



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO



**PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
FACULTAD DE BIOLOGÍA

**EVALUACIÓN CON CAMBIO CLIMÁTICO DE ESCENARIOS DE DEMANDA
PARA LAS MASAS SUBTERRÁNEAS EN LOS ACUÍFEROS ASOCIADOS AL
CAMPO GEOTÉRMICO CERRITOS COLORADOS**

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL

PRESENTA:

ING. MARÍA DEL MAR NAVARRO FARFÁN

ASESOR:

DR. MARCO ANTONIO MARTÍNEZ CINCO

DOCTOR EN CIENCIAS DE INGENIERÍA

CO-ASESOR:

DRA. SONIA TATIANA SÁNCHEZ QUISPE

DOCTORA EN INGENIERÍA DE CAMINOS CANALES Y PUERTOS

AGRADECIMIENTOS

Al programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por abrirme las puertas.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico recibido para la realización de mis estudios de maestría y su apoyo para realizar una estancia de Investigación en el extranjero.

A la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) por recibirme en el Instituto de Ingeniería y Medio Ambiente (IIAMA) para realizar mi estancia de investigación.

Al Dr. Marco Antonio Martínez Cincopor su gran labor como tutor, paciencia y aporte de conocimientos durante mis estudios.

A la Dra. Sonia Sánchez Quispe por su aporte de conocimientos y realizar los acercamientos necesarios para la realización de la estancia.

Al Dr. Mario Alberto Hernández Hernández por su apoyo, paciencia y acompañamiento a lo largo de este proyecto.

A la Dra. María Alcalá de Jesús y al Dr. Roberto Guerra González quienes además de ser revisores de este proyecto, estuvieron siempre al pendiente de mis avances y desempeño en este programa de maestría.

Al Dr. Abel Solera Solera quien estuvo al pendiente de mis avances durante mi estancia en la UPV.

CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IX
ÍNDICE DE ABREVIATURAS	XVII
RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
INTRODUCCIÓN.....	3
JUSTIFICACIÓN	4
HIPÓTESIS.....	5
OBJETIVO GENERAL.....	5
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
1 ESTADO DEL ARTE	6
1.1 DISPONIBILIDAD HÍDRICA SUPERFICIAL.....	6
1.2 FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO DE MASAS SUBTERRÁNEAS	7
1.3 CAMBIO CLIMÁTICO	7
2 ZONA DE ESTUDIO	9
2.1 REGIONES HIDROLÓGICO ADMINISTRATIVAS	9
2.2 ACUÍFEROS EN MÉXICO.....	10
2.3 DATOS HÍDRICOS EN JALISCO	10
2.3.1 AGUA SUPERFICIAL	10
2.3.2 AGUA SUBTERRÁNEA	11

2.4	ÁREA DE PROTECCIÓN DE FLORA Y FAUNA LA PRIMAVERA.....	14
2.5	ZONA METROPOLITANA DE GUADALAJARA.....	16
2.6	CAMPO GEOTÉRMICO CERRITOS COLORADOS	21
3	MATERIALES Y MÉTODOS	23
3.1	RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN	25
3.1.1	SERVICIO GEOLÓGICO MEXICANO	25
3.1.2	MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES.....	25
3.1.3	ARCHIVOS VECTORIALES DE CONABIO	26
3.1.4	INFORMACIÓN METEOROLÓGICA CON CLICOM	27
3.1.5	INFORMACIÓN HIDROMÉTRICA CON BANDAS	27
3.1.6	TÍTULOS CONCESIONADOS CON REPDA	28
3.1.7	MODELOS DE CIRCULACIÓN GENERAL	29
3.2	GESTIÓN DE DATOS.....	30
3.2.1	POLÍGONOS DE THIESSSEN	30
3.2.2	PRUEBAS EN LAS ESTACIONES	30
3.2.3	PRUEBA DE SECUENCIAS.....	31
3.2.4	TEST DE HELMERt.....	32
3.2.5	LÍMITES DE ANDERSON	32
3.2.6	LLENADO DE DATOS.....	33
3.2.7	MATRIZ DE CORRELACIÓN Y $\pm 10\%$	34
3.2.8	GENERACIÓN DE SERIES.....	35
3.2.9	OBTENCIÓN DE SERIES DE EVAPOTRANSPIRACIÓN	36

3.3	REVISIÓN DE ESTACIONES HIDROMÉTRICAS	39
3.3.1	ESTACIONES A RÉGIMEN NATURAL	39
3.3.2	REVISIÓN VISUAL DE LAS SERIES DE ESCURRIMIENTO	40
3.3.3	COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO	42
3.3.4	MODOS EN LAS APORTACIONES	44
3.3.5	CAUDAL MÍNIMO Y CAUDAL ECOLÓGICO	46
3.4	MODELOS PRECIPITACIÓN - ESCORRENTÍA (MPE)	47
3.4.1	TÉMEZ	48
3.4.2	HBV	53
3.4.3	SMM	58
3.5	CALIBRACIÓN DEL MODELO	63
3.5.1	FUNCIÓN OBJETIVO E INDICADORES DE BONDAD DE AJUSTE	64
3.6	TRASLADO DE PARÁMETROS	67
3.7	TRANSPORTE DE INFORMACIÓN HIDROMÉTRICA	67
3.8	BALANCE HÍDRICO	68
3.9	SIMULACIÓN SUBTERRÁNEA	69
3.9.1	TIPOS DE CELDAS EN EL MODELO Y SIMULACIÓN DE CONTORNO	78
3.9.2	CONCEPTUALIZACIÓN DEL MODELO	79
3.10	MODELOS DE CIRCULACIÓN GENERAL UTILIZADOS EN MÉXICO	84
3.10.1	TRAYECTORIAS REPRESENTATIVAS DE CONCENTRACIÓN RCp	86
3.10.2	REGIONALIZACIÓN DE LOS MODELOS	87
4	RESULTADOS	95

4.1	ANÁLISIS DE LA ZONA DE ESTUDIO	95
4.2	RECOPIACIÓN DE DATOS PARA LA MODELACIÓN SUPERFICIAL	109
4.3	RESULTADOS DE LA MODELACIÓN SUPERFICIAL	112
4.3.1	RESULTADOS DE LA MODELACIÓN SUPERFICIAL CON EL MODELO DE TÉMEZ 116	
4.3.2	RESULTADOS DE LA MODELACIÓN SUPERFICIAL CON EL MODELO hbv	118
4.3.3	RESULTADOS DE LA MODELACIÓN SUPERFICIAL CON EL SOIL MOISTURE METHOD	124
4.4	MODELACIÓN HIDROLÓGICA SUPERFICIAL DE LA ZONA EN CONJUNTO	129
4.4.1	TRASLADO DE INFORMACIÓN DE LAS MODELACIONES CON HBV	132
4.4.2	TRASLADO DE INFORMACIÓN DE LAS MODELACIONES CON SMM	135
4.4.3	SELECCIÓN DEL MODELO MÁS FAVORABLE DE SIMULACIÓN SUPERFICIAL .	138
4.5	RESULTADOS DE MODFLOW	140
4.6	ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO.....	155
5	CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	166
5.1	GESTIÓN DE DATOS.....	166
5.2	MODELACIÓN SUPERFICIAL.....	167
5.3	MODELACIÓN SUBTERRÁNEA	168
5.4	CAMBIO CLIMÁTICO.....	169
6	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	170
	ANEJO 1: REPORTE DE MUESTREO EN LA ZONA GEOTÉRMICA DEL BOSQUE LA PRIMAVERA (JALISCO).....	179
	OBJETIVO	179

METODOLOGÍA	180
RESULTADOS	181
MANANTIALES EN LA PRIMAVERA	186
CONCLUSIONES.....	195
AGRADECIMIENTOS	196

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características de la Región Hidrológica Administrativa Lerma-Santiago-Pacífico....	9
Tabla 2. Características de los acuíferos presentes en la zona de estudio.....	12
Tabla 3. Estatus de los acuíferos que tienen injerencia con el APFFLP.	14
Tabla 4. Crecimiento poblacional en la ZMG.	20
Tabla 5. Rangos de cambios permitidos para la prueba de Secuencias, según el número de datos.	32
Tabla 6. Valores propuestos de K considerando los diferentes tipos y usos de suelo. Adaptado de CONAGUA (2015).	43
Tabla 7. Términos presentes en las ecuaciones del SMM.....	58
Tabla 8. Calidad de ajuste con los diferentes indicadores de ajuste.....	66
Tabla 9. Modelos de circulación General utilizados por el INECC (Fernández, et al., 2015).	85
Tabla 10. Trayectorias de concentraciones representativas presentadas en el 5º reporte de evaluación del IPCC. Adaptado de (Fundación Biodiversidad, et al, 2013).	87
Tabla 11. Simbología del mapa del APFFLP.	97
Tabla 12. Diferentes usos del suelo en la zona de estudio.	105
Tabla 13. Volúmenes concesionados por el REPDA en la zona de estudio.	107
Tabla 14. Estaciones meteorológicas utilizadas para la modelación hidrológica superficial.	109
Tabla 15. Información de entrada para los modelos superficiales Témez, HBV y SMM. Los datos pueden ser para una cuenca o para varias, según se requiera en la modelación.	111
Tabla 16. Módulos de aportación de las estaciones hidrométricas con posible uso.	113
Tabla 17. Resultados de las pruebas de homogeneidad y persistencia en las 9 estaciones hidrométricas que pueden ser utilizadas en la zona de estudio.	114

Tabla 18. Resultados de los indicadores de ajuste obtenidos a partir de la simulación con el modelo Témez.	117
Tabla 19. Parámetros utilizados en las modelaciones con el MPE HBV para las distintas cuencas de simulación.	120
Tabla 20. Resultados de las calibraciones y Kperc utilizado para las cuencas de simulación.	120
Tabla 21. Resultados de los indicadores de ajuste obtenidos a partir de la simulación con el modelo Soil Moisture Method.	126
Tabla 22. Coeficiente de escurrimiento y área para las cuencas simuladas en HBV y SMM.	131
Tabla 23. Coeficiente de escurrimiento y área para las cuencas que se localizan en la zona de estudio.	131
Tabla 24. Valores de Kperc utilizados para la modelación de toda la zona de estudio.	132
Tabla 25. Volúmenes de entrada y salida del sistema considerados en el balance de HBV por traslado de parámetros.	133
Tabla 26. Volúmenes de entrada y salida del sistema considerados en el balance en HBV por similitud hidrológica.	134
Tabla 27. Parámetros utilizados para la modelación de la zona norte con el SMM.	135
Tabla 28. Parámetros utilizados para la modelación de la zona sur con el SMM.	135
Tabla 29. Volúmenes de entrada y salida del sistema considerados en el balance en SMM por traslado de parámetros.	136
Tabla 30. Volúmenes de entrada y salida del sistema considerados en el balance en SMM por traslado de parámetros.	137
Tabla 31. Información de volúmenes concesionados para los acuíferos presentes en la zona de estudio.	147

Tabla 32. Coeficiente de almacenamiento según la geología presente en la zona de estudio.	150
Tabla 33. Escenarios utilizados en la modelación con cambio climático, considerando el MCG, país de procedencia, RCP y horizonte.....	155
Tabla 34. Escenarios de cambio climático seleccionados para las simulaciones en estado estacionario. Entre paréntesis se muestra el escenario correspondiente.....	161
Tabla 35. Volumen total disminuido en Hm^3 , considerando la zona de estudio completa, el APFFLP y el Campo Geotérmico.....	163
Tabla 36. Parámetros físico-químicos de las manifestaciones hidrotermales asociadas al campo geotérmico La Primavera, Jalisco.....	183
Tabla 37. Resultados de las muestras de agua para iones mayores e isótopos estables del agua, obtenidos para las manifestaciones hidrotermales circundantes al campo geotérmico La Primavera, Jalisco	184
Tabla 38. Cálculo de la temperatura de reservorio para las muestras de La Primavera, Jalisco	189

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Municipios que conforman la ZMG.....	17
Figura 2. Esquema metodológico de la gestión de datos y modelación superficial.....	23
Figura 3. Esquema metodológico de la modelación subterránea y obtención de series meteorológicas con cambio climático.	24
Figura 4. Series cronológicas con varios tipos de componentes determinísticas. Adaptado de Campos (2007).....	41
Figura 5. Relación sobre los parámetros obtenidos con los aforos en las cuencas.	46
Figura 6. Representación del modelo Témez en EvalHid. Adaptado de Paredes, et al. (2014).	49
Figura 7. Representación del Modelo HBV del Software EvalHid.	54
Figura 8. Representación del SMM de WEAP.	62
Figura 9. Discretización del acuífero por medio de celdas, marcando filas, columnas y capas. Adaptado de Harbaugh (2005).....	70
Figura 10. Incisos para las seis celdas adyacentes que rodean el edificio celda i,j,k (oculta). Adaptado de Harbaugh (2005).....	72
Figura 11. Flujo de la celda i,j,k a la celda $i,j-1,k$. Adaptado de Harbaugh (2005).	72
Figura 12. Representación conceptual de las aportaciones a través del lecho de un río hacia una celda. Adaptado de Harbaugh (2005).	75
Figura 13. Celdas utilizadas en MODFLOW para caracterización de zona. Adaptado de Harbaugh (2005).	78
Figura 14. Diagrama de flujo del programa para simular el flujo de agua subterránea.....	81
Figura 15. Diagrama de flujo para la subrutina del bucle de paso de tiempo.....	82
Figura 16. Representación gráfica de la Ley de Darcy. Adaptado de Harbaugh (2005).	84

Figura 17. Esquema de la información local aportada por el aumento de resolución espacial de uso de suelo. Adaptado de Viner (2000).....	88
Figura 18. Localización de: a) la región 2 Centroamérica y la región 3 Norteamérica.	90
Figura 19. Divisiones de México para la validación de los MCG (Cavazos, et al., 2013).....	91
Figura 20. Diagrama de Taylor de precipitación anual para el sur de México, donde se comparan los 15 MCG con el CRU para el periodo de 1961. Se muestra la desviación estándar (Std) y la correlación con respecto al CRU. Adaptado de Cabazos, et al. (2013).	92
Figura 21. Diagrama de Taylor de precipitación anual para el norte de México, donde se comparan los 15 MCG con el CRU para el periodo de 1961. Se muestra la desviación estándar (Std) y la correlación con respecto al CRU. Adaptado de Cavazos, et al. (2013).....	93
Figura 22. Diagrama de árbol para la selección de escenarios con efecto del cambio climático.	94
Figura 23. Localización de la zona de estudio.	95
Figura 24. Mapa del APFFLP.....	96
Figura 25. Acuíferos asociados al APFFLP.....	97
Figura 26. Masas geológicas que conforman la zona de estudio.....	98
Figura 27. Localización de la zona de estudio en la Región Hidrológica Administrativa VIII.	99
Figura 28. Localización de la zona de estudio en regiones hidrológicas.	100
Figura 29. Localización de la zona de estudio en subregiones hidrológicas.	101
Figura 30. Localización de la zona de estudio en cuencas hidrológicas.....	101
Figura 31. Localización de la zona de estudio en subcuencas hidrológicas.	102
Figura 32. Municipios que abarca la zona de estudio.	103
Figura 33. Localidades que abarca la zona de estudio.....	103
Figura 34. Localización de los distritos de riego Estado de Jalisco y Jalisco Sur.....	104
Figura 35. Uso de suelo en las masas geológicas que conforman la zona de estudio.	105

Figura 36. Tipo de suelo en las masas geológicas que conforman la zona de estudio.....	106
Figura 37. Cuencas que cubren la zona de estudio.....	107
Figura 38. Pozos de extracción concesionados por el REPDA en la zona de estudio.	108
Figura 39. Delimitación de los polígonos de Thiessen para las 30 cuencas de simulación.	110
Figura 40. Localización de las estaciones hidrométricas localizadas dentro de un buffer de 100 km con respecto a la zona de estudio.....	112
Figura 41. Diagrama de la relación entre las 37 estaciones hidrométricas de cabecera y aquellas que pueden utilizarse.	113
Figura 42. Cuencas de simulación en régimen natural.	115
Figura 43. Resultados de los volúmenes anuales obtenidos con el modelo Témez para la cuenca 12 607.....	116
Figura 44. Resultados de los volúmenes anuales obtenidos con el modelo Témez para la cuenca 14 011.....	116
Figura 45. Resultados de los volúmenes anuales obtenidos con el modelo Témez para la cuenca 14 015.....	117
Figura 46. Resultados de los volúmenes anuales obtenidos con el modelo Témez para la cuenca 14 018.....	117
Figura 47. Resultados de los volúmenes anuales obtenidos con el modelo Témez para la cuenca 14 020.....	117
Figura 48. Comparación entre el modelo Témez y HBV.....	119
Figura 49. Resultados de los volúmenes anuales obtenidos con el modelo HBV para la cuenca 12 607.....	121
Figura 50. Resultados de los volúmenes medios mensuales obtenidos con el modelo HBV para la cuenca 12 607.....	121

Figura 51. Resultados de los volúmenes anuales obtenidos con el modelo HBV para la cuenca 14 011.	121
Figura 52. Resultados de los volúmenes medios mensuales obtenidos con el modelo HBV para la cuenca 14 011.	121
Figura 53. Resultados de los volúmenes anuales obtenidos con el modelo HBV para la cuenca 14 015.	122
Figura 54. Resultados de los volúmenes medios mensuales obtenidos con el modelo HBV para la cuenca 14 015.	122
Figura 55. Resultados de los volúmenes anuales obtenidos con el modelo HBV para la cuenca 14 018.	122
Figura 56. Resultados de los volúmenes medios mensuales obtenidos con el modelo HBV para la cuenca 14 018.	122
Figura 57. Resultados de los volúmenes anuales obtenidos con el modelo HBV para la cuenca 14 020.	123
Figura 58. Resultados de los volúmenes medios mensuales obtenidos con el modelo HBV para la cuenca 14 020.	123
Figura 59. Comparación entre el modelo HBV de EvalHid y SMM de WEAP.	125
Figura 60. Resultados de los volúmenes anuales obtenidos con el modelo SSM para la cuenca 12 607.	126
Figura 61. Resultados de los volúmenes medios mensuales obtenidos con el SSM para la cuenca 12 607.	126
Figura 62. Resultados de los volúmenes anuales obtenidos con el modelo SSM para la cuenca 14 011.	127
Figura 63. Resultados de los volúmenes medios mensuales obtenidos con el SSM para la cuenca 14 011.	127

Figura 64. Resultados de los volúmenes anuales obtenidos con el modelo SSM para la cuenca 14 018.	127
Figura 65. Resultados de los volúmenes medios mensuales obtenidos con el SSM para la cuenca 14 018.	127
Figura 66. Comparativa entre los MPE Témez, HBV y SMM con los volúmenes observados medios mensuales con los volúmenes observados en la cuenca 14 018 (Hm ³).	128
Figura 67. Dirección de flujo en los acuíferos de estudio, obtenido por la información en los informes de disponibilidad media anual de agua en el acuífero Ameca, Arenal, Atemajac, San Isidro y Toluquilla (CONAGUA, 2015).	129
Figura 68. Mapa de las treinta cuencas de simulación, donde se determina que la zona se divide en zona norte y zona sur.	130
Figura 69. Balance hidrológico medio anual por cuenca, realizado con traslado de parámetros con los resultados de las modelaciones con HBV.	133
Figura 70. Balance hidrológico medio anual por cuenca, realizado por similitud hidrológica con los resultados de las modelaciones con HBV.	134
Figura 71. Balance hidrológico medio anual por cuenca, realizado con traslado de parámetros con los resultados de las modelaciones con SMM.	136
Figura 72. Balance hidrológico medio anual por cuenca, realizado por similitud hidrológica con los resultados de las modelaciones con SMM.	137
Figura 73. Comparativa entre los balances obtenidos con traslado de parámetros y similitud hidrológica para los modelos HBV y SMM.	139
Figura 74. Mallado en la zona de estudio con tamaño variable.	141
Figura 75. Elevación del terreno natural en la zona de estudio en m. s. n. m.	142
Figura 76. Elevación del fondo de las masas geológicas en m. s. n. m.	143
Figura 77. Volúmenes de infiltración en la zona de estudio, considerando los obtenidos con WEAP y el retorno de riego en Hm ³ /mes.	143

Figura 78. Número de pozos por celda con retorno de riego.	144
Figura 79. Pozos de extracción en la zona de estudio sobre las masas geológicas en estudio.	145
Figura 80. Número de pozos de extracción que se tienen por celda.....	146
Figura 81. Volúmenes de extracción en la zona de estudio, en Hm ³ /mes.....	147
Figura 82. Mapa de extracción al acuífero para la modelación en estado estacionario del año 1989, considerando el 60% del volumen concesionado por el REPDA para el año 2014. ..	148
Figura 83. Número de manantiales por celda en la zona de estudio.....	149
Figura 84. Celdas con información de nivel estático para 1998 y 2004.....	150
Figura 85. Comparación entre el nivel estático observado en 1998 al oeste del APFFLP y los simulados en régimen estacionario.	152
Figura 86. Comparación entre el nivel estático observado en 1998 al este del APFFLP y los simulados en régimen estacionario.	152
Figura 87. Comparación entre el nivel estático observado en 2004 y los simulados en régimen estacionario.	153
Figura 88. Altura piezométrica inicial para la modelación de las masas geológicas en régimen estacionario para el año 2014 en m. s. n. m.	154
Figura 89. Variación de la precipitación en °C con los distintos escenarios de cambio climático (M1, M2, M3, M4) del RCP 4.5.....	157
Figura 90. Variación de la precipitación en °C con los distintos escenarios de cambio climático (M1, M2, M3, M4) del RCP 8.5.....	157
Figura 91. Variación del volumen precipitación en mm con los distintos escenarios de cambio climático (M1, M2, M3, M4) del RCP 4.5.	158
Figura 92. Variación del volumen precipitación en mm con los distintos escenarios de cambio climático (M1, M2, M3, M4) del RCP 8.5.	158

Figura 93. Variación del volumen infiltrado al acuífero profundo en Hm^3 con los distintos escenarios de cambio climático (M1, M2, M3, M4) del RCP 4.5.....	160
Figura 94. Variación del volumen infiltrado al acuífero profundo en Hm^3 con los distintos escenarios de cambio climático (M1, M2, M3, M4) del RCP 8.5.....	160
Figura 95. Descenso en los niveles piezométricos observados en el periodo 1989 – 2014.	162
Figura 96. Altura piezométrica inicial para las modelaciones afectadas por acción del cambio climático.....	163
Figura 97. Descenso del nivel piezométrico (en m s. n. m.) resultado de la modelación subterránea en estado estacionaria con el escenario 12, correspondiente al MCG HADGEM2_ES RCP 4.5.	164
Figura 98. Descenso del nivel piezométrico (en m. s. n. m.) resultado de la modelación subterránea en estado estacionaria con el escenario 24, correspondiente al MCG HADGEM2_ES RCP 8.5.	165
Figura 99. Descensos en el APFFLP (en m. s. n. m.) resultado de la modelación subterránea en estado estacionaria con el escenario 24, correspondiente al MCG HADGEM2_ES RCP 8.5 para el APFFLP.....	165
Figura 100. Localización de los sitios de muestreo de manantiales termales dentro y cercanos al Campo Geotérmico La Primavera, Jalisco, presentados en la Tabla 36.	182
Figura 101. Comparativo de la composición iónica de las muestras recolectadas en zonas aledañas al campo geotérmico de La Primavera, Jalisco.	186
Figura 102. Uso del Diagrama de Piper para la clasificación de las muestras de agua recolectadas en zonas aledañas al campo geotérmico de La Primavera, Jalisco.	187
Figura 103. Diagrama ternario de Giggenbach utilizado para la clasificación de la madurez de las muestras de agua recolectadas en zonas aledañas al campo geotérmico de La Primavera, Jalisco.	188

Figura 104. Diagrama ternario de Giggenbach para la determinación del equilibrio iónico en las muestras de agua recolectadas en zonas aledañas al campo geotérmico de La Primavera, Jalisco.....	189
Figura 105. Distribución de las temperaturas obtenidas con distintos geotermómetros para las muestras de agua recolectadas en zonas aledañas al campo geotérmico de La Primavera, Jalisco.....	190
Figura 106. Distribución de los isótopos estables del agua ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ en ‰ vs SMOW) en las muestras colectadas en manantiales aledaños al campo geotérmico La Primavera, Jalisco	191

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

ACDM	Atlas Climático Digital de México
APFFLP	Área de Protección de Flora y Fauna La Primavera
BANDAS	Banco Nacional de Datos de Agua Superficial
CCA	Centro de Ciencias de la Atmósfera
Ce	Coefficiente de Esguerrimiento
CFE	Comisión Federal de Electricidad
CICESE	Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada
CLICOM	Climate Computing Project
CNRMCM5	Centre National de Recherches Météorologiques
CONABIO	Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
CORDEX	Coordinate Regional Climate Downscaling Experiment
CRU	Climatic Research Unit
EvalHid	Evaluación de los Recursos Hídricos
GFDL_CM3	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
HADGEM2_ES	Met Office Hadley Centre
HBV	MPE Hydrologiska Byrås Vattenbalansavdelning
IDW	Inverse Distance Weighted
IMTA	Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
INECC	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LAN	Ley de Aguas Nacionales

MCG	Modelo de Circulación General
MDE	Modelo Digital de Elevaciones
MODFLOW	Modular Three Dimensional Finite - Difference Groundwater Flow Model
MPE	Modelo Precipitación Escorrentía
MPI_ESM_LR	Max Planck Institute for Meteorology
NARCCAP	Programa de Evaluación de Cambio Climático Regional de Norteamérica
PMWIN	Processing Modflow for Windows
RCP	Representative Concentration Pathway
REGCM4	Regional Climate Model system
REPDA	Registro Público de Derechos de Agua
RHA	Región Hidrológica Administrativa
SCE-UA	Shuffled Complex Evoution method developed at The University of Arizona
SIAPA	Sistema Intermunicipal de los Servicios de Agua Potable y alcantarillado
SMM	Soil Moisture Method
SMN	Servicio Meteorológico Nacional
TIFF	Tagged Image File Format
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México
USGS	U. S. Geological Survey
UNIATMOS	Unidad de Informática para las ciencias Atmosféricas y Ambientales
UTM	Universal Transverse Mercator
WCRP	World Climate Research Programme
WEAP	Water Evaluation and Planning System
ZMG	Zona Metropolitana de Guadalajara

RESUMEN

Para aprovechar de manera sustentable y responsable los recursos que la naturaleza proporciona, se debe conocer el comportamiento de los mismos para tomar decisiones coherentes, que optimicen dicho aprovechamiento; así mismo, se debe considerar el cambio climático, el cual es uno de los problemas ambientales más importantes en la actualidad. Este cambio se define como toda alteración significativa en el sistema climático del planeta, que permanece por décadas o por más tiempo. Ante ello, nace la necesidad de obtener estudios hídricos que permitan conocer el estado de la disponibilidad, tanto superficial como subterránea. De forma particular, este tipo de estudios puede demostrar una fracción importante de la factibilidad en proyectos de aprovechamiento de agua subterránea en campos geotérmicos para la obtención de energía eléctrica.

Lo ideal es gestionar los recursos de una forma oportuna y eficiente, es por ello que una adecuada planeación hídrica permitirá que coexistan diversos usos del agua en las masas subterráneas de los acuíferos asociados al Área de Protección de Flora y Fauna La Primavera.

Para ello, se realizan modelaciones superficiales (con los modelos Témez, HBV y Método de Humedad del Suelo) con lo cual se obtienen las series de recarga para el acuífero profundo y así poder realizar la modelación subterránea (MODFLOW), con lo cual se proponen escenarios actuales y futuros con cambio climático, utilizando cuatro modelos de circulación general para dos diferentes trayectorias de concentración RCP.

Los resultados arrojan que el modelo superficial que representa mejor la zona de estudio es el método de humedad del suelo, y que de acuerdo con los resultados obtenidos en MODFLOW y, probando los distintos escenarios de cambio climático, se tiene que el el escenario más crítico se presenta con el RCP 8.5 para el modelo perteneciente a Reino Unido HADGEM2_ES

PALABRAS CLAVE: modelo precipitación esorrentía, modelación matemática, cambio climático, masas geológicas, área natural protegida.

ABSTRACT

In order to make sustainable and responsible use of the resources that nature provides, their behavior must be known in order to make coherent decisions that optimize their use; likewise, climate change must be considered, which is one of the most important environmental problems at present. This change is defined as any significant alteration in the planet's climate system, which remains for decades or longer. In view of this, there is a need to obtain water studies that allow us to know the state of availability, both superficial and underground. In particular, this type of study can demonstrate an important fraction of the feasibility of projects to use groundwater in geothermal fields to obtain electricity.

The ideal is to manage the resources in a timely and efficient manner, which is why adequate water planning will allow the coexistence of different uses of water (consumptive and non-consumptive) in the underground masses of the aquifers associated with the Flora and Fauna Protection Area La Primavera (APFFLP).

For this purpose, surface modelling is carried out (with the Témez, HBV and Soil Moisture Method models), obtaining the recharge series for the deep aquifer and thus being able to carry out the underground modelling (MODFLOW), with which current and future climate change scenarios are proposed, using four general circulation models for two different PCR concentration trajectories.

The results show that the surface model that best represents the study area is the soil moisture method, and that according to the results obtained in MODFLOW and, testing the different climate change scenarios, the most critical scenario is presented with RCP 8.5 for the UK model HADGEM2_ES.

KEY WORDS: precipitation runoff model, mathematical modeling, climate change, geological masses, protected natural area.

INTRODUCCIÓN

En México, 90 millones de habitantes se abastecen de agua proveniente de los mantos acuíferos (INEGI, 2017 b), ante ello, existe la necesidad de conocer la disponibilidad hídrica, tanto superficial como subterránea en distintas zonas de estudios a lo largo del país, dicha disponibilidad puede ser utilizada para la generación de energía eléctrica por medio de plantas geotérmicas.

El estado de Jalisco sólo produce 3% de la energía eléctrica que consume, por lo que depende de la producción de energía de otras regiones del país. El suministro al estado de Jalisco implica pérdidas energéticas por distintos motivos como: transmisión, costos económicos para transformar la energía en cientos de kilómetros y consecuentes impactos ambientales (CONANP, 2000).

Se debe demostrar que el APFFLP es una zona que puede ser explotada sin deteriorar el ecosistema, sin modificar el paisaje ni causar impactos irreversibles en los elementos naturales que la conforma; en este caso, la explotación del campo geotérmico Cerritos Colorados solo implica el uso de 0.09% de la APFFLP (Rodríguez, 2009).

Para iniciar con los trabajos en el campo geotérmico, es imperativo analizar la influencia que puede tener el inicio de la explotación del campo geotérmico Cerritos Colorados, sobre los recursos hídricos utilizados por otras demandas en la zona de estudio; en este punto es importante reconocer que un factor importante que puede modificar la disponibilidad hídrica de la zona es el cambio climático, cuyos efectos se tornan cada vez más evidentes y a mayor velocidad de lo que se estimaba (CONANP, 2000) por lo que evaluarlo, daría la pauta para realizar la adecuada gestión del sistema de recursos hídricos, considerando el recurso natural y, los usos consuntivos y no consuntivos en la zona de estudio actuales y futuros para evaluar las potenciales ventajas y desventajas de distintos escenarios sobre las masas subterráneas asociadas a los acuíferos presentes en la zona.

JUSTIFICACIÓN

La necesidad de este proyecto nace de la falta de estudios hidrológicos actualizados para el APFFLP; por lo que resulta imperativo realizar un conjunto de estudios multidisciplinarios para conocer la situación actual de la zona en cuestión, de tal forma que se pueda obtener la disponibilidad del recurso, tanto superficial como subterráneo, con lo que se puede generar un modelo de gestión que reproduzca la situación actual del sistema de recursos hídricos.

Como parte de la protección y manejo del APFFLP se deben aprovechar al máximo todos los servicios ecológicos que ésta puede llegar a otorgar. Para tener un servicio sustentable en un área de protección, debe de considerarse la sustentabilidad de los recursos de la zona (SEMARNAT, 2000).

La ZMG es la segunda más importante en el país, por ello, se debe considerar la reactivación de esta planta geotérmica, la cual cuenta con una vida útil que va disminuyendo con el paso del tiempo y que Cerritos Colorados considera una unidad de generación de 25 megawatts (equivalente al 7% de la energía necesaria para la ZMG) (Rodríguez, 2009).

Al tener la infraestructura necesaria para poner en operación la planta geotérmica Cerritos Colorados, es necesario verificar la capacidad con que cuenta la zona para que el recurso geotérmico sea explotado sin que ello afecte el abastecimiento del APFF, así como de la zona industrial y metropolitana de la ciudad de Guadalajara, considerando los usos consuntivos y no consuntivos que esta generaría.

Ante esto, deben elaborarse distintos escenarios futuros con cambio climático, para conocer el comportamiento a lo largo del tiempo. Esta zona contribuiría a la reducción del consumo de combustibles fósiles y a su vez, reduciría la tasa de emisiones de gases de efecto invernadero, ya que esta planta cuenta con los requisitos para registrarse en el Mecanismo de Desarrollo Limpio del Protocolo de Kyoto; también, con la operación de esta planta geotérmica, se generan fuentes de trabajo para los habitantes de las regiones donde se ubica (Rodríguez, 2009). Por otra parte, se puede considerar que el uso que tendrá el agua en el

campo geotérmico es un uso no consuntivo, ya que este es utilizado y reinyectado al acuífero para procurar un reuso eficiente.

HIPÓTESIS

La evaluación de escenarios de demanda de recursos hídricos, considerando el campo geotérmico Cerritos Colorados y bajo efecto del cambio climático, permitirá gestionar de manera adecuada los recursos disponibles en las masas subterráneas de los acuíferos asociados al APFFLP.

OBJETIVO GENERAL

Obtener la disponibilidad de los recursos subterráneos en la zona de estudio en el contexto histórico y bajo efecto del cambio climático para así, determinar la posibilidad de la existencia del campo geotérmico Cerritos Colorados y el impacto que generaría.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Implementar los modelos de simulación superficial para obtener la recarga en la zona de estudio.
- Implementar el modelo del funcionamiento hidráulico de las masas de agua subterránea en la zona de estudio, lo que permite evaluar los escenarios de demanda.
- Determinar las series modificadas de precipitación y temperatura para los escenarios de cambio climático para su aplicación en los modelos de simulación superficial y subterránea.
- Evaluar el efecto de la demanda subterránea, cumpliendo con las necesidades hídricas del APFFLP y la ZMG, para el periodo histórico y con cambio climático.

1 ESTADO DEL ARTE

1.1 DISPONIBILIDAD HÍDRICA SUPERFICIAL

En su artículo, Marisa Escobar (2011) realizó la evaluación de impactos del cambio climático en la hidrología en los andes peruanos, sostiene que el retroceso glaciar, es a raíz de la variación del clima y temperatura, los cuales afectan el régimen hídrico, siendo su objetivo desarrollar metodologías para evaluar los impactos del cambio climático sobre el recurso hídrico en las montañas del Perú, para ello se aplicó un análisis climático e hidrológico, que alimentaron el programa WEAP, en donde se ve que el cambio climático es un factor que incide directamente sobre el retroceso glaciar que afecta el régimen hídrico reduciendo notablemente la escorrentía superficial, lo cual tendrá alta implicancia en cuanto al suministro para el sector energía, urbano y agrícola.

Varela (2017) realizó la evaluación integrada de los recursos hídrico de la parroquia rural de Nono, mediante la aplicación de herramientas tecnológicas, en este caso, el programa Water Evaluation and Planning (WEAP).

Se desarrolló un estudio para obtener una propuesta de Gestión Integral de recursos hídricos para la cuenca baja del río Zaña; por lo que se planeó el Modelo de GIRH por medio del modelo WEAP (Heredia y Cieza, 2017).

En 2017, se realizó un proyecto de investigación, con el propósito de modelar el comportamiento del recurso hídrico y evaluar las garantías de suministro en la Provincia del Tequendama en eventos de variabilidad climática Niña, Niño y en condiciones normales; mediante el software de Modelación para La Evaluación y Planificación del Agua WEAP, empleando el método escurrimiento de lluvia (modelo coeficiente simplificado) (Leguizamón, 2017).

En 2017, se realizó la modelación proyectada para el año 2070 con cambio climático de la zona semi-árida de Chile; esto para obtener el balance hídrico de la zona; para ello, se utiliza el modelo WEAP21 (Duque y Vázquez, 2017).

1.2 FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO DE MASAS SUBTERRÁNEAS

Con la finalidad de recuperar el buen estado de la masa de agua subterránea y dar una solución a los usuarios de dicho recurso, en diciembre de 2016 se redactó el Plan de Explotación de la masa de agua subterránea Requena-Utiel. Junto con el citado plan se plantea la necesidad de diseñar una herramienta de apoyo para la implementación del mismo. Se trata de elaborar un modelo matemático del sistema de acuíferos de Requena-Utiel que permita un mejor conocimiento del mismo a través de su simulación en MODFLOW (Fernández, 2017).

Llamocca modela el comportamiento del flujo de agua subterránea para un acuífero semiconfinado en la microcuenca de la quebrada Chorunga, la cual se encuentra en la cuenca media-baja del río Ocoña, utilizando el programa MODFLOW, por medio del cual se ha simulado un régimen estacionario y se realizó el estudio a nivel de detalle en la mina Century, con el objeto de obtener el régimen transitorio debido a variaciones en el flujo de agua desde y hacia el acuífero, con el fin de estudiar el movimiento de posibles partículas contaminantes en el sistema hidrogeológico, debido al tipo de minería de esta zona (Llamoca, et al., 2017).

Imaz Lamadrid construye un modelo subterráneo en MODFLOW para predecir cambios en el volumen de agua dulce y salada que se presentan en la zona de San José del Cabo, México; así como la correlación que existe entre ellos. Los resultados de su investigación indican que el uso de un modelo de flujo de agua subterránea, junto con un análisis geoespacial, proporcionan herramientas efectivas para predecir escenarios para el futuro de las lagunas costeras, y sirven como base para la planificación del territorio, la conservación de la naturaleza y el manejo sostenible de estos ecosistemas (Imaz, et al., 2019).

1.3 CAMBIO CLIMÁTICO

En 2017, se realizó una modelación con el programa WEAP para determinar el impacto de los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y 8.5 en los recursos hídricos en el periodo 2015-

2030 en el Valle de Galeana, Nuevo León. Se desarrollaron dos escenarios de adaptación: el primero considera una reducción en la demanda hídrica para uso agrícola por cambio de sistemas de riego gradual; el segundo contempla un plan hídrico integral para mejorar la capacidad de infiltración de la zona de recarga mediante programas de reforestación y recuperación de suelos.

En un artículo publicado por Montiel, et al. (2017), se evaluaron los impactos probables de cambio climático en la agricultura en Aguascalientes; con base al modelo HadGEM2-ES para el forzamiento radiativo 8.5 en un futuro cercano, el cual fue regionalizado a la zona de interés.

Para el 2019, el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), en conjunto con la Unidad de Informática para las ciencias Atmosféricas y Ambientales (UNIATMOS) y la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) realizan el I Atlas Climático Digital de México (ACDM), el cual es un proyecto que se fundamenta en la necesidad de disponer de mapas y datos de nuestro país, que contengan información de distintas variables climáticas que son necesarias para una gran diversidad de usuarios, destacando la de modelar la distribución de la biodiversidad, así como para manejar o adecuar el impacto de un posible cambio climático sobre ella (INECC, et al., 2019 b).

2 ZONA DE ESTUDIO

2.1 REGIONES HIDROLÓGICO ADMINISTRATIVAS

En México, la entidad encargada de la gestión del agua es la Comisión Nacional de Agua CONAGUA, la cual desempeña sus funciones administrativa, normativa, técnica y consultiva, a través de 13 organismos de cuenca, cuyo ámbito de competencia son las Regiones Hidrológico Administrativas (RHA) (Martínez, 2018).

La delimitación de las 13 RHA están definidas con criterios hidrológicos y respetando la división política municipal para facilitar la administración e integración de la información socioeconómica. Están conformadas por una o varias regiones hidrológicas, en la cual se considera a la cuenca hidrológica como la unidad básica para la gestión de los recursos hídricos (Martínez, 2018).

A continuación, se presenta una tabla con información de la RHA Lerma-Santiago-Pacífico (VIII) encargada de gestionar los recursos hídricos del área donde se encuentra la zona de estudio:

Tabla 1. Características de la Región Hidrológica Administrativa Lerma-Santiago-Pacífico.

Características	RHA VIII Lerma-Santiago- Pacífico
Sede	Guadalajara, Jalisco
Municipios	332
Superficie	192 722 km ²
Habitantes	23 888 024
Población urbana	78.30%
Población rural	21.70%
Precipitación anual	398 mm
Agua renovable per cápita	1469 m ³ /hab/año
Grado de presión	44% (alto)
Consumo de agua	15282 hm ³ /año
Aporte de agua superficial	48.60%
Aporte de agua subterránea	51.40%
Acuíferos	128
Uso agrícola	83%
Uso industrial	3%
Uso abastecimiento público	14%

2.2 ACUÍFEROS EN MÉXICO

Los acuíferos son formaciones geológicas por las cuales circulan o se almacenan aguas del subsuelo que pueden ser extraídas para su explotación, uso y aprovechamiento. Además de funcionar como filtros purificadores, preservando la calidad del agua, funcionan como depósitos de almacenamiento y red de distribución, siendo posible extraer agua en cualquier época del año de cualquier punto del acuífero (Martínez, 2018).

En relación a las aguas subterráneas y para fines de administración, México tiene delimitados 653 acuíferos, de los cuales 195 (30%) están sin disponibilidad; es decir, que toda su capacidad disponible ya está concesionada o comprometida. Del total, 105 acuíferos (16%) se encuentran en condición de sobreexplotación, 32 (5%) con presencia de suelos salinos y agua salobre y 18 (3%) con intrusión marina (Martínez, 2018).

Las aguas subterráneas desempeñan un papel de fundamental importancia en el desarrollo económico de México, revelando en la dimensión del volumen que aporta para ser utilizado por los principales usuarios. El 38.7% del volumen total concesionado para uso consuntivo (agrícola, consumo público e industrial); es decir 32 906 millones de metros cúbicos por año al 2014, corresponden a aguas subterráneas (Martínez, 2018).

2.3 DATOS HÍDRICOS EN JALISCO

Un problema con la disponibilidad del agua es la escasa capacidad de almacenamiento; la combinación de las características geológicas, orográficas y la disponibilidad natural de los ríos que cruzan el estado, dan como resultado que los sitios propicios para la construcción de infraestructura de almacenamiento, en Jalisco, sean limitados (SEMARNAT, 2007).

2.3.1 AGUA SUPERFICIAL

En Jalisco se genera un escurrimiento medio anual de 12 045 hectómetros cúbicos (Hm^3). De este volumen se utilizan 1829 Hm^3 y se evaporan en cuerpos de aguas superficiales 1750 Hm^3 . En el lago de Chapala, se evapora un volumen medio anual de 1400 Hm^3 , por lo que se estima un volumen de 10 340 Hm^3 (Lugo, 2014).

La cuenca Lerma-Chapala en su porción jalisciense, al igual que en toda la cuenca, presenta condición de sobreexplotación por lo que no es autorizable ningún nuevo aprovechamiento. Los esfuerzos compartidos por los cinco estados que la integran (México, Querétaro, Michoacán, Guanajuato y Jalisco) se dirigen principalmente hacia acciones que conlleven a la recuperación del equilibrio hidrológico e hidráulico, así como al saneamiento de la cuenca, bajo un enfoque de gestión integral del recurso (Lugo, 2014).

La cuenca alta del río Santiago que en su parte jalisciense envuelve porciones importantes y consecuentemente recibe las aportaciones que le generan los ríos Verde y Bolaños, presenta condiciones de disponibilidad. No obstante, en el caso particular del río Verde cabe indicar que tal disponibilidad de aguas está reservada por decreto del ejecutivo federal que data del año 1995 y reformado en 1997, mediante el cual se reservan para el estado de Jalisco y de Guanajuato, 504 576 millones de metros cúbicos anuales. De este volumen corresponde al estado de Guanajuato 119 837 millones de metros cúbicos, es decir 24% de la reserva, y 384739 millones de metros cúbicos para Jalisco, es decir el 76% de la reserva decretada (Lugo, 2014).

De la reserva para el estado de Jalisco se ha previsto distribuir, 302.7 millones de metros cúbicos para dotar de agua potable al Área Metropolitana de Guadalajara, 56.8 millones de metros cúbicos para dotar de agua a localidades de la región de Los Altos, 12.6 millones de metros cúbicos para el abasto de agua a Tepatitlán y Valle de Guadalupe y otros 12.6 millones de metros cúbicos para dotar de agua a productores de Jalisco de la misma cuenca (Lugo, 2014).

En la cuenca del río Bolaños y cuencas de la región pacífico en el estado de Jalisco, se tiene disponibilidad de agua para el desarrollo de la región y conservación del entorno, sin embargo, es necesario derogar algunas vedas de control vigentes (Lugo, 2014).

2.3.2 AGUA SUBTERRÁNEA

En México, se dividen los acuíferos en zonas de pago de derecho, en este caso, se presenta los 5 acuíferos que tienen injerencia en la zona de estudio (SINA y CONAGUA,2018):

Tabla 2. Características de los acuíferos presentes en la zona de estudio.

Acuífero	Régimen General (pesos/m ³)	Número de Zona	Condición	Disponibilidad (Hm ³)	Decreto de Veda
Ameca	8.4505	2	No Sobreexplotado	0	Si
Arenal	21.8314	1	No Sobreexplotado	0	Si
Atemajac	8.4505	2	Sobreexplotado	0	Si
San Isidro	8.4505	2	No Sobreexplotado	0	Si
Toluquilla	21.8314	1	Sobreexplotado	0	Si

La importancia el agua subterránea se manifiesta en la magnitud del volumen utilizado por los principales usuarios. El agua subterránea aportó 34 385 Hm³ en 2017 para uso consuntivo, que representó 39.1% del volumen total concesionado.

Las zonas de veda son aquellas áreas específicas de las regiones hidrológicas, cuencas hidrológicas o acuíferos, en las cuales no se autorizan aprovechamientos de agua adicionales a los establecidos legalmente y éstos se controlan mediante reglamentos específicos, en virtud del deterioro del agua en cantidad o calidad, por la afectación a la sustentabilidad hidrológica, o por el daño a cuerpos de agua superficiales o subterráneos.

En el país se han definido 653 que suministran gran parte de las demandas de agua de los desarrollos industriales y cerca de 65% del volumen de agua que demandan las ciudades donde se concentran unos 60 millones de habitantes (Lugo, 2014).

Además, estos acuíferos constituyen la principal fuente de abastecimiento de la población rural y aportan el agua para el riego de aproximadamente dos millones de hectáreas, 35% de la superficie de riego de nuestro país. La sobreexplotación de los acuíferos en México es cada año más alarmante: 32 en 1975 y 106 en 2013 (Lugo, 2014).

2.3.2.1 AMECA

Su geología se basa en rocas de origen volcánicas permeables, que propician la presencia de manantiales termales que acumulan un total de 400 lps, de los cuales nace el río Caliente.

Está dividido en 3 valles:

- Magdalena: conformada con rocas basálticas con dirección de flujo N-S
- Ahualulco – Tala: se divide en 2 zonas⁷ que tienen dirección de flujo E-W:
 - Volcán Tequila, ubicado al norte del valle, constituido por basalto.
 - Caldera Primavera, ubicado en la parte este del valle y constituida por riolita, toba y pómez de alta permeabilidad.
- Ameca: valle conformado por riolita de poca permeabilidad.

El acuífero tiene espesores que van desde los 100 m (Cocula, San Martín Hidalgo y Buenavista) y de 300 m (Ameca) (CONAGUA, 2015 a).

2.3.2.2 ARENAL

Es un acuífero libre por depósitos granulares y arenas gruesas. Las rocas volcánicas funcionan como acuífero semi confinado y el flujo va en dirección SE – N y presenta una recarga en la zona SW. Además, tiene un espesor saturado de 65 m (CONAGUA, 2015 b).

2.3.2.3 ATEMAJAC

Se presenta como acuífero libre y acuífero semi confinado, la zona libre tiene un espesor que va desde los 4 hasta los 300 m y está conformado por arenas pumíticas y basalto; la parte semi confinada se conforma por basaltos y andesita. La dirección de flujo en este acuífero se presenta del E-NE (CONAGUA, 2015 c).

2.3.2.4 SAN ISIDRO

Se presentan dos acuíferos, un superior libre con espesores de 30 a 100 m y un semiconfinado con espesores de 100 a 300 m.

El medio poroso se constituye por depósitos de tobas y el medio fracturado por rocas volcánicas, como basalto, riolita y andesita. La dirección de flujo que se presenta en la zona es NW-SE (CONAGUA, 2015 d).

2.3.2.5 TOLUQUILLA

Es un acuífero libre, semiconfinado en algunas zonas por intercalación de lentes arcillosas; constituida por sedimentos aluviales y volcanoclásticos. El espesor del acuífero oscila los 400 m y la dirección del flujo que presenta el acuífero es NW - SE (CONAGUA, 2015 e).

Finalmente, en la Tabla 3 se presenta un resumen correspondiente a la disponibilidad media anual de aguas subterráneas en acuíferos del estado de Jalisco, de acuerdo con lo publicado en el Diario Oficial de la Federación el día 4 de enero de 2018 (CEA Jalisco, 2019). Como se observa, los acuíferos en estudio tienen un déficit que oscila en el rango de 1 a 73 Hm³.

Tabla 3. Estatus de los acuíferos que tienen injerencia con el APFFLP.

CVE	Acuífero	R	DNC	VCAS	VAPTYR	DMA	Estatus
1409	Ameca	277.3	20.9	278.2	6.8	-28.6	Déficit, sin disponibilidad
1436	Arenal	22.5	1.9	28.2	0.1	-7.7	Déficit, sin disponibilidad
1401	Atemajac	147.3	25.7	133.1	0.0	-11.5	Déficit, sin disponibilidad
1450	San Isidro	64.2	19.6	44.5	1.4	-1.3	Déficit, sin disponibilidad
1402	Toluquilla	49.1	2.4	119.6	0.2	-73.1	Déficit, sin disponibilidad

Donde, se tiene que los valores representados en la tabla anterior son:

R: recarga total media anual en Hm³/año; DNC: descarga natural comprometida en Hm³/año; VCAS: volumen concesionado/asignado de aguas subterráneas inscrito en el REPDA en Hm³/año; VAPTYR: volumen de extracción de agua pendiente de titulación y/o registro en el REPDA; para obtener DMA: Disponibilidad Media Anual de Agua del Subsuelo en Hm³/año.

2.4 ÁREA DE PROTECCIÓN DE FLORA Y FAUNA LA PRIMAVERA

El 6 de marzo de 1980, el Gobierno federal decretó el Bosque La Primavera como Área de Protección de Flora y Fauna La Primavera (APFFLP). El 27 de octubre de 2006, la Mesa del Consejo Internacional de Coordinación del Programa MAB (Man and the Biosphere Programme) de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) incorporó el APFFLP en la Red Mundial de Reservas de la Biosfera del MAB-

UNESCO, esta Área Protegida es de las más importantes del occidente del país (CONANP, 2000).

El APFFLP cumple una labor indispensable para mantener el equilibrio ecológico del Valle de Atemajac, al grado que una buena parte del microclima de la ZMG depende de su buen estado de conservación. Debido a esta relación de cercanía, desde principios del siglo XX ha existido una continua lucha por la explotación de los recursos productivos del bosque. No se ha respetado el perímetro protegido y constantemente se ha tenido que replantear. Esta continua explotación se ha acelerado en los últimos años con el crecimiento de la mancha urbana, dejando a la zona de protección con un alto grado de vulnerabilidad (Alcocer y Valdés, 2014).

Ésta APFF tiene una diversidad de aproximadamente 1000 especies de flora y 29 especies de mamíferos; por ello se considera patrimonio genético. Además, es un importante recolector de aguas superficiales y subterráneas; se tiene que la captación media anual de agua de lluvia es de 240 Hm³, lo cual genera un potencial hídrico que es aportado a tres cuencas hidrológicas de suma importancia para el estado de Jalisco. Asimismo, de las recargas de esta área dependen una importante superficie con infraestructura de riego, algunas industrias como los ingenios de Tala, Ameca y Bella Vista, así como un gran número de pozos, manantiales y norias de importancia vital para los pobladores del bosque y de su área de influencia (SEMARNAT, 2000).

En el año 2000, se realizó un informe por parte de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, donde se comenta la ubicación del APFFLP, la cual se localiza en el centro del Estado de Jalisco, que comprende la zona de traslape entre dos provincias florísticas: la Sierra Madre Occidental y el Eje Neovolcánico Transversal (SEMARNAT, 2000). Ubicado al poniente de la ZMG, forma parte de la región hidrológica Lerma Santiago Pacífico; así como de las cuencas La Vega-Cocula, Lago Chapala y Río Santiago Guadalajara. Abarca un área de 306.36 km² y ubicado en la convergencia de los acuíferos: Ameca, Arenal, Atemajac, San Isidro y Toluquilla.

Para 2005 (Díaz, et al.), se realiza un artículo para el foro de investigación y conservación del bosque La Primavera, donde se comenta la influencia que tiene el bosque la primavera sobre la ZMG; ante esa investigación, se considera que se tienen condiciones adecuadas para el funcionamiento de una circulación meteorológica y climática bosque-ciudad, el inconveniente en dicho trabajo radica en que las series de datos utilizados fluctúan entre los años 1982 a 2002.

Para 2014 se hace una propuesta de programa maestro de educación ambiental para el APFFLP, donde mencionan que el crecimiento de la mancha urbana, las actividades económicas como cultivos tradicionales, la infraestructura carretera e inmobiliaria, alrededor de ella, amenazan con convertirla en una isla, traduciendo lo anterior en pérdida de energía y su consecuente degradación ambiental, que repercutirá gravemente en sus procesos ecosistémicos, sociales y culturales. Así mismo, se sabe que el bosque es una importante fuente de bienes y servicios ambientales debido al alto valor ecológico que tiene, por ello se le reconoce como el regulador de clima principal, denominándolo “el pulmón de Guadalajara” (Carrillo y Bedoy, 2014).

2.5 ZONA METROPOLITANA DE GUADALAJARA

Como se observa en la Figura 1, al oriente del Bosque La Primavera, se localiza la ZMG que es el segundo núcleo urbano más poblado de México con alrededor de 4.8 millones de habitantes. La ZMG agrupa a los municipios de Guadalajara, Zapopan, San Pedro Tlaquepaque, Tlajomulco de Zúñiga, Tonalá, El Salto, Ixtlahuacán de los Membrillos y Juanacatlán. Los dos últimos no forman parte de la mancha urbana y se les considera municipios exteriores de la ZMG, a diferencia de los primeros seis, los cuales son considerados como los municipios centrales (ITESO y UNIVA, 2019).

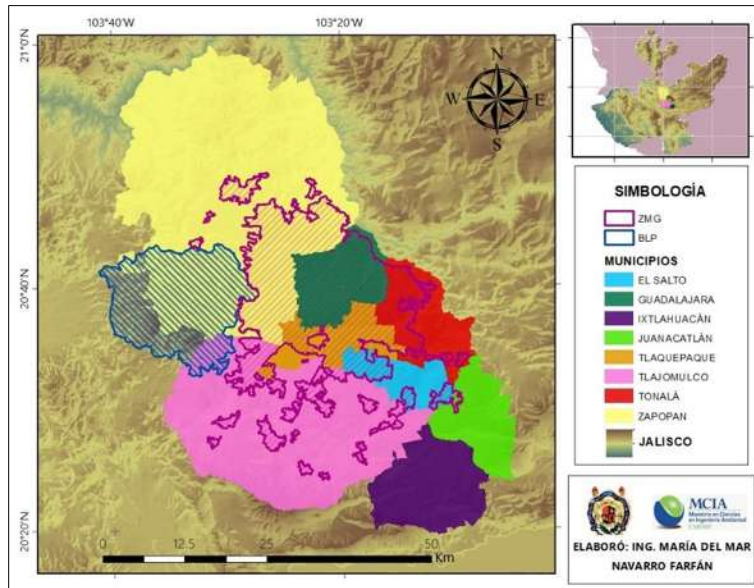


Figura 1. Municipios que conforman la ZMG.

En el caso del municipio de Guadalajara, la mancha urbana se extiende hacia el norte con el municipio de Zapopan, al oriente con el municipio de Tonalá y al sur con San Pedro Tlaquepaque.

Tal y como mencionan Pfannenstien, et al. (2018) conforme crece una ciudad, se observan los problemas en regiones bien definidas, sobre todo en áreas de reciente urbanización, hacia la periferia de la mancha urbana.

En el caso del municipio de Zapopan, se tiene que, pese a que en el inicio fue una comunidad agrícola, la cercanía que tiene con la capital estatal provocó que su proceso de urbanización se acelerara después de integrarse a la mancha urbana de Guadalajara; en dicha zona, se presentan las mejores condiciones de vida en la ZMG ya que se encuentran más consolidadas; sin embargo, también se considera que en esa zona, se tienen dos grandes e importantes urbanizaciones cerradas, las cuales se ven beneficiadas por la ubicación con un alto valor natural, lo que produjo la inserción de élites en entornos rurales, donde residía la población de escasos recursos económicos; de esta forma, pese a que se disminuye la relación entre diferentes grupos sociales, se muestra una segregación social importante.

Tanto Zapopan como Tlajomulco, han sido posiblemente territorios que han sufrido mayores prejuicios debido a la gran cantidad de superficie urbanizable y a la presencia de vialidades

importantes; ello sin mencionar el peso que ha tenido en ambos casos la cercanía del Bosque La Primavera, un recurso natural que se empleó como argumento de marketing.

La construcción de fraccionamientos de lujo junto al bosque fue un éxito que comenzó a incrementar la plusvalía de la zona, atrajo más urbanizaciones cerradas y provocó su expansión por el territorio. Este hecho cambió los flujos de mercancías y personas; y aún más importante, el proceso de interacción social.

Esta transformación de la dinámica urbana alteró de manera importante el sistema; como drenaje y alcantarillado, agua potable, condiciones de vivienda, superficie útil por persona, educación y oferta laboral (Venegas y Castañeda, 2005).

El servicio de drenaje y alcantarillado constituye un factor importante para el buen desempeño social, económico y ambiental en las localidades especialmente por el crecimiento poblacional, la expansión industrial y comercial, y la cantidad de aguas residuales que generan tanto las actividades humanas como las productivas (Venegas y Castañeda, 2005).

Como mencionan McCulligh y Tetreault (2011) en la ZMG han aflorado conflictos relativos al agua tanto del lado del abastecimiento como del saneamiento aún y cuando las fuentes de abastecimiento sean diversas como lo menciona el Informe Anual de Actividades y resultados del SIAPA (2017), la ZMG depende de cuatro fuentes: Lago de Chapala (59%), Pozos subterráneos (27%), Presa Elías González Chávez (11%) y Manantiales (11%).

La instancia encargada de dotar los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento en cantidad y calidad suficiente a los habitantes de la ZMG, contribuyendo a su salud y bienestar es el Sistema Intermunicipal de los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado (SIAPA, 2019).

Según McCulligh y Tetreault (2011) del lado del saneamiento, el no tratamiento de las aguas municipales e industriales ha provocado una crisis de salud ambiental en las poblaciones aledañas al río Santiago, receptor de los desechos de la ZMG. Es especialmente en El Salto y Juanacatlán, municipios que albergan una población de más de 150 000 personas, en donde

grupos sociales y civiles han denunciado las graves afectaciones a la salud (enfermedades respiratorias, diferentes tipos de cáncer, insuficiencia renal crónica, abortos espontáneos, entre otras) y han demandado la restauración del río.

Además, en la medida en que se quiere aumentar la oferta de agua en la ZMG para enfrentar el crecimiento demográfico, se apuntan hacia diversas fuentes alternativas que pueden ser aprovechadas de una manera social y ecológicamente sustentable como son el aprovechamiento de manantiales en la ZMG, la captación de aguas pluviales a diferentes escalas (desde la vivienda hasta el nivel de micro-cuenca urbana) y la construcción de un sistema de doble drenaje para facilitar el reúso de las aguas grises.

Durante una conferencia de prensa, Mejía (2014) menciona que el abastecimiento de agua para la ZMG estaba garantizada para los próximos 20 años a través del lago de Chapala, así mismo, hizo mención en que el lago se encontraba al 51.8% de su capacidad, con un volumen aproximado de 4100 Hm³.

El crecimiento acelerado de la población en zonas urbanas, la inadecuada planeación de la infraestructura hídrica y la ineficiente regulación de contaminantes se han convertido en algunas de las causas que afectan el abasto, la distribución y la calidad del agua. La búsqueda de sistemas alternativos de abastecimiento y la reutilización del agua hoy en día, son funciones imperativas para las ciudades y municipios. Cuidar el agua y darle un uso eficiente con un enfoque de sustentabilidad es fundamental para el desarrollo del estado de Jalisco (Lugo, 2014).

Como se muestra en la Tabla 4, el número de habitantes en la ZMG se ha triplicado en 45 años. En este sentido, también se sabe que 4.2% de la población total en el país, reside en esta zona.

Tabla 4. Crecimiento poblacional en la ZMG.

Localidad	Habitantes 1970	Habitantes 2015
Guadalajara	1 199 391	1 460 148
Zapopan	155 488	1 332 272
San Pedro Tlaquepaque	100 945	664 193
Tlajomulco de Zúñiga	35 145	549 442
Tonalá	24 648	536 111
El Salto	12 367	183 437
Ixtlahuacán de los Membrillos	10 652	53 045
Juanacatlán	5501	17 955
Total	1 544 137	4 796 603

Según el último conteo realizado en 2015 (INEGI, 2019 b), la ZMG contiene 61% de la población total en el estado de Jalisco. La creciente mancha urbana obliga a plantear nuevos retos de coordinación entre los tres órdenes de gobierno que posibiliten la planeación integral del territorio, la gestión eficiente de los servicios públicos y el ejercicio pleno de los derechos de los ciudadanos, elementos indispensables para la gobernabilidad y el desarrollo sustentable de las áreas metropolitanas.

En este contexto, la identificación del número y tamaño del Área metropolitana es de fundamental interés para la toma de decisiones, especialmente para los diferentes sectores encargados de diseñar e instrumentar políticas de desarrollo con un referente territorial. Es importante señalar que el Área Metropolitana de Guadalajara no se encuentra exenta de los contrastes que existen en el resto del país y así como existen áreas de pleno confort, también se encuentran otros en los que impera la desigualdad y la pobreza (Gobierno del Estado de Jalisco , 2019).

El potencial económico histórico de Guadalajara, ahora fortalecido con los municipios conurbanos, hacen que se consolide como la segunda aglomeración del país en términos de intercambio comercial en una de las primeras en el volumen de su producción industrial (Gobierno del Estado de Jalisco , 2019).

Es importante señalar que 75% de las industrias jaliscienses se encuentran en esta Área y ello la convierte en el principal centro de actividades económicas en el estado e incluso con injerencia en el occidente del país (Gobierno del Estado de Jalisco , 2019).

2.6 CAMPO GEOTÉRMICO CERRITOS COLORADOS

Una de las particularidades importantes de la zona de estudio radica en que dentro del Bosque La Primavera, se localiza una pequeña porción delimitada como zona de aprovechamiento especial, en la cual se tiene un importante potencial geotérmico denominado campo geotérmico Cerritos Colorados.

Como mencionan Rocha y Prol (2013), desde mediados de 1970, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) inició en el área de Cerritos Colorados, ubicada dentro del Bosque La Primavera, una serie de estudios geológicos, geoquímicos y geofísicos, con el objetivo de evaluar de manera preliminar el potencial geotérmico, dada su reciente actividad volcánica, la cual concluyó en la región hace unos 25 mil años, y a la presencia superficial de fumarolas, manantiales calientes y zonas de alteración hidrotermal.

Así, la CFE empezó ejecutando estudios geológicos de cobertura regional que abarcaron una superficie de aproximadamente 80 000 km², incluyendo la zona del Bosque La Primavera, además de otras zonas termales como son Hervores de la Vega y San Marcos. Posteriormente, se llevaron a cabo estudios geológicos a detalle, levantando cartografía geológica a escalas 1:25 000 e incluso 1:5000, así como el muestreo sistemático de los gases de las fumarolas y de los manantiales termales, con el fin de realizar el análisis e interpretaciones geoquímicas.

Paralelamente, se desarrollaron estudios geofísicos que incluyeron levantamientos de resistividad con sondeos eléctricos verticales, estudios gravimétricos y magnetométricos. Como principal conclusión de esta detallada secuencia de estudios, se identificaron como áreas de alto interés geotérmico, la porción centro-sur de la caldera volcánica denominada La Primavera, en la porción conocida como Cerritos Colorados y el cráter del domo Las Planillas, cerro ubicado al sur, fuera del límite de la caldera. En ambas áreas, los estudios

concluyeron que era factible la existencia en el subsuelo de sendos sistemas geotérmicos que podrían ser comercialmente aprovechables para la generación de electricidad.

Sobre la base de esos resultados, se localizaron en la porción centro – sur de la caldera, los sitios para perforar lo primeros pozos exploratorios, etapa subsecuente en la secuencia exploratoria que había venido realizando la CFE en la zona.

Como menciona Rodriguez (2009) de manera preliminar, se obtuvo que el potencial geotérmico de la zona es de 75 megawatts. Las actividades de la zona se ejecutaron en el periodo comprendido de 1980 a 1989, para las cuales se construyeron 13 plataformas y presas de lodos, alrededor de 13.5 km de caminos de acceso y se perforaron y construyeron 12 pozos geotérmicos.

Aun así, a finales de 1989, a instancias de las autoridades ambientales tanto federales como estatales, la CFE suspendió los trabajos de exploración geotérmica en la zona; además, inició con los trabajos de restauración del campo reforestando la zona que pudo llegar a ser afectada.

Además, la CFE realizó un informe donde se mencionan los beneficios de la energía geotérmica en el APFFLP, así como los antecedentes dentro de la misma zona referente al campo geotérmico Cerritos Colorados, así como otros campos que se encuentran en operación a lo largo de la República Mexicana.

3 MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología utilizada en el trabajo se muestra en la Figura 2 y la Figura 3. Se observa que, el contar con información en calidad y cantidad es importante para realizar las modelaciones de forma correcta.

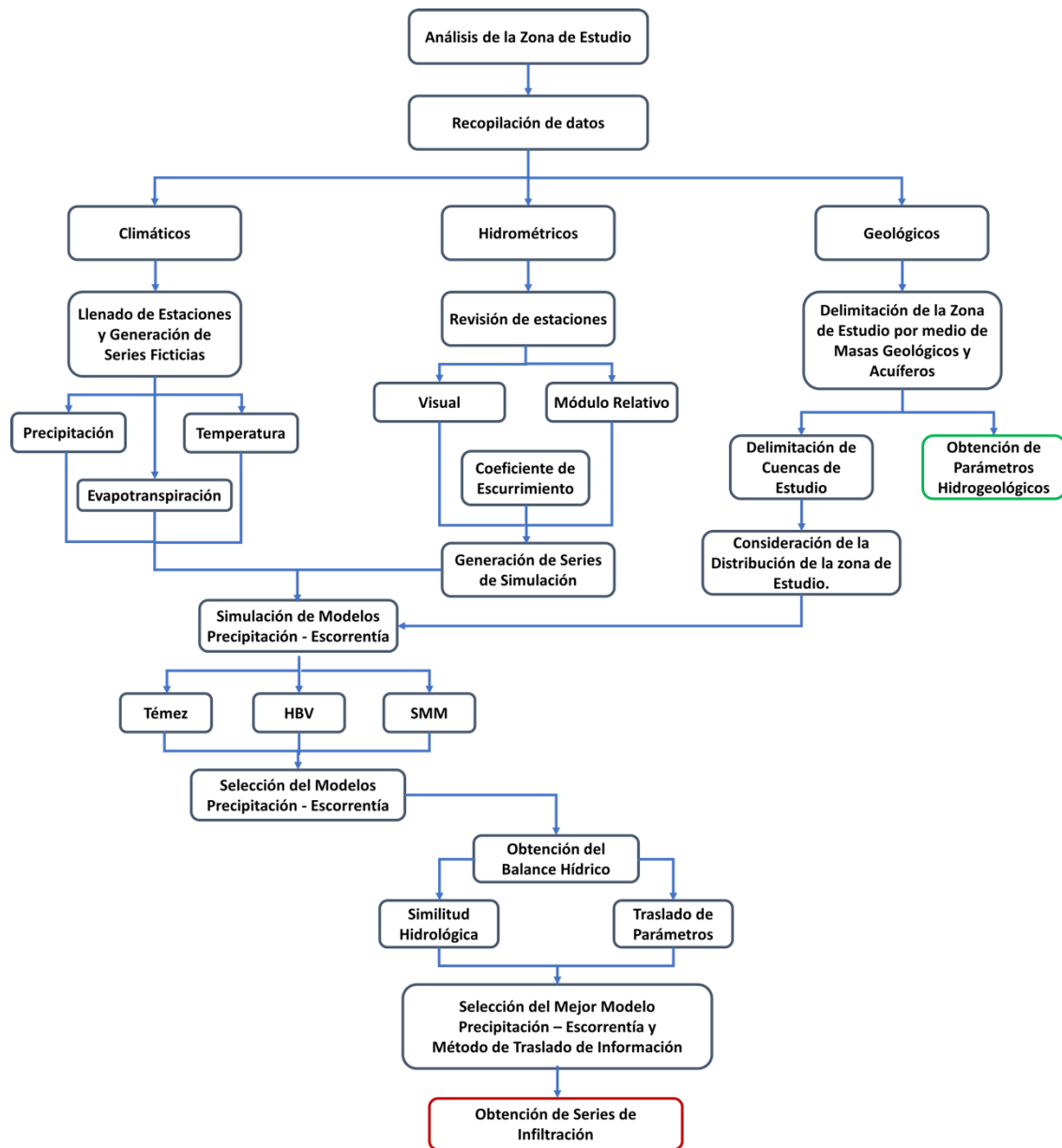


Figura 2. Esquema metodológico de la gestión de datos y modelación superficial.

En general, el trabajo se divide en 4 etapas: 1) gestión de datos, 2) modelación superficial, 3) modelación subterránea y 4) obtención de escenarios de cambio climático. Es importante considerar que los parámetros hidrogeológicos obtenidos en la gestión de datos y las series de infiltración profunda calculados en la modelación superficial son utilizados en la modelación subterránea.

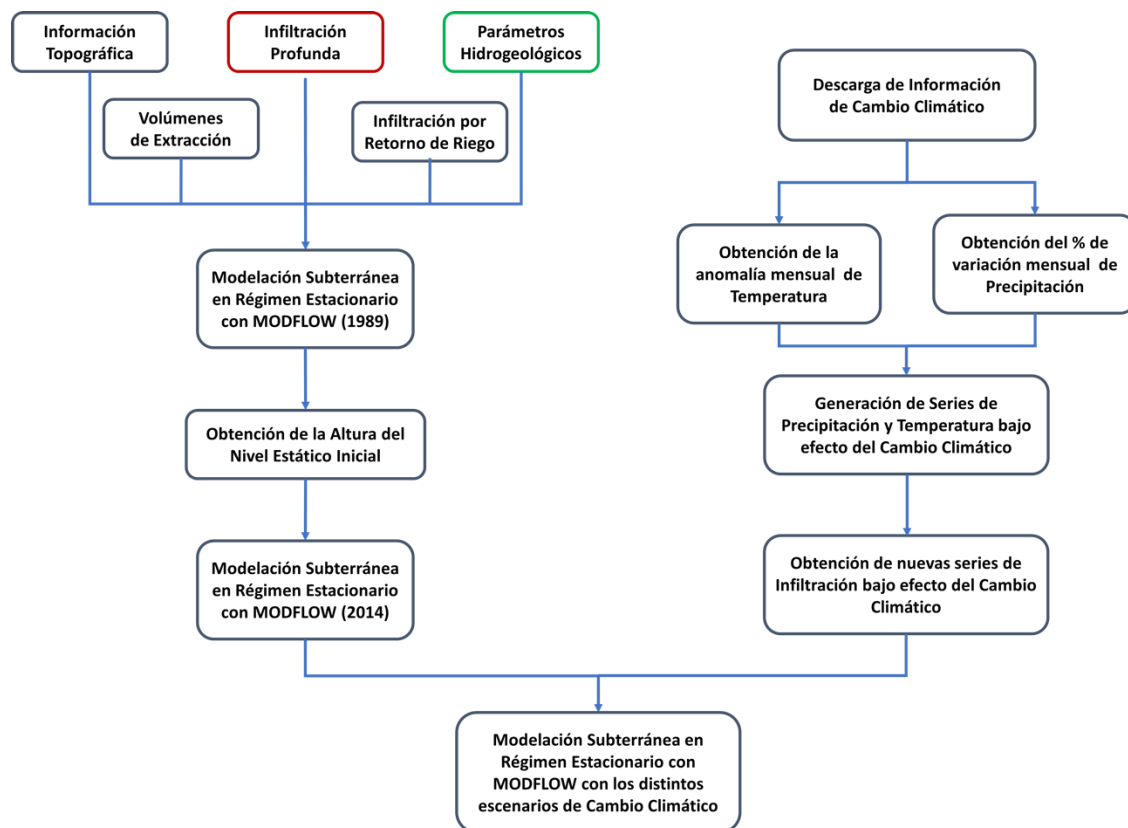


Figura 3. Esquema metodológico de la modelación subterránea y obtención de series meteorológicas con cambio climático.

En la Figura 3, se obtienen las nuevas series de infiltración bajo el efecto del cambio climático, lo cual se logra al volver a realizar la modelación hidrológica superficial de la zona, con las series modificadas por la variación en la precipitación y la anomalía en la temperatura; cabe destacar que se realiza con los modelos calibrados para la serie de control.

3.1 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

La zona de estudio tiene la particularidad de presentarse en zonas en las cuales no se tiene suficiente información meteorológica, hidrométrica o geológica. Es por ello, que lo primero que se realiza es una búsqueda de información para trabajar con la mayor cantidad de datos posibles.

3.1.1 SERVICIO GEOLÓGICO MEXICANO

Para delimitar la zona de estudio, se consideraron las masas geológicas localizadas por debajo de los acuíferos que tienen injerencia en el APFFLP y en la ZMG. La selección de masas geológicas o hidrogeológicas se plantea a partir de que, la simulación subterránea se realizó con el software MODFLOW, el cual representa los acuíferos individuales o zonas permeables por capas hidrogeológicas.

A partir de las cartas geológicas en formato de documento portable (PDF) a escala 1:250 000 obtenidas del Servicio Geológico Mexicano (2019) se genera un archivo vectorial con el software cartalinx, con el cual se seleccionan las masas geológicas que se modelaron como zona subterránea.

Una vez delimitada la zona de estudio, se generan las cuencas superficiales con un sistema de información geográfica, de tal forma que cubran por completo las masas geológicas para determinar el área de influencia sobre la cual se encuentren las estaciones meteorológicas e hidrométricas.

3.1.2 MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES

El Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática es un organismo público autónomo responsable de normar y coordinar el Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica (INEGI), así como de captar y difundir información de México en cuanto al territorio, los recursos, la población y economía, que permita dar conocer las características del país y ayudar a la toma de decisiones (INEGI, 2019 a).

El Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0, es un producto que representa las elevaciones del territorio continental mexicano, mediante valores que indican puntos sobre la superficie del terreno, cuya ubicación geográfica se encuentra definida por coordenadas (X, Y) a las que se le integran valores que representan las elevaciones (Z). Los puntos se encuentran espaciados y distribuidos de modo regular (INEGI, 2019 a). Estos modelos digitales se pueden descargar con resoluciones de 15, 30, 60, 90 y 120 m y son la base en la generación de las cuencas hidrográficas.

Un modelo digital de elevaciones (MDE) se define como una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno (Felicísimo, 1994).

En este caso la palabra elevación enfatiza el concepto de medición de altura con respecto a un datum y la generación por parte del modelo de valores absolutos de altura. Este término se utiliza con frecuencia en los Estados Unidos para describir un arreglo rectangular o hexagonal de puntos con valores de elevación obtenidos por métodos fotogramétricos o cartográficos (Fallas, 2007).

3.1.3 ARCHIVOS VECTORIALES DE CONABIO

La Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) tiene la misión de promover, coordinar, apoyar y realizar actividades dirigidas al conocimiento de la diversidad biológica, así como a su conservación y uso sustentable para beneficio de la sociedad.

Por medio de archivos vectoriales, se representa la información de la zona de estudio, de tal forma que se conozca la cobertura y distribución de los diferentes usos que se le da al suelo; así como la información edafológica que otorga una descripción detallada del suelo, mostrando las características morfológicas y propiedades físicas y químicas. Toda la información que se tenga es lo que dará la pauta para realizar las modelaciones superficiales y subterráneas de una forma más clara y precisa.

Los archivos para determinar las características geomorfológicas de la zona de estudio son: tipo de suelo, uso de suelo, ubicación de cuerpos de agua, delimitación de cuencas y subcuencas hidrológicas, acuíferos y, localización de regiones y subregiones hidrológicas disponibles de forma gratuita en el sitio web de CONABIO (2018).

3.1.4 INFORMACIÓN METEOROLÓGICA CON CLICOM

La información meteorológica (precipitación y temperatura) se obtuvo de la base de datos Climate Computing Project o CLICOM (CICESE, 2018), que es un sistema de software de manejo de datos climatológicos desarrollado por las Naciones Unidas, administrada por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) en México, el cual nos ayuda a conocer la ubicación espacial de cada estación climatológica en la república mexicana, así como toda la información que contiene cada estación meteorológica.

Las observaciones representan los datos recopilados en las diferentes estaciones meteorológicas del país y estas se contienen en diferentes periodos de información, donde los datos más antiguos datan de 1920 hasta el periodo actual, en diciembre de 2014 (CICESE, 2018).

Esta base de datos permite realizar una elección preliminar de las estaciones a utilizar en el estudio, así como a descargar la información climática para manipular los datos y seleccionar las estaciones más favorables para el estudio en específico.

3.1.5 INFORMACIÓN HIDROMÉTRICA CON BANDAS

El manejo digital de la información hidrométrica es de suma importancia para la gestión del recurso hídrico del país, por tal motivo, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), a través del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) ha venido actualizando el Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) que integra la red hidrométrica nacional. En esta red se registra el nivel de agua (escalas) y la cantidad de agua que pasa a una determinada hora (aforos) en los principales ríos de la República Mexicana (IMTA, 2017).

Cuenta con los datos de 2070 estaciones hidrométricas, las cuales son el resultado de una depuración al catálogo BANDAS hecho en 2008 por la Conagua y el IMTA. Aproximadamente 480 estaciones fueron actualizadas en el año 2006 y tiene registradas casi 180 presas (IMTA, 2017).

La información que se requiere puede ser encontrada en las estaciones hidrométricas que proporciona BANDAS (2019) es:

- Valores diarios: Gasto medio diario (m^3/s) día 1 a día 28-31.
- Valores mensuales: Se incluyen la hora y el día del gasto máximo y el gasto mínimo (m^3/s). Además de la lectura de volumen máximo y medio de escurrimientos (miles de m^3), sedimentos (miles de m^3) y la lectura del día y hora de las escalas para el gasto mínimo, medio y máximo.
- Valores anuales: Menciona el mes, día y hora en que ocurre el gasto máximo y gasto mínimo (m^3/s). La lectura de escala para el gasto máximo y mínimo (m), además del volumen anual de escurrimientos (miles de m^3), gasto medio anual (m^3/s) y volumen anual de sedimentos (miles de m^3).

3.1.6 TÍTULOS CONCESIONADOS CON REPDA

La CONAGUA, cuenta con un sistema de concesiones y asignaciones de agua superficial y subterránea regidos por la Ley de Aguas Nacionales (LAN), cuyo proceso implica la elaboración de Títulos y la solicitud de su inscripción en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) a efecto de otorgar seguridad jurídica a los particulares a través de la inscripción oportuna y confiable de las concesiones, emitir la información estadística, así como permitir la consulta pública. Esto también permite evitar o mitigar la sobreexplotación de acuíferos, disminuir la contaminación por descargas de aguas residuales a cuerpos de jurisdicción federal, custodiar las zonas federales y controlar la extracción de materiales pétreos (IMTA, 2017).

El Registro Público de Derechos de Agua proporciona información y seguridad jurídica a los usuarios de aguas nacionales y sus bienes públicos inherentes, a través de la inscripción de

los títulos de concesión, asignación y permisos de descarga, haciendo constar la titularidad de los derechos inscritos y los cambios en sus características. Su principal objetivo es registrar y resolver consultas en forma eficaz, sobre los derechos de los usuarios en materia de aguas nacionales que compete administrar a la Comisión Nacional del Agua (REPDA, 2017).

De la base de datos del REPDA se obtienen el número de pozos de extracción con los que se cuenta en la zona de estudio, de tal forma que se conozca el total de uso concesionado (en m³) y el tipo de uso al que pertenece, ya sea: agrícola, acuícola, doméstico, industrial, pecuario o público urbano.

3.1.7 MODELOS DE CIRCULACIÓN GENERAL

Para realizar las simulaciones afectadas por cambio climático, se obtienen los Modelos de Circulación General (MCG), se utilizan los escenarios que proporciona el INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático) en el portal de la Unidad de Informática para las Ciencias Atmosféricas y ambientales del Centro de Ciencias de la Atmósfera por parte de la Universidad Nacional Autónoma de México (INECC, et al., 2019 b) donde se descargan como archivos tipo TIFF (Tagged Image File Format), el cual es un formato de archivo informático para almacenar imágenes de mapa de bits. De las diferentes series que se descargan son la anomalía (Δ) en las series de temperatura y para la precipitación se descarga la serie de control y las series bajo efecto de cambio climático para así, poder obtener el porcentaje de variación mensual en los distintos escenarios climáticos con los que se trabaja.

Esta base de datos es una actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación, y cuenta con un total de 16 modelos de circulación general.

3.2 GESTIÓN DE DATOS

Para la selección de estaciones tanto meteorológicas como hidrométricas, se obtienen las características espaciales como son longitud, latitud y elevación; años en estudio, en servicio y efectivos y, el porcentaje de datos vacíos que se presentan en la serie, el cual se recomienda que sea bajo para que el llenado de estaciones sea sencillo y no se altere la serie estudiada.

3.2.1 POLÍGONOS DE THIESSEN

Se obtuvieron los polígonos de Thiessen para que, de esta forma, se conozca el área de influencia que tiene cada estación meteorológica sobre las cuencas de estudio. Los Polígonos de Thiessen no presentan mayores complicaciones en su aplicación. A cada estación se le asigna una superficie, la cual es obtenida representando las estaciones en un plano y uniéndolas a través de rectas. A estas rectas posteriormente se les trazan sus mediatrices hasta que se intersecan entre sí. Con los límites del área en estudio y los que definen las mediatrices se obtiene la superficie de influencia para cada estación (Pizarro, et al., 2003).

3.2.2 PRUEBAS EN LAS ESTACIONES

Se realizaron pruebas de consistencia en las series de precipitación y escurrimiento, de tal forma que cumpla con las condiciones de aleatoriedad, homogeneidad, independencia (persistencia para las series hidrométricas) y estacionalidad (Merlos, et al., 2014).

Para Salas, et al. (1980), la no homogeneidad en los datos es común en las series de tiempo hidrológicas; es inducida por los seres humanos o producida por factores naturales de perturbación significativos, evolutivos o repentinos (como los desastres naturales). Además, los datos hidrológicos pueden tener errores sistemáticos significativos que producen series inconsistentes.

Entonces, para las series de precipitación y escurrimiento se debe obtener la homogeneidad de cada estación. La homogeneidad se realiza con la prueba de Secuencias y el Test de Helmert y esta se cumple si todos los valores que conforman la muestra provienen estadísticamente de una misma población.

De la misma forma, la independencia se obtiene por medio de Límites de Anderson e implica la probabilidad de ocurrencia de cualquier dato que no depende de la ocurrencia de algún otro valor precedente en el tiempo o en el espacio.

Varias características de las series temporales, como la media, la desviación estándar y las correlaciones seriales, pueden verse afectadas cuando una tendencia y/o un salto positivo o negativo (deslizamiento) se producen en series hidrológicas por falta de homogeneidad e inconsistencia.

Es importante considerar que, cuanto más larga es una serie, mayor es la probabilidad de que haya cierta falta de homogeneidad en los datos, producida por actividades humanas o por una interrupción accidental de la naturaleza, además de algunos errores sistemáticos (inconsistencia).

Las series hidrológicas pueden dividirse en 2 grupos básicos: serie de tiempo simple en un específico punto y múltiples series de tiempo en varios puntos o múltiples series de tiempo de diferente tipo en un punto.

Las series de tiempo simples, son las series anuales de precipitación y las series mensuales de escorrentía medidas en una estación hidrométrica; las series simples también son llamadas series invariables.

3.2.3 PRUEBA DE SECUENCIAS

Esta prueba consiste en analizar el signo de las desviaciones con respecto a la mediana muestral para cada dato y comparar el número de cambios permitidos (u) en base al tamaño de la muestra (n). Si el número de cambios está entre los valores establecidos en los rangos presentados en la Tabla 5, se dice que la serie es homogénea.

Tabla 5. Rangos de cambios permitidos para la prueba de Secuencias, según el número de datos.

n	u	n	u	n	u	n	u
12	5 – 8	22	9 – 14	32	13 – 20	50	22 – 30
14	5 – 10	24	9 – 16	34	14 – 21	60	26 – 36
16	6 – 11	26	10 – 17	36	15 – 22	70	31 – 41
18	7 – 12	28	11 – 18	38	16 – 23	80	35 – 47
20	8 – 13	30	12 – 19	40	16 – 25	100	45 – 57

3.2.4 TEST DE HELMERT

Consiste en un procedimiento sencillo donde se ordena la serie en función del tiempo y se analiza el signo de las desviaciones con respecto a la media aritmética de los datos. Si una desviación de un cierto signo es seguida por otra del mismo signo, entonces se dice que se forma una secuencia “S”, de lo contrario se considera un cambio “C”. Para comprobar que la serie es homogénea se aplica el criterio mostrado en la Ecuación [1]:

$$-\sqrt{n-1} \leq (S - C) \leq \sqrt{n-1} \quad [1]$$

3.2.5 LÍMITES DE ANDERSON

Según Salas, et al.(1980), para una serie independiente la población del correlograma es igual a cero para $k \neq 0$. Sin embargo, series temporales independientes, presentan variabilidad de la muestra, conteniendo fluctuaciones de alrededor de cero, pero estos no son necesariamente cero.

El caso contrario se presenta en las series de volúmenes de escurrimiento porque debe existir una dependencia o asociación a través del tiempo; tal dependencia se incrementa conforme el intervalo de muestreo de una serie se reduce, de manera que existe más dependencia entre valores sucesivos mensuales que entre magnitudes anuales (Campos, 2007).

Para calcular el correlograma, se debe considerar que a partir de la serie original (X) se genera una serie modificada (Y) que depende del desfase (k) que se esté aplicando; de esta forma, para un mismo k, se tiene una serie X y una serie Y.

Entonces, según el número de desfases, será el número de valores que se tienen en el correlograma (ρ), representados en las Ecuaciones [2] y [3]; donde σ_x y σ_y son las desviaciones estándar de las series X y Y, respectivamente y n representa el número de datos de la serie.

$$\rho = \beta \frac{\sigma_x}{\sigma_y} \quad [2]$$

Donde:

$$\beta = \frac{n \sum XY - \sum X \sum Y}{n \sum X^2 - (\sum X)^2} \quad [3]$$

Para determinar los límites de probabilidad de series independientes o persistentes, se utilizan los límites de Anderson (Anderson, 1941) para un 95% de nivel de confianza, el cual se muestra en la Ecuación [4] y dependen también, del número de desfases.

$$r_{k(95\%)} = \frac{-1 \pm 1.645\sqrt{n-k-1}}{n-k} \quad [4]$$

Para las estaciones meteorológicas, si menos del 10% de los valores del correlograma calculado superan los límites, se dice que la serie de datos es independiente. Caso contrario sucede con la prueba aplicada a las estaciones hidrométricas, ya que se requiere que al menos 90% de valores del correlograma se encuentren por fuera de los límites de Anderson para considerar que la serie es persistente.

3.2.6 LLENADO DE DATOS

Para realizar las modelaciones superficiales, es necesario tener el periodo de tiempo con el que se trabaja. En México, uno de los principales problemas que se tiene con las estaciones

meteorológicas e hidrométricas es la falta de información, es por ello que en repetidas ocasiones se encuentran días, meses e incluso años vacíos.

Dado que las series requeridas como datos de entrada a los Modelos Precipitación – Escorrentía MPE son precipitación, temperatura y evapotranspiración, es necesario tener en cuenta el mismo periodo tiempo, que a su vez debe de coincidir con el periodo de la serie de datos de las estaciones hidrométricas.

El llenado de vacíos en las estaciones meteorológicas es el procedimiento más importante en la gestión de datos; debido a que de ello dependen los resultados de las modelaciones.

Se debe considerar que, cualquiera que sea el método que se utilice las series se ven afectadas, razón por la cual debemos tener cierto recelo respecto a ellas y comprender lo que les sucede al ser manipuladas.

Por ello, se aplica el criterio de matriz de correlación y $\pm 10\%$, de tal forma que se tenga un control en los resultados que se obtienen con las series de precipitación y temperatura y que, además, sean lógicos.

3.2.7 MATRIZ DE CORRELACIÓN Y $\pm 10\%$

La matriz de correlación sirve para conocer las estaciones de apoyo con las cuales se logre realizar el llenado de estaciones. Es importante que no exista una variación importante entre los valores precipitación media anual entre una estación y otra, por lo que se propone que el coeficiente de correlación debe ser mayor a 0.75. Dicha similitud es importante, ya que de acuerdo a este resultado se puede evitar la discrepancia de datos.

Además, se realiza una matriz con la cual, se fuerza a que las estaciones que se encargan del llenado de la estación sin datos, tengan una variación de $\pm 10\%$ con respecto a los valores anuales. Esto se aplica debido a que se puede presentar una variación alta en el valor de la precipitación anual entre estaciones relativamente cercanas.

Ahora bien, es importante considerar que no solamente se debe procurar que una estación tenga correlación con varias estaciones de apoyo, de esta forma, el llenado de estaciones

será homogéneo y no dependerá solamente de una estación en específico, lo que llevaría a realizar una traslación espacial de información.

3.2.8 GENERACIÓN DE SERIES

3.2.8.1 LLENADO DE ESTACIONES DE PRECIPITACIÓN POR INTERPOLACIÓN DE DISTANCIA INVERSA

Para evitar la traslación de información espacial en las series de precipitación, se propone utilizar el método de interpolación de distancia inversa (IDW), el cual goza de una larga historia de uso y fiabilidad, debido principalmente a su simplicidad de formulación y a su persistente aplicación en entornos operativos (García, et al., 2008).

El método IDW se basa en el método de la media aritmética, pero con el agregado de una ponderación por distancia euclidiana. Dicha ponderación, al tener un factor cuadrático, recibe una influencia bastante fuerte del monto pluvial de las estaciones más cercanas y al considerar una serie o variedad de puntos de estimación puede formar agrupaciones concéntricas de los montos estimados en torno a las estaciones (Pizarro, et al., 2003).

La distancia euclidiana en este caso, considera la diferencia de longitud, latitud y elevación entre las estaciones meteorológicas en estudio y está dada por la Ecuación [5].

$$do_1 = \sqrt{(x_o - x_1)^2 + (y_o - y_1)^2 + (z_o - z_1)^2} \quad [5]$$

Donde do = distancia euclidiana (m) y $x_{0,1}$, $y_{0,1}$ y $z_{0,1}$ representan las coordenadas geográficas en proyección UTM (Universal Transverse Mercator) de la estación meteorológica con dato faltante (0) y con dato existente (1).

Para este método, el valor que encontramos depende de la correlación que tengamos entre las estaciones en estudio, es por ello que el número de estaciones utilizadas varía de acuerdo a la correlación y a la existencia del dato faltante en la estación de apoyo. Con la Ecuación [6] y [7] se obtiene el valor de la precipitación en el mes faltante en la estación estudiada:

$$EF1 = \frac{\sum_{i=1}^n EP_i \frac{1}{do_i^2}}{D_i} \quad [6]$$

$$D_i = \sum_{i=1}^n \frac{1}{do_i^2} \quad [7]$$

Donde, EF es el valor de la precipitación en la estación con dato faltante (mm) y EP, el valor de la precipitación en la estación con dato existente (mm).

3.2.8.2 LLENADO DE TEMPERATURA POR MEDIA ARITMÉTICA

Para las series de temperatura, es importante tomar en cuenta el número de años con los que se trabaja en la modelación superficial, ya que son datos de entrada para las modelaciones y son la base para el cálculo de evapotranspiración.

Se parte del hecho que las series de temperatura presentan periodicidad anual, la cual se puede eliminar si se hace un llenado con las estaciones que se encuentran cerca de la estudiada. Por ello, se opta por utilizar un método de llenado que permita mantener esa característica y que, al mismo tiempo, preserve un valor medio.

La idea central del procedimiento para obtener datos faltantes es aprovechar que no hay grandes cambios climáticos en la región donde se ubican las estaciones (Matlalcuatzi, 2006); en México, la temperatura promedio ha aumentado 0.85°C en el último siglo (INECC, et al., 2019 a). Entonces, se realiza el llenado de estaciones por el método de llenado de estaciones con media aritmética, la cual consiste en calcular el promedio de los datos de temperatura puntuales de estaciones ubicadas en un área geográfica determinada (Pizarro, et al., 2003) o con su propio valor medio mensual.

3.2.9 OBTENCIÓN DE SERIES DE EVAPOTRANSPIRACIÓN

La evaporación y la transpiración ocurren simultáneamente y no hay forma sencilla de separar ambos procesos, por lo que al flujo de vapor de agua desde una cubierta vegetal se

le denomina de forma general evapotranspiración, lo que quiere decir que toma en cuenta los dos procesos ocurridos.

La estimación precisa de la evapotranspiración no es una tarea simple. Los procedimientos requieren el control continuo de un gran número de parámetros físicos, meteorológicos y de la cubierta vegetal (Aparicio, 1992).

En México se usa fundamentalmente el método de Thornthwaite para el cálculo del uso consuntivo; el cual solo toma en cuenta la temperatura media mensual y arroja resultados estimativos que pueden usarse para estudios preliminares o de gran visión (Aparicio, 1992).

3.2.9.1 MÉTODO DE THORNTWAITE

Como cita Almorox (2003), este método fue desarrollado en 1944 y calcula el uso consuntivo mensual como una función de las temperaturas medias anuales mediante la Ecuación [8]:

$$U_j = 1.6K_a \left(\frac{10T_j}{I} \right)^a \quad [8]$$

Donde: U_j representa el uso consuntivo en el mes j , en cm; T_j es la temperatura media en el mes j , en °C; a , I son constantes y K_a es constante que depende de la latitud y el mes del año.

Las constantes a (Ecuación [9]) e I (índice de eficiencia de la temperatura) Ecuación [10] se calculan de la siguiente manera:

$$a = 675 \times 10^{-9}I^3 - 771 \times 10^{-7}I^2 + 179 \times 10^{-4}I + 0.492 \quad [9]$$

$$I = \sum_{j=1}^{12} i_j \quad [10]$$

Donde, i está dada por la Ecuación [11] y, j representa el número de mes

$$i_j = \left(\frac{T_j}{5} \right)^{1.514} \quad [11]$$

3.2.9.2 MÉTODO DE PENMAN – MONTEITH

En 1948, Penman combinó el balance energético con el método de la transferencia de masa y derivó una ecuación para calcular la evaporación de una superficie abierta de agua a partir de datos climáticos estándar de horas sol, temperatura, humedad atmosférica y velocidad de viento. Este método conocido como combinado fue desarrollado posteriormente por muchos investigadores y ampliado a las superficies cultivadas por medio de la introducción de factores de resistencia.

Los parámetros de la resistencia superficial se combinan a menudo en un solo valor, el de la resistencia superficial total que se combina en serie con la resistencia aerodinámica. La resistencia superficial, r_s , describe la resistencia al flujo de vapor a través de las estomas, del área total de la hoja y de la superficie del suelo. La resistencia aerodinámica, r_a , describe la resistencia en la parte inmediatamente superior a la vegetación e incluye a la fricción que sufre el aire al fluir sobre superficies vegetativas. Aunque el proceso del intercambio en la vegetación es demasiado complejo para ser descrito completamente por los dos factores de resistencia mencionados, con esta estimación se obtienen buenas correlaciones entre los valores medidos y calculados de evapotranspiración, especialmente en el caso de una superficie de pasto uniforme (referencia). La Ecuación [12], combinada de Penman-Monteith lo menciona Allen (2006).

$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p \frac{e_s e_a}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \quad [12]$$

Donde R_n es la radiación neta, G es el flujo del calor en el suelo, $(e_s - e_a)$ representa el déficit de presión de vapor del aire, ρ_a es la densidad media del aire a presión constante, c_p es el calor específico del aire, Δ representa la pendiente de la curva de presión de vapor de saturación, γ es la constante psicrométrica, y r_s y r_a son las resistencias superficiales (total) y aerodinámicas.

Según lo formulado anteriormente, el enfoque de Penman-Monteith incluye todos los parámetros que gobiernan el intercambio de energía y el flujo de calor (evapotranspiración) de grandes extensiones uniformes de vegetación. La mayoría de los parámetros son medidos o pueden calcularse fácilmente de datos meteorológicos. La ecuación se puede utilizar para el cálculo directo de la evapotranspiración de cualquier cultivo pues las resistencias superficial y aerodinámica son específicas para cada cultivo.

3.3 REVISIÓN DE ESTACIONES HIDROMÉTRICAS

Para las estaciones hidrométricas, se genera un buffer de influencia sobre la zona de estudio, de tal forma que se encuentren las estaciones que se pueden modelar y en este caso, para realizar las modelaciones, es preciso considerar que las cuencas deben encontrarse a régimen natural.

3.3.1 ESTACIONES A RÉGIMEN NATURAL

Las series hidrométricas a régimen natural son dadas por la serie histórica de caudales que hubieran circulado por dicho lugar en caso de que no existiera ninguna intervención humana en la cuenca. Las acciones antropogénicas son todos los trabajos de regulación o utilización del agua superficial o subterránea que alteren la cuantía del caudal que habría circulado por el río (Solera y Andreu, 2003).

Entonces, si se configura un modelo matemático para la simulación del funcionamiento del mismo y, se alimenta este con las series a régimen natural, el resultado serán las series simuladas también en régimen natural.

En México, no se cuenta con la información necesaria para realizar una restitución a régimen natural; razón por la cual, se plantea trabajar con estaciones hidrométricas sin alteración, con las cuales se crean cuencas altas o de cabecera. Estas cuencas, son áreas aledañas a la divisoria del agua o parteaguas en la porción altimétrica más elevada de la cuenca y, en esta zona se forman los primeros escurrimientos luego que el suelo haya retenido o absorbido el agua según su capacidad (Cotler, et al., 2013).

Al partir de series hidrométricas en las que no existen acciones antropogénicas, es necesario revisar que no existan obras importantes en la cuenca; además del comportamiento de la serie hidrométrica en sí. Por ello, además de realizar las pruebas de homogeneidad y persistencia, se realiza una revisión visual de las series de gastos a través del tiempo; así pues, para las cuencas generadas a partir de las estaciones hidrométricas, se obtiene el coeficiente de escurrimiento y se calcula el módulo relativo.

3.3.2 REVISIÓN VISUAL DE LAS SERIES DE ESCURRIMIENTO

Como menciona Campos Aranda en su libro: *Estimación y Aprovechamiento del Escurrimiento* (2007), la hidrología define a una serie cronológica o serie de tiempo como una sucesión de observaciones que miden la variación en el tiempo de algún aspecto de un fenómeno, tal como es el gasto o volumen de un cauce, el nivel de agua en un lago o embalse, etc. En hidrología solo se aceptan dos componentes: la determinística y la aleatoriedad o estocástica.

La componente determinística es aquella que puede ser evaluada para propósitos de predicción y consiste principalmente de comportamientos del tipo de tendencia y forma cíclica o periódica, además de cambios súbitos, llamados saltos que son inhomogeneidades de un tipo particular. En cambio, la componente estocástica está constituida por oscilaciones irregulares y efectos aleatorios que no pueden ser explicados físicamente en forma estricta y requieren de los conceptos probabilísticos para su descripción. En la Figura 4 se esquematizan series cronológicas con varios tipos de componentes determinísticas.

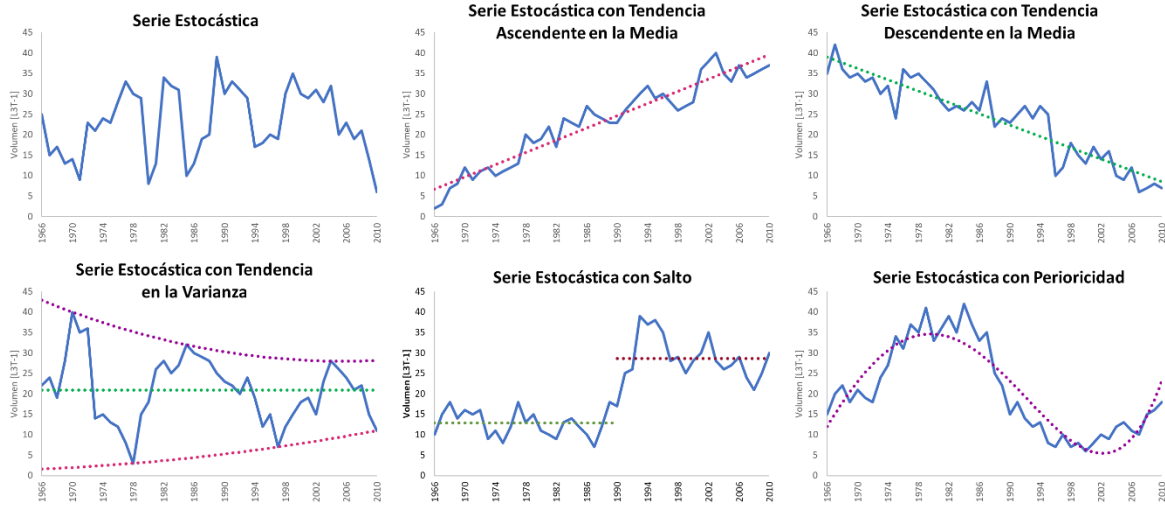


Figura 4. Series cronológicas con varios tipos de componentes determinísticas. Adaptado de Campos (2007).

En general, las tendencias en las series cronológicas de escurrimientos anuales, pueden resultar de cambios en el ambiente hidrológico que produce la serie o de alteraciones que provienen de variaciones graduales naturales o que son inducidas por el hombre. Ya sea que la tendencia en la serie de tiempo se deba a cambios en la cuenca o a errores en la medición, el hecho es que origina que la serie sea catalogada como inconsistente. En algunas ocasiones, la tendencia en la media puede ser bastante obvia, sin embargo, en la mayoría de los casos se tiene cierta duda si los efectos del error sistemático sospechados son significativos o no; razón por la cual, resulta imperativo realizar pruebas numéricas como es la persistencia.

Aparte de la tendencia, pueden ocurrir cambios súbitos denominados saltos, los cuales pueden ser el resultado de eventos naturales catastróficos como terremotos o incendios forestales, o consecuencias de obras hidráulicas construidas en la cuenca. En general, la presencia de un salto en la serie indica que de alguna manera se ha perdido la homogeneidad del registro, es decir que ahora las observaciones que lo integran provienen de dos poblaciones, tal vez diferentes estadísticamente y por ello, habrá que probar si se perdió o no la homogeneidad.

3.3.3 COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO

Chow, et al. (1994) definió el coeficiente de escurrimiento como la relación entre el escurrimiento directo y la intensidad promedio de la precipitación de una tormenta. Sin embargo, a causa de la variabilidad de la intensidad de precipitación, este valor es difícil de determinar utilizando la información observada, por lo que también puede definirse como la relación entre el volumen de escurrimiento directo y el volumen de precipitación en la cuenca, en un periodo de tiempo dado, tal que se tiene la Ecuación [13]:

$$Ce = \frac{V_E}{V_P} \quad [13]$$

Donde V_E es el volumen de la aportación anual y V_P es el volumen anual precipitado en la zona.

El coeficiente de escurrimiento es una variable poco precisa, debido a que implica una relación fija entre el escurrimiento y la precipitación de la cuenca, lo cual no se cumple en realidad. La proporción de lluvia total que fluirá como escurrimiento superficial depende de la permeabilidad del suelo y de la pendiente de la zona. Además, para este coeficiente, existen otros factores que influye en su cálculo y no son considerados, como la proximidad del nivel freático, el grado de compactación del suelo, la porosidad del subsuelo, la vegetación, la pendiente del suelo y el almacenamiento por depresión.

Otra forma de comprenderlo, es obteniendo el parámetro K con la relación existente entre la lámina escurrida en mm (E) y la precipitación en mm (P), como se muestra en la Ecuación [14].

$$K = \frac{E}{P} \quad [14]$$

Tanto para Ce y K , debe cumplirse que: $K < 1$ y $Ce < 1$; esto debido a que el escurrimiento de una cuenca debe de ser menor que las precipitaciones presentes.

Según la NOM-011-CONAGUA-2015 para obtener el coeficiente de escurrimiento, se debe conocer el valor de K, que se obtiene en función del tipo y uso del suelo, por lo que, se debe clasificar el área de la cuenca en tres diferentes tipos de suelo, como son A (permeables), B (medianamente permeables) y C (suelos casi impermeables), los cuales se especifican en la Tabla 6; generalmente se tiene que en una misma cuenca se encuentran diferentes tipos y usos de suelo, por lo que el valor de K se calcula como la resultan de subdividir la cuenca en zonas homogéneas y obtener el promedio ponderado de todas ellas.

Tabla 6. Valores propuestos de K considerando los diferentes tipos y usos de suelo. Adaptado de CONAGUA (2015).

Usos de Suelo	Tipo de Suelo		
	A	B	C
Barbecho, áreas incultas y desnudas	0.26	0.28	0.30
Cultivos:			
En hilera	0.24	0.27	0.30
Legumbres o rotación de pradera	0.24	0.27	0.30
Granos pequeños	0.24	0.27	0.30
Pastizal			
% del suelo cubierto o pastoreo			
Más del 75% -Poco-	0.14	0.20	0.28
Del 50 al 75% -Regular-	0.20	0.24	0.30
Menos del 50% -Excesivo-	0.24	0.28	0.30
Bosque:			
Cubierto más del 75%	0.07	0.16	0.24
Cubierto del 50 al 75%	0.12	0.22	0.26
Cubierto del 25 al 50%	0.17	0.26	0.28
Cubierto menos del 25%	0.22	0.28	0.30
Zonas urbanas	0.26	0.29	0.32
Caminos	0.27	0.30	0.33
Pradera permanente	0.18	0.24	0.30

Una vez que se obtiene el coeficiente K, y, con base al valor del mismo, se obtiene el coeficiente de escurrimiento anual C_e , el cual se encuentra en función de la precipitación

media anual (P) en la zona, mediante las Ecuaciones[15] para cuando $K \leq 0.15$ y la Ecuación [16] cuando se cumpla que $K > 0.15$.

$$C_e = \frac{K(P - 250)}{2000} \quad [15]$$

$$C_e = \frac{K(P - 250)}{2000} + \frac{K - 0.15}{1.5} \quad [16]$$

Se tiene entonces que el valor máximo para K es de 0.33; además, para obtener valores válidos para K y C_e , es necesario considerar que la precipitación debe oscilar en el rango de 350 mm y 2150 mm (CONAGUA, 2015).

3.3.4 MODOS EN LAS APORTACIONES

Sánchez (2017) menciona que en los datos de aforo se pueden presentar distintos modos, como: caudales diarios, mensuales o anuales, aportación, lámina de agua equivalente y caudal específico. Estos dos últimos permiten relacionar el escurrimiento y la precipitación con el área de estudio y es por ello, que se utiliza como un parámetro de comprensión de las estaciones hidrométricas en revisión.

Caudales diarios: que pueden corresponder a la lectura diaria de una escala limnimétrica o corresponder a la ordenada media del gráfico diario de un limnógrafo.

Caudales mensuales o mensuales medios: para un año concreto, es la media de todos los días de ese mes. Para una serie de años, se refiere a la media de todos los valores de octubre, todos los valores de noviembre, etc para toda la serie estudiada.

Para un año concreto, el caudal anual o anual medio (módulo) es la media de todos los días de ese año, para la serie de años se refiere a la media de todos los años de la serie considerada.

La aportación normalmente es referida a un año (aportación anual), aunque a veces la referimos a un mes (aportación mensual). Es el volumen de agua aportado por el cauce en el punto considerado durante un año o un mes (Hm^3).

La lámina de agua equivalente es el espesor de agua que se obtendría repartiendo sobre toda la cuenca el volumen de la aportación anual (en mm). Se obtiene dividiendo la aportación anual por la superficie de la cuenca. Es útil especialmente cuando queremos comparar la esorrentía con las precipitaciones. Si la cuenca es hidrológicamente cerrada y los datos proceden de más de 20 años, este valor debe ser similar a las precipitaciones no evapotranspiradas (P-ETR).

El caudal específico es el caudal por unidad de superficie. Representa el gasto aportado por cada km² de cuenca. Se calcula dividiendo el caudal (normalmente caudal medio anual por la superficie de la cuenca o subcuenca considerada (litros/seg·km²); este parámetro también se conoce como módulo relativo y como se observa en la Ecuación [17] se obtiene con el módulo o caudal (M) en litros por segundo y con el área de la cuenca (S) en km²:

$$M_r = \frac{M}{S} \quad [17]$$

El módulo relativo permite comparar el caudal de diversas cuencas, siendo sus superficies distintas. Las áreas de montaña proporcionan más de 20 litros/seg·km², mientras que, en las partes bajas de la misma cuenca se generan solamente 4 o 5 litros/seg·km². Así mismo, sabemos que:

- Si el módulo relativo es menor a 5 litros/seg·km², se tiene una escasez de agua.
- Si el módulo relativo se encuentra en el rango de 5 a 15 litros/seg·km², se dice que se encuentra en valores medios y,
- Si el módulo relativo es mayor a 15 litros/seg·km², los valores son elevados y es posible que se esté considerando mal un parámetro.

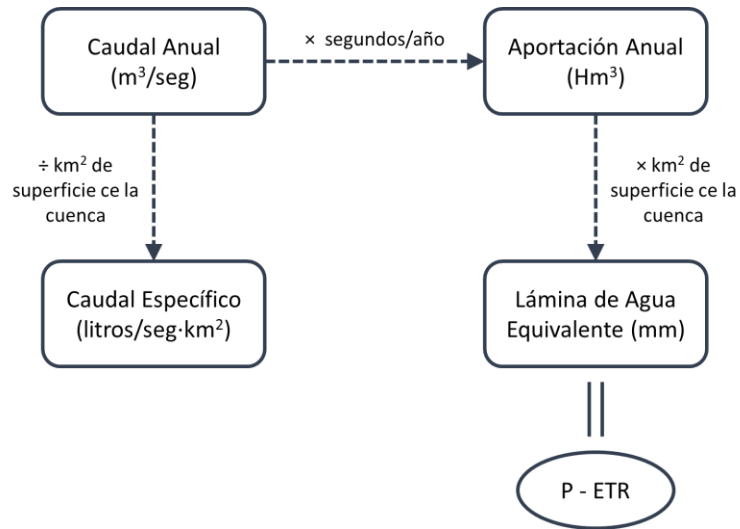


Figura 5. Relación sobre los parámetros obtenidos con los aforos en las cuencas.

3.3.5 CAUDAL MÍNIMO Y CAUDAL ECOLÓGICO

Se calcula también el caudal mínimo y el caudal ecológico, de tal forma que se verifique que el volumen que se tiene en la estación de aforo es mayor a estos dos.

El caudal mínimo de una cuenca se le utiliza generalmente como referencia para determinar el caudal ecológico, por lo que se recomienda considerarlo igual a lo representado en la Ecuación [18], donde se tiene que P es la precipitación y A el área de la cuenca en estudio.

$$Q_{min} = \frac{PA}{10^6} \quad [18]$$

Como mencionan en su artículo Sandoval y Aguilera (2014), si se asume que, en cada cuenca, la vida animal y vegetal tiene que estar adaptada a las condiciones naturales del sitio, y que esa adaptación se relaciona directamente con el volumen de agua disponible, incluyendo las variaciones extremas, se observa que la anterior ecuación propuesta corresponde a las condiciones mínimas de equilibrio. De acuerdo a lo enunciado, resultaría factible tomar este valor como el caudal ecológico, sin dejar de lado las variaciones resultantes de condiciones específicas, que se les determine mediante estudios especializados, o características

particulares del uso del agua, determinadas a partir de factores paisajísticos, de recreación u otros.

El caudal mínimo propuesto corresponde aproximadamente al 97% de probabilidad de ocurrencia de los caudales en la cuenca; en cualquier caso, el caudal ecológico no supera un valor igual a 2.5 veces este caudal mínimo, por lo que se tiene en la Ecuación [19] que:

$$Q_{eco} = 2.5Q_{min} \quad [19]$$

3.4 MODELOS PRECIPITACIÓN - ESCORRENTÍA (MPE)

Se puede afirmar que los modelos hidrológicos son representaciones simplificadas, a partir de los cuales es posible estudiar la relación causa-efecto de la precipitación sobre una cuenca (Navarro, 2017). Lo anterior es útil en la comprensión de procesos físicos, ecológicos e hidrológicos que tienen lugar dentro de una zona en específico, generalmente representada por una cuenca, en cuyo punto de salida se encuentre una estación hidrométrica (con registros de caudales aforados para un periodo de años suficientemente largo).

Los modelos matemáticos de escorrentía pueden aplicarse a los problemas de los recursos hídricos. Algunas de las aplicaciones más comunes son simulación de descarga natural, previsión operativa y predicción de los efectos de futuros cambios físicos en una cuenca de captación.

Para simular el proceso precipitación-aportación para un determinado periodo de tiempo, para lo cual se requiere contar con algunos componentes del ciclo hidrológico (tales como precipitación, temperatura y evapotranspiración). Estos modelos hidrológicos arrojan resultados de escorrentía de una cuenca, que pueden representarse tanto mensuales como anuales que son comparados con los volúmenes circulantes registrados en una estación hidrométrica, considerando el mismo periodo de tiempo para la comparación.

En este caso, se utilizan dos softwares: EvalHid (Evaluación de recursos Hídricos) desarrollado por la Universidad Politécnica de Valencia y WEAP (Water Evaluation and Planning System) el cual es una iniciativa del Stockholm Environment Institute.

Estos softwares a su vez, contienen diferentes MPE para el cálculo de la aportación a partir del proceso lluvia escurrimiento. EvalHid cuenta con el Modelo de Témez, HBV, Sacramento, GR2M, GR4J y AWMB; por su parte, WEAP cuenta con Soil Moisture Method, Simplified Coefficient Method y MABIA.

3.4.1 TÉMEZ

El modelo de Témez pertenece al grupo de los denominados modelos agregados de simulación de cuencas. El modelo realiza balances de humedad entre los distintos procesos de transporte de agua que tienen lugar en un sistema hidrológico durante las diferentes fases del ciclo hidrológico. Todo el proceso está gobernado por el principio de continuidad y de balance de masa y materia, y regulado por leyes específicas de reparto y transferencia entre los distintos términos del balance, como se muestra en la Figura 6 (Paredes, et al., 2014).

El modelo considera el terreno dividido en 2 zonas:

- Una zona superior, que no se encuentra saturada donde coexisten agua y aire, y su contenido de agua es asimilable a la humedad del suelo.
- Una inferior o acuífero, la cual está saturada y funciona como un almacenamiento subterráneo que desagua a la red de drenaje superficial.

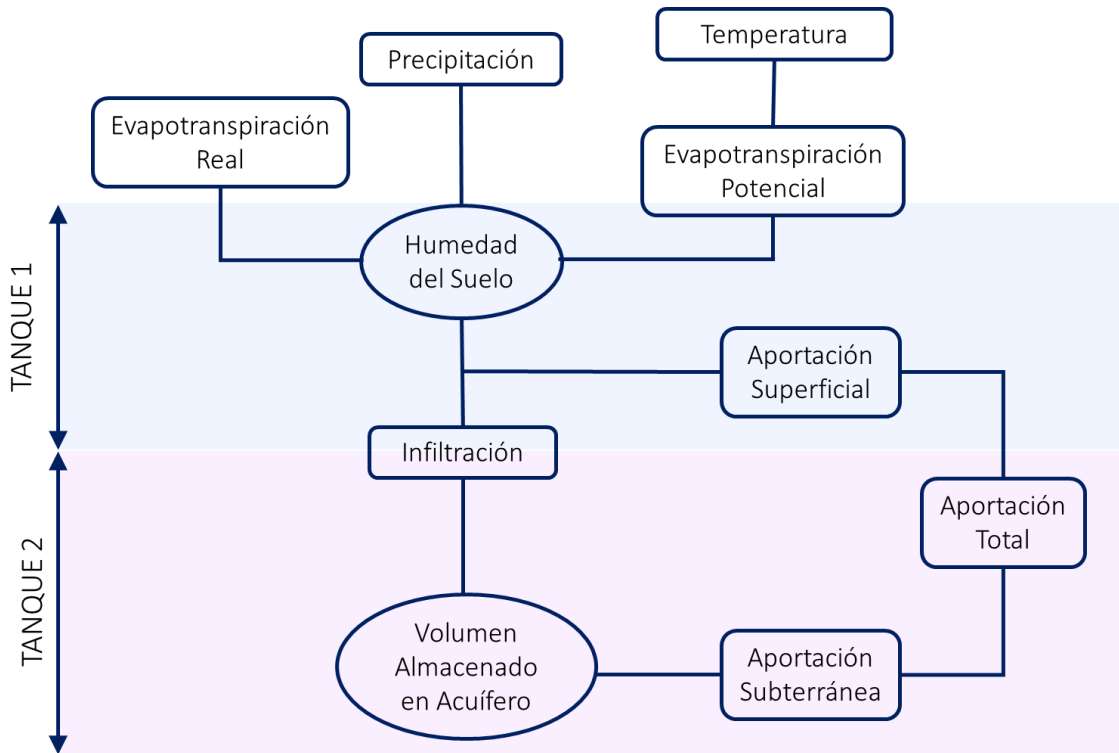


Figura 6. Representación del modelo Témez en EvalHid. Adaptado de Paredes, et al. (2014).

El reparto de flujos salientes e intermedios y de los almacenamientos intermedios, dependen del flujo entrante de precipitación. Se tiene como flujo de entrada la precipitación (P) [L]; los flujos de salida son: evapotranspiración real (E) [L], aportación superficial (A_{sup}) [L] y aportación Subterráneo (A_{sub}) [L]. La infiltración es el único tipo de flujo intermedio que tiene el modelo, que considera la cantidad de agua que pasa entre la parte superior del suelo a la zona inferior del acuífero, por lo que la infiltración se identifica con la recarga al acuífero; por último, tenemos que el almacenamiento intermedio corresponde a la humedad del suelo y al volumen almacenado en el acuífero.

Se considera que una fracción de agua que se precipita sobre el terreno (P_t) es almacenada en la zona superior del suelo (H_t) y que el resto, que se conoce como excedente (T_t); este se distribuye entre la aportación se origen superficial (A_{sup}) y la infiltración sobre el acuífero o recarga (R_t).

Se tiene que el excedente (T_t) es 0, si $P_o \geq P_t$, ya que toda el agua que se precipita se infiltra o se satura y, por tal motivo no queda volumen que se pueda escurrir, el caso contrario se presenta en la Ecuación[20].

$$T_t = \frac{(P_t - P_o)^2}{P_t - \delta_t - 2P_o} \quad [20]$$

Donde:

$$\delta = H_{max} - H_{t-1} + ETP_t \quad [21]$$

$$P_o = C(H_{max} - H_{i-1}) \quad [22]$$

Siendo: H_{max} la capacidad máxima de almacenamiento del suelo [L], que depende de las características del suelo y la vegetación donde tiene lugar la evapotranspiración. El valor de H_{max} aumenta conforme lo hacen aquellos factores que facilitan la retención de agua en el suelo y el espesor del mismo que puede ser drenado por evapotranspiración. H_{t-1} el almacenamiento de agua en el suelo [L] en el instante t-1. ETP_t la evapotranspiración potencial máxima que se producirá en condiciones óptimas de humedad [L] en el intervalo de tiempo t; C es el coeficiente de inicio de excedente. Un factor adimensional, que define el inicio de la escorrentía antes de que se alcance el máximo de humedad en el suelo H_{max} .

Una vez estimado el excedente (T_t), la humedad en el suelo al final de cada mes se obtiene mediante la Ecuación[23]; la cual representa el cierre del balance entre el agua que queda en el suelo y la ETP. Si el resultado es negativo la humedad del suelo al final del periodo es nula, y la evapotranspiración potencial no se habrá desarrollado en su totalidad.

$$H_t = \max \left\{ H_{t-1} + P_t - T_t - ETP_t, 0 \right\} \quad [23]$$

La Ecuación [24] representa la evapotranspiración real que se produce (ET_t); esta se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$ET_t = \min \left\{ \begin{array}{l} H_{t-1} + P_i - T_i \\ ETP_t \end{array} \right\} \quad [24]$$

Siempre que exista suficiente agua en el suelo, la evapotranspiración se desarrolla hasta alcanzar la evapotranspiración potencial. En caso de haberla, la humedad en el suelo al final del mes será nula.

La infiltración del acuífero es función del excedente y de la infiltración máxima (I_{max}), que expresa la máxima cantidad de agua que puede infiltrarse en el terreno, a través de la Ecuación [25], la cual es una expresión empírica.

$$I_t = I_{max} \cdot \frac{T_t}{T_c + I_{max}} \quad [25]$$

A medida que el excedente aumenta, también lo hace la infiltración y ésta tiende a la infiltración máxima (I_{max}); por otra parte, la infiltración máxima no depende exclusivamente de las propiedades del terreno, sino de la intensidad y concentración de las precipitaciones.

La aportación subterránea producida ($A_{sub,t}$), está formada por el drenaje del agua almacenada en el acuífero (V_t) por encima del umbral de salida de la red fluvial. Para simular el comportamiento del acuífero se plantea el modelo unicelular, el cual está basado en la función exponencial que representa la curva de agotamiento de un manantial. La variable de estado es el volumen almacenado en el acuífero (V_t). El caudal cedido a la red superficial (Q_t) se obtiene mediante la Ecuación [26].

$$Q_t = \alpha \cdot V_t \quad [26]$$

Donde α es una constante con dimensiones de $[T^{-1}]$.

Si se aplica al acuífero una ecuación de balance de masa de tipo representado por la Ecuación diferencial ordinaria [27].

$$I_t - Q_t = \frac{dV_t}{dt} \quad [27]$$

Donde: I_t son las entradas al acuífero en el tiempo t . Q_t son las salidas del acuífero en el tiempo t . V_t es el volumen almacenado en el acuífero en el tiempo t . De esta forma y sustituyendo la primera ecuación en la segunda y considerando R_t como el caudal de recarga neta al acuífero en el tiempo se tiene la Ecuación [28].

$$R_t - \alpha \cdot V_t = \frac{dV_t}{dt} \quad [28]$$

La resolución de esta ecuación diferencial, para la condición inicial de volumen inicial de acuífero, V_0 y para un caudal de recarga constante R , a la Ecuación [29].

$$V_t = V_0 e^{-\alpha \cdot t} + \frac{R}{\alpha} (1 - e^{-\alpha \cdot t}) \quad [29]$$

Expresando el volumen como una función del caudal y haciendo $R=0$, se obtiene la Ecuación [30], la cual representa la curva de agotamiento del acuífero:

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-\alpha \cdot t} \quad [30]$$

Este modelo subterráneo presenta la ventaja de la simplicidad de cálculo, pero la desventaja de que supone una simplificación excesiva del sistema, por lo que no es válido para modelar acuíferos cársticos, donde se han identificado más de una rama de descarga en el agotamiento del acuífero.

El modelo de Témez, contempla el ajuste de cuatro parámetros: H_{\max} , C , I_{\max} y α ; los parámetros H_{\max} y C regulan el almacenamiento de agua en el suelo, I_{\max} separa la escorrentía superficial de la subterránea y el parámetro α regula el drenaje subterráneo.

También deben definirse las condiciones iniciales de simulación, como es humedad inicial de suelo (H_0) y del almacenamiento inicial en el acuífero (que puede aproximarse a $V_0=Q_0/\alpha$). El efecto de los valores iniciales se reduce a medida que transcurre el tiempo, por lo que en realidad estos valores son poco significativos (Paredes, et al., 2014).

3.4.2 HBV

El modelo fue creado y establecido por el Instituto Meteorológico e Hidrológico de Suecia denominado HBV (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning) (Bergström, 1976), el cual posee una larga historia y que inicialmente fue desarrollado para los países nórdicos. Debido a su popularidad y buenos resultados se ha ido expandiendo por el mundo hasta ser aplicado en más de 30 países, ha sido elegido entre otros tantos modelos existentes debido a que no tiene gran cantidad de parámetros siendo así un modelo robusto y versátil haciéndolo cumplir con el principio de parsimonia (Tellez, et al., 2016).

El modelo consta de cuatro módulos o rutinas principales: un módulo de fusión y acumulación de nieve, un módulo de humedad del suelo y precipitación efectiva, un módulo de evapotranspiración y por último un módulo de estimación de escorrentía. El modelo puede ejecutarse a escala temporal diaria o mensual y los datos de entrada necesarios incluyen: series de precipitación y temperatura observadas en cada paso de tiempo y estimaciones a largo plazo de la temperatura y evapotranspiración media mensual (Paredes, et al., 2014).

En el diagrama presentado en la Figura 7, se ilustran los procesos generales de la versión utilizada del HBV. Esta incluye un módulo que procesa los datos de precipitación como lluvia o como nieve basándose en la temperatura de cada paso de tiempo. La lluvia y la nieve fundida (si existe) son procesadas en el módulo de humedad del suelo donde se evalúa la precipitación efectiva que contribuye a la escorrentía superficial. La parte restante de la precipitación contribuye a la humedad almacenada en el suelo, que a su vez puede evaporarse siempre y cuando el contenido de agua existente en el subsuelo sea lo suficientemente grande. La salida principal del modelo es la escorrentía total en el punto de desagüe de la cuenca, que consta de tres componentes: escorrentía superficial, interflujo y flujo base (contribución del flujo subterráneo).

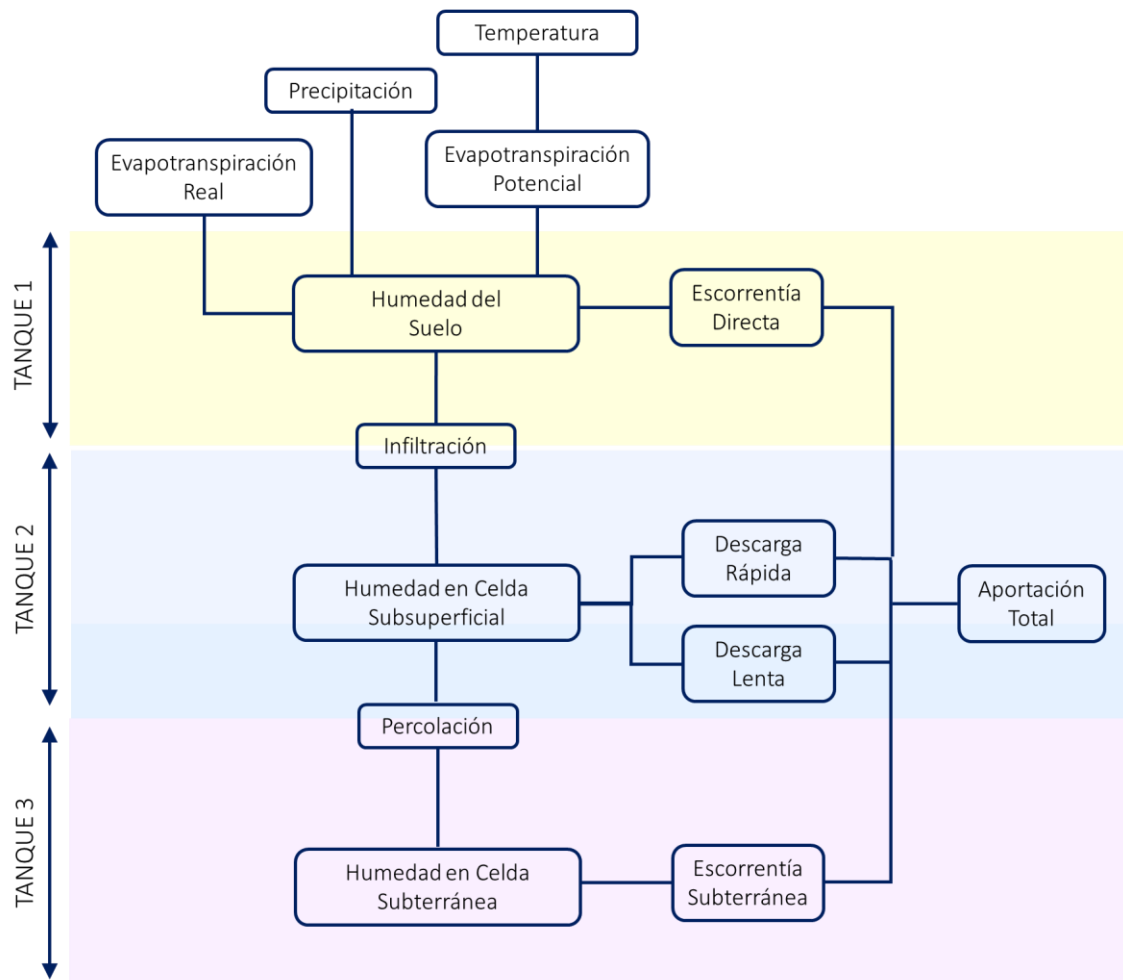


Figura 7. Representación del Modelo HBV del Software EvalHid.

La lluvia precipitada en una cuenca se divide en dos componentes: La primera constituye el almacenamiento como humedad en el suelo del agua capilar disponible para evapotranspiración (SM); la segunda contribuye a la escoorrentía subterránea. Esta segunda (infiltración) es estimada basándose en el contenido de humedad del suelo en el momento en que se produce la precipitación.

Para este proceso se definen dos parámetros: la capacidad de campo (FC) que limita el contenido máximo de humedad en el suelo en la zona superficial; el segundo parámetro (β) es adimensional que modifica el porcentaje de filtración para el mismo grado de humedad relativa en el suelo.

La Ecuación [31] calcula la precipitación efectiva en función del contenido existente de humedad del suelo.

$$Inf_t = \left(\frac{SM_{t-1}}{FC} \right)^\beta P_t \quad [31]$$

Donde se tiene que Inf_t es la filtración efectiva [L], SM la humedad del suelo [L], FC la máxima capacidad de almacenamiento del suelo o capacidad de campo [L], P es la precipitación diaria [L] y β es el coeficiente de forma. El parámetro β controla la cantidad de agua que contribuye a la escorrentía. Siendo el coeficiente de filtración el cociente entre la filtración calculada y la precipitación (Inf/P). Para una determinada humedad del suelo, cuanto mayor es β , menor es el coeficiente de filtración.

La evapotranspiración se calcula con base a la humedad en el suelo y la evapotranspiración potencial. La evapotranspiración real será igual a la potencial o un valor reducido calculado mediante el parámetro de punto de marchitez del suelo (PWP); si $SM_t < PWP$, se utiliza la Ecuación [32]; caso contrario, si $SM_t > PWP$, se aplica la Ecuación [33].

$$ETr_t = ETP_t \left(\frac{SM_t}{PWP} \right) \quad [32]$$

$$ETr_t = ETP_t \quad [33]$$

El punto de marchitez es un límite de humedad del suelo por debajo del cual la evapotranspiración real es menor que la potencial con una reducción en el desarrollo de las plantas. PWP ha de tener un valor inferior a FC para que tenga un sentido físico.

La humedad en el suelo resultante (SM) después de incorporar la precipitación y descontar la filtración y la evapotranspiración se calcula a partir de la Ecuación [34].

$$SM_t = SM_{t-1} + P_t - ETr_t - Inf_t \quad [34]$$

Si la precipitación P_t fuera muy elevada, este balance podría dar como resultado un valor de SM superior a FC como se muestra en la Ecuación [35]. En este caso el exceso se asigna como escorrentía directa (Q_s).

$$\text{Si } SM_t > FC \begin{cases} QS_t = SM_t - FC \\ SM_t = FC \end{cases} \quad [35]$$

El flujo subsuperficial se modelar mediante dos funciones de descarga. Una descarga rápida (Q0) que se activa cuando el almacenamiento en el suelo (S1) supera un mínimo (Lm) y se define por un parámetro K_0 , donde se tiene que si $S1_{t-1} > Lm$ se utiliza la Ecuación [36] y si $S1_{t-1} < Lm$, se tiene que Q0 es igual a cero.

$$Q0 = K_0(S1_{t-1} - Lm) \quad [36]$$

También se considera una descarga lenta que se regula por el parámetro K_1 y que se determina en la Ecuación [37].

$$Q1_t = K_1 * S1_{t-1} \quad [37]$$

Por último, esta celda tiene una descarga por percolación (Qperc) que alimenta la celda de almacenamiento profundo, y se regula con el parámetro K_{perc} como se muestra en la Ecuación [38].

$$Qperc_t = K_{perc} * S1_{t-1} \quad [38]$$

Tras determinar los flujos anteriores se calcula el balance de humedad en la celda subsuperficial por medio de la Ecuación [39]:

$$S1_t = S1_{t-1} + Inf_t - Q0_t - Q1_t - Qperc_t \quad [39]$$

Para la simulación de la escorrentía subterránea (Ecuación [40]) se utiliza un modelo de celda como en el caso anterior, aunque con un solo parámetro de descarga (K_2) calculándose el drenaje subterráneo (Q2).

$$Q2_t = K_2 * S2_{t-1} \quad [40]$$

Como se muestra en la Ecuación [41], la escorrentía o aportación total se calcula entonces, como la suma de las escorrentías generadas en cada uno de los módulos anteriores. Estos aportes han sido todos calculados en unidades de [mm] por lo que el caudal o volumen final de aportación se obtiene multiplicando por la superficie de la cuenca (A).

$$Q_t = (QS_t + QO_t + Q1_t + Q2_t) * A \quad [41]$$

Al momento de realizar las modelaciones, es necesario definir las condiciones iniciales que son la humedad inicial del suelo (SM_0) y los almacenamientos iniciales de ambos tanques ($S1_0$ y $S2_0$). Además, estos parámetros deberán cumplir algunas condiciones para que el modelo trabaje de forma adecuada, como:

- El parámetro FC debería tomar valores comparables a los definidos para H_{max} en modelo de tipo Temez.
- PWP no debería ser mayor que FC.
- Los coeficientes K_0 , K_1 , K_2 y K_{perc} no pueden ser mayores que 1.
- Debe cumplirse que $K_0 > K_1 > K_2$, debido a que la respuesta disminuye conforme se aleja de la zona superficial.
- Si la suma de $K_0 + K_1 + K_{perc}$ es mayor que 1 existe el riesgo de generar un error de balance.

De la estructura del modelo se extrae la influencia que tienen los parámetros en la generación de escorrentía:

- Los parámetros de humedad en el suelo (FC, PWP y β) determinan la evapotranspiración real y por tanto la escorrentía total generada.
- El parámetro β es el factor determinante de la infiltración. Un valor más bajo aumenta la filtración al nivel subsuperficial.
- El resto de parámetros regulan la descarga subterránea, y si son definidos correctamente, K_0 y L_m determinan la descarga rápida y el resto (K_1 , K_{perc} y K_2) regulan la descarga a más largo plazo y la curva de recesión del río a largo plazo.

3.4.3 SMM

El método de humedad del suelo o SMM por sus siglas en inglés (Soil Moisture Method) es el único modelo que se utiliza con el software WEAP, la cual es una herramienta de modelación para la planificación y distribución de agua que puede ser aplicada a diferentes escalas, desde pequeñas zonas de captación hasta extensas cuencas (Stockholm Environment Institute, 2009).

En general, este modelo hidrológico es espacialmente continuo con un área de estudio configurado como un set de subcuencas contiguas que cubren toda la extensión de la cuenca de análisis. Un set homogéneo de datos climáticos (precipitación, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento) es utilizado en cada una de estas subcuencas, que se encuentran divididas en diferentes tipos de cobertura/uso de suelo (Stockholm Environment Institute, 2009).

Este método se considera como el más complejo presente en WEAP, ya que representa la cuenca como dos tanques de suelo, así como el potencial de acumulación de nieve. En la capa superior del suelo, simula la evapotranspiración considerando las precipitaciones y el riego en tierras agrícolas y no agrícolas, la escorrentía y el flujo subsuperficial y los cambios en la humedad del suelo.

En la Tabla 7, se presenta la lista de términos presentes en las Ecuaciones [42] a [45] que definen el Soil Moisture Method.

Tabla 7. Términos presentes en las ecuaciones del SMM.

R	Recarga	f	Coeficiente de Partición
R_d	Almacenamiento Efectivo	k_s	Conductividad Saturada
P_e	Precipitación que Escurre	P	Precipitación
PET	Evapotranspiración Potencial	A	Área
K_c	Coeficiente de Cultivo	S_{max}	Percolación Profunda
z_1	Almacenamiento Relativo en el Tanque 1	z_2	Almacenamiento Relativo en el Tanque 2
RRF	Factor de Resistencia al Escurrimiento		

Este método permite la caracterización del uso de la tierra y/o el impacto del tipo de suelo en estos procesos. El encauzamiento del flujo de base al río y los cambios de humedad del suelo se simulan en la capa inferior del suelo. En consecuencia, el método de humedad del suelo requiere una parametrización más extensa del suelo y el clima para simular estos procesos.

Una unidad de cuenca hidrográfica se puede dividir en N áreas fraccionales que representan diferentes usos de la tierra / tipos de suelo, y se calcula un balance de agua para cada área fraccional, j de N . El clima se supone uniforme sobre cada subcuenca, y el balance hídrico como almacenamiento efectivo en la zona raticular se calcula como se muestra en la Ecuación [42].

$$Rd_j \frac{dz_{1,j}}{dt} = P_e(t) - PET(t)k_{c,j}(t) \left(\frac{5z_{1,j} - 2z_{1,j}^2}{3} \right) - P_e(t)z_{1,j}^{RRF_j} - f_j k_{s,j} z_{1,j}^2 - (1 - f_j) k_{s,j} z_{1,j}^2 \quad [42]$$

Al no tener módulo de nieve, se tiene que la escorrentía total de superficie e interflujo, RT , de cada subcuenca en el tiempo t está dada por la Ecuación [43]; la percolación y la recarga también se muestran en las Ecuaciones [44] y [45].

$$RT(t) = \sum_{j=1}^N A_j \left(P_e(t)z_{1,j}^{RRF_j} + f_j k_{s,j} z_{1,j}^2 \right) \quad [43]$$

$$S_{max} \frac{dz_2}{dt} = \left(\sum_{j=1}^N (1 - f_j) k_{s,j} z_{1,j}^2 \right) - k_{s2} z_2^2 \quad [44]$$

$$R = \sum_{j=1}^N A_j (1 - f_j) k_{s,j} z_{1,j}^2 \quad [45]$$

De todos los parámetros que intervienen en la idealización del modelo, existen 9 que influyen de forma puntual en cada uno de los procesos del ciclo del agua:

K_c	Coeficiente de cultivo
S_w	Capacidad de almacenamiento de agua en la zona de raíces
D_w	Capacidad de almacenamiento de agua en la zona profunda
RRF	Factor de resistencia a la escorrentía
K_s	Conductividad de zona de raíces
K_d	Conductividad de zona profunda
f	Dirección preferencial de flujo
z_1	Nivel inicial de humedad en la zona de raíces
z_2	Nivel inicial de humedad en la zona profunda

Conceptualmente, lo que hace WEAP es convertir las entradas de precipitación en las salidas hacia flujos que alimentan los ríos.

Hay tres salidas del primer taque:

1. Escorrentía Superficial: que está gobernada por el parámetro Factor de Resistencia a la escorrentía (RRF).
2. Escorrentía Directa: que solo ocurre si el tanque 1 está completamente saturado, es decir que no se dan procesos de infiltración hacia la primera capa del suelo, eso debido a la capacidad de agua en la zona de raíces, que llamaremos S_w .
3. Flujos Intermedios: debido a que en el tanque 1 hay una capacidad de agua y tiene una conductividad en zona de raíces que llamaremos K_s se dan los flujos intermedios; adicionalmente, este flujo intermedio está gobernados por la dirección del flujo (f), que es el factor que me distribuye el agua entre flujo intermedio y percolación.

El tanque 2 también tiene una capacidad de almacenamiento en la zona profunda que llamaremos D_w ; y a su vez tiene una conductividad en la zona profunda que gobierna el flujo base K_d .

Por otro lado, como todo modelo, es necesario fijar las condiciones de frontera o condiciones iniciales; en ese sentido debemos fijar el nivel de humedad inicial en la zona de raíces y el nivel de humedad inicial en la zona profunda (z_1 y z_2 respectivamente).

El modelo matemático del método de la humedad del suelo, es un balance de agua entre entradas y salidas; en donde la diferencia entre entradas y salidas en cada uno de los 2 tanques representa los cambios en la humedad del tanque 1 y el tanque 2 en la zona de raíces y en la zona profunda, respectivamente.

El coeficiente de cultivo (K_c) permite transformar de ET de Referencia a ET del cultivo bajo condiciones estándar. El cálculo de la evapotranspiración potencial, PET, se realiza utilizando la ecuación de Penman-Monteith modificada para una cosecha de hierba estandarizada, de 0.12 m de altura y con una resistencia superficial de 69 s/m.

El modelo matemático del método de la humedad del suelo, es un balance de agua entre entradas y salidas; en donde la diferencia entre entradas y salidas en cada uno de los dos tanques representa los cambios en la humedad en la zona de raíces y en la zona profunda respectivamente. En la Figura 8, se muestra el esquema del funcionamiento del Método de Humedad del Suelo:

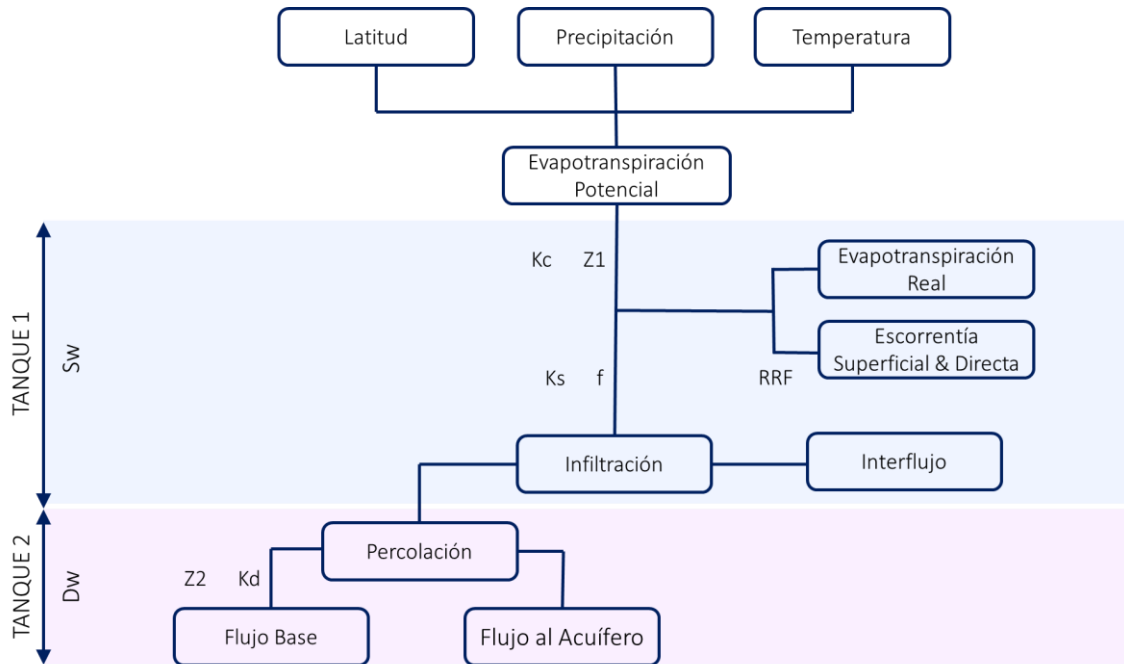


Figura 8. Representación del SMM de WEAP.

3.5 CALIBRACIÓN DEL MODELO

Como menciona Casas (2013), los modelos permiten partir de un grupo de datos y al pasar por una formulación matemática que explique el proceso considerado, obtener una o varias variables de respuesta. La mayoría de los modelos hidrológicos están basados en representaciones conceptuales de procesos físicos que gobiernan los flujos de agua superficial y subterráneo.

Los resultados del modelo serán tan fiables como lo sean las suposiciones tomadas, los datos de entrada disponibles y los parámetros estimados. Se presenta el problema de seleccionar el modelo que simule de una forma adecuada el caso de estudio, además de contar con parámetros coherentes en las modelaciones que represente el comportamiento real de la cuenca. Al proceso de obtención de estos parámetros se le denomina calibración, y en el caso de los MPE se realiza mediante la aplicación de técnicas de optimización que busquen un conjunto de parámetros que hagan que los resultados del modelo se ajusten a los valores observados lo mejor posible.

La calibración puede realizarse de forma manual, que consiste en un proceso iterativo de prueba y error y cada vez que los parámetros del modelo son ajustados, se compara por medio de indicadores de bondad de ajuste o visualmente los resultados del modelo con los datos de las aportaciones históricas.

Por otra parte, la calibración automática o autocalibración consiste en programar un algoritmo que agilice el proceso de calibración, como es el caso del algoritmo evolutivo de calibración SCE-UA (Shuffled Complex Evolution method developed at The University of Arizona); el cual fue desarrollado por Duan, et al. (1992) y se mostró como un método capaz de identificar de forma efectiva y eficiente los valores óptimos de los parámetros que requiere un MPE.

El funcionamiento básico del algoritmo está inspirado en la selección natural y la genética y es una combinación de procedimientos deterministas y aleatorios. Se parte de diferentes puntos de búsqueda (individuos) que se organizan por equipos (complex). De esta manera,

la búsqueda de la solución global óptima se plantea como un proceso evolutivo (evolution) basado en la reproducción (cruce, mutación, recombinación) existiendo, además, mezcla de equipos (shuffled) (Casas y Paredes,2013).

3.5.1 FUNCIÓN OBJETIVO E INDICADORES DE BONDAD DE AJUSTE

El propósito de la calibración automática de modelos es, por tanto, encontrar aquellos valores de los parámetros del modelo que optimicen (maximizando o minimizando) el valor numérico de la función objetivo, la cual integra diferentes indicadores de ajuste.

La calibración de modelos está enfocada a un criterio de exactitud, que se apoya en la cuantificación de la bondad de ajuste del modelo; para ello se hace uso de diferentes metodologías basadas en ecuaciones para la bondad de ajuste o su indicador de ajuste, los cuales demuestran numéricamente la similitud o diferencia entre los valores simulados por el MPE y observados de la estación hidrométrica.

3.5.1.1 EFICIENCIA DE NASH – SUTCLIFFE (NSE)

Es un error cuadrático medio que da mayor peso a los errores grandes, que a menudo, pero no siempre, suceden durante periodos de flujo elevado. El valor de NSE varía de -1 a 1. Un valor de NSE = 1 significa que el ajuste es perfecto. Un valor de NSE = 0 significa que el error es del mismo orden de magnitud que la varianza de los datos observados, por lo que la media de estos datos tendría una capacidad de predicción similar al modelo. Valores inferiores a cero implican que la media tiene una capacidad de predicción más alta que el modelo, lo que implica el mal funcionamiento del modelo.

La principal desventaja del coeficiente de eficiencia de Nash – Sutcliffe es que las diferencias entre los valores observados y simulados se calculan como valores cuadráticos. Como resultado, los valores mayores de las series temporales están fuertemente sobrevalorados mientras que los valores más bajos no son tenidos en cuenta. En la cuantificación de predicciones de flujo, esto conlleva a una sobreestimación del mal funcionamiento del modelo durante picos de flujo y una subestimación del funcionamiento del modelo para

condiciones de flujo escaso. El NSE (Ecuación [46]) no es muy sensible a sobre o infravaloraciones sistemáticas del modelo especialmente durante periodos de flujo escaso.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{sim}(t) - Q_{obs}(t))^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{obs}(t) - \bar{Q}_{obs}(t))^2} \quad [46]$$

3.5.1.2 EFICIENCIA DE NASH – SUTCLIFFE MODIFICADA (LN NSE)

El coeficiente de Nash – Sutcliffe de la transformación logarítmica del flujo (Ecuación [47]), da mayor peso a los errores durante flujos escasos. Para reducir el problema de las diferencias cuadráticas y la consecuente sensibilidad a valores extremos, el coeficiente de NSE se calcula con valores logarítmicos de los valores observados y simulados. Mediante esta transformación, los picos se achatan y los valores más bajos se mantienen más o menos al mismo nivel. Como consecuencia, la influencia de los valores de flujo escaso se incrementa en comparación con los picos de flujo y por tanto aumenta la sensibilidad del \ln NSE frente a las sobre o infravaloraciones sistemáticas del modelo.

$$\ln NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N [\ln(Q_{sim}(t)) - \ln(Q_{obs}(t))]^2}{\sum_{i=1}^N [\ln(Q_{obs}(t)) - \ln(\bar{Q}_{obs}(t))]^2} \quad [47]$$

3.5.1.3 COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE PEARSON (r)

La correlación de Pearson (Ecuación [48]) mide la covariabilidad de valores observados y simulados sin penalización por el sesgo. El valor del coeficiente varía entre -1 y 1. El coeficiente r toma el valor de 1, momento denominado de correlación completa positiva, cuando los puntos de datos describen una perfecta línea recta con pendiente positiva, con X e Y aumentando conjuntamente. El valor de 1 es independiente de la magnitud de la pendiente. En cambio, si los puntos de datos describen una perfecta línea recta con pendiente negativa, con Y decreciendo cuando X aumenta, el coeficiente r toma el valor de -1, momento denominado de correlación completa negativa. Un valor de r cercano a cero indica que las variables X e Y no están correlacionadas linealmente.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{sim}(t) - \bar{Q}_{sim}) \cdot (Q_{obs}(t) - \bar{Q}_{obs})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Q_{sim}(t) - \bar{Q}_{sim})^2 \cdot \sum_{i=1}^N (Q_{obs}(t) - \bar{Q}_{obs})^2}} \quad [48]$$

Por otra parte, tiene el inconveniente que es un estadístico pobre para decidir si la correlación observada es estadísticamente significativa, y/o si una correlación observada es significativamente más fuerte que otra. El motivo es que en el cálculo del coeficiente se ignora la distribución individual de X e Y, por lo tanto, no hay una manera universal de evaluar sus distribuciones en el caso de que las dos variables no estén correlacionadas (hipótesis nula).

3.5.1.4 COEFICIENTE DE SIMETRÍA (CS)

Es una medida de la simetría del ajuste entre la simulación media y la observación media; esta característica, aunque simple, es importante preservarla en modelaciones de periodos largos. Si el valor del CS (Ecuación [49]) es 1, quiere decir que la serie observada y la serie simulada tienen la misma media.

$$CS = 1 - \left[\max \left(\frac{\bar{Q}_{sim}}{\bar{Q}_{obs}}; \frac{\bar{Q}_{obs}}{\bar{Q}_{sim}} \right) - 1 \right]^2 \quad [49]$$

Para las ecuaciones anteriores [46] - [49] se tiene que $Q_{sim}(t)$ y $Q_{obs}(t)$ son el flujos simulado y observado, respectivamente, en el intervalo de tiempo t ; N es el número de meses de la calibración, y la barra alta denota el valor medio. Además, en la Tabla 8 se muestra la calidad del indicador según el valor que se haya obtenido en la calibración.

Tabla 8. Calidad de ajuste con los diferentes indicadores de ajuste

CALIDAD	NSE / ln NSE / r / SC
Muy Buena	$0.75 < \text{Coeficiente} \leq 1.00$
Buena	$0.65 < \text{Coeficiente} \leq 0.75$

Satisfactoria	$0.50 < \text{Coeficiente} \leq 0.65$
No Satisfactoria	$\text{Coeficiente} \leq 0.50$

3.6 TRASLADO DE PARÁMETROS

Como muchos de los tributarios presentan información limitada en las series de tiempo de caudales, resulta imposible realizar modelaciones fiables, por lo que se opta por extrapolar los parámetros de calibración en las cuencas simuladas a las cuencas no instrumentadas (Sánchez, 2017).

Para transferir información hacia una cuenca que no dispone, se debe de considerar que la zona debe ser vecina y con características similares, como son similitud geométrica, cinemática (misma conformación geométrica de red de drenaje natural) y similitud dinámica (relieve). El cumplimiento de dichas condiciones garantiza la similitud que encierran condiciones de clima, geología y cobertura vegetal.

Lo único que se realiza entonces, es el traslado de los parámetros con los cuales se obtuvo la calibración más adecuada en las cuencas que se encuentran cerca o dentro de la zona de estudio.

3.7 TRANSPORTE DE INFORMACIÓN HIDROMÉTRICA

Campos (2007), menciona que el método de transporte de información hidrométrica también se conoce como de la analogía hidrológica y se basa en la similitud climática y en las características físicas entre cuencas de una misma región geográfica o de una gran cuenca hidrográfica. El caso más simple se presenta cuando el sitio del proyecto está cercano a una estación hidrométrica que se localiza en el mismo cauce, ya sea agua arriba o aguas abajo; entonces el transporte se realiza por medio de la Ecuación [50].

$$Vx = F_i Vd \quad [50]$$

Donde V_x es el volumen escurrido estimado, V_d es el volumen escurrido conocido de la estación hidrométrica y F_i es un factor que se genera de la relación entre datos o características de la cuenca conocidos, como puede ser área, pendiente o coeficiente de escurrimiento.

Es importante recalcar que esta ecuación es recomendable cuando las cuencas no difieren más de un 30 a un 40%; además puede considerarse cuando la estación de aforos no está en el mismo río que se aprovecha, pero se encuentra en la misma cuenca hidrográfica (superior) o bien, son adyacentes, la ecuación anterior aún se considera confiable (Campos, 2007).

Además, si se requiere obtener un valor de volumen de escurrimiento de alguna cuenca dentro de la misma región hidrológica, pero no en la misma cuenca, esta puede obtenerse agregando tantos factores (F_i) como se requieran.

3.8 BALANCE HÍDRICO

El término Balance Hídrico, fue utilizado en 1944 por el meteorólogo C. W. Thornthwaite para referirse a la contabilidad entre las entradas de agua por precipitación o fusión de nieve y las salidas que se componen por la evapotranspiración, recarga de agua subterránea y escurrimiento (Campos, 1998).

El estudio del balance de agua en hidrología es la aplicación del principio de conservación de masas, usualmente referenciado a la ecuación de continuidad. Esto establece que, para cualquier volumen de agua y durante cualquier periodo de tiempo, la diferencia entre el total de entradas y salidas del sistema, son balanceadas por el cambio del volumen en el almacenamiento (Sokolov y Chapman, 1974). Dado que el balance hídrico presenta un diagnóstico de las condiciones reales del recurso hídrico en un área en particular, permite tomar medidas y establecer lineamientos y estrategias para su protección y utilización de una manera integrada, de tal forma que se garantice su disponibilidad tanto en cantidad como en calidad (Stockholm Environment Institute, 2009).

Campos (1998) menciona que, el escurrimiento de una corriente puede ser considerado como la componente más importante del ciclo hidrológico. El balance hídrico plantea los

ingresos y salidas de agua en un determinado sistema pudiendo considerarse como se muestra en la Ecuación [51].

$$P + Q_{in} = ETR + \Delta S + Q_{out} \quad [51]$$

Donde se tiene que P es la precipitación (L^3); Q_{in} es flujo de agua hacia dentro de la cuenca (L^3); ETR es la evapotranspiración (suma de la evaporación de suelo, superficies de agua y plantas, expresada en L^3), ΔS es el cambio en el almacenamiento de agua (L^3), y Q_{out} es el flujo de agua (L^3) que sale de la cuenca considerada Cogliati, et al. (2018).

El cambio de almacenamiento de agua está dado por los flujos internos que se tienen en las celdas subsuperficiales y profundas. En este sentido, para considerar un balance hídrico completo y que el cierre sea cero, debe tenerse absoluto control sobre los volúmenes de entrada y salida al sistema.

3.9 SIMULACIÓN SUBTERRÁNEA

Esta etapa del proyecto se realiza a partir de la paquetería Modflow 2005, utilizando el software PMWIN (Processing Modflow for Windows), el cual es un software de código libre desarrollado en Fortran por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), que puede ser descargado, instalado y modificado sin costo; es importante mencionar que esto no quiere decir que el software en sí esté desactualizado o que tenga menor calidad.

MODFLOW se basa en diferencias finitas que definen el flujo en el medio poros; dada su discretización en celdas rectangulares, el control volumétrico de lo que entra y lo que sale es exacto y no es un problema en la simulación. Este control también se cumple en condiciones que varían con el tiempo, teniendo un control exacto del agua proveniente de almacenamiento.

Según Harbaugh (2005), MODFLOW simula el flujo constante y no permanente en un sistema de flujo de forma irregular en el que las capas de acuíferos pueden ser confinadas, no confinadas, o una combinación de ambas. Se puede simular el flujo de las tensiones externas, como el flujo a los pozos, la recarga de área, la evapotranspiración, el flujo a los

desagües y el flujo a través de los lechos de los ríos. Las conductividades o transmisiones hidráulicas para cualquier capa pueden diferir espacialmente y ser anisotrópicas (restringidas a tener las direcciones principales alineadas con los ejes de la malla), y el coeficiente de almacenamiento puede ser heterogéneo. Pueden simularse los límites de altura y flujo especificados, así como un flujo dependiente de la altura a través del límite exterior del modelo que permite que el agua sea suministrada a un bloque límite en el área modelada a una tasa proporcional a la diferencia de altura actual entre una "fuente" de agua fuera del área modelada y el bloque límite.

Para realizar las simulaciones en MODLFOW, es necesario contar con una discretización espacial de un sistema acuífero con una red de bloques llamados celdas, cuyas ubicaciones se describen en términos de filas, columnas y capas como se muestra en la Figura 9.

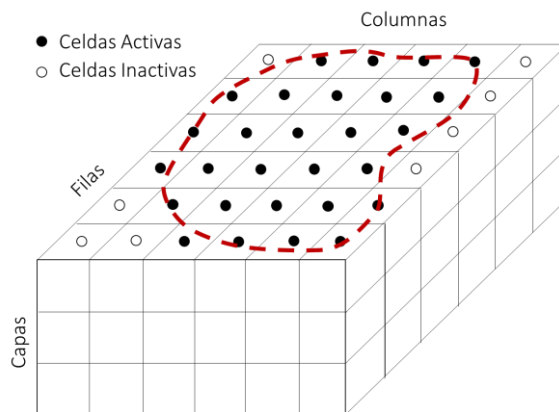


Figura 9. Discretización del acuífero por medio de celdas, marcando filas, columnas y capas.

Adaptado de Harbaugh (2005).

El movimiento tridimensional del agua subterránea a través del material poroso puede ser descrito por la Ecuación [52] como una diferencial parcial:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad [52]$$

K_{xx} , K_{yy} y K_{zz} son valores de conductividad hidráulica a lo largo de los ejes cartesianos x , y , y z , que se supone que son paralelos a los principales ejes de la conductividad hidráulica (LT^{-1}); h es altura piezométrica (L); W es un flujo volumétrico por unidad de volumen que representa las fuentes y/o sumideros que permiten la entrada ($W > 0$) o salida ($W < 0$) de agua del sistema (T^{-1}); S_s es el almacenamiento específico del material poroso ($1/L$); t es el tiempo (T). En general, K_{xx} , K_{yy} y K_{zz} pueden ser funciones del espacio (x , y , z), y h y W del espacio y tiempo (x , y , z , t), con lo que la ecuación anterior describe el flujo saturado en un medio poroso heterogéneo y anisótropo en régimen transitorio. La ecuación anterior junto con condiciones iniciales y de contorno, constituyen el modelo matemático del flujo subterráneo.

Dentro de cada celda hay un punto llamado "nodo" en el que se debe calcular la altura. Se podrían usar muchos esquemas para localizar nodos en las celdas; sin embargo, la ecuación de diferencia finita desarrollada utiliza la formulación centrada en bloques en la que los nodos están en el centro de las celdas.

El desarrollo de la ecuación del flujo en diferencias finitas (Ecuación [53]) resulta de aplicar la ecuación de continuidad a una celda: la suma de todos los flujos que entran y salen de la celda debe ser igual al cambio en el almacenamiento. Suponiendo que la densidad del agua subterránea es constante y considerando que junto con las condiciones iniciales y de contorno, se tiene que la ecuación de continuidad que expresa el balance de flujo en una celda es:

$$\sum Q_i = S_s \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta V \quad [53]$$

Q_i es el caudal que entra en la celda por una cara (L^3/T), S_s es el coeficiente de almacenamiento específico del medio ($1/T$), ΔV es el volumen de la celda (L^3), Δh es la variación en el potencial por unidad de peso en el intervalo de tiempo Δt (L).

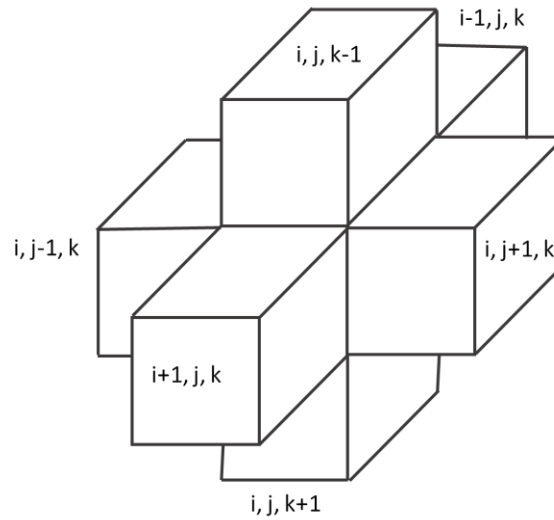


Figura 10. Incisos para las seis celdas adyacentes que rodean el edificio celda i, j, k (oculta). Adaptado de Harbaugh (2005).

En la Figura 10, se puede observar que hay seis celdas de acuíferos adyacentes a la celda i, j, k . Considerando entonces, que las filas (i), columnas (j) y capas (k), se tienen las celdas adyacentes: $i-1, j, k$; $i+1, j, k$; $i, j-1, k$; $i, j+1, k$; $i, j, k-1$; e $i, j, k+1$.

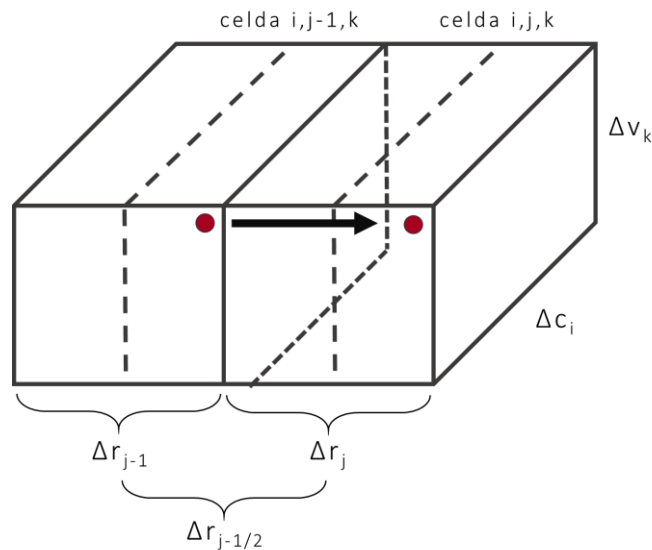


Figura 11. Flujo de la celda i, j, k a la celda $i, j-1, k$. Adaptado de Harbaugh (2005).

Para simplificar el siguiente desarrollo, los flujos se consideran positivos si están entrando a la celda i,j,k . Siguiendo esta convención, el flujo hacia la celda i,j,k en la dirección de la fila desde la celda $i,j-1,k$ (Figura 11), es dado por la ley de Darcy, tal y como se muestra en la Ecuación [54]:

$$q_{i,j-1/2,k} = KR_{i,j-1/2,k} \Delta c_i \Delta v_k \frac{(h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k})}{\Delta r_{j-1/2}} \quad [54]$$

Donde $h_{i,j,k}$ es la altura del nodo i,j,k y $h_{i,j-1,k}$ es la altura del nodo $i,j-1,k$; a su vez, $q_{i,j-1/2,k}$ es el flujo que pasa a través de la superficie frontal entre las celdas i,j,k y $i,j-1,k$, en (L^3T^{-1}); $KR_{i,j-1/2,k}$ es la conductividad hidráulica (antes permeabilidad) a lo largo de la fila entre los nodos i,j,k y $i,j-1,k$ (LT^{-1}); $\Delta c_i \Delta v_k$ es el área de la superficie normal de la celda en la dirección del flujo; y $\Delta r_{j-1/2}$ es la distancia entre los nodos, i,j,k y $i,j-1,k$ (L); esta puede escribirse para cada celda adyacente a la celda i,j,k .

Con lo anterior, se pueden escribir expresiones similares aproximando el flujo hacia la celda a través de las cinco caras restantes, resultando así, las Ecuaciones [55] a [59].

$$q_{i,j+1/2,k} = KR_{i,j+1/2,k} \Delta c_i \Delta v_k \frac{(h_{i,j+1,k} - h_{i,j,k})}{\Delta r_{j+1/2}} \quad [55]$$

$$q_{i-1/2,j,k} = KC_{i-1/2,j,k} \Delta r_j \Delta v_k \frac{(h_{i-1,j,k} - h_{i,j,k})}{\Delta r_{i-1/2}} \quad [56]$$

$$q_{i+1/2,j,k} = KC_{i+1/2,j,k} \Delta r_j \Delta v_k \frac{(h_{i+1,j,k} - h_{i,j,k})}{\Delta r_{i+1/2}} \quad [57]$$

$$q_{i,j,k-1/2} = KV_{i,j,k-1/2} \Delta c_i \Delta r_j \frac{(h_{i,j,k-1} - h_{i,j,k})}{\Delta r_{k-1/2}} \quad [58]$$

$$q_{i,j,k+1/2} = KR_{i,j,k+1/2} \Delta c_i \Delta r_j \frac{(h_{i,j,k+1} - h_{i,j,k})}{\Delta r_{k+1/2}} \quad [59]$$

Dicha ecuación se puede simplificar si se considera la conductancia hidráulica CR , que representa el factor de proporcionalidad de flujo de agua por unidad de gradiente de potencial hidráulico (L^2T^{-1}), de tal forma que, en la Ecuación [60] se tiene para las celdas i,j,k y $i,j-1,k$ que :

$$CR_{i,j-1/2,k} = \frac{KR_{i,j-1/2,k}\Delta c_i\Delta v_k}{\Delta r_{j-1/2}} \quad [60]$$

Por lo tanto, la conductancia es el producto de la conductividad hidráulica y el área de flujo de la sección transversal dividida por la longitud de la trayectoria del flujo (en este caso, la distancia entre los nodos). De esta forma, se tiene que al sustituir la conductancia en las Ecuaciones [54] a [59], se tienen la Ecuaciones [61] a [66]:

$$q_{i,j-1/2,k} = CR_{i,j-1/2,k}(h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k}) \quad [61]$$

$$q_{i,j+1/2,k} = CR_{i,j+1/2,k}(h_{i,j+1,k} - h_{i,j,k}) \quad [62]$$

$$q_{i-1,j/2,k} = CC_{i-1/2,j,k}(h_{i-1,j,k} - h_{i,j,k}) \quad [63]$$

$$q_{i+1/2,j,k} = CC_{i+1/2,j,k}(h_{i+1,j,k} - h_{i,j,k}) \quad [64]$$

$$q_{i,j,k-1/2} = CV_{i,j,k-1/2}(h_{i,j,k-1} - h_{i,j,k}) \quad [65]$$

$$q_{i,j,k+1/2} = CV_{i,j,k+1/2}(h_{i,j,k+1} - h_{i,j,k}) \quad [66]$$

Para contabilizar los caudales que ingresan a la celda desde características o procesos externos al acuífero, tales como ríos, drenajes, recarga natural, evapotranspiración o pozos, se requieren términos adicionales. Estos flujos dependen de la altura de la celda receptora, pero ser independientes de todas las demás alturas del acuífero, o pueden ser totalmente

$$a_{i,j,k,n} = p_{i,j,k,n}h_{i,j,k} + q_{i,j,k,n} \quad [67]$$

independientes de la altura de la celda receptora. El flujo procedente del exterior del acuífero puede estar representado por la Ecuación [67]:

Donde $a_{i,j,k,n}$ representa el flujo desde la n-ésima fuente externa hacia la celda i,j,k (L^3T^{-1}) y a su vez; $p_{i,j,k,n}$ y $q_{i,j,k,n}$ son constantes (L^2T^{-1}) y (L^3T^{-1}) respectivamente; así, $p_{i,j,k,n}$ depende de la altura h en la celda (L).

De esta forma, si se tiene la recarga al acuífero por medio de un pozo, el cual no depende del nivel del agua al que se encuentre, se tiene la expresión representada en la Ecuación [68]:

$$a_{i,j,k,n} = q_{i,j,k,n} \tag{68}$$

Así, si se tiene una interconexión río – acuífero, como se muestra en la Figura 12, se requiere conocer la conductancia ($CRIV_{i,j,k}$) que controla el flujo del río al nodo de la celda y las alturas tanto en el río ($R_{i,j,k}$) y en la celda ($h_{i,j,k}$) para de esta forma, representar el fenómeno en la Ecuación[69].

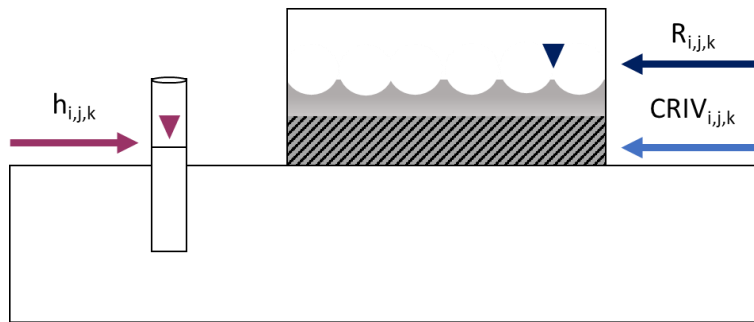


Figura 12. Representación conceptual de las aportaciones a través del lecho de un río hacia una celda. Adaptado de Harbaugh (2005).

$$a_{i,j,k,n} = CRIV p_{i,j,k,n} (R_{i,j,k} - h_{i,j,k}) \tag{69}$$

Entonces, considerando que todas las aportaciones al acuífero se toman como positivas y, las extracciones negativas, se puede simplificar el sistema como se muestra en la Ecuación [70] al sumar todas las entradas y salidas para que se tenga:

$$\sum_{n=1}^N a_{i,j,k,n} = P_{i,j,k} h_{i,j,k} + Q_{i,j,k} \quad [70]$$

Aplicando la ecuación de continuidad a la celda i,j,k , y tomando en cuenta los flujos de las seis celdas adyacentes, el cambio en el almacenamiento, y los flujos externos, se representa por medio de la Ecuación [71].

$$q_{i,j-\frac{1}{2},k} + q_{i,j+\frac{1}{2},k} + q_{i-\frac{1}{2},j,k} + q_{i+\frac{1}{2},j,k} + q_{i,j,k-\frac{1}{2}} + q_{i,j,k+\frac{1}{2}} + P_{i,j,k} h_{i,j,k} + Q_{i,j,k} = SS_{i,j,k} (\Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k) \frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t} \quad [71]$$

Donde se tiene que $\Delta h_{i,j,k}/\Delta t$ es una aproximación de diferencias finitas para la derivada de la altura en la celda con respecto al tiempo (LT^{-1}); $SS_{i,j,k}$ representa el almacenamiento específico de la celda i,j,k (L^{-1}); y $\Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k$ es el volumen de celda i,j,k (L^3).

Todos los coeficientes de $h_{i,j,k}^m$ que no incluyen la conductancia entre nodos se combinan en un solo término, HCOF (Ecuación [72]) que resulta con las unidades L^2T^{-1} , y todos los términos del lado derecho se combinan en el término RHS (Ecuación [73]) con las unidades L^3T^{-1} .

$$HCOF_{i,j,k} = P_{i,j,k} - \frac{SS_{i,j,k} \Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k}{t - t^{m-1}} \quad [72]$$

$$RHS_{i,j,k} = -Q_{i,j,k} - SS_{i,j,k} \Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k \frac{h_{i,j,k}^{m-1}}{t - t^{m-1}} \quad [73]$$

Además, la complejidad puede reducirse asumiendo que el superíndice de tiempo es m , a menos que se indique lo contrario. La Ecuación [74] se obtiene también al sustituir $q_{i,j,k}$ por las expresiones utilizadas en las Ecuaciones [61] a [66]:

$$\begin{aligned} & (CV_{i,j,k-1} h_{i,j,k-1} + CC_{i-1,j,k} h_{i-1,j,k} + CR_{i,j-1,k} h_{i,j-1,k} + \\ & + CV_{i,j,k+1} h_{i,j,k+1} + CC_{i+1,j,k} h_{i+1,j,k} + CR_{i,j+1,k} h_{i,j+1,k} + \\ & + (-CV_{i,j,k-\frac{1}{2}} - CC_{i-\frac{1}{2},j,k} - CR_{i,j-\frac{1}{2},k} - CV_{i,j,k+\frac{1}{2}} + CC_{i+\frac{1}{2},j,k} + \\ & + CR_{i,j+\frac{1}{2},k} + HCOF_{i,j,k}) h_{i,j,k} = RHS_{i,j,k} \end{aligned} \quad [74]$$

Todo el sistema de ecuaciones de la forma de la Ecuación [74], que incluye una ecuación para cada celda de altura variable en la malla, puede escribirse en forma de matriz como se muestra en la Ecuación [75].

$$[A]\{h\} = \{q\} \quad [75]$$

Donde: $[A]$ es una matriz de los coeficientes de la altura, desde el lado izquierdo de la Ecuación [74], para todos los nodos activos de la cuadrícula; $\{h\}$ es un vector de los valores de la cabeza al final del paso m del tiempo para todos los nodos de la malla; y $\{q\}$ es un vector de los términos constantes, RHS , para todos los nodos de la malla.

MODFLOW ensambla el vector $\{q\}$ y los términos que componen $[A]$ mediante una serie de subrutinas. El vector $\{q\}$ y los términos que comprenden $[A]$ se transfieren a subrutinas que resuelven realmente las ecuaciones de la matriz para la variable vector $\{h\}$.

3.9.1 TIPOS DE CELDAS EN EL MODELO Y SIMULACIÓN DE CONTORNO

En la práctica, la formulación de una ecuación compleja para cada celda en la malla del modelo es innecesario, ya que el estado de algunas celdas se especifica con antelación para simular las condiciones de contorno del problema.

Como se muestra en la Figura 13, MODFLOW tiene diferentes tipos de celda utilizadas para simular condiciones de contorno que se agrupan en dos categorías: celdas de altura constante y celdas sin flujo. Las celdas de altura constante son aquellas para las que se especifica la altura para cada momento, y dicho valor no cambia como resultado de la resolución de las ecuaciones de flujo; así mismo, las celdas sin flujo no se permite ningún flujo de entrada o salida de la celda.

El resto de las celdas de la malla, denominadas celdas de altura variable, se caracterizan por tener alturas no especificadas y libres de variar con el tiempo; para resolver el sistema, se debe formular una ecuación de la forma de la Ecuación [74] para cada celda de cabeza de variable en la malla, y el sistema de ecuaciones resultante se debe resolver simultáneamente para cada paso temporal de la simulación.

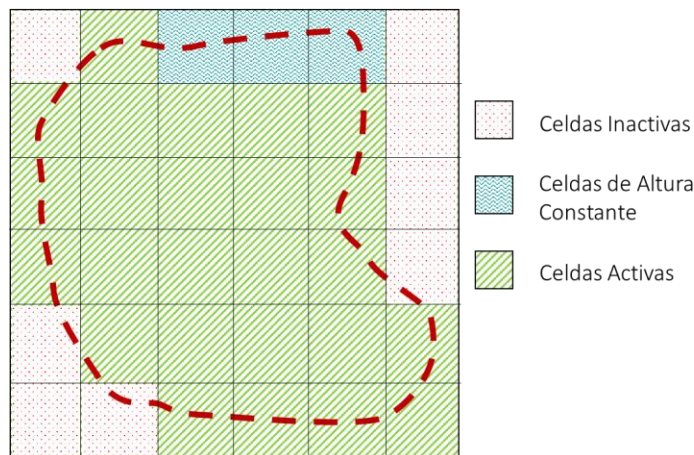


Figura 13. Celdas utilizadas en MODFLOW para caracterización de zona. Adaptado de Harbaugh (2005).

Los valores que se ingresan en la distribución inicial de alturas, condiciones de contorno, parámetros hidráulicos y agentes externos son utilizados para calcular el primer paso de tiempo de la modelación y así, cada sistema de ecuaciones que se resuelve de forma

simultánea tiene unos parámetros iniciales que dependen de la simulación anterior; además, el modelo en sí se puede utilizar cualquier tipo de unidades, mientras se tenga cuidado al ser congruente con ellas.

Como primer punto, es importante conocer la geología de la zona, para determinar el coeficiente de almacenamiento y la conductancia o transmisividad; así como la existencia de manantiales y determinar aquellas celdas que se encuentran activas, ya que para las celdas sin flujo no se formula ninguna ecuación de ninguna celda adyacente para el flujo hacia o desde la celda sin flujo; así mismo, la discretización vertical del modelo no se representa al cien por cien de forma correcta, debido a que no son rectángulos; para poder lograr que se parezca más, sería necesario entonces agregar más capas para simular los estratos existentes.

3.9.2 CONCEPTUALIZACIÓN DEL MODELO

Para representar el flujo subterráneo de forma simple, se muestra el diagrama (Figura 14) con el orden por medio del cual se involucran los procedimientos para resolver la ecuación del flujo subterráneo. En la subrutina (Figura 15) que representa el bucle del paso de tiempo, se muestra el equilibrio que se realiza por celda para determinar si los resultados que se tienen son aptos para continuar con la modelación.

El periodo de simulación se divide en periodos de estrés donde se muestran las acciones que afectan el acuífero, tales como entradas (recargas) y salidas (extracciones) del sistema; en este punto es importante mencionar que el tamaño de la celda se especifica según las necesidades de la modelación que también se ve afectada por la densidad de puntos de extracción en la zona, además, la discretización puede no ser homogénea y seguir considerándose igual de válida.

Por otra parte, el balance hídrico que forma parte en el proceso de modelación proporciona una indicación de la aceptabilidad general de la solución, ya que debe existir una continuidad para los flujos totales de entrada y salida del modelo; es decir, la diferencia entre el flujo total de entrada y el flujo total de salida debe ser igual al cambio total en el almacenamiento.

El balance total, tal y como se imprime en la salida no incluye los flujos internos entre las celdas del modelo, sólo los flujos que entran o salen del modelo como un todo, donde se considera claramente el cambio de almacenamiento a través del tiempo. Debido a esto y, pese a que para cada celda existen seis celdas adyacentes, sólo se requieren tres términos de flujo y, el flujo a través de los otros tres lados se tiene en cuenta en los cálculos de flujo para las celdas adyacentes a esos lados.

Por otra parte, como se muestra en la Figura 15, se tiene que, para poder obtener el balance en cada celda, se utiliza la Ley de Darcy, la cual se considera como la base de la hidrogeología y de todos los estudios físico-matemáticos posteriores sobre el flujo del agua subterránea.

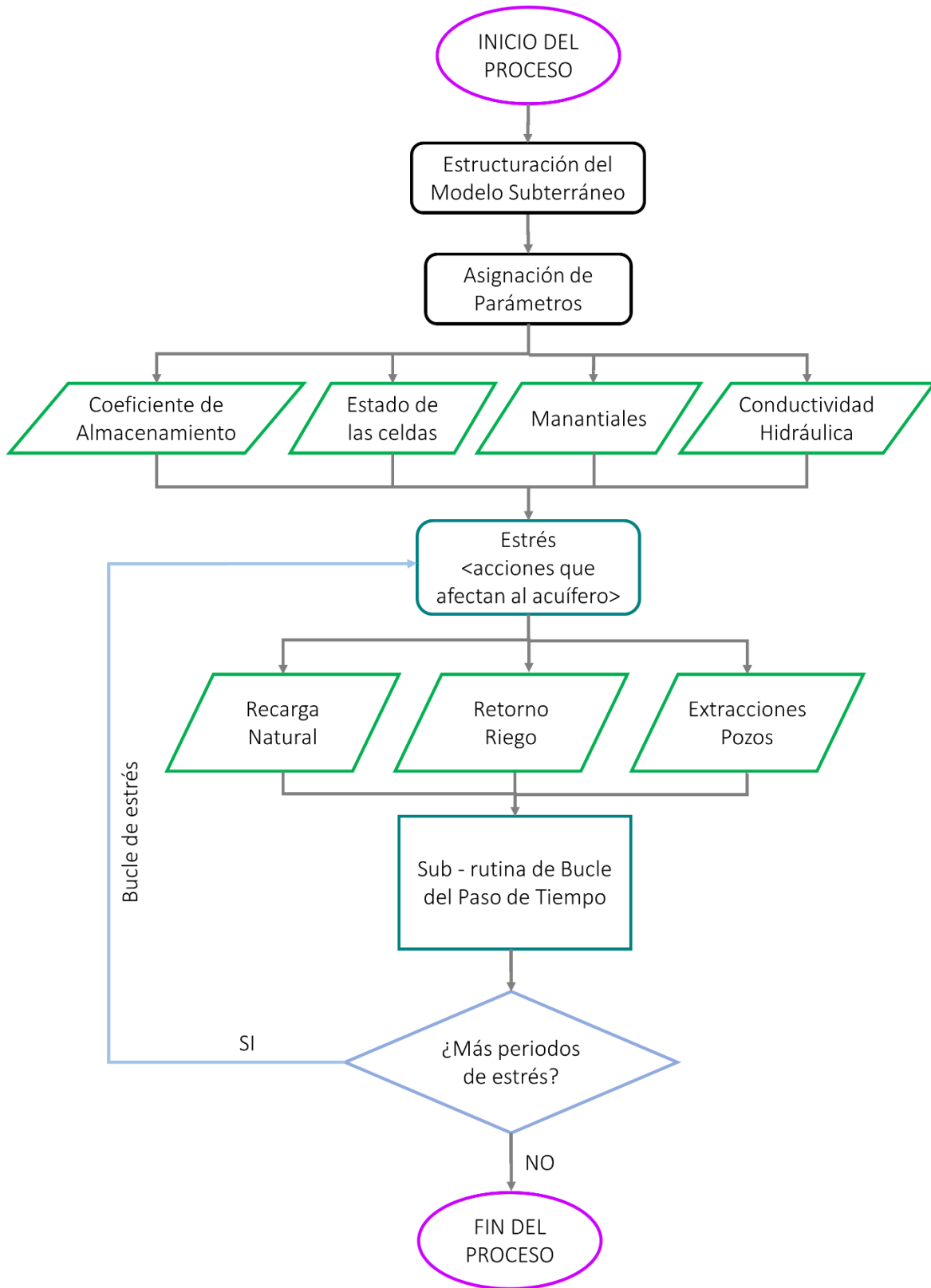


Figura 14. Diagrama de flujo del programa para simular el flujo de agua subterránea.

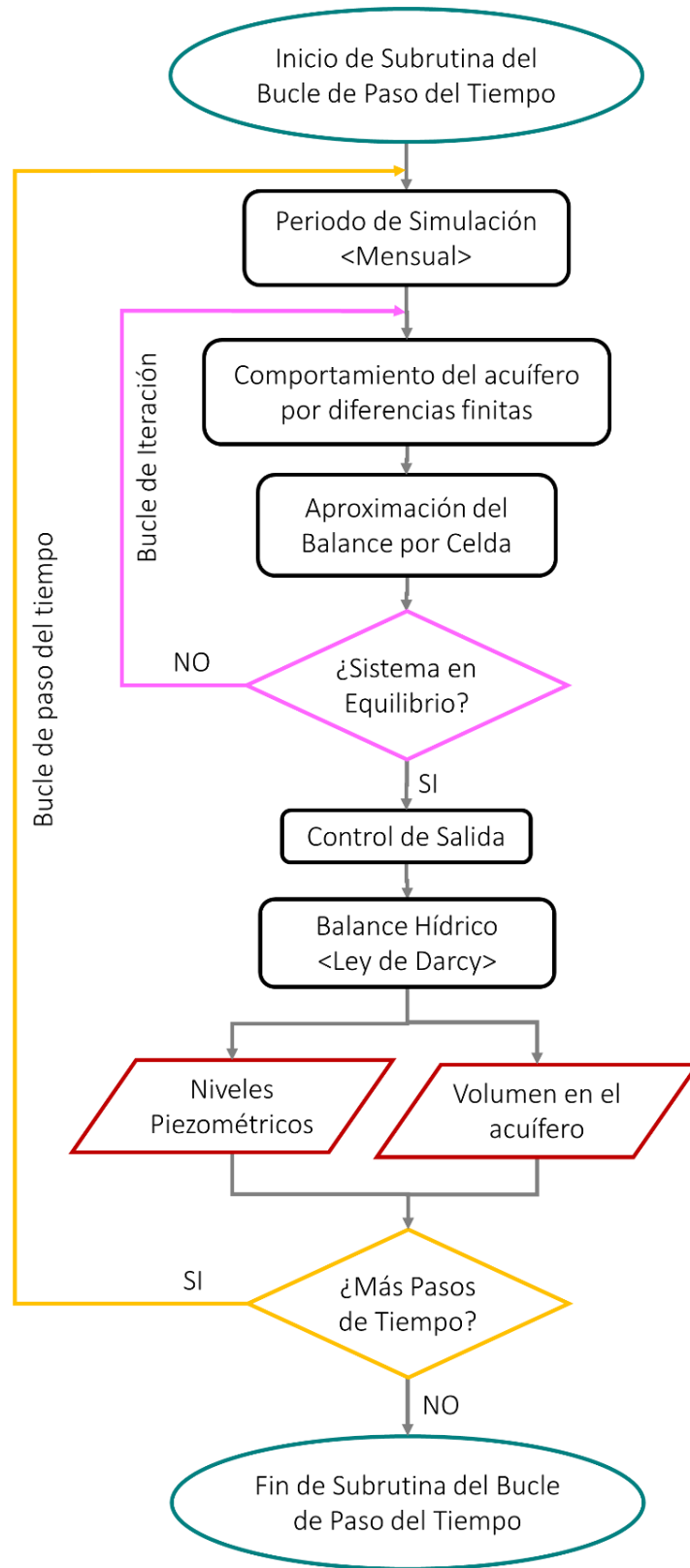


Figura 15. Diagrama de flujo para la subrutina del bucle de paso de tiempo.

Entonces, la Ley de Darcy, como se muestra en la Ecuación [76] se define por:

$$Q = KA \frac{\Delta h}{\Delta L} \quad [76]$$

Donde se tiene que Q es el gasto volumétrico [L^3T^{-1}] que atraviesa la sección perpendicular A al flujo [L^2]; K es la conductividad hidráulica del material en dirección del flujo [LT^{-1}]; Δh es la diferencia de alturas piezométricas en el prisma paralelo al flujo [L] y ΔL es la longitud del prisma paralelo al flujo [L].

Así mismo, como se muestra en la Ecuación [77], la conductancia C [L^2T^{-1}] tiene relación con la conductividad hidráulica, de tal forma que así, puede ser sustituida en la Ecuación [78], reescribiendo así, la Ley de Darcy.

$$C = \frac{KA}{L} \quad [77]$$

$$Q = C(\Delta h) \quad [78]$$

Además, en la Ecuación [79] se muestra otra forma para definir la conductancia para el flujo horizontal en un prisma como:

$$C = \frac{TW}{L} \quad [79]$$

Donde T es la transmisividad en dirección del flujo [L^2T^{-1}] y W es el ancho del prisma. Por tanto, como se muestra en la Figura 16 la Ley de Darcy tiene una ejemplificación sencilla e importante para las modelaciones celda a celda que se utiliza en MODFLOW, donde según los datos con los que se cuente, se puede considerar entonces utilizar la conductancia, conductividad hidráulica o transmisividad.

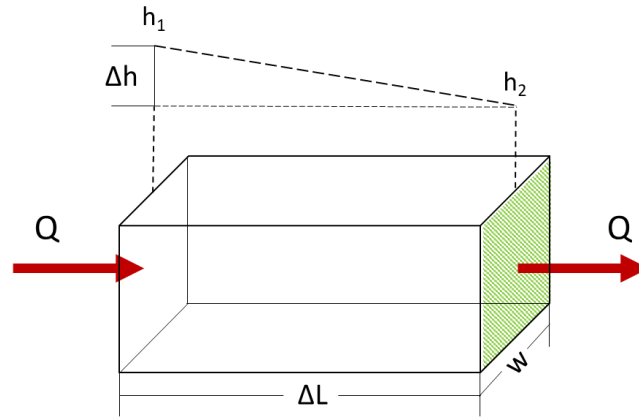


Figura 16. Representación gráfica de la Ley de Darcy. Adaptado de Harbaugh (2005).

3.10 MODELOS DE CIRCULACIÓN GENERAL UTILIZADOS EN MÉXICO

Los MCG son las herramientas utilizadas para realizar experimentos de cambio climático a partir de los cuales se pueden construir escenarios de cambio climático (posibles representaciones de cómo evolucionará el clima). Los MCG representan el clima, usando una malla tridimensional sobre el globo, típicamente teniendo una resolución horizontal de entre 250 y 600 km, 10 a 20 capas verticales en la atmósfera y algunas veces tantas como 30 capas en los océanos. Su resolución es entonces bastante tosca a escala de exposición en la mayoría de las evaluaciones de impacto de los gases de efecto invernadero (Viner, 2000).

En México, en 2012, se desarrollaron escenarios climáticos regionales; este proyecto fue realizado en conjunto con el Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada, C. C. (CICESE), el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y el Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) perteneciente a la UNAM, en coordinación con el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). De esta forma, se logró tener un análisis para evaluar el desempeño regional de los Modelos de Circulación General (MCG), usando un período histórico específico, el cual brinda elementos para observar la reproducción de procesos atmosféricos de importancia para México. El desempeño de los modelos debe evaluarse ya que un MCG puede representar bien una región y tener un mal desempeño en otra (Fernández, et al., 2015).

Para análisis regional del periodo histórico y de las proyecciones, se consideraron los 15 Modelos de Circulación General (Tabla 9) con una resolución espacial estructurada en celdas de 0.5° x 0.5° (aproximadamente 55 km x 55 km).

Tabla 9. Modelos de circulación General utilizados por el INECC (Fernández, et al., 2015).

MODELO	INSTITUCIÓN	PAÍS
BCC_CSM1	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration	China
CAnESM	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (CCCMA)	Canadá
CNRMCM5	Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM-CERFACS)	Francia
CSIRO_Mk3	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO)	Australia
GFDL_CM3	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL)	Estados Unidos
GISS_E2_R	NASA Goddard Institute for Space Studies (NASAGISS)	Estados Unidos
HAGEM2_ES	Met Office Hadley Centre (MOHC)	Reino Unido
INM	Russian Institute for Numerical Mathematics	Rusia
IPSLcm5a_lr	Institute Pierre Simon Laplace (IPSL)	Francia
MIROC_esm	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo)	
MIROC_ESM_CHEM	National Institute for Environmental Studies	Japón
MIROC5	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (MIROC)	
MPI_ESM_LR	Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M)	Alemania
MRI_CGCM3	Meteorological Research Institute (MRI)	Japón
NCC_orESM1	Bjerknes Centre for Climate Research, Norwegian Meteorological Institute (NCC)	Noruega

3.10.1 TRAYECTORIAS REPRESENTATIVAS DE CONCENTRACIÓN RCP

Se define al clima como el tiempo meteorológico promedio, es decir, como “la descripción estadística en términos de la media y la variabilidad de magnitudes tales como la temperatura ambiente, las precipitaciones y los vientos. A lo largo de un periodo de tiempo”, la Organización Meteorológica Mundial, recomienda que sea de al menos 30 años. Se trata, por lo tanto, de un sistema cuyo estado viene definido por condiciones de contorno, frente al tiempo meteorológico que depende de las condiciones iniciales (Santamaría, 2010).

Lo que hace del clima un sistema tan complejo son, en primer lugar, las interacciones que tienen lugar principalmente en la atmósfera y también en los océanos, entre la radiación solar, la química y la dinámica, y, en segundo lugar, los mecanismos de retroalimentación entre ella, que provocan derivas del conjunto de condiciones de contorno que definen el estado climático (Santamaría, 2010).

Como menciona Santamaría (2010), los factores que afectan al cambio climático se dividen en forzamientos y retroalimentaciones. Un forzamiento climático es un desequilibrio energético impuesto sobre el sistema climático, bien externamente (cambios en la radiación solar, emisiones volcánicas) y puede ser radiativo (directo como los gases de efecto invernadero, o indirecto) o no radiativo (flujo de evapotranspiración). Una retroalimentación del clima es un proceso interno que amplifica o disminuye la respuesta climática a un forzamiento inicial (como el incremento de vapor de agua y nubes posterior al incremento de la concentración de CO₂).

El clima global viene determinado por el balance radiativo del planeta. Existen tres maneras fundamentales de modificar el balance radiativo: cambiando la radiación solar entrante por cambios en la órbita terrestre o en el sol mismo; cambiando el albedo de la tierra o alterando la longitud de onda de la energía irradiada al espacio como consecuencia de los cambios en las concentraciones de gases efecto invernadero.

Considerando lo anterior, Santamaría (2010) comenta que los modelos complejos del clima son más realistas, pero son computacionalmente costosos y contienen tantas variables interdependientes que no es posible en general, seguir la conexión entre causas y efectos

definidos. Están basados en Modelos de Circulación General para la Atmósfera y los océanos, mutuamente ligados, y contienen subrutinas para tratar la formación del hielo, el ciclo de carbono, los procesos químicos de la atmósfera, los procesos del suelo y vegetación, y en particular los relativos a la composición atmosférica y reflectividad superficial.

En el Quinto Reporte de Evaluación del IPCC, se definieron cuatro nuevos escenarios de emisión de las denominadas Trayectorias Representativas de Concentración (RCP). Estas se identifican por su forzamiento radiativo total, el cual oscila en un rango de 2.6 a 8.5 W/m² para el año 2100 (Tabla 10); de ellos, se trabaja únicamente con los RCP 4.5 y 8.5 W/m².

Tabla 10. Trayectorias de concentraciones representativas presentadas en el 5º reporte de evaluación del IPCC. Adaptado de (Fundación Biodiversidad, et al, 2013).

Trayectoria Representativa de Concentración	Forzamiento Radiativo	Tendencia del Forzamiento Radiativo	[CO ₂] en 2100
RCP 2.6	2.6 W/m ²	Decreciente en 2100	421 ppm
RCP 4.5	4.5 W/m ²	Estable en 2100	538 ppm
RCP 6.0	6.0 W/m ²	Creciente	670 ppm
RCP 8.5	8.5 W/m ²	Creciente	936 ppm

3.10.2 REGIONALIZACIÓN DE LOS MODELOS

La regionalización de los modelos de circulación general se realiza con el Programa de Evaluación de Cambio Climático Regional de Norteamérica (NARCCAP, por sus siglas en inglés) y permiten producir simulaciones de cambio climático con una resolución espacial alta con la finalidad de investigar la incertidumbre asociada a proyecciones climáticas en escala regional del clima futuro y generar escenarios de cambio climático para usarse en la estimación de los impactos del cambio climático Fernández, et al. (2015).

Se realizaron una serie de simulaciones numéricas utilizando varios modelos climáticos regionales, cuyas condiciones de contorno se obtuvieron de modelos acoplados océano-atmósfera de circulación general.

Como se muestra en la Figura 17, es importante incluir las propiedades del tipo de uso de suelo y la orografía a alta resolución que afectan la dinámica atmosférica local, ya que poseen una variabilidad espacial de menor escala.

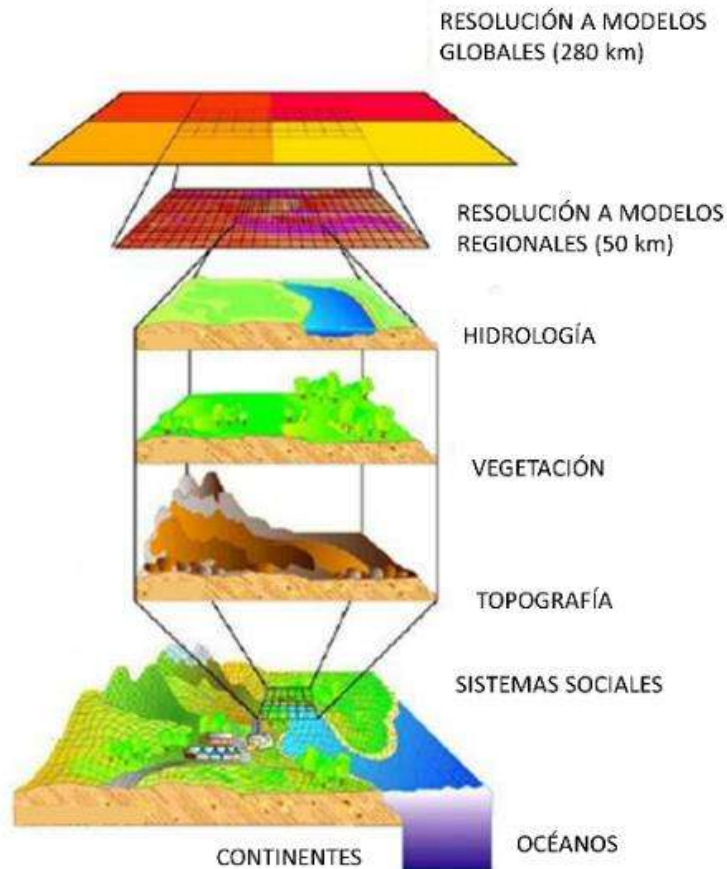


Figura 17. Esquema de la información local aportada por el aumento de resolución espacial de uso de suelo. Adaptado de Viner (2000).

Dada la incertidumbre asociada a los modelos globales, no es recomendable utilizar únicamente uno de ellos para estudios de impacto regional, por ello se recomienda utilizar información colectiva de simulaciones de MCG, esto para minimizar los errores individuales (Cavazos, et al.,

2015). Es por ello que de los 15 MCG que se presentan por parte del INECC, se utilizan únicamente cuatro que representan adecuadamente las condiciones en México.

La selección de lo MCG en México se realiza con base al proyecto CORDEX (Coordinate Regional Climate Downscaling Experiment), el cual es un programa patrocinado por el World Climate Research Programme (WCRP) para organizar un marco internacional coordinado con el fin de producir una mejor generación de proyecciones regionales sobre el cambio climático en todo el mundo, con el fin de contribuir a los estudios de impacto y adaptación (Fernández, et al., 2019).

CORDEX produce un conjunto de múltiples modelos dinámicos y estadísticos de reducción de escala considerando múltiples MCG forzados del archivo CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project fase 5) el cual es un modelo acoplado océano - atmósfera utilizado para los distintos MCG. Está desarrollado en fases sucesivas adoptadas para la mejorar los sucesivos modelos de clima, pero también para informar a las agencias nacionales e internacionales acerca de posibles acciones para mitigar los efectos del cambio climático.

El CMIP5 es la fase más reciente del proyecto CMIP que ha sido completada (2010-2014). Desde el punto de vista técnico, CMIP5 incluyó más metadatos describiendo las simulaciones de los diferentes modelos que las fases anteriores.

El proyecto creó un esquema exhaustivo describiendo tanto las partes científica y técnica, como los aspectos numéricos de los resultados.

El objetivo principal de CMIP5 era responder a las cuestiones científicas más complejas surgidas durante la cuarta reunión del IPCC; también promueve un mejor entendimiento general del clima, y a su vez proporcionar estimaciones de cambio de clima futuro útiles para evaluar las consecuencias e impacto del cambio climático. El Quinto Informe del IPCC contiene información de los experimentos de CMIP5.

Inicialmente, CORDEX ha seleccionado una cuadrícula de 50 km para realizar los acoplamientos de modelos, favoreciendo así, el compromiso de la comunidad en general. Se consideran múltiples dominios comunes que cubren todas (o la mayoría) las áreas terrestres del mundo (con un enfoque inicial en África). Estas regiones aprovechan los proyectos regionales existentes.

Para el caso particular, México se encuentra localizado en dos dominios delimitados por CORDEX; a) Región 2 Centroamérica y b) Región 3 Norteamérica; estos datos se muestran en la Figura 18 y fueron obtenidos de del sitio oficial de CORDEX (WCRP, 2019).

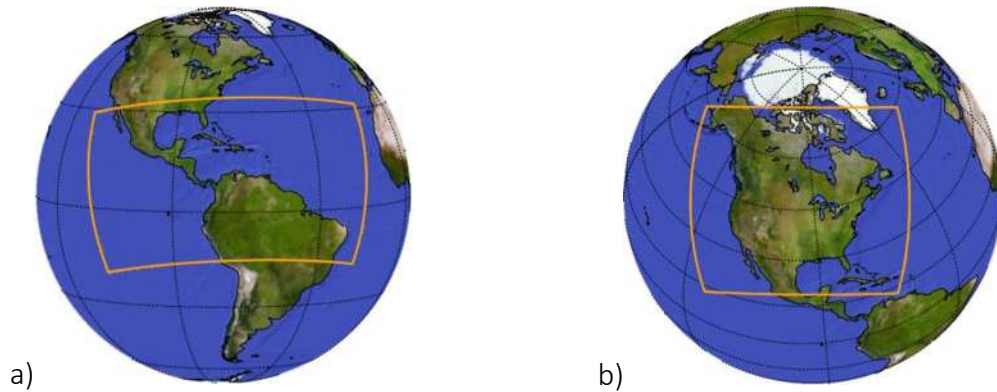


Figura 18. Localización de: a) la región 2 Centroamérica y la región 3 Norteamérica.

Además, se considera que la República Mexicana se subdivide a la vez en 4 zonas que se muestran en la Figura 19, la cuales son noroeste (azul), noreste (amarillo), sur (rojo) y sureste (verde). Los límites de las regiones son: noroeste (23 a 35°N ; 106 a 117°W), noreste (23 a 31°N ; 97 a 106°W), centro/sur (15 a 23°N ; 97 a 106°W) y sureste (15 a 22°N ; 87 a 97°W).

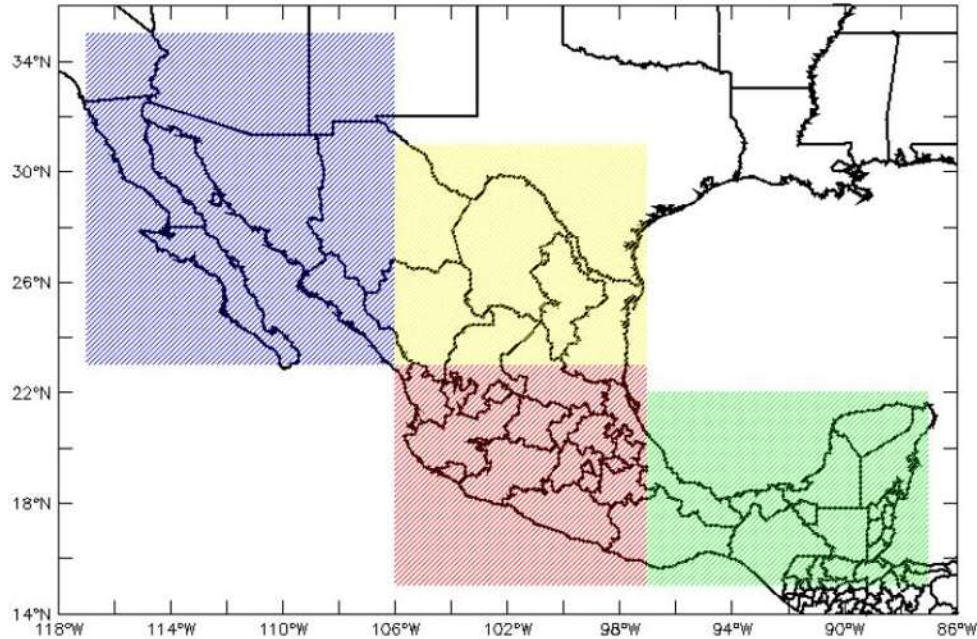


Figura 19. Divisiones de México para la validación de los MCG (Cavazos, et al., 2013).

Según la configuración que se tiene según CORDEX para México, se revisan los informes que se han realizado para así, considerar los MCG que deben utilizarse en el proyecto.

Según Cavazos, et al. (2013), la región 2 es simulada con los distintos MCG por el CICESE, IMTA y CCA-UNAM; en el caso particular del modelo CNRM-CM5 (Francia) es simulada por el IMTA, con un total de 10 corridas para el periodo histórico.

Considerando que el periodo histórico es de 1961 a 2000, se tiene una serie de control proveniente de la base de datos de Climate Research Unit (CRU). Por ello, como se muestra en el diagrama de Taylor en la Figura 20, los MCG deben simular dicha serie por medio de una correlación, siendo 1 el valor más alto.

En este sentido, en la Figura 20 se muestra que el modelo CNRM-CM5 (Modelo 3) tiene una correlación de 0.75 con respecto al CRU (flecha rosa), siendo así la más alta en los modelos; por otra parte, el modelo CSIRO-MK3_6_0 (Modelo 4) tiene una correlación de 0.72 (flecha azul). Para seleccionar el modelo más adecuado, se considera también el valor de la

desviación estándar, de esta forma, el valor del Modelo 3 es de 2.2 mientras que para el Modelo 4 es de 2.9.

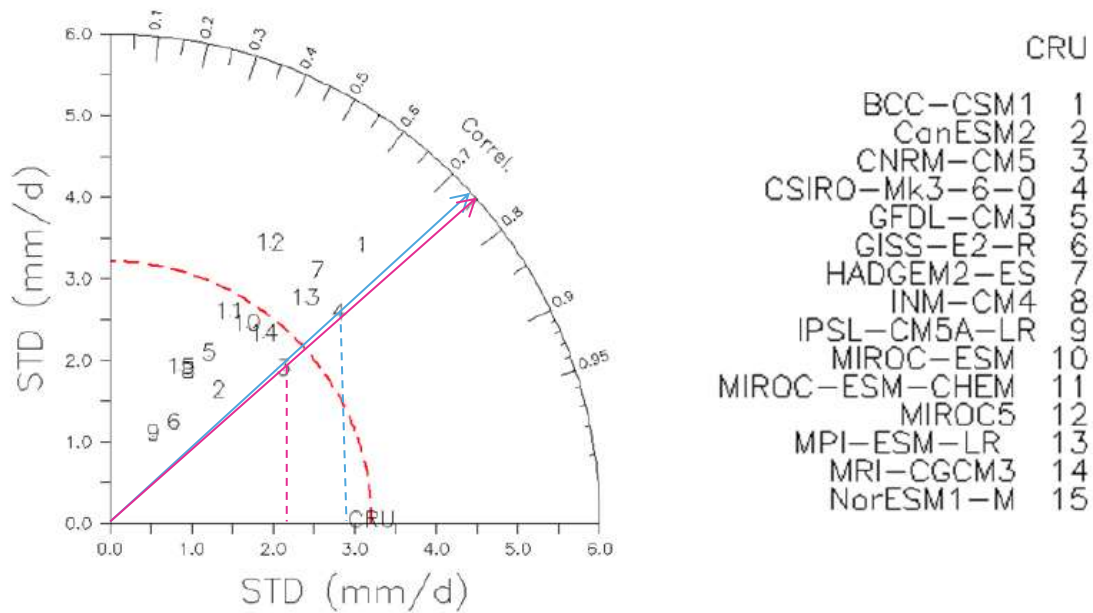


Figura 20. Diagrama de Taylor de precipitación anual para el sur de México, donde se comparan los 15 MCG con el CRU para el periodo de 1961. Se muestra la desviación estándar (Std) y la correlación con respecto al CRU. Adaptado de Cabazos, et al. (2013).

Debido a que la Región 3 Norteamérica cuenta ya con información sobre los MCG, menciona Cavazos, et al. (2013) que es necesario considerar las simulaciones realizadas con base a los modelos dinámicos regionales WRF y a RegCM4 (Regional Climate Model system, versión 2010). Estas modelaciones se parten del trabajo realizado por NA – CORDEX (Mearns, et al., 2019).

Tanto para WRF y RegCM4, se tienen simulaciones para los modelos MPI_ESM_LR, GFDL_CM3 y HADGEM2_ES en una resolución de 25 y 50 km, razón por la cual se consideran estos modelos como escenarios de cambio climático en México.

Además, como se muestra en la Figura 21, los modelos de interés según Cavazos, et al, (2013) para la zona norte son el MCG 5, 7 y 13 (GFDL_CM3, HADGEM2_ES y MPI_ESM_LR respectivamente). En este caso, se tiene que, pese a que los valores de las correlaciones no son altos, son los que mejor representan el modelo CRU.

El modelo de circulación general GFDL_CM3 tiene una correlación de 0.32 (flecha azul); el modelo HADGEM2_ES de 0.34 (flecha rosa) y el MPI_ESM_LR de 0.52 (flecha verde).

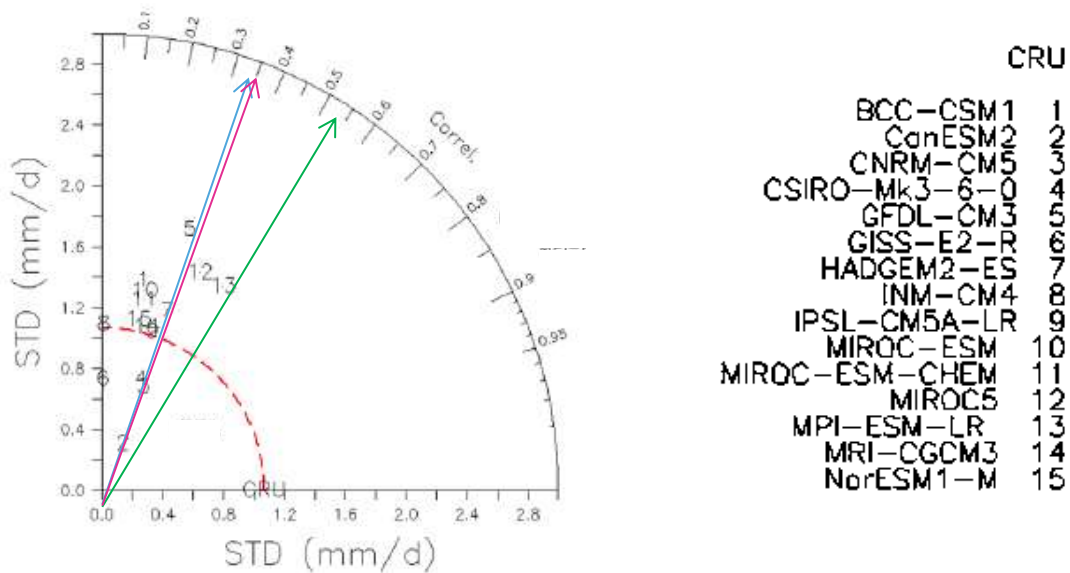


Figura 21. Diagrama de Taylor de precipitación anual para el norte de México, donde se comparan los 15 MCG con el CRU para el periodo de 1961. Se muestra la desviación estándar (Std) y la correlación con respecto al CRU. Adaptado de Cavazos, et al. (2013).

Es importante considerar que solo se muestran los diagramas de Taylor de precipitación debido a que los de temperatura no son representativos.

De esta forma, y debido a que la climatología de referencia utilizada (1961 – 2000), tiene una resolución a 30" x 30", Fernández, et al. (2015) modifican la resolución espacial de cuatro de los quince MCG para incorporar el efecto de la topografía en México.

1. MPI_ESM_LR (Alemania)
2. GFDL_CM3 (Estados Unidos)

3. CNRMCM5 (Francia)
4. HADGEM2_ES (Reino Unido)

Para lograr la resolución de los distintos modelos de circulación general, se utilizaron alrededor de 5227 estaciones meteorológicas de la república mexicana y de Estados Unidos, de las cuales se obtuvo información de precipitación y temperatura.

Los datos climatológicos diarios de las estaciones meteorológicas se procesaron para obtener la serie de control y, las series modificadas a efectos de cambio climático. En este sentido, se tiene que para la zona de estudio y considerando los MCG regionalizados para México a cada treinta segundos (aproximadamente un kilómetro), se trabaja con escenarios seleccionados con base en la Figura 22.

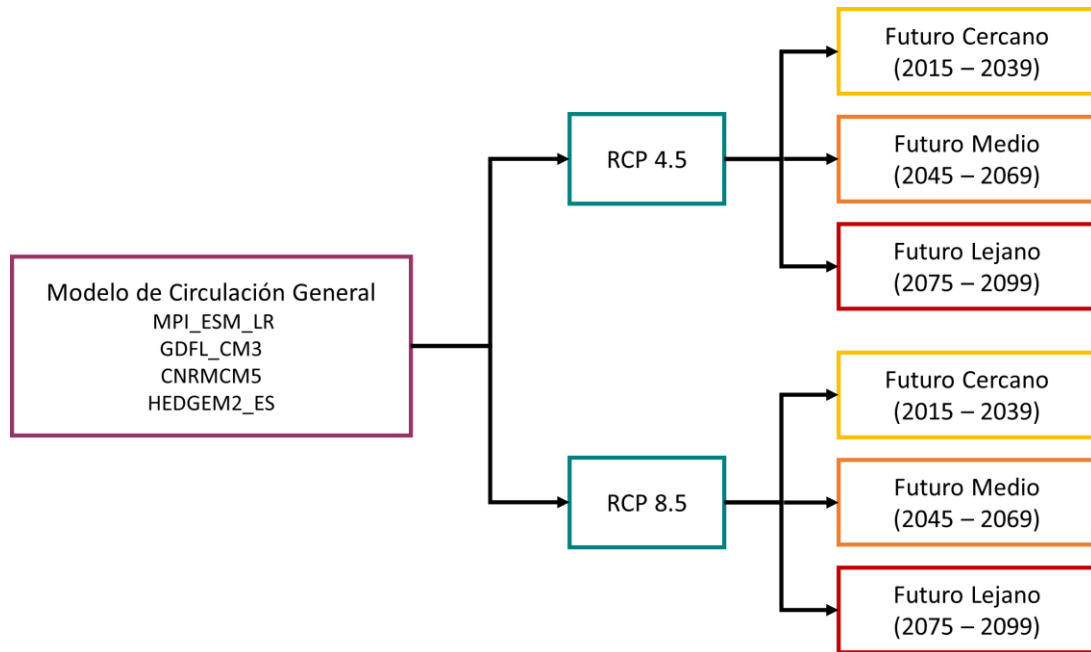


Figura 22. Diagrama de árbol para la selección de escenarios con efecto del cambio climático.

4 RESULTADOS

4.1 ANÁLISIS DE LA ZONA DE ESTUDIO

La extensión total del área de estudio comprende 5265 km², la cual incluye al bosque La Primavera, con una extensión de 40 000 ha, de las cuales 30 500 conforman el APFFLP. A lo largo del tiempo, esta zona ha sido estudiada debido a su importancia, sin embargo, se cuenta con poca información sobre el recurso hídrico. Esto se vuelve imperativo debido a que, como se muestra en la Figura 23, al Este del APFFLP se encuentra la ZMG.

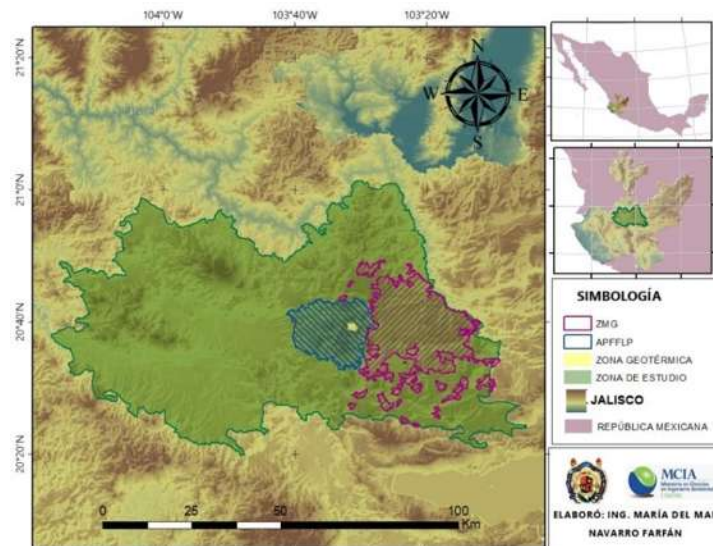


Figura 23. Localización de la zona de estudio.

En la Figura 24 se muestra el mapa del APFFLP, el cual se realizó a través del software Cartalinx, vectorizando el mapa presentado en “Programa de Manejo Área de Protección de Flora y Fauna, México” (SEMARNAT, 2000). Actualmente el Bosque la Primavera se encuentra bordeada por poblaciones de gran impacto social, económico, político y cultural, generando una gran presión a su conservación (Gobierno de Jalisco, 2019).

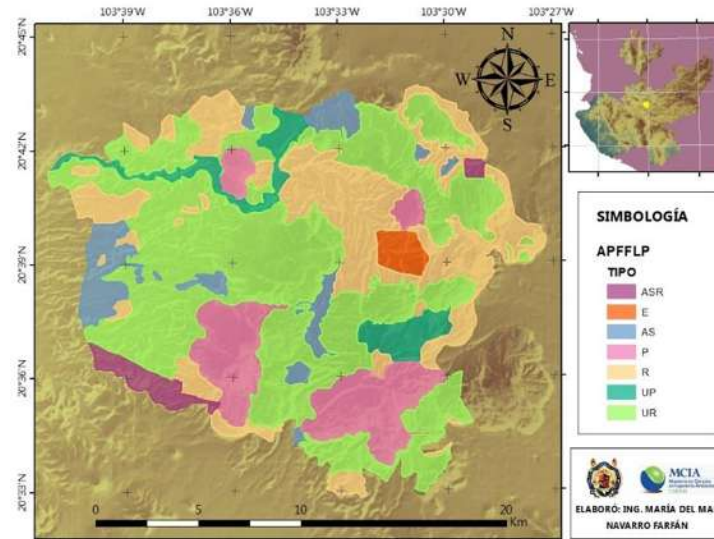


Figura 24. Mapa del APFFLP.

En general, el APFFLP se puede identificar como un área boscosa que genera múltiples bienes y servicios ambientales, principalmente para la ciudad de Guadalajara, proporcionando protección a la cuenca y subcuencas hidrológicas en que se ubica, la cual representa uno de los principales aportes de agua a la región, en particular a la ciudad de Guadalajara. Al tiempo, funciona como sitio fundamental para la captación, filtración y saneamiento de aguas superficiales y subterráneas (Huerta e Ibarra, 2014).

Con base al mapa de la zona de estudio, se delimitan las zonas existentes dentro del APFFLP, las cuales se muestran en la Tabla 11. Es importante mencionar que la zona de uso restringido se considera como zona privada, otorgada por el gobierno al Ejido Adolfo López Mateos. También se debe considerar que al noreste del APFFLP, la zona en color naranja (Figura 24), denominado como de aprovechamiento especial, representa el área donde se ubica el campo geotérmico Cerritos Colorados, el cual representa únicamente el 0.09% del APFFLP.

Tabla 11. Simbología del mapa del APFFLP.

	ASR	Zona de Aprovechamiento de Uso Sustentable de los Recursos Naturales
	E	Zona de Aprovechamiento Especial
	ASR	Zona de Aprovechamiento Sustentable de Agrosistemas
	P	Zona de Protección
	R	Zona de Recuperación
	UP	Zona de Uso Público
	UR	Zona de Uso Restringido

El área de estudio se encuentra asociada a cinco acuíferos (Figura 25): Ameca, Arenal, Atemajac, San Isidro y Toluquilla. Resulta importante considerar que, en México, aproximadamente el 40% del volumen de agua total concesionada para usos consuntivos proviene de aguas subterráneas. Los acuíferos Toluquilla y Atemajac se encuentran en situación de sobreexplotación.

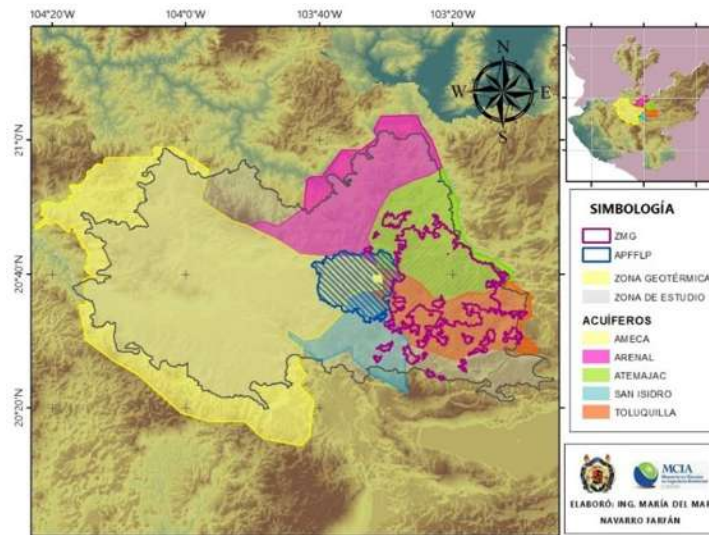


Figura 25. Acuíferos asociados al APFFLP.

Para delimitar la zona de estudio, se vectorizaron en el software Cartalinx las cartas geológicas proporcionadas por el Servicio Geológico Nacional (2019). Las cartas geológicas que se utilizaron fueron: Puerto Vallarta (F13-11) perteneciente a los estados de Jalisco y

Nayarit; Aguascalientes (F13-9) perteneciente a los estados de Aguascalientes, Jalisco, Zacatecas y Nayarit; Guadalajara (F13-12) perteneciente a los estados de Jalisco, Michoacán y Guanajuato.

Al tener una caracterización digital de las masas geológicas en la zona de estudio, se seleccionan aquellas masas geológicas que cubran los acuíferos sobre los que se ubican el APFFLP y la ZMG. De esta forma, se delimita el área de interés y se tiene entonces, que se define por 16 masas geológicas diferentes (Figura 26).

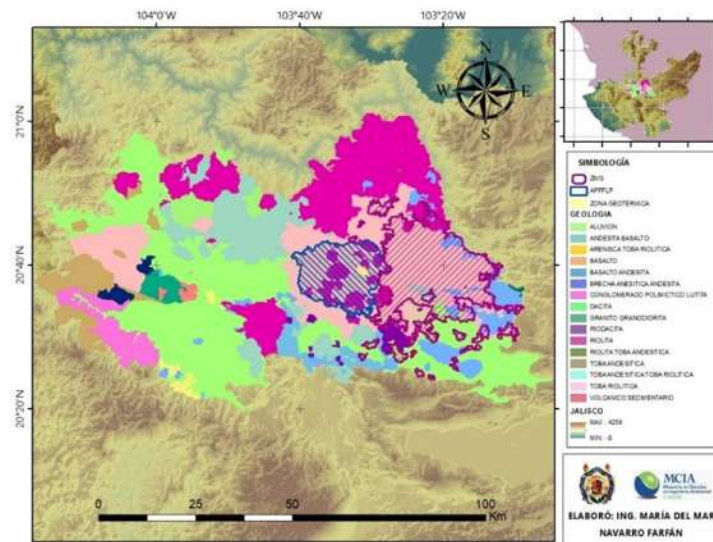


Figura 26. Masas geológicas que conforman la zona de estudio.

Definir la zona de estudio con base a las masas geológicas, permite conocer las características hidrogeológicas para cada zona, por medio del cual, se logra la caracterización de estas masas de una forma sencilla, ya que, de acuerdo a la geología, se le asignan parámetros hidrogeológicos, como son conductividad hidráulica, transmisividad y coeficiente de almacenamiento. El tener un control en los parámetros hidrogeológicos permite que las modelaciones que se realizan en MODFLOW sean fáciles de calibrar, debido a que se establece un rango en los parámetros para cada tipo de geología, lo que permite afectar cada masa geológica por separado.

Como se observa entonces en la Figura 26, el APFFLP y la ZMG comparten el mismo lecho geológico, el cual está constituido por toba riolítica. La zona de estudio está conformada por depósitos de ceniza e ignimbrita volcánica, principalmente por pumita (piedra pómez).

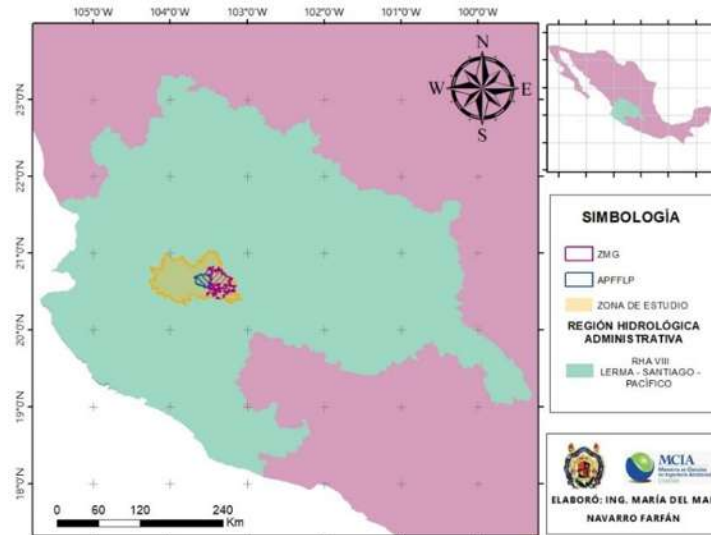


Figura 27. Localización de la zona de estudio en la Región Hidrológica Administrativa VIII.

Es importante también conocer la ubicación hidrológica. De esta forma, se tiene que la zona de estudio se localiza en la zona centro occidente del país, más en concreto en la región Hidrológica – Administrativa VIII: Lerma – Santiago – Pacífico (Figura 27) esta es, la segunda región más importante del país y las actividades económicas que vinculan el uso de agua son principalmente a la agricultura y a los servicios turísticos. Actualmente 82% del volumen de agua concesionado se destina a la agricultura y 9% al uso urbano.

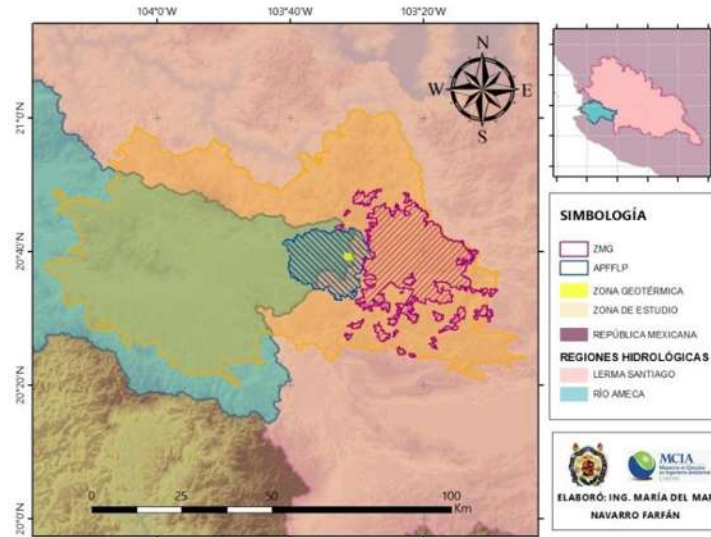


Figura 28. Localización de la zona de estudio en regiones hidrológicas.

En la Figura 28, se muestra que la zona de estudio se encuentra en las regiones hidrológicas Lerma – Santiago y Río Ameca; cuyos ríos más importantes son el Río Santiago y el Río Ameca, respectivamente. Además, en la Figura 29 se observa, que la zona de estudio se localiza en la convergencia de cuatro subregiones hidrológicas: Río Ameca, bajo Lerma, Río alto Santiago y Río Bajo Santiago; estas tres últimas pertenecen a la región hidrológica Lerma – Santiago.

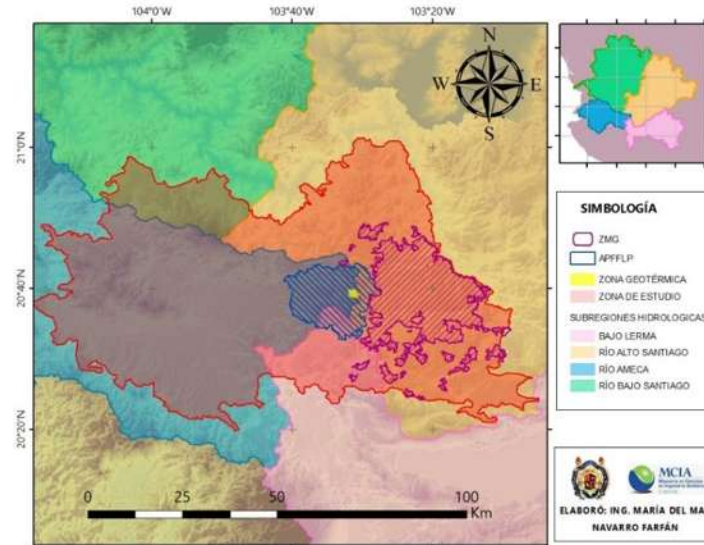


Figura 29. Localización de la zona de estudio en subregiones hidrológicas.

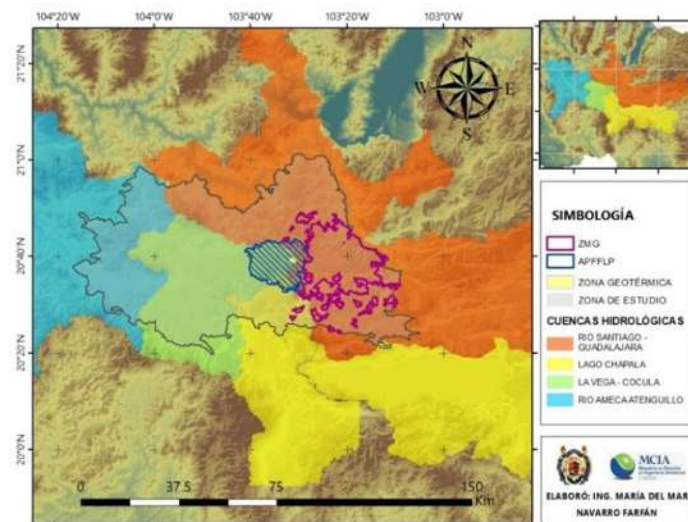


Figura 30. Localización de la zona de estudio en cuencas hidrológicas.

Al igual que con las regiones hidrológicas, se muestran los mapas que contienen la información de las cuencas hidrológicas (Figura 30) y subcuencas hidrológicas (Figura 31). Las cuales fueron creadas a través del MDE que proporciona INEGI, ya que los archivos vectoriales de CONABIO presentaban un desfase espacial.

Las cuencas hidrológicas se encuentran conformadas por subcuencas, algunas de ellas forman parte de la zona de estudio. Se tiene entonces que, para la zona Noreste y Este, se

encuentran las subcuencas hidrológicas Juchipila, Guadalajara – Acatic, San Lucas Evangelista y Atequiza, las cuales forman parte de la cuenca hidrológica Río Santiago – Guadalajara; en la zona sur se localizan la cuenca Lago Chapala, cuya subcuenca es San Marcos y la cuenca La Vega – Cocula con las subcuencas de Ahualulco, Cocula, Presa la Vega y San Martín Hidalgo – San Jerónimo; por último, al poniente de la zona de estudio se localiza la subcuenca San Marcos – Tzatlán, que pertenece a la cuenca Río Ameca.

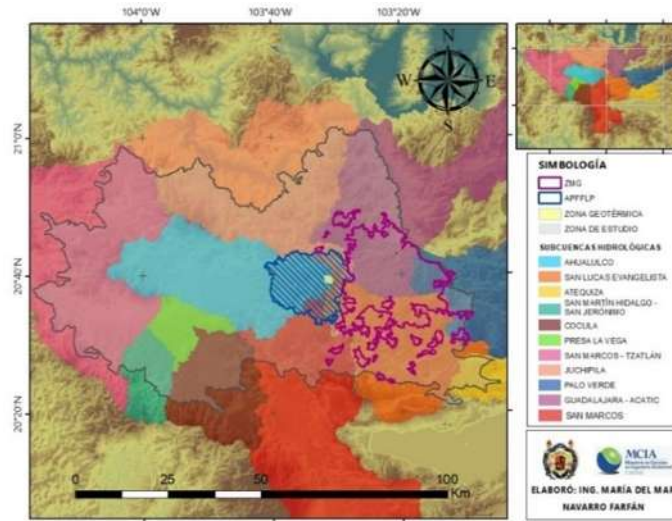


Figura 31. Localización de la zona de estudio en subcuencas hidrológicas.

A partir de la zona de estudio delimitada por las masas geológicas, se obtiene el mapa de municipios que tienen injerencia sobre ella; de esta forma, como se muestra en la Figura 32, se tienen en total 24 municipios, todos ubicados en el estado de Jalisco. Los municipios de Ameca, Etzatlán, San Marcos y Magdalena colindan con el Estado de Nayarit y el municipio de San Cristóbal con el Estado de Zacatecas; así mismo, el municipio de Tequila colinda con los Estados de Nayarit y Zacatecas.

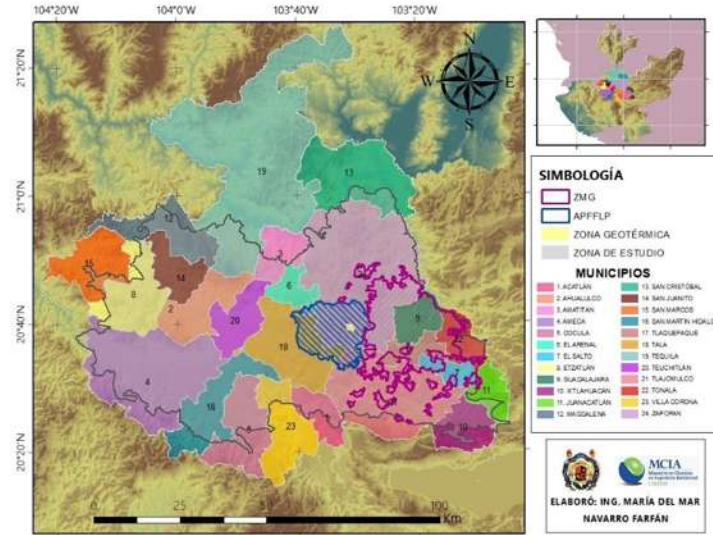


Figura 32. Municipios que abarca la zona de estudio.

A partir de los municipios que conforman la zona de estudio, se obtiene la cantidad de localidades que hay en la zona y, como se muestra en la Figura 33, se tiene un total de 635, donde la mayor concentración de ellas se encuentra en la ZMG y en la periferia del APFFLP.

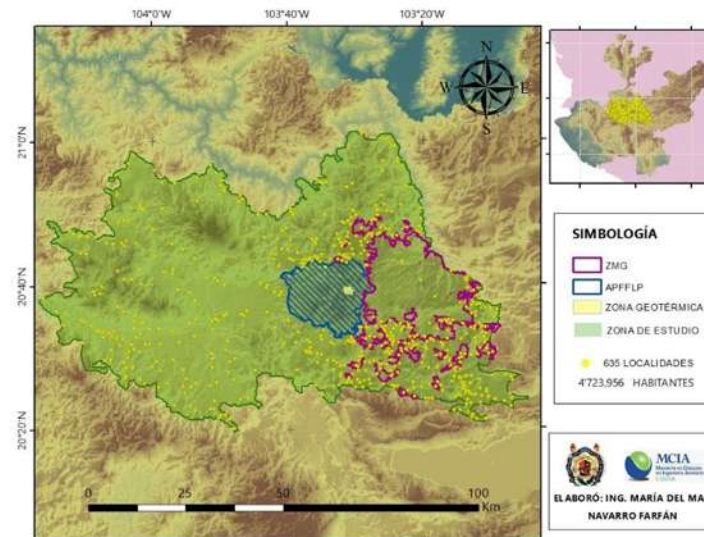


Figura 33. Localidades que abarca la zona de estudio.

Como se observa en la Figura 34, las poblaciones que se encuentran al Suroeste de la zona de estudio y al Sureste de la ZMG, corresponden a las áreas donde se localizan los distritos de riego Estado de Jalisco (013) y Jalisco Sur (094).

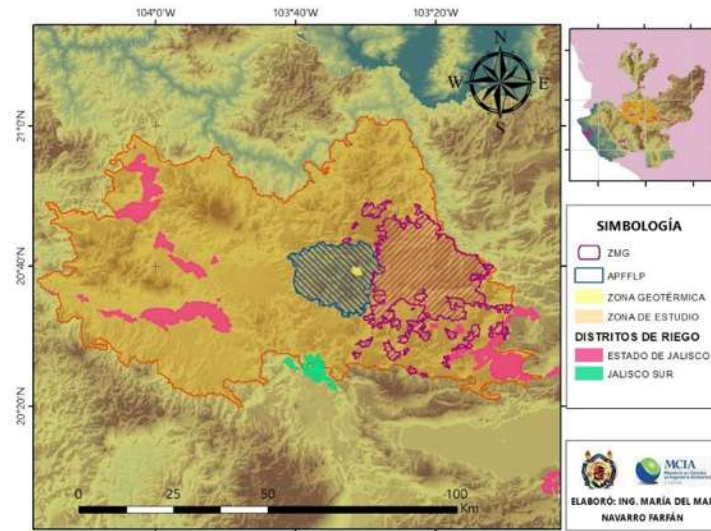


Figura 34. Localización de los distritos de riego Estado de Jalisco y Jalisco Sur.

Aunque los distritos de riego se encuentran delimitados, la práctica agrícola se localiza al poniente de la zona de estudio (Figura 35).

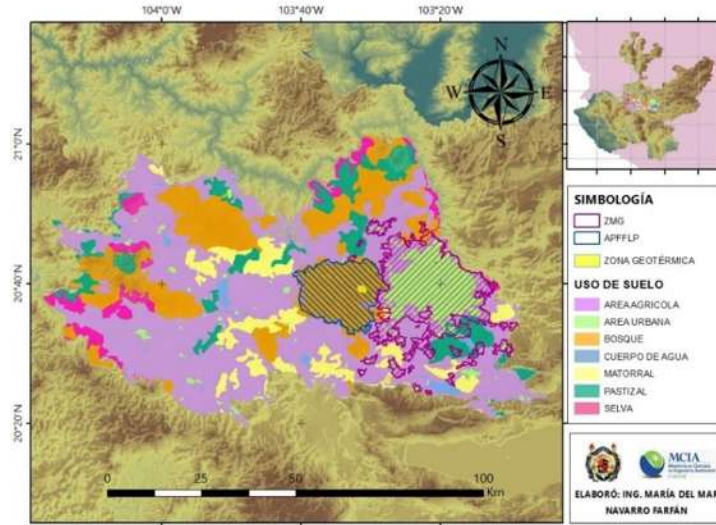


Figura 35. Uso de suelo en las masas geológicas que conforman la zona de estudio.

Los principales cultivos en el distrito de riego 013 son maíz, avena, trigo, arroz y sorgo como cultivos temporales y, para el distrito de riego 094, el principal cultivo temporal es el maíz elotero. Sin embargo, el principal cultivo perenne para ambas zonas es la caña de azúcar, la cual presenta un problema importante para el APFFLP debido a que es común realizar un incendio controlado para poder realizar el corte del cultivo con facilidad y existen ocasiones que esta práctica se sale de control. Como se muestra en la Tabla 12, el principal uso de suelo que se tiene en la zona es el agrícola, el cual representa casi la mitad de la superficie, seguido por el bosque. Los principales bosques que se tienen en la zona pertenecen al tipo encino, encino – pino, pino y tropical caducifolio (selva).

Tabla 12. Diferentes usos del suelo en la zona de estudio.

Uso de Suelo	Área (km ²)	Área (%)
Área Agrícola	2710.6	48.5%
Área Urbana	397.7	7.1%
Bosque	1254.4	22.4%
Cuerpo de Agua	66.8	1.2%
Matorral	421.2	7.5%
Pastizal	505.0	9.0%
Selva	234.6	4.2%
Total	5590.3	100%

En la Figura 36, se muestran los tipos de suelo en la zona de estudio, donde se observa en color amarillo el tipo feozem y el tipo regosol en color rosa.

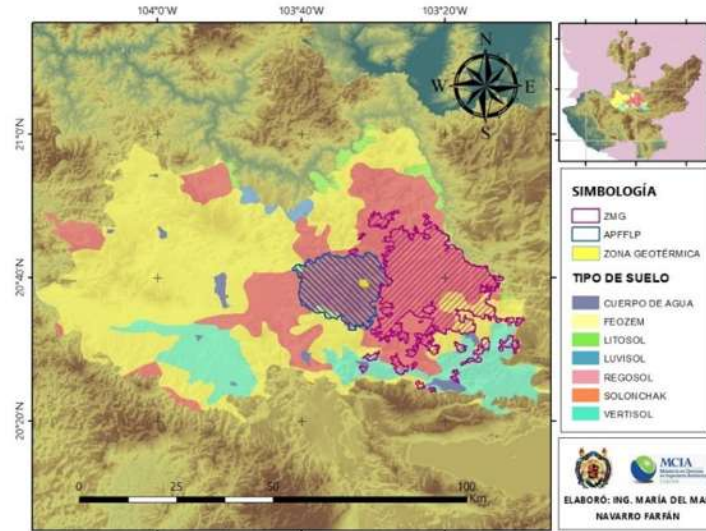


Figura 36. Tipo de suelo en las masas geológicas que conforman la zona de estudio.

El Feozem es un suelo rico en materia orgánica y con buen drenaje y ventilación; en general son poco profundos y se recomiendan para agricultura perenne. Comparando la Figura 35 y la Figura 36 se observa que, las zonas agrícolas se localizan en las áreas que tienen el tipo de suelo feozem.

Como se observa en la Figura 36, el APFFLP y la ZMG se conforman por el tipo Regosol, que se localiza en zonas con fuertes procesos erosivos que provocan un continuo rejuvenecimiento. Además, según Huerta (2014), el 80% del suelo involucrado en el APFFLP presenta un contenido de materia orgánica menores al 2%, lo cual no es típico para un bosque.

Para realizar la modelación superficial, es necesario considerar que las cuencas superficiales deben cumplir por completo las masas geológicas que representan la zona subterránea. De esta forma, se generaron 30 microcuencas (Figura 37), las cuales superan la

superficie de la zona de estudio y de esta forma, se garantiza que toda la zona cuente con la recarga natural obtenida por las modelaciones con el MPE.

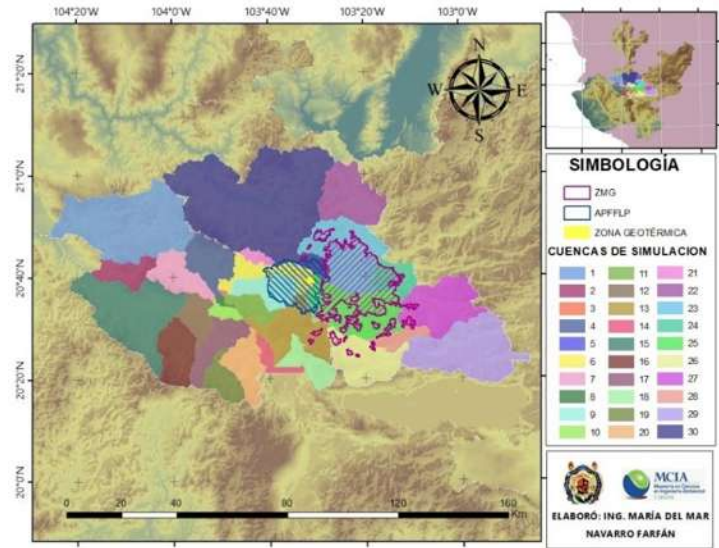


Figura 37. Cuencas que cubren la zona de estudio.

En el caso de la modelación subterránea, es necesario considerar todas las extracciones y recargas para los distintos usos que se presentan en la zona (Figura 38). Para ello, se utiliza la base de datos del REPDA (2018), la cual otorga los volúmenes concesionados en la zona, así como el uso que se le da. Lo más importante es distinguir entre el uso urbano, industrial y agrícola; con ellos, se puede además obtener la recarga por retorno de riego, considerándolo como 20% del volumen concesionado para el uso agrícola. En la Tabla 13 se indican un total de 5734 pozos en la zona de estudio.

Tabla 13. Volúmenes concesionados por el REPDA en la zona de estudio.

Uso que ampara el título	Pozos	Pozos %	Volumen Hm ³ /año	Volumen %
Agrícola	3345	58.34	322.23	49.62
Público Urbano	652	11.37	184.46	28.40
Diferentes Usos	590	10.29	34.8	5.26
Industrial	463	8.07	53.59	8.26

Servicios	448	7.81	51.38	7.91
Pecuario	149	2.60	1.31	0.20
Doméstico	84	1.46	2.13	0.33
Acuicultura	2	0.03	0.10	0.02
Agroindustrial	1	0.02	0.05	0.01
Total	5734	100	649.4	100

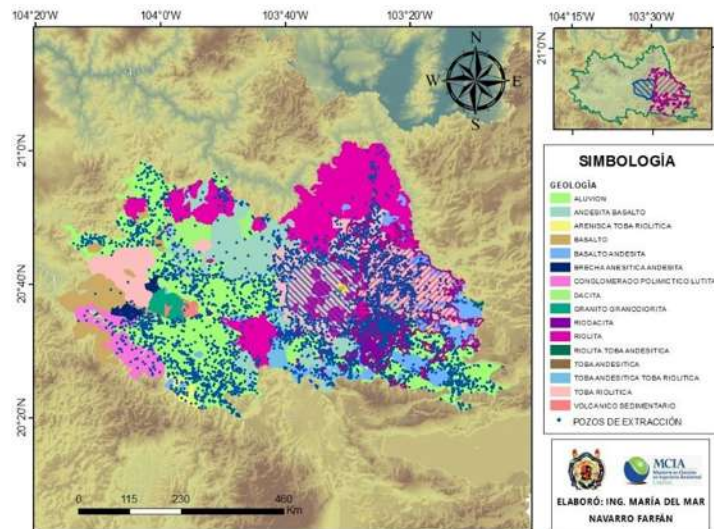


Figura 38. Pozos de extracción concesionados por el REPDA en la zona de estudio.

4.2 RECOPIACIÓN DE DATOS PARA LA MODELACIÓN SUPERFICIAL

La selección de estaciones meteorológicas a utilizar en el estudio se logra a partir de los resultados obtenidos con las pruebas de consistencia que se presentaron en el capítulo de metodología. El tener una estación homogénea e independiente permite reducir la incertidumbre en los datos que se ingresan al modelo, en este caso, las series de precipitación y temperatura.

A continuación, en la Tabla 14 se muestran las características principales en las estaciones y sus resultados en las pruebas de consistencia. En total, se utilizaron 17 estaciones que tienen relación con las cuencas en estudio y que, además de cubrir las treinta cuencas de simulación, abarcan las cuencas generadas con las estaciones hidrométricas que se localizan al oriente de la zona de estudio. Como se observa, en las estaciones meteorológicas se utilizaron únicamente las estaciones que cumplían con la homogeneidad e independencia. En total, se probaron 35 estaciones y se estudiaron cerca de 175 estaciones en la zona.

Tabla 14. Estaciones meteorológicas utilizadas para la modelación hidrológica superficial.

ESTACIÓN	NOMBRE	SERVICIO	EFECTIVO	VACÍOS	PMA	PRUEBAS EN LAS ESTACIONES	
						LÍMITES DE ANDERSON	SECUENCIAS Y HELRMERT
				%			
14017	ATOTONILCO EL ALTO, JAL	72.3	66.0	8.8	867.7	INDEPENDIENTE	HOMOGÉNEO
14038	CUIXTLA-JAL	60.6	60.2	0.7	867.4	INDEPENDIENTE	HOMOGÉNEO
14047	EL FUERTE-JAL	54.0	51.1	5.4	874.0	INDEPENDIENTE	HOMOGÉNEO
14064	EX HACIENDA SAN DIEGO, JAL	39.3	37.5	4.5	827.8	INDEPENDIENTE	HOMOGÉNEO
14066	GUADALAJARA (DGE)-JAL	84.3	77.5	8.1	978.6	INDEPENDIENTE	HOMOGÉNEO
14072	HUERTA VIEJA-JAL	64.3	61.3	4.5	853.1	INDEPENDIENTE	HOMOGÉNEO
14073	IXTLAHUACAN DEL RIO-JAL	61.8	56.5	8.5	859.8	INDEPENDIENTE	HOMOGÉNEO
14076	JESUS MARIA, JAL	70.9	67.2	5.3	864.3	INDEPENDIENTE	HOMOGÉNEO
14080	LA CUÑA, JAL	65.6	63.2	3.7	794.6	INDEPENDIENTE	HOMOGÉNEO
14086	LA MANZANILLA DE LA PAZ, JAL	64.3	54.3	15.6	949.2	INDEPENDIENTE	HOMOGÉNEO

14087	LA RED, JAL	53.6	52.2	2.6	861.2	INDEPENDIENTE	HOMOGÉNEO
14121	GUADALAJARA (SMN), JAL	42.0	38.0	9.5	944.6	INDEPENDIENTE	HOMOGÉNEO
14125	SAN GREGORIO, JAL	70.7	67.1	5.1	1292.3	INDEPENDIENTE	HOMOGÉNEO
14136	SANTA ROSA, JAL	59.83	55.67	7.0	873.13	INDEPENDIENTE	HOMOGÉNEO
14140	TALPA DE ALLENDE, JAL	56.4	38.7	31.5	903.6	INDEPENDIENTE	HOMOGÉNEO
14349	EL RODEO, JAL	34.5	32.5	5.8	915.6	INDEPENDIENTE	HOMOGÉNEO
32143	GARCIA DE LA CADENA-ZAC	30.00	27.25	9.2	806.70	INDEPENDIENTE	HOMOGÉNEO

Se realizaron los polígonos de Thiessen para las estaciones seleccionadas (Figura 39) y de esta forma, se determinó la relación entre cuencas y estaciones.



Figura 39. Delimitación de los polígonos de Thiessen para las 30 cuencas de simulación.

De las estaciones seleccionadas, se obtuvieron las series de precipitación y temperatura, las cuales tienen datos faltantes (representado como el porcentaje de vacíos en la Tabla 14). Estas series se completaron por medio de los métodos de llenado IDW (para la precipitación) y media aritmética (para la temperatura).

Pese a que se realiza un llenado de datos, es importante considerar que mientras sea más bajo el porcentaje de datos a llenar, menos incertidumbre se ingresa a los modelos. Una vez

que se tienen llenas las series de precipitación y temperatura, se procede con la modelación superficial; en la Tabla 15 se muestra la información que se ingresa para cada modelo.

Tabla 15. Información de entrada para los modelos superficiales Témez, HBV y SMM. Los datos pueden ser para una cuenca o para varias, según se requiera en la modelación.

MODELO	DATOS DE ENTRADA
TÉMEZ	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Cuenca y punto de salida de la cuenca (archivos vectoriales) ◦ Área de la cuenca ◦ Serie de precipitación ◦ Serie de evapotranspiración
HBV	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Cuenca y punto de salida de la cuenca (archivos vectoriales) ◦ Área de la cuenca ◦ Serie de precipitación ◦ Serie de evapotranspiración
SMM	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Cuenca y punto de salida de la cuenca (archivos vectoriales) ◦ Río principal (archivo vectorial) ◦ Relación entre área de la cuenca y uso de suelo ◦ Serie de precipitación ◦ Serie de temperatura ◦ Latitud en la que se encuentra la cuenca

Entonces, de acuerdo con la Tabla 15; para los modelos de EvalHid (Témez y HBV), se ingresó directamente la serie de evapotranspiración, la cual fue calculada por medio del método de Thornthwaite y para el SMM se ingresa la serie de temperatura; y se calculó la evapotranspiración por medio del método Penman – Monteith, a través del software WEAP.

Las series de evapotranspiración serán entonces, diferentes. Sin embargo, la variación mensual entre los dos métodos es en promedio de 1.8 mm mensuales, siendo HBV el valor superior. Dado que la diferencia es pequeña y, que se tiene una falta de información importante por lo cual no se puede calcular de forma manual la evapotranspiración por el método de Penman - Monteith, se optó por mantener esta diferencia y continuar con la modelación.

4.3 RESULTADOS DE LA MODELACIÓN SUPERFICIAL

Para seleccionar las estaciones hidrométricas, se tiene que, a partir de la zona de estudio, se realizó un buffer de 100 km y dentro se encontraron 106 estaciones (Figura 40), de ellas únicamente existen 37 estaciones en la cabecera de los ríos y, por tanto, se consideraron a régimen natural. Al revisarlas, se tiene que únicamente 13 estaciones hidrométricas podían utilizarse para la modelación.

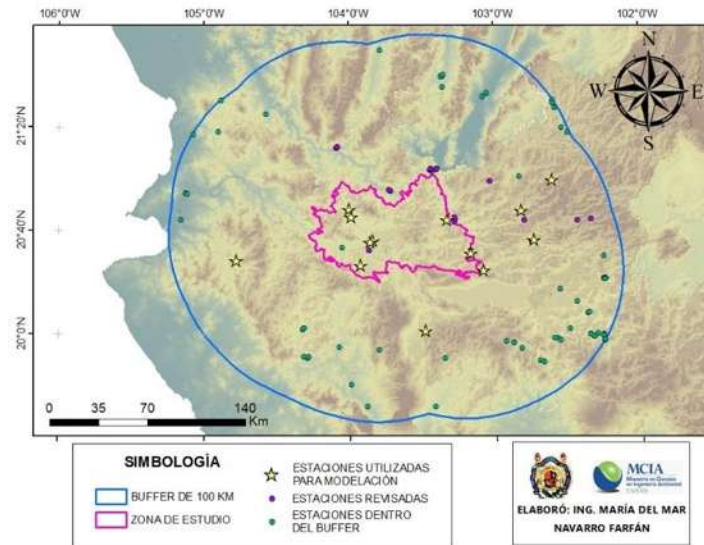


Figura 40. Localización de las estaciones hidrométricas localizadas dentro de un buffer de 100 km con respecto a la zona de estudio.

Una vez que se tuvieron seleccionadas las estaciones, se obtuvieron los módulos de aportación. El módulo relativo o caudal específico, el cual mide la relación entre el escurrimiento presente en la cuenca y el área la misma; este parámetro debe encontrarse en el rango establecido de 5 a 15 L/s·km² (Sánchez, 2017) para ser considerado como un escurrimiento medio (sin escasez ni exceso). También se calculó el coeficiente de escurrimiento (Ce) considerando únicamente la lámina precipitada y la lámina escurrida, el cual debe ser menor a 1 (Chow, et al., 1994). Por último, se calculó la lámina relativa anual, la cual se compara con la lámina precipitada y esta relación debe ser menor a 1.

También se calcularon el gasto mínimo (Q_{min}) y el gasto ecológico (Q_{eco}) anuales, los cuales deben ser menores al gasto anual observado para que de esta forma la cuenca cumpla con sus necesidades para con la naturaleza.

Como se muestra en la Tabla 16, se tiene que, únicamente 4 cuencas se encontraron dentro del rango establecido para el módulo relativo, que representa el 11% de las estaciones revisadas, así mismo, se observó que el módulo relativo engloba todos los módulos de aportaciones. Con estas estaciones son con las que se trabaja (Figura 41).

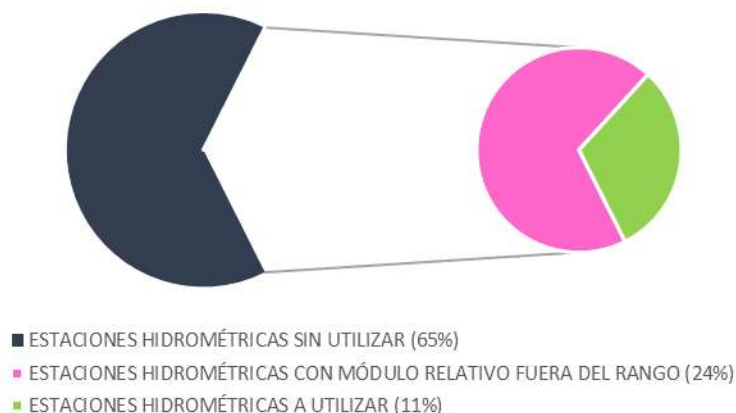


Figura 41. Diagrama de la relación entre las 37 estaciones hidrométricas de cabecera y aquellas que pueden utilizarse.

Tabla 16. Módulos de aportación de las estaciones hidrométricas con posible uso.

ESTACIÓN	APORTACIÓN ANUAL	SUPERFICIE DE CUENCA	VOLUMEN PRECIPITADO	MÓDULO RELATIVO	Ce	LÁMINA EQUIVALENTE	Q_{min}	Q_{eco}
	Hm ³	km ²	Hm ³	L/s.km ²		mm	Hm ³	Hm ³
12278	16	147	150	3.59	0.11	112	1.5E-04	3.7E-04
12288	16	3	3	153.41	5.3	4772	3.0E-06	7.6E-06
12371	57	390	382	4.67	0.15	145	3.8E-04	9.5E-04
12515	34	8	7	145.33	5.02	4520	6.8E-06	1.7E-05
12559	43	282	254	4.88	0.17	152	2.5E-04	6.4E-04
12573	245	220	201	35.78	1.22	1113	2.0E-04	5.0E-04
12607	87	299	270	9.34	0.32	290	2.7E-04	6.8E-04
14003	14	18	16	26.19	0.89	814	1.6E-05	4.1E-05
14011	41	221	211	5.94	0.19	185	2.1E-04	5.3E-04

14015	23	124	119	6.02	0.19	187	1.2E-04	3.0E-04
14018	11	126	118	2.85	0.09	89	1.2E-04	3.0E-04
14020	68	153	144	14.3	0.47	445	1.4E-04	3.6E-04
14029	76	492	734	4.96	0.10	154	7.3E-04	1.8E-03

Para determinar si las series podían ser utilizadas para la simulación con un Modelo de Precipitación – Escorrentía (MPE), se revisaron 9 estaciones hidrométricas, de tal forma que se pudiera tener apoyo de más cuencas, las cuales se encuentran distribuidas dentro y alrededor de la zona de estudio; para el caso, se consideraron algunas características, como los resultados de las pruebas de persistencia y de homogeneidad de la serie anual, así como la cantidad de datos con los que se contaba (Tabla 17), la tendencia de los mismos y con ella, la presencia de algún salto que pudiera mostrar la existencia de alguna obra en la zona que alterara el comportamiento de la serie del escurrimiento.

Tabla 17. Resultados de las pruebas de homogeneidad y persistencia en las 9 estaciones hidrométricas que pueden ser utilizadas en la zona de estudio.

E.H.	Homogénea	Persistente	Periodo de Información	Años Continuos
12 278	NO	NO	1942 – 1993	38
12 371	SI	NO	1941 - 1995	46
12 559	SI	NO	1962 - 1972	10
12 607	SI	NO	1966 - 1992	27
14 011	SI	NO	1957 - 2010	48
14 015	NO	SI	1962 - 2014	47
14 018	SI	SI	1963 - 1988	22
14 020	SI	NO	1939 - 1985	16
14 029	SI	NO	1986 - 2014	9

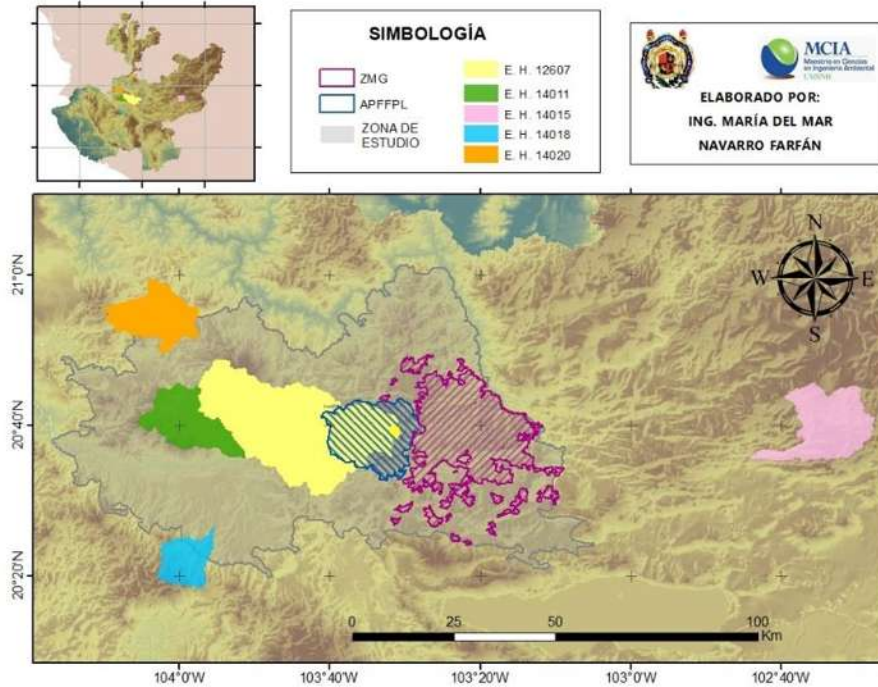


Figura 42. Cuencas de simulación en régimen natural.

Como se observa en la Figura 42, las cinco cuencas que se seleccionaron según los modos de aportación y la revisión visual fueron las 12 607, 140 11, 14 015, 14 018 y 14 020; estas cuencas son las que se utilizaron en la modelación superficial.

Al revisar las series de escurrimiento en las estaciones, se encontró que algunas de ellas tienen datos de escurrimiento que no corresponde, ya sea por los caudales igual a cero en los meses de estiaje, el mismo caudal durante todo el año (que muestra que la cuenca se encuentra controlada) y datos incoherentes, como que los caudales altos se presentan en los meses húmedos, debieran ser aquellos de los meses secos y viceversa. Sin embargo, dado que, en México, no contamos con la suficiente cantidad o calidad de información, se trató de simular la mayor cantidad de cuencas para observar el comportamiento de los resultados, en relación con los problemas que presenta la serie.

4.3.1 RESULTADOS DE LA MODELACIÓN SUPERFICIAL CON EL MODELO DE TÉMEZ

Para realizar la simulación superficial, se utilizó el MPE Témez para calibrar las cuencas que presentaron un valor aceptable del módulo relativo y, pese a que el módulo de la cuenca 14018 es menor a 5, se simula la cuenca debido a que se encuentra en el sur de la zona de estudio y se intentaba cubrir la mayor cantidad del área de interés.

Dado que Témez es un modelo de dos tanques con un sistema simplificado, se tiene que, al comparar los volúmenes simulados con los observados, las series tienen un comportamiento y una tendencia adecuada en las gráficas (Figura 43 y Figura 44).

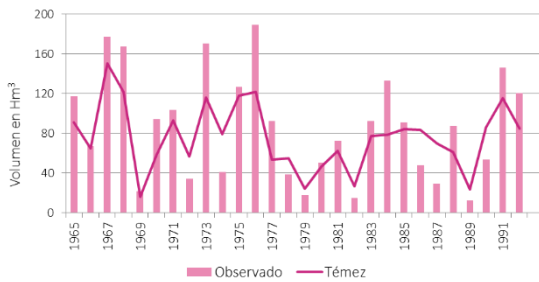


Figura 43. Resultados de los volúmenes anuales obtenidos con el modelo Témez para la cuenca 12 607.

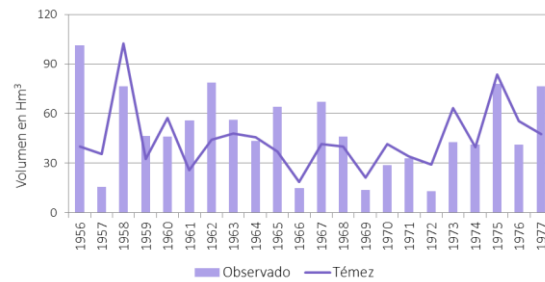


Figura 44. Resultados de los volúmenes anuales obtenidos con el modelo Témez para la cuenca 14 011.

Sin embargo, para las cuencas 14 015 (Figura 45), 14 018 (Figura 46) y 14 020 (Figura 47), el comportamiento de los volúmenes simulados quedan por encima de los observados, lo que demuestra la necesidad de mejorar la calibración con otro MPE debido al exceso de agua presente en el sistema.

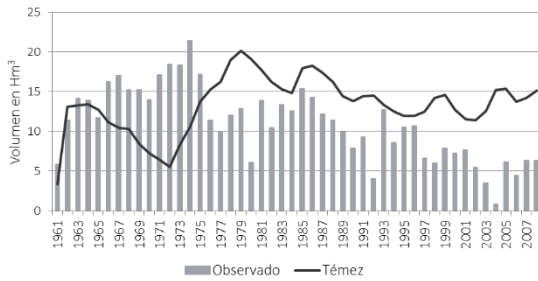


Figura 45. Resultados de los volúmenes anuales obtenidos con el modelo Témez para la cuenca 14 015.

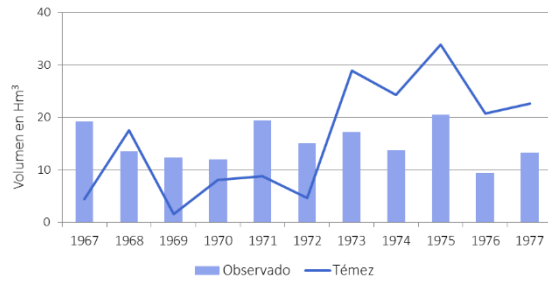


Figura 46. Resultados de los volúmenes anuales obtenidos con el modelo Témez para la cuenca 14 018.

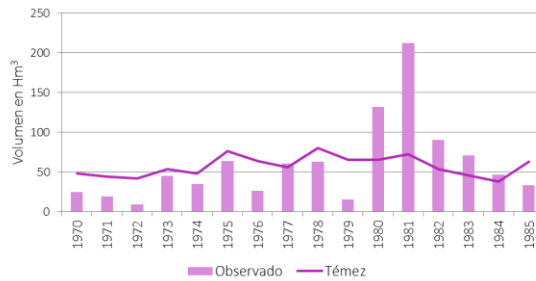


Figura 47. Resultados de los volúmenes anuales obtenidos con el modelo Témez para la cuenca 14 020.

Tabla 18. Resultados de los indicadores de ajuste obtenidos a partir de la simulación con el modelo Témez.

CUENCA	INDICADORES DE AJUSTE				INDICADOR MEDIO	PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN			
	NSE	ln NSE	r	CS		H MAX	Ce	I MAX	α
12 607	0.77	0.86	0.88	0.98	0.87	213	0.697	22	0.419
14 011	0.56	0.78	0.75	0.99	0.77	290	0.200	83	0.751
14 015	-0.62	-0.08	-0.08	0.22	-0.14	469	0.250	1500	0.021
14 018	-0.01	0.59	0.57	0.99	0.54	705	0.210	221	0.869
14 020	0.11	0.35	0.41	0.91	0.44	53	0.378	552	0.429

De la misma forma, los indicadores de ajuste muestran resultados aceptables (Tabla 18) en tres (12 607, 14 011 y 14 018) de las cinco cuencas considerando el indicador medio y el

coeficiente de simetría, pero solamente dos (12 607 y 14 011), presentan valores establecidos como bueno.

Según los datos de geología con que se cuenta (Servicio Geológico Mexicano, 2000), la zona de estudio está conformada principalmente por materiales de origen volcánico; en este caso, en la visita de campo que se realizó se observó que la geología se conforma de piedra pómez, la cual se caracteriza por ser de baja densidad y porosa; con ello, si se considera que las cuencas de cabecera con una calibración más adecuada son aquellas con las que se parametriza toda la zona, se puede homogeneizar el área y de esta forma, la simulación se vuelve menos compleja.

Aun así, se observó que existe un excedente en la serie de volúmenes simulados, lo que indica que existe una infiltración profunda que no considera el modelo Témez. Entonces, lo que se propuso fue utilizar un modelo de 3 tanques que tenga a bien calcular de forma independiente el flujo subsuperficial y el subterráneo, ya que se conoce la existencia masas geológicas (acuíferos) que reciben recarga de la superficie y la descarga estos se encuentra fuera de la cuenca.

Como se presentó en la metodología, EvalHid cuenta con el modelo HBV, el cual es modelo de tres tanques; en este caso se migraron del modelo todas las cuencas para volver a simular y observar el comportamiento. Sin embargo, se requiere partir de las cuencas 12 607, 14 011 y 14 018, las cuales obtuvieron las calibraciones con los mejores indicadores de bondad de ajuste para que de esta forma, se obtenga una cuenca base, la cual ayudará a homogeneizar los parámetros en la zona de estudio.

4.3.2 RESULTADOS DE LA MODELACIÓN SUPERFICIAL CON EL MODELO HBV

Al tener un MPE que considerara el porcentaje que se infiltra y el porcentaje que escurre, las calibraciones pudieron ser más finas y de más calidad.

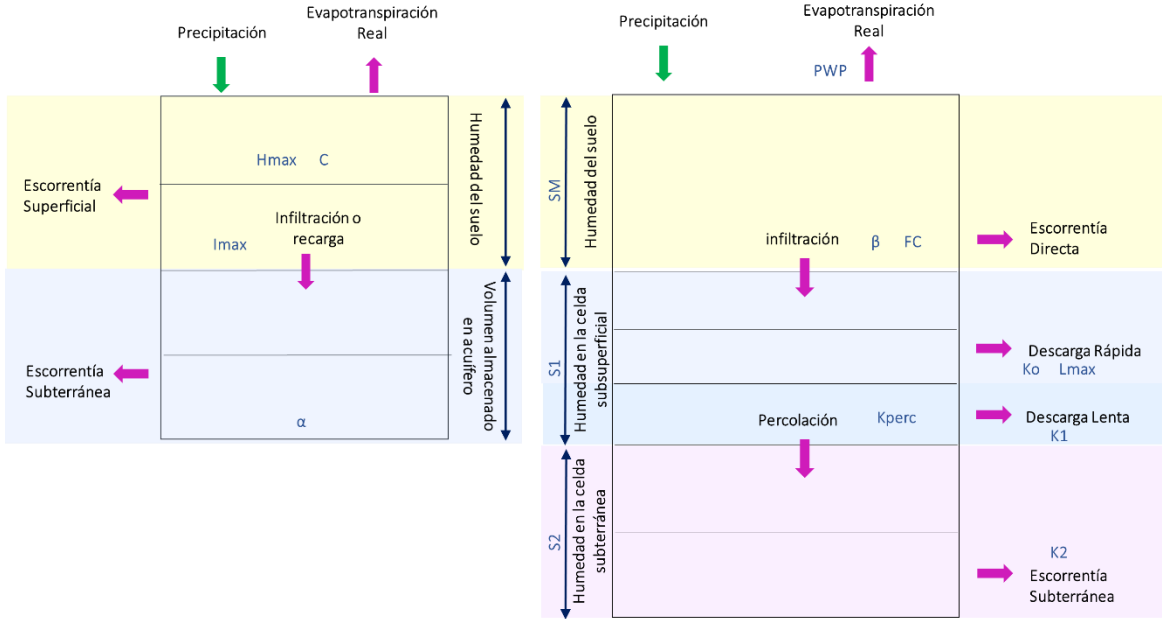


Figura 48. Comparación entre el modelo Témez y HBV.

Esto se logró al migrar del MPE Témez a HBV, ya que el modelo HBV si considera una aportación subterránea. Como se aprecia en la Figura 48, el modelo Témez es una representación de los primeros dos tanques del modelo HBV, por lo que, para migrar de un modelo a otro, fue necesario tomar la cuenca que obtuvo los mejores resultado, de tal forma que no presentara un excedente importante en la simulación y así, se considere que la infiltración profunda era nula; de esta forma, el modelo HBV se convirtió en una representación del modelo Témez para así, lograr una calibración similar.

Se realizó la modelación de cada cuenca de forma independiente y debido a la calidad de los resultados que se obtuvieron, se decidió optar por utilizar la cuenca que mejor representara los valores observados de forma gráfica y numérica. Pese a que no se tenía un módulo relativo dentro del rango establecido, se consideró que la cuenca 14 018 era aquella que puede tener un mejor comportamiento con respecto las otras cuencas. Entonces, la cuenca 14 018 se convierte en la base de las demás cuencas de simulación. De esta forma, se toman los parámetros que se utilizaron y se trasladan a las otras cuatro cuencas de simulación, para de esta forma, recalibrar dichas cuencas considerando la aportación al acuífero de manera profunda (con el parámetro Kperc).

Cabe recordar que la información con la que se cuenta en la zona de estudio es escasa y limitada y únicamente se contaba con datos mensuales para las series de escurrimiento, lo que no permitió tener una modelación adecuada debido a que el modelo HBV está formulado para realizarse con datos diarios.

Como se observó en la Figura 46, fue necesario demostrar para la cuenca 14 018 que se infiltra un volumen importante en la zona y esto se pudo demostrar debido a que el K_{perc} fue alto, por el contrario, el K_{perc} para las cuencas 12 607 y 14 011 tuvo ser muy bajo.

Una vez que se tuvieron todas las cuencas simuladas, se expone en la Tabla 19 los parámetros que se utilizan en el MPE HBV para todas las cuencas, así como el valor del parámetro K_{perc} y los resultados de los indicadores de ajuste que se obtienen en las calibraciones (Tabla 20).

Tabla 19. Parámetros utilizados en las modelaciones con el MPE HBV para las distintas cuencas de simulación.

β	FC	PWP	Lmax	K1	K0	K2
1.57	245.6	15.2	4.8	0.135	0.116	0

Tabla 20. Resultados de las calibraciones y K_{perc} utilizado para las cuencas de simulación.

CUENCA	K_{perc}	INDICADOR DE AJUSTE				INDICADOR MEDIO
		NSE	ln NSE	r	CS	
12 607	0.1404	0.23	0.39	0.50	0.92	0.51
14 011	0.1095	-0.06	0.24	0.21	0.95	0.33
14 015	0.4506	-1.85	-2.12	0.04	0.95	-0.75
14 018	0.6801	-0.44	-0.80	0.38	0.99	0.04
14 020	0.0010	-0.17	0.04	0.25	0.72	0.21

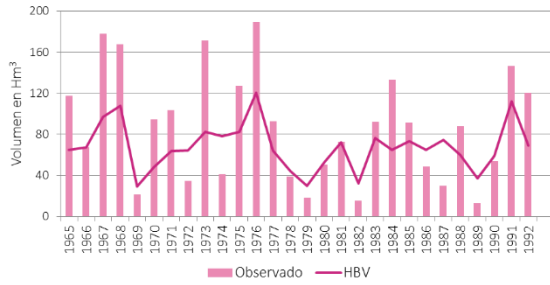


Figura 49. Resultados de los volúmenes anuales obtenidos con el modelo HBV para la cuenca 12 607.

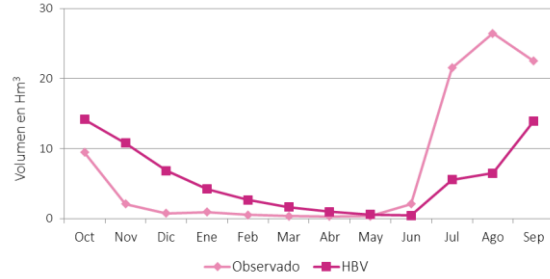


Figura 50. Resultados de los volúmenes medios mensuales obtenidos con el modelo HBV para la cuenca 12 607.

La cuenca 12 607 obtuvo la calibración con los indicadores de bondad de ajuste más altos (Figura 49) con los parámetros de la cuenca 14 018 (cuenca base), pese a que la cuenca no se encuentra en la misma zona, aun así, se presenta un retraso de escurrimiento a partir del mes de junio (Figura 50).

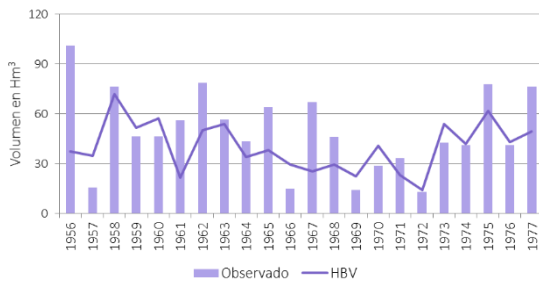


Figura 51. Resultados de los volúmenes anuales obtenidos con el modelo HBV para la cuenca 14 011.

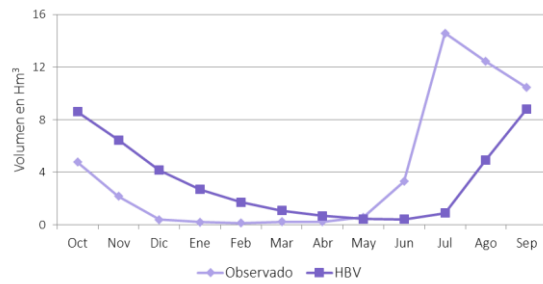


Figura 52. Resultados de los volúmenes medios mensuales obtenidos con el modelo HBV para la cuenca 14 011.

En las gráficas de la cuenca 14 011 (Figura 51 y Figura 52) se observa que el volumen observado presenta escorrentía antes que el modelo, debido a que, para el modelo, el suelo aún no tiene humedad, y debido a ello, lo que se precipita se retiene en el suelo y no percola ni escurre.

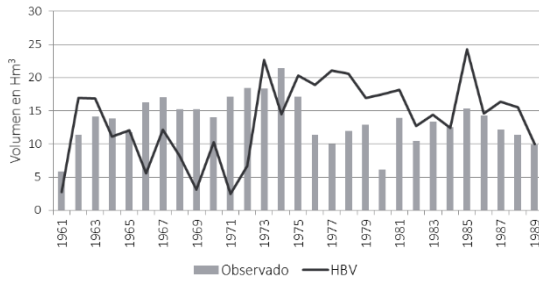


Figura 53. Resultados de los volúmenes anuales obtenidos con el modelo HBV para la cuenca 14 015.

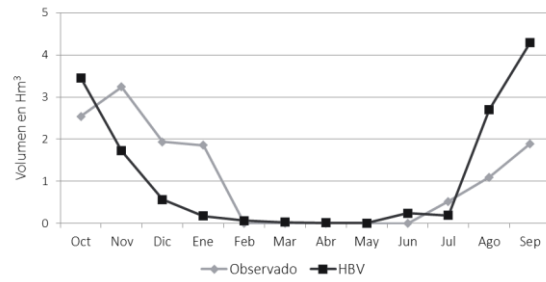


Figura 54. Resultados de los volúmenes medios mensuales obtenidos con el modelo HBV para la cuenca 14 015.

Los resultados para la cuenca 14 015 presentan un salto a partir del año 1973 (Figura 53), el cual incrementa hasta el fin de la serie de simulación; además, se tiene que el escurrimiento no corresponde al periodo de lluvias (Figura 54), razón por la cual se trató de simular únicamente con los meses de estiaje, sin embargo, el resultado presenta una clara alteración y por ello, la estación 14 015 queda completamente excluida del trabajo.

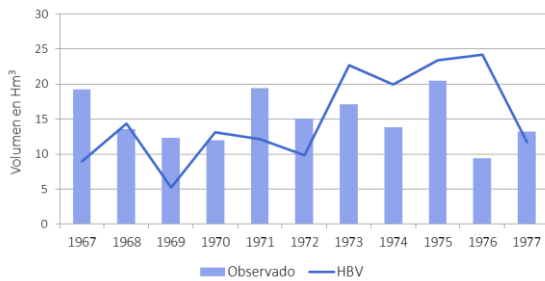


Figura 55. Resultados de los volúmenes anuales obtenidos con el modelo HBV para la cuenca 14 018.

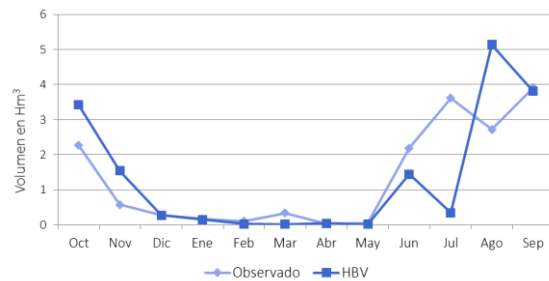


Figura 56. Resultados de los volúmenes medios mensuales obtenidos con el modelo HBV para la cuenca 14 018.

Para los valores anuales de la cuenca 14 018, se observa que el comportamiento es bastante bueno y aunque se sobreestiman un poco los volúmenes en los años 1973 -1976, estos se compensan con los años anteriores (Figura 55), sin embargo, se tiene que, en el mes de julio tiene un descenso en los volúmenes obtenidos con HBV, el cual no es lógico (Figura 56).

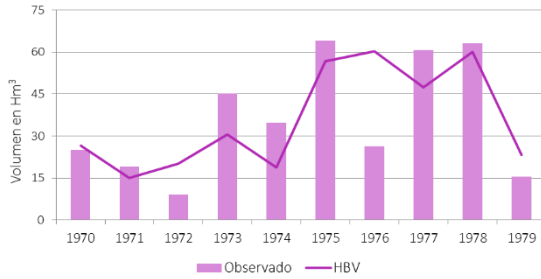


Figura 57. Resultados de los volúmenes anuales obtenidos con el modelo HBV para la cuenca 14 020.

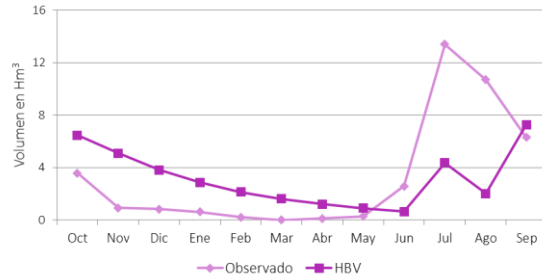


Figura 58. Resultados de los volúmenes medios mensuales obtenidos con el modelo HBV para la cuenca 14 020.

En la cuenca 14 020, el valor de K_{perc} para esta simulación es muy bajo, lo que muestra que realmente no hace falta considerarlo, se tiene que sólo se logran simular adecuadamente los últimos años de la serie (Figura 57) y, debido a ello, los volúmenes medios mensuales observados no corresponden con los simulados (Figura 58).

Numéricamente, la modelación con HBV no mejora con respecto a la modelación con el modelo Témez, sin embargo, en las gráficas se muestra que el volumen excedido ha disminuido. Los volúmenes mensuales y anuales no corresponden de la forma en que deberían debido a que se presenta un desfase.

Para el modelo HBV, un valor de beta (β) mayor a 1, representa que, para humedades pequeñas no hay filtración; caso contrario, si beta es inferior a 1, quiere decir que, para humedades grandes, la filtración sería prácticamente del cien por ciento, y se presenta de esta forma cuando la zona de estudio tiene rocas porosas o son zonas muy áridas.

Se muestra que, pese a que los volúmenes no quedan por completo representados; el volumen excedente ya no es tan obvio, lo que quiere decir que el planteamiento de un modelo que represente adecuadamente la parte subterránea funciona y es adecuado, entonces, lo que sigue es trabajar con otro MPE para que los volúmenes simulados sean lo más parecido posible a los valores observados. De tal forma que se prueba con otro modelo que cuente con la información necesaria de flujo al acuífero y que, al mismo tiempo, esté planteado para calcular volúmenes mensuales, como es el SMM.

4.3.3 RESULTADOS DE LA MODELACIÓN SUPERFICIAL CON EL SOIL MOISTURE METHOD

En comparación con HBV, el Soil Moisture Method (SMM) trabaja de forma similar, si bien pudiera comportarse como un modelo de tres tanques, se considera como un modelo de dos tanques debido a que antes de ingresar al primer tanque, se presentan los escurrimientos (superficial y directo).

En términos generales, el problema que se presenta con el modelo HBV es que, los volúmenes no se representan adecuadamente debido a que está planteado para utilizarse a escala diaria, razón por la cual, el modelo no podrá representar el sistema como debería; sin embargo, sirve de pauta para que se comparen los resultados obtenidos con el SMM.

El SMM de WEAP tiene la particularidad de poder ser calibrado considerando (o no) la parte subterránea, con esto, el modelo arroja dos calibraciones igual de válidas si se consideran únicamente los escurrimientos, la variación se presenta en el volumen que se evapotranspira; si no se considera la infiltración, la evapotranspiración se eleva hasta que se logra el balance en el modelo. En este sentido, dado que, para la zona de estudio se tiene conocimiento del volumen evapotranspirado, la calibración se logra de forma simple si se limita la evapotranspiración real, de tal forma que se aumente el flujo al acuífero y a su vez, se mantenga el escurrimiento.

Pese a que no se puede representar un modelo con otro, se entienden de forma similar como se muestra en la Figura 59, donde se observa que si se considera que los primeros escurrimientos (superficial y directo) del SMM se consideraran en un tanque 0, se tendría que el modelo en sí, pasa de ser de 2 tanques a 3 tanques.

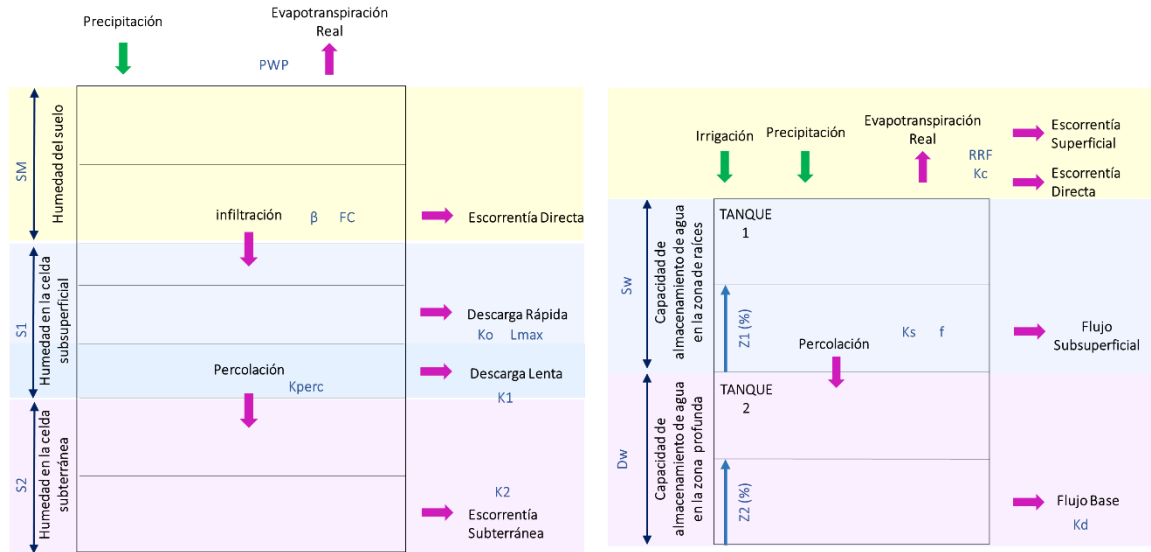


Figura 59. Comparación entre el modelo HBV de EvalHid y SMM de WEAP.

Para calibrar el modelo, es importante considerar que es muy sensible con los siguientes parámetros:

- Kc (Crop Coefficient), afectando a la evapotranspiración real.
- Sw (Soil Water Capacity), la cual modifica la infiltración y el escurrimiento.
- RRF (Runoff Resistance Factor) que se encuentra ligado a la escorrentía superficial y escorrentía directa.
- Ks (Root Zone Conductivity) que se encarga de proporcionar la infiltración en el sistema.

También es importante mencionar que, pese a que el modelo arroja resultados similares, los MPE SMM y HBV no podrán tener el mismo volumen evapotranspirado, debido a que la evapotranspiración potencial que se ingresa a HBV se obtiene con el método de Thornthwaite y el SMM calcula la evapotranspiración potencial con Penman-Monteith.

Como se muestra en la Tabla 21, se tienen indicadores aceptables para las cuencas 12 607 y 14 011, sin embargo, la cuenca 14 018 tiene valores muy bajos para Nash-Suttcliffe y el modificado de Nash -Suttcliffe, sin embargo, el coeficiente de simetría es bastante bueno y eso ayuda a que la modelación se acepte.

Tabla 21. Resultados de los indicadores de ajuste obtenidos a partir de la simulación con el modelo Soil Moisture Method.

CUENCA A	INDICADORES DE AJUSTE				INDICADOR MEDIO
	NSE	ln NSE	r	CS	
12 607	0.71	0.56	0.85	0.99	0.778
14 011	0.63	0.66	0.79	0.99	0.770
14 018	0.42	0.16	0.75	0.98	0.578

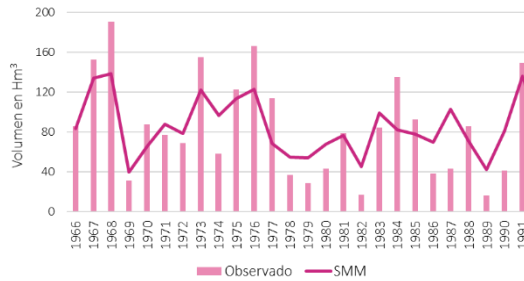


Figura 60. Resultados de los volúmenes anuales obtenidos con el modelo SSM para la cuenca 12 607.

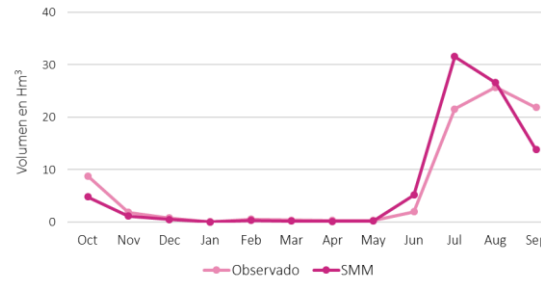


Figura 61. Resultados de los volúmenes medios mensuales obtenidos con el SSM para la cuenca 12 607.

La cuenca 12 607 tiene los indicadores de bondad de ajuste más altos en la calibración en el modelo y se aprecia que en los volúmenes anuales simulados (Figura 60) tienen un comportamiento similar a los volúmenes observados; por su parte, los volúmenes medios mensuales simulados (Figura 61) tienen una tendencia similar a los observados, lo que permite que el valor de los indicadores de ajuste sea alto.

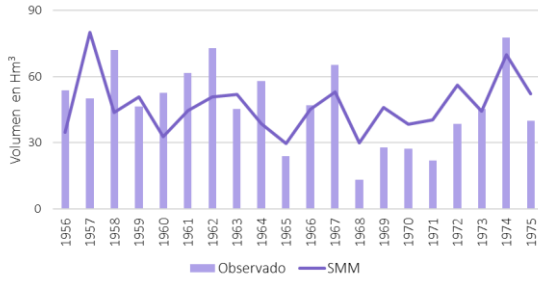


Figura 62. Resultados de los volúmenes anuales obtenidos con el modelo SSM para la cuenca 14 011.

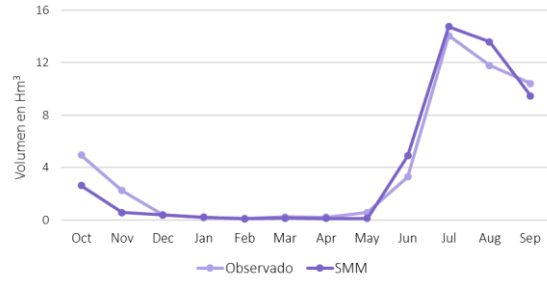


Figura 63. Resultados de los volúmenes medios mensuales obtenidos con el SSM para la cuenca 14 011.

Los resultados obtenidos en la simulación de la cuenca 14 011 semejan bastante bien el comportamiento de los volúmenes observados, tanto en la gráfica anual (Figura 62) como en los volúmenes medios mensuales (Figura 63), si bien, para los volúmenes anuales pareciera que se encuentran sobreestimados en los años 1968 – 1972, esto se compensa con los años anteriores, donde se observa claramente que los volúmenes simulados se encuentran por debajo de los observados.

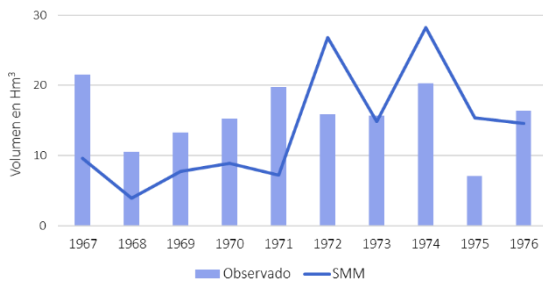


Figura 64. Resultados de los volúmenes anuales obtenidos con el modelo SSM para la cuenca 14 018.

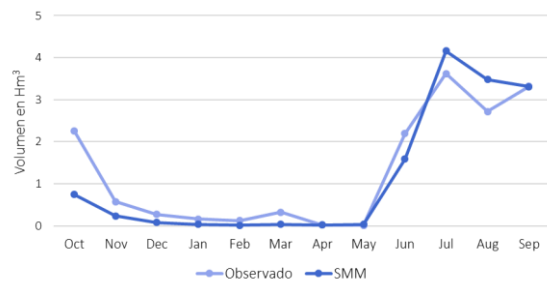


Figura 65. Resultados de los volúmenes medios mensuales obtenidos con el SSM para la cuenca 14 018.

Como se muestra en la Figura 64, a partir del año 1972 se presenta un incremento en el volumen, existente debido a los datos de precipitación que se ingresan al modelo, lo que provoca que los resultados de los indicadores de ajuste de NSE y ln NSE sean muy bajos; aun así, se observa claramente en la Figura 65 que los volúmenes observados y los simulados

tienen un comportamiento similar y la tendencia es la adecuada, en este sentido, se muestra gráficamente que el modelo SMM representa mejor los volúmenes observados en la zona en comparación al modelo HBV.

Se tiene en la Figura 66, la comparativa realizada para la cuenca 14 018, la cual, es la que mejor se representa en los 3 modelos, se observa que en los meses de febrero a mayo, los volúmenes simulados y los observados son muy bajos y que, al revisar los meses húmedos (junio – noviembre) se observa que el comportamiento más adecuado se presenta con el modelo Témez.

Es necesario recordar que debido a que se requiere conocer el volumen infiltrado al acuífero, se debe seleccionar un modelo entre HBV y SMM. Se tiene entonces que, el modelo que mejor representa los volúmenes observados es el SMM.

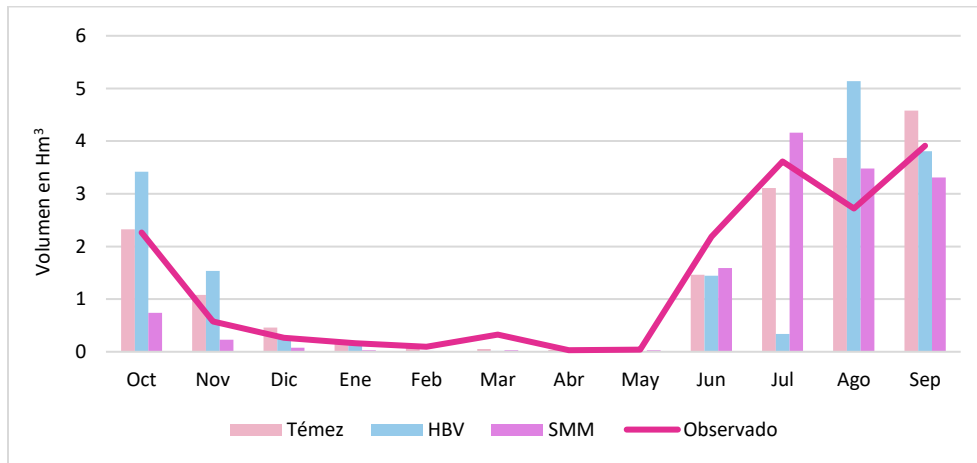


Figura 66. Comparativa entre los MPE Témez, HBV y SMM con los volúmenes observados medios mensuales con los volúmenes observados en la cuenca 14 018 (Hm³).

4.4 MODELACIÓN HIDROLÓGICA SUPERFICIAL DE LA ZONA EN CONJUNTO

Al no tener datos de aforo en las treinta cuencas de simulación que se tienen en la zona de estudio, es necesario utilizar el traslado de información, la cual puede realizarse por traslado de parámetros o por similitud hidrológica.

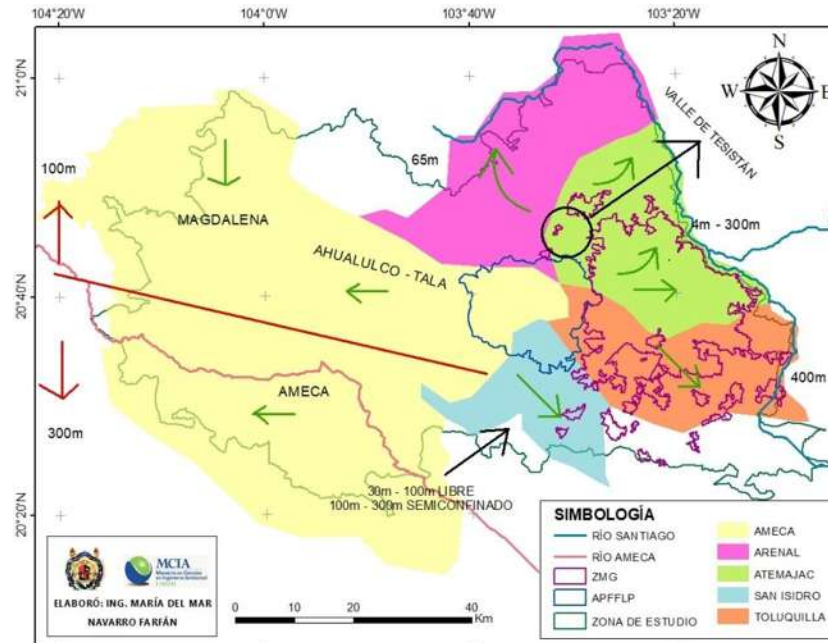


Figura 67. Dirección de flujo en los acuíferos de estudio, obtenido por la información en los informes de disponibilidad media anual de agua en el acuífero Ameca¹, Arenal², Atemajac³, San Isidro⁴ y Toluquilla⁵ (CONAGUA, 2015).

La heterogeneidad en la zona de estudio, considerando el uso, tipo de suelo y distribución hidrológica no permite que se delimite o se clasifique el territorio de forma simple; por ello, la división de la zona de estudio se realiza considerando la dirección de flujo que tienen los

¹ (CONAGUA, Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Ameca (1409), 2015 a)

² (CONAGUA, Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Arenal (1436), 2015 b)

³ (CONAGUA, Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Atemajac (1401), 2015 c)

⁴ (CONAGUA, Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero San isidro (1450), 2015 d)

⁵ (CONAGUA, Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Toluquilla (1402), 2015 e)

acuíferos, que, como se muestra la Figura 67, el agua subterránea de la zona norte se direcciona hacia el Río Santiago y la zona Sur presenta una dirección hacia el Río Ameca, ubicado al sur de la zona de estudio.

Como se muestra en la Figura 68, las cuencas 12 607 y 14 011 intervienen en la zona norte y la cuenca 14 018 en la zona sur; es importante mencionar que para el modelo HBV, los parámetros son únicos para todas las cuencas en una zona u otra (norte y sur), sin embargo, para SMM, se considera el uso de suelo que se tiene en cada cuenca.

Esta característica presente en el SMM permite mantener la heterogeneidad de la zona de estudio, ya que no suponemos un valor medio para cada cuenca, sino que se preservan las características de los parámetros para cada uso de suelo.

Para el traslado de información por medio de los parámetros, para la zona norte, basta con utilizar, el promedio de los parámetros involucrados en las cuencas 12 607 y 14 011 y para la zona sur, se preservan los valores obtenidos con la cuenca 14 018.

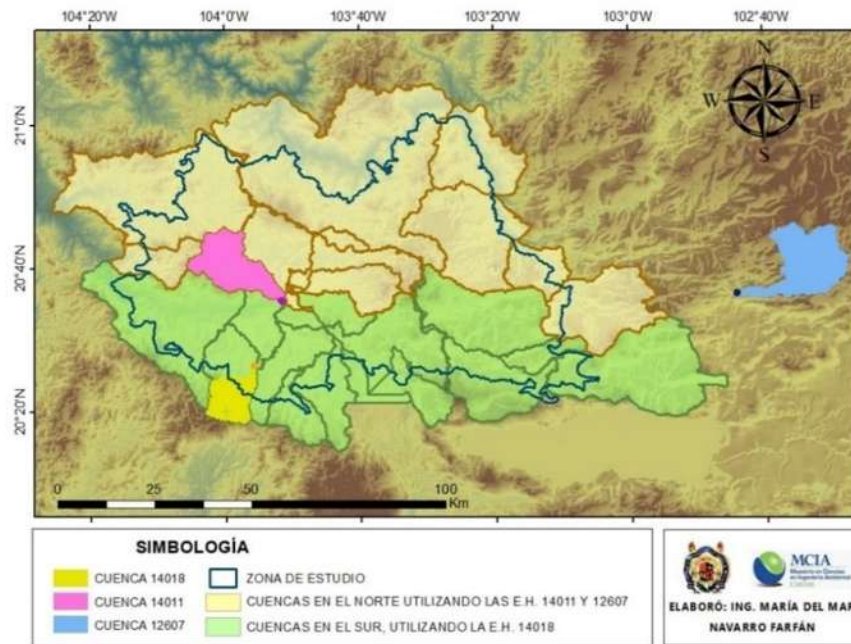


Figura 68. Mapa de las treinta cuencas de simulación, donde se determina que la zona se divide en zona norte y zona sur.

Por otra parte, la similitud hidrológica utiliza la relación existente entre las cuencas ya simuladas, con aquellas que requieren información, afectándolas directamente por el coeficiente de escurrimiento (obtenido por medio de la NOM-011-CONAGUA), el cual considera el uso y tipo de suelo de la zona y el área de la cuenca; de la misma forma, la localización de la cuenca (zona norte o sur) determina con cuál o cuáles cuencas simuladas se ve relacionada.

De esta manera, se presentan en la Tabla 22, los valores de coeficiente de escurrimiento y área de las cuencas simuladas y en la Tabla 23, los valores correspondientes a las 30 cuencas sin aforo.

Tabla 22. Coeficiente de escurrimiento y área para las cuencas simuladas en HBV y SMM.

Estación Hidrométrica	Ce	Área km ²
12607	0.18	299
14011	0.16	221
14018	0.14	126

Tabla 23. Coeficiente de escurrimiento y área para las cuencas que se localizan en la zona de estudio.

Características de las Cuencas de Estudio					
Cuenca	Ce	Área km ²	Cuenca	Ce	Área km ²
1	0.15	973	16	0.16	267
2	0.14	163	17	0.17	226
3	0.15	4	18	0.16	165
4	0.16	247	19	0.13	154
5	0.02	3	20	0.14	231
6	0.14	196	21	0.17	43
7	0.16	223	22	0.10	387
8	0.13	15	23	0.14	540
9	0.14	200	24	0.13	168
10	0.16	49	25	0.16	500
11	0.15	124	26	0.15	354
12	0.18	154	27	0.17	439
13	0.15	372	28	0.20	100
14	0.13	79	29	0.18	667
15	0.14	724	30	0.13	1744

Para realizar el balance en la zona de estudio se requiere conocer entonces los volúmenes medios anuales (Hm^3) de: precipitación, evapotranspiración, escorrentía (directa), infiltración (flujo hacia el acuífero) y cambios en el almacenamiento. Los cambios en el almacenamiento se consideran como los flujos subsuperficiales que pueden retornar hacia la superficie o percolar hacia el acuífero, además también se muestra la variación o cambio en la humedad y almacenamiento del suelo.

Al ser un balance, este deberá cerrar en cero; sin embargo, considerando que el periodo de años con el que se trabaja es relativamente corto, es importante considerar que un valor cercano a cero es un balance exitoso.

4.4.1 TRASLADO DE INFORMACIÓN DE LAS MODELACIONES CON HBV

Resulta importante recordar que el único parámetro que cambia para las cuencas modeladas con HBV es K_{perc} , así, para la zona norte se utiliza un promedio de los K_{perc} de las cuencas 14 011 y 12 607 y, para las cuencas del lado sur, se utiliza el K_{perc} de la cuenca 14 018 (Tabla 24).

Tabla 24. Valores de K_{perc} utilizados para la modelación de toda la zona de estudio.

ZONA	CUENCAS	K_{perc}
Norte	14011 y 12607	0.12495
Sur	14018	0.68012

Con base a los resultados obtenidos en las treinta cuencas de simulación con el modelo HBV (Figura 69) se tiene que, en todas las cuencas, el balance es positivo, cabe destacar que la aportación que presentan las cuencas depende del área de la cuenca.

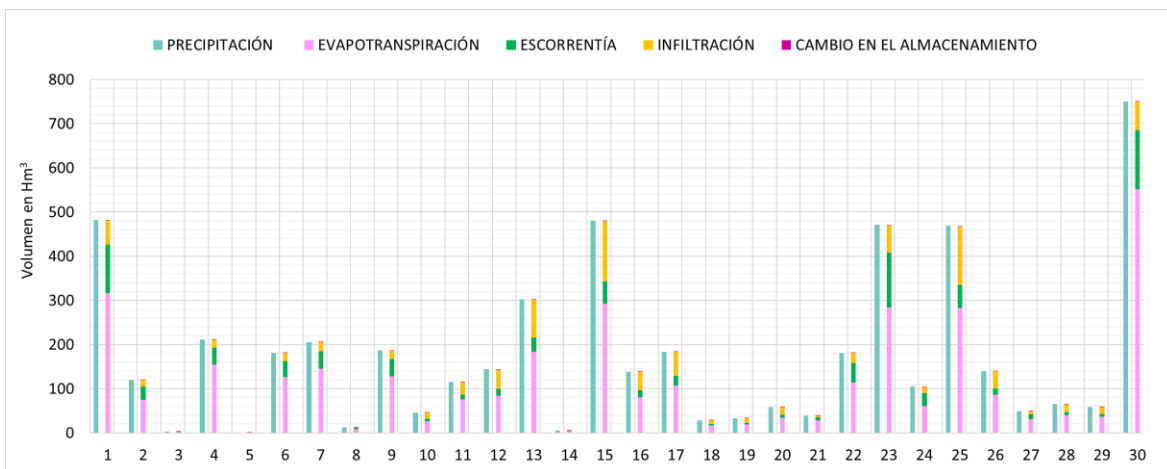


Figura 69. Balance hidrológico medio anual por cuenca, realizado con traslado de parámetros con los resultados de las modelaciones con HBV.

Como se observa en la Tabla 25, el balance hídrico cierra y se tiene un cambio en el almacenamiento de aproximadamente es positivo y tiene un cambio en el almacenamiento de 12.8 Hm³, el error en el balance es del 0.1% del volumen de agua ingresado en la zona, aproximadamente 2.6 Hm³.

Tabla 25. Volúmenes de entrada y salida del sistema considerados en el balance de HBV por traslado de parámetros.

Parámetro	Volumen
	Hm ³
Precipitación	5268.3
Evapotranspiración	3395.9
Escorrentía	891.7
Infiltración profunda	965.2
Cambios en el Almacenamiento	12.8

De la misma forma, se realiza el balance hídrico en la zona por medio de la similitud hidrológica, donde se puede observar en la Figura 70 que, pese a que el volumen de entrada y salida parece ser el mismo, el balance es negativo, lo que quiere decir que en el cambio de almacenamiento es negativo para compensarlo.

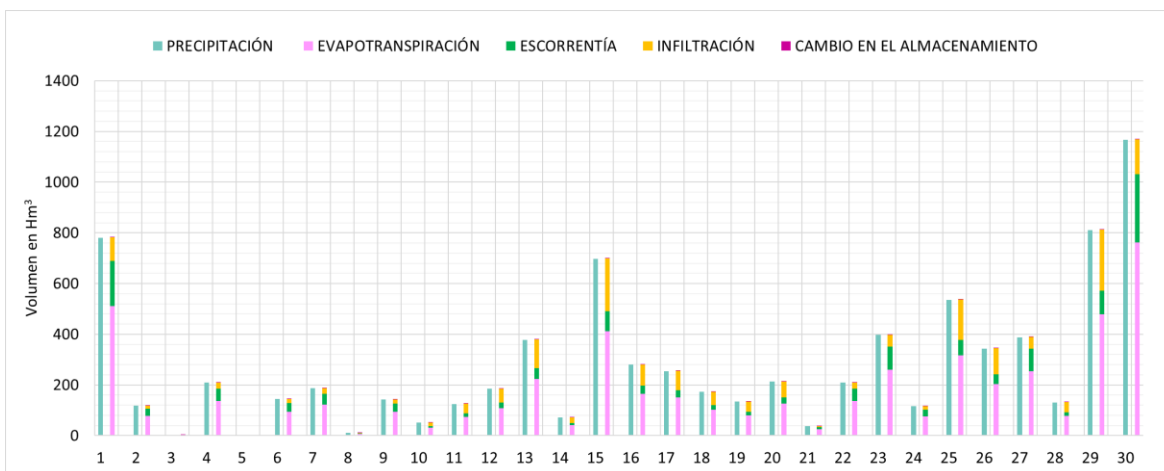


Figura 70. Balance hidrológico medio anual por cuenca, realizado por similitud hidrológica con los resultados de las modelaciones con HBV.

Además, en comparación con el balance por traslado de parámetros, se observa en la Tabla 26, se tiene una sobreestimación en la precipitación del 57%; junto con ello, incrementan los volúmenes de escorrentía, evapotranspiración e infiltración presentes en el balance hídrico, de igual forma, el error que se tiene con respecto a las entradas y a las salidas es de -1.51 Hm³, lo que representa un déficit de 0.18% del volumen de agua presente en la zona.

Tabla 26. Volúmenes de entrada y salida del sistema considerados en el balance en HBV por similitud hidrológica.

Parámetro	Volumen
	Hm ³
Precipitación	8296.2
Evapotranspiración	5144.8
Escorrentía	1402.4
Infiltración profunda	1764.0
Cambios en el Almacenamiento	13.6

4.4.2 TRASLADO DE INFORMACIÓN DE LAS MODELACIONES CON SMM

Partiendo de los resultados obtenidos con las calibraciones en SMM, se realiza el traslado de información a toda la zona de estudio por medio del traslado de parámetros. Como se muestra en la Tabla 27, los parámetros utilizados para la modelación de toda la zona se obtienen como el promedio de los parámetros utilizados en la simulación de las cuencas 12 607 y 14 011 y para la zona sur (Tabla 28) los parámetros de calibración que se utiliza son los obtenidos de la cuenca 14 018.

Tabla 27. Parámetros utilizados para la modelación de la zona norte con el SMM.

Uso de Suelo	Kc	Sw	RRF	Ks
Agrícola	0.2	200	3.75	100
Urbano	0.6	75	2.5	200
Bosque	0.8	200	3.25	100
Pastizal	0.4	100	3	100
Selva	0.6	200	2.75	100

Tabla 28. Parámetros utilizados para la modelación de la zona sur con el SMM.

Uso de Suelo	Kc	Sw	RRF	Ks
Agrícola	0.4	200	10	150
Urbano	0.7	50	6	50
Bosque	0.9	200	8	150
Pastizal	0.7	200	7	150
Selva	0.6	200	2.75	100

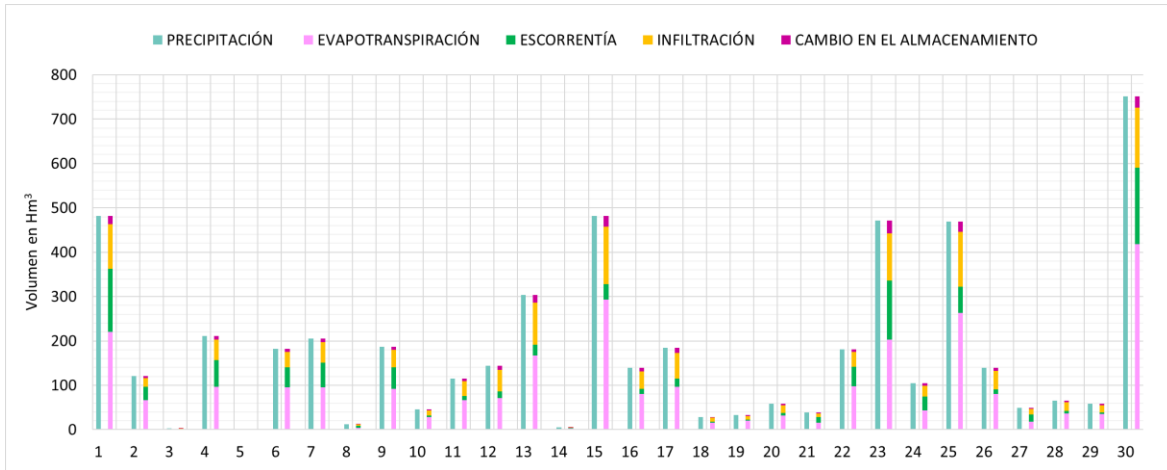


Figura 71. Balance hidrológico medio anual por cuenca, realizado con traslado de parámetros con los resultados de las modelaciones con SMM.

Como se observa en la Figura 71, al realizar el traslado de información por medio del traslado de parámetros, se encuentra una similitud importante con el balance obtenido con el MPE HBV. Los volúmenes de entrada y salida se compensan de forma adecuada. El error de balance es un déficit de 1 Hm³, lo que representa el 0.02% del total de agua presente en la zona de estudio.

En la Tabla 29 se muestran los volúmenes de entradas y salidas considerados en el balance hídrico; se tiene un cambio en el almacenamiento de 243.3 Hm³, el cual representa el 4.6% del volumen de agua que se tiene en la zona. En este caso, con respecto a los resultados obtenidos con HBV, se observa que la evapotranspiración real es menor casi un veinte por ciento y el flujo al acuífero se incrementa en un trece por ciento.

Tabla 29. Volúmenes de entrada y salida del sistema considerados en el balance en SMM por traslado de parámetros.

Parámetro	Volumen
	Hm ³
Precipitación	5268.3
Evapotranspiración	2755.0
Escorrentía	1004.3
Infiltración profunda	1266.7
Cambios en el Almacenamiento	243.3

Al realizar el balance hídrico por cuenca por medio de similitud hidrológica con SMM, se vuelve a presentar el mismo problema que con el MPE HBV. Pese a que se tienen balances positivos para cada cuenca (Figura 72), se encuentra que los valores obtenidos con el balance total por medio del traslado de parámetros y similitud hidrológico no coinciden, debido a que el volumen de entrada está sobreestimado.

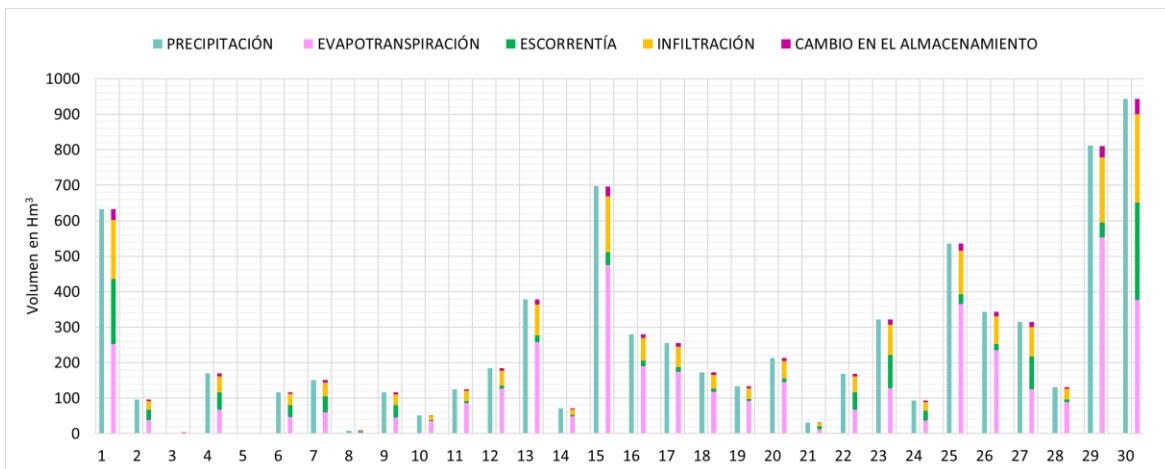


Figura 72. Balance hidrológico medio anual por cuenca, realizado por similitud hidrológica con los resultados de las modelaciones con SMM.

El error de cierre de balance es de 0.02%, lo que representa 1.4 Hm³ y como se observa en la Tabla 30, el cambio en el almacenamiento es de 319.5 Hm³, lo cual representa un 4.23% del volumen de agua que ingresa al sistema, sin embargo, se hace hincapié en que la precipitación se encuentra sobreestimada en aproximadamente un 70%.

Tabla 30. Volúmenes de entrada y salida del sistema considerados en el balance en SMM por traslado de parámetros.

Parámetro	Volumen
	Hm ³
Precipitación	7550.8
Evapotranspiración	4248.0
Escorrentía	1151.7
Infiltración profunda	1830.3
Cambios en el Almacenamiento	319.5

4.4.3 SELECCIÓN DEL MODELO MÁS FAVORABLE DE SIMULACIÓN SUPERFICIAL

Es importante mencionar que la selección del modelo se basa en que requerimos utilizar un solo método para la obtención de volúmenes de infiltración profunda y así poder utilizarlos en la simulación subterránea con MODFLOW. Sin embargo, se debe tomar en cuenta que la incertidumbre en los datos es alta y que cualquier balance puede ser correcto, por lo que se podría incluso utilizar el promedio de las cuatro series de flujo al acuífero para las simulaciones consecuentes.

De acuerdo a los datos descargados de la base de datos de CLICOM (2018) se conoce que el volumen precipitado en la zona; este volumen no corresponde con los volúmenes calculados por medio de la similitud hidrológica. Por lo tanto, el método no refleja fiabilidad en los resultados obtenidos debido a que se observa un incremento superior al 50% con respecto a los reales.

En la Figura 73, se presentan los resultados de los cuatro balances obtenidos con los diferentes modelos precipitación - escorrentía y métodos de traslado de información. Además, se considera que, en comparación con el modelo HBV, SMM representó de forma más parecida los volúmenes observados y, el error en el cierre del balance fue menor.

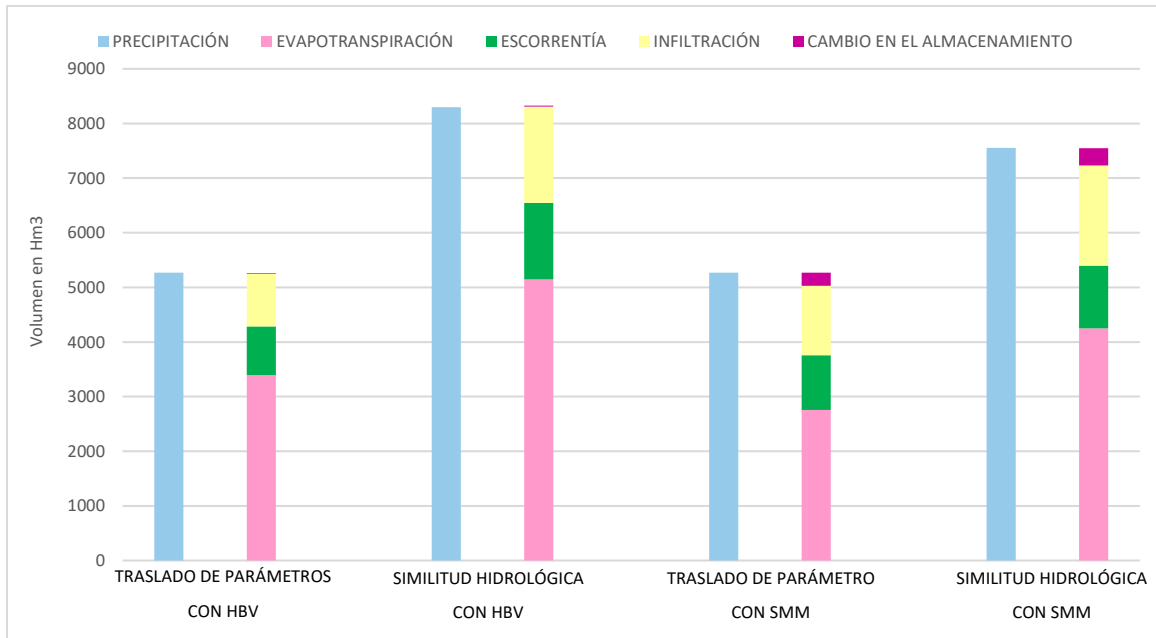


Figura 73. Comparativa entre los balances obtenidos con traslado de parámetros y similitud hidrológica para los modelos HBV y SMM.

Entonces, al comparar los resultados obtenidos con los diferentes modelos de precipitación escorrentía y los métodos de traslado de información, se tiene que, el balance que se considera como adecuado es el que se genera a partir de los resultados de SMM por medio de traslado de parámetros.

4.5 RESULTADOS DE MODFLOW

Las modelaciones en MODFLOW se pueden realizar en régimen permanente (estacionario) o en régimen transitorio. Para realizar la modelación de las masas subterráneas es necesario contar con información sobre la zona de estudio, como son volúmenes de recarga y extracción, así como características geomorfológicas como conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento, además de elevaciones en el terreno, espesor de las masas geológicas y localización de manantiales conectados al acuífero; otra característica importante para la realización de la modelación superficial es la altura del nivel estático inicial.

Para la modelación en régimen transitorio de las masas geológicas, se considera que el periodo de simulación va de octubre de 1989 a septiembre de 2014, los que representa 300 pasos de tiempo (mensuales) a lo largo de 25 años.

Debido a la escasez de información, es importante considerar que para realizar la modelación en el periodo actual es necesario partir de un estado estacionario para obtener el nivel estático inicial (octubre de 1989) de la zona de estudio. En este sentido, se logra estabilizar el modelo contemplando las afectaciones externas en una situación inicial, en la cual no hay variación temporal.

Para utilizar el software MODFLOW, se realiza una malla (como se muestra en la Figura 74), de tal forma que se cubra toda la zona de estudio; no es necesario que las celdas sean del mismo tamaño, lo que permite mantener una mayor atención a algún área en específico, como es el caso del APFFLP y la ZMG. De esta manera, la malla que cubre la zona de estudio está constituida por 25 filas y 35 columnas, con tamaño variable, las celdas que se encuentran intersecadas por el APFFLP y la ZMG tienen una dimensión de 2.5 km por 2.5 km, las demás tienen dimensiones variables 2.5 km por 5 km (y viceversa) y las celdas de mayor tamaño son de 5 km por 5 km.

En total se tienen 875 celdas, de las cuales, es necesario conocer el estado en el que se encuentran. En la Figura 74, observa que, en color rojo, se distinguen las celdas que están en

estado inactivo (170 celdas), lo que quiere decir que en ellas no se realizará el balance de flujo subterráneo; caso contrario sucede en las celdas activas (606 en color verde) en las cuales, se realiza el balance y son consideradas debido a que las celdas que si están intersecadas con la zona de estudio. Por último, en color amarillo; se tienen 99 celdas de altura constante que a lo largo del tiempo no se modifican debido a que son ríos; al norte, se encuentra el río Grande Santiago y al sur, el río Amecca.

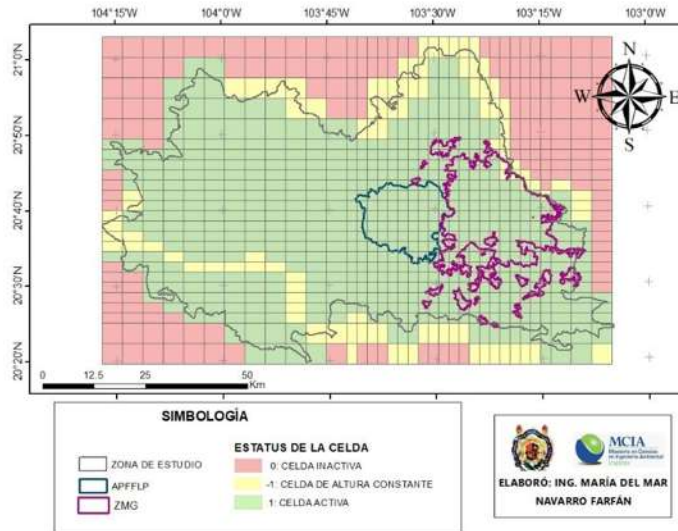


Figura 74. Mallado en la zona de estudio con tamaño variable.

Una vez que se tienen delimitadas las celdas en las cuales se realiza el balance, se debe conocer la elevación a la cual se encuentra el terreno natural y el espesor de las masas geológicas. Para obtener la elevación del terreno natural, se utiliza la información de los modelos digitales de elevaciones, proporcionados por el INEGI (2017 a); para obtener matriz de elevaciones, se toma la altura en el centroide de cada celda perteneciente a la malla.

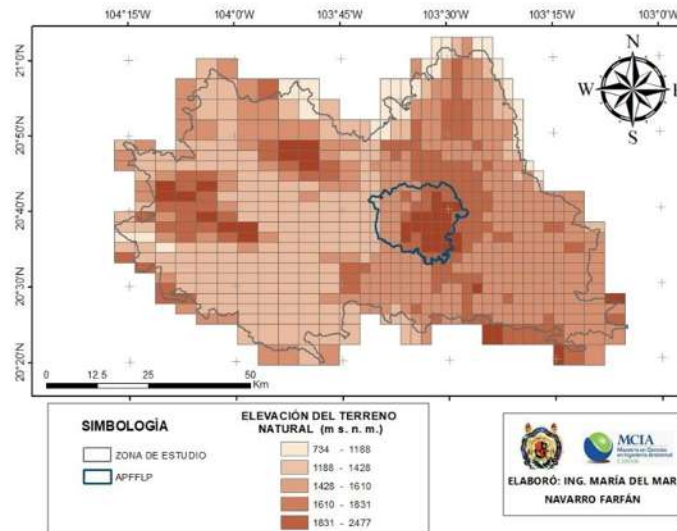


Figura 75. Elevación del terreno natural en la zona de estudio en m. s. n. m.

Las elevaciones del terreno natural están estrechamente relacionadas con las celdas de altura constante; por ello, se tiene especial cuidado en las celdas que forman parte de los ríos. Como se observa en la Figura 75, las zonas más altas se localizan al noroeste de la zona de estudio, donde se localizan el volcán de Tequila y el cerro Cuauhtépetl y, dentro del APFFLP se ubican los cerros El Pedernal, San Miguel, Las Planillas y El Chapulín con elevaciones aproximadas a 2200 m s. n. m.

Como fueron mostradas en la Figura 67, los espesores de las masas geológicas oscilan entre 4 m y 400 m; estos valores fueron obtenidos como el promedio de distintas mediciones y, debido a que se desconocen las coordenadas en las cuales se obtuvo dicha información se plantea utilizar un espesor uniforme de 500 m (Figura 76) de tal forma que se cubra todo el rango necesario.

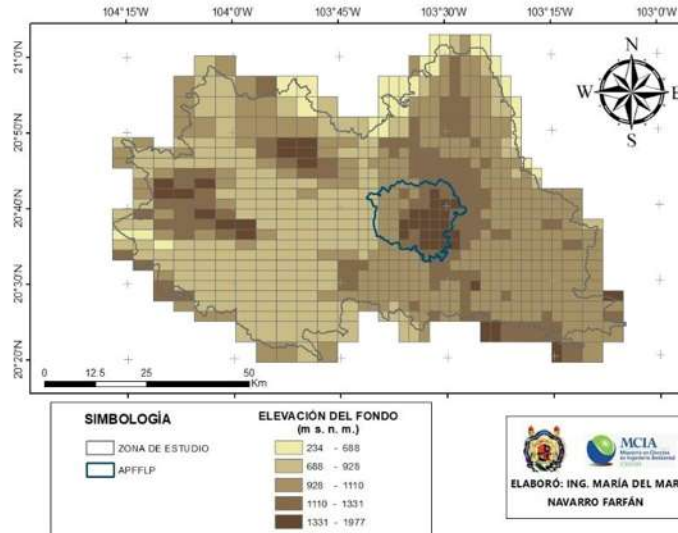


Figura 76. Elevación del fondo de las masas geológicas en m. s. n. m.

Es importante mencionar que dicho espesor no significa otra cosa más que el valor máximo de desnivel que puede llegar a tener un acuífero está limitado a 500 m debajo del nivel de terreno natural.

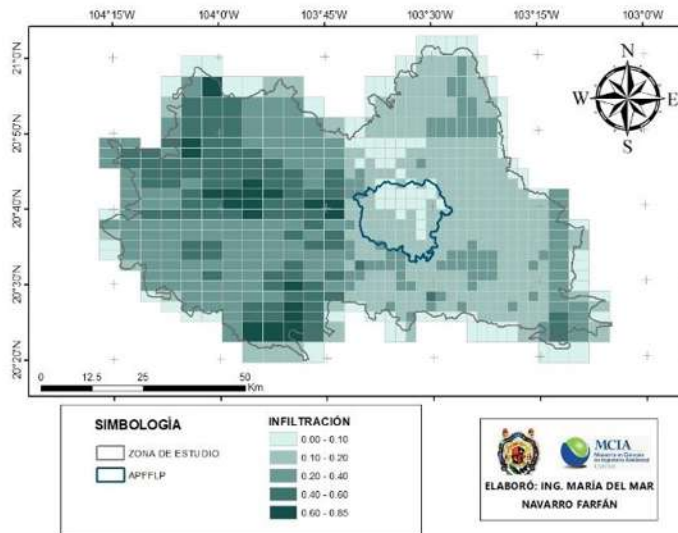


Figura 77. Volúmenes de infiltración en la zona de estudio, considerando los obtenidos con WEAP y el retorno de riego en Hm³/mes.

Como se mencionó anteriormente, es necesario considerar todas las afectaciones que se realizan a las masas geológicas, es por ello que, como se muestra en la Figura 77, para cada celda activa, se obtiene el valor de la infiltración hacia el acuífero, donde se considera además de la recarga natural, el retorno por riego.

La recarga natural se calcula a partir de los resultados obtenidos con el SMM de WEAP. Debido a que esta modelación se realiza en estado estacionario, basta con considerar únicamente el promedio mensual debido a que no se toma en cuenta la variación temporal.

El volumen considerado como retorno por riego corresponde al 20% del volumen concesionado por el REPDA a aquellos pozos con uso agrícola. Esto debido a que, en México la eficiencia en el uso del agua en el sector agrícola es apenas del 46% (AGUA, 2019); y, al no contar valores puntuales en los distritos de riego cercanos a la ZMG o dentro de la zona de estudio en general, se propone un valor uniforme que afecte significativamente a toda la zona de estudio.

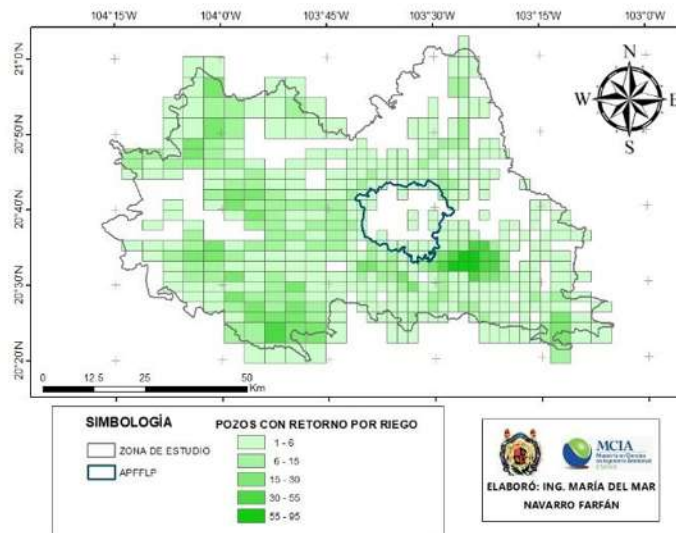


Figura 78. Número de pozos por celda con retorno de riego.

En la Figura 78, se muestra por celda, el número de pozos de extracción de uso agrícola que existen en la zona de estudio, en total se tienen 3346 pozos con retorno de riego en la zona

de estudio. En algunas celdas al sureste de la ZMG, se alcanzan valores de 95 pozos de extracción para uso agrícola en un área de 6.25 km².

Para obtener el porcentaje de volumen que retorna al acuífero debido al uso agrícola, es necesario, considerar que en la zona de estudio se utilizan diversos sistemas de riego dentro de los que destacan de gravedad, aspersión y goteo, los cuales tienen diferentes eficiencias por lo que resulta como una opción viable utilizar un promedio. El rango de eficiencia oscila entre 40% y 95%, por lo que se aceptan pérdidas desde el 5% al 60%; se considera entonces, el promedio de las pérdidas y dado a que no se retornan el cien por ciento de las pérdidas, se determina que únicamente el 20% del volumen concesionado se recarga en la zona.

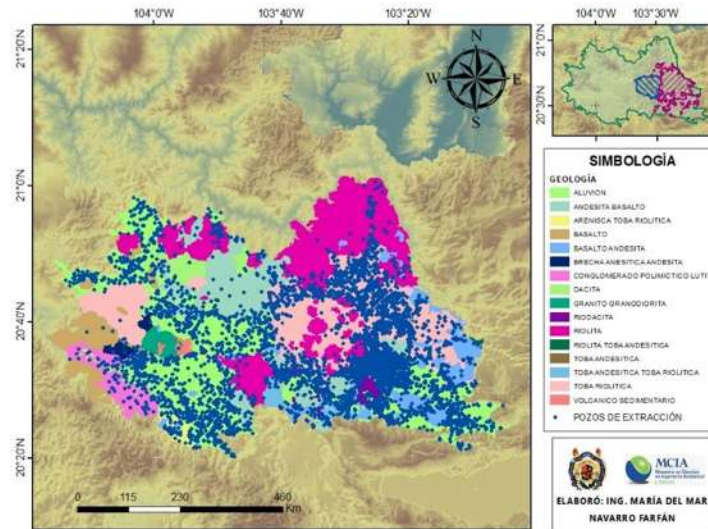


Figura 79. Pozos de extracción en la zona de estudio sobre las masas geológicas en estudio.

De la misma forma, se requieren conocer los pozos de extracción concesionados para cualquier uso en la zona de estudio, esto permite conocer el volumen que se extrae mensualmente. En la Figura 79, se muestran los pozos de extracción en la zona de estudio, donde se observa que la mayor concentración de pozos se localiza en la ZMG y en la periferia del APFFLP.

Es necesario recordar que, como se mostró en la Figura 26, la ZMG y el APFFLP comparten el mismo lecho geológico, lo que indica que las acciones que se tengan en cualquier punto,

tendrán afectaciones en las zonas que se encuentren conectadas por medio de las masas geológicas.

En la Figura 80 se observa que, al sur de la ZMG se tienen concentraciones de aproximadamente 19 pozos por km², por lo que se entiende que, pese a que en el bosque La Primavera no se tienen muchos pozos de extracción, esta se ve afectada por lo que sucede en su periferia.

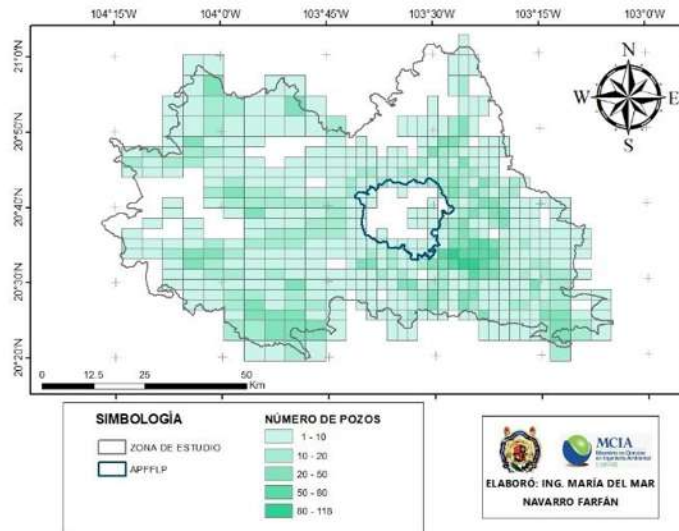


Figura 80. Número de pozos de extracción que se tienen por celda.

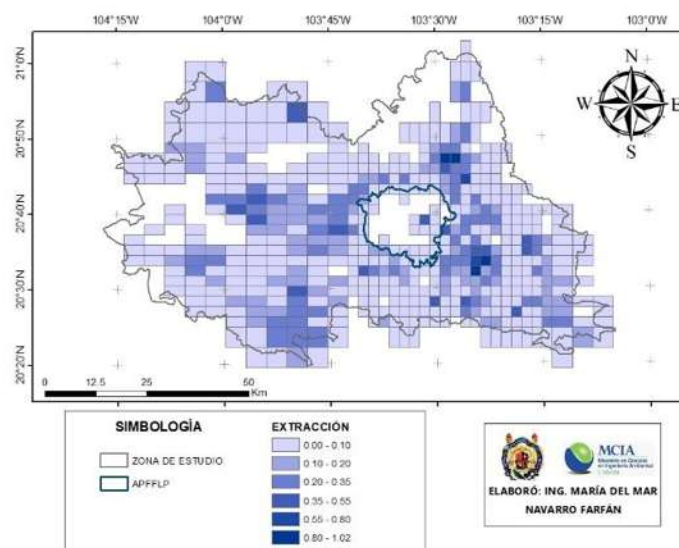


Figura 81. Volúmenes de extracción en la zona de estudio, en Hm³/mes.

Por otra parte, en la Figura 81, se muestra por código de colores el volumen extraído de los acuíferos en la zona de estudio; claramente se observa que dentro del Bosque La Primavera, el volumen parece ser casi inexistente; y aquellos pozos que se localizan dentro son para uso agrícola y para uso doméstico debido a que, aproximadamente el 53% del terreno dentro del bosque es uso particular o ejidal.

Para la modelación en estado transitorio, se cuenta con la serie de volúmenes de extracción para el periodo de 1989 a 2014; sin embargo, para la modelación en estado estacionario de 1989, se requiere conocer el volumen en la fecha.

Para determinar el porcentaje de volumen extraído para el año 1989, el cual es el que corresponde a la simulación en régimen estacionario, se revisan los volúmenes concesionados en los acuíferos que tiene injerencia en la zona de estudio.

Se tienen cinco acuíferos principales Ameca, Arenal, Atemajac, San Isidro y Toluquilla; sin embargo, se obtienen datos de cuatro acuíferos más: Ajititlán, Cajititlán, Lagunas y Tequila. Como se presenta en la

Tabla 31, se tiene que el porcentaje de volumen concesionado antes de 1989 es de aproximadamente 24%; sin embargo, si se consideran únicamente los cinco acuíferos principales, se tiene que el volumen aumenta hasta casi 35%.

Tabla 31. Información de volúmenes concesionados para los acuíferos presentes en la zona de estudio.

Acuífero	Volumen concesionado a la fecha	Volumen concesionado después de 1989	Volumen concesionado antes de 1989
	Hm ³ /año	Hm ³ /año	%
Ameca	268.22	212.64	20.7
Arenal	26.81	19.97	25.50
Atemajac	155.54	50.65	67.44
San Isidro	42.32	35.28	16.63
Toluquilla	119.37	68.53	42.59

Amatitlán	9.70	8.87	8.57
Cajititlán	63.09	47.79	24.25
Lagunas	13.02	12.83	1.52
Tequila	12.39	11.68	5.77
TOTAL	710.46	468.23	23.67

Se tiene entonces que, pese a que se puede considerar para la simulación en estado estacionario una extracción del 35% con respecto al volumen extraído a la fecha, se considera un porcentaje de 60% (Figura 82) con respecto a la concesión actual. Esto debido a que la base de datos del REPDA (2018), no cuenta con datos más antiguos y de esta forma, se logra compensar con un 25% los volúmenes que no se encuentran registrados antes de 1989.

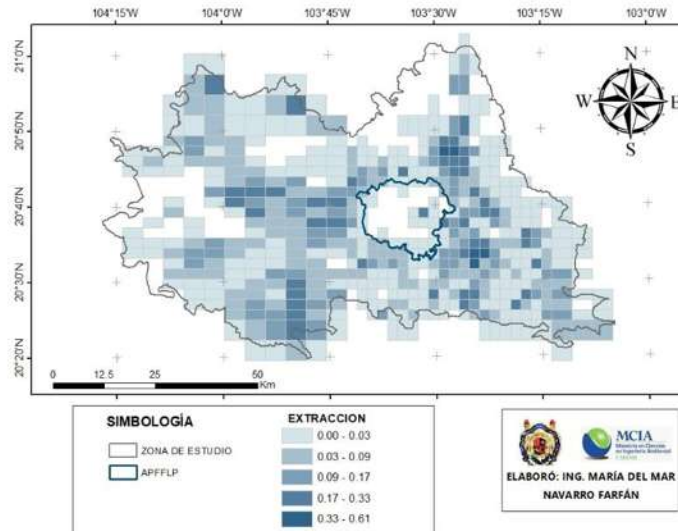


Figura 82. Mapa de extracción al acuífero para la modelación en estado estacionario del año 1989, considerando el 60% del volumen concesionado por el REPDA para el año 2014.

En un principio, es necesario localizar los manantiales en la zona de estudio, como se muestra en la Figura 83. Para este caso en particular, no se consideran en la modelación subterránea debido a que son el origen de los cauces que ya se han calibrado en el MPE. Además, al considerarse como someros no describen al acuífero profundo, por lo que se entiende que provienen de un acuífero colgado.

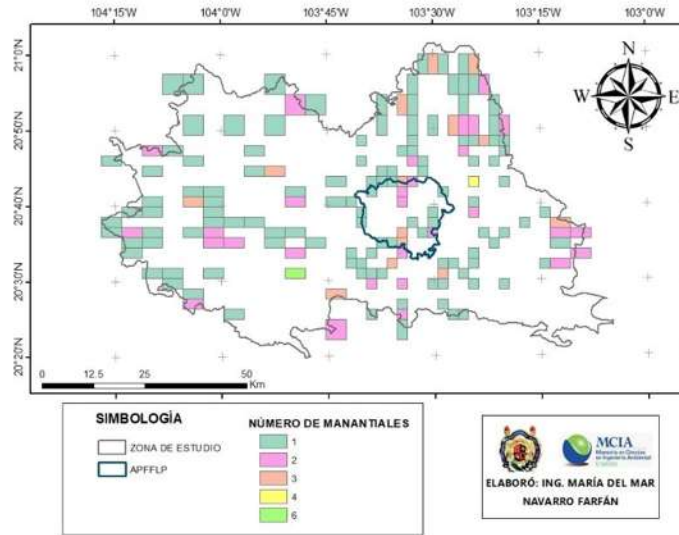


Figura 83. Número de manantiales por celda en la zona de estudio.

Se dispone con poca información para la calibración del modelo. En este caso únicamente se cuentan con valores de nivel estático en dos años, para el año 1998, se tienen 31 celdas con información, y para el año 2004 se tienen 22 celdas con información; además se cuenta con el comportamiento de las líneas de flujo mostradas en la Figura 67, lo que permite calibrar el modelo.

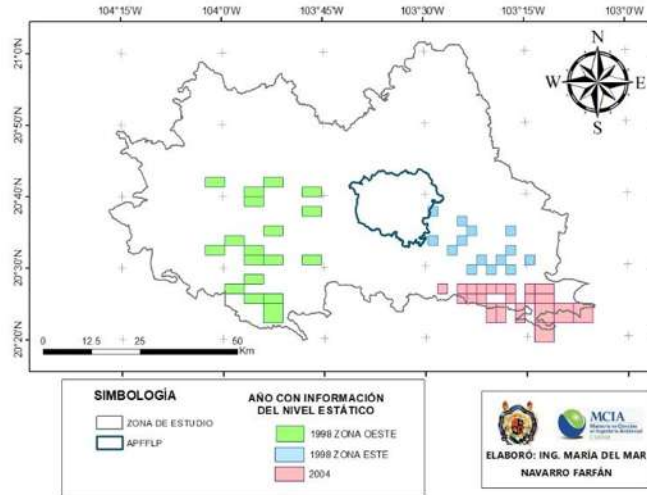


Figura 84. Celdas con información de nivel estático para 1998 y 2004.

Las celdas con información se dividen en tres zonas que se muestran en la Figura 84; se aprecia que se tienen dos grupos para los niveles estáticos observados en 1998 debido a la topografía que se tiene en la zona.

El parámetro con el cual se calibra el modelo subterráneo en MODFLOW es la conductividad hidráulica. Al cambiar el valor de la conductividad, se generan distintos escenarios, para los cuales oscilará entre su valor mínimo y máximo.

Según la geología presente en la zona de estudio, se tiene diferentes valores para la conductividad hidráulica, de esta forma, se delimitan escenarios con diferentes combinaciones de valores.

En total, se realizaron las modelaciones con veintisiete escenarios, de los cuales se consideran únicamente tres que tenían un cambio en la variación con respecto a los valores observados del nivel estático, los cuales se muestran en la Tabla 32. Como se observa, los valores de conductividad máximos tienen un crecimiento importante con respecto a la conductividad mínima.

Tabla 32. Coeficiente de almacenamiento según la geología presente en la zona de estudio.

Material Geológico	Valor de coeficiente de almacenamiento
--------------------	--

	Mínimo	Medio	Máximo
Volcánica basáltica andesítica cenozoico	3.30	165.65	328.00
Sedimentaria marina arcillosa, caliza arcillosa	33.00	1658.00	3283.00
Volcánica riolita	0.16	16.58	33.00
Terraza marina grava, arena, limos	33.00	1658.00	3283.00
Areniscas y conglomerados	99.00	542.00	985.00
Rocas metamórficas	0.16	16.58	33.00

El grupo que niveles que se muestran en la Figura 85 corresponden a las celdas en verde que se localizan al oeste del APFFLP (Figura 84); la cual tiene valores de nivel estático altos y que oscilan entre 1200 m y 1300 m ya que se localizan dentro de una zona de terreno llana; por otra parte, las celdas de control mostradas en la Figura 86, pertenecen a la zona este del bosque la primavera (Figura 84), y los valores de nivel estático van de los 1500 m a 1600 m debido a que pertenece a una zona de terreno montañoso.

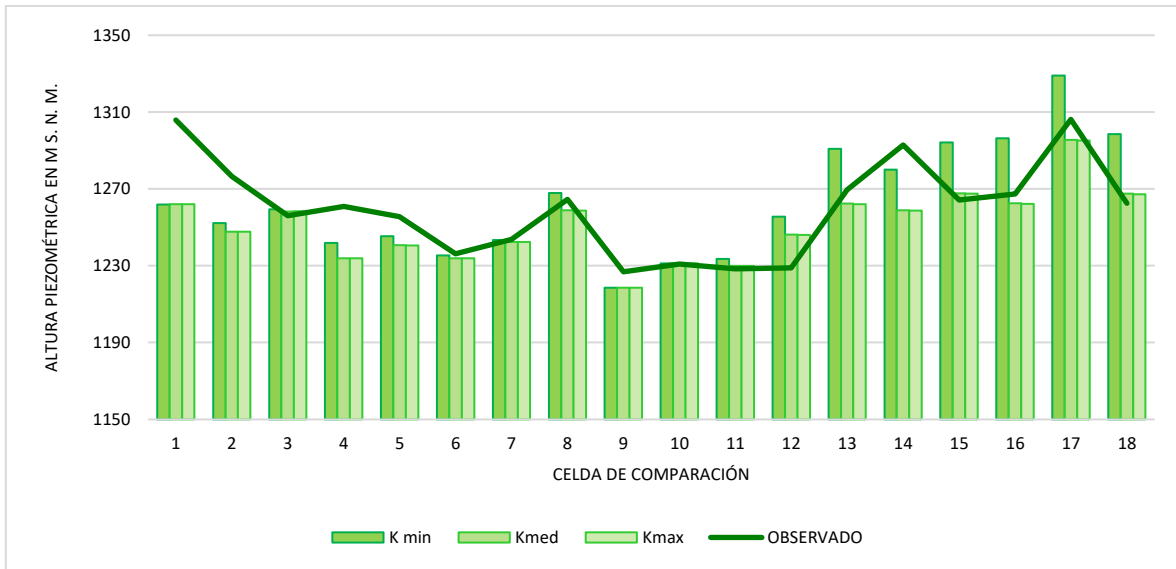


Figura 85. Comparación entre el nivel estático observado en 1998 al oeste del APFFLP y los simulados en régimen estacionario.

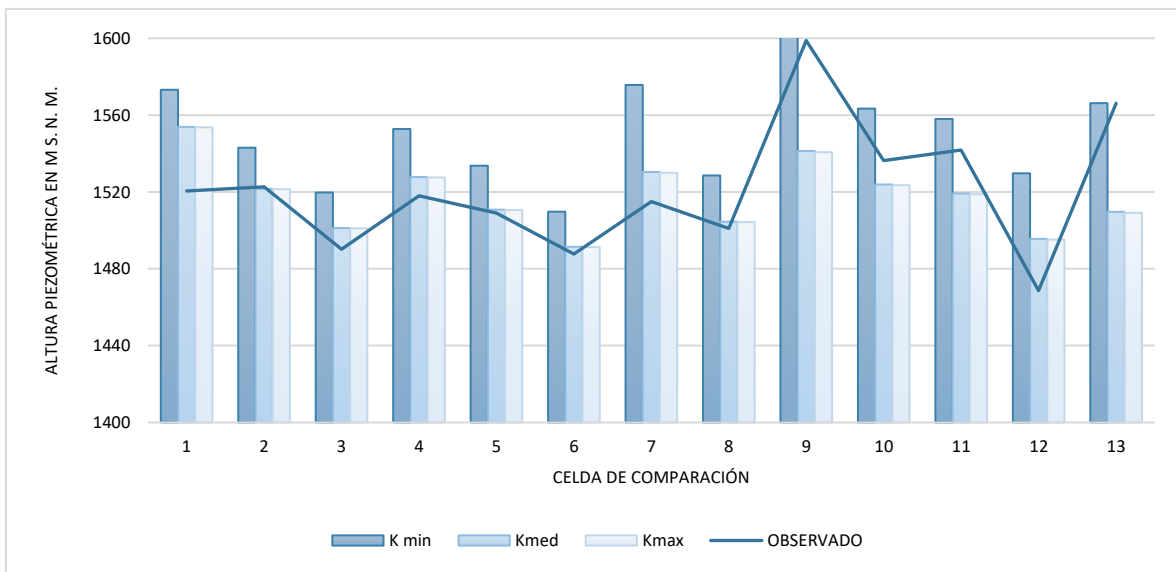


Figura 86. Comparación entre el nivel estático observado en 1998 al este del APFFLP y los simulados en régimen estacionario.

En la Figura 87, se observan las variaciones entre el nivel estático y los observados en el 2004. Los valores oscilan en el rango de 1350 m a 1650 m y corresponden a las celdas localizadas al sureste de la zona de estudio que se muestran en la Figura 84.

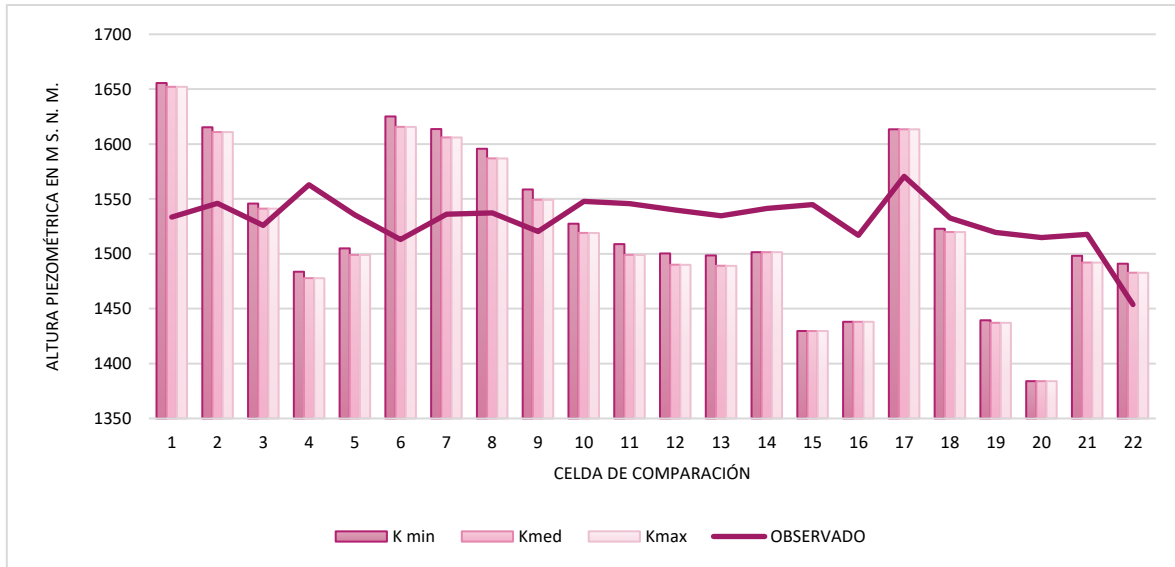


Figura 87. Comparación entre el nivel estático observado en 2004 y los simulados en régimen estacionario.

Las variaciones entre los distintos escenarios son bastante homogéneas, lo que no permite seleccionar un escenario de forma sencilla. Si se considera diferencias positivas y negativas a partir del valor del nivel estático observado, se tiene que el resultado más favorable se obtiene con el valor de conductividad mínimo, que tiene en promedio un error de 14.44 m para el año 1998 y de - 6.36 m para el año 2004.

Es importante mencionar que, cualquier valor seleccionado dentro del rango de valores de conductividad da buenos resultados en comparación con los observados; por lo cual se asevera que las condiciones de contorno fueron delimitadas de forma adecuada. Debido a ello, las direcciones de flujo se cumplen y las pendientes hidráulicas son razonables.

Se considera que la recarga natural que recibe el acuífero se obtiene a partir del volumen medio mensual obtenido con el SMM el cual, además, considera el retorno por riego; sin embargo, se consideran como extracciones el 60% del volumen concesionado en la actualidad.

En la Figura 88 se muestran los resultados de la simulación en régimen estacionario, que es, el nivel estático inicial para el año 2014 utilizando la conductividad hidráulica mínima. Además, las condiciones que se consideran son un espesor uniforme de las masas geológicas de 500 m y la consideración de las celdas de altura constante aquellas que se intersecan con los cauces de los ríos Grande Santiago y Ameca.

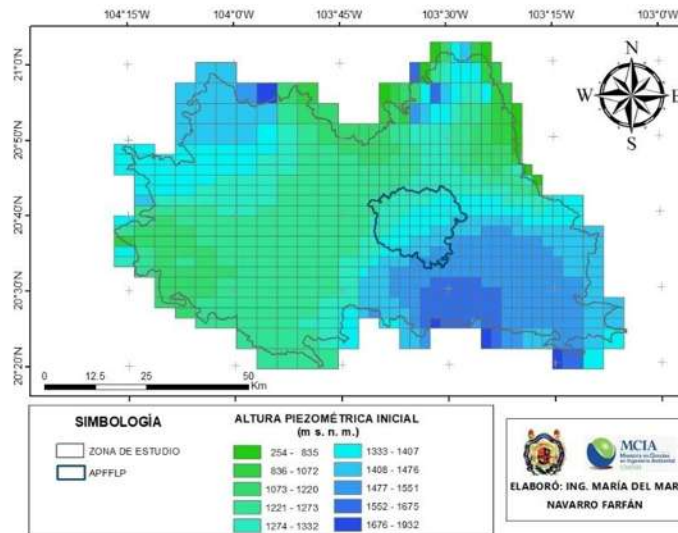


Figura 88. Altura piezométrica inicial para la modelación de las masas geológicas en régimen estacionario para el año 2014 en m. s. n. m.

Se observa que las zonas con el nivel estático más alto se localizan dentro del bosque la primavera, y el nivel baja de forma casi radial hacia los extremos de la zona de estudio. Sin embargo, en la zona noroeste, dicho nivel se mueve hacia el sur.

Cabe destacar que puede realizarse una simulación sin considerar las celdas de altura constante; sin embargo, la misma simulación no representará adecuadamente el flujo subterráneo y las direcciones del mismo. En este sentido, se realiza una simulación en estado estacionario para el escenario presente al año 2014.

4.6 ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO





Para realizar las modelaciones con cambio climático, es necesario considerar las distintas combinaciones que pueden realizarse; en este caso, como se muestra en la Tabla 33, se tienen 24 escenarios.

Tabla 33. Escenarios utilizados en la modelación con cambio climático, considerando el MCG, país de procedencia, RCP y horizonte.

ESCENARIO	MODELO		RCP	HORIZONTE
	CLAVE	NOMBRE		
1	M1	MPI_ESM_LR	4.5	Futuro Cercano
2	M1	MPI_ESM_LR	4.5	Futuro Medio
3	M1	MPI_ESM_LR	4.5	Futuro Lejano
4	M2	GFDL_CM3	4.5	Futuro Cercano
5	M2	GFDL_CM3	4.5	Futuro Medio
6	M2	GFDL_CM3	4.5	Futuro Lejano
7	M3	CNRMCM5	4.5	Futuro Cercano
8	M3	CNRMCM5	4.5	Futuro Medio
9	M3	CNRMCM5	4.5	Futuro Lejano
10	M4	HADGEM2_ES	4.5	Futuro Cercano
11	M4	HADGEM2_ES	4.5	Futuro Medio
12	M4	HADGEM2_ES	4.5	Futuro Lejano
13	M1	MPI_ESM_LR	8.5	Futuro Cercano
14	M1	MPI_ESM_LR	8.5	Futuro Medio
15	M1	MPI_ESM_LR	8.5	Futuro Lejano
16	M2	GFDL_CM3	8.5	Futuro Cercano
17	M2	GFDL_CM3	8.5	Futuro Medio
18	M2	GFDL_CM3	8.5	Futuro Lejano
19	M3	CNRMCM5	8.5	Futuro Cercano
20	M3	CNRMCM5	8.5	Futuro Medio
21	M3	CNRMCM5	8.5	Futuro Lejano
22	M4	HADGEM2_ES	8.5	Futuro Cercano
23	M4	HADGEM2_ES	8.5	Futuro Medio
24	M4	HADGEM2_ES	8.5	Futuro Lejano

De la base de datos del INECC se descargan los datos de cada escenario; de esta forma, se obtienen las anomalías mensuales para las series de temperatura y para las series de precipitación se descargaron las series mensuales afectadas por el efecto del cambio climático y la serie de control, la cual otorga los valores mensuales de la serie observada en el periodo histórico de año 1961 a 2000.

La clave del MCG mostrada en la Tabla 33, será utilizado en las gráficas de variación de precipitación, temperatura e infiltración profunda. Además, se muestran en los gráficos tres fondos: el verde representa los escenarios de futuro cercano, con color amarillo se localizan los escenarios en futuro medio y con fondo naranja se muestran los escenarios pertenecientes al futuro lejano.

	MPI_ESM_LR	M1
	GDFL_CM3 M3	M2
	CNRMCM5	M3
	HADGEM2_ES	M4

De esta forma, se obtiene la gráfica de variación de temperatura media anual para los distintos escenarios de cambio climático, mostrando la Figura 89 para el RCP 4.5 y la Figura 90 para el RCP 8.5; donde se observa que el escenario más crítico se presenta en el horizonte futuro del modelo CNRMCM5 (M3) del forzamiento radiativo 8.5, con un aumento de temperatura media anual de 8°C.

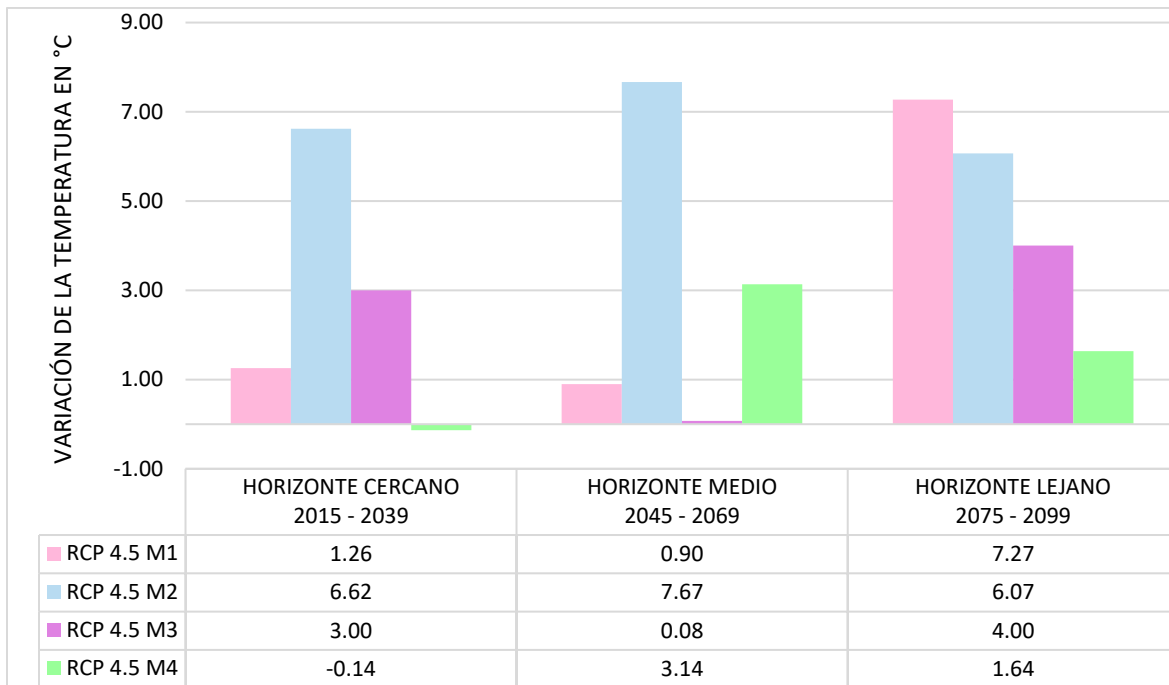


Figura 89. Variación de la precipitación en °C con los distintos escenarios de cambio climático (M1, M2, M3, M4) del RCP 4.5.

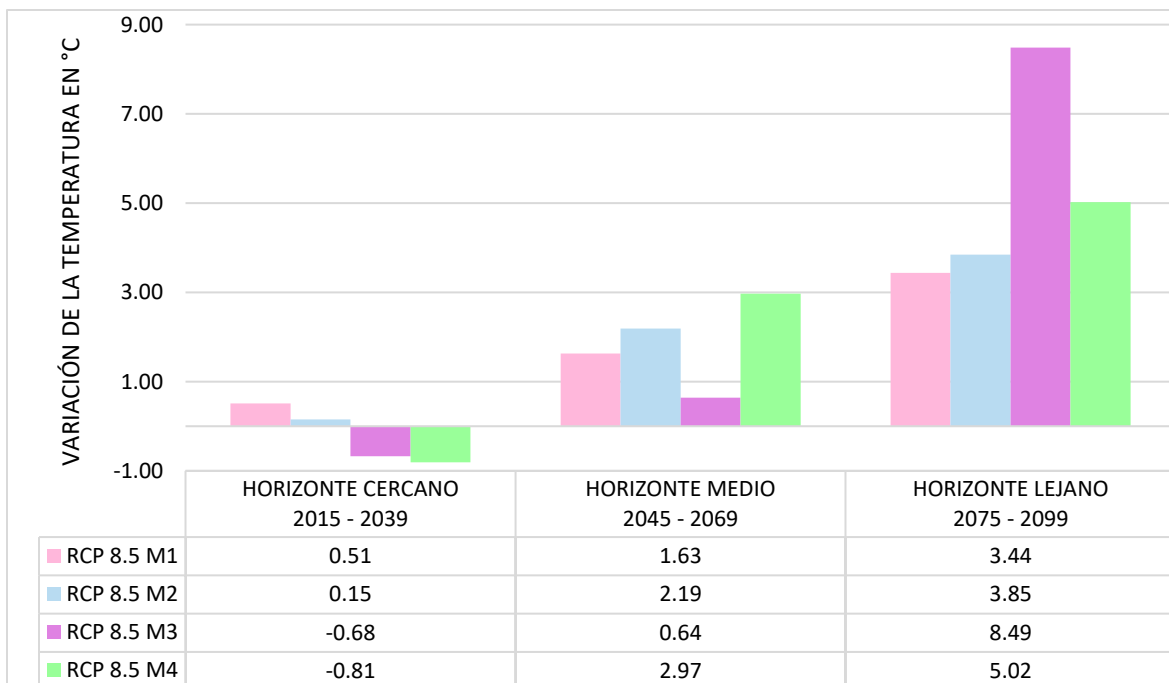


Figura 90. Variación de la precipitación en °C con los distintos escenarios de cambio climático (M1, M2, M3, M4) del RCP 8.5.

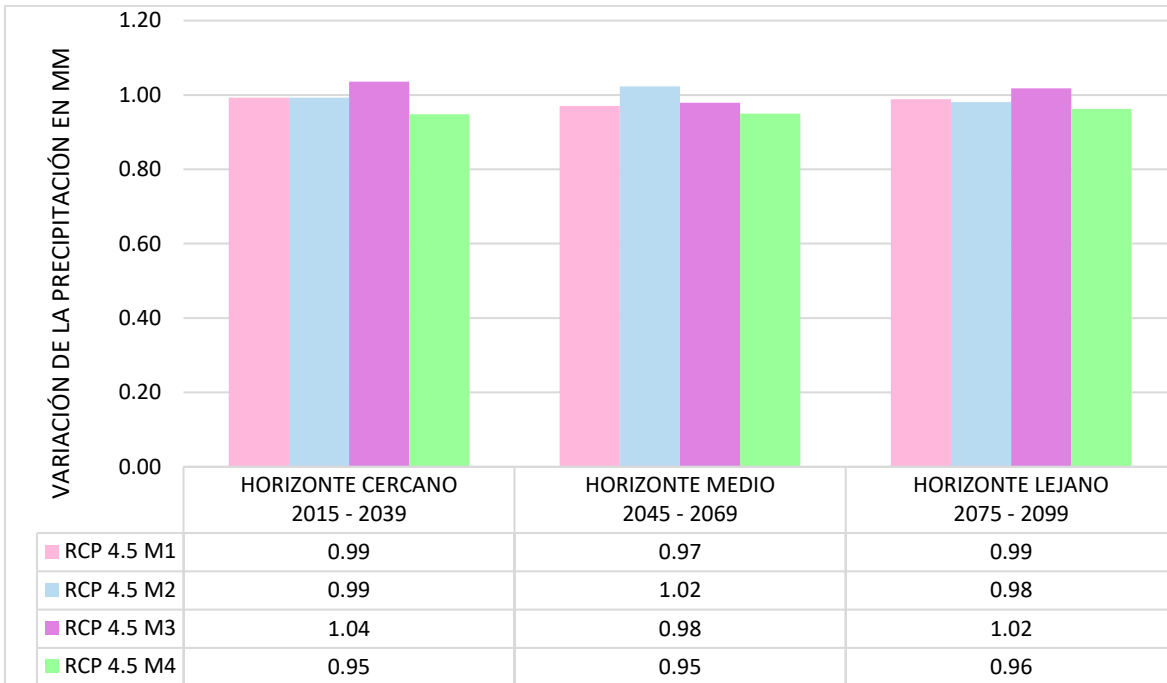


Figura 91. Variación del volumen precipitación en mm con los distintos escenarios de cambio climático (M1, M2, M3, M4) del RCP 4.5.

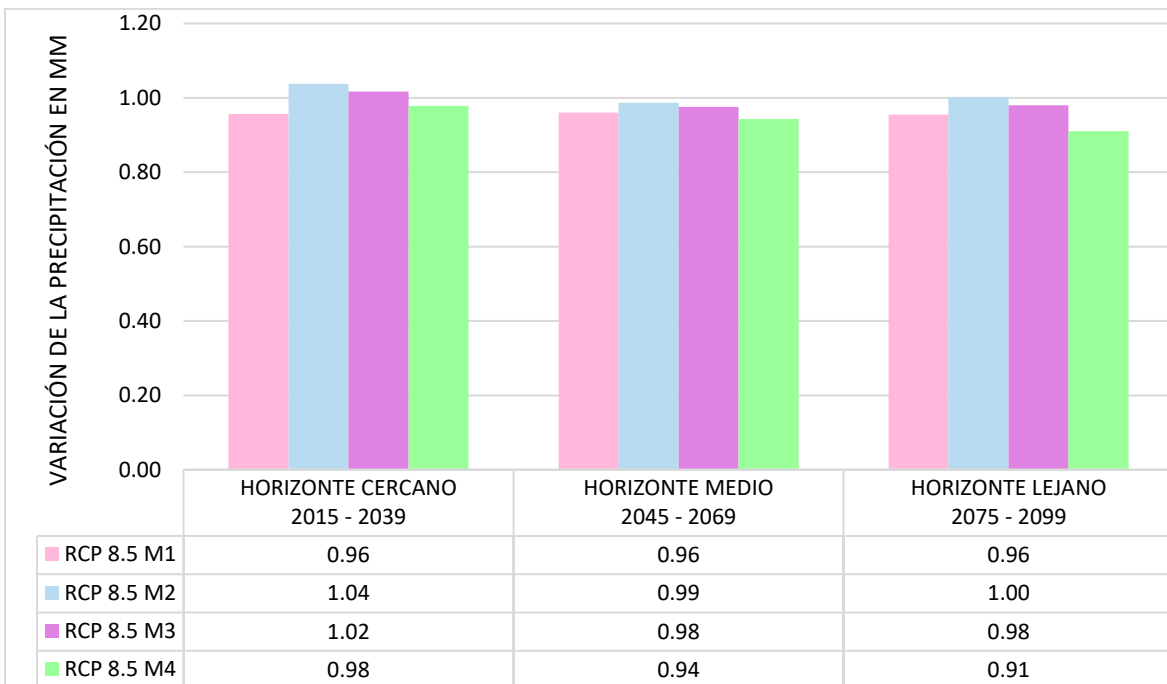


Figura 92. Variación del volumen precipitación en mm con los distintos escenarios de cambio climático (M1, M2, M3, M4) del RCP 8.5.

De la misma manera, se obtuvieron las gráficas de variaciones de precipitación media anual como se muestran en la Figura 91 y Figura 92 para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 respectivamente; donde se muestra que los escenarios más críticos se presentan en el MCG HADGEM2_ES (M4) en el forzamiento radiativo 8.5 para el horizonte futuro, con una variación de -80 mm con respecto a la serie de control. Sin embargo, para el horizonte cercano del modelo GDFL_CM3 (M2) con un forzamiento radiativo de 8.5, se tiene un incremento de 36 mm.

Para el volumen infiltrado en el acuífero se tiene que habrá un descenso de 9 Hm³ en el horizonte cercano con el MCG HADGEM2_ES (M4) en el forzamiento radiativo de 4.5 (Figura 93), esto debido a que la temperatura no cambia con respecto a la serie de control, por lo que la evapotranspiración es prácticamente la misma, y de esta forma, el balance se compensa con el volumen infiltrado al acuífero. El caso contrario se presenta en el horizonte cercano con el MCG GDFL_CM3 (M2) con el RCP 8.5; donde la recarga en el acuífero incrementa 11 Hm³ debido a que la temperatura no cambia y la precipitación en la zona aumenta (Figura 94).

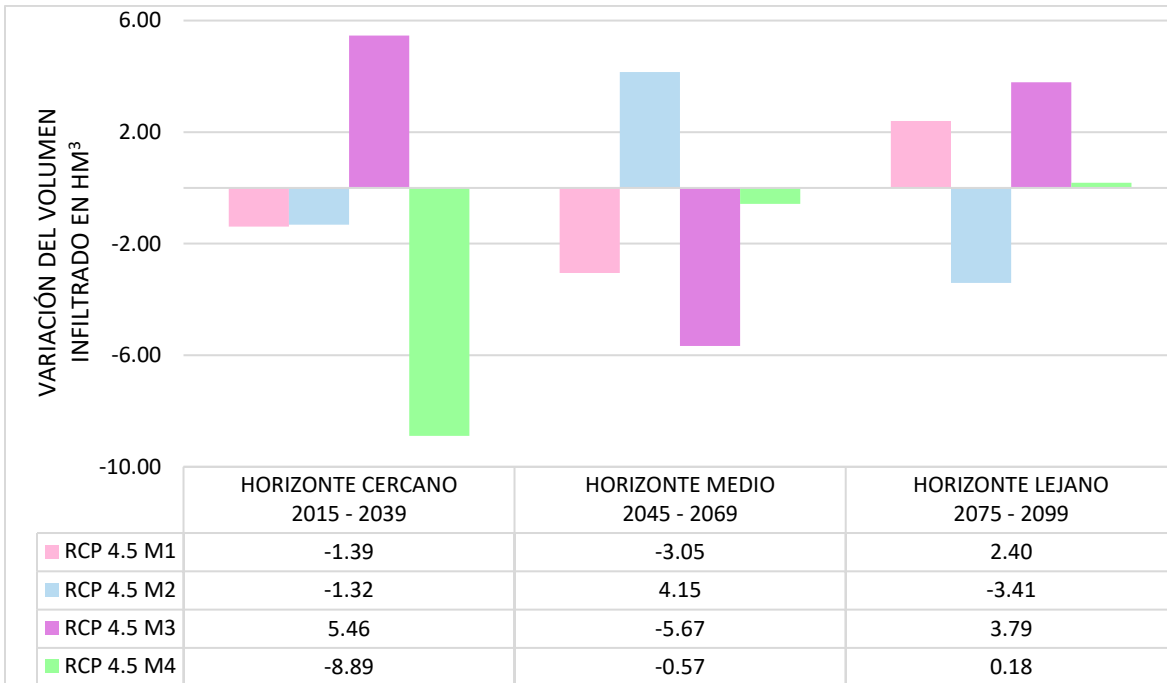


Figura 93. Variación del volumen infiltrado al acuífero profundo en Hm³ con los distintos escenarios de cambio climático (M1, M2, M3, M4) del RCP 4.5.

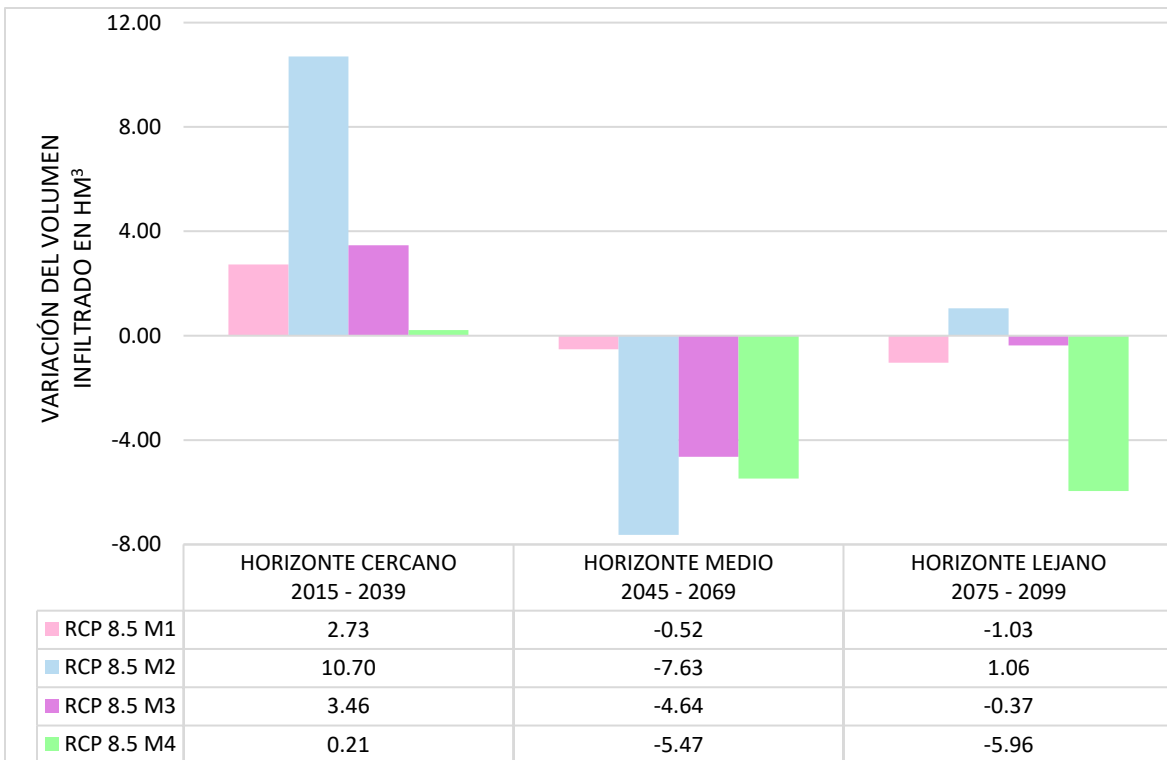


Figura 94. Variación del volumen infiltrado al acuífero profundo en Hm³ con los distintos escenarios de cambio climático (M1, M2, M3, M4) del RCP 8.5.

Se observa también en la Figura 94, que para el RCP 8.5, el M4, (MCG HADGEM2_ES perteneciente al Reino Unido) es el único que tiene una tendencia constante hacia una disminución del volumen infiltrado.

También se presentan volúmenes con variaciones positivas, las cuales no se toman en cuenta para las simulaciones en la zona de estudio, esto debido a que la toma de decisiones debe realizarse con el escenario más crítico para que, de esta forma, se esté preparado para la situación más desfavorable o para el valor más representativo (el cual puede determinarse por medio de la media).

Debido a que muchos de los escenarios cuentan con valores similares en comparación con el volumen infiltrado, se realiza una selección de escenarios representativos, los cuales son los que se simularán en estado estacionario.

Como primer punto, se seleccionan los MCG con base al horizonte que representan: futuro cercano, medio o largo; de ellos se toman cuatro escenarios, dos por cada RCP (4.5 y 8.5) que representan el promedio de la variación de la infiltración y la máxima disminución de la infiltración en la zona. Como se muestra en la Tabla 34 se tiene un total de 12 modelaciones.

Tabla 34. Escenarios de cambio climático seleccionados para las simulaciones en estado estacionario. Entre paréntesis se muestra el escenario correspondiente.

RCP	Promedio de variación de infiltración			Máxima disminución en la infiltración		
	Futuro Cercano	Futuro Medio	Futuro Lejano	Futuro Cercano	Futuro Medio	Futuro Lejano
4.5	M1 (1)	M1	M4	M4	M3	M2

8.5

M3

M3

M1

M4

M2

M4

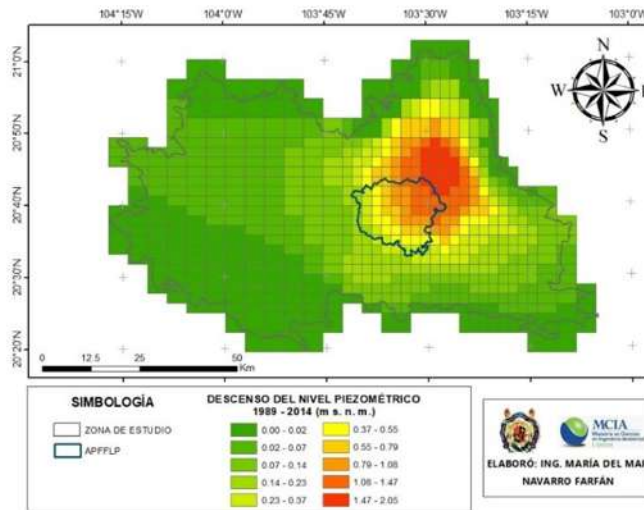


Figura 95. Descenso en los niveles piezométricos observados en el periodo 1989 – 2014.

Una vez que se realizan las modelaciones en el estado estacionario, se realiza el cálculo de la variación del nivel estático en las masas geológicas. Se compara el nivel estático celda por celda con los obtenidos de la modelación en estado estacionario realizado para la serie de control al año 2014, cuyos resultados de variación se presentan en la Figura 95. Estos se obtienen de comparar el resultado de la simulación en régimen estacionario en el año 1989 y el resultado de la simulación en régimen estacionario para el año 2014. Se observa entonces, que en la zona noroestes del APFFLP se presenta el mayor decremento de nivel estático, con valores que superan los 2 m de descenso.

Para la Tabla 35, se considera la pérdida de volumen partiendo de los resultados de la modelación en régimen estacionario en el año 2014. De esta forma, se entiende que el volumen disminuido depende del valor del nivel estático que se tenía al 2014; además, al momento de realizar las modelaciones con MODFLOW se utiliza como la altura de nivel estático inicial, el cual es mostrado en la Figura 96.

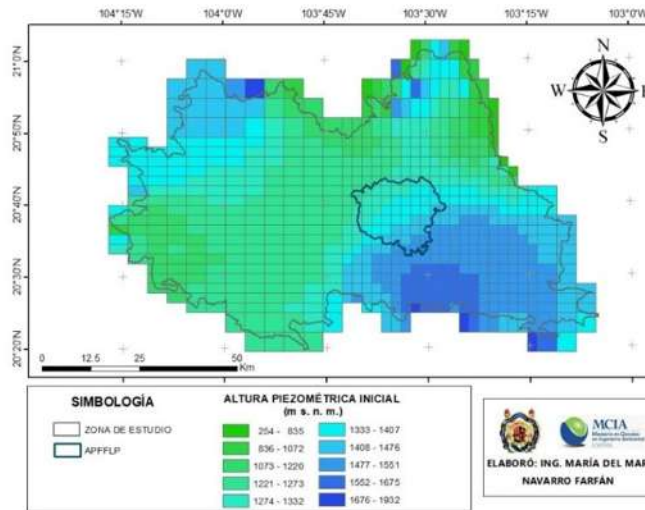


Figura 96. Altura piezométrica inicial para las modelaciones afectadas por acción del cambio climático.

Únicamente se muestran los resultados para aquellas modelaciones que tienen una variación importante en el volumen, todas pertenecen al RCP 8.5, a excepción de la modelación con el escenario 12, la cual forma parte del RCP 4.5, en horizonte de futuro lejano.

Como se observa en la Tabla 35, se tiene que el volumen disminuido en el APFFLP corresponde al 18% del volumen total perdido en la zona de estudio. Esto es importante debido a que el APFFLP representa solamente el 5% del área total de estudio. Ante esto, se tiene entonces que, el escenario más desfavorable es el 24, el cual pertenece al MCG del Reino Unido HADGEM2_ES en el RCP 8.5 para el horizonte de futuro lejano.

Tabla 35. Volumen total disminuido en Hm^3 , considerando la zona de estudio completa, el APFFLP y el Campo Geotérmico.

Escenario	12	15	17	20	22	24
Zona de Estudio	269.96	263.93	149.43	144.33	158.22	523.66
APFFLP	48.81	47.09	25.73	25.52	29.18	95.11
Campo Geotérmico	1.04	1.02	0.57	0.54	0.65	2.08

En la Figura 97 y Figura 98 se muestran las variaciones de los niveles estáticos más críticas para el RCP 4.5 y RCP 8.5 respectivamente. El escenario con cambio climático de futuro lejano HADGEM2_ES es el que mostró un resultado más crítico para el RCP4.5; el descenso máximo que se presenta en la zona de estudio es de 23 cm y se localiza en la zona roja mostrada en la Figura 97.

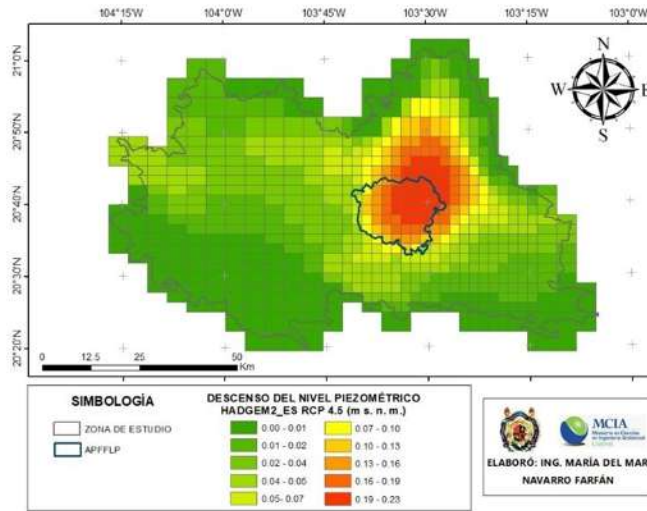


Figura 97. Descenso del nivel piezométrico (en m s. n. m.) resultado de la modelación subterránea en estado estacionaria con el escenario 12, correspondiente al MCG HADGEM2_ES RCP 4.5.

Como se muestra en la Figura 98, el escenario afectado por el cambio climático corresponde al HADGEM2_ES RCP 8.5 en un horizonte de futuro lejano, los resultados muestran descensos dentro de la zona de estudio hasta de 45 cm, los cuales se localizan en la zona noroeste del APFFLP y noroeste de la ZMG. Como se observó en la El área con los descensos más altos es la que comparte el mismo lecho geológico (observado en la Figura 26. Masas geológicas que conforman la zona de estudio.); con lo que se demuestra que, pese a que los pozos de extracción no se localizan dentro del APFFLP, estos la afectan de forma directa.

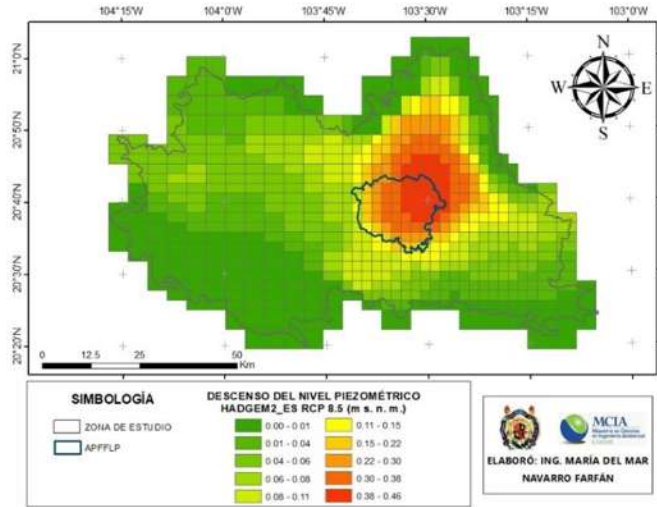


Figura 98. Descenso del nivel piezométrico (en m. s. n. m.) resultado de la modelación subterránea en estado estacionaria con el escenario 24, correspondiente al MCG HADGEM2_ES RCP 8.5.

Así mismo, se realiza un mapa (Figura 99) donde se observa que, el descenso del nivel estático en el APFFLP llega hasta los 46 cm en la zona donde se localiza el campo geotérmico Cerritos Colorados, esto sin considerar que los volúmenes extraídos en la zona de estudio deben aumentar con el paso del tiempo.

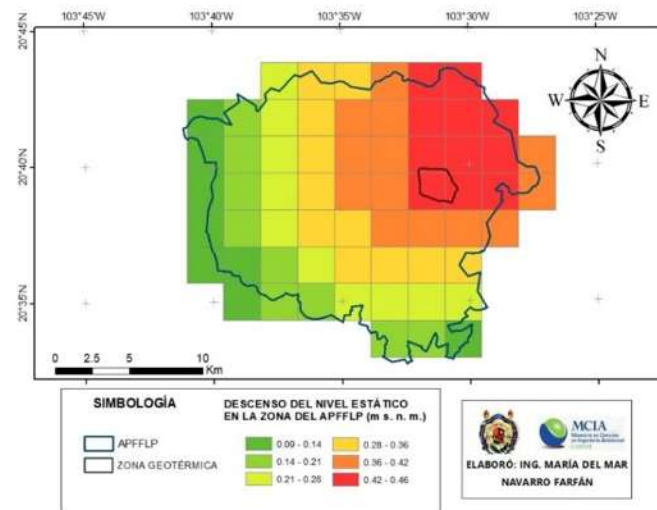


Figura 99. Descensos en el APFFLP (en m. s. n. m.) resultado de la modelación subterránea en estado estacionario con el escenario 24, correspondiente al MCG HADGEM2_ES RCP 8.5 para el APFFLP.

5 CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

No existe información pública sobre los niveles presentes en la zona de estudio y más concretamente en el campo geotérmico. Sin embargo, resulta importante que, para poder considerar la reapertura del campo geotérmico, debe tomarse en consideración el efecto del cambio climático sobre la zona de estudio.

En un futuro, el crecimiento poblacional aunado al descenso del nivel freático puede generar el fenómeno de subsidencia, el cual afecta de forma directa a la ZMG.

La operación del Campo Geotérmico Cerritos Colorados es posible siempre y cuando se limiten las concesiones otorgadas por el REPDA en la zona de estudio, de tal forma que se evite que el descenso de los niveles piezométricos se vean afectados. Además, se debe considerar que cuando se realizó la visita de campo, se observó que el bosque se ha recuperado desde que el campo geotérmico dejó de operar.

5.1 GESTIÓN DE DATOS

La falta de información meteorológica e hidrométrica en México es un problema grave; debido a ello, es importante probar para una misma zona, diferentes modelos hidrológicos que pueden representar adecuadamente las condiciones y procesos que se tengan.

En México no se cuenta con la información necesaria para realizar una restitución a régimen natural en las estaciones hidrométricas; esta fue la principal razón para trabajar con cuencas de cabecera; sin embargo, esta decisión fue un limitante importante para el trabajo, debido a que no se conocían características específicas para cada zona.

Se revisó de manera visual y mediante el coeficiente de escurrimiento y el módulo relativo que las cuencas hidrométricas generadas tuvieran la menor alteración antropogénica posible.

5.2 MODELACIÓN SUPERFICIAL

Como primera opción se realiza la modelación superficial con el modelo Témez, pero, al no representar adecuadamente la infiltración profunda, se migró a un modelo de tres tanques, de tal forma que pudiera separarse directamente el flujo al acuífero y el interflujo.

El modelo HBV no pudo ser utilizado adecuadamente debido a que requiere datos diarios; se descartó y por ello se implementa el uso de SMM.

El indicador medio que se utiliza para calibrar las cuencas es el promedio de los cuatro indicadores de bondad de ajuste (NSE, Ln NSE, r, SC); se considera de esta forma debido a que la calibración que representa mejor los volúmenes observados se logra al ponderar con el mismo peso todos los indicadores de bondad de ajuste. Para poder considerarlos por separado, se requiere realizar una calibración multiobjetivo, que, en este caso, no es posible debido a que el calibrador SCE-UA concentra todo en un mismo valor. Por otra parte, este indicador medio es válido únicamente porque todos los indicadores de bondad de ajuste oscilan en el rango de -1 a 1.

La importancia de la calibración numérica tanto para Témez, como para el SMM se basó en el coeficiente de simetría, debido a que este valor preserva la media de las series y a que se trabajan valores mensuales para periodos largos, se requiere mantener esta característica a lo largo de la simulación.

Una vez que se determinan las cuencas que lograron simularse con el modelo Témez (pertenecientes a las estaciones 12 607, 14 011, 14 018), se considera trabajar para el SMM únicamente con ellas debido a que así se logra una comparación más clara.

La cuenca 14 018 fue la única que no se representa correctamente con el modelo Témez, sin embargo, el modelo SMM mejoró considerablemente la gráfica de volúmenes medios mensuales y los indicadores de bondad de ajuste.

El SMM, es un modelo maleable, en el sentido que su calibración es fácil debido a que, pese a que tiene 9 parámetros para calibrar, solamente 4 están directamente relacionados con el flujo superficial y subterráneo; estos parámetros son: el coeficiente de cultivo, la

conductividad y capacidad de almacenamiento en la zona de raíces y el factor de resistencia al flujo; además, el rango de aplicación que pueden utilizar los parámetros es amplio.

Es importante considerar que la calibración del SMM fue sencilla debido a que se conocían los volúmenes evapotranspirados en la zona de estudio.

El resultado del balance hídrico en toda la zona de estudio es aceptable debido al porcentaje de error que representa el cierre del mismo es prácticamente cero.

Al realizar el traslado de parámetros y la similitud hidrológica se observa que, con la similitud hidrológica se incrementan los volúmenes precipitados; ya que, sin este incremento, no hubiera sido posible alcanzar el valor de los volúmenes escurridos. El realizar el balance en la zona de estudio permitió determinar el error y de esta forma, descartar el método.

5.3 MODELACIÓN SUBTERRÁNEA

Al calibrar la modelación subterránea se observa que los valores del nivel estático no tienen una variación importante con respecto al valor de conductividad utilizado, lo que demuestra que el modelo es más sensible a las condiciones de contorno como es el caso de las celdas de altura constante.

Al construir el modelo de MODFLOW, no se consideran los manantiales debido a que éstos ya se habían tomado en cuenta al momento de realizar la modelación superficial con el modelo de tres tanques (SMM).

Debido a la escasez de información resulta complicado realizar modelaciones subterráneas en estado transitorio debido a que no se cuenta con series mensuales de extracción. Realizar la modelación en estado transitorio con la información con que se cuenta, supondría que el volumen de extracción es cíclico anualmente y no permite observar el descenso en la zona de estudio de forma clara.

Se consideró que para año de 1989 las extracciones serían el 60% de las concesionadas al año 2018 debido a que no se tiene un registro claro de los volúmenes extraídos en ese año

y a que, según la información, solo se había concesionado el 35% del volumen en la actualidad.

Al realizar la modelación subterránea en régimen estacionario, obtenemos un único valor como si se realizara el estado transitorio. Esto permitió, además, realizar las modelaciones para los 24 escenarios que se obtuvieron con los cuatro MCG.

5.4 CAMBIO CLIMÁTICO

El escenario más desfavorable de cambio climático que se presentó en la zona de estudio fue el MCG perteneciente al Reino Unido: HADGEM2_ES con el horizonte futuro lejano para el RCP 8.5; con el que se obtuvo una disminución anual de 72 Hm³.

En general, cada cuenca debería de tener un propio MCG que se acople a las características de la zona; sin embargo, existe la limitante de observar y procesar los datos en tiempo real.

Se utilizan los datos proporcionados por el INECC con una resolución de 926 m. Se trabajó con las series de anomalías de cambio climático, sin embargo, estas no arrojaron valores favorables debido a que el cambio es constante; por ello, se obtuvo el porcentaje de variación con las series afectadas por el cambio climático y la serie de control.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUA. (10 de Junio de 2019). Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, A. C. . Obtenido de Sistemas de riego y disponibilidad del agua: <https://agua.org.mx/actualidad/tipos-riego-disponibilidad-del-agua/>

Alcocer Santos, P., y Valdés Valdés, S. (2014). Anillo Primavera. Perspectivas en la gestión de la zona de amortiguamiento del bosque La Primavera desde la visión de los Paisajes Culturales. Guadalajara: ITESO .

Allen, R. G. (2006). Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Food & Agriculture Organization.

Almorox Alonso, J. (2003). Métodos de estimación de las evapotranspiraciones ETP y ETR. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.

Anderson, R. (1941). Distribution of the Serial Correlation Coefficient. The Annals of Mathematical Statistics.

Aparicio Mijares, F. (1992). Fundamentos de Hidrología de Superficie. México: Editorial Limusa.

BANDAS. (2019). Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales. Obtenido de Conagua: <http://www.conagua.gob.mx/conagua07/contenido/documentos/portada%20bandas.htm>

Bergström, S. (1976). Development and Application of a Conceptual Runoff Model for Scandinavian Catchments. Hydrologi Och Oceanografi.

Campos Aranda, D. F. (1998). Procesos del Ciclo Hidrológico. San Luis Potosí: Editorial Universitaria Potosina.

Campos Aranda, D. F. (2007). Estimación y Aprovechamiento del Escurrimiento. México: UNAM.

Carrillo Rodriguez, M. C., y Bedoy Velázquez, V. (2014). Propuesta de programa maestro de educación ambiental para el APFFLP, Jalisco, México. Zapopan, Jalisco: Universidad de Guadalajara.

Casas Mas, A., y Paredes Arquiola, J. (2013). Evaluación del recurso hídrico en la cuenca del río Turia (España) mediante la aplicación de modelos semiagregados de Precipitación-Escorrentía. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia .

Cavazos, T., Ayala, R., y Colorado, G. (2013). Actualización de escenarios de cambio climático para México como parte de los productos de la Quinta Comunicación Nacional. México : CICESE, IMTA, UNIAMTOS.

CEA Jalisco. (08 de Febrero de 2019). Comisión Estatal de Agua Jalisco. Obtenido de Acuíferos: <https://www.ceajalisco.gob.mx/contenido/acuiferos/>

Chow, V., Maidment, D. R., y Mays , L. (1994). Hidrología aplicada . Colombia : McGRAW HILL.

CICESE. (2018). CLICOM. Obtenido de Base de Datos Climatológica Nacional: <http://clicom-mex.cicese.mx/mapa.html>

Cogliati, M. G., Ostertag, G., Caso, M., Finessi, F. G., y Groch, D. (2018). Análisis del Balance Hídrico Medio Mensual en la Provincia del Neuquén (Argentina). Boletín Geográfico, 26-44.

CONABIO. (Julio de 2018). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Obtenido de Portal de Geoinformación: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>

CONAGUA. (2015 a). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Ameca (1409). Estado de Jalisco, México: Diario Oficial de la Federación.

CONAGUA. (2015 b). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Arenal (1436). Estado de Jalisco, México: Diario Oficial de la Federación.

CONAGUA. (2015 c). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Atemajac (1401). Estado de Jalisco, México: Diario Oficial de la Federación.

CONAGUA. (2015 d). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero San isidro (1450). Estado de Jalisco, México: Diario Oficial de la Federación.

CONAGUA. (2015 e). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Toluquilla (1402). Estado de Jalisco, México: Diario Oficial de la Federación.

CONAGUA. (27 de Marzo de 2015). Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015. Conservación del recurso agua, que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales. D.F., México: Diario Oficial de la Federación.

CONANP. (2000). Programa De Manejo. Área De Protección De Flora Y Fauna La Primavera. En Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. México.

Cotler Ávalos, H., Galindo Alcántar, A., González Mora , I., Pineda López, R., y Ríos Patrón, E. (2013). Cuencas hidrográficas. Fundamentos para su manejo y gestión. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Díaz Vera, A., Filonov, A., y Tereschenko, I. (2005). Influencia del Bosque La Primavera al Clima Urbano de la Zona Metropolitana de Guadalajara, México. Zapopan, Jalisco: I Foro de investigación y conservación del bosque La Primavera.

Duan, Q., Sorooshian, S., y Gupta , V. (1992). Effective and Efficient Global Optimization for Conceptual Rainfall-Runoff Models. Water Resources Research, 1015-1031.

Duque, L., y Vázquez, R. (2017). WEAP 21 based modeling under climate change considerations for a semi-arid region in southern-central Chile. Chile.

Escobar, M. (2011). Evaluación de los impactos del cambio climático en la hidrología de montaña: Desarrollo de una metodología a través de un estudio de caso en los Andes del Perú. USA.

Fallas, J. (2007). Modelos digitales de elevación: Teoría, métodos de interpolación y aplicación.

Felicísimo, A. M. (1994). Modelos Digitales del Terreno: Introducción y aplicación de las ciencias ambientales.

Fernández Eguiarte, A., Zavala Hidalgo, J., Romero Centeno, R., Conde Álvarez, A., y Trejo Vázquez, R. (2015). Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación en México y Centroamérica. México: UNIATMOS, UNAM, INECC.

Fernández, J., García Díez, M., y Gutiérrez, J. (2019). CORDEX. España: Grupo de Meteorología Santander. Obtenido de Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment.

Fernández Urizar, I. (2017). Modelación matemática del flujo de agua subterránea del acuífero Rquena-Utiel. Estudio del plan de explotación de la masa de agua. España.

Fundación Biodiversidad, Oficina Española de Cambio Climático, Agencia Estatal de Meteorología, y Centro Nacional de Educación Ambiental. (2013). Cambio Climático: Bases Físicas. Guía Resumida del Quinto Informe de Evaluación del IPCC. España: Gobierno de España. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.

García, M., Peters Lindard, C., y Goodrich, D. (2008). Spatial interpolation of precipitation in a dense gauge network for monsoon storm events in the southwestern United States. Water Resources Research.

Gobierno de Jalisco. (23 de Mayo de 2019). Bosque La Primavera. Obtenido de Contexto Social: <http://bosquelaprimavera.com/social.php>

Gobierno del Estado de Jalisco. (2014). Abastecimiento de agua en la ZMG está garantizado. Guadalajara, Jalisco: CEA y SIAPA.

Gobierno del Estado de Jalisco. (21 de Febrero de 2019). Jalisco. Obtenido de Área Metropolitana de Guadalajara: <https://www.jalisco.gob.mx/es/jalisco/guadalajara>

Harbaugh, A. (2005). MODFLOW-2005, The U. S. Geological Survey Modular Ground-Water Model. Estados Unidos: U.S. Geological Survey.

Heredia Koo, G. P., y Cieza Sánchez, J. L. (2017). Gestión integrada del recurso hídrico en la cuenca baja del río Zaña. Perú .

Huerta Martínez, F., e Ibarra Montoya, J. (2014). Incendios en el Bosque La Primavera (Jalisco, México): un acercamiento a sus posibles causas y consecuencias. Ciencia UAT.

Imaz Lamadrid, M., Wurl, J., y Ramos Velázquez, E. (2019). Future of Coastal Lagoons in Arid Zones Under Climate Change and Anthropogenic Pressure. A Case Study from San José Lagoon, Mexico. Resources.

IMTA. (10 de Enero de 2017). IMTA. Obtenido de Instituto Mexicano de Tecnología del Agua: <https://www.imta.gob.mx>

INECC, SEMARNAT, e INEGI. (21 de Mayo de 2019 a). México ante el Cambio Climático. Obtenido de ¿Qué es Cambio Climático?: <https://cambioclimatico.gob.mx/descarga-infografia-acerca-del-cambio-climatico/>

INECC, UNIATMOS, y UNAM. (20 de Mayo de 2019 b). Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impacto, vulnerabilidad y adaptación. Obtenido de Bases de datos: http://atlasclimatico.unam.mx/AECC_descargas/

INEGI. (20 de Octubre de 2017 a). Continuo de Elevaciones Mexicano. Obtenido de Descarga de Datos: <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>

INEGI. (2017 b). Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (INEGI) Obtenido de <http://www.beta.inegi.org.mx/inegi.html>

INEGI. (10 de Enero de 2019 a). INEGI. Obtenido de Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática: <http://www.beta.inegi.org.mx/inegi.html>

INEGI. (21 de Febrero de 2019 b). INEGI, Cuéntame. Obtenido de División Municipal 2015:

http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/jal/territorio/div_municipal.aspx?tema=me&e=14

ITESO, y UNIVA. (21 de Febrero de 2019). Jalisco Cómo Vamos. Obtenido de ¿Dónde es el AMG?: <http://www.jaliscocomovamos.org/donde-es-el-area-metropolitana-de-guadalajara>

Leguizamón Leal, C. F. (2017). Evaluación de las garantías de suministro del recurso hídrico en la provincia del Tequendama por medio de la herramienta WEAP. Colombia.

Llamoca, M., Quispe, E., y Quispe, Y. (2017). Modelado hidrogeológico de la microcuenca Chorunga, detallado en el área de la Mina Century; aplicación a la calidad de las captaciones de agua de abastecimiento urbano del poblado de San Juan de Chorunga (Condesuyos). Perú.

López García, T. G., Manzano, M. G., y Ramírez, A. I. (2017). Disponibilidad hídrica bajo escenarios de cambio climático en el Valle de Galeana, Nuevo León, México. México.

Lugo Arias, F. T. (2014). Agua y Reservas Hielológicas. Jalisco, México: Programa Sectorial.

Martínez, A. G. (23 de Julio de 2018). Información de México . Obtenido de Para todo México : <https://www.paratodomexico.com/geografia-de-mexico/index.html>

Matlalcuatzi Rogerio, F. (2006). Análisis espectral de series temporales de temperaturas y su aplicación al estudio de su comportamiento en una red de observatorios meteorológicos. México: UNAM.

McCulligh, C., y Tetreault, D. (2011). La gestión del agua en la Zona Metropolitana de Guadalajara. El modelo dominante versus las alternativas de la sociedad civil organizada. Guadalajara, Jalisco: Memorias del Seminario Taller Agua, Ciudad Y Cambio Climático.

Mearns, L., McGinnis, S., y Korytina, D. (25 de Junio de 2019). NA-CORDEX dataset. Obtenido de Version 1.0. NCAR Climate Data Gateway: <https://na-cordex.org/>

Merlos Villegas, F., Sánchez Quispe, S. T., y Almanza Campos, J. A. (2014). Creación de un Sistema de Información Hidrológico para el Cálculo de intensidades Máximas y Gestión de Datos Meteorológicos. Jalisco, México: XXIII Congreso Nacional de Hidráulica.

Montiel González, I., Santos Martínez, S., y Lopez Santos, A. (2017). Impacto del cambio climático en la agricultura de secano de Aguascalientes, México para un futuro cercano (2015-2039). México.

Navarro Avargonzález, A. (12 de Enero de 2017). Conceptos Básicos de Hidrogeología. Obtenido de Instituto Geominero de España: http://aguas.igme.es/igme/publica/pdfjor_aguas_mine/1_conceptos.pdf

Paredes Arquiola, J., Solera Solera, A., Andreu Álvarez, J., y Lerma Elvira, N. (2014). Herramienta EvalHid para la evaluación de recursos hídricos. Manual Técnico. Valencia, España : Universidad Politécnica de Valencia .

Pfannenstein, B., Anacleto Herrera, E. E., y Sevilla Villalobos, S. (2018). Zapopan y la urbanización cerrada: el fenómeno de la segregación residencial en un municipio del Área Metropolitana de Guadalajara, México. LIMAQ, 59-79.

Pizarro, R., Ramirez, C., y Flores, J. P. (2003). Análisis comparativo de cinco métodos para la estimación de precipitaciones areales anuales en periodos extremos. Chile.

REPDA. (10 de Enero de 2017). REPDA. Obtenido de Registro Público de Derechos de Agua: <https://www.gob.mx/conagua/>

REPDA. (2018). REPDA. Obtenido de Registro Público de Derechos de Agua: <https://www.gob.mx/conagua/>

Rocha Ruiz, D., y Prol Ledesma, R. (2013). Distribución de la Alteración Hidrotermal del Campo Geotérmico Cerritos Colorados, México. México: Universidad Nacional Autónoma de México.

Rodriguez Cervantes, F. (2009). Proyecto de aprovechamiento geotérmico en el bosque La Primavera por la CFE. Guadalajara, Jalisco: CFE.

Salas, J. D., Delleur, J. W., Yevjevich, V., y Lane, W. L. (1980). Applied Modeling of Hydrologic Time Series. Colorado: Water Resources Publications.

Sánchez Lozano, J. L. (2017). Modelación hidrológica e hidráulica acoplada de la cuenca media y baja del río Magdalena. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

Sánchez San Román, F. (2017). Hidrología Superficial y Subterránea. España: Createsoace Independent Pub.

Sandoval Erazo, W., y Aguilera Ortiz, E. (2014). Determinación de Caudales en cuencas con poca información Hidrológica. Ciencia UNEMI, 100 - 110.

Santamaría Antonio, J. (2010). Forzamiento Radiativo y Cambios Químicos en la Atmósfera. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, España.

SEMARNAT. (2000). Programa de Manejo, Área de Protección de Flora y Fauna La Primavera. México: CONANP.

SEMARNAT. (2007). Programa Visión 2030 del Estado de Jalisco. Jalisco : Gobierno Federal .

Servicio Geológico Mexicano. (2000). Carta Geológico - Minera. INEGI .

Servicio Geológico Mexicano. (2019). Carta Geológico - Minera. Obtenido de <https://www.sgm.gob.mx/CartasDisponibles/>

SIAPA. (2017). Informe Anual de Actividades y Resultados. Jalisco: Gobierno del Estado de Jalisco.

SIAPA. (21 de Feb de 2019). SIAPA. Obtenido de Órganos de Gobierno : <http://www.siapa.gob.mx/gobierno>

SINA y CONAGUA. (6 de Febrero de 2018). Sistema Nacional de Información del Agua . Obtenido de Acuíferos: <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=acuiferos>

Sokolov, A., y Chapman, T. (1974). Methods for water balance computations . Paris: The Unesco Press.

Solera Solera, A., y Andreu Álvarez, J. (2003). Herramientas y métodos para la ayuda a la decisión en la gestión sistemática de recursos hídricos. Aplicación a las cuencas de los ríos Tajo y Júcar. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia .

Stockholm Environment Institute. (2009). Guía Metodológica. Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con el modelo WEAP. Chile.

Tellez Rojas, A., Paredes Arquiola, J., y García Hernández, J. (2016). Modelación Hidrológica del Sistema de Explotación Gállego-Cinca de la Confederación Hidrográfica del Ebro mediante el Modelo de Precipitación - Escorrentía HBV. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.

Varela Cevallos, M. J. (2017). Evaluación integrada de los recursos hídricos de la parroquia de Nono mediante WEAP. Ecuador.

Venegas Herrera, A., y Castañeda Huizar, P. (2005). El crecimiento urbano y las características socioeconómicas de la Zona Metropolitana de Guadalajara: la generación de áreas pauperizadas. Carta Económica Regional , 3-15.

Viner, D. (2000). Modelling climate Change. East Anglia: Climate Research Unit.

WCRP. (25 de Junio de 2019). CORDEX. Obtenido de Dominios : <http://www.cordex.org/domains/>

ANEJO 1: REPORTE DE MUESTREO EN LA ZONA GEOTÉRMICA DEL BOSQUE LA PRIMAVERA (JALISCO)

Reconocimiento y recolección de muestras de agua en manifestaciones hidrotermales en 12 zonas aledañas al Bosque La Primavera, Jalisco. Realizado del 6 al 10 de septiembre de 2018.

El presente reporte es un documento descriptivo de las actividades llevadas a cabo durante el reconocimiento y recolección de muestras de agua tibia y caliente en manantiales asociados a la zona geotérmica del Bosque La Primavera, reconocida principalmente por el campo geotérmico Ceritos Colorados. Se trata de la recopilación de información y muestras en campo para su análisis y realización de estudios complementarios que permitan determinar el potencial geotérmico de la zona, a través de análisis hidrogeoquímicos e isotópicos.

Actualmente la zona geotérmica de las inmediaciones del Bosque La Primavera no se encuentra en explotación para producción eléctrica, pero si cuenta con zonas de recreación con uso directo del agua descargada por los manantiales calientes, como son: zonas de albercas de aguas termales, balnearios comunitarios, estanques para extracción de agua caliente para uso doméstico y zona de baños termales a cielo abierto.

OBJETIVO

El objetivo principal de la actividad consistió en la recolección de muestras de agua en las 12 distintas zonas de manifestación hidrotermal relacionadas a la zona geotérmica del Bosque La Primavera (manantiales de agua tibia y caliente).

Como objetivos secundarios se tienen:

- Entendimiento del funcionamiento de la estructura geológica que aloja la zona de manifestaciones hidrotermales.
- Toma de parámetros de campo (temperatura, pH, conductividad eléctrica) con el apoyo de un medidor multiparamétrico de campo.
- Analizar muestras de agua en instalaciones del CICESE (para determinar cationes y aniones del agua) y en Université du Québec à Montréal (para analizar ^{18}O y ^2H).

- Análisis por cromatografía iónica de Fluoruro, Cloruro, Nitrito, Bromuro, Nitrato, Sulfato y Fosfato disueltos en agua.

METODOLOGÍA

En total, fueron tomadas 60 muestras de agua en botellas de plástico Nalgene®, repartidas entre las distintas descargas difusas que tienen los manantiales de agua templada y caliente de la zona. La recolección y toma de parámetros de campo fue se realizó con el siguiente instrumental y material:

- Botellas plásticas de Nalgene® de 1 litro, 500 mililitros, 125 mililitros y 60 mililitros.
- Jeringas y filtros.
- Dispositivo multiparamétrico de campo.
- Termómetro (0 - 120°C).
- Dispositivo GPS Garmix.
- Cámara fotográfica Samsung Galaxy 2.0.
- Material de etiquetado (rotuladores, etiquetas, cintas adhesivas, libreta de campo, plumas, lápiz, etc.).
- Cajas plásticas de almacenamiento de muestras.
- Guantes de piel resistentes a alta temperatura.
- Cubeta y recipientes plásticos.
- Varilla de aluminio de 2.0m con depósito plástico acoplado.
- Botella plástica con agua destilada.

La colección de muestras de agua se hizo usando botellas de 1 litro de Nalgene®, para análisis de cationes y aniones, que consistió en su recolecta directa desde las pozas de descarga, construidas para captar y conducir el agua de los manantiales calientes difusos presentes en 12 zonas distintas cerca del Bosque La Primavera. El procedimiento fue el siguiente:

- i. Las botellas deben abrirse y enjuagarse (tapa y recipiente) en el tipo de agua que será colectada.
- ii. Su llenado se realiza con el instrumental plástico llevado o directamente con el auxilio de la vara de aluminio con recipiente plástico.
- iii. Al momento de llenar las muestras, se debe tener cuidado de no dejar burbujas ni materia orgánica dentro del recipiente. Si existen burbujas, el contenido de los

elementos que quieren analizarse se modificarán, debido al tiempo que transcurre entre la toma de la muestra y su análisis en laboratorio.

- iv. Una vez sellada la botella, se procede a etiquetar cada una de las muestras y colocarlas en el recipiente plástico de almacenamiento y transporte.
- v. Posteriormente, deben ser empacadas en plástico burbuja para su protección y posterior envío al laboratorio para su análisis.
- vi. Sobre la poza y cercano a la zona de burbujeo o de mayor flujo, deben tomarse independientemente la temperatura del agua en la descarga del manantial (usando tanto el termómetro portátil como el del sensor multiparamétrico).
- vii. Usando el dispositivo GPS, deben tomarse las coordenadas (X, Y), así como la altitud y la precisión que maneja el dispositivo.
- viii. Determinar los valores de pH y Conductividad Eléctrica de manera independiente, usando el dispositivo multiparamétrico, de la misma forma que es tomada la temperatura con dicho dispositivo, anotando los datos en la libreta de campo.

Los análisis de laboratorio fueron realizados en el Centro de Investigación Científica de Estudios Superiores de Ensenada (CICESE) en Ensenada, Baja California. En los distintos laboratorios de este centro fueron determinados los iones mayores (F^- , Cl^- , NO_2^- , NO_3^- , Br^- , SO_4^- , PO_4^- , HCO_3^- ; Na^+ , Ca^+ , K^+ , Mg^+), utilizados en la clasificación de aguas y la geotermometría; además, se realizaron las determinaciones de los isótopos estables del agua ($\delta^{18}O$ y δ^2H), con objeto de relacionar el origen de las aguas termales y su relación con los procesos que originan su firma isotópica.

En el caso de los análisis de Aniones en las muestras de agua, el laboratorio del CICESE utiliza el protocolo de ensayo por “cromatografía iónica” en un equipo tipo ICS-2000 Ion Chromatography de la marca Thermo Scientific. Respecto a los análisis de Cationes, el protocolo de ensayo para las muestras de agua fue realizado por Espectroscopia de Emisión Atómica de Plasma inducido por Microondas (ICP), en un equipo de la marca PartoZist Behbound. Los análisis de isótopos estables del agua ($\delta^{18}O$ y δ^2H), éstos fueron realizados en un equipo de tipo Picarro Spectrometer (Cavity Ring-Down Spectroscopy CRDS).

RESULTADOS

Como resultados obtenidos de la primera campaña de muestreo, llevada a cabo del 6 al 10 de septiembre de 2018, en las zonas cercanas al Bosque La Primavera, se incluyen los

siguientes datos tomados en campo: nombre de la zona de muestreo, coordenadas UTM y elevación, tipo de zona de muestreo, fecha de muestreo y tipo de muestra tomada. Otros parámetros tomados en campo fueron la temperatura, la conductividad eléctrica (C. E.), cantidad de sólidos disueltos totales (S. D. T.) y el pH de cada muestra de agua recolectada.

En la Figura 100 la localización de los puntos de muestreo; así mismo, en la Tabla 36 y en la Tabla 37 se registran los datos de las muestras recolectadas, considerando también algunos de los parámetros que se obtuvieron con las pruebas de laboratorio.

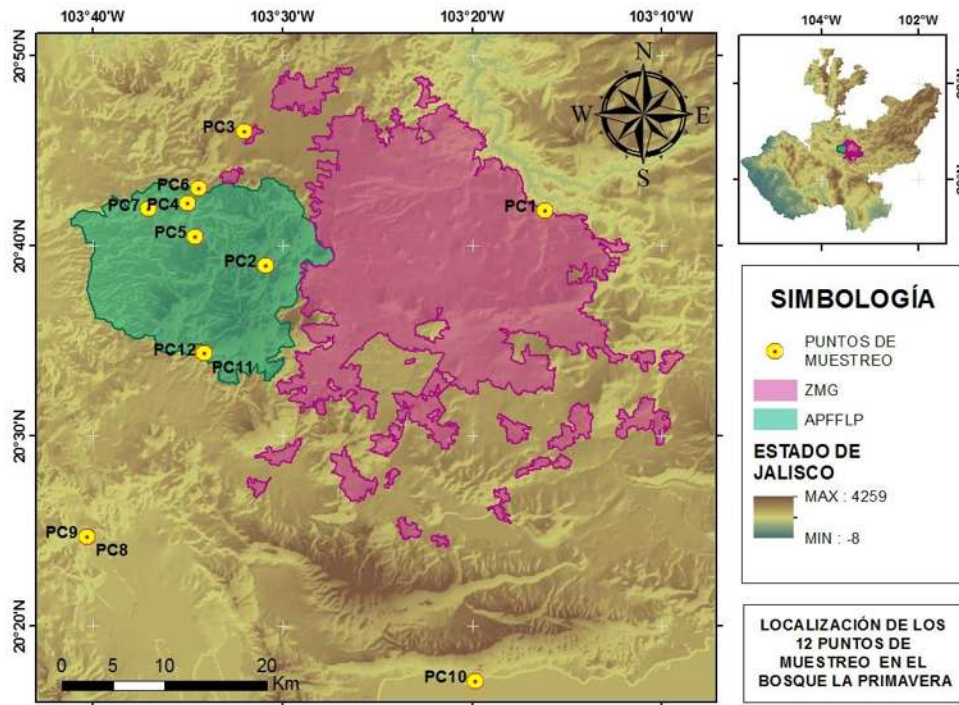


Figura 100. Localización de los sitios de muestreo de manantiales termales dentro y cercanos al Campo Geotérmico La Primavera, Jalisco, presentados en la Tabla 36.

Tabla 36. Parámetros físico-químicos de las manifestaciones hidrotermales asociadas al campo geotérmico La Primavera, Jalisco.

NO.	ZONA DE MUESTREO	GRUPO DE MUESTREO	COORDENADAS UTM (Z - 13 Q)			FECHA	TEMP. (°C) (termómetro)	pH	CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA EC (µS/cm)	SÓLIDOS DIS. TOTALES TDS (ppm)	TIPO DE MUESTRA COLECTADA	SALINIDAD (psu)	RESISTIVIDAD (Kohm-cm)	mV (mV)	RmV (mV)	POTENCIAL REDOX ORP (mV)
			X	Y	ELEV (m)											
1	BAÑOS OBLADOS	PC1	680281	22893649	1521	14/09/2019	42.7	8.06	303.4	149.2	Agua de manantial termal	0.33	2.36	155.95	155.95	155.95
2	EJIDO ADOLFO LÓPEZ MATEOS	PC2	654725	2284066	1904	14/09/2019	26.5	7.10	209.0	102.9	Agua de manantial termal	0.22	6.17	170.23	170.23	170.23
3	NEXTIPAC	PC3	652642	2297078	1635	14/09/2019	20.0	6.13	375.6	184.6	Agua de manantial termal	0.66	1.19	143.30	143.30	143.30
4	TINAJITAS	PC4	647554	2290068	1574	15/09/2018	44.0	7.56	941.6	461.8	Agua de manantial termal	0.33	2.40	150.73	150.73	150.73
5	RÍO CALIENTE	PC5	648280	2286816	1572	15/09/2018	67.5	7.44	1169.0	573.2	Agua de manantial termal	0.61	1.30	189.93	189.93	189.93
6	CAÑÓN DE LAS FLORES	PC6	648549	2291470	1574	15/09/2018	24.7	7.79	156.5	77.2	Agua de manantial termal	0.25	6.08	169.60	169.60	169.60
7	AGUA CLARA	PC7	643979	2289433	1480	15/09/2018	23.2	7.37	336.3	165.3	Agua de manantial termal	0.47	5.63	134.05	134.05	134.05
8	CHIMULCO I	PC8	638639	2257566	1357	16/09/2018	37.4	8.17	521.1	255.4	Agua de manantial termal	0.31	6.06	169.75	169.75	169.75
9	CHIMULCO II	PC9	638587	2257617	1360	16/09/2018	39.7	7.90	487.3	239.3	Agua de manantial termal	0.31	5.28	189.10	189.10	189.10
10	SAN JUAN COSALÁ	PC10	674327	2243904	1533	16/09/2018	80.4	8.97	1277.0	626.0	Agua de manantial termal	0.46	2.54	207.50	207.50	207.50
11	VOLCANES I	PC11	649151	2275463	1667	17/09/2018	62.0	8.24	1231.0	603.1	Agua de manantial termal	0.41	2.20	198.18	198.18	198.18
12	VOLCANES II	PC12	649213	2275451	1667	17/09/2018	58.2	8.61	1241.0	608.7	Agua de manantial termal	0.51	2.21	162.85	162.85	162.85

Tabla 37. Resultados de las muestras de agua para iones mayores e isótopos estables del agua, obtenidos para las manifestaciones hidrotermales circundantes al campo geotérmico La Primavera, Jalisco

NO.	ZONA DE MUESTREO	GRUPO DE MUESTREO	$\delta^{18}O$ VSMOW2	Precisión*	δD VSMOW2	Precisión*	Fluoruro mg/L (ppm)	Incert. (+/-)	Cloruro mg/L (ppm)	Incert. (+/-)	Nitrato mg/L (ppm)	Incert. (+/-)	Nitrato mg/L (ppm)	Incert. (+/-)	Bromuro mg/L (ppm)	Incert. (+/-)	Sulfato mg/L (ppm)	Incert. (+/-)	Fosfato mg/L (ppm)	Incert. (+/-)	Bicarbonatos mg/L (bal) [ppm]	Na mg/L (ppm)	Incert. (+/-)	Ca mg/L (ppm)	Incert. (+/-)	K mg/L (ppm)	Incert. (+/-)	Mg mg/L (ppm)	Incert. (+/-)
1	BAÑOS OBLADOS	PC1	-8.91	0.05	-64.56	0.11	ND	---	3.1	0.11	ND	---	ND	---	ND	---	ND	---	ND	---	72.45	54.07	1.23	11.81	0.25	12.1	0.28	4.07	0.09
2	EJIDO ADOLFO LÓPEZ MATEOS	PC2	-9.21	0.04	-65.47	0.15	ND	---	3.27	0.11	ND	---	37.61	1.31	ND	---	33.03	1.1	ND	---	6.83	33.49	0.76	7.55	0.16	1.14	0.03	3.28	0.07
3	NEXTIPAC	PC3	-9.37	0.03	-66.34	0.05	ND	---	12.14	0.42	ND	---	109.53	3.82	ND	---	38.43	1.28	ND	---	9.38	19.9	0.45	27.1	0.58	22.5	0.52	8.2	0.18
4	TINAJITAS	PC4	-8.60	0.03	-69.62	0.10	16.69	0.48	91.46	3.17	ND	---	ND	---	ND	---	32.78	1.09	ND	---	101.91	222.61	5.05	7.01	0.15	11.12	0.26	<0.01	-
5	RÍO CALIENTE	PC5	-8.70	0.05	-71.15	0.11	16.58	0.48	117.62	4.08	ND	---	ND	---	ND	---	28.56	0.95	ND	---	103.75	289.22	6.57	7.26	0.16	13.71	0.32	<0.01	-
6	CAÑÓN DE LAS FLORES	PC6	-9.51	0.02	-69.11	0.12	1.51	0.04	ND	---	ND	---	ND	---	ND	---	ND	---	ND	---	46.16	35.77	0.81	1.83	0.04	4.31	0.1	1.49	0.03
7	AGUA CLARA	PC7	-8.79	0.05	-65.94	0.37	3.61	0.1	24.31	0.84	ND	---	6.2	0.22	ND	---	12.9	0.43	ND	---	29.05	72.76	1.65	4.02	0.09	6.27	0.14	3.19	0.07
8	CHIMULCO I	PC8	-8.79	0.05	-65.04	0.24	ND	---	25.56	0.89	ND	---	ND	---	ND	---	10.98	0.37	ND	---	90.95	101.45	2.3	23.4	0.5	12.59	0.29	12.59	0.27
9	CHIMULCO II	PC9	-8.79	0.05	-64.81	0.38	ND	---	20.37	0.71	ND	---	ND	---	ND	---	ND	---	ND	---	80.11	85.54	5.8	19.47	0.42	12.12	0.28	11.13	0.24
10	SAN JUAN COSALÁ	PC10	-9.20	0.04	-70.17	0.23	3.09	0.09	64.44	2.24	ND	---	ND	---	ND	---	401.93	13.38	ND	---	1.86	255.72	6.48	23.3	0.5	10.35	0.24	<0.01	-
11	VOLCANES I	PC11	-8.31	0.02	-71.36	0.19	23.9	0.69	194.79	6.76	ND	---	ND	---	ND	---	6.42	0.21	ND	---	100.33	285.28	6.62	3.52	0.08	10.36	0.24	<0.01	-
12	VOLCANES II	PC12	-8.15	0.03	-70.90	0.09	29.41	0.85	198.51	6.89	ND	---	ND	---	ND	---	8.89	0.3	ND	---	87.52	291.48	6.62	3.1	0.07	11.09	0.26	<0.01	-

Inicialmente se planteó realizar la recolección de muestras de 1 litro por cada manantial difuso, pero se consideró como mejor opción obtener 5 muestras de cada sitio, siendo una de 500 ml, además de una de 125 ml y tres de 60 ml, filtradas para evitar la presencia de materia, esto para poder realizar las pruebas pertinentes para toda la zona; logrando recolectar lo siguiente:

- 60 muestras de agua en manantiales tibios y calientes, 12 en botellas de 500 mililitros, 12 botellas de 125 mililitros y 36 botellas de 60 mililitros de Nalgene®.
 - 5 muestras del manantial 1, denominado “Baños Oblados”, donde desde distintas pozas se colecta y encausa el agua de manantial hacia el balneario recreativo.
 - 5 muestras del manantial 2, denominado “Ejido Adolfo López Mateos”, el cual es un manantial “privado” que se encuentra dentro del Bosque La Primavera.
 - 5 muestras del manantial 3, denominado “Nextipac”, es cual es un manantial de agua fría, con el que se abastece la comunidad para uso agrícola y doméstico; este se encuentra delimitado por una malla perimetral.
 - 5 muestras del manantial 4, denominado “Tinajitas”, el cual es un manantial que se encuentra 1.5 debajo del terreno; se encuentra dentro de un balneario recreativo y la zona de muestra se encuentra dentro de un cuarto de vapor.
 - 5 muestras del manantial 5, denominado “Río Caliente”, este manantial se encuentra en el centro Bosque La Primavera, en el nace el Río Caliente: nace con una temperatura de 67.5°C y a lo largo del mismo río se presentan temperaturas hasta de 41°C.
 - 5 muestras del pozo 6, denominado “Cañón de las Flores”, el cual es un pozo profundo que se utiliza para abastecer un balneario recreativo, además de ser utilizado por los trabajadores del lugar para consumo humano.
 - 5 muestras del manantial 7, denominada “Agua Clara”, este se encuentra dentro del bosque la primavera, por lo que se creía sería agua termal, sin embargo, es un agua de baja temperatura, utilizada para consumo humano y para una granja acuícola que se localiza en la zona.
 - 5 muestras del manantial 8, denominado “Chimulco I”, esta proviene de un manantial que se utiliza para un balneario recreativo y como uso doméstico.
 - 5 muestras del pozo 9, denominado “Chimulco II”, el agua se utiliza para un balneario recreativo y como uso doméstico.
 - 5 muestras del pozo 10, denominada “San Juan Cosalá”, el cual presenta la mayor temperatura en toda la zona, es un pozo profundo que llega a una pila que abastece las diferentes albercas dentro del balneario recreativo. Los

propietarios comentan que, la alta concentración de sales en el agua daña gravemente las tuberías.

- 5 muestras del manantial 11, denominado “Volcanes I”, el cual es un pequeño manantial que se encuentra al norte del balneario Los Volcanes.
- 5 muestras del manantial 12, denominado “Volcanes II”, se ubica a unos metros del manantial “Volcanes I”, que abastece también al balneario Los Volcanes.

MANANTIALES EN LA PRIMAVERA

SOBRE LA CLASIFICACIÓN DE LAS AGUAS GEOTÉRMICAS

En la Figura 101 se presenta la distribución de los iones mayores en las muestras recolectadas en los manantiales asociados al campo geotérmico de La Primavera. Del total de muestras, 5 de ellas no presentan resultados para el ion Magnesio, siendo el Sodio y el Cloruro los iones mayoritarios en todas las muestras, seguidas de los iones de Sulfato y Bicarbonato.

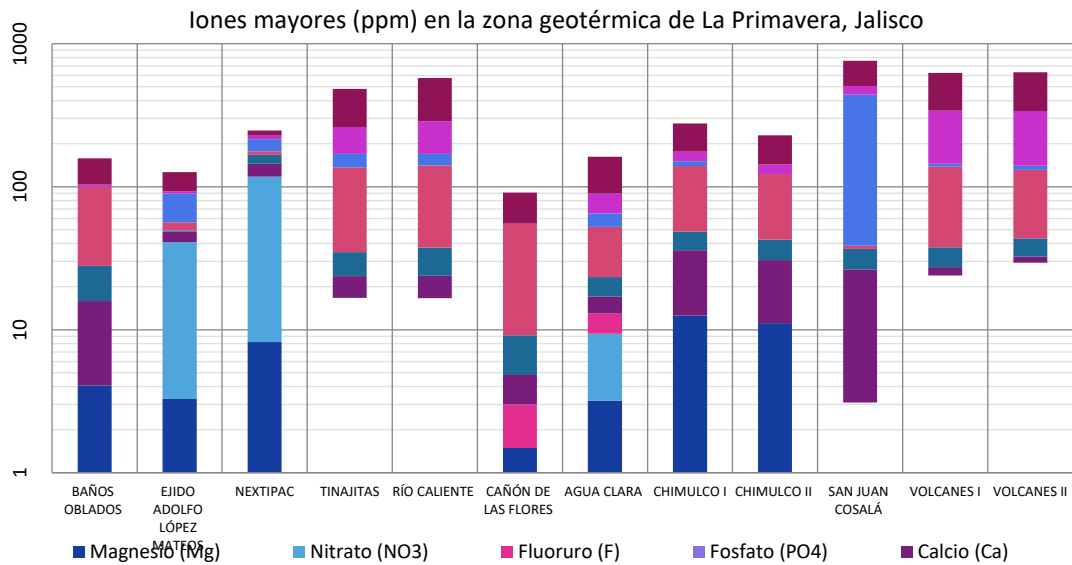


Figura 101. Comparativo de la composición iónica de las muestras recolectadas en zonas aledañas al campo geotérmico de La Primavera, Jalisco.

El diagrama ternario de Piper para la clasificación de aguas muestra 4 grupos principales; el primero de ellos correspondiente a aguas de tipo “bicarbonatadas sódicas y potásicas”; el segundo grupo se corresponde con aguas en transición hacia las “bicarbonatadas sódicas y potásicas”; el tercer grupo corresponde a aguas de tipo “hiper-cloruradas sódicas” y el cuarto grupo a una transición entre aguas “sulfatadas sódicas y cálcicas”.

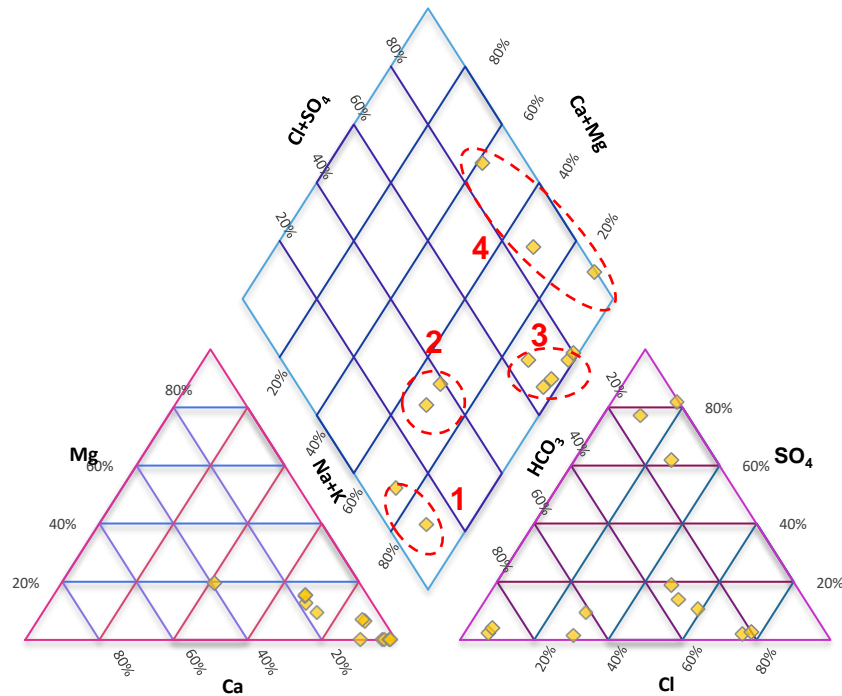


Figura 102. Uso del Diagrama de Piper para la clasificación de las muestras de agua recolectadas en zonas aledañas al campo geotérmico de La Primavera, Jalisco.

En la Figura 103 se muestra la clasificación de la madurez de las aguas geotérmicas colectadas en la zona de La Primavera. Mediante la clasificación, se observan claramente 4 grupos bien definidos; el primer grupo corresponde a aguas de tipo maduras; el segundo grupo corresponde a una transición entre aguas maduras y periféricas; el tercer grupo, el de mayor número de muestras, se asocia a aguas de tipo periféricas; el cuarto grupo corresponde a una mezcla de aguas volcánicas y calentadas por vapor.

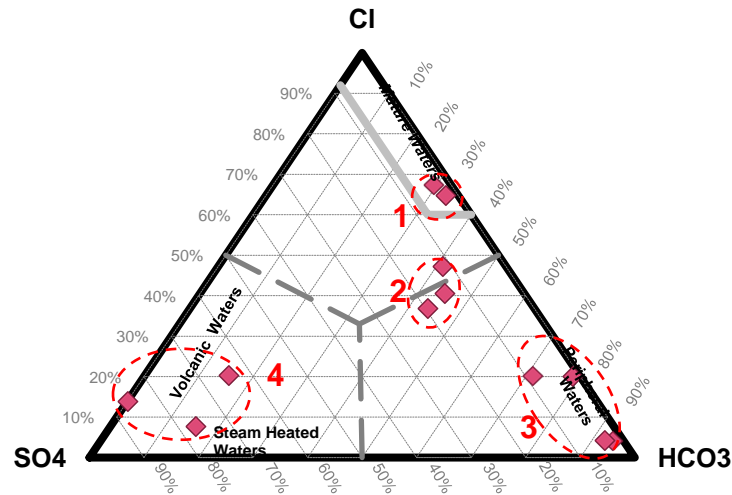


Figura 103. Diagrama ternario de Giggenbach utilizado para la clasificación de la madurez de las muestras de agua recolectadas en zonas aledañas al campo geotérmico de La Primavera, Jalisco.

En el caso del diagrama ternario de la Figura 104, el resultado de clasificación de aguas en equilibrio iónico o inmaduras indica la presencia de 2 grupos bien definidos entre las muestras de agua geotérmica analizada. El primer grupo corresponde a aguas inmaduras, con muy bajos contenidos de ion Magnesio, mientras que el segundo grupo se ubica en la zona de equilibrio parcial, con temperaturas aproximadas de reservorio (calculadas por el abanico de Giggenbach) de entre 160 y 180°C, que permitirían utilizar las formulaciones de geotermómetros para dichas muestras.

Por otro lado, en la Tabla 38 se muestran los resultados obtenidos de temperatura de reservorio aproximada por la aplicación de las formulaciones para los geotermómetros de Fournier, Nieva, Giggenbach, Arnorsson, etc. Los geotermómetros que mejor se ajustan a las temperaturas de superficie registradas al momento de muestreo son los Na-K-Ca y K/Mg de Giggenbach, con temperaturas de yacimiento entre 102 y 157°C para el primer geotermómetro y de entre 70 y 133°C para el segundo. En el caso del manantial del Ejido Adolfo López Mateos, éste no se considera manantial termal (temperatura en superficie de 26.5°C), por lo que no son aplicables las formulaciones propuestas por los geotermómetros analizados.

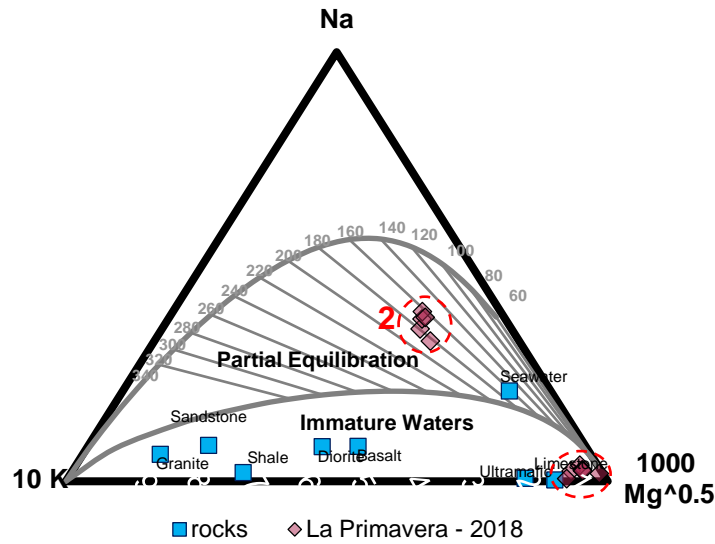


Figura 104. Diagrama ternario de Giggenbach para la determinación del equilibrio iónico en las muestras de agua recolectadas en zonas aledañas al campo geotérmico de La Primavera, Jalisco.

Tabla 38. Cálculo de la temperatura de reservorio para las muestras de La Primavera, Jalisco

Sitio de muestreo	Temperatura en superficie (°C)	Na-K-Ca	R factor Mg corr	delta T R<5	delta T R>5	Na-K-Ca Mg corr	Na/K Fournier 1979	Na/K Truesdell 1976	Na/K Giggenbach 1988	Na/K Tonani 1980	Na/K Nieva & Nieva 1987	Na/K Arnorsson 1983	K/Mg Giggenbach 1986
BAÑOS OBLADOS	42.7	112	27.1	26.2	47.6	65	297	294	306	344	282	295	83
EJIDO ADOLFO LÓPEZ MATEOS	26.5	41	39.9	-103.1	-28.6	41	139	95	159	120	128	106	34
NEXTIPAC	20.0	102	25.9	10.6	32.2	70	578	791	546	942	558	720	90
TINAJITAS	44.0	144	1.5	-5.8	2.8	144	164	123	182	151	152	133	130
RÍO CALIENTE	67.5	157	1.7	-4.9	2.5	157	160	119	179	146	148	129	133
CAÑÓN DE LAS FLORES	24.7	115	37.8	44.7	74.2	41	234	209	248	247	220	215	70
AGUA CLARA	23.2	119	42.1	55.2	85.7	33	205	172	221	206	192	180	70
CHIMULCO I	37.4	105	41.0	31.1	66.2	38	236	212	250	251	223	218	70
CHIMULCO II	39.7	106	41.7	33.6	68.6	37	249	228	262	269	235	233	71
SAN JUAN COSALÁ	80.4	109	0.6	0.0	0.0	109	150	107	169	133	138	118	131
VOLCANES I	62.0	153	2.0	-5.4	1.3	153	143	99	163	125	132	110	129
VOLCANES II	58.2	156	2.4	-4.2	1.0	156	146	103	165	128	135	114	129

En la Figura 105 se presentan de manera gráfica los valores obtenidos en los geotermómetros aplicados a las muestras de manantiales termales. La media de los valores de cada geotermómetro puede seguirse mediante la línea punteada en color morado. En valor medio, la mayoría de las muestras analizadas son consistentes con valores de temperatura de reservorio de entre 220 y 240°C, esto producto de los altos valores obtenidos para la zona de Nextipac, incongruentes con aguas de fluidos geotérmicos (comúnmente menores a 550°C).

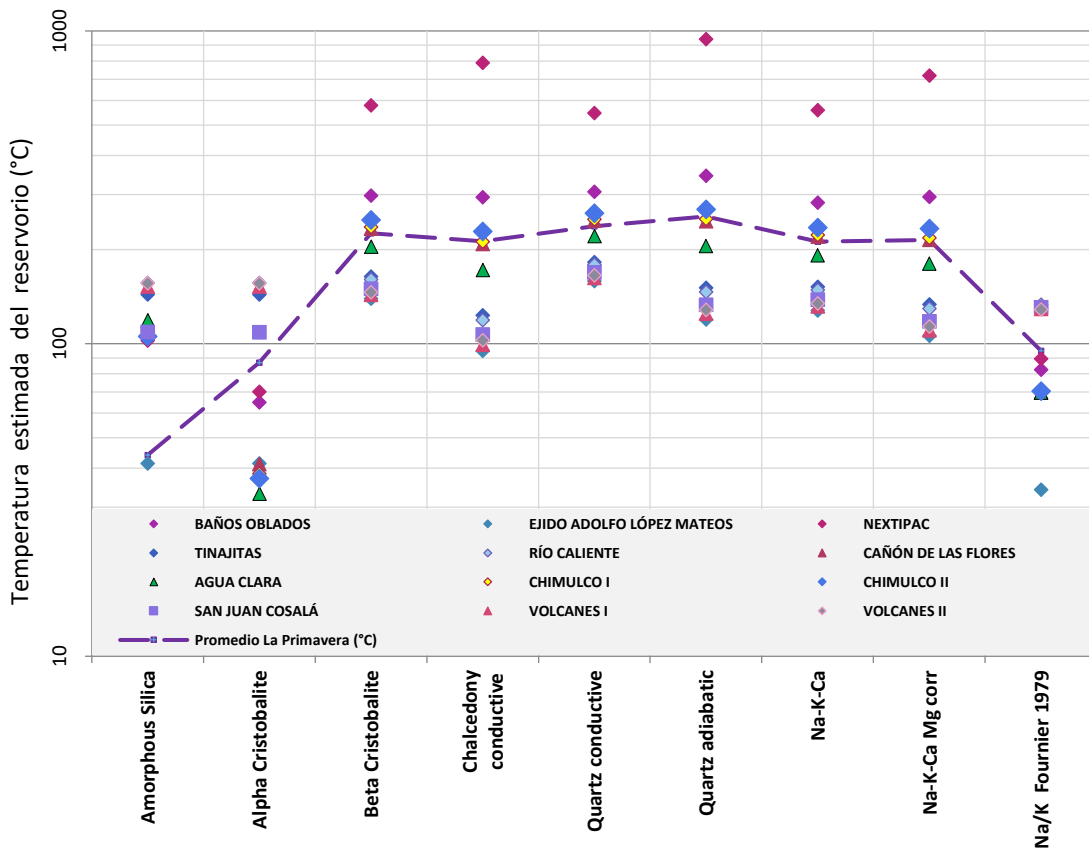


Figura 105. Distribución de las temperaturas obtenidas con distintos geotermómetros para las muestras de agua recolectadas en zonas aledañas al campo geotérmico de La Primavera, Jalisco.

SOBRE LOS ISÓTOPOS ESTABLES DEL AGUA ($\Delta^{18}\text{O}$ Y $\Delta^2\text{H}$)

En la Figura 106 se presenta un comparativo de los resultados de isótopos de ^{18}O y ^2H para la zona de estudio de La Primavera (círculos verdes), comparado con los resultados obtenidos por Aída en 2017 para el CeMIEGeo (triángulos morados) y teniendo como referencia la línea meteórica regional (línea roja), determinada a partir de datos del programa web Water Isotopes (2018). En la figura se observa que las muestras de agua se separan de la línea regional (Regional MWL), enriqueciéndose de ^{18}O y ^2H . Se trata de un grupo muy compacto, oscilando el exceso de ^{18}O entre -9.5 y -8.15, con tan solo un -1.35‰ de variación; respecto al exceso de ^2H , los datos oscilan entre -64.56 y -71.40, registrando una variación de -6.84‰. La variación tan pequeña de los datos de isótopos estables de muestras espacialmente retiradas, indicarían una conexión entre todas las muestras colectadas en la zona.

Nuevamente, la desviación hacia la derecha en los datos de ^{18}O indican procesos de interacción agua-roca, que propician un enriquecimiento de las aguas geotérmicas muestreadas respecto al agua de lluvia local o las aguas subterráneas de la zona.

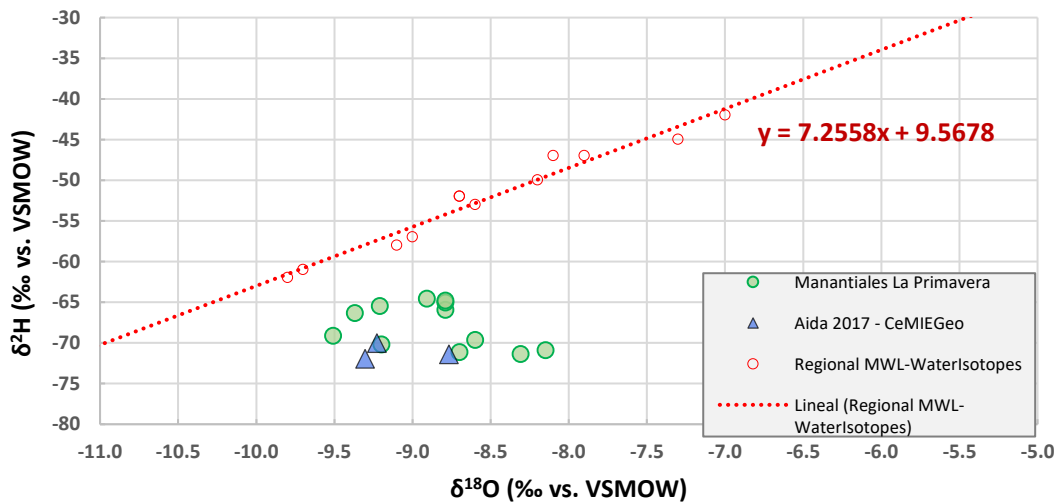


Figura 106. Distribución de los isótopos estables del agua ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ en ‰ vs. SMOW) en las muestras colectadas en manantiales aledaños al campo geotérmico La Primavera, Jalisco



Fotografía 1. Punto de Control 1: Baños Oblados; ubicados al noreste de la ZMG.



Fotografía 2. Punto de Control 2: Manantial en el Ejido Adolfo López Mateo; ubicado al centro del Bosque La Primavera.



Fotografía 3. Punto de Control 3: Manantial en la localidad Nextipac; ubicado al norte del Bosque La Primavera.



Fotografía 4. Punto de Control 4: Manantial en el balneario Tinajitas, ubicado en la zona norte del Bosque La Primavera.



Fotografía 5. Punto de Control 5: Manantial donde nace Río Caliente; ubicado al centro del Bosque La Primavera.



Fotografía 6. Punto de Control 6: Pozo en el balneario Cañón de las Flores; ubicado en la zona norte del Bosque La Primavera.



Fotografía 7. Punto de Control 7: Manantial Agua Clara; ubicado en la zona noroeste del Bosque La Primavera



Fotografía 8. Punto de Control 8: Manantial en el balneario Chimulco I; ubicado al suroeste del Bosque La Primavera.



Fotografía 9. Punto de Control 9: Manantial en el balneario Chimulco II; ubicado al suroeste del Bosque La Primavera.



Fotografía 10. Punto de Control 10: Manantial en el balneario San Juan Cosalá; ubicado al norte del Lago de Chapala.



Fotografía 11. Punto de Control 11: Manantial en el balneario Los Volcanes I; ubicado en la zona sur del Bosque La Primavera.



Fotografía 12. Punto de Control 12: Manantial en el balneario Los Volcanes II; ubicado en la zona sur del Bosque La Primavera.

Según estudios geológicos, las manifestaciones hidrotermales de la zona del Bosque La Primavera, están asociadas a la caldera por la cual se formó el Bosque en sí. Se espera corroborar dicha información mediante los análisis de muestras de agua tomados, así como determinar la relación que guardan con las manifestaciones que ocurren en la periferia del mismo Bosque, así como con las zonas que están al norte del Lago de Chapala.

En esta zona geotérmica los manantiales de agua caliente son usados para distintos fines, entre ellos, la recreación, abastecimiento de agua caliente a hogares, salud y sanidad pública, etc. Las mayores temperaturas se reportaron al Centro del Bosque La Primavera y al Sur del mismo, con temperaturas de 67.5 °C y 80.4 °C, respectivamente. Por su parte, las menores temperaturas se localizaron en una zona conocida como “Agua Clara”, localizadas al norte del Bosque, en la localidad de Nextipac, con temperaturas registradas de hasta 20° C. Esta última zona, a diferencia de las restantes, ya no pertenece al campo geotérmico, además, es posible que se propicie el enfriamiento por la exposición a la temperatura ambiente. Por otro lado, la poza que registra la mayor temperatura, localizada en el municipio de San Juan Cosalá se encuentra dentro de un cuarto que abastece una pileta que no supera los 4 m² de área, lo que posiblemente propicie la conservación del calor de descarga del agua de manantial caliente.

CONCLUSIONES

El objetivo principal y los secundarios fueron cumplidos en su totalidad, logrando tener un mejor entendimiento del funcionamiento de las estructuras geológicas que dan origen a la zona geotérmica del Bosque La Primavera. Se visualizó, entrenó y ensayó sobre las técnicas de muestreo de agua y toma de parámetros en campo, como parte del aprendizaje en el área de la hidrogeología y geoquímica que conlleva el postdoctorado asociado al proyecto. Este entrenamiento será complementario al que se llevará a cabo en instalaciones de laboratorios en USA y CAD, una vez sean enviadas las muestras para su análisis.

AGRADECIMIENTOS

Para la realización de estas actividades de campo, se agradece enormemente a los técnicos de la UMSNH, que acompañaron y colaboraron activamente durante la campaña de recolección de muestras, a la Dra. Aída López Hernández (UMSNH), por el equipo de medición y toma de muestras prestados, por las facilidades otorgadas en el proceso de aprendizaje en campo de las técnicas de muestreo y análisis hidrogeológico de campos geotérmicos asociados a sus proyectos de investigación del CeMIEGeo, así como al representante ejidal de “Adolfo López Mateos” y al Biólogo Emilio Camarena quienes con mucho gusto accedieron a acompañarnos en la campaña de muestreo dentro del Bosque La Primavera, en la explicación del uso histórico que se le ha dado a las aguas termales en la zona y en su interpretación comparativa de cómo era cada zona de descarga desde que ellos lo recuerdan y hasta la actualidad (aprox. 1990-2017).

Finalmente, agradecer al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y a la Secretaría de Energía (SENER), por el apoyo y financiamiento otorgado al Proyecto Postdoctoral #272697, dirigido por el Dr. Mario A. Hernández Hdez., como parte del Fondo Sectorial CONACYT-SENER-SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA, en su convocatoria 2015-07.



Fotografía 13. Equipo de trabajo en la campaña de muestreo del APFFLP.



Fotografía 14. Equipo de trabajo en la campaña de muestreo del APFFLP.