existe una disminución en cuanto a la observado en la condición basal. No obstante, 3, 4 y 5 son aquellos escenarios con una mayor disminución de este parámetro, esto viene dado principalmente a que el área restaurada con bosque nativo corresponde a pendientes mayores a 25°, en donde, según lo indicado por diversos autores se favorece la escorrentía por sobre la infiltración, ya que la velocidad del flujo es mayor que en zonas con pendientes leves.

Si bien en el escenario 3 existía una disminución en la interceptación al mismo tiempo observamos un aumento en la infiltración, ya que, aunque las características de estas áreas favorecen la escorrentía no anulan la capacidad de infiltración de un suelo restaurado.

Una mayor superficie utilizada por bosque nativo significa una mejora en las propiedades de los suelos, permitiendo que el agua se estanque temporalmente en microdepresiones o en capas de hojas e infiltrar en el perfil del suelo. Lo que significan una disminución en la escorrentía del suelo.

por lo tanto, al aumentar la cobertura de bosque nativo por sobre usos de suelos presentes en esas áreas, aumenta la interceptación del agua, la infiltración, el almacenamiento de agua en los suelos y en consecuencia la escorrentía superficial disminuye.

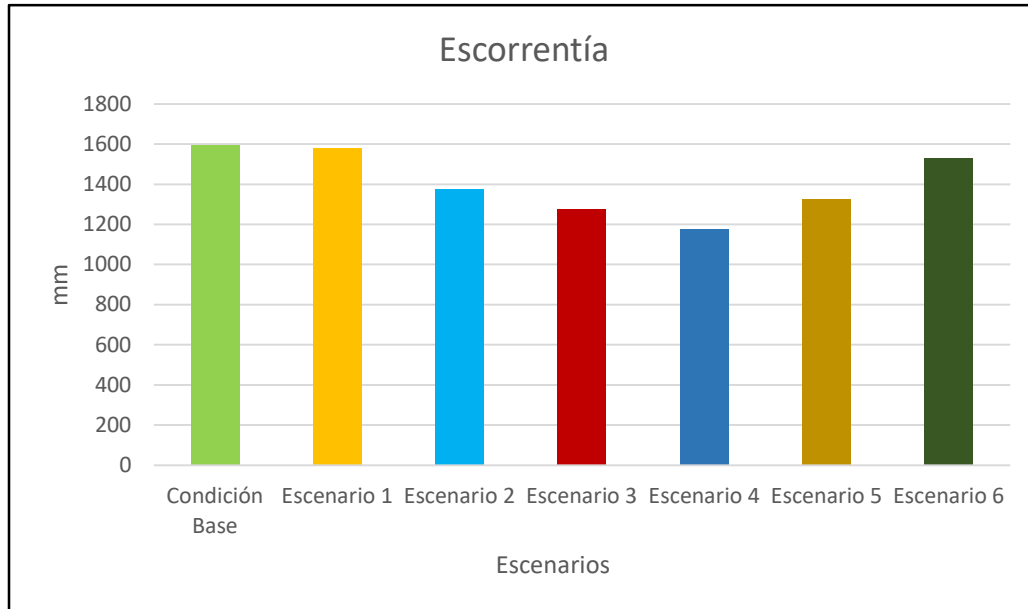
Tabla 30.

Variación de parámetro de la escorrentía en base a los escenarios

Escenarios	mm			
	Periodo de 10 años	Promedio anual	Verano	Invierno
Condición Base	1593.27	159.62	12.25	67.00
Escenario 1	1580.74	158.23	11.35	66.95
Escenario 2	1373.97	153.04	9.89	61.95
Escenario 3	1275.74	116.51	8.45	52.43
Escenario 4	1178.21	121.94	9.16	56.96
Escenario 5	1326.25	132.76	9.52	60.37
Escenario 6	1528.85	159.48	10.98	67.62

Figura 60.

Variación de parámetro de evapotranspiración en base a los escenarios



A continuación, en las siguientes figuras se presenta la variación del parámetro Escorrentía directa en cada escenario evaluado respecto a la condición inicial, en promedio anual (Figura 61) y temporada de verano e invierno. (Figura 62).

Figura 61.

Variación de parámetro de escorrentía en base a los escenarios (promedio anual)

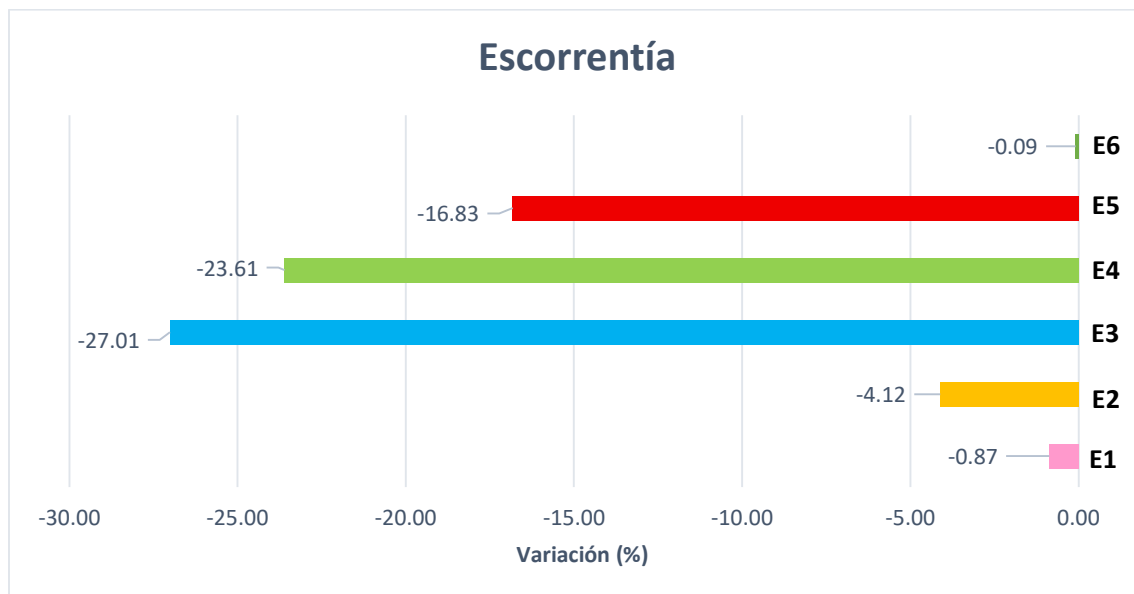
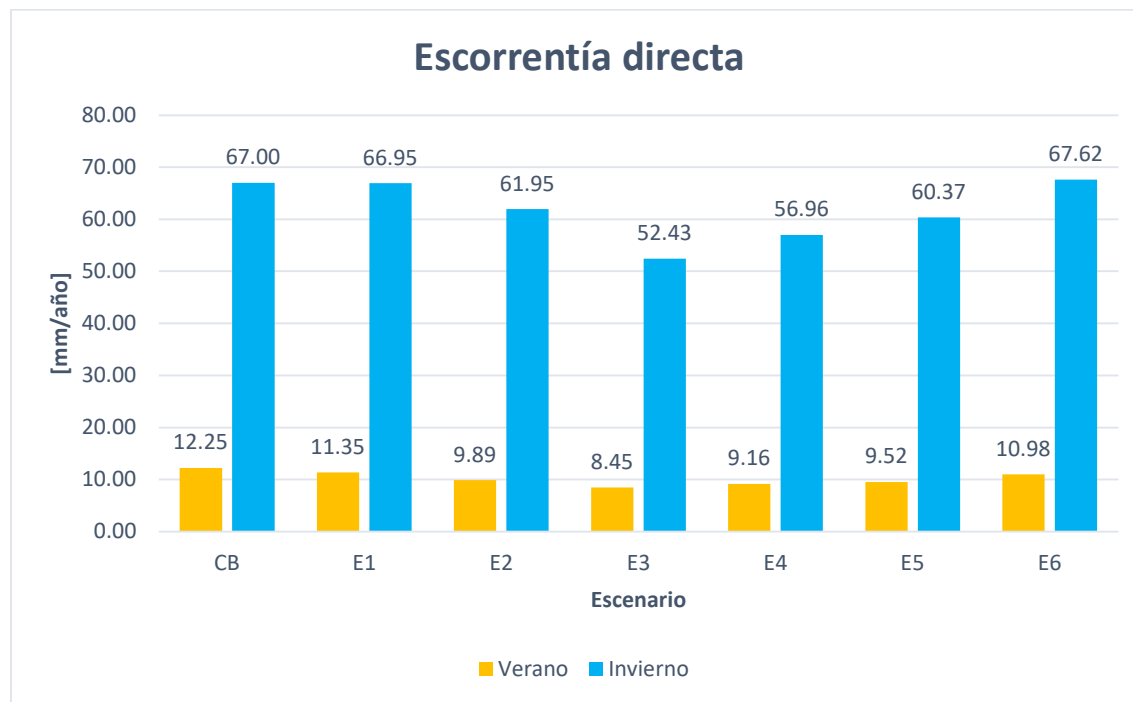


Figura 62.

Variación de parámetro escorrentía en base a los escenarios en temporada de verano e invierno



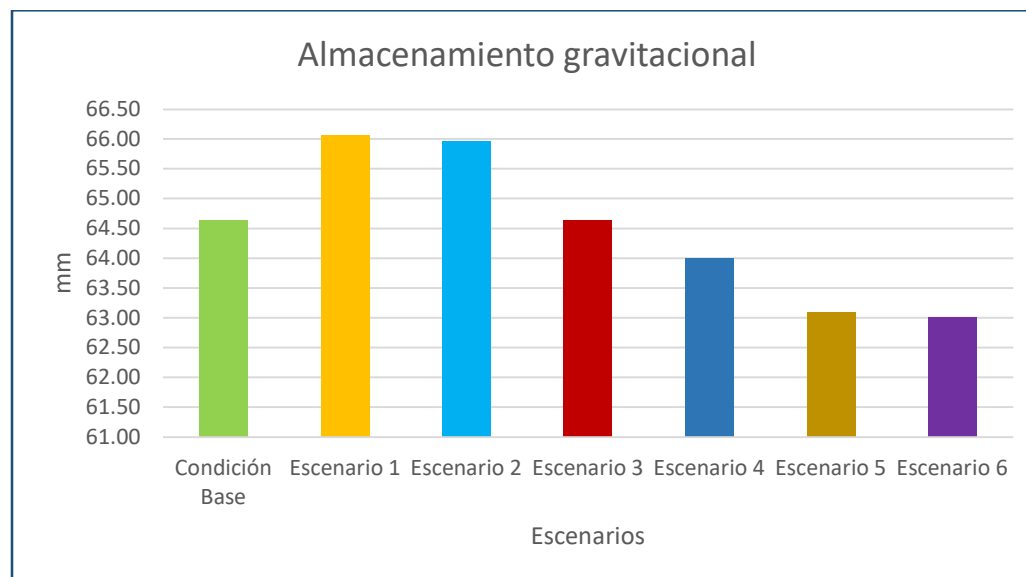
Almacenamiento gravitacional

El almacenamiento gravitacional en el modelo hidrológico TETIS se puede entender como el agua gravitacional almacenada en el suelo, en donde parte de este volumen ingresa al nivel inferior por medio de la percolación, otra parte produce el interflujo y el resto puede volver a la superficie como escorrentía de retorno. El almacenamiento gravitacional se desarrolla inicialmente por aquella agua que se va concentrando en pequeñas depresiones, grietas o conductos por el interior de la capa.

En base a los resultados de la modelación es posible indicar que, el almacenamiento gravitacional aumenta ligeramente en tres de los escenarios evaluados, ya que si bien, es un parámetro que depende principalmente por la porosidad del suelo, un aumento en la cobertura de bosque nativo puede significar un aumento de la materia orgánica y una mejora de la estructura del suelo ya que representa diferentes profundidades de raíces y patrones de crecimiento. Y por consecuencia, mejorar levemente el factor de almacenamiento gravitacional.

Tabla 31.*Variación de parámetro almacenamiento gravitacional en base a los escenarios*

Escenarios	mm			
	Periodo de 10 años	Promedio anual	Verano	Invierno
Condición Base	64.64	52.73	0.09	57.66
Escenario 1	66.06	55.09	0.09	62.16
Escenario 2	65.96	54.49	0.09	60.54
Escenario 3	64.64	53.73	0.09	59.59
Escenario 4	64.00	53.63	0.09	59.29
Escenario 5	63.10	53.09	0.09	58.54
Escenario 6	63.00	52.38	0.09	57.61

Figura 63.*Variación de parámetro Almacenamiento gravitacional en base a los escenarios*

En figura 64 se presenta la variación del parámetro respecto a cada escenario evaluado en un promedio anual y en la figura 65 se presenta la variación de este parámetro en las temporadas de verano e invierno.

Figura 64.

Variación de parámetro de Almacenamiento gravitacional en base a los escenarios (promedio anual)

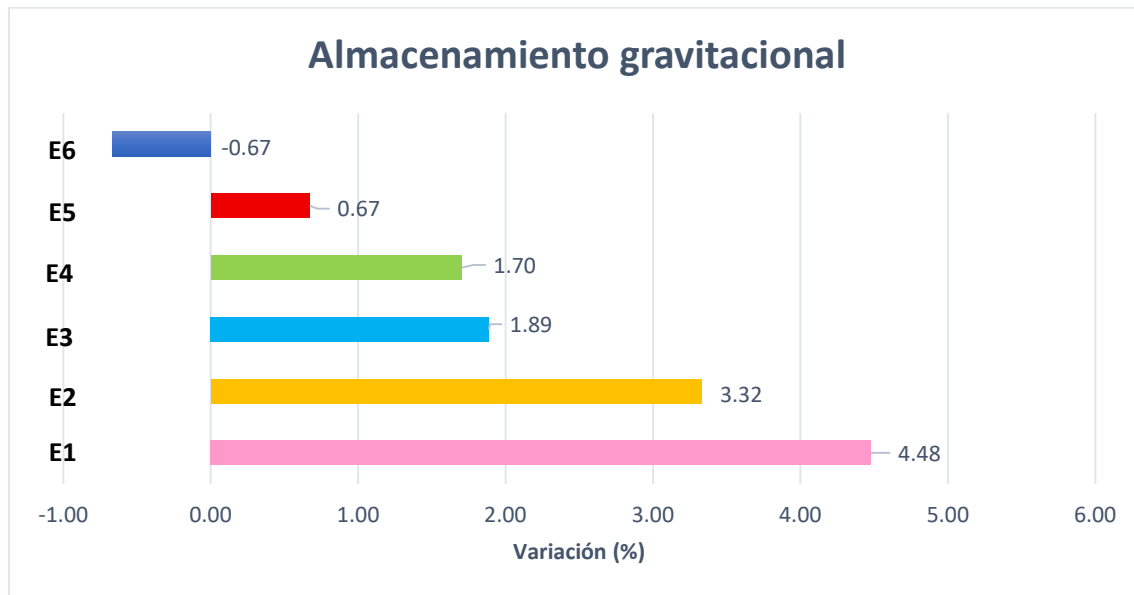
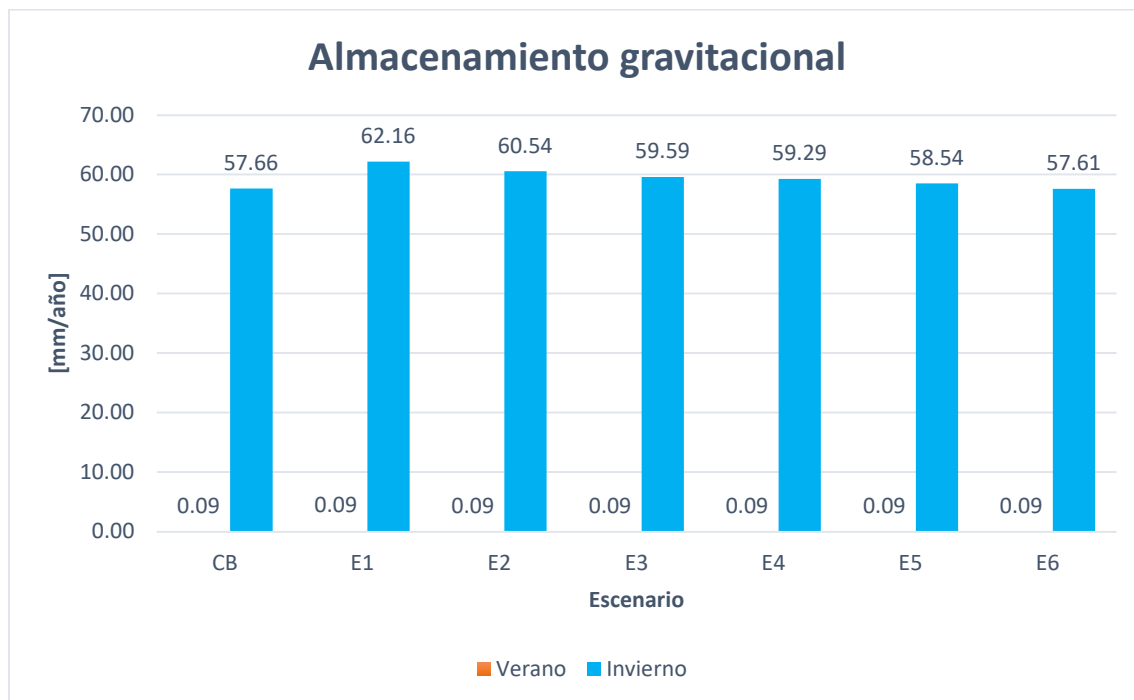


Figura 65.

Variación de parámetro Almacenamiento gravitacional en base a los escenarios en temporada de verano e invierno



Infiltración

En base a los resultados presentados es posible indicar que, la infiltración aumenta en todos los escenarios propuestos y disminuye a medida que las pendientes aumentan, aproximándose cada vez más a la condición basal. Esto se debe, a que, si bien la infiltración viene otorgada principalmente por las características del suelo, este puede ser mejorado con la cobertura de bosque nativo, ya que, mejora la estructura y la porosidad del suelo, incorpora mayor cantidad de materia orgánica y aumenta la retención de agua en la capa superficial por sobre coberturas como plantaciones forestales y disminuye la velocidad del flujo superficial. En los escenarios con mayores pendientes, la infiltración no sufre mayores cambios con respecto a la condición inicial, y esto viene dado principalmente por la magnitud de las pendientes, al ser más empinadas que la de los dos primeros escenarios aumenta la velocidad del flujo superficial de la ladera, por lo que disminuye la infiltración.

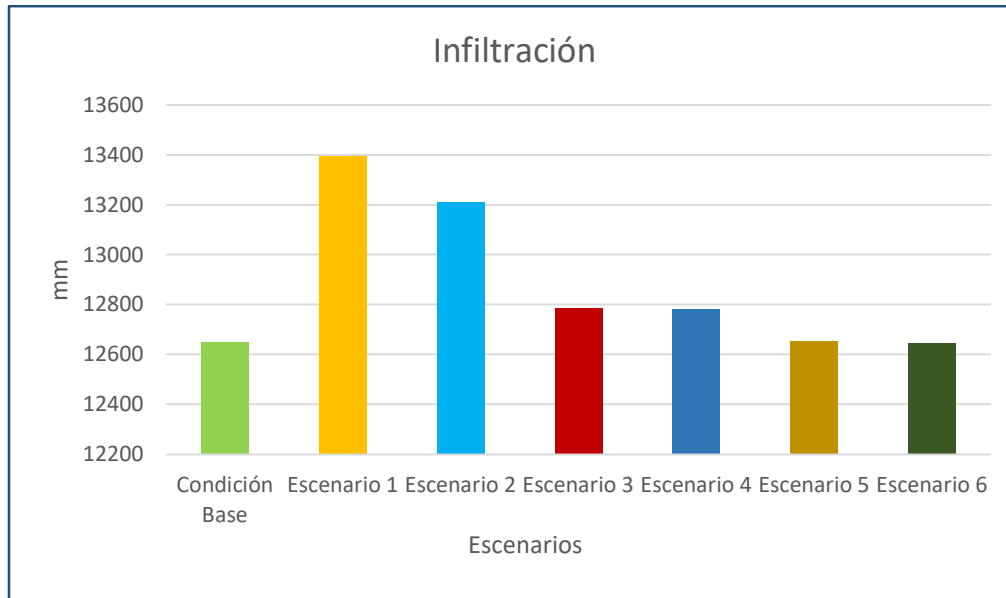
Tabla 32.

Variación de parámetro infiltración en base a los escenarios

Escenarios	Mm			
	Periodo de 10 años	Promedio anual	Verano	Invierno
Condición Base	12651.17	1112.79	9.50	437.37
Escenario 1	13395.04	1162.18	11.96	459.50
Escenario 2	13210.94	1148.80	10.88	455.62
Escenario 3	12786.67	1126.29	10.28	445.46
Escenario 4	12780.57	1119.48	9.91	441.23
Escenario 5	12655.61	1114.89	9.77	439.61
Escenario 6	12646.45	1110.69	9.23	435.14

Figura 66.

Variación de parámetro Infiltración en base a los escenarios



En las siguientes figuras se presenta la variación del parámetro infiltración en cada escenario evaluado respecto a la condición inicial, en promedio anual (Figura 67), donde se observa que existe una mayor cantidad de infiltración de agua en el escenario 1. Lo mismo ocurre durante las temporadas de verano e invierno en Figura 68, no obstante, este aumento no es visible durante la temporada de verano.

Figura 67.

Variación de parámetro de infiltración en base a los escenarios (promedio anual)

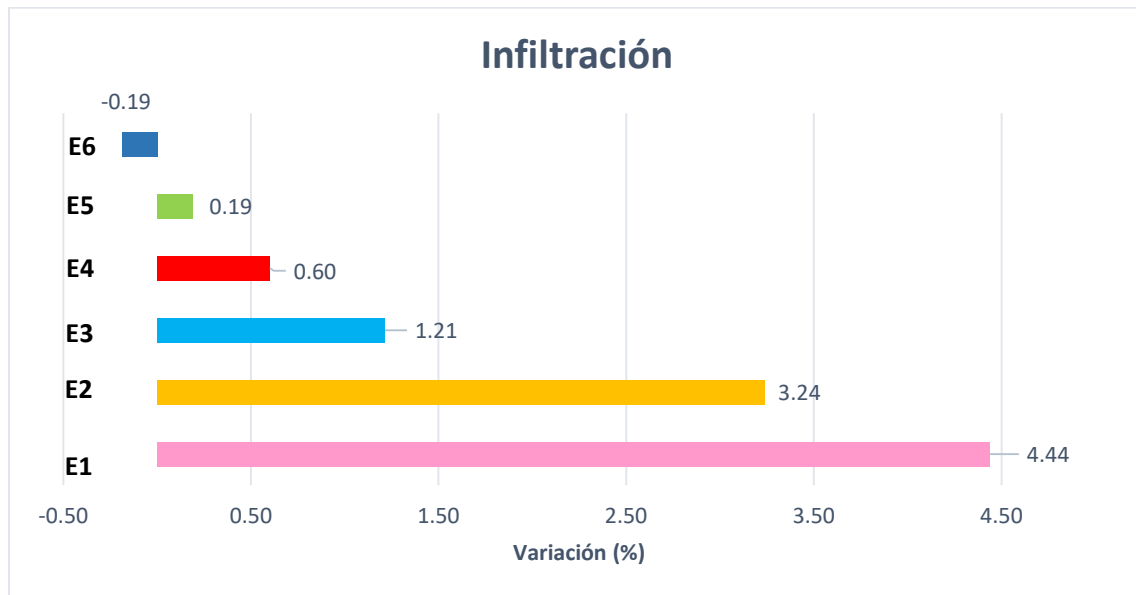
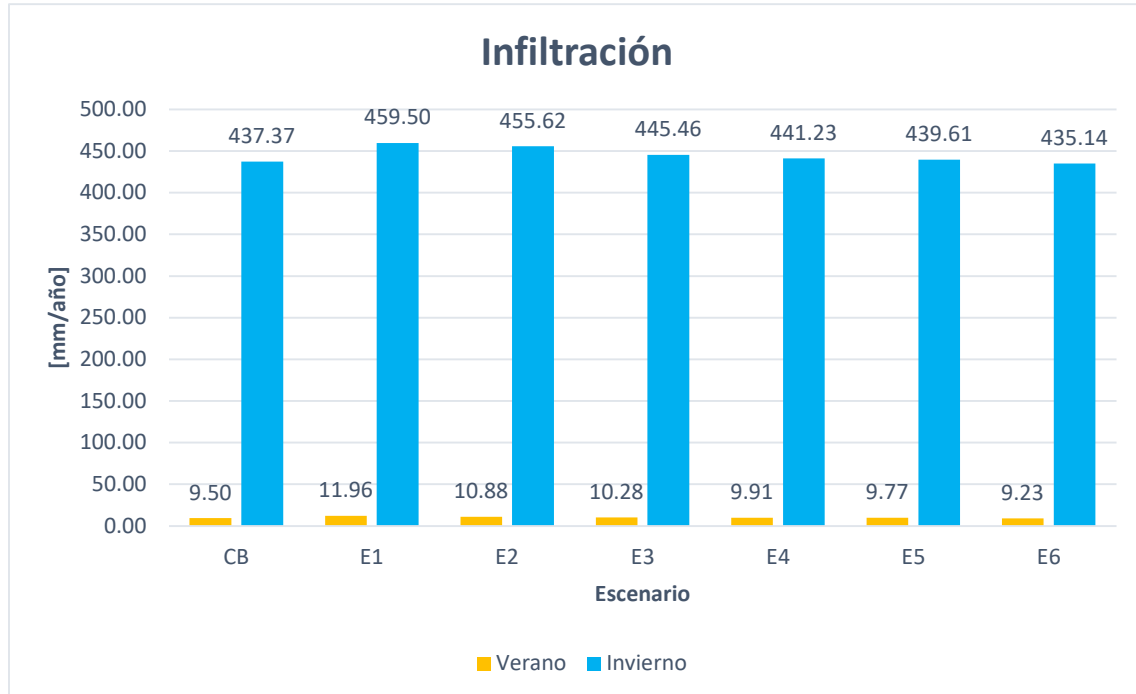


Figura 68.

Variación de parámetro infiltración en base a los escenarios en temporada de verano e invierno



Interflujo

En el caso del interflujo ocurre un escenario similar al parámetro de infiltración, esto se debe a que el interflujo está directamente relacionado con la infiltración y el almacenamiento gravitacional, por lo que, un aumento en estos dos parámetros concluirá en un aumento del volumen del interflujo. Sin embargo, como se puede observar en el gráfico anterior presenta un incremento en el escenario 2 por sobre el escenario 1, lo que puede relacionarse a que, el escenario 2 presenta pendientes más pronunciadas que el escenario 1, lo que aumentaría la velocidad del flujo, disminuyendo la capacidad de que el agua se estanque y por consecuencia percole más rápido hacia el flujo subterráneo. Si el flujo se mueve más rápido aumenta el tiempo en el suelo tarda en saturarse y, por lo tanto, este flujo puede incluirse en la escorrentía total.

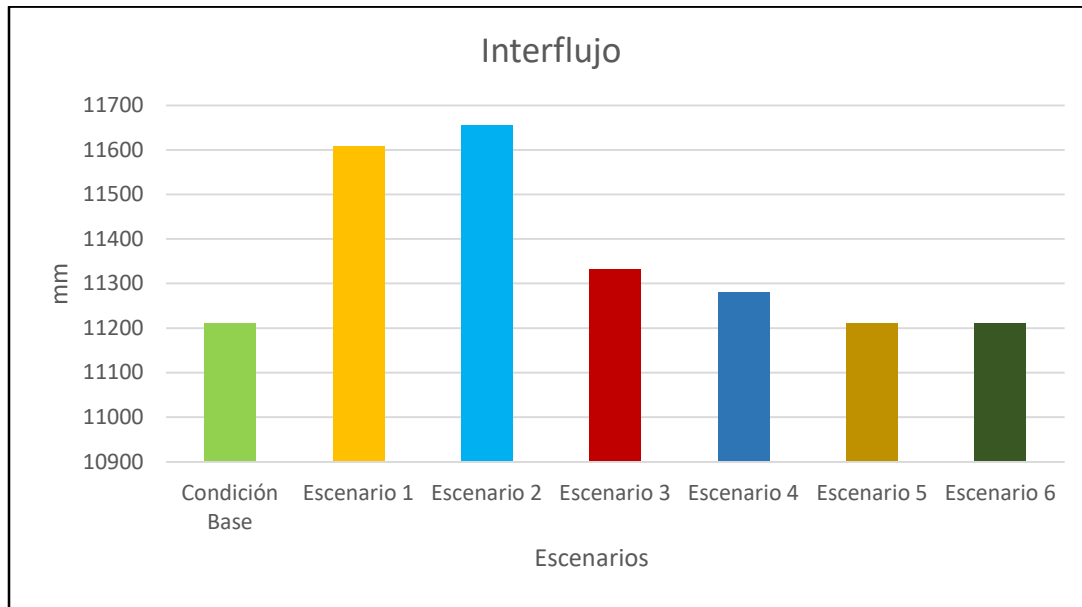
Tabla 33.

Variación de parámetro interflujo en base a los escenarios

Escenarios	mm			
	Periodo de 10 años	Promedio anual	Verano	Invierno
Condición Base	11209.98	954.27	0.50	289.96
Escenario 1	11608.72	993.01	0.51	298.53
Escenario 2	11656.01	1008.12	0.57	304.23
Escenario 3	11331.71	979.79	0.51	296.52
Escenario 4	11281.59	977.92	0.51	295.90
Escenario 5	11210.98	967.20	0.51	294.43
Escenario 6	11211.94	953.74	0.51	290.15

Figura 69.

Variación de parámetro Interflujo en base a los escenarios



En Figura 70 se presenta la variación del parámetro respecto a cada escenario evaluado en un promedio anual y en la Figura 71 se presenta la variación de este parámetro en las temporadas de verano e invierno.

Figura 70.

Variación de parámetro de interflujo en base a los escenarios (promedio anual)

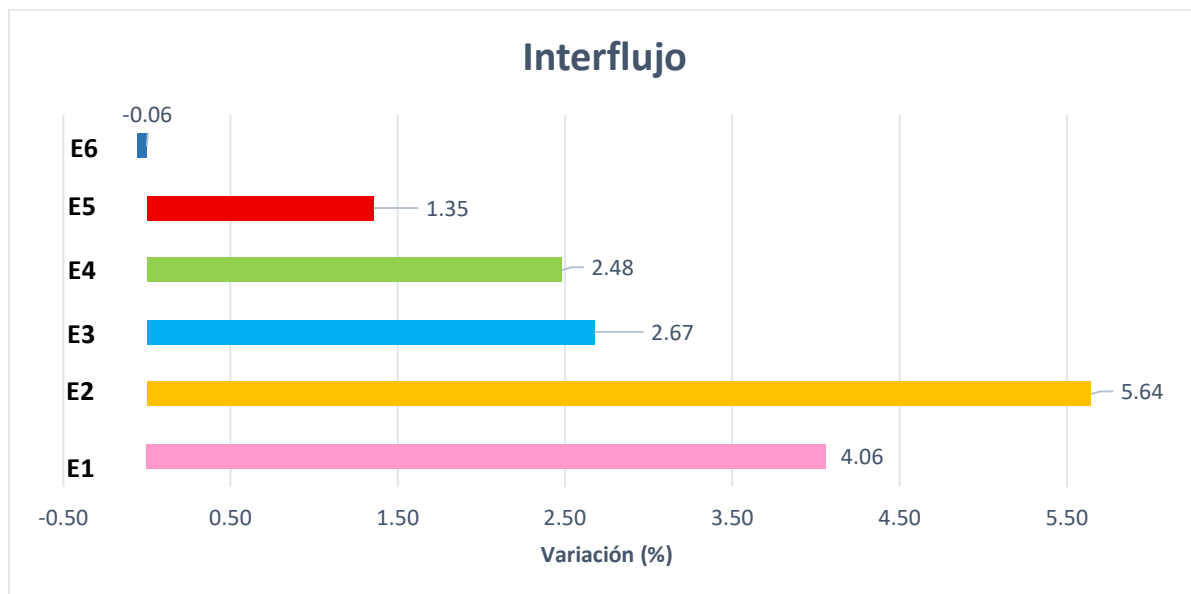
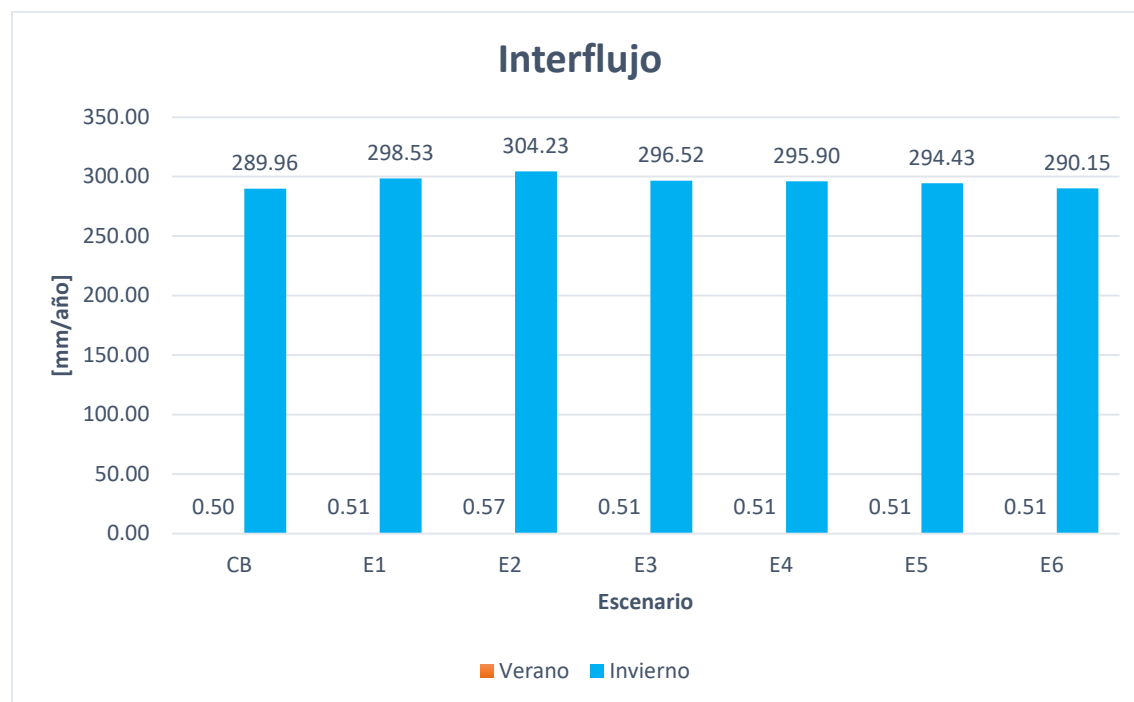


Figura 71.

Variación de parámetro interflujo en base a los escenarios en temporada de verano e invierno



Percolación y Flujo subterráneo

En cuanto a la percolación y el flujo subterráneo, podemos observar una tendencia a aumentar en todos los escenarios evaluados, con una predominancia en los dos primeros escenarios.

La percolación y posteriormente el flujo subterráneo tienden a aumentar en suelos con mayor infiltración y con menor pendiente (escenarios 1), esto debido a que, la velocidad del flujo disminuye lo que permite que el agua se estanque en depresiones y grietas, lo que permite que el suelo llegue a su punto de saturación mayor rapidez, favoreciendo así la percolación, ya que, tal como se mencionaba anteriormente, a mayor pendiente se favorece la escorrentía por sobre la infiltración y percolación.

Además, es importante mencionar que en cada uno de los escenarios evaluados se registra un aumento en la percolación y flujo subterráneo respecto a la condición base, esto viene dado porque en todos los escenarios la infiltración aumenta.

Tabla 34.

Variación de parámetro Percolación en base a los escenarios

Escenarios	mm			
	Periodo de 10 años	Promedio anual	Verano	Invierno
Condición Base	173.83	2.04	0.01	1.09
Escenario 1	200.14	2.32	0.01	1.20
Escenario 2	176.00	2.06	0.01	1.10
Escenario 3	174.39	2.04	0.01	1.09
Escenario 4	174.19	2.04	0.01	1.09
Escenario 5	174.13	2.04	0.01	1.09
Escenario 6	174.21	2.04	0.01	1.09

Figura 72.

Variación de parámetro Percolación en base a los escenarios

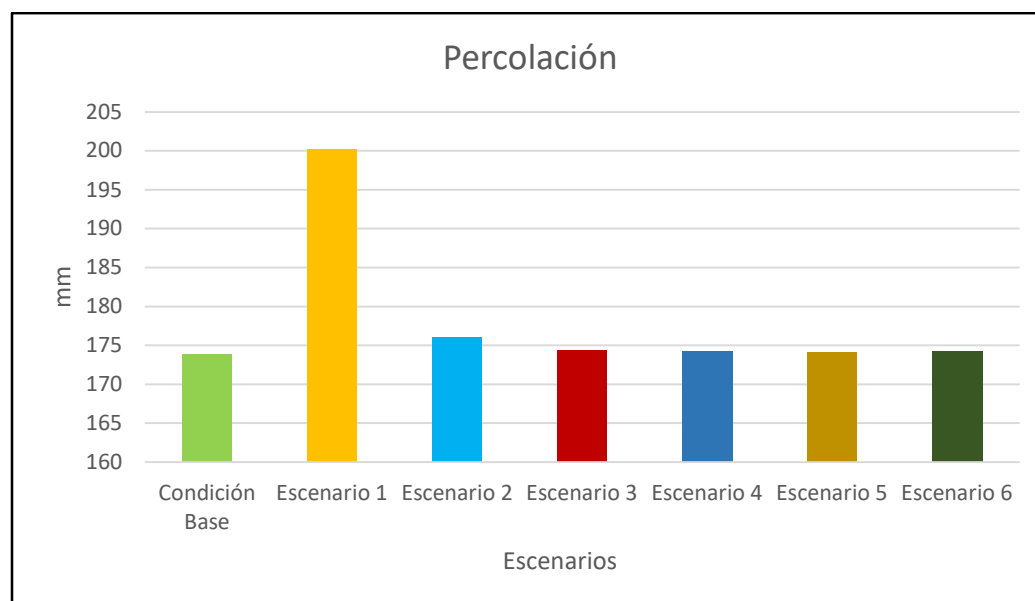


Figura 73.

Variación de parámetro de percolación en base a los escenarios (promedio anual)

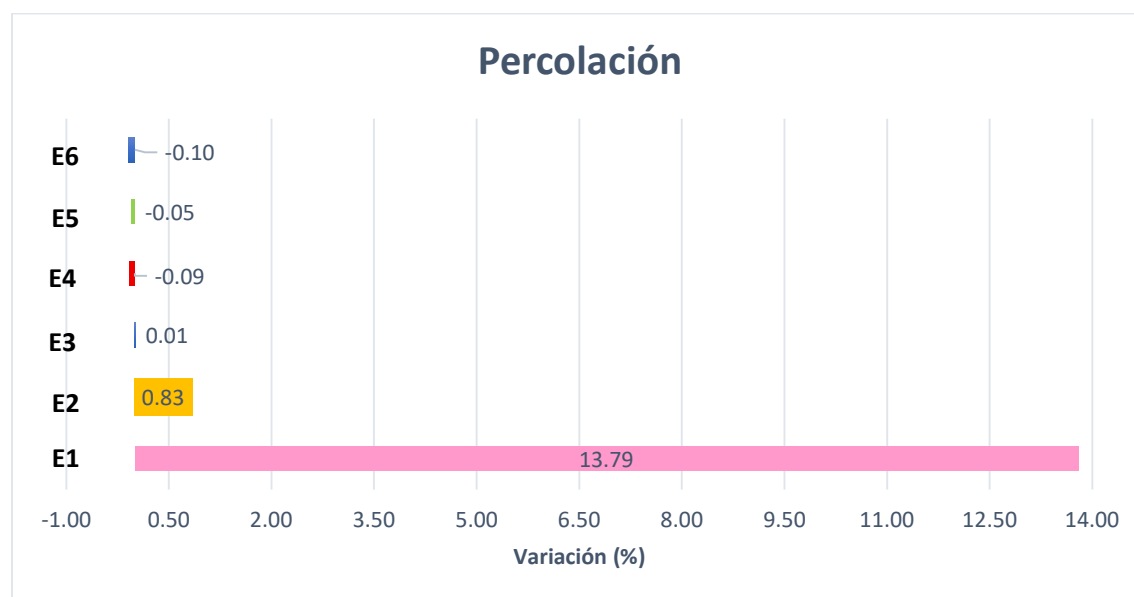


Figura 74.

Variación de parámetro percolación en base a los escenarios en temporada de verano e invierno

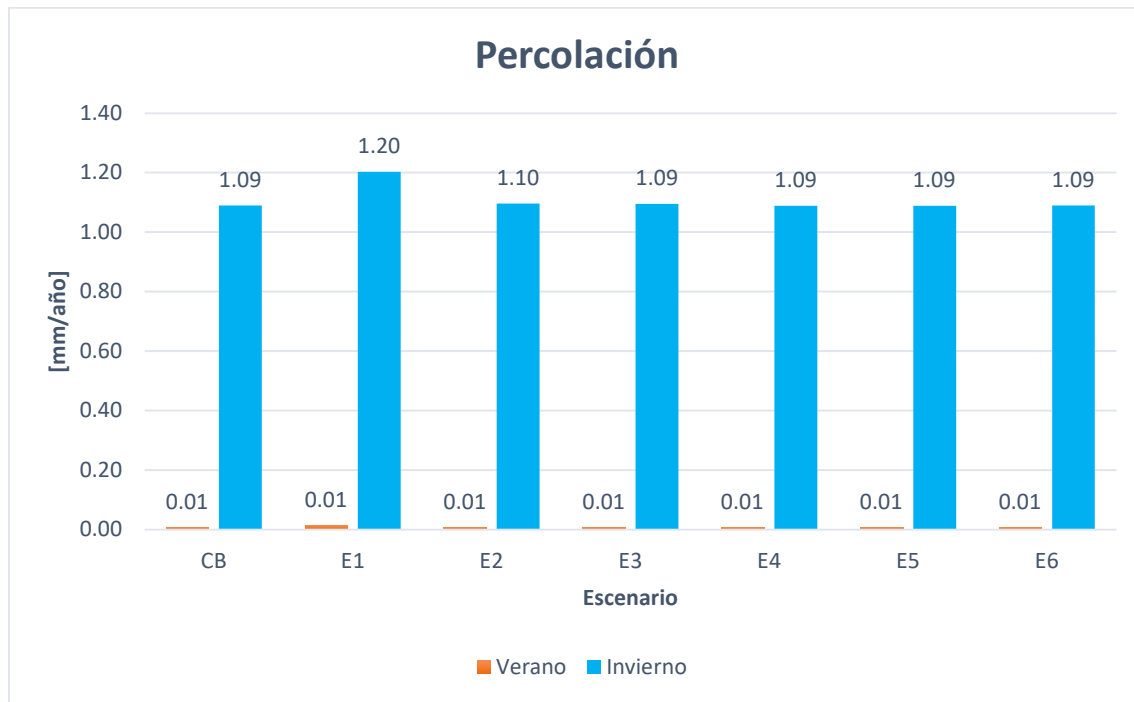


Tabla 35.

Variación de parámetro Flujo subterráneo en base a los escenarios

Escenarios	mm			
	Periodo de 10 años	Promedio anual	Verano	Invierno
Condición Base	173.83	2.04	0.01	1.09
Escenario 1	200.14	2.32	0.01	1.20
Escenario 2	176.00	2.06	0.01	1.10
Escenario 3	174.39	2.04	0.01	1.09
Escenario 4	174.19	2.04	0.01	1.09
Escenario 5	174.13	2.04	0.01	1.09
Escenario 6	174.21	2.04	0.01	1.09

Figura 75.

Variación de parámetro flujo subterráneo en base a los escenarios

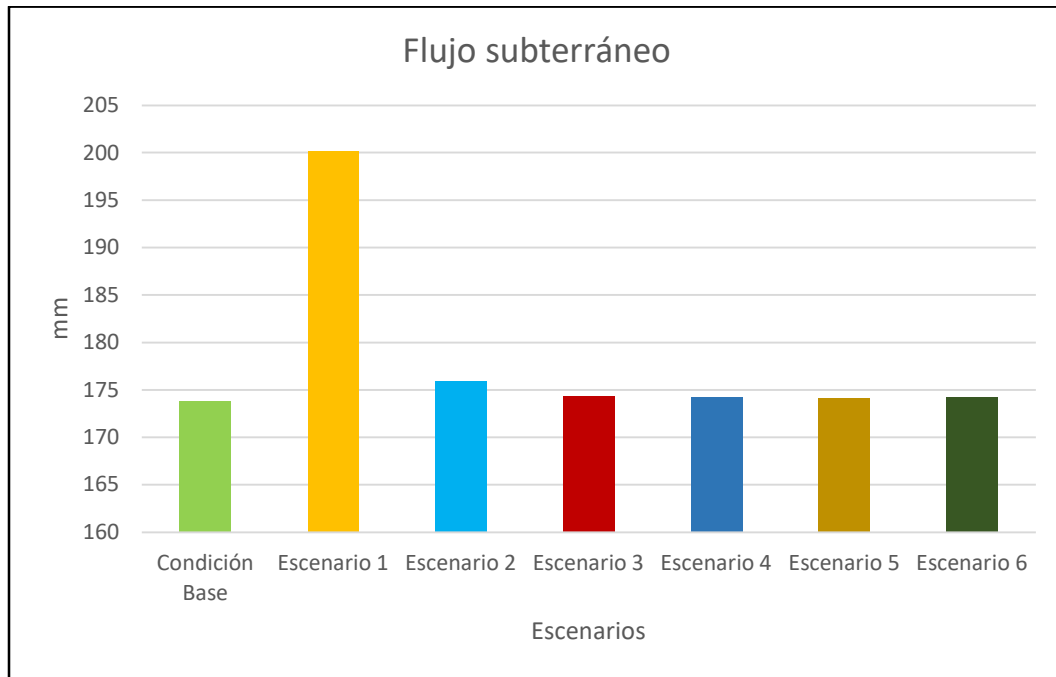


Figura 76.

Variación de parámetro de flujo subterráneo en base a los escenarios (promedio anual)

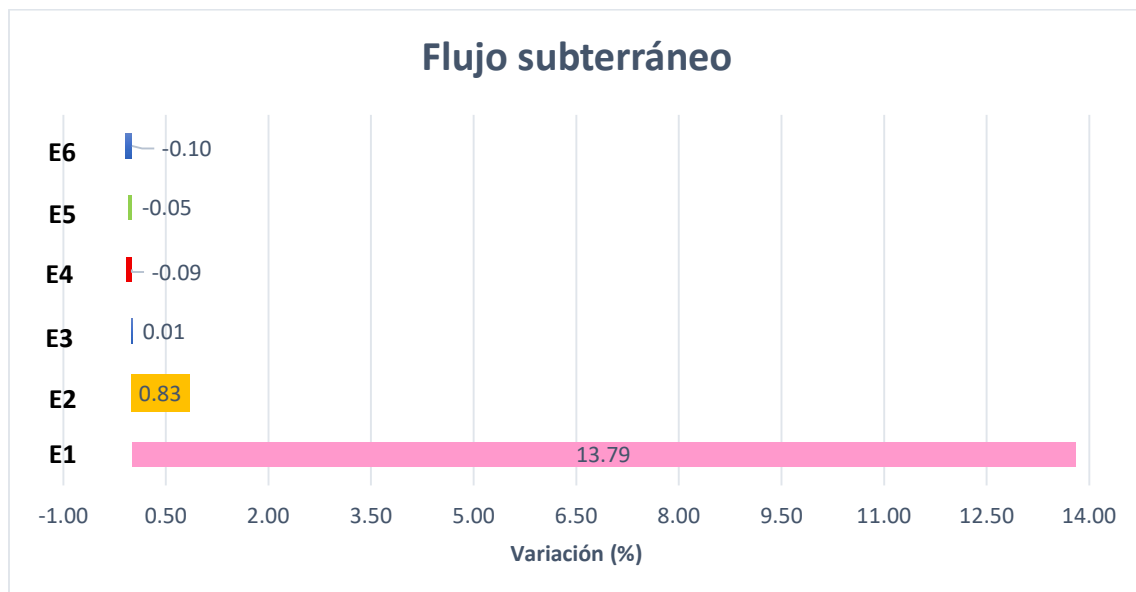
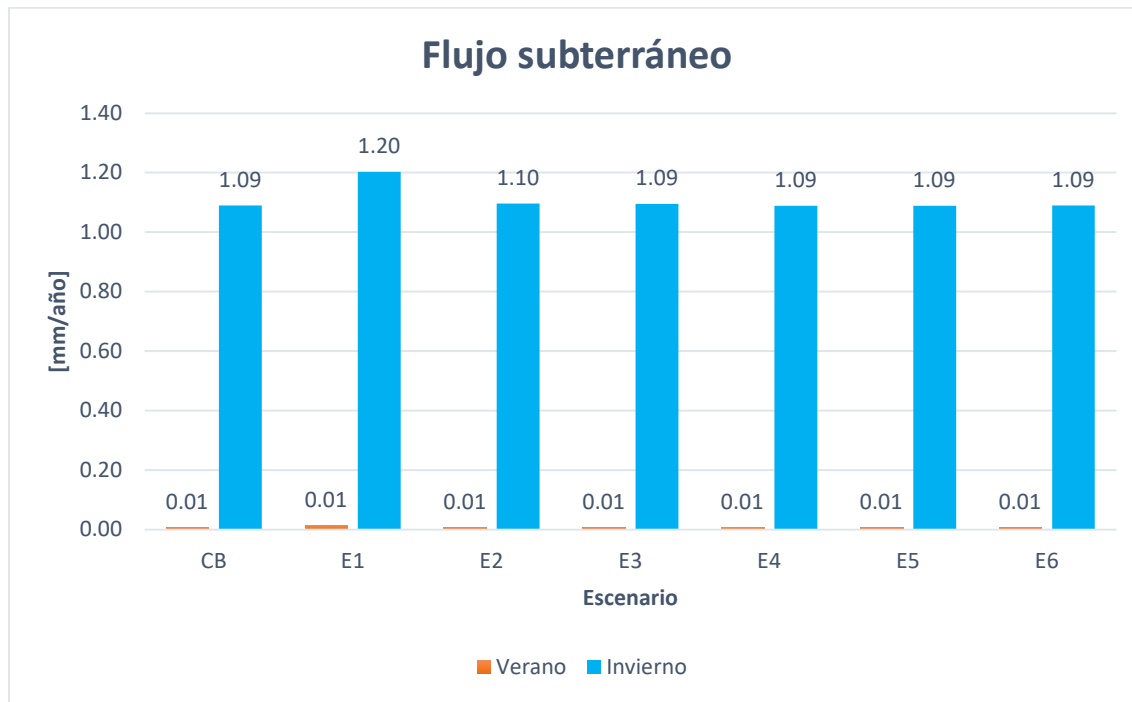


Figura 77.

Variación de parámetro flujo subterráneo en base a los escenarios en temporada de verano e invierno



Caudal de salida de la cuenca

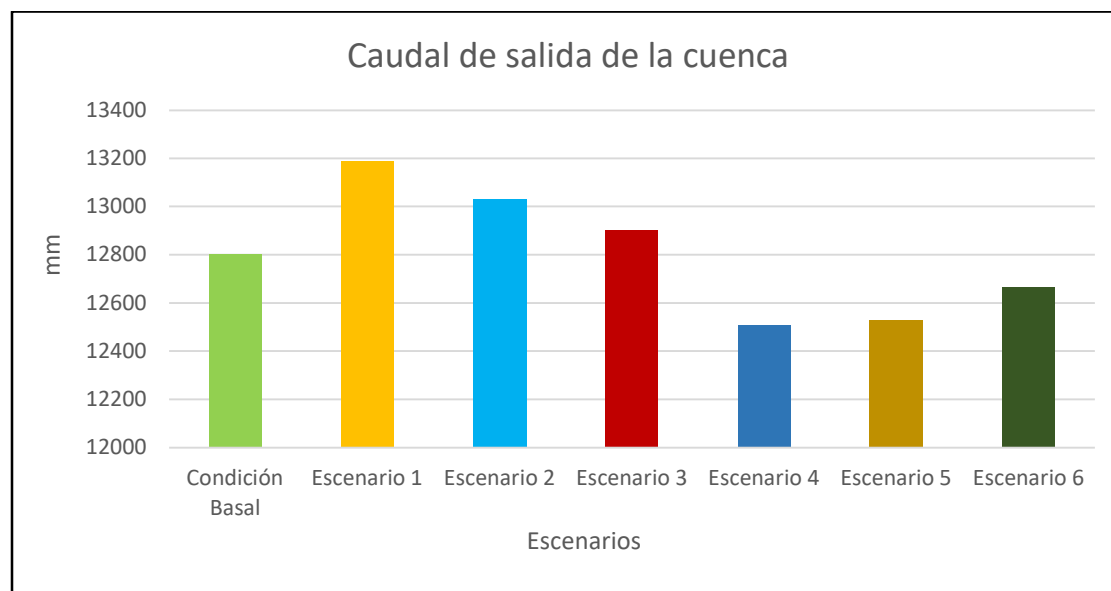
Como se puede observar en el gráfico y tabla anterior, el caudal de salida también se ve modificado producto a los cambios de cobertura, ya que, en los primeros escenarios se registra un aumento en el caudal de salida, lo que se explica por la disminución de las pérdidas de precipitación asociadas a la cobertura vegetal, esto se debe principalmente a que los parámetros como interceptación, evaporación y evapotranspiración disminuyen, porque existe una relación inversa entre el aumento de cobertura de bosque nativo y la disminución de dichos parámetros.

En contraste, en los escenarios 4 y 5, el caudal de salida se reduce, esto ya que, a diferencia de los primeros escenarios, las pérdidas de precipitación aumentan producto de mayores tasas de interceptación, evaporación y evapotranspiración respecto a la condición inicial.

Finalmente, el escenario número 6 presenta un comportamiento semejante a la condición inicial, dado que la diferencia en cobertura vegetal respecto a la cobertura original es mínima.

Tabla 36.*Variación de caudal de salida en base a los escenarios*

Escenarios	mm			
	Periodo de 10 años	Promedio anual	Verano	Invierno
Condición Basal	12803.3994	1090.70	8.95	349.21
Escenario 1	13189.5586	1141.41	11.85	370.03
Escenario 2	13030.0967	1128.48	10.50	364.90
Escenario 3	12900.8780	1105.37	9.77	356.24
Escenario 4	12508.4678	1096.14	9.42	353.06
Escenario 5	12526.4209	1091.64	9.11	350.83
Escenario 6	12667.9248	1089.76	8.80	347.60

Figura 78.*Variación de caudal de salida en base a los escenarios*

En figura 79 se presenta la variación del parámetro respecto a cada escenario evaluado en un promedio anual y en la figura 80 se presenta la variación de este parámetro en las temporadas de verano e invierno.

Figura 79.

Variación de parámetro de caudal de salida en base a los escenarios (promedio anual)

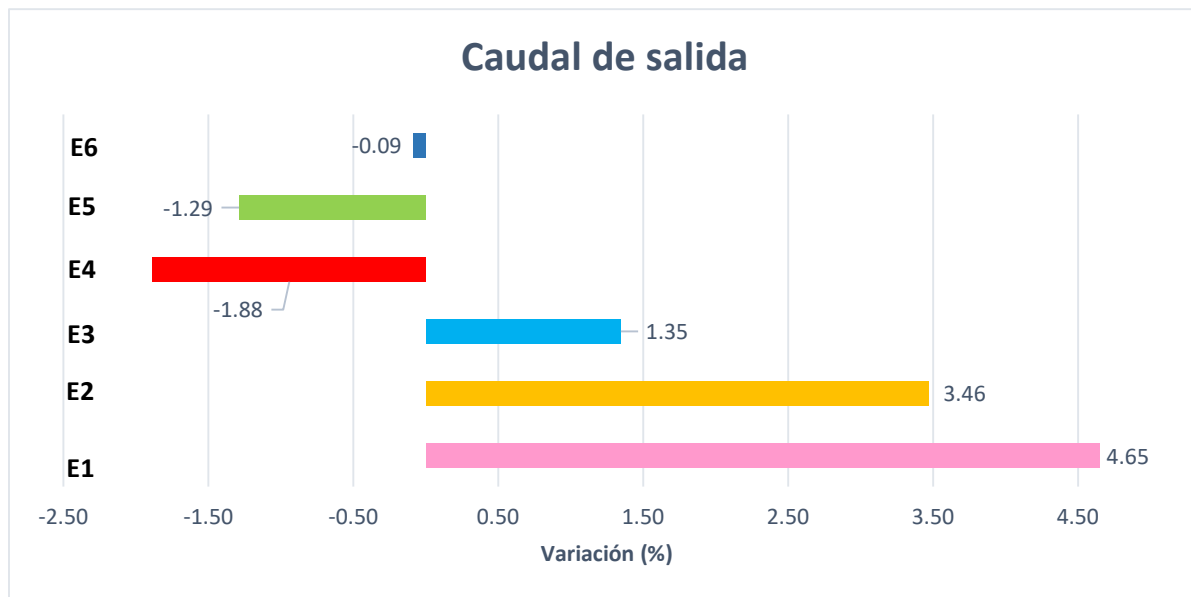
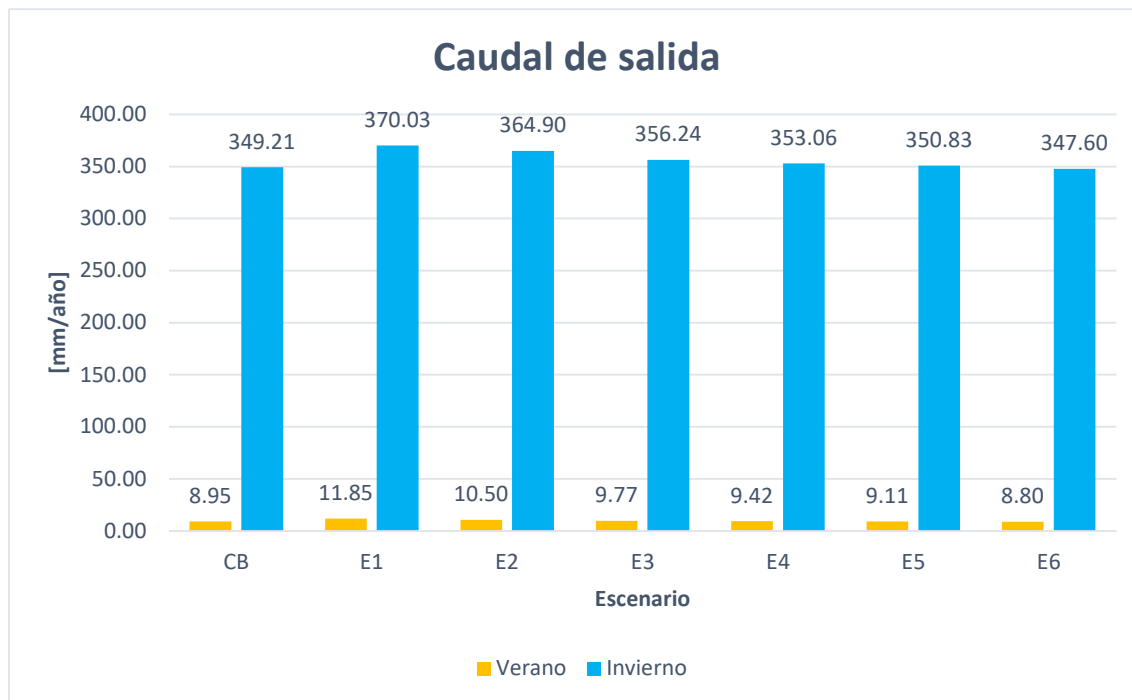


Figura 80.

Variación de parámetro caudal de salida en base a los escenarios en temporada de verano e invierno



7. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El objetivo principal de la investigación consistía en determinar el efecto producido por la restauración de bosque nativo sobre los parámetros hidrológicos en diferentes escenarios de restauración.

Para la calibración del modelo se utilizaron datos hidrológicos y meteorológicos registrados en la cuenca del río Duqueco en un periodo de tiempo que abarca desde el año 2011 al 2014 y se utilizó el uso de suelo del año 2013, se calibraron 6 factores correctores, los cuales demostraron ser los factores más sensibles respecto a las modificaciones del suelo. La calibración entregó un índice de Nash-Sut de 0.6123, que, de acuerdo a la clasificación de rendimiento de Molnar (2011) corresponde a un rendimiento “muy bueno”.

Por otra parte, para la validación del modelo, se empleó la técnica de “validación temporal”, para ello, se utilizaron datos meteorológicos e hidrológicos de un periodo de tiempo distinto al de la calibración (2015 - 2019) pero de la misma estación de caudal. Es importante mencionar, que para demostrar un escenario lo más cercano a la realidad se ocupó el catastro de uso de suelo más actual disponible en las bases de datos existente (catastro del 2015 para la Región del Biobío), lo que entregó un valor de 0.6002 de índice de Nash-Sut.

Se diseñaron 6 escenarios de restauración en base a una clasificación de pendientes definidas por “Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. Consorcio Vino Tinto y Oro, (2017)”. En donde, el objetivo consistía en reemplazar usos de suelo antrópicos por cobertura de bosque nativo.

En aquellos escenarios en donde las pendientes son de menor grado, los usos de suelo mayormente reemplazados fueron plantaciones forestales y cultivos agrícolas, mientras que en los escenarios con pendientes pronunciadas los usos de suelo principalmente modificados son praderas y suelos con vegetación escasa.

Los resultados mostraron una disminución en los valores de interceptación, evaporación y evapotranspiración en aquellos escenarios en donde el principal uso de suelo modificado fueron plantaciones forestales, lo que viene dado por tipo de follaje, disposición y tamaño del bosque nativo, ya que, estos interceptan un menor volumen de agua, permitiendo un aumento en el volumen de agua que ingresa a los suelos. Además, las plantaciones forestales a diferencia de bosque nativo no pierden sus hojas en periodo invernal por lo que la interceptación no varía a lo largo del año ni por estación.

Una disminución en los valores de intercepción se refleja en un mayor volumen de agua disponible para el ingreso de agua en los suelos, asimismo, el bosque nativo utiliza de mejor forma el agua disponible almacenada en los suelos, haciéndolo de una forma parcial y controlada, por lo tanto, esto se traduce en una disminución en los parámetros de evaporación y evapotranspiración.

Un caso contrario ocurre para el parámetro escorrentía, ya que, se observó una disminución en cada uno de los escenarios evaluados, no obstante, los escenarios 3, 4 y 5 son aquellos con una mayor disminución de este parámetro, esto viene dado principalmente a que el área restaurada con bosque nativo corresponde a pendientes mayores a 25° , esto viene dado por la velocidad del flujo, ya que de acuerdo a diversos autores a medida que las pendientes son mayormente pronunciadas, la velocidad del flujo aumenta, evitando que el agua se acumule en el suelo e infiltre, beneficiando a la escorrentía superficial. Por lo que, un aumento en la cobertura vegetal en zonas con pendientes pronunciadas significaría un aumento en la intercepción del agua y por consecuencia una disminución en la escorrentía superficial.

Los resultados sobre el impacto de la restauración con bosque nativo en procesos hidrológicos en la Cuenca del río Duqueco, se ven complementados por estudios previos en contextos ribereños similares.

Un estudio realizado en las riberas del río Duqueco por Cepeda, 2021, utilizando también el modelo hidrológico TETIS que buscaba evaluar el efecto de la restauración ribereña en la recuperación de procesos hidrológicos, demostró que a medida que mayor era el área reemplazada por bosque nativo por sobre plantaciones forestales significaba una considerable disminución en la intercepción y la escorrentía directa. Estos hallazgos refuerzan los resultados obtenidos en la presente investigación, en donde se observan tendencias similares en la reducción de la intercepción, lo que subraya la coherencia del efecto de la restauración en los procesos hidrológicos de la cuenca.

Una investigación sobre la riqueza arbórea en riberas de arroyos de cabecera (Flores-Díaz et. al, 2022) ha descrito la interdependencia que existe entre el comportamiento del caudal y la vegetación circundante, formando parches heterogéneos a lo largo de la red hídrica. Esto demostró la influencia de la elevación, la precipitación y el orden hidrológico en la vegetación ribereña, lo que concuerda con la importancia de la variabilidad espacial (como las pendientes), reconociendo que los impactos de restauración no son uniformes, lo que también hemos evaluado en nuestros escenarios de restauración.

Respondiendo a la pregunta de investigación, en base a los resultados obtenidos es posible concluir que no existe un escenario óptimo de restauración que mejore todos los parámetros hidrológicos evaluados en este estudio, más bien, el escenario a escoger dependerá única y exclusivamente de la solución o condición que se quisiera conseguir, ya que, los parámetros hidrológicos se ven beneficiados o perjudicados dependiendo del escenario escogido.

En el caso de que se requiera disminuir la escorrentía superficial en periodos de intensas lluvias es recomendable evaluar escenarios de restauración en pendientes mayores a 25°. Por otro lado, para parámetros como la infiltración, evaporación y evapotranspiración, es recomendable evaluar la restauración en pendientes de 0 a 5°.

Los mapas de tipo de suelo y geológicos pueden haber influenciados los resultados de los parámetros de percolación y flujo base, ya que estos estudios están desactualizados, al igual que en los parámetros de infiltración e interflujo.

8. LÍNEA FUTURA DE INVESTIGACIÓN

Finalmente, es recomendable continuar con el estudio de este proyecto mediante a un análisis detallado que incluya escenarios de restauración con características similares en cuanto a proporción de bosque nativo y usos de suelo presentes en las cuencas, de modo que la única variable relevante corresponda a la variación de las pendientes. Esto permite aislar el efecto de la topografía sobre la respuesta hidrológica, dado que en este estudio las grandes diferencias en cobertura vegetal pudieron influenciar en los resultados obtenidos. Además, se sugiere incorporar mayor detalle de la composición de los bosques y los usos de suelo, información más actualizada y que refleje las condiciones actuales de la zona que se desea estudiar.

9. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) son el núcleo de la Agenda 2030 y representan una visión integral e indivisible, así como un renovado compromiso de colaboración integral (CEPAL, 2023). En total, existen 17 ODS, que incluyen 169 metas y 231 indicadores.

En relación con el tema principal de esta investigación y su contribución a los ODS, se destacan los siguientes objetivos específicos.

1. ODS 6: Agua limpia y saneamiento

El objetivo número 6 busca garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos. Ya que, actualmente gran parte de la población sigue sin tener acceso

a agua potable, saneamiento e higiene y la escasez de agua es un problema cada vez más grave potenciado por los conflictos y el cambio climático.

2. ODS 15: Vida de ecosistemas terrestres

Este ODS tiene por fin, asegurar la sostenibilidad de los ecosistemas, preservado la biodiversidad y los servicios que estos proporcionan. La implementación de medidas de mitigación, reparación y compensación ambiental eficaces para la flora y la vegetación es esencial para alcanzar este objetivo.

10. REFERENCIAS

AGUAYO, M., et al. (2009). "Cambio del uso del suelo en el centro sur de Chile a fines del siglo XX: Entendiendo la dinámica espacial y temporal del paisaje." Revista chilena de historia natural **82**: 361-374.

Aliaga I. (2017). Modelación hidrológica de la cuenca del río Huallaga, aguas arriba del punto de control Santa Lorenza. (Tesis de grado, Universidad Nacional Agraria la Molina).

Alvarez-Garretón, C., et al. (2019). "The Impacts of Native Forests and Forest Plantations on Water Supply in Chile." Forests **10**(6): 473.

Ángel del Miguel, Lado J, Martínez V, Leal M, García R. (2009). El ciclo hidrológico: Experiencias prácticas para su comprensión. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra. 78-85.

Arauz C, Marzo M. (2021). Las Soluciones basadas en la Naturaleza como herramienta para mitigar el cambio climático. Recuperado de: <https://www.icerda.org/wp-content/uploads/2021/03/127-ARTICULO-SbN-MITIGAR-CAMBIO-CLIMATICO.pdf>

Arumí, J. L., et al. (2012). "Interacciones entre el agua superficial y subterránea en la región del Bío Bío de Chile." Obras y proyectos: 4-13.

Bizama, G., et al. (2011). "Pérdida y fragmentación del bosque nativo en la cuenca del río Aysén (Patagonia-Chile) durante el siglo XX." Revista de geografía Norte Grande: 125-138.

Budano M. (2021). *Ordenación y propuesta de restauración de la Cuenca del Río Jesús María*. (Tesis de máster, Universitat Politècnica de València). <https://riunet.upv.es/handle/10251/177606>

Brown S, Lugo A. (1994). Rehabilitation of Tropical Lands: a key to sustaining development. Restoration ecology. Vol 2, 97-111. DOI: [10.1111/j.1526-100X.1994.tb00047.x](https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.1994.tb00047.x)

Cabrera, J., (s.f). "Modelos hidrológicos." Recuperado de: https://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_2.pdf

Ceccon E. (2003). Los bosques ribereños y la restauración y conservación de las cuencas hidrográficas.

Cepeda S. (2021). Efecto de la restauración ribereña en los procesos hidrológicos en la cuenca del río Duqueco. (Tesis de grado, Universidad de Concepción)

Chikodzi D. (2013). Remote Sensing Based Unravelling of Landcover and Groundwater Scenarios Relationships for the Middle Save Sub Catchment of South Eastern Zimbabwe. American Journal of Water Resources. 1(3):45-50. doi: 10.12691/ajwr-1-3-5.

Cisternas M, Martinez P, Oyarzún C, y Debels P. (1999). Caracterización del proceso de reemplazo de vegetación nativa por plantaciones forestales en una cuenca lacustre de la Cordillera de Nahuelbuta, VIII Región, Chile. Revista Chilena de Historia Natural. 72. 661-676.

Cohen-Shacham, E., Walters, G., Janzen, C. and Maginnis, S. (eds.) (2016). Nature-based Solutions to address global societal challenges. Gland, Switzerland: IUCN. xiii + 97pp. DOI: 10.2305/IUCN.CH.2016.13.en

Comité científico de Cambio Climático. (2021). Soluciones basadas en la naturaleza. Recuperado de: <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/147776>

CONAMA (2018). Soluciones basadas en la naturaleza. Recuperado de: http://www.conama.org/conama/download/files/conama2018/GTs%202018/10_final.pdf

DGA MOP. (s. f.). recuperado de <https://dga.mop.gob.cl/estudiospublicaciones/mapoteca/Paginas/Mapoteca-Digital.aspx>

FAO (2021). Evaluación de los recursos forestales mundiales 2020.

Fernández D. (2020). *Proyecto de restauración de roberas del tramo bajo del río Iregua (Logroño)*. (Tesis de grado, Universidad de la Roja). <https://core.ac.uk/download/pdf/464899740.pdf>

Frêne C, Oyarzún C. *Manejo integrado de cuencas*. CONAF. https://investigacion.conaf.cl/archivos/repositorio_documento/2018/11/038_2010-CAPITULO-DE-LIBRO.pdf

Flores-Díaz, Adriana Carolina, & Martínez-Cruz, Juan. (2022). Relación entre la vegetación ribereña arbórea remanente y los rasgos de la red fluvial en arroyos de cabecera. *Madera y bosques*, 28(3), e2832500. Epub 14 de abril de 2023. <https://doi.org/10.21829/myb.2022.2832500>

Fuentes I, Fuster R, Avilés D and Vervoort W. (2021). Water scarcity in central Chile: the effect of climate and land cover changer on hydrologic resources. Hydrological Sciences Journal. Vol 66. 1028-1044. DOI:10.1080/02626667.2021.1903475

García B (2021). Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN) en la Gestión Integrada de los Recursos hídricos. Taller Consejo Recursos Hídricos Tumbes, Tumbes.

Gómez, C. L., Maldonado, J. R., & Rojas, M. J. G. (2014). Permeabilidad del suelo de la cuenca del río Chillán, entre Estero Peladillas y río Ñuble, Chile. *Cuadernos de Geografía Revista Colombiana de Geografía*, 24(1), 73-86. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v24n1.41679>

Gutiérrez, I. and P. Becerra (2018). "Composición, diversidad y estructura de la vegetación de bosques ribereños en el centro sur de Chile." *Bosque (Valdivia)* **39**: 239-253.

Henríquez, C. and G. Azócar (2006). "Cambio de uso del suelo y escorrentía superficial: aplicación de un modelo de simulación espacial en Los Ángeles, VIII Región del Biobío, Chile." *Revista de geografía Norte Grande*: 61-74.

Huber, A., & Iroumé, A. (2001). Variability of annual rainfall partitioning for different sites and forest covers in Chile. *Journal Of Hydrology*, 248(1-4), 78-92. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00394-8](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00394-8)

IDE Chile. (s.f.) recuperado en: <https://www.ide.cl>

Iroume, A., & Huber, A. (2000). Intercepción de las lluvias por la cubierta de bosques y efecto en los caudales de crecida en una cuenca experimental en Malalcahuello, IX Región, Chile. *Bosque (Valdivia)*, 21(1), 45-56. <https://doi.org/10.4206/bosque.2000.v21n1-05>

INTA República Argentina. (2011). Valoración de servicios ecosistémicos: conceptos, herramientas y aplicaciones para el ordenamiento territorial.

Jullian, C., et al. (2018). "Evaluación del servicio ecosistémico de regulación hídrica ante escenarios de conservación de vegetación nativa y expansión de plantaciones forestales en el centro-sur de Chile." *Bosque (Valdivia)* **39**: 277-289.

Kernizan E, González E, Figueredo L. (2013). Propuesta para la rehabilitación ecológica de un sitio degradado en la franja costera de la Reserva de la Biosfera Baconao. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*. Vol. 1(2)

Lara A, Little C, Nahuelhual L, Urrutia R, y Díaz I. (2011). *Lecciones, desafíos y recomendaciones de política para el manejo, conservación y restauración de los bosques nativos en Chile*.

Little, C. and A. Lara (2010). "Restauración ecológica para aumentar la provisión de agua como un servicio ecosistémico en cuencas forestales del centro-sur de Chile." Bosque (Valdivia) **31**: 175-178.

Lowrance R, Todd R, Fail J, Hendrickson O, Leonard R, Asmussen L. (1984). Riparian forest as nutrient in agricultural watersheds. Vol 34, 374-377. DOI: 10.2307/1309729

Lytle D, and Merritt D. (2004). Hydrologic regimes and riparian forests: a structured population model for Cottonwood. Col 85. 2493-2503. DOI: [10.1890/04-0282](https://doi.org/10.1890/04-0282)

Ma X, Xu J, Luo Y, Prasad S and Li J. (2009). *Response of hydrological processes to land-cover and climate changes in Kejie watershed, south-west China*. Wiley InterScience. (23) 1179-1191. DOI: 10.1002/hyp.7233

Martínez Valdés, Y. and V. M. Villalejo García (2018). "La gestión integrada de los recursos hídricos: una necesidad de estos tiempos." Ingeniería Hidráulica y Ambiental **39**: 58-72.

McDonald T, Gann GD, Jonson J, and Dixon KW. (2016) *International standards for the practice of ecological restoration – including principles and key concepts*. Society for Ecological Restoration, Washington, D.C.

Mejía L. (2019). *Determinación de áreas y costos potenciales para alternativas de restauración ecológica en la zona alta de la Microcuenca del Río El Tablón, Chiapas, México*. (Tesis de máster, CATIE). <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/9126>

Méndez-Toribio M, Zermeno-Hernández I, Ibarra-Manríquez G. (2014). *Effect of land use on the structure and diversity of riparian vegetation in the Duero River watershed in Michoacán, Mexico*. *Plant Ecology* 215: 285-296. DOI: [10.1007/s11258-014-0297-z](https://doi.org/10.1007/s11258-014-0297-z)

Mintengui J, Robredo J. (1994). Caracterización de las cuencas hidrográficas, objeto de restauración hidrológico-forestal, mediante modelos hidrológicos. *Ingeniería del agua*; 1(2): 69-82. DOI: 10.4995/ia.1994.2637

Molina Y. (2019). La reforestación como Estrategia Ambiental para la conservación de ríos y quebradas. *Revista Científica*. Vol. 4, Num 13, 182-199.

Muñoz-Villers, L. E., et al. (2015). "Efectos hidrológicos de la conversión del bosque de niebla en el centro de Veracruz, México." Bosque (Valdivia) **36**: 395-407.

Nadal-Romero E, Regües D y Serrano-Muela P. (2010). *Respuesta hidrológica en una pequeña cuenca experimental pirenaica con dos ambientes extremos: cárcavas y bosques de repoblación*. Ecología de Montaña. Vol 165, 135-155.

Naiman RJ, H Decamps. (1997). The ecology of interfaces: Riparian zones. *Annual Review of Ecology and Systematics* 28(102): 621-658. DOI: [10.1146/annurev.ecolsys.28.1.621](https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.28.1.621)

Nájera O, Bojórquez J, Cifuentes JL y Marcelleño S. (2010). Cambio de cobertura y uso del suelo en la cuenca del Río Mololoa, Nayarit. *Revista Biociencias* Vol 1 Num 1, 19-29.

Niemeyer H., (1980). "Hoyas hidrográficas de Chile: 8a. región del Bío-Bío, 9a. región de la Araucanía, 10a. región de Los Lagos" <http://hdl.handle.net/20.500.12140/33018>

Novosadová, K., Kadlec, J., Řehořková, Š., Matoušková, M., Urban, J., & Pokorný, R. (2023). Comparison of Rainfall Partitioning and Estimation of the Utilisation of Available Water in a Monoculture Beech Forest and a Mixed Beech-Oak-Linden Forest. *Water*, 15(2), 285. <https://doi.org/10.3390/w15020285>

Ocampo O, Vélez J. (2013). Análisis comparativo de modelos hidrológicos de simulación continua en cuencas de alta montaña: caso del Río Chinchiná. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*. Vol 13, No. 24, 1692-3324.

Orozco, I., Ramírez, A. I., & Francés, F. (2018). Modelación de los impactos del Cambio Climático sobre los flujos y almacenamientos en una cuenca de alta montaña. *Ingeniería Del Agua*, 22(3), 125. <https://doi.org/10.4995/IA.2018.8931>

Ortiza-Arrona C.I, Gerritsen P.R.W, Martinez L.M, Allen A, y Snoep M. (2004). *Restauración de bosques ribereños en paisajes antropogénicos, en el occidente de México*.

Pedraza G, Giraldo L, y Chará J. (2008). *Efecto de la restauración de corredores ribereños sobre características bióticas y abióticas de quebradas en zonas ganaderas de la cuenca del río La Vieja, Colombia*. *Zootecnia Trop*. 26(3): 179-182.

Pérez L. (2014). *Restauración ecológica en cuencas transfronterizas: análisis de las prácticas de restauración desde un enfoque integral*. (Tesis de grado, el colegio de la frontera sur Université de Sherbrooke). https://ecosur.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1017/1845/1/100000053626_documento.pdf

Refsgaard, J., Knudsen, J. (1996). "Operational validation and intercomparison of different types of hydrological models. *Water Resources Research*, 32(7), 2189-2202. Doi: 10.1029/96wr00896

Romero, F. I., et al. (2014). "Zonas ribereñas: protección, restauración y contexto legal en Chile." *Bosque (Valdivia)* **35**: 3-12.

Roy, A.H., Freeman, M.C., Freeman, B.J. et al. Importance of Riparian Forests in Urban Catchments Contingent on Sediment and Hydrologic Regimes. *Environmental Management* 37, 523–539 (2006). DOI: 10.1007/s00267-005-0029-1.

Sandoval, V., et al. (2016). "Diversidad vegetal en las cuencas de los ríos Baker y Pascua (Aisén, Patagonia Chilena)." *Bosque (Valdivia)* **37**: 243-253.

Solano A, Pinzón S. (2017). *Renaturalización, reactivación y restauración bajo los parámetros del ecourbanismo en la parte alta del Río Fucha: Parque ecosistémico Río Fucha*. (Tesis de grado, universidad Piloto de Colombia) <http://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/2054>

UNESCO. (2018). Las soluciones basadas en la naturaleza (SbN) y el agua. Recuperado de https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000261605_spa

Vergara, G. and J. T. Ibarra (2019). "Paisajes en transición: gradientes urbano-rurales y antropización del bosque templado andino del sur de Chile." *Revista de geografía Norte Grande*: 139-158.

Zhou Z, Ouyang Y, Li Y, Qiu Z and Moran M. (2017). Estimating impact of rainfall change on hydrological processes in Jianfengling rainforest watershed, China using BASINS-HSPF-CAT modeling system. *Ecological engineering*. (105) 87-94. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2017.04.051

Zúñiga, R., et al. (2012). "Estudio de los procesos hidrológicos de la cuenca del Río Diguillín." *Obras y proyectos*: 69-78.

11. ANEXOS

Tabla 37.

Intercepción Anual por escenario de restauración (mm/año)

Años	Intercepción (mm/año)						
	CB	E1	E2	E3	E4	E5	E6
2010	0.97	0.60	0.67	0.89	0.97	0.98	0.97
2011	1.01	0.59	0.68	0.92	1.00	1.01	1.01
2012	1.08	0.68	0.75	1.00	1.08	1.09	1.09
2013	1.00	0.60	0.68	0.92	0.99	1.00	1.00
2014	1.13	0.69	0.78	1.04	1.13	1.13	1.13
2015	1.08	0.67	0.81	0.89	1.07	1.08	1.08
2016	0.91	0.56	0.63	0.84	0.91	0.91	0.91
2017	1.20	0.77	0.88	1.15	1.24	1.24	1.24
2018	1.20	0.77	0.87	1.15	1.24	1.25	1.25
2019	1.10	0.67	0.76	1.00	1.08	1.09	1.08

Figura 81.

Intercepción anual por escenario de restauración

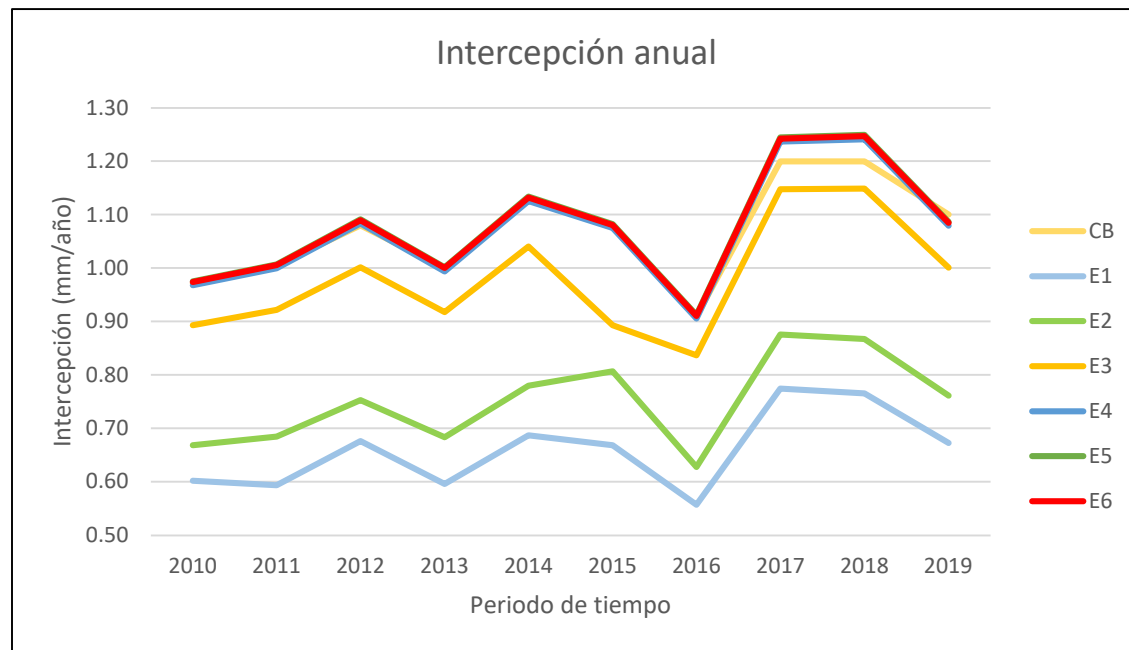


Tabla 38.*Intercepción temporada de verano por escenario de restauración (mm/tem. verano)*

Años	Intercepción (mm/temporada de verano)						
	CB	E1	E2	E3	E4	E5	E6
2010	0.24	0.14	0.16	0.23	0.25	0.25	0.25
2011	0.25	0.15	0.16	0.23	0.25	0.26	0.26
2012	0.36	0.20	0.22	0.32	0.35	0.36	0.36
2013	0.11	0.06	0.07	0.10	0.11	0.11	0.11
2014	0.24	0.14	0.15	0.22	0.24	0.25	0.25
2015	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2016	0.03	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04	0.04
2017	0.16	0.10	0.10	0.15	0.16	0.17	0.17
2018	0.22	0.12	0.14	0.20	0.22	0.22	0.22
2019	0.20	0.12	0.13	0.19	0.20	0.20	0.20

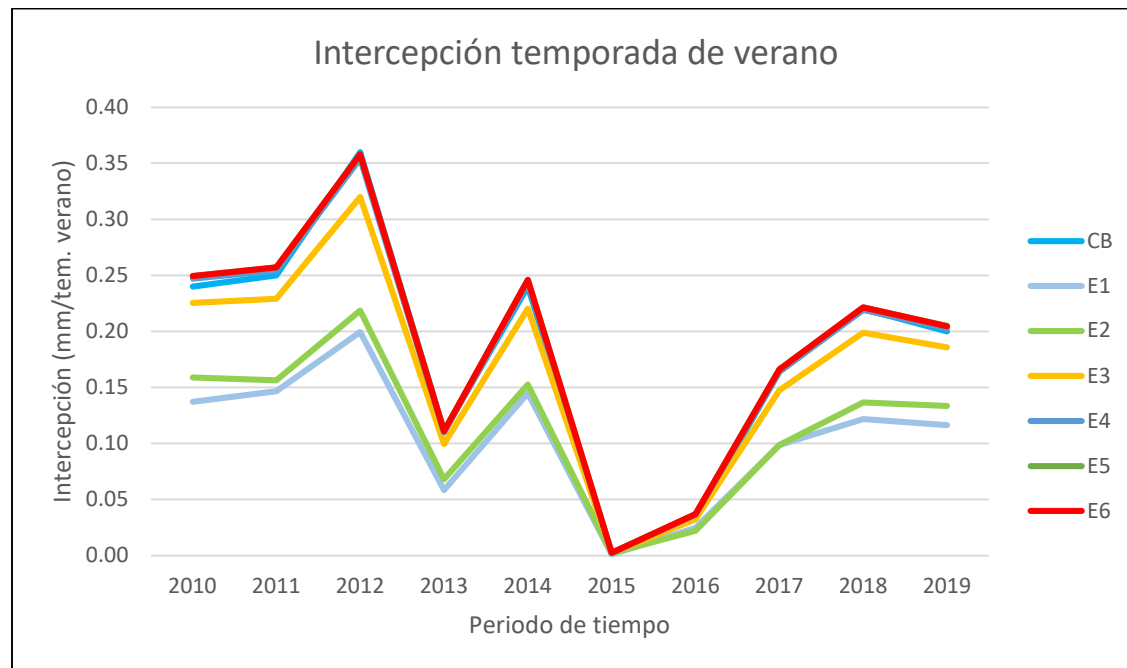
Figura 82.*Intercepción temporada de verano por escenario de restauración*

Tabla 39.

Intercepción temporada de invierno por escenario de restauración (mm/tem. invierno)

Años	Intercepción (mm/temporada de invierno)						
	CB	E1	E2	E3	E4	E5	E6
2010	1.766	1.002	1.179	1.612	1.752	1.767	1.766
2011	1.998	1.002	1.321	1.822	1.982	1.999	1.998
2012	2.220	1.509	1.668	1.741	2.217	2.226	2.220
2013	2.176	1.244	1.449	1.986	2.160	2.178	2.176
2014	1.919	1.080	1.271	1.749	1.903	1.920	1.919
2015	1.864	1.056	1.209	1.612	1.849	1.865	1.864
2016	1.444	0.807	0.952	1.315	1.432	1.444	1.444
2017	2.197	1.253	1.470	2.007	2.180	2.198	2.197
2018	1.880	1.059	1.248	1.715	1.866	1.881	1.880
2019	2.031	1.158	1.359	1.855	2.016	2.032	2.031

Figura 83.

Intercepción temporada de invierno por escenario de restauración

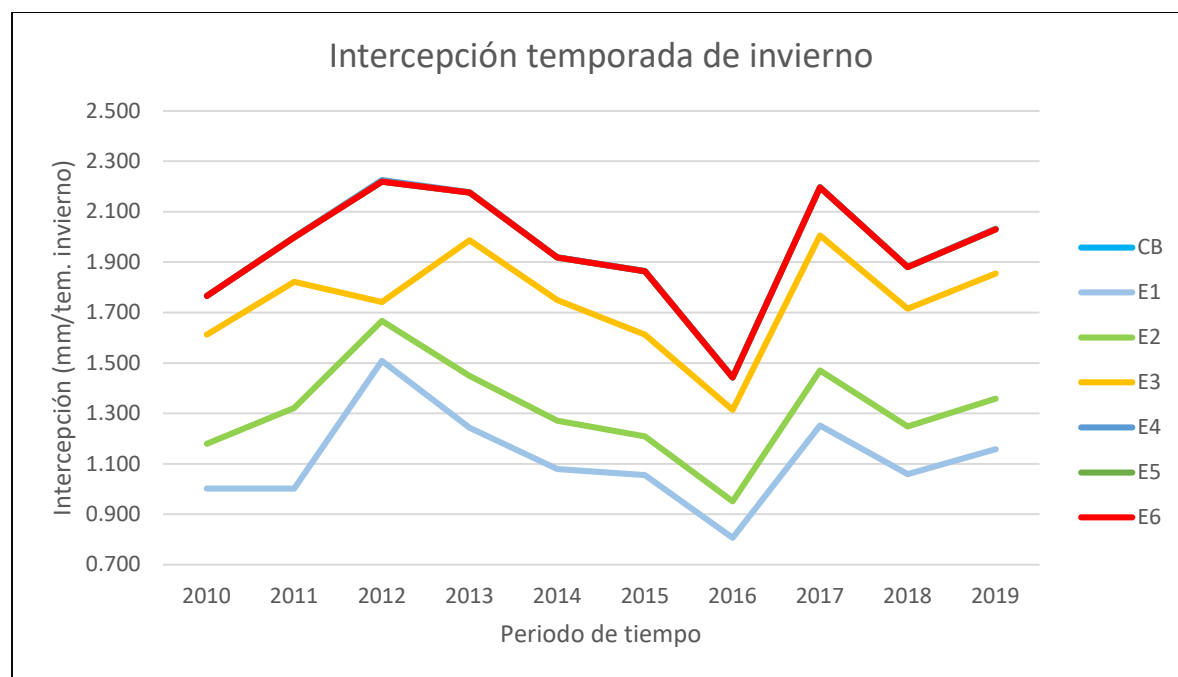


Tabla 40.*Evaporación Anual por escenario de restauración (mm/año)*

Años	Evaporación (mm/año)						
	CB	E1	E2	E3	E4	E5	E6
2010	238.00	214.23	219.68	235.55	241.48	240.63	238.67
2011	207.20	182.75	189.09	204.04	209.48	208.80	207.16
2012	274.10	242.83	251.02	270.02	276.91	275.98	273.80
2013	202.10	177.63	184.31	198.94	204.17	203.56	202.04
2014	225.00	202.50	209.40	223.98	229.32	228.49	226.64
2015	194.81	177.47	185.20	190.55	197.37	196.50	194.79
2016	226.01	200.58	207.33	223.03	228.77	227.97	226.12
2017	247.60	222.67	229.35	244.78	250.50	249.59	247.57
2018	265.20	233.96	242.63	261.51	268.31	267.44	265.35
2019	215.76	192.20	197.89	212.75	218.21	217.47	215.75

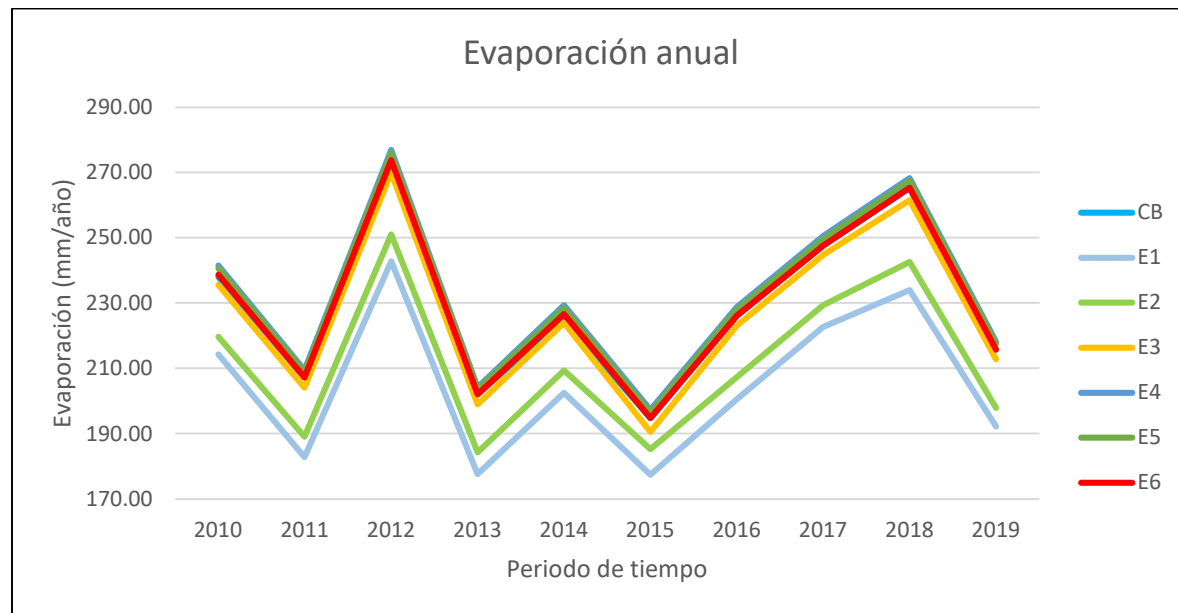
Figura 84.*Intercepción temporal de invierno por escenario de restauración*

Tabla 41.*Evaporación temporada de verano por escenario de restauración (mm/tem. verano)*

Años	Evaporación (mm/temporada de verano)						
	CB	E1	E2	E3	E4	E5	E6
2010	238.00	214.23	219.68	235.55	241.48	240.63	238.67
2011	207.20	182.75	189.09	204.04	209.48	208.80	207.16
2012	274.10	242.83	251.02	270.02	276.91	275.98	273.80
2013	202.10	177.63	184.31	198.94	204.17	203.56	202.04
2014	225.00	202.50	209.40	223.98	229.32	228.49	226.64
2015	194.81	177.47	185.20	190.55	197.37	196.50	194.79
2016	226.01	200.58	207.33	223.03	228.77	227.97	226.12
2017	247.60	222.67	229.35	244.78	250.50	249.59	247.57
2018	265.20	233.96	242.63	261.51	268.31	267.44	265.35
2019	215.76	192.20	197.89	212.75	218.21	217.47	215.75

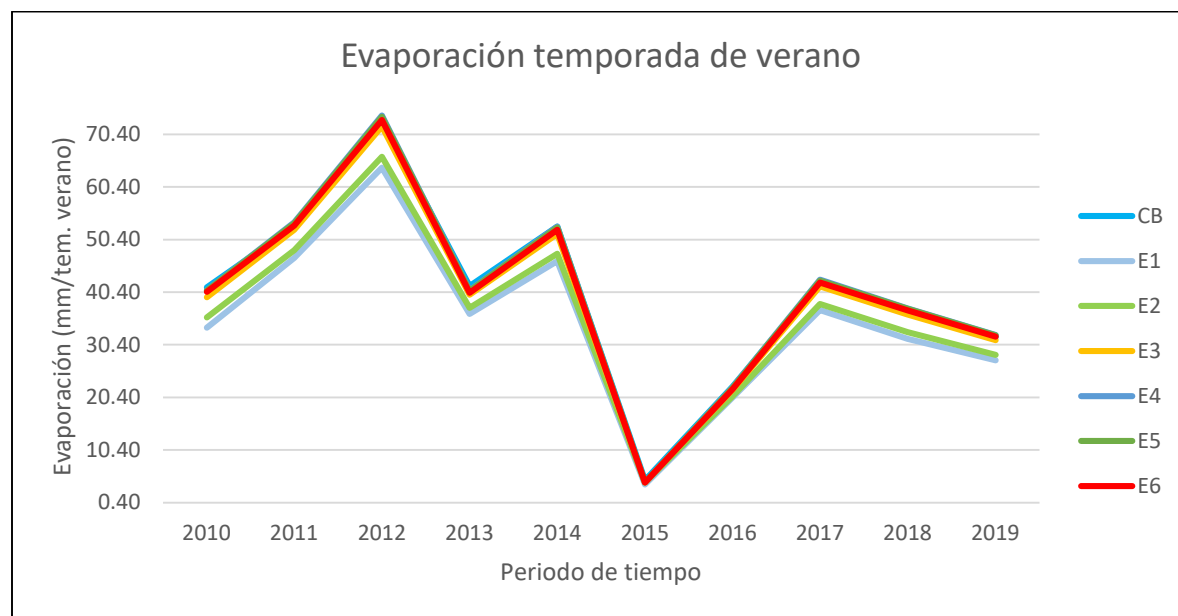
Figura 85.*Evaporación temporada de verano por escenario de restauración (mm/tem. verano)*

Tabla 42.*Evaporación temporada de invierno por escenario de restauración (mm/tem. invierno)*

Años	Evaporación (mm/temporada de invierno)						
	CB	E1	E2	E3	E4	E5	E6
2010	238.00	214.23	219.68	235.55	241.48	240.63	238.67
2011	207.20	182.75	189.09	204.04	209.48	208.80	207.16
2012	274.10	242.83	251.02	270.02	276.91	275.98	273.80
2013	202.10	177.63	184.31	198.94	204.17	203.56	202.04
2014	225.00	202.50	209.40	223.98	229.32	228.49	226.64
2015	194.81	177.47	185.20	190.55	197.37	196.50	194.79
2016	226.01	200.58	207.33	223.03	228.77	227.97	226.12
2017	247.60	222.67	229.35	244.78	250.50	249.59	247.57
2018	265.20	233.96	242.63	261.51	268.31	267.44	265.35
2019	215.76	192.20	197.89	212.75	218.21	217.47	215.75

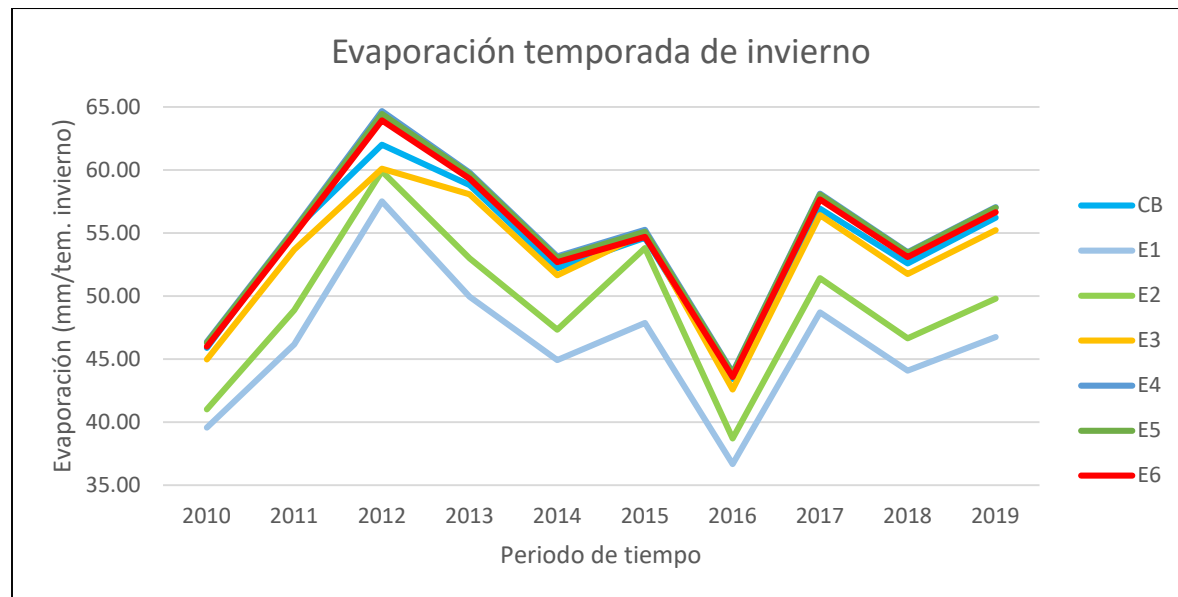
Figura 86.*Evaporación temporada de invierno por escenario de restauración (mm/tem. invierno)*

Tabla 43.*Almacenamiento Estático anual por escenario de restauración (mm/año)*

Años	Almacenamiento estático (mm/año)						
	CB	E1	E2	E3	E4	E5	E6
2010	186.00	190.19	188.15	187.67	187.61	188.21	186.00
2011	203.46	205.92	204.47	204.04	203.51	203.63	203.46
2012	230.72	233.66	232.86	232.07	231.80	232.06	230.72
2013	188.16	190.77	189.11	188.70	188.54	188.28	188.18
2014	210.07	214.33	212.92	211.59	211.10	210.42	210.04
2015	183.21	190.41	185.89	183.67	182.68	183.33	183.34
2016	198.73	202.22	199.03	199.02	198.58	198.81	198.73
2017	196.16	210.04	198.97	198.29	194.92	197.38	196.01
2018	224.53	230.68	228.56	228.01	227.67	226.99	224.53
2019	201.00	212.54	204.18	203.95	203.90	203.25	200.93

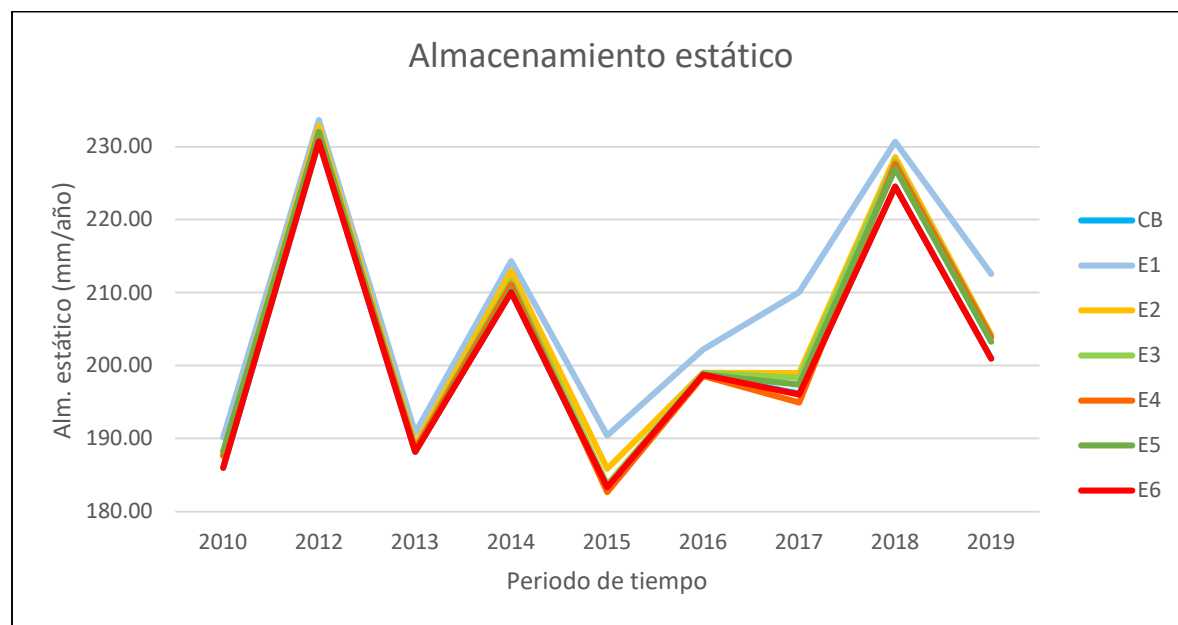
Figura 87.*Almacenamiento estático Anual por escenario de restauración (mm/año)*

Tabla 44.

Almacenamiento Estático temporada de verano por escenario de restauración (mm/temporada de verano)

Años	Almacenamiento estático (mm/tem. verano)						
	CB	E1	E2	E3	E4	E5	E6
2010	17.51	21.57	20.51	18.63	18.15	17.83	17.51
2011	11.73	12.80	12.96	12.35	12.21	11.98	11.73
2012	71.00	76.93	75.72	73.38	72.88	72.00	71.00
2013	9.59	15.11	11.14	10.22	9.97	9.78	9.59
2014	17.87	22.31	21.00	19.10	18.60	18.23	17.87
2015	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
2016	0.69	0.78	0.77	0.75	0.75	0.72	0.69
2017	9.86	12.29	11.34	10.47	10.24	10.05	9.86
2018	5.81	7.22	6.27	6.05	6.00	5.91	5.81
2019	33.44	39.81	38.54	35.45	34.63	34.04	33.44

Figura 88.

Almacenamiento Estático temporada de verano por escenario de restauración (mm/temporada de verano)

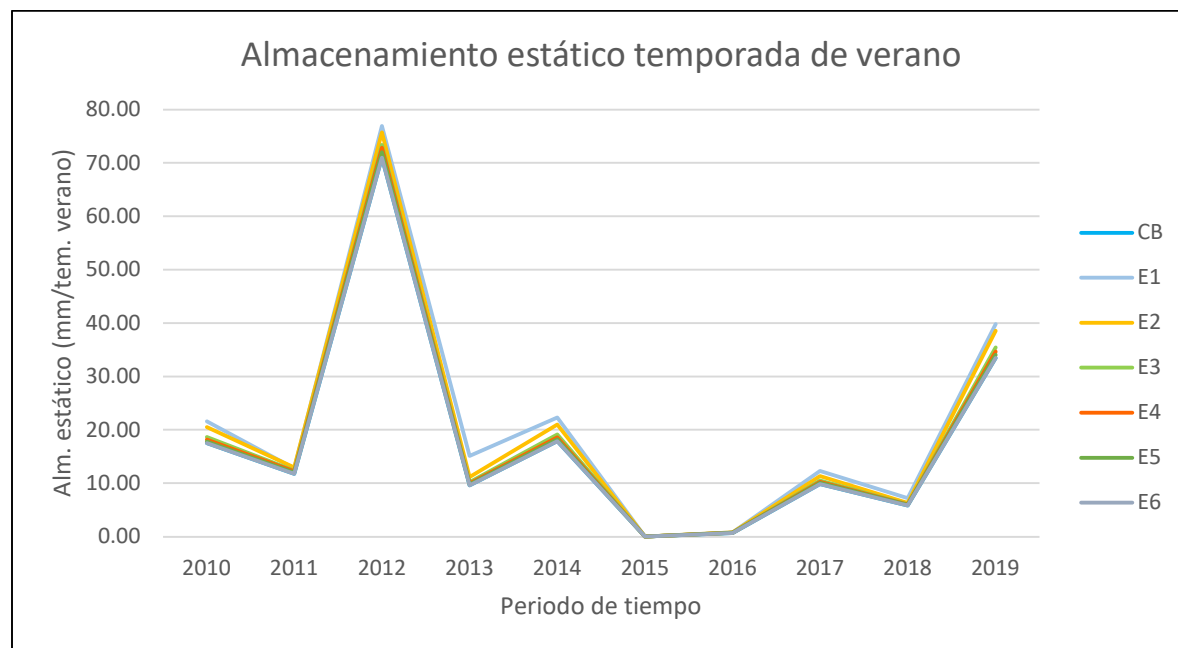


Tabla 45.

Almacenamiento Estático temporada de invierno por escenario de restauración (mm/temporada de invierno)

Años	Almacenamiento estático (mm/tem. invierno)						
	CB	E1	E2	E3	E4	E5	E6
2010	281.33	288.29	286.12	285.65	285.41	283.36	282.29
2011	243.88	250.06	248.40	246.21	246.52	245.73	244.06
2012	221.72	226.74	225.24	225.20	224.53	222.51	219.74
2013	281.43	289.55	288.27	286.58	286.00	285.58	284.55
2014	225.50	232.91	229.96	228.78	228.00	227.36	227.11
2015	238.63	245.40	244.38	244.00	243.80	243.03	241.40
2016	218.14	223.55	222.46	222.58	222.00	221.95	219.55
2017	270.47	277.38	276.16	275.01	275.50	274.43	272.38
2018	252.49	255.64	254.69	253.97	253.58	253.53	250.64
2019	286.95	295.56	293.46	292.72	290.66	288.63	287.56

Figura 89.

Almacenamiento Estático temporada de invierno por escenario de restauración (mm/temporada de invierno)

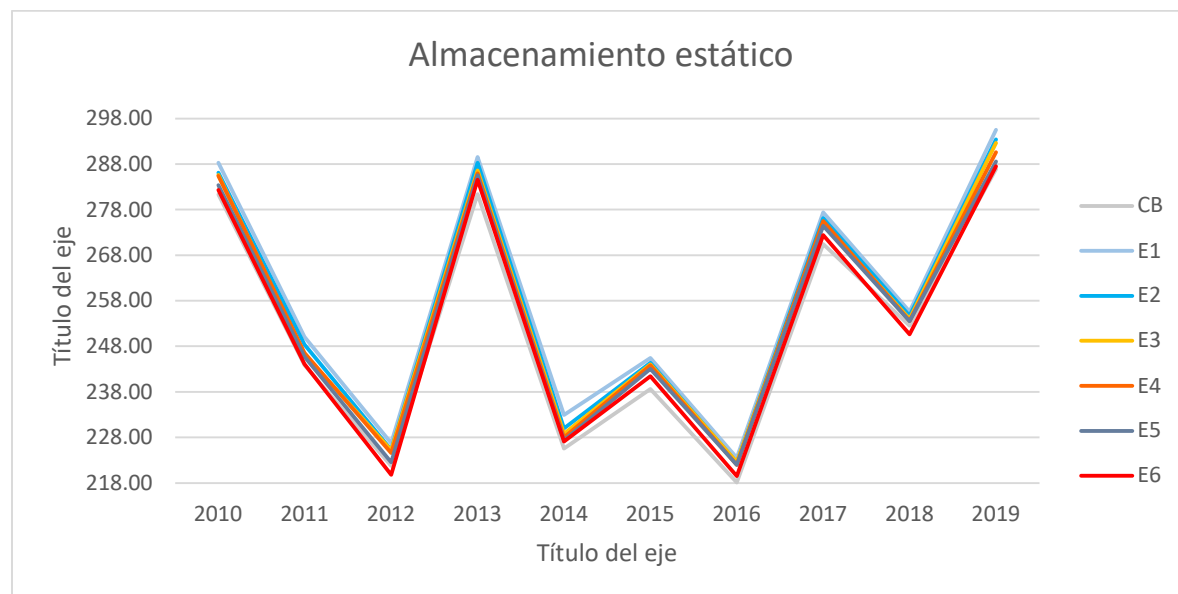


Tabla 46.*Lluvia directa anual por escenario de restauración (mm/año)*

Años	Lluvia directa (mm/año)						
	CB	E1	E2	E3	E4	E5	E6
2010	1307.65	1335.08	1329.64	1313.77	1309.84	1308.69	1306.65
2011	1673.51	1698.81	1692.46	1681.56	1677.75	1674.56	1672.51
2012	1600.00	1634.30	1626.12	1607.11	1603.21	1601.15	1600.33
2013	1501.64	1526.05	1519.37	1510.74	1505.50	1502.12	1501.64
2014	1882.01	1907.35	1900.43	1885.50	1882.94	1882.06	1881.71
2015	1691.25	1794.89	1717.40	1701.68	1697.77	1690.51	1690.38
2016	1196.98	1222.52	1215.78	1200.07	1194.33	1195.12	1196.98
2017	1776.65	1801.56	1794.88	1779.44	1773.71	1774.64	1776.65
2018	1815.39	1846.78	1838.11	1819.23	1815.44	1813.31	1815.39
2019	1467.80	1491.35	1485.66	1470.80	1465.34	1466.07	1467.80

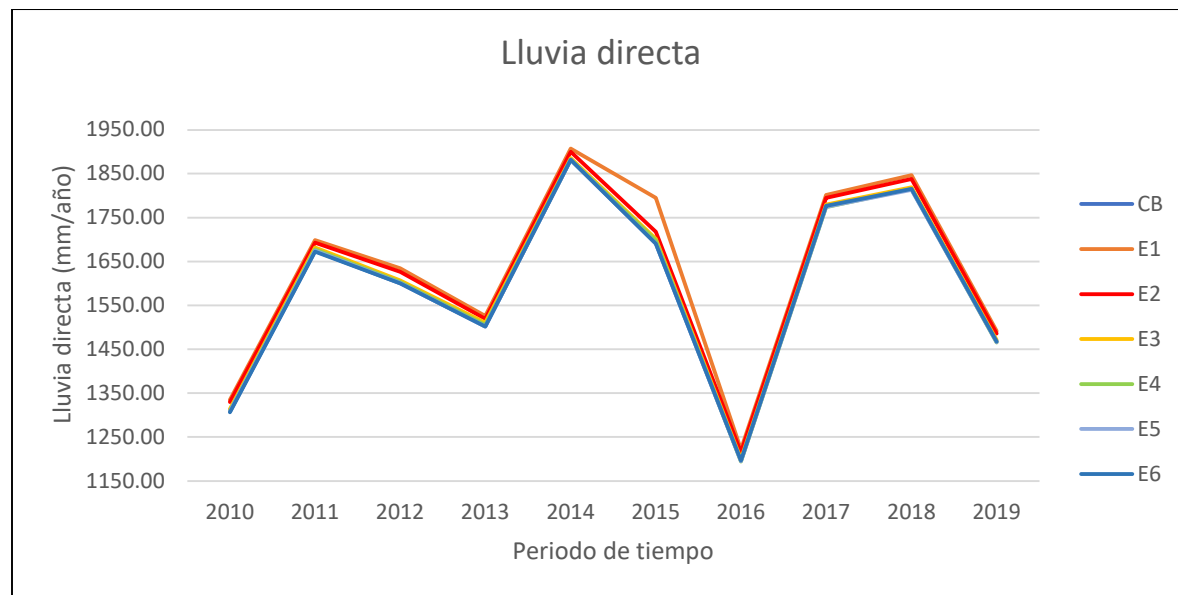
Figura 90.*Lluvia directa anual por escenario de restauración (mm/año)*

Tabla 47.*Lluvia directa temporada de invierno por escenario de restauración (mm/temporada de verano)*

Años	Lluvia directa (mm/tem. verano)						
	CB	E1	E2	E3	E4	E5	E6
2010	108.01	114.62	112.61	108.25	106.75	106.80	107.08
2011	96.40	104.10	102.68	98.38	96.81	96.97	95.80
2012	262.21	271.37	269.29	263.54	261.46	261.70	262.29
2013	63.80	66.16	65.01	62.53	61.61	61.77	62.10
2014	90.07	97.79	96.40	92.65	91.76	91.42	91.83
2015	1.30	1.76	1.39	1.35	1.32	1.30	1.30
2016	16.11	18.35	18.11	16.89	16.75	16.52	16.21
2017	83.98	91.55	90.42	87.04	85.80	85.94	84.31
2018	96.02	102.62	101.34	98.01	97.22	96.92	96.42
2019	130.20	134.92	133.85	131.09	130.69	130.63	130.43

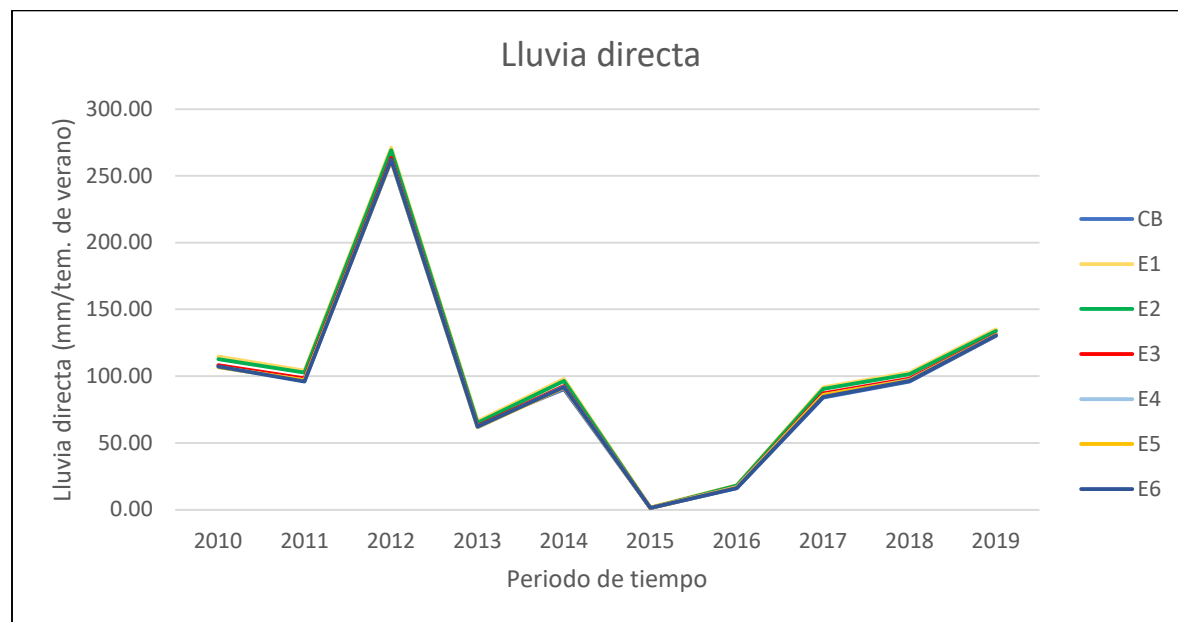
Figura 91.*Lluvia directa temporada de verano por escenario de restauración (mm/temperatura de verano)*

Tabla 48.*Lluvia directa temporada de invierno por escenario de restauración (mm/temporada de invierno)*

Años	Lluvia directa (mm/tem. invierno)						
	CB	E1	E2	E3	E4	E5	E6
2010	696.85	703.26	701.83	697.88	696.48	696.55	696.85
2011	958.65	967.35	964.62	959.84	958.22	958.31	958.65
2012	423.01	429.66	427.22	435.89	422.28	422.51	423.01
2013	931.78	943.38	940.27	935.06	933.30	933.40	931.78
2014	821.04	896.11	863.42	848.52	836.84	836.93	822.24
2015	910.35	998.32	970.58	957.88	938.95	926.35	912.35
2016	219.55	616.50	614.47	225.58	223.57	221.95	219.55
2017	869.04	878.84	876.20	871.11	869.97	869.52	869.10
2018	666.30	676.53	673.68	667.96	666.54	666.37	666.21
2019	754.92	766.11	763.07	757.64	755.89	755.88	755.23

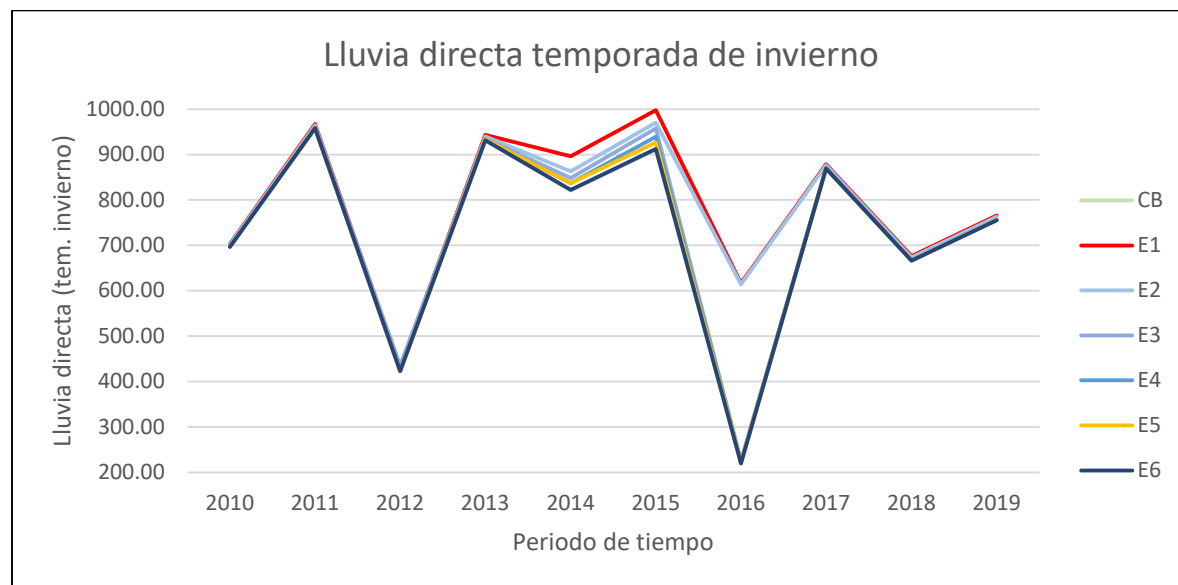
Figura 92.*Lluvia directa temporada de invierno por escenario de restauración (mm/temporada de invierno)*

Tabla 49.*Evapotranspiración anual por escenario de restauración (mm/año)*

Años	Evapotranspiración (mm/año)						
	CB	E1	E2	E3	E4	E5	E6
2010	225.39	202.82	213.08	224.20	228.01	227.13	225.39
2011	262.46	236.31	245.05	260.09	265.40	264.47	262.46
2012	258.38	223.30	238.88	255.38	260.85	260.14	258.38
2013	250.73	229.03	236.30	249.02	253.67	252.71	250.73
2014	250.21	225.11	232.51	247.52	252.83	252.05	250.21
2015	173.05	150.51	170.42	174.20	174.64	174.23	173.05
2016	194.43	167.99	181.33	192.89	196.66	195.92	194.43
2017	222.49	202.70	212.34	221.85	225.23	224.27	222.49
2018	184.00	162.79	174.45	183.25	186.17	185.42	184.00
2019	264.34	240.56	248.29	262.27	267.28	266.35	264.34

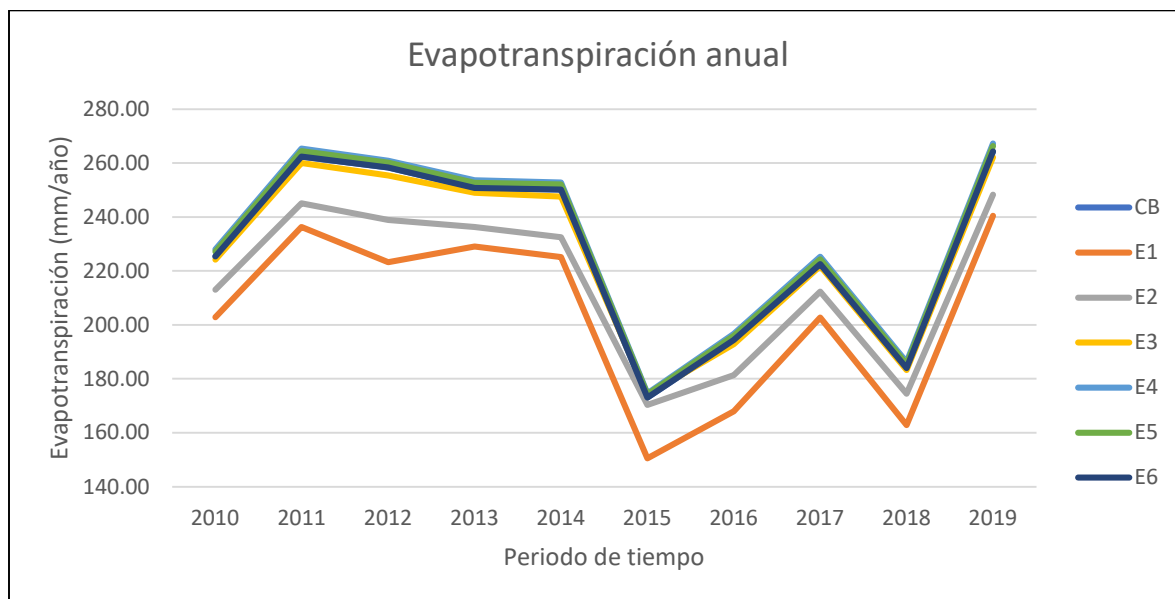
Figura 93.*Evapotranspiración anual por escenario de restauración (mm/año)*

Tabla 50.*Evapotranspiración temporada de verano por escenario de restauración (mm/temporada de verano)*

Años	Evapotranspiración (mm/tem. verano)						
	CB	E1	E2	E3	E4	E5	E6
2010	62.06	66.49	65.31	64.78	64.51	64.02	63.96
2011	51.45	55.00	54.02	53.93	53.48	52.90	52.22
2012	71.83	75.72	74.02	73.68	73.53	73.42	72.83
2013	45.54	48.17	47.15	46.19	46.11	45.72	45.21
2014	52.84	56.74	52.92	53.36	53.68	53.34	52.84
2015	1.05	1.44	1.25	1.13	1.07	1.06	1.05
2016	10.88	13.46	12.83	12.11	11.94	11.66	11.36
2017	61.17	64.30	62.39	61.32	61.24	60.74	60.07
2018	22.95	26.72	25.82	24.49	24.15	23.82	23.45
2019	84.35	89.78	87.44	86.86	86.33	85.91	85.16

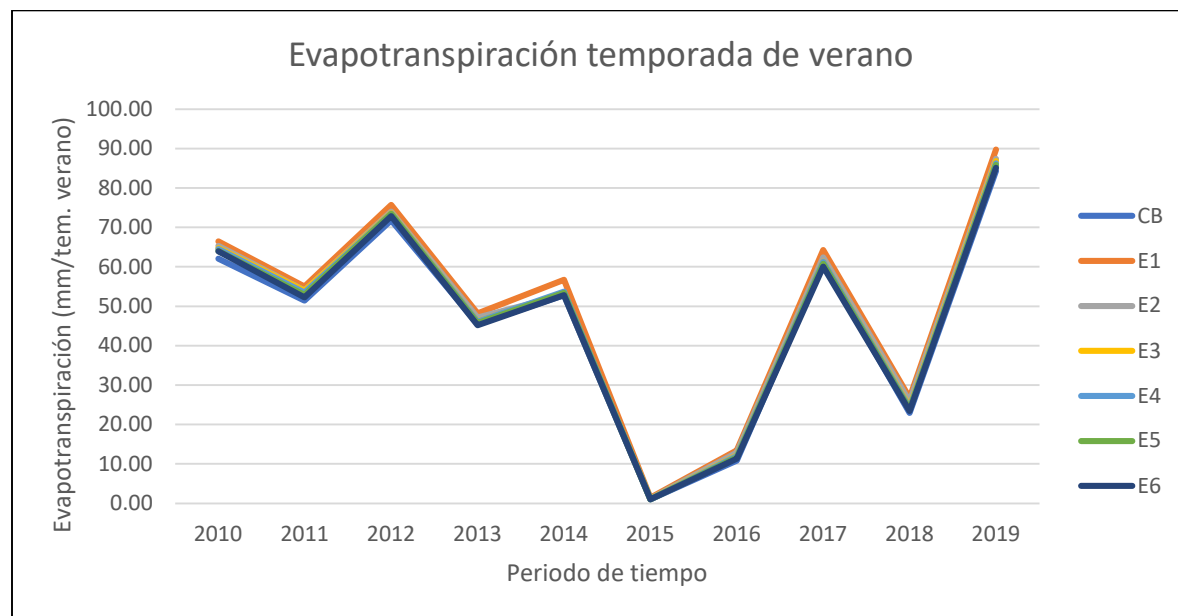
Figura 94.*Evapotranspiración temporada de invierno por escenario de restauración (mm/temporada de invierno)*

Tabla 51.*Evapotranspiración temporada de invierno por escenario de restauración (mm/temporada de invierno)*

Años	Evapotranspiración (mm/tem. invierno)						
	CB	E1	E2	E3	E4	E5	E6
2010	16.17	19.47	17.91	16.73	16.23	16.24	16.17
2011	8.05	9.48	8.75	8.57	8.44	8.41	8.35
2012	15.22	17.43	16.82	15.32	15.91	15.64	15.02
2013	5.44	6.04	5.95	5.81	5.73	5.68	5.62
2014	51.98	55.74	54.92	53.76	53.68	53.34	52.84
2015	10.12	11.76	10.77	10.63	10.33	10.31	10.26
2016	16.02	18.59	18.12	17.49	17.09	16.11	16.04
2017	5.38	7.66	6.29	6.07	5.98	5.94	5.88
2018	11.23	12.12	11.38	11.01	10.20	10.17	10.10
2019	8.00	9.23	8.10	8.12	8.10	8.06	8.00

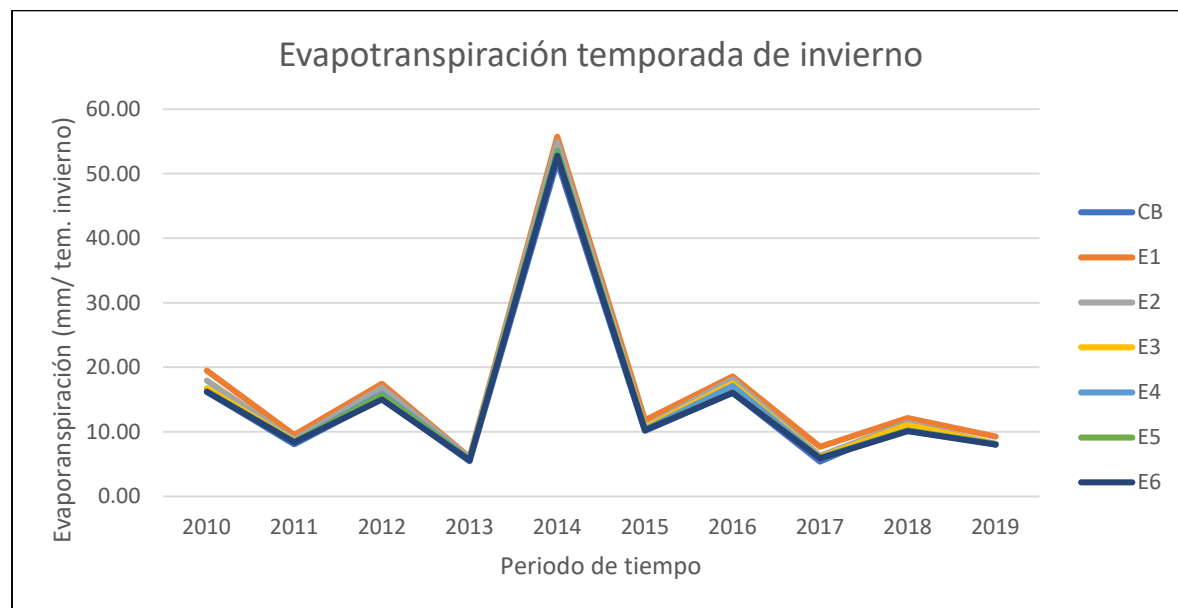
Figura 95.*Evapotranspiración temporada de invierno por escenario de restauración (mm/temporada de invierno)*

Tabla 52.*Almacenamiento superficial anual por escenario de restauración (mm/añual)*

Años	Almacenamiento superficial (mm/añual)						
	CB	E1	E2	E3	E4	E5	E6
2010	4.40E-04	4.50E-04	3.60E-04	3.60E-04	3.50E-04	4.00E-04	4.40E-04
2011	5.30E-04	5.40E-04	4.40E-04	4.40E-04	4.30E-04	4.80E-04	5.30E-04
2012	5.20E-04	5.30E-04	4.30E-04	4.20E-04	4.10E-04	4.70E-04	5.20E-04
2013	4.70E-04	4.80E-04	3.90E-04	3.90E-04	3.80E-04	4.20E-04	4.70E-04
2014	5.80E-04	5.90E-04	4.80E-04	4.70E-04	4.60E-04	5.20E-04	5.80E-04
2015	5.40E-04	5.50E-04	4.40E-04	3.60E-04	4.30E-04	4.90E-04	5.40E-04
2016	4.00E-04	4.00E-04	3.30E-04	3.20E-04	3.20E-04	3.60E-04	4.00E-04
2017	5.60E-04	5.70E-04	4.60E-04	4.60E-04	4.50E-04	5.00E-04	5.60E-04
2018	5.70E-04	5.80E-04	4.70E-04	4.60E-04	4.50E-04	5.10E-04	5.70E-04
2019	4.70E-04	4.70E-04	3.90E-04	3.80E-04	3.70E-04	4.20E-04	4.70E-04

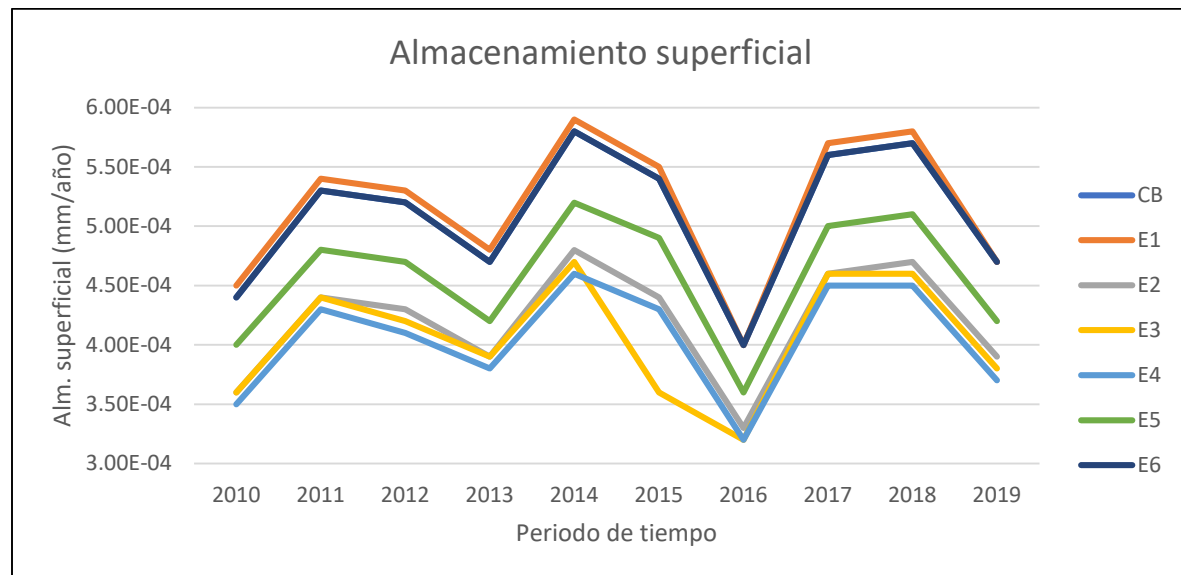
Figura 96.*Almacenamiento superficial anual por escenario de restauración (mm/añual)*

Tabla 53.

Almacenamiento superficial temporada de verano por escenario de restauración (mm/temporada de verano)

Años	Almacenamiento superficial (mm/tem. verano)						
	CB	E1	E2	E3	E4	E5	E6
2010	1.80E-04	1.90E-04	1.50E-04	1.50E-04	1.50E-04	1.70E-04	1.80E-04
2011	2.00E-04	2.00E-04	1.60E-04	1.60E-04	1.60E-04	1.80E-04	2.00E-04
2012	3.90E-04	4.00E-04	3.30E-04	3.20E-04	3.20E-04	3.60E-04	3.90E-04
2013	1.20E-04	1.30E-04	1.00E-04	1.00E-04	1.00E-04	1.10E-04	1.20E-04
2014	1.80E-04	1.80E-04	1.50E-04	1.50E-04	1.40E-04	1.60E-04	1.80E-04
2015	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
2016	6.00E-05	7.00E-05	5.00E-05	5.00E-05	5.00E-05	6.00E-05	6.00E-05
2017	1.70E-04	1.70E-04	1.40E-04	1.40E-04	1.30E-04	1.50E-04	1.70E-04
2018	1.70E-04	1.70E-04	1.40E-04	1.40E-04	1.30E-04	1.50E-04	1.70E-04
2019	1.90E-04	2.00E-04	1.60E-04	1.60E-04	1.50E-04	1.70E-04	1.90E-04

Figura 97.

Almacenamiento superficial temporada de verano por escenario de restauración (mm/temporada de verano)

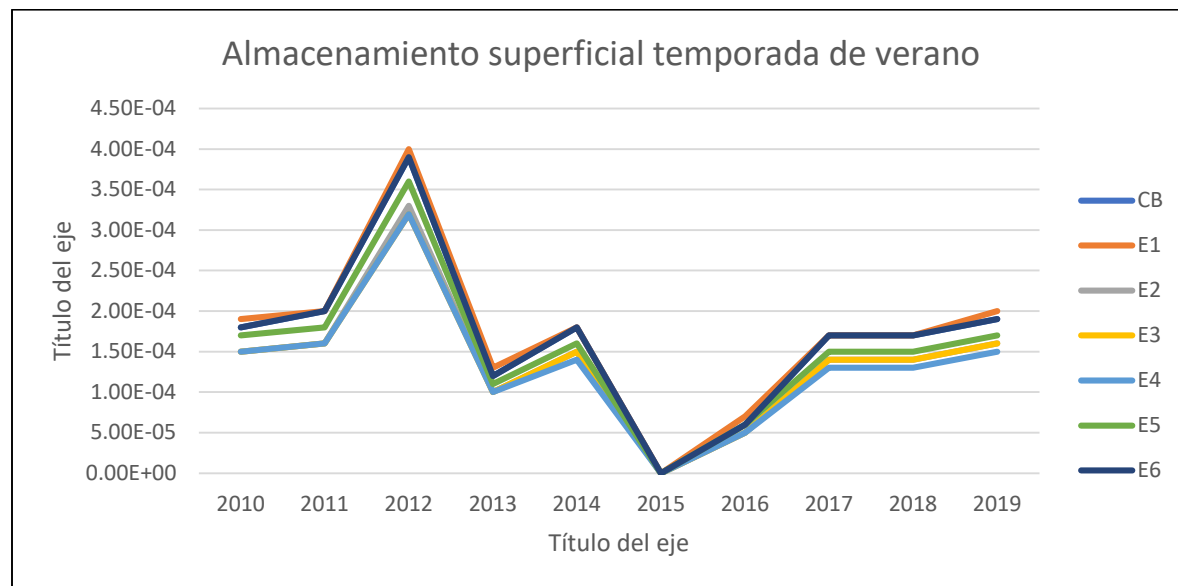


Tabla 54.

Almacenamiento superficial temporada de invierno por escenario de restauración (mm/temporada de invierno)

Años	Almacenamiento superficial (mm/tem. invierno)						
	CB	E1	E2	E3	E4	E5	E6
2010	8.00E-04	8.10E-04	6.60E-04	6.50E-04	6.40E-04	7.20E-04	8.00E-04
2011	1.09E-03	1.11E-03	9.00E-04	8.90E-04	8.70E-04	9.80E-04	1.09E-03
2012	5.40E-04	5.40E-04	4.40E-04	4.40E-04	4.30E-04	4.80E-04	5.40E-04
2013	1.07E-03	1.09E-03	8.80E-04	8.70E-04	8.60E-04	9.60E-04	1.07E-03
2014	9.60E-04	9.70E-04	7.90E-04	7.80E-04	7.70E-04	8.60E-04	9.60E-04
2015	1.12E-03	1.13E-03	9.10E-04	6.50E-04	8.90E-04	1.00E-03	1.12E-03
2016	7.00E-04	7.20E-04	5.80E-04	5.60E-04	6.30E-04	7.00E-04	7.00E-04
2017	9.90E-04	1.01E-03	8.20E-04	8.10E-04	7.90E-04	8.90E-04	9.90E-04
2018	7.60E-04	7.70E-04	6.30E-04	6.20E-04	6.10E-04	6.80E-04	7.60E-04
2019	8.40E-04	8.50E-04	6.90E-04	6.90E-04	6.70E-04	7.60E-04	8.40E-04

Figura 98.

Almacenamiento superficial temporada de invierno por escenario de restauración (mm/temporada de invierno)

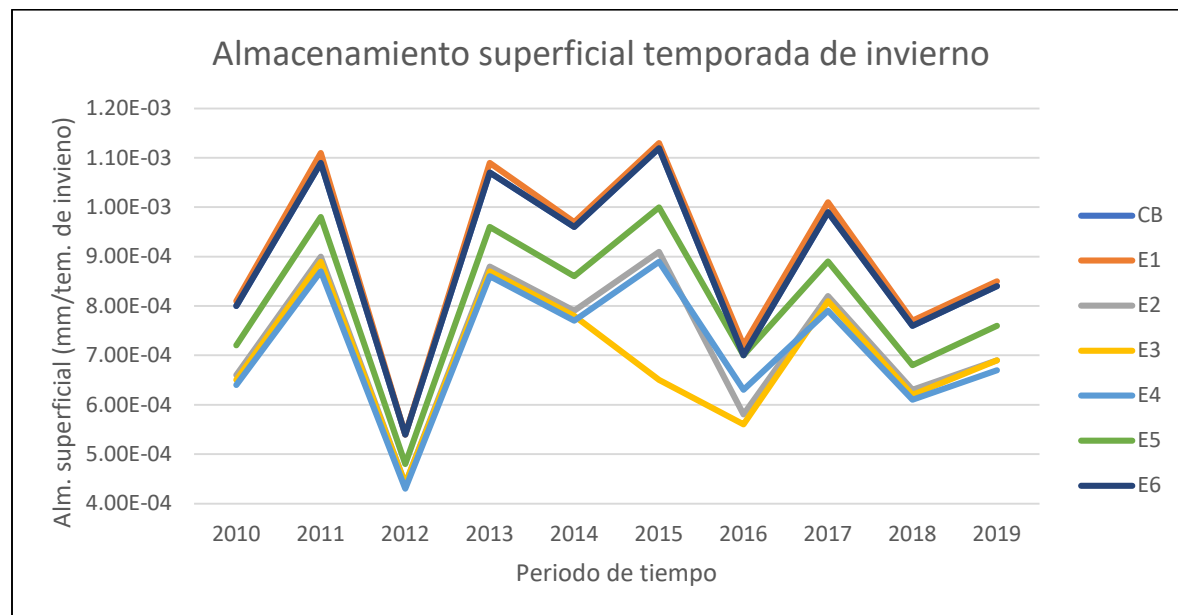


Tabla 55.*Excedente anual por escenario de restauración (mm/añual)*

Años	Excedente (mm/añual)						
	CB	E1	E2	E3	E4	E5	E6
2010	816.35	849.11	843.63	829.82	822.24	813.36	815.35
2011	1214.02	1257.28	1245.99	1224.14	1214.85	1218.70	1213.08
2012	1031.16	1107.84	1084.59	1042.92	1037.19	1030.95	1032.14
2013	1021.33	1117.38	1069.42	1048.84	1039.80	1033.59	1021.83
2014	1430.05	1462.93	1452.09	1429.25	1419.47	1423.44	1430.05
2015	1314.84	1350.45	1334.00	1320.82	1319.06	1316.52	1315.14
2016	700.01	759.51	745.14	716.32	708.67	704.46	701.08
2017	1275.12	1326.64	1316.44	1295.16	1285.75	1280.08	1271.12
2018	1303.17	1409.10	1394.84	1369.09	1358.51	1332.49	1319.17
2019	948.12	1022.02	1012.29	987.97	977.70	963.69	945.37

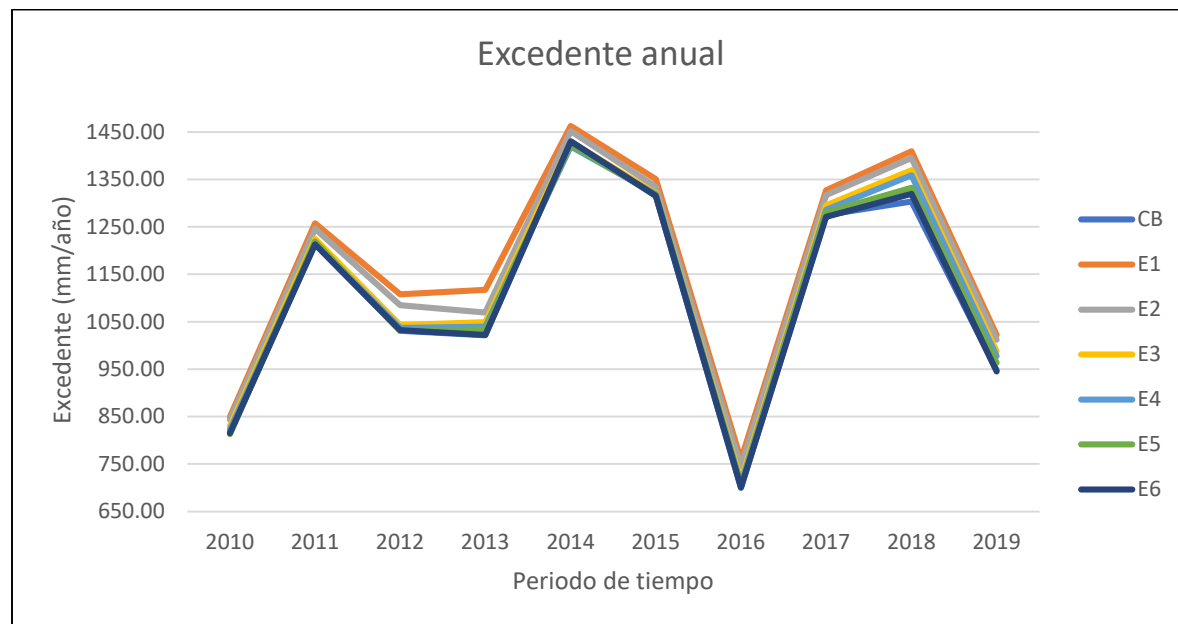
Figura 99.*Excedente anual por escenario de restauración (mm/añual)*

Tabla 56.*Excedente temporada de verano por escenario de restauración (mm/temporada de verano)*

Años	Excedente (mm/tem. verano)						
	CB	E1	E2	E3	E4	E5	E6
2010	12.44	12.68	12.22	11.45	11.38	10.86	9.44
2011	13.27	13.55	11.96	11.12	10.28	11.55	13.27
2012	29.39	31.29	27.00	25.09	23.41	25.95	29.39
2013	8.30	8.49	7.50	6.96	6.43	7.23	8.30
2014	12.06	12.31	10.89	10.12	9.36	10.51	12.06
2015	0.20	0.32	0.25	0.25	0.23	0.22	0.21
2016	3.12	4.43	3.92	3.62	3.35	3.28	3.13
2017	7.54	11.61	10.10	9.36	8.66	8.52	7.96
2018	8.19	11.66	10.35	9.63	8.92	8.40	8.36
2019	9.75	15.46	11.96	11.16	10.34	10.27	9.25

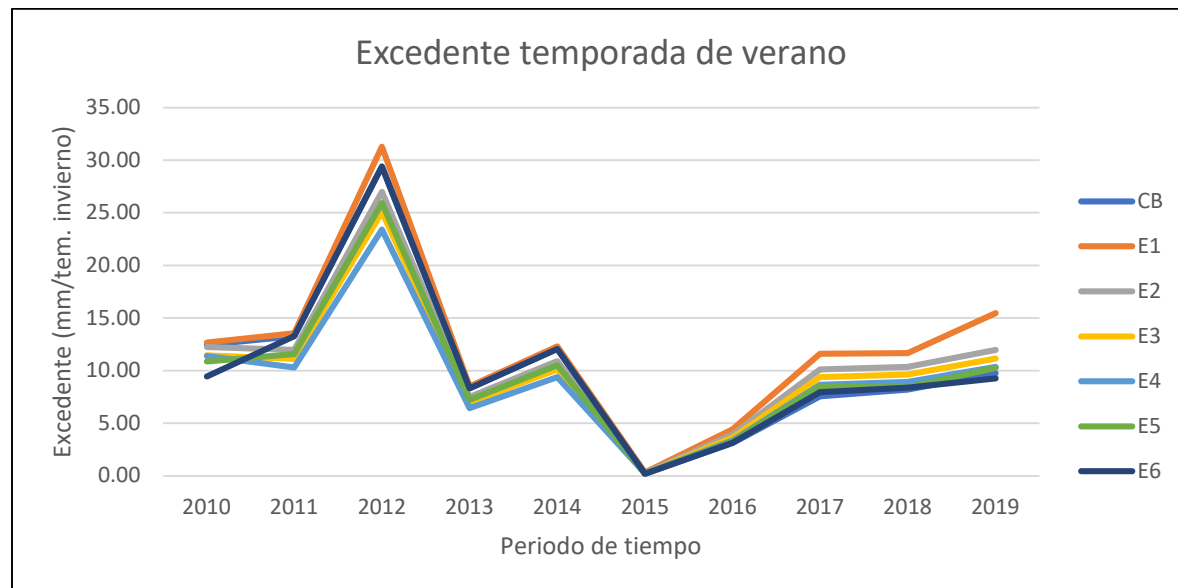
Figura 100.*Excedente temporada de verano por escenario de restauración (mm/temporada de verano)*

Tabla 57.*Excedente temporada de invierno por escenario de restauración (mm/temporada de invierno)*

Años	Excedente (mm/tem. invierno)						
	CB	E1	E2	E3	E4	E5	E6
2010	8.00E-04	8.10E-04	6.60E-04	6.50E-04	6.40E-04	7.20E-04	8.00E-04
2011	1.09E-03	1.11E-03	9.00E-04	8.90E-04	8.70E-04	9.80E-04	1.09E-03
2012	5.40E-04	5.40E-04	4.40E-04	4.40E-04	4.30E-04	4.80E-04	5.40E-04
2013	1.07E-03	1.09E-03	8.80E-04	8.70E-04	8.60E-04	9.60E-04	1.07E-03
2014	9.60E-04	9.70E-04	7.90E-04	7.80E-04	7.70E-04	8.60E-04	9.60E-04
2015	1.12E-03	1.13E-03	9.10E-04	6.50E-04	8.90E-04	1.00E-03	1.12E-03
2016	7.00E-04	7.20E-04	5.80E-04	5.60E-04	6.30E-04	7.00E-04	7.00E-04
2017	9.90E-04	1.01E-03	8.20E-04	8.10E-04	7.90E-04	8.90E-04	9.90E-04
2018	7.60E-04	7.70E-04	6.30E-04	6.20E-04	6.10E-04	6.80E-04	7.60E-04
2019	8.40E-04	8.50E-04	6.90E-04	6.90E-04	6.70E-04	7.60E-04	8.40E-04

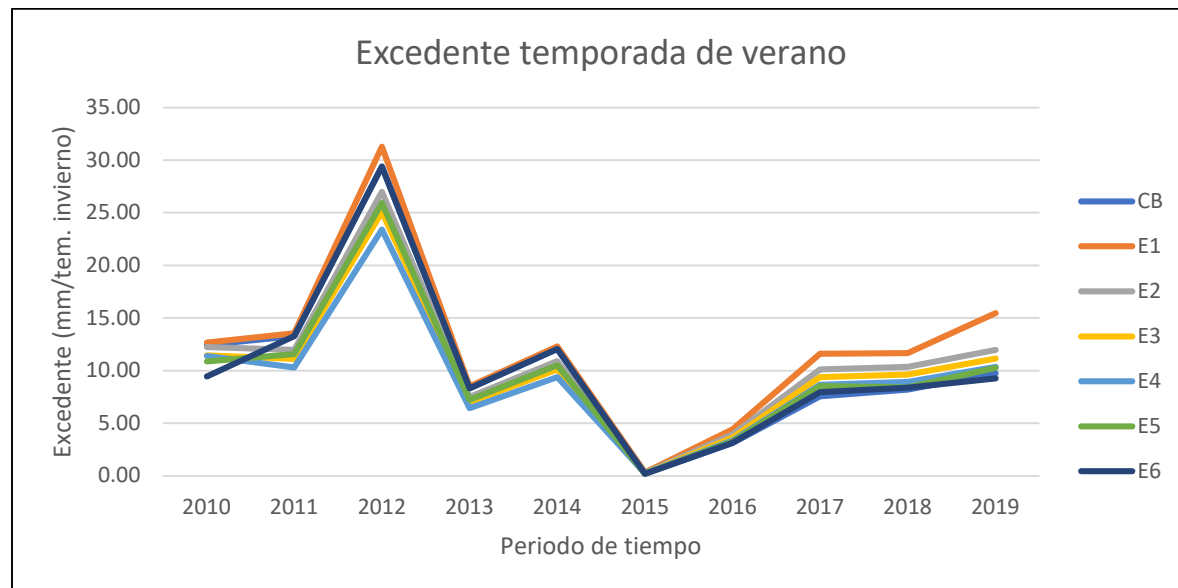
Figura 101.*Excedente temporada de invierno por escenario de restauración (mm/temporada de invierno)*

Tabla 58.*Escorrentía anual por escenario de restauración (mm/añual)*

Años	Escorrentía (mm/añual)						
	CB	E1	E2	E3	E4	E5	E6
2010	119.25	137.32	132.83	110.76	112.26	115.20	119.30
2011	144.32	166.68	161.22	120.47	124.21	139.83	144.80
2012	140.54	162.04	156.72	110.86	120.88	136.04	141.05
2013	127.73	147.19	142.37	114.81	119.73	123.50	127.95
2014	155.55	179.80	173.91	135.13	144.04	150.85	156.24
2015	141.44	169.33	163.81	120.76	126.29	142.17	136.71
2016	108.32	124.38	120.29	80.46	92.81	104.43	108.22
2017	150.42	173.94	168.22	122.27	129.50	145.81	151.02
2018	152.67	176.44	170.63	132.39	141.48	147.99	153.34
2019	125.97	145.20	140.43	117.17	108.20	121.78	126.16

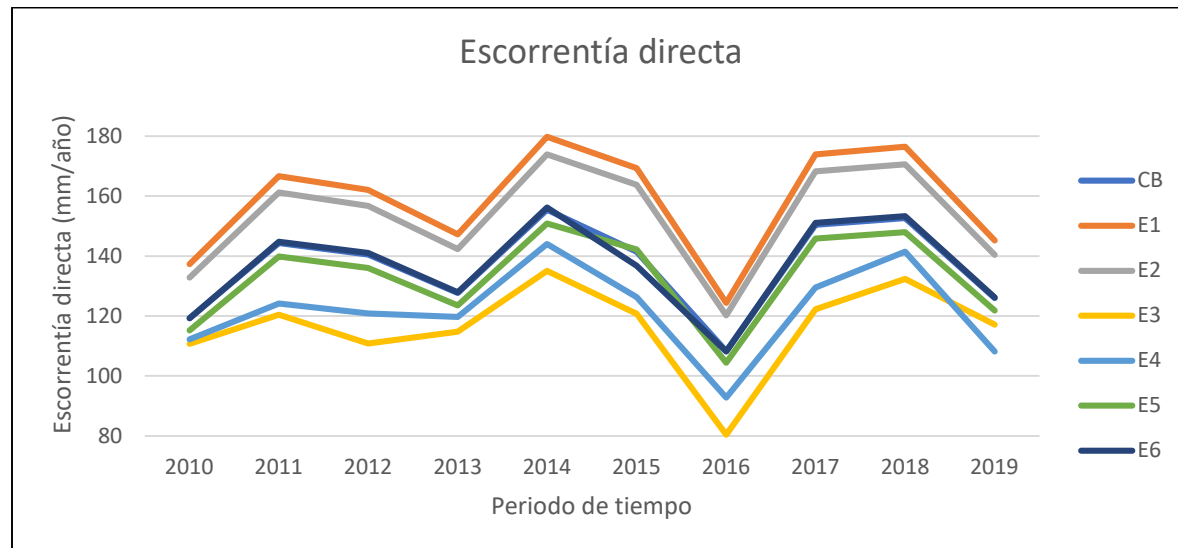
Figura 102.*Escorrentía anual por escenario de restauración (mm/añual)*

Tabla 59.*Escorrentía temporada de verano por escenario de restauración (mm/temporada de verano)*

Años	Escorrentía (mm/tem. verano)						
	CB	E1	E2	E3	E4	E5	E6
2010	13.21	12.40	10.79	9.24	10.01	10.41	12.00
2011	14.01	13.31	11.57	9.89	10.72	11.16	12.87
2012	26.39	27.01	23.54	20.14	21.82	22.67	26.12
2013	9.53	8.34	7.26	6.20	6.72	7.00	8.06
2014	12.92	12.09	10.52	8.99	9.75	10.14	11.69
2015	2.28	0.32	0.27	0.23	0.25	0.26	0.30
2016	5.99	4.41	3.86	3.30	3.56	3.72	4.27
2017	12.12	11.21	9.78	8.33	9.04	9.40	10.83
2018	12.28	11.38	9.91	8.47	9.18	9.55	11.00
2019	13.78	13.06	11.35	9.72	10.53	10.94	12.62

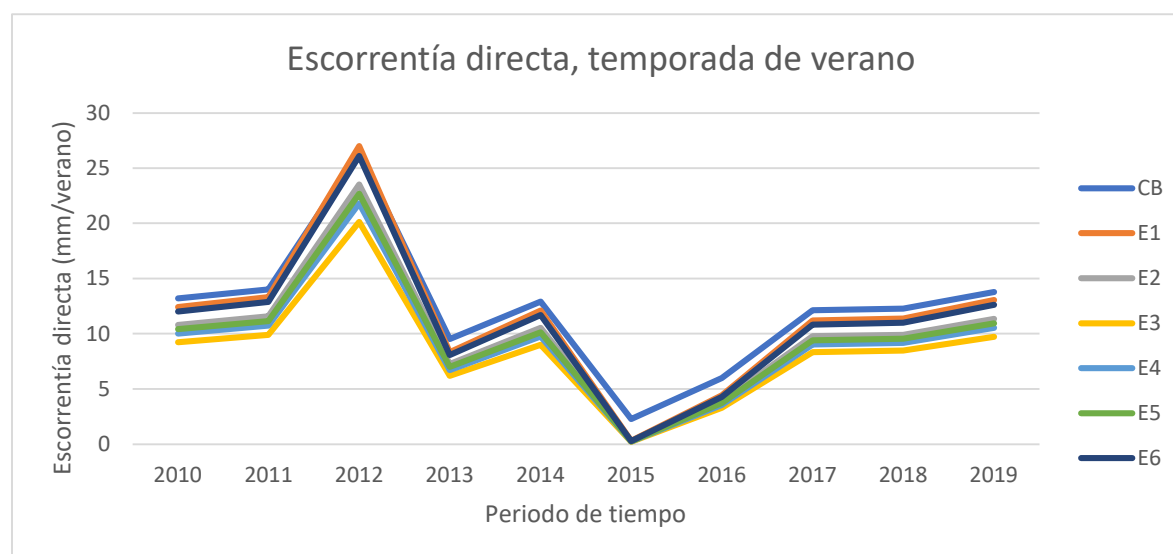
Figura 103.*Escorrentía temporada de verano por escenario de restauración (mm/temporada de verano)*

Tabla 60.*Escorrentía temporada de invierno por escenario de restauración (mm/temporada de invierno)*

Años	Escorrentía (mm/tem. invierno)						
	CB	E1	E2	E3	E4	E5	E6
2010	60.39	64.66	56.12	48.14	52.14	54.23	62.55
2011	81.99	88.59	76.91	65.99	71.46	74.29	85.69
2012	41.33	43.56	37.86	32.44	35.14	36.53	42.12
2013	80.43	86.85	75.46	64.73	70.09	72.85	84.01
2014	72.19	77.70	67.53	57.95	62.73	65.22	75.16
2015	83.96	90.70	73.21	55.65	62.14	76.17	87.75
2016	53.65	57.19	49.71	42.65	46.18	47.99	55.31
2017	74.69	70.23	69.84	59.91	64.90	67.48	77.89
2018	57.81	61.82	53.70	46.04	49.88	51.83	59.78
2019	63.55	68.20	59.18	50.77	55.00	57.15	65.96

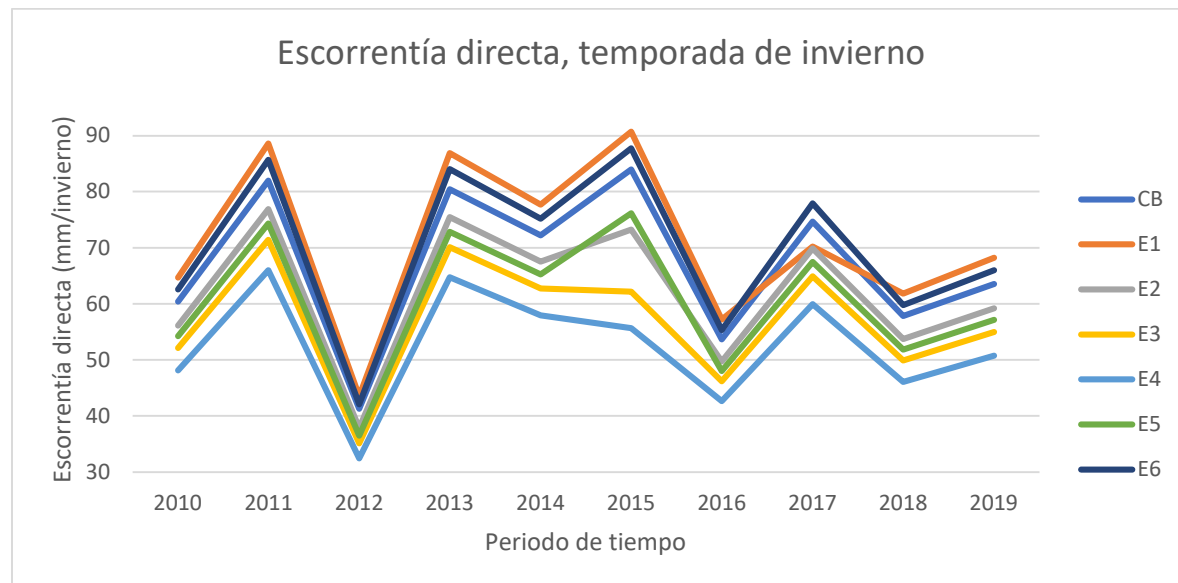
Figura 104.*Escorrentía temporada de invierno por escenario de restauración (mm/temporada de invierno)*

Tabla 61.*Almacenamiento gravitacional anual por escenario de restauración (mm/añual)*

Años	Almacenamiento gravitacional (mm/añual)						
	CB	E1	E2	E3	E4	E5	E6
2010	37.25	39.23	38.94	38.13	38.02	37.54	36.96
2011	58.62	60.61	59.80	59.66	59.51	59.05	58.20
2012	44.26	47.90	47.10	45.51	45.20	44.61	43.91
2013	49.90	51.73	51.44	50.81	50.81	50.25	49.54
2014	69.23	71.20	70.99	70.55	70.41	69.69	68.76
2015	63.58	64.92	64.85	64.13	64.08	63.78	63.38
2016	31.44	34.00	33.32	32.30	32.11	31.69	31.19
2017	61.49	64.30	63.10	62.52	62.59	61.92	61.06
2018	64.96	67.28	66.90	66.09	66.10	65.41	64.52
2019	46.61	49.79	48.41	47.57	47.48	46.95	46.27

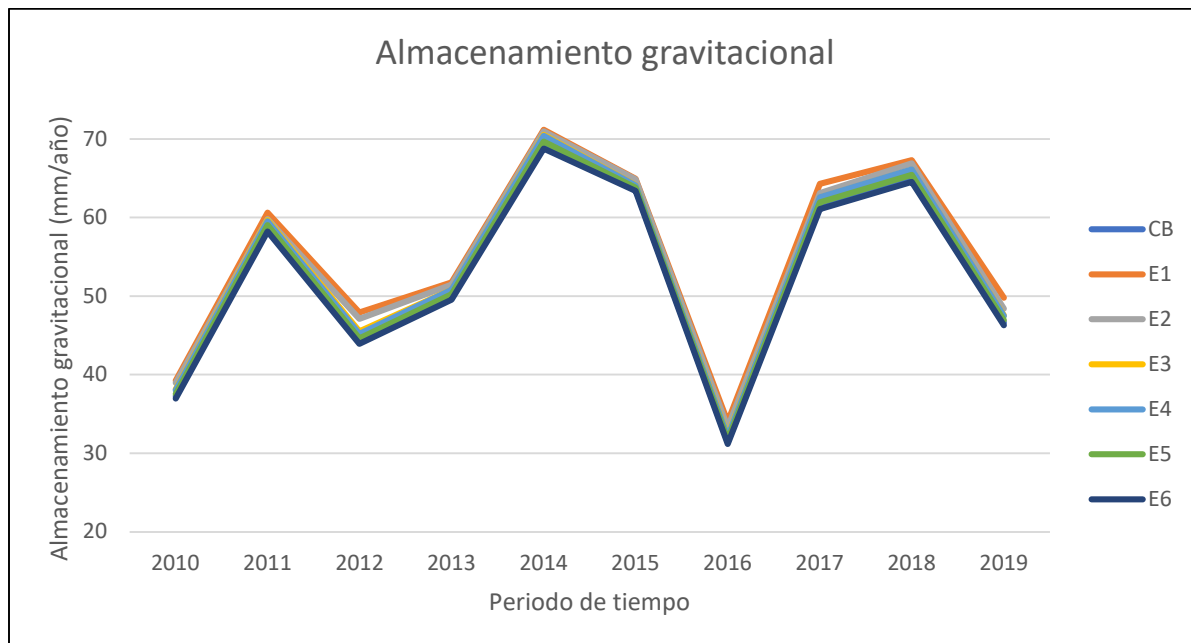
Figura 105.*Almacenamiento gravitacional anual por escenario de restauración (mm/añual)*

Tabla 62.

Almacenamiento gravitacional temporada de verano por escenario de restauración (mm/temporada de verano)

Años	Almacenamiento gravitacional (mm/tem. verano)						
	CB	E1	E2	E3	E4	E5	E6
2010	0.09	0.10	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
2011	0.06	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
2012	0.34	0.35	0.34	0.33	0.33	0.34	0.34
2013	0.05	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
2014	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
2015	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2016	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
2017	0.07	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
2018	0.04	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
2019	0.14	0.15	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14

Figura 106.

Almacenamiento gravitacional temporada de verano por escenario de restauración (mm/temporada de verano)

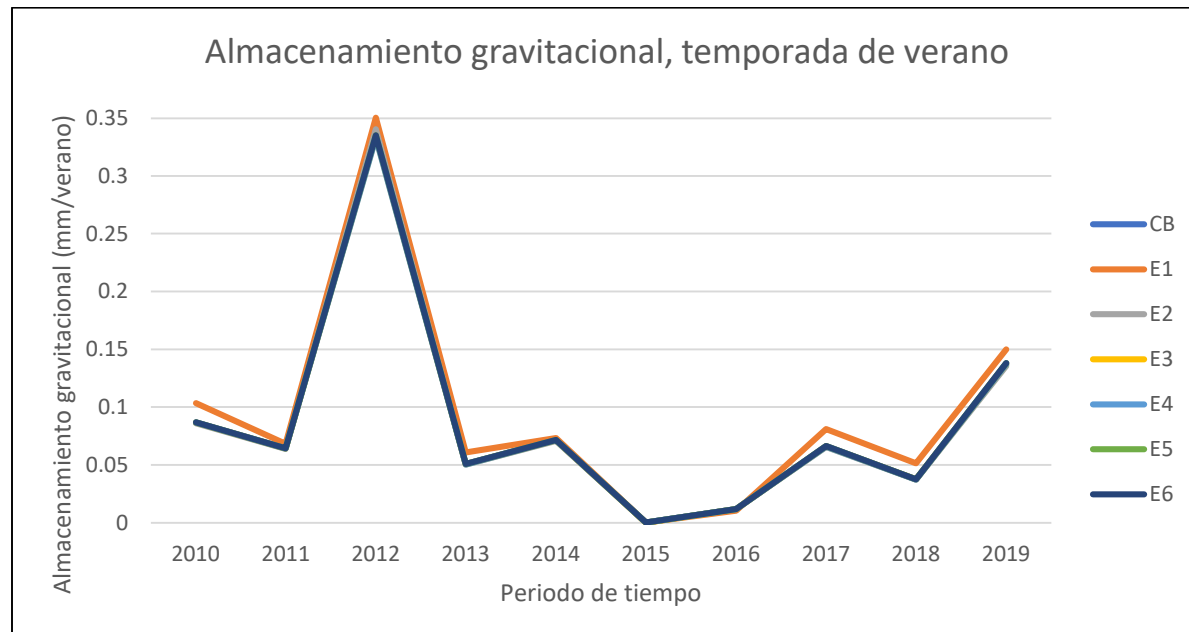


Tabla 63.

Almacenamiento gravitacional temporada de invierno por escenario de restauración (mm/temporada de invierno)

Años	Almacenamiento gravitacional (mm/tem. invierno)						
	CB	E1	E2	E3	E4	E5	E6
2010	52.97	60.25	55.70	54.35	54.12	53.40	52.55
2011	87.68	95.41	91.22	90.58	90.08	89.02	87.68
2012	9.66	12.48	11.15	11.02	10.13	9.91	9.66
2013	84.43	89.33	88.08	86.80	86.74	85.72	84.43
2014	61.21	65.17	64.58	63.18	62.98	62.18	61.21
2015	82.75	86.39	85.14	85.35	85.16	84.09	82.75
2016	35.61	39.34	38.46	37.10	36.80	36.25	35.61
2017	75.88	79.85	79.07	78.07	78.00	77.06	75.88
2018	25.36	28.23	27.61	26.54	26.25	25.83	25.36
2019	61.00	65.14	64.43	62.91	62.64	61.91	61.00

Figura 107.

Almacenamiento gravitacional temporada de invierno por escenario de restauración (mm/temporada de invierno)

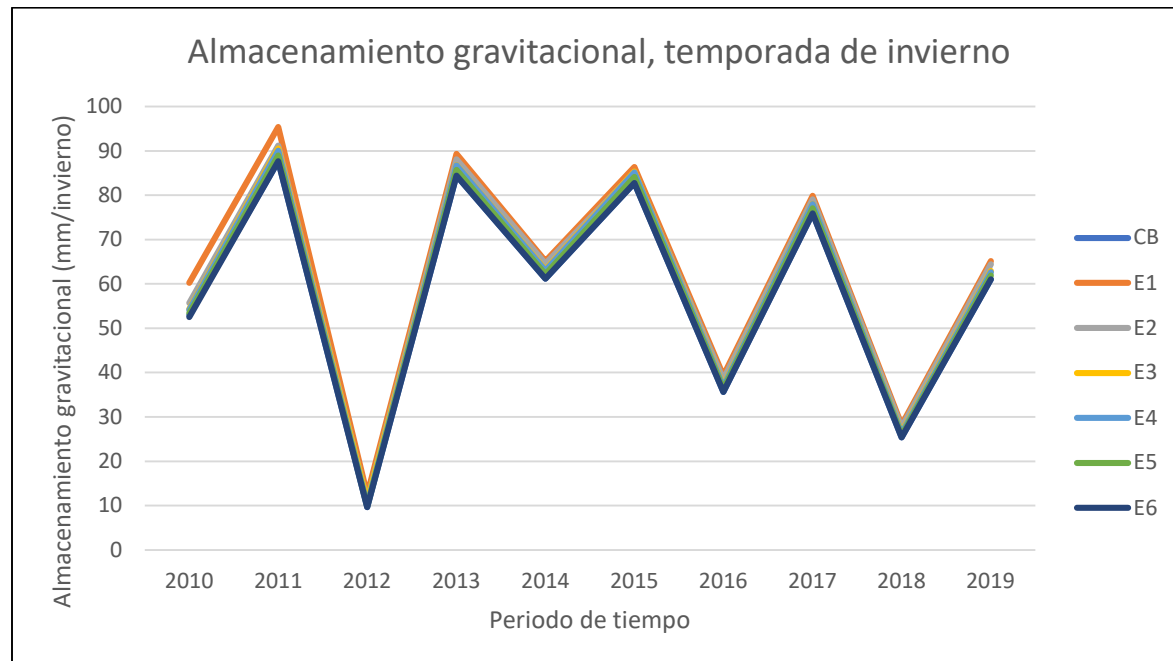


Tabla 64.*Infiltración anual por escenario de restauración (mm/añual)*

Años	Infiltración (mm/añual)						
	CB	E1	E2	E3	E4	E5	E6
2010	806.86	849.11	843.63	819.82	809.24	807.36	806.35
2011	1211.39	1257.28	1245.99	1224.14	1214.85	1212.70	1210.08
2012	1029.54	1107.84	1084.59	1042.92	1037.19	1030.95	1028.14
2013	1042.21	1077.38	1069.42	1048.84	1049.80	1043.59	1040.83
2014	1415.72	1462.91	1452.07	1429.23	1422.45	1420.42	1411.03
2015	1310.32	1350.44	1323.99	1319.82	1315.05	1311.51	1309.13
2016	716.77	759.51	745.14	726.32	724.67	718.46	715.08
2017	1273.60	1326.64	1316.44	1295.16	1285.75	1280.08	1267.12
2018	1350.64	1408.90	1394.65	1368.90	1358.32	1352.30	1348.98
2019	970.83	1021.80	1012.08	987.77	977.49	971.48	970.17

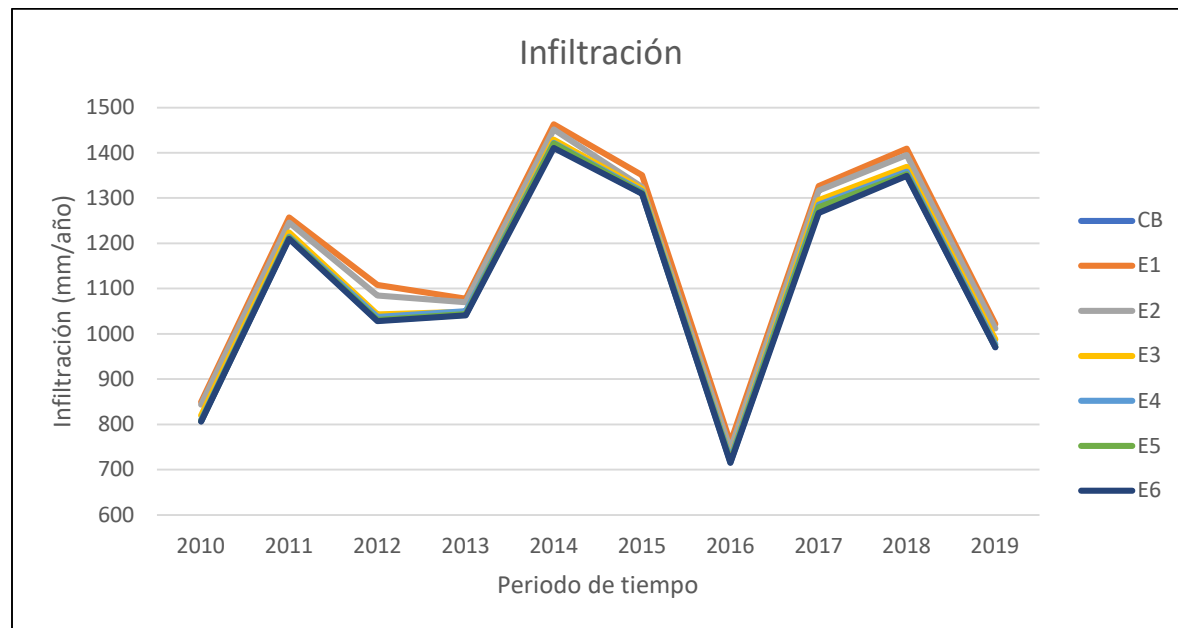
Figura 108.*Infiltración anual por escenario de restauración (mm/añual)*

Tabla 65.*Infiltración temporada de verano por escenario de restauración (mm/temporada de verano)*

Años	Infiltración (mm/tem. verano)						
	CB	E1	E2	E3	E4	E5	E6
2010	10.65	12.68	11.22	10.80	10.68	10.86	10.44
2011	10.61	13.55	11.96	11.62	11.28	11.15	10.07
2012	23.67	31.29	27.00	25.09	24.41	23.95	23.39
2013	6.17	8.49	7.50	6.96	6.43	6.23	6.10
2014	10.19	12.31	11.89	11.12	10.66	10.51	9.86
2015	0.23	0.32	0.25	0.24	0.23	0.23	0.22
2016	3.46	4.43	3.92	3.82	3.75	3.61	3.32
2017	9.44	11.41	10.70	10.36	9.86	9.72	9.16
2018	9.68	11.66	11.35	10.63	10.01	9.90	9.46
2019	10.91	13.46	12.96	12.16	11.73	11.57	10.25

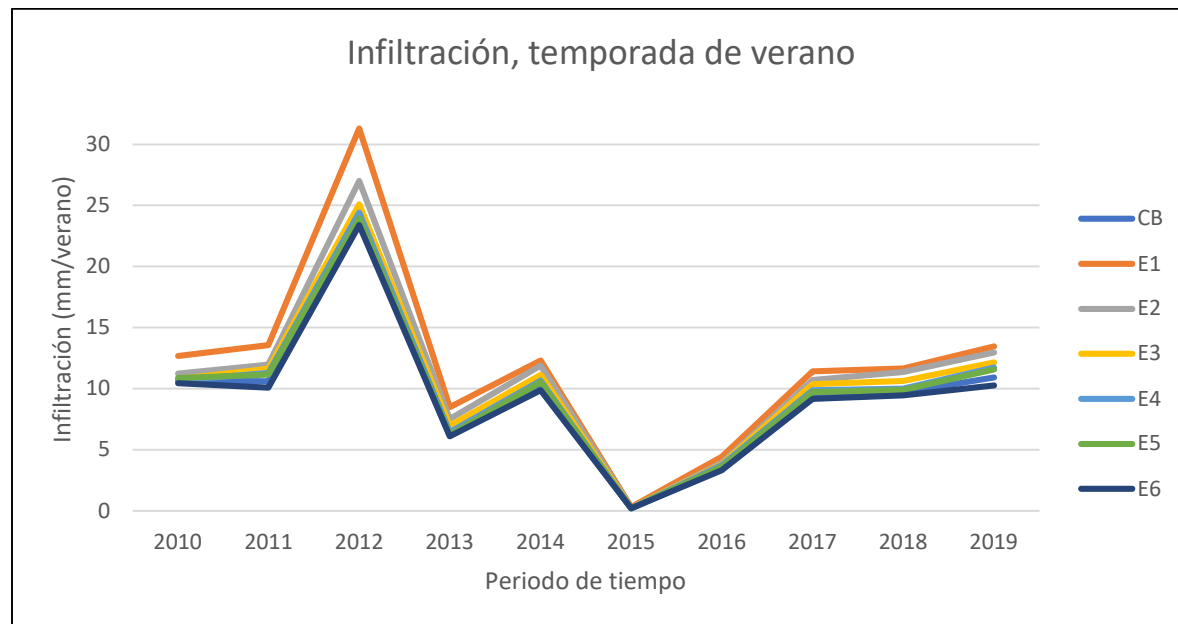
Figura 109.*Infiltración temporada de verano por escenario de restauración (mm/temporada de verano)*

Tabla 66.*Infiltración temporada de invierno por escenario de restauración (mm/temporada de invierno)*

Años	Infiltración (mm/tem. invierno)						
	CB	E1	E2	E3	E4	E5	E6
2010	363.52	384.50	382.30	371.43	368.42	364.68	362.36
2011	625.70	648.39	644.87	632.90	629.60	627.85	623.56
2012	115.18	132.53	130.22	126.79	120.12	119.72	110.64
2013	603.43	624.66	620.62	612.23	608.79	605.06	601.80
2014	504.85	523.62	519.40	512.39	508.75	506.99	502.71
2015	602.40	625.83	618.78	609.43	605.23	603.51	601.28
2016	273.22	294.85	291.53	279.50	274.19	276.39	270.04
2017	533.24	560.23	556.69	544.51	539.11	535.38	531.11
2018	327.43	353.60	349.00	335.24	330.38	329.57	325.28
2019	424.77	446.79	442.78	430.17	427.67	426.91	422.62

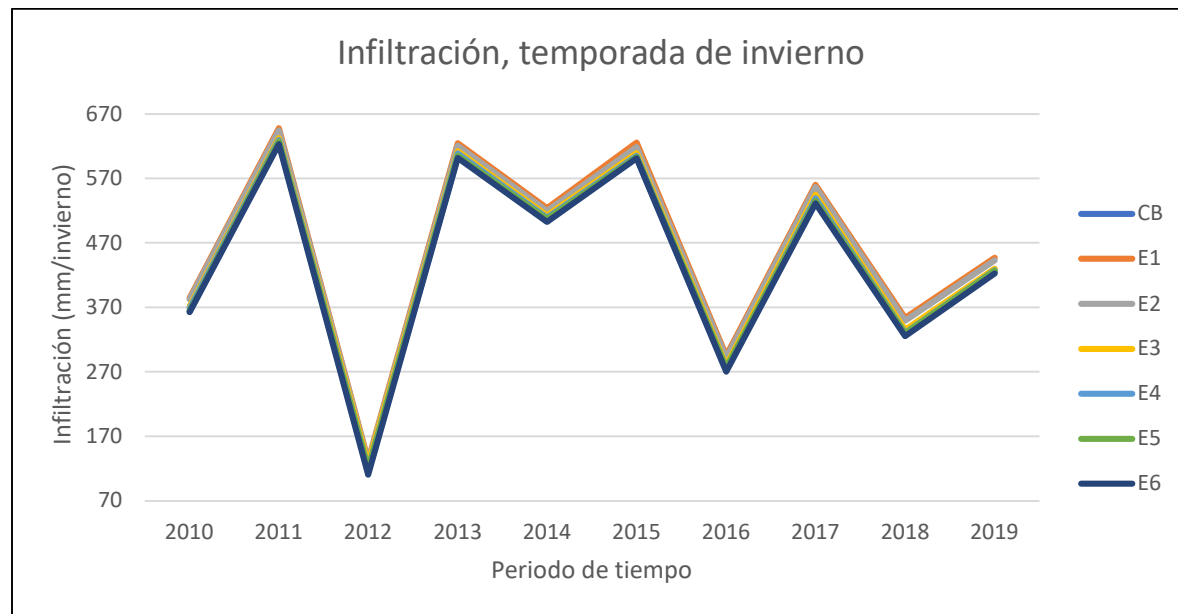
Figura 110.*Infiltración temporada de invierno por escenario de restauración (mm/temporada de invierno)*

Tabla 67.*Interflujo anual por escenario de restauración (mm/añual)*

Años	Interflujo (mm/añual)						
	CB	E1	E2	E3	E4	E5	E6
2010	679.16	717.19	709.18	694.73	692.87	684.33	673.98
2011	1057.31	1103.18	1094.04	1092.57	1083.54	1071.79	1056.82
2012	802.29	871.26	860.39	831.36	826.02	815.51	803.08
2013	901.26	963.01	934.70	923.42	923.51	913.56	900.97
2014	1246.46	1293.81	1286.82	1275.16	1276.48	1263.66	1247.25
2015	1152.34	1210.72	1187.21	1180.73	1179.70	1167.32	1151.35
2016	574.19	629.19	612.01	593.43	590.16	582.66	573.73
2017	1112.29	1165.74	1148.90	1138.45	1139.79	1127.92	1112.67
2018	1177.01	1239.44	1218.61	1203.94	1204.26	1191.89	1176.13
2019	840.37	886.50	879.34	864.16	862.89	853.34	841.41

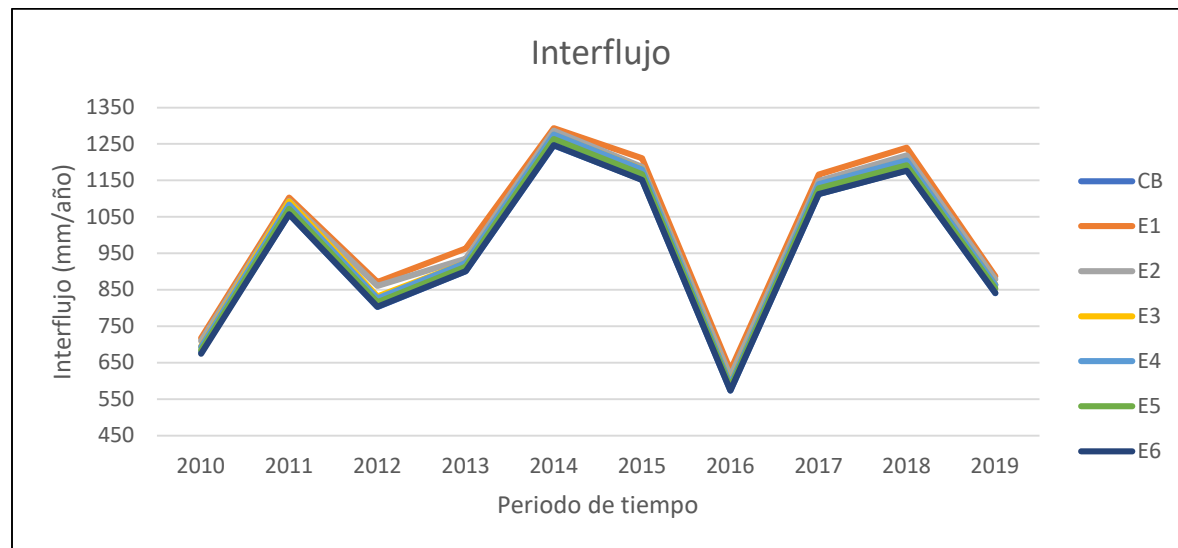
Figura 111.*Interflujo anual por escenario de restauración (mm/añual)*

Tabla 68.*Interflujo temporada de verano por escenario de restauración (mm/temporada de verano)*

Años	Interflujo (mm/tem. verano)						
	CB	E1	E2	E3	E4	E5	E6
2010	0.35	0.35	0.36	0.35	0.35	0.35	0.35
2011	0.26	0.27	0.29	0.27	0.27	0.27	0.27
2012	2.92	2.93	3.51	2.93	2.93	2.93	2.93
2013	0.19	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
2014	0.28	0.29	0.31	0.29	0.29	0.29	0.29
2015	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2016	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
2017	0.26	0.27	0.28	0.27	0.27	0.27	0.27
2018	0.16	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17
2019	0.53	0.54	0.55	0.54	0.54	0.54	0.54

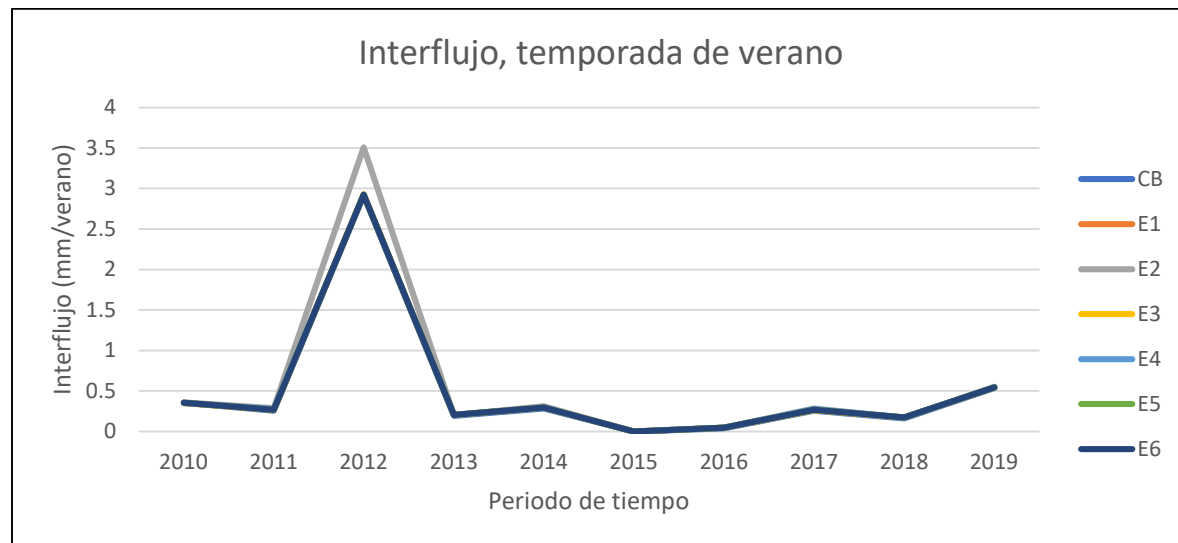
Figura 112.*Interflujo temporada de verano por escenario de restauración (mm/temporada de verano)*

Tabla 69.*Interflujo temporada de invierno por escenario de restauración (mm/temporada de invierno)*

Años	Interflujo (mm/tem. invierno)						
	CB	E1	E2	E3	E4	E5	E6
2010	265.57	273.99	279.98	273.69	272.68	269.37	265.37
2011	436.43	446.03	453.15	447.72	447.74	442.86	436.67
2012	53.34	54.73	56.12	55.17	55.81	54.81	53.67
2013	419.29	429.35	436.29	430.26	430.01	425.29	419.34
2014	309.02	319.73	325.13	318.55	317.67	313.97	309.46
2015	412.01	420.79	431.04	423.69	423.15	418.20	412.02
2016	184.16	193.40	197.37	190.92	189.58	187.04	184.06
2017	378.05	387.83	394.59	388.94	388.64	384.30	378.83
2018	136.43	142.89	147.33	142.14	140.81	138.90	136.73
2019	305.31	316.62	321.33	314.13	312.96	309.55	305.38

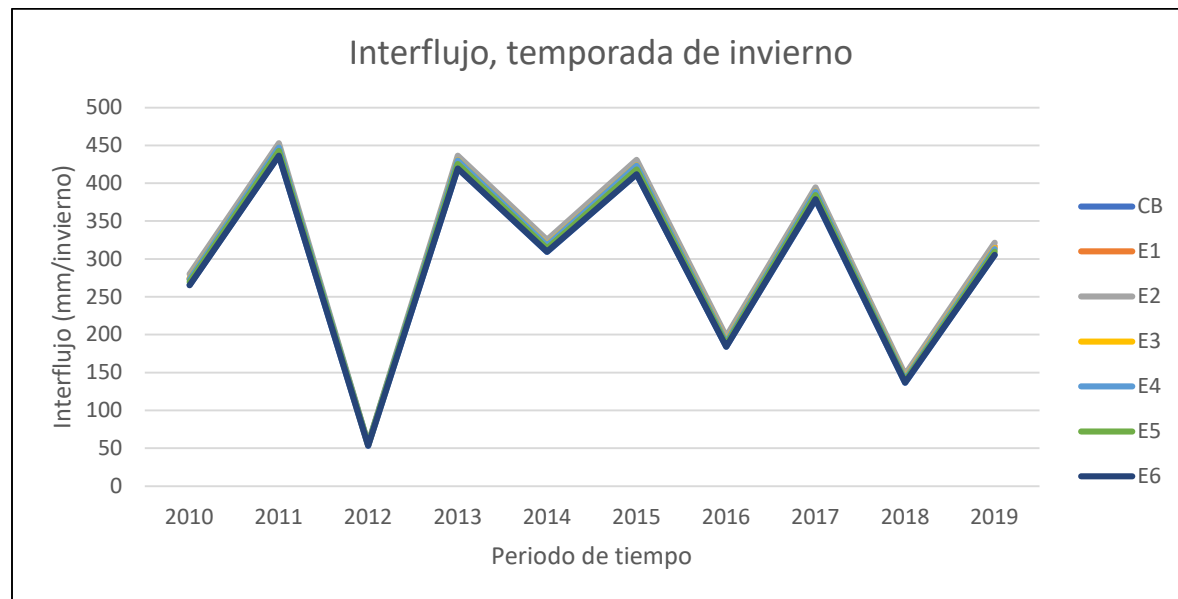
Figura 113.*Interflujo temporada de invierno por escenario de restauración (mm/temporada de invierno)*

Tabla 70.*Percolación anual por escenario de restauración (mm/añual)*

Años	Percolación (mm/añual)						
	CB	E1	E2	E3	E4	E5	E6
2010	1.39	1.53	1.40	1.39	1.39	1.39	1.39
2011	2.16	2.25	2.17	2.16	2.16	2.16	2.16
2012	1.85	2.57	1.89	1.85	1.84	1.85	1.85
2013	1.73	2.03	1.75	1.73	1.73	1.73	1.73
2014	2.46	2.62	2.47	2.46	2.46	2.46	2.46
2015	2.46	2.58	2.46	2.46	2.46	2.46	2.46
2016	1.57	1.96	1.59	1.57	1.56	1.56	1.57
2017	2.27	2.61	2.29	2.27	2.27	2.27	2.27
2018	2.55	2.76	2.56	2.55	2.55	2.55	2.55
2019	1.96	2.29	1.98	1.96	1.96	1.96	1.96

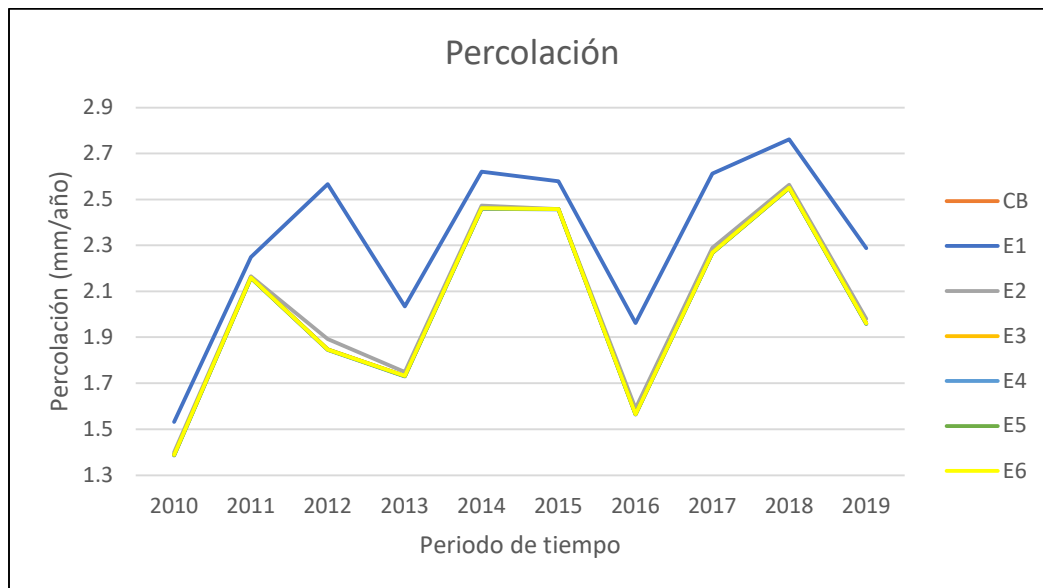
Figura 114.*Percolación anual por escenario de restauración (mm/añual)*

Tabla 71.*Percolación temporada de verano por escenario de restauración (mm/temporada de verano)*

Años	Percolación (mm/tem. verano)						
	CB	E1	E2	E3	E4	E5	E6
2010	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2011	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2012	0.06	0.12	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
2013	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2014	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2015	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2016	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2017	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2018	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2019	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

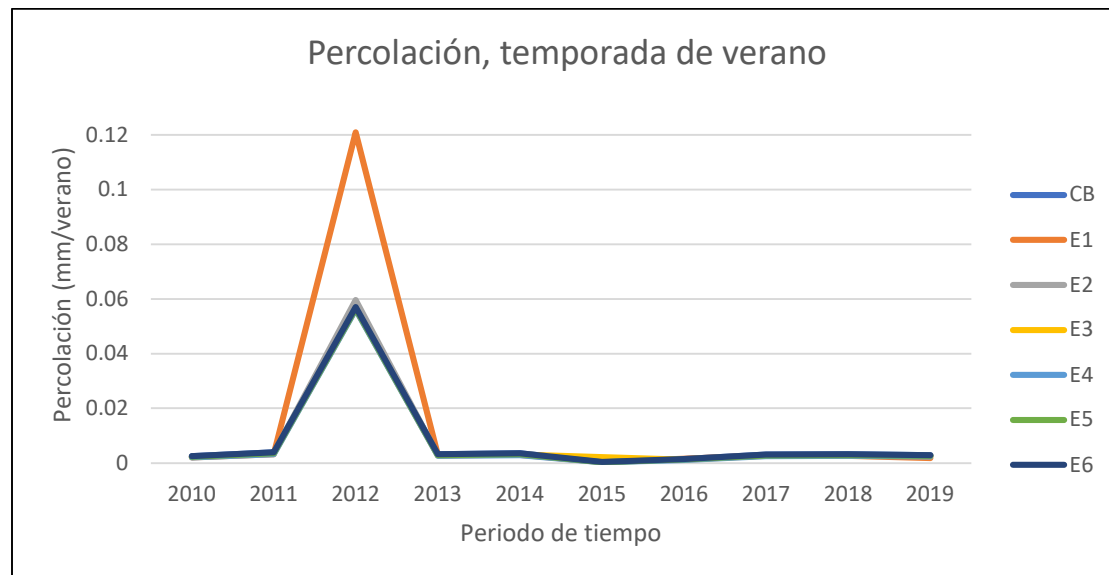
Figura 115.*Percolación temporada de verano por escenario de restauración (mm/temporada de verano)*

Tabla 72.*Percolación temporada de invierno por escenario de restauración (mm/temporada de invierno)*

Años	Percolación (mm/tem. invierno)						
	CB	E1	E2	E3	E4	E5	E6
2010	1.02	1.09	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02
2011	1.31	1.32	1.31	1.31	1.31	1.31	1.31
2012	0.60	0.77	0.61	0.65	0.59	0.59	0.60
2013	1.19	1.40	1.20	1.19	1.19	1.19	1.19
2014	1.15	1.25	1.16	1.15	1.15	1.15	1.15
2015	1.26	1.31	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26
2016	0.81	0.91	0.82	0.81	0.81	0.81	0.81
2017	1.25	1.48	1.26	1.25	1.24	1.24	1.25
2018	1.11	1.20	1.11	1.11	1.11	1.11	1.11
2019	1.19	1.30	1.20	1.19	1.19	1.19	1.19

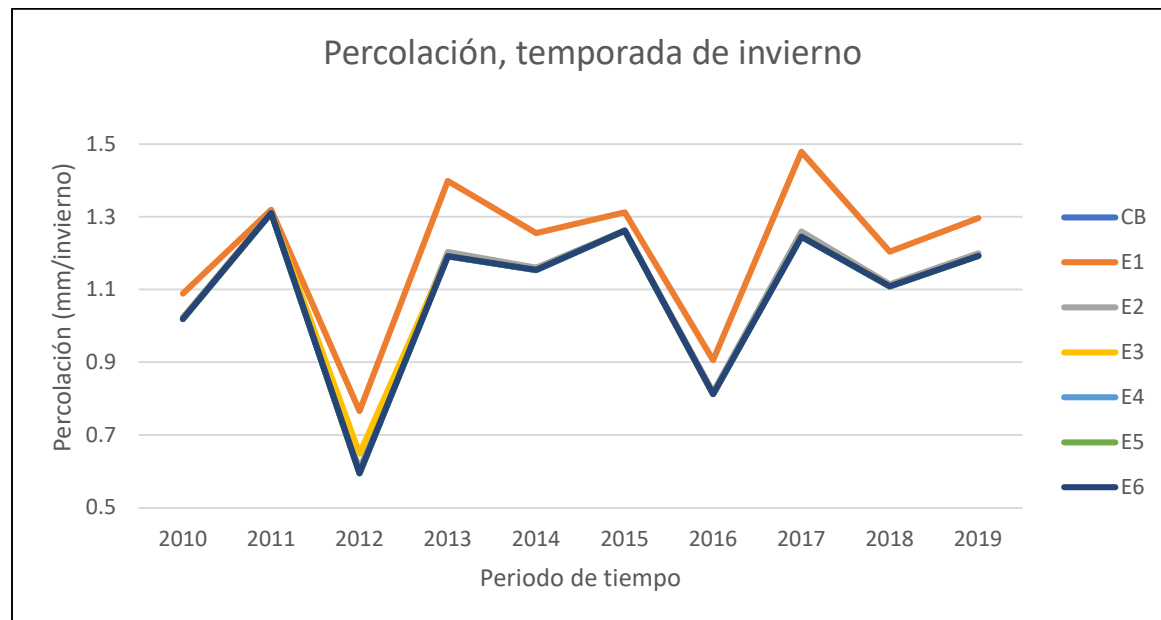
Figura 116.*Percolación temporada de invierno por escenario de restauración (mm/temporada de invierno)*

Tabla 73.*Flujo subterráneo anual por escenario de restauración (mm/añual)*

Años	Flujo subterráneo (mm/añual)						
	CB	E1	E2	E3	E4	E5	E6
2010	1.39	1.53	1.40	1.39	1.39	1.39	1.39
2011	2.16	2.25	2.17	2.16	2.16	2.16	2.16
2012	1.85	2.57	1.89	1.85	1.84	1.85	1.85
2013	1.73	2.03	1.75	1.73	1.73	1.73	1.73
2014	2.46	2.62	2.47	2.46	2.46	2.46	2.46
2015	2.46	2.58	2.46	2.46	2.46	2.46	2.46
2016	1.57	1.96	1.59	1.57	1.56	1.56	1.57
2017	2.27	2.61	2.29	2.27	2.27	2.27	2.27
2018	2.55	2.76	2.56	2.55	2.55	2.55	2.55
2019	1.96	2.29	1.98	1.96	1.96	1.96	1.96

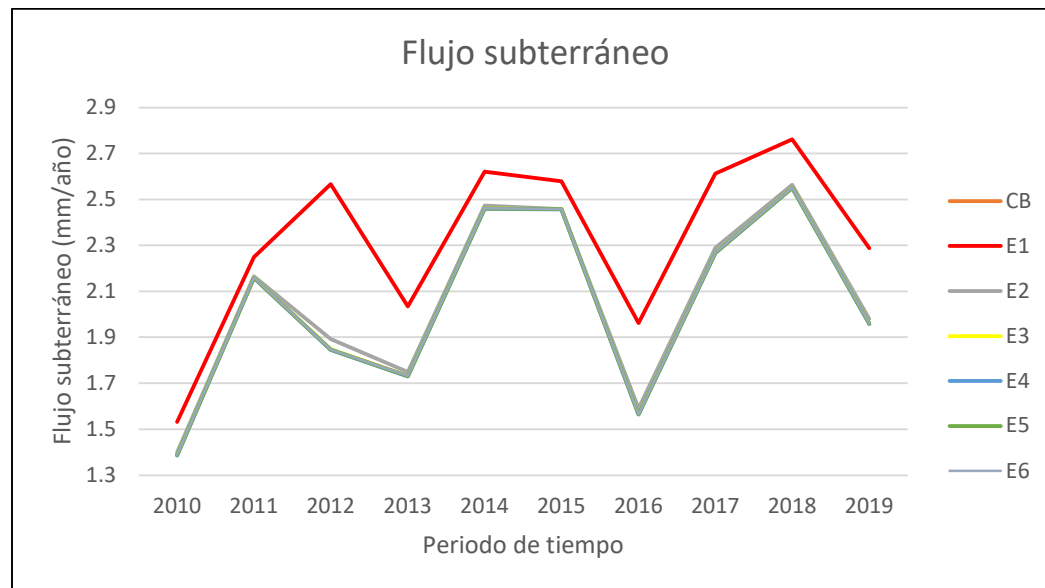
Figura 117.*Flujo subterráneo anual por escenario de restauración (mm/añual)*

Tabla 74.*Flujo subterráneo temporada de verano por escenario de restauración (mm/temporada de verano)*

Años	Flujo subterráneo (mm/tem. verano)						
	CB	E1	E2	E3	E4	E5	E6
2010	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2011	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2012	0.06	0.12	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
2013	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2014	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2015	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2016	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2017	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2018	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2019	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

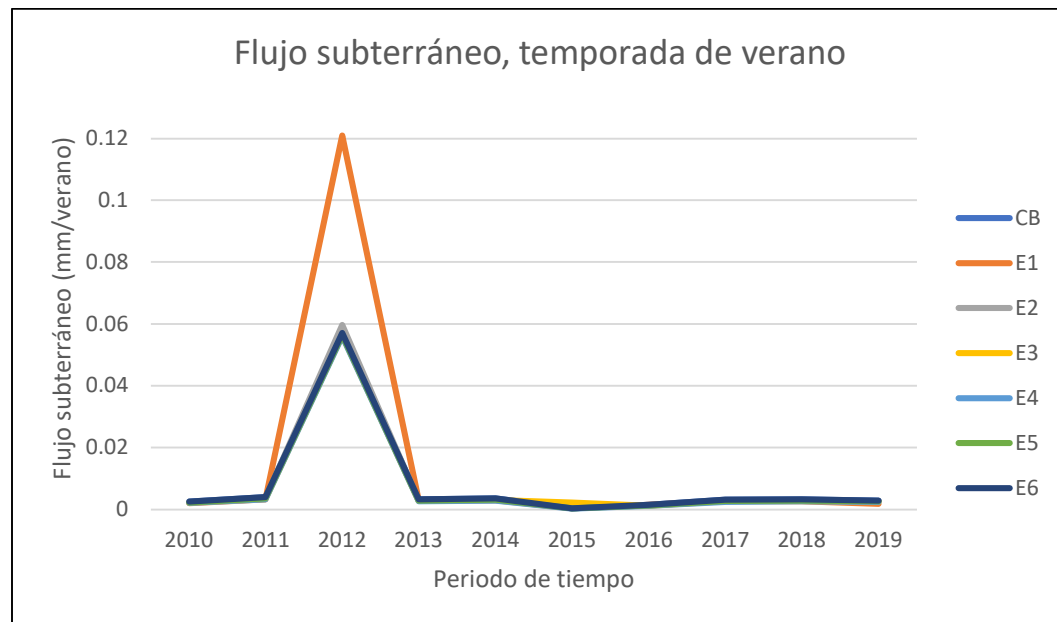
Figura 118.*Flujo subterráneo temporada de verano por escenario de restauración (mm/temporada de verano)*

Tabla 75.*Flujo subterráneo temporada de invierno por escenario de restauración (mm/temporada de invierno)*

Años	Flujo subterráneo (mm/tem. invierno)						
	CB	E1	E2	E3	E4	E5	E6
2010	1.02	1.09	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02
2011	1.31	1.32	1.31	1.31	1.31	1.31	1.31
2012	0.60	0.77	0.61	0.65	0.59	0.59	0.60
2013	1.19	1.40	1.20	1.19	1.19	1.19	1.19
2014	1.15	1.25	1.16	1.15	1.15	1.15	1.15
2015	1.26	1.31	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26
2016	0.81	0.91	0.82	0.81	0.81	0.81	0.81
2017	1.25	1.48	1.26	1.25	1.24	1.24	1.25
2018	1.11	1.20	1.11	1.11	1.11	1.11	1.11
2019	1.19	1.30	1.20	1.19	1.19	1.19	1.19

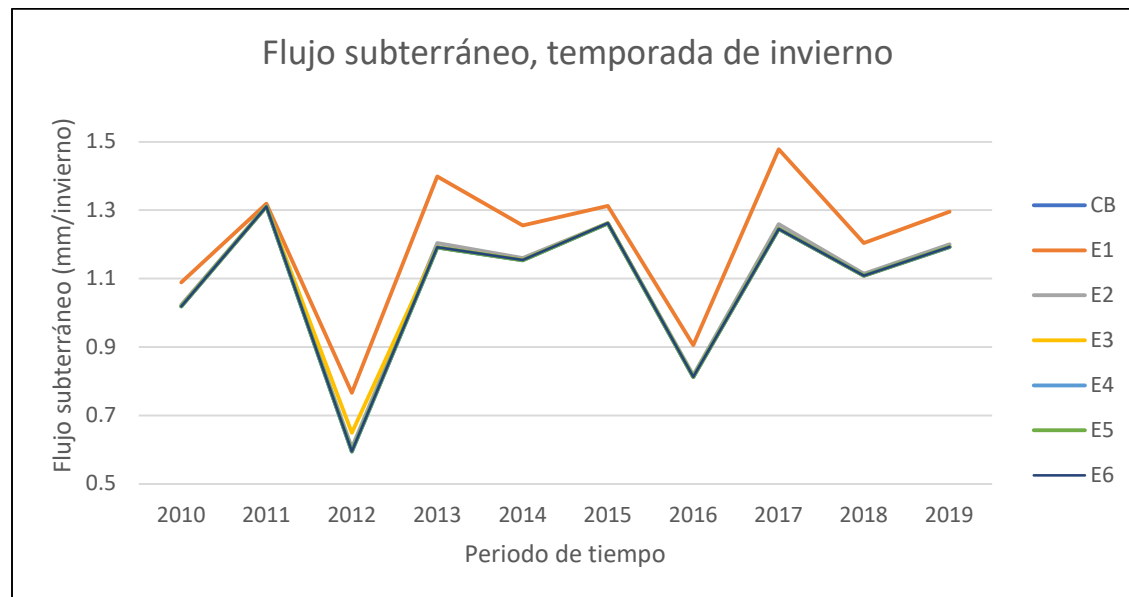
Figura 119.*Flujo subterráneo temporada de invierno por escenario de restauración (mm/temporada de invierno)*

Tabla 76.*Caudal de salida anual por escenario de restauración (mm/añual)*

Años	Caudal de salida (mm/añual)						
	CB	E1	E2	E3	E4	E5	E6
2010	793.03	834.36	828.32	805.34	794.99	793.39	792.67
2011	1209.31	1249.84	1238.82	1217.01	1211.72	1210.60	1208.02
2012	939.27	1022.89	1001.03	961.82	946.49	940.14	938.40
2013	1025.16	1070.16	1062.62	1042.19	1033.20	1027.02	1023.30
2014	1402.70	1453.47	1442.94	1420.16	1410.40	1404.39	1401.02
2015	1301.79	1340.01	1313.89	1307.34	1305.95	1302.45	1301.12
2016	675.36	733.35	720.02	693.70	682.78	676.90	673.83
2017	1262.22	1309.59	1299.83	1278.63	1269.20	1263.64	1260.80
2018	1328.71	1385.78	1371.84	1346.22	1335.63	1330.77	1326.66
2019	969.45	1014.68	1005.48	981.30	971.06	967.09	971.81

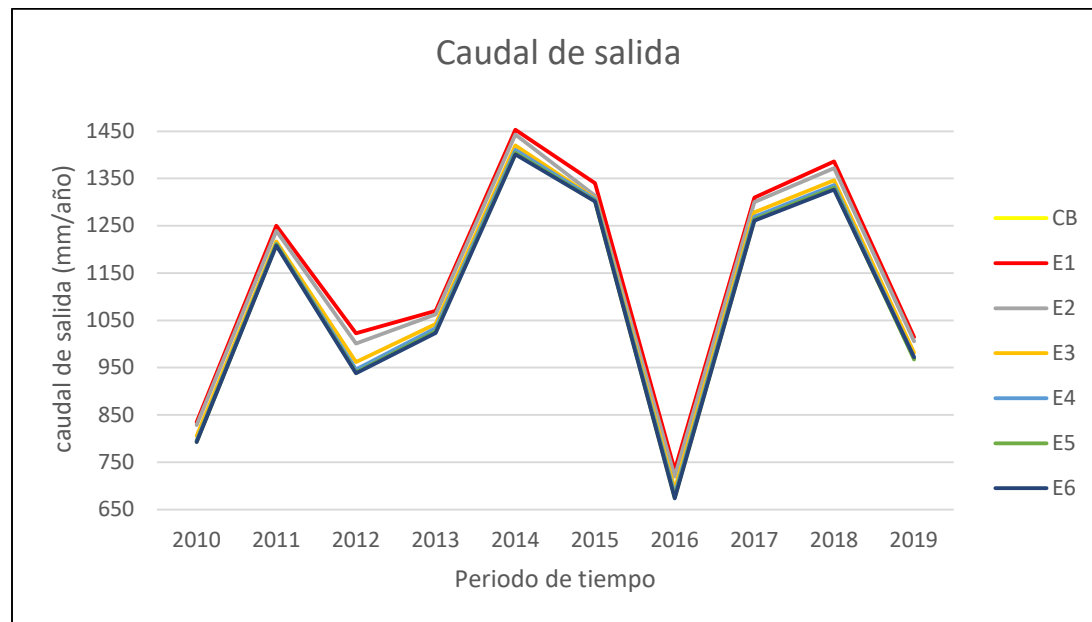
Figura 120.*Caudal de salida anual por escenario de restauración (mm/añual)*

Tabla 77.*Caudal de salida temporada de verano por escenario de restauración (mm/temporada de verano)*

Años	Caudal de salida (mm/tem. verano)						
	CB	E1	E2	E3	E4	E5	E6
2010	9.44	12.50	11.02	10.25	9.89	9.65	9.22
2011	10.11	13.29	11.67	10.83	10.61	10.26	9.96
2012	23.31	30.97	26.64	24.74	24.05	23.59	23.03
2013	6.05	8.45	7.45	6.91	6.39	6.18	5.93
2014	9.41	12.27	10.81	10.64	10.29	9.73	9.08
2015	0.23	0.32	0.25	0.25	0.23	0.23	0.22
2016	3.25	4.42	3.91	3.61	3.34	3.27	3.23
2017	8.23	11.37	10.04	9.30	8.59	8.37	8.10
2018	9.34	11.47	10.07	9.34	9.74	9.51	9.17
2019	10.14	13.41	13.16	11.88	11.07	10.26	10.02

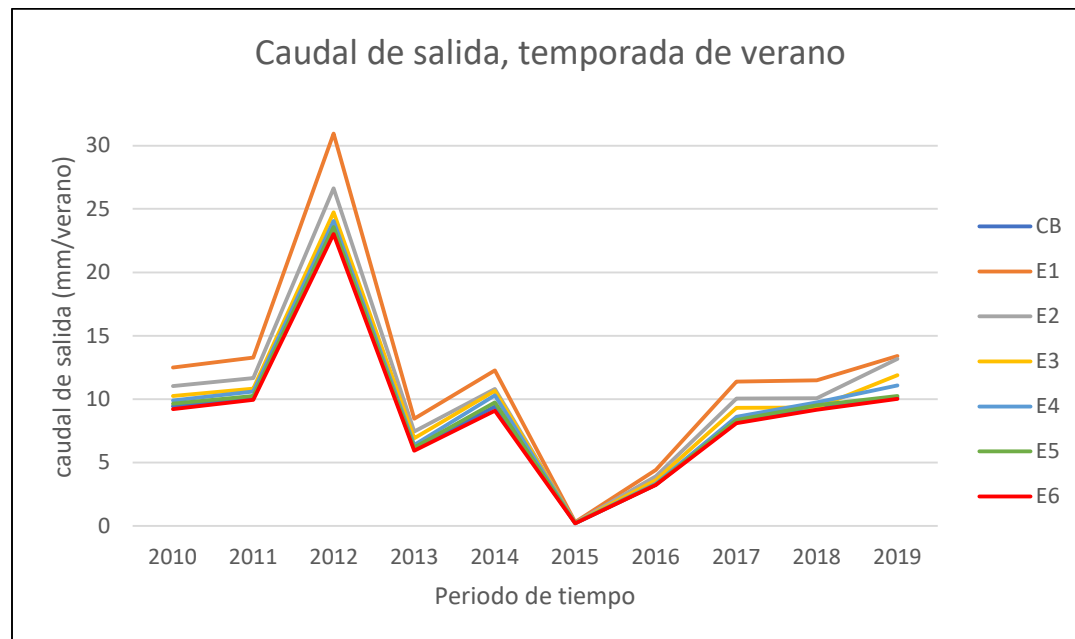
Figura 121.*Caudal de salida temporada de verano por escenario de restauración (mm/temporada de verano)*

Tabla 78.*Caudal de salida temporada de invierno por escenario de restauración (mm/temporada de invierno)*

Años	Caudal de salida (mm/tem. invierno)						
	CB	E1	E2	E3	E4	E5	E6
2010	322.50	338.38	335.85	325.57	324.56	323.34	321.66
2011	513.72	534.09	529.52	518.64	516.19	515.61	511.83
2012	87.38	98.10	93.79	92.08	90.06	89.15	85.61
2013	491.23	515.68	511.22	499.82	497.21	494.62	487.84
2014	372.55	396.54	391.81	380.45	378.80	374.35	370.75
2015	489.42	510.81	495.60	495.57	490.16	489.73	489.11
2016	233.45	250.32	246.81	236.83	235.97	234.77	232.12
2017	445.30	467.91	463.97	453.39	448.10	446.33	444.28
2018	178.90	203.96	200.28	191.29	186.13	180.01	177.79
2019	357.68	384.47	380.17	368.78	363.38	360.36	355.00

Figura 122.*Caudal de salida temporada de invierno por escenario de restauración (mm/temporada de invierno)*