



MEDIO AMBIENTE
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES



IMTA
INSTITUTO MEXICANO
DE TECNOLOGÍA DEL AGUA

**COORDINACIÓN DE DESARROLLO
PROFESIONAL E INSTITUCIONAL
SUBCOORDINACIÓN DE POSGRADO**

TESIS

**ESTIMACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y
TEMPORAL DE LA RECARGA POTENCIAL EN LA
CUENCA ALTA DEL RÍO GRIJALVA**

**Para obtener el grado de
Maestro en Ciencias y Tecnología del Agua**

Presenta

Sofía Guadalupe Díaz Palacios

Tutor: Dr. Roel Simuta Champo

Co-tutor: Dr. Rodrigo Roblero Hidalgo

Jiutepec, Morelos

Año 2022





Con fundamento en los artículos 21 y 27 de la Ley Federal del Derecho de Autor y como titular de los derechos moral y patrimoniales de la obra titulada "Estimación de la variabilidad espacial y temporal de la recarga potencial en la cuenca alta del río Grijalva", otorgo de manera gratuita y permanente al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, autorización para que fijen la obra en cualquier medio, incluido el electrónico, y la divulguen entre su personal, estudiantes o terceras personas, sin que pueda percibir por tal divulgación una contraprestación.

Sofia Guadalupe Diaz Palacios

Jiutepec, Morelos, octubre 2022



MAESTRÍA EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA DEL AGUA

Ante el Jurado integrado por:

Presidente: Dr. Rodrigo Roblero Hidalgo

Secretario: Dr. Edgar Yuri Mendoza Cázares

Vocal 1: Dr. Roel Simuta Champo

Vocal 2: M.C. Roberto Ramírez Villa

Vocal 3: Dra. Mayrén Alavez Vargas

Director de tesis

Dr. Roel Simuta Champo

Co-director de tesis

Dr. Rodrigo Roblero Hidalgo

Jiutepec, Morelos, México, octubre 2022
Instituto Mexicano de Tecnología de Agua

Resumen

La variabilidad espacial y temporal de la recarga potencial está en función de varios parámetros, tales como; la vegetación, edafología, uso de suelo, la precipitación, el clima y la topografía, entre otros. Lo anterior impacta de forma importante diferentes variables relacionadas con el ciclo hidrológico como la recarga natural (la evapotranspiración y escurrimiento superficial). En este estudio se estimó la variabilidad espacio-temporal de la recarga potencial para determinar el impacto por el cambio de uso de suelo y la variabilidad climática, mediante un modelo de balance de agua del suelo con paso de tiempo diario denominado Soil-Water Balance (SWB). En la ecuación de dominio del SWB para estimar la recarga potencial, son valores positivos: la precipitación, el flujo de entrada de las corrientes a la cuenca; y como valores negativos: la evapotranspiración, la interceptación y el flujo de salida de la cuenca. Para estimar el escurrimiento se utilizó el método de número de curva, que depende del grupo hidrológico, los usos del suelo y la capacidad de retención máxima de los suelos. La evapotranspiración se estimó con el método de Hargreaves y Samani. El modelo se calibró para el año 2010, seleccionado con base en la disponibilidad de información hidrométrica (claves: 30102, 30187 y 30195). Los parámetros con los que se calibró el modelo fueron el espesor de raíz efectiva, recarga máxima diaria y, número de curva. Una vez calibrado el modelo se realizó la simulación para tres periodos (2001 – 2005), (2006 – 2009) y (2010-2015). Los resultados más importantes indican que para el periodo 2001-2005, del volumen total de la precipitación media anual, el 16 % forma parte de la recarga potencial, el 25 % del escurrimiento superficial y el 58 % de la evapotranspiración real; para el periodo 2006-2009, el 18 % forma parte de la recarga potencial, el 25 % es escurrimiento superficial y el 52 % de la evapotranspiración real; y finalmente para el periodo 2010-2015, el 19 % se convierte en recarga potencial, el 30 % en escurrimiento superficial y el 51 % de la evapotranspiración real. Dentro de las conclusiones más importantes se destaca que la variación en espacio y tiempo de las variables climáticas y el cambio de uso de suelo inciden de forma importante en los porcentajes obtenido de las variables arriba descritas, además de que los usos de suelo pastizal y forestal son los que más favorecen a la recarga potencial.

Palabras Clave: Recarga potencial, balance de agua de suelo, evapotranspiración real, escurrimiento superficial, modelo hidrológico, SWB.

Abstract

The spatial and temporal variability of potential recharge is a function of several parameters, such as; vegetation, edaphology, land use, precipitation, climate and topography, among others. This has an important impact on different variables related to the hydrological cycle, such as natural recharge (evapotranspiration and surface runoff). In this study, the spatial-temporal potential recharge was estimated to determine the impact of land use change and climate conservation, using a soil water balance model with a daily time step called Soil-Water Balance. (SWB). In the SWB domain equation to estimate potential recharge, the following are positive values: precipitation, inflow of streams into the basin; and as negative values: evapotranspiration, interception and outflow from the basin. To estimate the runoff, the curve number method was used, which depends on the hydrological group, the land uses and the maximum retention capacity of the soils. Evapotranspiration was estimated using the Hargreaves and Samani method. The model was calibrated for the year 2010, selected based on the availability of hydrometric information (keys: 30102, 30187 and 30195). The parameters with which the model was calibrated were the effective root thickness, the maximum daily recharge and the curve number. Once the model was calibrated, the simulation was carried out for three periods (2001-2005), (2006-2009) and (2010-2015). The most important results indicate that for the period 2001-2005, the total volume of average annual precipitation, 16% is part of the potential recharge, 25% of surface runoff and 58% of real evapotranspiration; for the 2006-2009 period, 18% is part of the potential recharge, 25% is surface runoff and 52% is real evapotranspiration; and finally for the 2010-2015 period, 19% becomes potential recharge, 30% surface runoff and 51% actual evapotranspiration. Among the most important conclusions, it is highlighted that the variation in space and time of the climatic variables and the change in land use have an important impact on the percentages obtained from the variables described above, in addition to the fact that the uses of grassland and forest land are the ones that most favor potential recharge.

Keywords:

Potential recharge, soil water balance, actual evapotranspiration, surface runoff, hydrological model, SWB.

Índice general

Capítulo 1 . Antecedentes	11
1.1 Planteamiento del problema	13
1.2 Justificación	14
1.3 Hipótesis	16
1.4 Objetivos.....	16
Capítulo 2 . Marco teórico.....	18
2.1 Recarga potencial y temporal	18
2.2 El ciclo hidrológico	19
2.2.1 Precipitación	21
2.2.2 Intercepción	21
2.2.3 Infiltración y percolación.....	22
2.2.4 Evaporación	23
2.2.5 Escurrimiento	23
2.2.6 Evapotranspiración	24
2.3 Cuenca Hidrológica	24
2.4 Modelación hidrológica.....	25
2.4.1 Proceso de modelación.....	26
2.5 Estadística de prueba	27
Capítulo 3 . Metodología.....	29
3.1 Estimación de la recarga potencial	29
3.1.1 Insumos del modelo SWB.....	32
3.1.2 Tablas de consulta (Look table)	33
3.1.3 Ejecución del modelo.....	34
Capítulo 4 . Caracterización de la cuenca Alto Grijalva.....	36
4.1 Ubicación del área de estudio.....	36
4.2 Edafología.....	36
4.3 Orografía.....	39
4.4 Hidrología.....	40
4.5 Hidrogeología	41
4.6 Clima	43
4.7 Análisis de los materiales	44
4.6.1 Uso de suelo y vegetación.....	45
4.6.2 Edafología	46

4.6.3 Grupo hidrológico del suelo.....	47
4.6.4 Capacidad de agua disponible del suelo.....	49
4.6.5 Modelo digital de elevaciones.....	50
4.6.6 Dirección del flujo	50
4.6.7 Datos hidrometeorológicos	50
4.6.8 Datos climáticos.....	51
Capítulo 5 . Diseño y calibración del balance de agua de suelo.....	53
5.1 Parámetros del modelo	53
5.1.1 Cobertura del suelo	53
5.1.2 Dinámica de cambio	56
5.1.2 Grupo hidrológico del suelo.....	59
5.1.3 Capacidad de agua disponible del suelo.....	60
5.1.4 Dirección del flujo	62
5.1.5 Datos Climatológicos.....	63
5.2 Calibración	68
5.2.1 Análisis hidrométrico.....	69
5.2.2 Estimación del flujo directo	69
5.2.3 Diseño del modelo SWB año 2010	72
5.2.4 Comparación de los resultados simulados vs observados	76
5.2.5 Diseño de modelo SWB para los periodos de simulación.....	77
Capítulo 6 . Resultados	79
6.1 Análisis del balance hídrico por periodo	79
6.1.1 Periodo 2001 – 2005	79
6.1.2 Periodo 2006 – 2009	84
6.1.3 Periodo 2010 – 2015	86
6.2 Volúmenes estimados de las variables del ciclo hidrológico por grupo hidrológico y por uso de suelo para cada periodo.....	89
Capítulo 7 . Discusión.....	104
Capítulo 8 . Conclusiones y recomendaciones	119
8.1 Conclusiones.....	119
6.2 Recomendaciones	122
Capítulo 9 . Referencias	124
Anexo A. Tablas complementarias	130
Anexo B: Mapas de los parámetros del ciclo hidrológico.	132
Anexo C: Mapas de coeficientes.....	163

Índice de Tablas:

<i>Tabla 3-1. Definición de las condiciones de escurrimiento antecedente usados por el código SWB (USGS, 2010)</i>	31
<i>Tabla 3-2. Datos de superficie terrestre mallado</i>	32
<i>Tabla 3-3. Datos climáticos tabulares o mallados.</i>	33
<i>Tabla 4-1. Edafológica de la cuenca Alto Grijalva. (SoildGrids)</i>	39
<i>Tabla 4-2. Cuencas pertenecientes a la subregión hidrológica Alto Grijalva (SIALT, 2021)</i>	41
<i>Tabla 4-3. Información geográfica tabular y espacial utilizada.</i>	44
<i>Tabla 4-4. Disponibilidad de información de uso de Suelo y vegetación (INEGI, 2017).</i>	45
<i>Tabla 4-5. Grupos hidrológicos del suelo (SCS, 1964 en Bradbury et al, 2000)</i>	49
<i>Tabla 5-1. Distribución territorial de la clasificación de usos de suelo para la cuenca Alto Grijalva (México-Guatemala). Fuente (INEGI, MAGA)</i>	56
<i>Tabla 5-2. Razón de cambio de los periodos comprendidos del (2001 - 2005) y (2004 - 2009) México.</i>	57
<i>Tabla 5-3. Razón de cambio de los periodos comprendidos del (2006 - 2009) y (2010 - 2015) México.</i>	57
<i>Tabla 5-4. Razón de cambio de los periodos comprendidos del (2001 - 2005) y (2010 - 2015) México.</i>	58
<i>Tabla 5-5. Razón de cambio de los periodos comprendidos del (2001 - 2005) y (2006 - 2009) Guatemala.</i> ..	58
<i>Tabla 5-6. Razón de cambio de los periodos comprendidos del (2006 - 2009) y (2010 - 2015) Guatemala.</i> ..	59
<i>Tabla 5-7. Razón de cambio de los periodos comprendidos del (2001 - 2005) y (2010 - 2015) Guatemala.</i> ..	59
<i>Tabla 5-8. Distribución territorial del grupo hidrológico del suelo para la cuenca Alto Grijalva.</i>	60
<i>Tabla 5-9. Distribución territorial de las capacidades de agua disponibles estimadas para la cuenca Alto Grijalva. (Westenbroek et al., 2010).</i>	60
<i>Tabla 5-10. Valor de los parámetros de calibración del modelo SWB para la cuenca Alto Grijalva.</i>	73
<i>Tabla 5-11. Volúmenes de aportación y porcentajes de error resultantes de la calibración.</i>	77

Índice de Figuras:

<i>Figura 2.1.-Representación del ciclo hidrológico (Recuperado de periódico digital, 2018).</i>	20
<i>Figura 2.2.-Esquema de un sistema de modelación, mostrando entradas y salidas. Fuente: Beven, 2012.</i> ..	26
<i>Figura 3.1.-Ecuaciones y variables que modela SWB.</i>	32
<i>Figura 3.2.- Estructura de la tabla de consulta de cobertura de uso del suelo.</i>	33
<i>Figura 3.3.- Archivo de configuración Control_recharge_altogrijalva2010.ctl de SWB.</i>	35
<i>Figura 4.1.- Localización del área de estudio. Fuente: Elaboración propia</i>	36
<i>Figura 4.2.- Edafología cuenca Alto Grijalva. Fuente: Elaboración propia.</i>	37
<i>Figura 4.3.- Hidrografía y acuíferos de la cuenca Alta Grijalva. Fuente: Elaboración propia.</i>	42
<i>Figura 5.1.- Uso y cobertura del suelo cuenca Alto Grijalva (2001, 2006 y 2010). Fuente: Elaboración propia</i>	54
<i>Figura 5.2.- Grupo Hidrológico del suelo cuenca Alto Grijalva</i>	61
<i>Figura 5.3.- Capacidad de agua disponible del suelo (pulgadas por pie) cuenca Alto Grijalva</i>	62
<i>Figura 5.4.- Dirección de flujo cuenca Alto Grijalva</i>	63
<i>Figura 5.5.- Precipitación acumulada del año 2010 en la cuenca Alto Grijalva.</i>	64
<i>Figura 5.6.- Precipitación media acumulada periodos 2001 – 2005, 2006 – 2009 y 2010 – 2015 cuenca Alto Grijalva</i>	65
<i>Figura 5.7.- Tendencia de las temperaturas medias mensuales máximas en la cuenca Alto Grijalva</i>	67
<i>Figura 5.8.- Tendencia de las temperaturas medias mensuales mínimas en la cuenca Alto Grijalva</i>	68
<i>Figura 5.9.- Tendencia de la precipitación acumulada mensual en la cuenca Alto Grijalva</i>	68
<i>Figura 5.10.- Cuencas de aportación de las estaciones hidrométricas</i>	70
<i>Figura 5.11.- Hidrogramas estación hidrométrica 30102</i>	71
<i>Figura 5.12.- Hidrogramas estación hidrométrica 30187</i>	72

<i>Figura 5.13.- Hidrogramas estación hidrométrica 30195</i>	72
<i>Figura 5.14.- Láminas de escurrimiento superficial año 2010 cuenca Alto Grijalva</i>	74
<i>Figura 5.15.- Láminas de recarga potencial año 2010 cuenca Alto Grijalva</i>	75
<i>Figura 5.16.- Láminas de evapotranspiración real año 2010 cuenca Alto Grijalva</i>	76
<i>Figura 6.1.- Lámina de escurrimiento medio anual en el periodo (2001 – 2005, 2006 – 2009 y 2010 -2015)</i> 80	
<i>Figura 6.2.- Lámina de recarga media anual en el periodo (2001 – 2005, 2006 – 2009 y 2010 -2015)</i>	80
<i>Figura 6.3.- Lámina de evapotranspiración real media anual en el periodo (2001 – 2005, 2006 – 2009 y 2010 -2015)</i>	81
<i>Figura 6.4.- Coeficiente de escurrimiento medio periodo (2001 – 2005, 2006 – 2009 y 2010 -2015)</i>	82
<i>Figura 6.5.- Coeficiente de recarga media periodo (2001 – 2005, 2006 – 2009 y 2010 -2015)</i>	83
<i>Figura 6.6.- Coeficiente de evapotranspiración media periodo (2001 – 2005, 2006 – 2009 y 2010 -2015)</i> ..	83
<i>Figura 6.7.- Balance hidrológico cuenca Alta Grijalva periodo 2001 -2005</i>	84
<i>Figura 6.8.- Balance hidrológico cuenca Alta Grijalva periodo 2006 - 2009</i>	86
<i>Figura 6.9.- Balance hidrológico cuenca Alta Grijalva periodo 2010 - 2015</i>	88
<i>Figura 6.10.- Análisis del volumen de aportación de cada parámetro del ciclo hidrológico del periodo (2001 -2005) en la cuenca Alto Grijalva</i>	89
<i>Figura 6.11.- Análisis del volumen de aportación de cada parámetro del ciclo hidrológico del periodo (2006 -2009) en la cuenca Alto Grijalva</i>	90
<i>Figura 6.12.- Análisis del volumen de aportación de cada parámetro del ciclo hidrológico del periodo (2010 -2015) en la cuenca Alto Grijalva</i>	91
<i>Figura 6.13.- Análisis de los volúmenes de aportación con respecto a los grupos hidrológicos del suelo del periodo (2001 -2005) en la cuenca Alto Grijalva</i>	92
<i>Figura 6.14.- Análisis de los volúmenes de aportación con respecto a los grupos hidrológicos del suelo del periodo (2006 -2009) en la cuenca Alto Grijalva</i>	92
<i>Figura 6.15.- Análisis de los volúmenes de aportación con respecto a los grupos hidrológicos del suelo del periodo (2010 -2015) en la cuenca Alto Grijalva</i>	93
<i>Figura 6.16.- Relación volumen/superficie del grupo hidrológico del suelo periodo (2001 – 2005) en la cuenca Alto Grijalva</i>	94
<i>Figura 6.17.- Relación volumen/superficie del grupo hidrológico del suelo periodo (2006 –2009) en la cuenca Alto Grijalva</i>	94
<i>Figura 6.18.- Relación volumen/superficie del grupo hidrológico del suelo periodo (2010 – 2015) en la cuenca Alto Grijalva</i>	95
<i>Figura 6.19.- Análisis de los volúmenes de aportación con respecto al uso y cobertura del suelo periodo (2001 -2005) en la cuenca Alto Grijalva (México)</i>	96
<i>Figura 6.20.- Relación volumen/superficie de los usos y coberturas del suelo periodo (2001 – 2005) en la cuenca Alto Grijalva (México)</i>	96
<i>Figura 6.21.- Análisis de los volúmenes de aportación con respecto al uso y cobertura del suelo periodo (2006 -2009) en la cuenca Alto Grijalva (México)</i>	97
<i>Figura 6.22.- Relación volumen/superficie de los usos y coberturas del suelo periodo (2006 – 2009) en la cuenca Alto Grijalva (México)</i>	98
<i>Figura 6.23.-. Análisis de los volúmenes de aportación con respecto al uso y cobertura del suelo periodo (2010 -2015) en la cuenca Alto Grijalva (México)</i>	99
<i>Figura 6.24.- Relación volumen/superficie de los usos y coberturas del suelo periodo (2010 – 2015) en la cuenca Alto Grijalva (México)</i>	99
<i>Figura 6.25.-. Análisis de los volúmenes de aportación con respecto al uso y cobertura del suelo periodo (2001 -2005) en la cuenca Alto Grijalva (Guatemala)</i>	100
<i>Figura 6.26.- Relación volumen/superficie de los usos y coberturas del suelo periodo (2001 – 2005) en la cuenca Alto Grijalva (Guatemala)</i>	100

Figura 6.27.- Análisis de los volúmenes de aportación con respecto al uso y cobertura del suelo periodo (2006 -2009) en la cuenca Alto Grijalva (Guatemala)	101
Figura 6.28.- Relación volumen/superficie de los usos y coberturas del suelo periodo (2006 – 2009) en la cuenca Alto Grijalva (Guatemala)	101
Figura 6.29. Análisis de los volúmenes de aportación con respecto al uso y cobertura del suelo periodo (2010 -2015) en la cuenca Alto Grijalva (Guatemala)	102
Figura 6.30. Relación volumen/superficie de los usos y coberturas del suelo periodo (2010 – 2015) en la cuenca Alto Grijalva (Guatemala)	103

Capítulo 1 . Antecedentes

La cuantificación de las tasas de recarga natural del agua subterránea es una variable importante para la gestión eficiente de los recursos hídricos subterráneos. Es particularmente importante en regiones con grandes demandas de abastecimiento de agua subterránea, donde dichos recursos son la clave para el desarrollo económico. (Kumar, 2003). La cantidad y calidad del escurrimiento de aguas superficiales y la recarga de aguas subterráneas pueden verse afectadas por la urbanización (Foster *et al.*, 1999). La recarga de aguas subterráneas es el agua que se infiltra en el suelo hasta una profundidad por debajo de la zona de la raíz (French y Silvestre, 1999) alcanzando el nivel freático y formando una adición al depósito de aguas subterránea (De Vries y Simmers, 2002).

El comportamiento de la recarga de los mantos acuíferos, la evapotranspiración y el escurrimiento superficial depende además de las variables climáticas de precipitación y temperatura, además de otras características físicas propias de cada cuenca hidrográfica como lo son: Tipo de suelo, geología, topografía y cobertura vegetal. Estas características físicas propias de las cuencas sumadas a, la distribución y duración de las precipitaciones y temperaturas a lo largo de la misma, condicionan la variabilidad espacial y temporal de las láminas de recarga natural, evapotranspiración y escurrimiento superficial que se presentan en una cuenca (Dripps *et al.*, 2006). La recarga de las aguas subterráneas urbanas tiene dos tipos de fuente: 1) Recarga natural, que se deriva de precipitación infiltrada, 2) Recargas artificiales, que se derivan de agua importada de fuentes generalmente fuera de la cuenca hidrográfica (Meyer, 2005).

Los métodos numéricos proporcionan estimaciones de las tasas de recarga en grades áreas, pero su precisión depende de la calibración y escalas temporales y espaciales (Scanlon *et al.* 2003). Estimar la recarga potencial en cuencas hidrológicas mediante modelación numérica ha sido posible por el desarrollo de diversos métodos que estiman este parámetro en función de la condición del suelo y las herramientas con las que se dispone para la cuantificación de la recarga potencial. En este sentido, metodologías particulares con modelos de balance hídrico se han desarrollado para obtención de láminas de recarga potencial, tal como el caso de Soil and Water Assessment Tool (SWAT) (Moreno *et al.*, 2013), MODFLOW; modelo matemático de aguas subterráneas (Hydar *et al.*, 2016), Soil Water Balance; modelo de

balance suelo-agua (Dripps *et al.*, 2010), WetSpass; metodología de base física para la estimación de los patrones espaciales promedio a largo plazo de la escorrentía superficial, la evapotranspiración real y la recarga de aguas subterráneas (Pan *et al.*, 2011), entre otros.

Dripps *et al.* (2006) compararon un código de elemento analítico (EA) (GFLOW) con un código de estimación de parámetros no lineales (UCODE) para estimar la distribución espacial y temporal de la recarga usando un modelo de estado estacionario y caudales de base anual. Éstos, a su vez fueron comparados con: un modelo de superficie terrestre (IBIS-2) y un modelo SWB, que incluían resultados de mediciones de recarga sobre el terreno, los valores finales de recarga (EA) se aproximaron significativamente con las mediciones de recarga en campo, lo que respalda la utilidad de los códigos de estimación de parámetros de EA vinculados para estimar la recarga potencial.

Huil *et al.* (2012) usan los sistemas de información geográfica y modelación numérica, para la estimación de la recarga potencial, en donde encuentran que los cambios de precipitación, el uso de la tierra y la textura del suelo, juegan un papel influyente en la variación de la recarga de agua subterránea, en el que se consideró como limitantes la no descripción de la infiltración por debajo de la zona de la raíz, donde ocurre una sobreestimación de la variación de la recarga, misma que se ve afectada por la difícil cuantificación exacta de la cantidad de riego en sistemas agrícolas.

Pan *et al.* (2011), analizaron los procesos hidrológicos y la capacidad de recarga en el acuífero, para varios tipos de uso de la tierra en la cuenca del río Guishui, China, mediante el modelo de balance hídrico (WetSpass) y un sistema de información geográfica. Sus resultados muestran la disminución de tierras de cultivos y pastizales junto con el aumento del área urbana y los asentamientos rurales son las principales razones de reducción de la recarga anual de agua subterránea, la cual represento el 21.16% de la precipitación.

En el trabajo Dripps y Bradbury (2010) realizaron un modelo simple, diario de balance suelo-agua para estimar la distribución espacial y temporal de recarga de agua subterránea de la cuenca del lago Trout en el norte de Wisconsin, usando el modelo SWB. Aunque la precisión de la recarga simulada y su distribución requieren mayor verificación y evaluación, la comparación de los resultados de SWB con las mediciones de campo y otros modelos

presentados en publicaciones anteriores (como Dripps, 2003; Dripps y Bradbury, 2007) proporciona confianza en los valores de recarga calculados. Por lo que concluyeron que los resultados obtenidos de recarga potencial con el modelo SWB son razonables y representan adecuadamente la variabilidad de recarga observada.

En el Estado de México, el instituto de gobierno Probosque en colaboración con el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua aplicaron la metodología del SWB para la obtención de cartografías de las láminas de recarga potencial, de escurrimiento superficial y de evapotranspiración real para los años 2008, 2015 y 2018 en las cuencas Lerma y Balsas, Estado de México. Además, se estimó la recarga potencial anual que aportan las superficies beneficiadas con el programa Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos del Estado de México (PsaheM) ubicadas en las cuencas Lerma y Balsas (IMTA, 2020). Por otro lado, Ríos *et al.* (2019) aplicó la misma metodología en la cuenca del lago Zirahuén en Michoacán de Ocampo, en donde se realizó la estimación de la disponibilidad hídrica, en el periodo de tiempo de 1972 al 2015, como resultado las láminas unitarias de recarga mostraron que los mayores valores se presentaron en los años 1992 y 2000, en tanto que los años 2009 y 2015, presentan los valores más bajos. La porción central norte con cobertura de bosques tiene bajos valores de recarga debido a las altas pendientes que registran por la presencia de las elevaciones mayores.

La presente propuesta se considera que la deforestación; el cambio de uso de suelo, por las actividades agrícolas; además de las variaciones climáticas, que se registran en la cuenca Alto Grijalva, han impactado significativamente en las variables del ciclo hidrológico, por lo que en este trabajo se estimarán las láminas de recarga potencial, evapotranspiración y escurrimiento de la cuenca con el modelo SWB (Dripps y Bradbury, 2010), para determinar cómo la cobertura del suelo, tipo de suelo y variables climáticas impactan de forma espacial y temporal sobre estos parámetros.

1.1 Planteamiento del problema

El estudio de evaluación de sequía de la cuenca Grijalva-Usumacinta de la Comisión Nacional de Agua (CONAGUA, 2014) a través del método SPI (índice de precipitación estandarizado, por sus siglas en inglés) demuestra que en la cuenca alta del río Grijalva

durante los meses de octubre diciembre del año 2000 al 2006 se presentaron sequías que van de modera, severa a extrema en el último año del periodo evaluado.

El uso de suelo de la cuenca Alto Grijalva sufre cambios constantes debido a la actividad agrícola y ganadera que amplía las fronteras mediante obras de drenaje y bordos intensificando la deforestación en la zona. Los tipos de vegetación más extendidos en la cuenca Alto Grijalva son bosques de pino (2.8%) de pino – encino (4.8%) y mesófilo de montaña (5.4%) y a menor altitud sobre sale la selva alta perennifolia (6.4%) (Vargas *et al.* 2014).

El presente estudio se orienta con las siguientes preguntas, ¿Cuál es el volumen de la recarga potencial en la cuenca alta del río Grijalva? y ¿Cuál es el impacto que generan en la recarga potencial el cambio de uso de suelo y las variables climáticas?

La estimación de la recarga potencial en la cuenca de estudio genera aportes preliminares para el diseño de futuros proyectos socioeconómicos, o gubernamentales que tenga un impacto o interacción con los recursos hídricos, además proporcionará un estimado de los escurrimientos que aporta a la Central Hidroeléctrica Belisario Domínguez (La Angostura).

1.2 Justificación

En México, la deforestación y el incremento poblacional son los fenómenos más importantes que influyen en los procesos de cambio de uso de suelo (Mas *et al.*, 2009). Las acciones de índole económica y social que desarrolla la humanidad han favorecido la modificación del entorno donde se establece, esto con la finalidad de satisfacer sus necesidades básicas de alimentación vivienda y servicios básicos; causando cambios en el ambiente a consecuencia de alterar las características físicas, químicas y biológicas del suelo, la vegetación y hábitat de la fauna silvestre (Hernández *et al.*, 2020).

La cobertura vegetal conservada son componentes integrales del ciclo del agua: regulan el flujo de la corriente, fomentan la recarga de aguas subterráneas y contribuyen al reciclaje del agua atmosférica, incluida la generación de nubes y la precipitación a través de la evapotranspiración. Las áreas boscosas y los paisajes con árboles también actúan como filtros naturales, reducen la erosión del suelo y la sedimentación de agua, con lo que proporcionan

agua de alta calidad para consumo humano, industrial y del medio ambiente (Springgay, 2019).

El 90 % de las principales ciudades depende de las cuencas hidrográficas forestadas para su abastecimiento de agua (McDonald y Shemie, 2014), y un tercio de las ciudades más grandes del mundo, incluidas Bogotá, Johannesburgo, Nueva York, Tokio y Viena, obtiene una gran proporción de su agua potable de áreas forestales protegidas (Dudley y Stolton, 2003). En México, surgió en el año 2009, el programa de restauración forestal en cuencas hidrográficas prioritarias, como una nueva estrategia de restauración para la recuperación y establecimiento de las condiciones que propicie la evolución de procesos naturales en zonas forestales en cuencas prioritarias (Comisión Nacional Forestal [CONAFOR],2012).

Las aguas subterráneas están sujetas a una serie de riesgos y problemas relacionados tanto con su cantidad (reducción del caudal) como con su calidad (contaminación). En lo que se refiere a la cantidad, es evidente que toda extracción de agua subterránea disminuirá el flujo y el aporte de un acuífero determinado a lagos, ríos y humedales. Asimismo, los cambios en la cantidad de agua pueden afectar a su calidad, de modo que es importante calcular los tiempos de extracción para estimar los efectos diferidos de la misma y poder prever las relaciones causa efecto (Fondo de Cooperación para Agua y Saneamiento [FCAS], 2017).

Los escurrimientos de la cuenca alta del río Grijalva forman parte de una gran aportación al embalse de la Central Hidroeléctrica Belisario Domínguez (La Angostura) que representa el embalse más grande del país con una capacidad aproximada de 10,727 hectómetros cúbicos de agua (CONAGUA, 2008). Del volumen total de aguas superficiales que escurren anualmente en la región del Grijalva-Usumacinta (147 km^3) se aprovechan para todos los usos el 34% (49.81 km^3), de los cuales el 98.67% se utiliza para la generación de energía eléctrica (uso considerado como no consuntivo) y solamente el 1.33% se destina a usos consuntivos (agrícolas, público-urbanos, industriales y otros usos). Dentro de estos últimos, el de mayor demanda es el agrícola, seguido por el público-urbano. En general, la región tiene una demanda igual para usos consuntivos tanto de aguas subterráneas ($0.67 \text{ km}^3/\text{año}$), como de aguas superficiales (0.67 km^3). En conjunto se tiene una extracción de 1.33 hm^3 de agua para usos consuntivos, lo que no llega al 1% de las disponibilidades totales (Instituto

Nacional de Ecología y Cambio Climático [INECC], 2007). A pesar de su abundancia, el agua tiene algunas limitaciones para sus usos directos en las diversas actividades humanas. Las aguas superficiales presentan altos contenidos de sólidos disueltos y las aguas subterráneas son de las consideradas duras, esto es, con niveles elevados de sulfato y carbonato. A estas limitantes iniciales hay que agregarle las que representan las descargas de contaminantes domésticos e industriales sin tratamientos previos (INECC, 2007).

En la cuenca Grijalva se ubican las zonas de mayor precipitación pluvial de México. En varias localidades llueve más de 4 500 milímetros anuales, lo que equivale a un volumen siete veces mayor al que llueve en la Ciudad de México o Monterrey. Ante la falta de cobertura vegetal, esta cantidad de precipitación convierte a la cuenca en una zona vulnerable a inundaciones. Algunos fragmentos de vegetación aún se mantienen gracias a que se decretaron como áreas naturales protegidas entre ellas; el Parque Nacional Cañón del Sumidero y la Reserva de la Biosfera El Ocote, y la parte que corresponde de las reservas de la biosfera El Triunfo y La Sepultura. Entre todas protegen aproximadamente 260 mil hectáreas, que no representan ni el 4 % de la superficie de la cuenca. El resto de la escasa vegetación remanente sigue en riesgo de perderse si las tendencias de deforestación no se revierten (Carabias, 2008).

1.3 Hipótesis

El comportamiento espacial y temporal de la recarga potencial en la cuenca alta del río Grijalva es afectado por el cambio de uso de suelo y la variabilidad climática.

1.4 Objetivos

General:

Estimar la variabilidad espacio-temporal de la recarga potencial en la cuenca alta del río Grijalva para determinar el impacto en la región de estudio por el cambio de uso de suelo y la variabilidad climática.

Específicos:

1. Determinar la variabilidad espacio-temporal de la recarga potencial de la cuenca de estudio mediante el modelo SWB.

2. Obtener mapas de las láminas de recarga potencial, láminas de escurrimiento y láminas de evapotranspiración para cada año en el periodo comprendido del 2001 - 2015
3. Evaluar el impacto sobre las variables del ciclo hidrológico debido al cambio de uso de suelo y las variables climáticas en la zona de estudio.

Capítulo 2 . Marco teórico

En este capítulo se exponen brevemente algunas consideraciones teóricas relativas a la recarga potencial que sirvieron de base para el desarrollo de esta investigación.

2.1 Recarga potencial y temporal

La recarga es la entrada de agua dentro de la zona saturada donde comienza a hacer parte de las reservas subterráneas, esta entrada puede darse de dos maneras, por un movimiento descendente del agua debido a las fuerzas de gravedad y luego de presentarse un movimiento horizontal del flujo debido a las diferentes condiciones hidráulicas de las capas que constituyen el perfil del suelo (Balek, 1988).

La recarga a un acuífero puede darse naturalmente debido a la precipitación, a las aguas superficiales, es decir, a través de ríos y lagos, o por medio de transferencias desde otras unidades hidrogeológicas o acuíferos; pero también puede darse de manera artificial producto de actividades como la irrigación, fugas de redes de abastecimiento o por infiltraciones de embalses y depósitos (Balek, 1988).

Lerner (1990) propone una clasificación similar pero un poco más completa sobre las fuentes de recarga:

- Recarga directa o recarga difusa, proveniente de la precipitación.
- Recarga concentrada o indirecta, producto de cauces permanentes, estacionales y efímeros.
- Flujos laterales, procedentes de otros acuíferos.
- Retorno de riegos, excesos de riegos o las pérdidas en los canales de distribución.
- Recarga urbana, producto de fugas de redes de abastecimiento y redes de alcantarillado.

Lerner (1990) y luego Simmers (1997) definen la recarga localizada como una categoría intermedia la cual implica un movimiento horizontal del agua antes de que se dé el proceso de recarga. Es importante saber que muchas de las técnicas existentes para determinar la recarga no cuantifican el valor real, sino que estiman la recarga potencial, este término fue

introducido por Rushton en 1988 y se refiere al agua que se infiltra pero que puede o no alcanzar el nivel freático (Scanlon *et al.*, 2002).

Variabilidad espacial. Las propiedades del suelo y del acuífero incluyendo el proceso de recarga varían de un lugar a otro lateral y verticalmente (Balek, 1988). La variabilidad espacial de las propiedades de los acuíferos y acuitardos es siempre muy elevada, aún aquellos que se consideran más homogéneos, (Custodio, 1997).

Variabilidad temporal. Balek (1988) define cuatro tipos de recarga según el tiempo:

- Recarga a corto plazo. Ocurre ocasionalmente luego de una fuerte lluvia, se da principalmente en regiones donde no hay estaciones húmedas y secas muy marcadas.
- Recarga estacional. Ocurre regularmente, por ejemplo, durante el período húmedo en regiones húmedas y secas.
- Recarga perenne. Ocurre en ciertos lugares del trópico húmedo donde el flujo de agua descendente es casi permanente y puede ocurrir una recarga continua.
- Recarga histórica. Este tipo de recarga se presentó hace mucho tiempo y contribuyó a la formación de los presentes recursos de agua subterránea, está estrechamente relacionada con lo que se conoce como tiempo de residencia, definido como el tiempo que permanece un volumen determinado de agua en las reservas subterráneas desde que se convirtió en recarga hasta que vuelve a hacer parte del ciclo hidrológico activo.

2.2 El ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico, según lo señala la Organización Meteorológica Mundial (2012), es una “sucesión de fases por las que pasa el agua en su movimiento de la atmósfera a la tierra y en su retorno a la misma”, en su trayecto se ven modificadas las características físicas, químicas y biológicas del agua, el suelo y aire presentes en el planeta (Puyol y Villa, 2006).



Figura 2.1.-Representación del ciclo hidrológico (Recuperado de periódico digital, 2018).

Aparicio (1992), menciona que, como todo ciclo, el hidrológico no tiene ni principio ni fin, y su descripción puede comenzar en cualquier punto. El agua que se evapora bajo el efecto de la radiación solar y el viento. El vapor de agua, que así se forma, se eleva y se transporta por la atmósfera en forma de nubes hasta que se condensa y cae hacia la tierra en forma de precipitación. Durante su trayecto hacia la superficie de la tierra, el agua precipitada puede volver a evaporarse o ser interceptada por las plantas o las construcciones, luego fluye por la superficie hasta las corrientes o se infiltra. El agua interceptada y una parte de la infiltrada y de la que corre por la superficie se evapora nuevamente. De la precipitación que llega hasta los océanos y otros grandes cuerpos de agua, como presas y lagos. Del agua infiltrada una parte es absorbida por las plantas y posteriormente es transpirada, casi en su totalidad, hacia la atmósfera y otra parte fluye bajo la superficie de la tierra hacia las corrientes, el mar u otros cuerpos de agua, o bien hacia zonas profundas del suelo para ser almacenada como agua subterránea y después aflorar en manantiales, ríos o el mar.

Así, un sistema hidrológico, se puede analizar como una estructura en el espacio, que está delimitada por una frontera en tres dimensiones que acepta entradas y salidas de agua, en ésta, se establecen flujos superficiales, subterráneos y atmosféricos, de tal forma que un medio (generalmente agua, aire y calor) que entra al sistema, interactúa con otros medios y

emerge como salida del sistema, fundamentalmente, el objetivo del análisis de un sistema hidrológico, es estudiar la operación y predecir con ello, las salidas (Chow *et al.*, 1994).

2.2.1 Precipitación

La precipitación, es el agua liberada desde las nubes hacia las capas inferiores de la atmósfera. Incluye la lluvia, nieve, granizo y aguanieve; para que ésta se presente, es necesaria la elevación de una masa de agua en la atmósfera que al enfriarse condense una parte de ésta para que luego sea liberada por la gravedad (Chow *et al.*, 1994).

En la relación a su origen, pueden clasificarse en (Sánchez, 2017).

- Las ciclónicas son las provocadas por los frentes asociados a una borrasca o ciclón. La mayor parte del volumen de precipitación recogido en una cuenca se debe a este tipo de precipitaciones.
- Las de convección se producen por el ascenso de bolsas de aire caliente; son las tormentas de verano.
- Las precipitaciones orográficas se presentan cuando masas de aire húmedo son obligadas a ascender al encontrar una barrera montañosa.

2.2.2 Intercepción

La intercepción de lluvia, es el proceso por el cual el agua de lluvia, modifica su trayectoria al ser interceptada por el dosel de los árboles, edificios, estructuras sobre la superficie ejerciendo de esta manera, una marcada influencia en el patrón de la lluvia que alcanza a llegar suelo. Una vez interceptada, el agua es retenida por las hojas y ramas de los árboles, incluso por plantas epifitas, o por las condiciones de las estructuras de los edificios pudiendo a partir de este momento, continuar su trayectoria, por una o más de estas tres vías: evaporarse, gotear desde el almacenamiento, o fluir por las paredes hasta el suelo de (García, 2006).

Flores *et al.* 2016, afirman que este proceso afecta al rendimiento hídrico de las cuencas, por lo que densidad de la cobertura vegetal tiene un impacto en el contenido de humedad del suelo, la escorrentía superficial y el volumen evaporado.

En el proceso de intercepción, la vegetación forestal participa en la distribución espacial de la lluvia que golpea a dicha vegetación en distintos estratos y que llega al piso forestal

presentando patrones de temporalidad (Loescher *et al.*, 2002; Cameron, 2007), constituye un proceso de gran complejidad, debida a los elementos estructurales del bosque y a su interacción con el ambiente (Sinoquet y Le Roux, 2000). Las copas del arbolado regulan el recorrido que sigue la lluvia antes de llegar al piso forestal, modificando la trayectoria de la caída de las gotas de lluvia, dividiéndola en: lluvia directa, lluvia interfoliar y lluvia de escurrimiento fustal. De hecho, las copas evitan que la lluvia llegue como tal al piso forestal, dado que es interceptada y retenida en hojas, ramas, fuste (Chappell *et al.*, 2001; Germer *et al.*, 2006) e inclusive por plantas epifitas, y que son las causantes de que considerables cantidades de agua sean retenidas por la vegetación forestal (Hölscher *et al.*, 2004; Pypker *et al.*, 2006; Pypker *et al.*, 2006b; Guevara-Escobar *et al.*, 2011).

2.2.3 Infiltración y percolación

La infiltración es el proceso mediante el cual el agua penetra desde la superficie del terreno hacia el subsuelo. Los factores influyen en la tasa de infiltración, son; la condición de la superficie del suelo y su cubierta vegetal, las propiedades del suelo, tales como la porosidad y la conductividad hidráulica, y el contenido de humedad presente en el mismo, así como también la duración de la lluvia y del patrón de drenaje en la cuenca (Sistema Intermunicipal De Los Servicios De Agua Potable Y Alcantarillado [SIAPA], 2014)

En el proceso de infiltración se pueden distinguir tres fases:

- a) Intercambio. Se presenta en la parte superior del suelo, donde el agua puede retornar a la atmósfera por medio de la evaporación debido al movimiento capilar o por medio de la transpiración de las plantas.
- b) Transmisión. Ocurre cuando la acción de la gravedad supera a la de la capilaridad y obliga al agua a deslizarse verticalmente hasta encontrar una capa impermeable.
- c) Circulación. Se presenta cuando el agua se acumula en el subsuelo debido a la presencia de una capa impermeable y empieza a circular por la acción de la gravedad, obedeciendo las leyes del escurrimiento subterráneo.

La tasa de infiltración se refiere a la relación del volumen infiltrado por unidad de tiempo, usualmente se expresa en centímetros por hora. Chow *et al.*, (1994), señalan que, las propiedades del suelo, la cubierta vegetal, la porosidad, la conductividad hidráulica, la

condición de la superficie del suelo, el contenido inicial de humedad en el mismo, entre otros, son factores que intervienen en la tasa de infiltración, sin embargo, la gran variabilidad espacial y temporal del suelo, hacen de éste un proceso muy complejo, por lo que los modelos desarrollados apenas se aproximan a la realidad.

Capacidad de infiltración.

La capacidad de infiltración se define como el nivel máximo de agua que un suelo puede absorber dependiendo de sus propiedades físicas y del estado de humedad antecedente a la precipitación. Se mide por la altura de agua que se infiltra, expresada en mm/hora. En la década de los años treinta, los trabajos de Horton en infiltración dominan el pensamiento hidrológico ya que conociendo la precipitación y la capacidad de infiltración de un suelo en un momento dado se puede determinar la escorrentía superficial (Ruiz *et al.*, s/f).

2.2.4 Evaporación

La evaporación es un proceso por el cual el agua de la superficie es transmitida a la atmósfera en forma de vapor. Este es consecuencia del impacto que los rayos solares producen sobre los mares, lagos, ríos, suelos húmedos y de la vegetación transformando el agua en vapor (Puyol y Villa, 2006).

La evaporación es un proceso esencial del ciclo hidrológico, pues se estima que aproximadamente el 75% de la precipitación total anual que ocurre sobre los continentes retorna a la atmósfera en forma de vapor, directamente por evaporación o a través de las plantas, por transpiración (Gray *et al.*, 1973).

2.2.5 Escurrimiento

El escurrimiento se define como el agua proveniente de la precipitación que circula sobre o bajo la superficie terrestre y que llega a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca. El agua proveniente de la precipitación que llega hasta la superficie terrestre, una vez que una parte ha sido interceptada y evaporada, sigue diversos caminos hasta llegar a la salida de la cuenca. Conviene dividir estos caminos en tres clases; escurrimiento superficial, escurrimiento subsuperficial y escurrimiento subterráneo (Aparicio, 1992).

Tipos de escurrimiento (Murillo, 2010):

El escurrimiento superficial es el que se mueve por lo superficie del terreno hacia los cauces de drenaje durante y después de ocurrida la lluvia. Este escurrimiento marca el exceso de la capacidad de infiltración del suelo.

El escurrimiento subsuperficial, es la parte del agua de lluvia que se infiltra y se mueve lateralmente por los estratos más elevados hasta llegar al cauce. Su movimiento es más lento que el superficial y tarda más tiempo en llegar al cauce. A veces el flujo subsuperficial aflora antes de llegar al cauce y se convierte en superficial. Otras veces se profundiza agregándose al subterráneo.

El escurrimiento subterráneo proviene de la precipitación que se infiltran hasta alcanzar los niveles freáticos moviéndose muy lentamente (es el más lento) hasta enriquecer las corrientes superficiales. A los efectos del análisis, el escurrimiento total de una corriente, se considera formado por el escurrimiento directo y el escurrimiento base (llamado caudal de estiaje).

2.2.6 Evapotranspiración

La evaporación y la transpiración ocurren simultáneamente y no hay una manera sencilla de distinguir entre estos dos procesos. Aparte de la disponibilidad de agua en los horizontes superficiales, la evaporación de un suelo cultivado es determinada principalmente por la fracción de radiación solar que llega a la superficie del suelo. Esta fracción disminuye a lo largo del ciclo del cultivo a medida que el dosel del cultivo proyecta más y más sombra sobre el suelo. En las primeras etapas del cultivo, el agua se pierde principalmente por evaporación directa del suelo, pero con el desarrollo del cultivo y finalmente cuando este cubre totalmente el suelo, la transpiración se convierte en el proceso principal (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], s/f).

2.3 Cuenca Hidrológica

El término cuenca hidrológica, se refiere a la superficie a través de la cual, el agua precipitada, se transfiere por medio del sistema de drenaje hacia las zonas más bajas para concentrarse y descargar a otras cuencas o al océano (Breña y Villa, 2006). La definición anterior se refiere a una cuenca superficial; asociada a cada una de estas existe también una cuenca subterránea, cuya forma en planta es semejante a la superficial. Desde el punto de vista de su salida, existen fundamentalmente dos tipos de cuencas; endorreicas y exorreicas.

En las primeras el punto de salida está dentro de los límites de la cuenca y generalmente es un lago; en las segundas, el punto de salida se encuentra en los límites de la cuenca y está en otra corriente o en el mar (Aparicio, 1992).

La cuenca constituye un sistema complejo, abierto y dinámico donde se llevan a cabo una serie de relaciones entre las actividades antropogénicas y las características naturales, que dan origen a fuentes puntuales y no puntuales de contaminación, que favorecen el detrimento de los bienes y servicios ambientales, la salud humana e incluso, a largo plazo pueden incidir sobre el clima (Cuevas *et al.*, 2010).

2.4 Modelación hidrológica

Los modelos hidrológicos pueden ser clasificados, de acuerdo con el análisis de tres características básicas útiles para la modelación hidrológica de cuencas. De acuerdo con la conceptualización de los procesos básicos; pueden ser empíricos, conceptuales o basados en procesos. Según la naturaleza de los algoritmos básicos; pueden ser determinísticos o estocásticos; y según su representación espacial; pueden ser agrupados o distribuidos.

Los modelos hidrológicos se presentan como una necesidad y una herramienta para conocer mejor el funcionamiento y el comportamiento de las diferentes componentes del ciclo hidrológico. Como consecuencia de ello, los modelos hidrológicos se usan (Cabrera, 2012):

- Como herramienta para la gestión y planeación.
- Para una mayor comprensión del rol de los componentes del ciclo hidrológico en una determinada cuenca.
- Para extrapolar potenciales condiciones futuras a partir de condiciones actuales.
- Como base para la modelación de otros procesos, como la calidad de agua, erosión, etc.

El modelo hidrológico de una cuenca, es un reflejo de los procesos que en ella se presentan, de las condiciones iniciales y están delimitados por una frontera en tres dimensiones que acepta entradas y salidas de agua, producto de flujos superficiales, subterráneos o atmosféricos (Chow *et al.*, 1994) y debe representar un punto de equilibrio entre complejidad y exactitud de la representación, basado en la comprensión del sistema, la disponibilidad de datos y de su capacidad predictiva (Cabrera, 2015).

2.4.1 Proceso de modelación

El primer paso de toda modelación hidrológica es establecer un “modelo conceptual”, es decir, decidir cuáles son los principales procesos y variables que intervienen en la generación de caudales. Una vez reconocidos, se debe relacionar estos procesos y variables principales entre sí por medio de ecuaciones, obteniéndose un “modelo conceptual”. Si las ecuaciones constitutivas son demasiado complejas, como es el caso de ecuaciones diferenciales, se hace necesario simplificarlas de manera que puedan ser reconocidas y procesadas por un sistema de cómputo; este modelo simplificado es una aproximación al modelo conceptual y suele llamársele “modelo procedimental” (Cabrera, 2015).

Según Beven (2012), para llevar a cabo una modelación de cuenca se suele llevar a cabo los siguientes pasos:

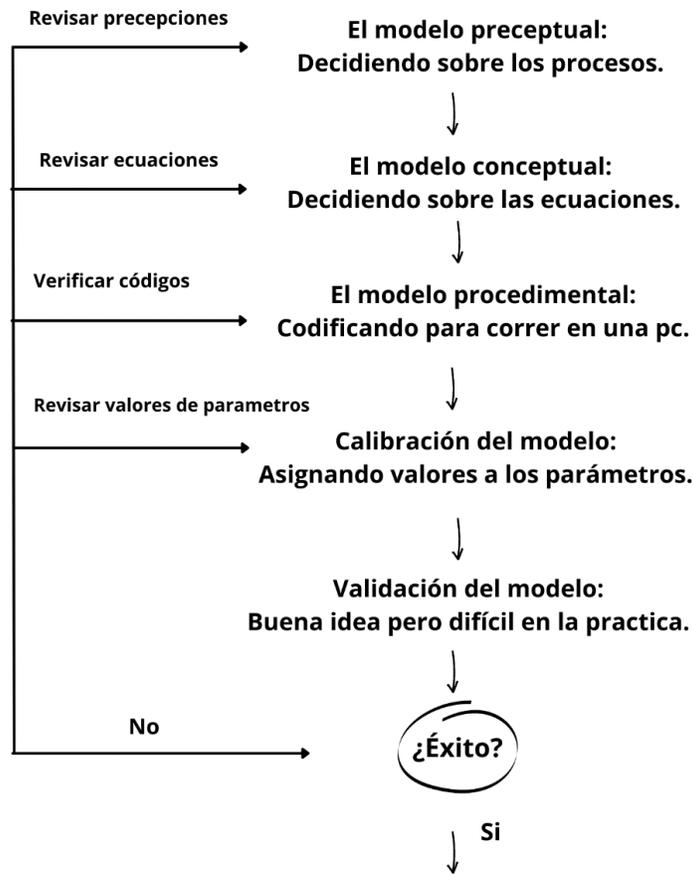


Figura 2.2.-Esquema de un sistema de modelación, mostrando entradas y salidas. Fuente: Beven, 2012

La calibración es el proceso de ajuste de valores de parámetros para optimizar el funcionamiento de parámetros de acuerdo con un grupo de criterios predefinidos (Sooroosshian y Gupta, 1995). (Walski *et al.*, 2007) definen la calibración como un proceso de dos pasos que consisten en:

1.-Comparar los caudales simulados con aquellos observados para unas condiciones conocidas.

2.-Ajustar los datos de entrada al modelo de tal forma que exista concordancia entre los valores simulados y observados.

La calibración se logra en dos pasos, separación de los gastos observados; escurrimiento directo y/o recarga de flujo de corriente, utilizando la separación de hidrogramas y luego la comparación de los valores de escurrimiento pronosticados y observados. La precisión de la separación del flujo base depende de la longitud de datos de registro de ancho de vía que se procesan. Periodos más largos de los datos proporcionan una separación más confiable que los periodos más cortos, y los valores medios anuales o medios mensuales dan mejor resultado que predicciones diarias. Por lo tanto, el periodo de calibración debe ser más largo y los datos utilizados para calibrar deben ser estandarizados para tener en cuenta la variabilidad temporal de la escurrimiento que es causada por cambios en la lluvia y condiciones de usos del suelo (Muthukrisbman *et al.*, 2006).

Evaluar el desempeño de un modelo calibrado se denomina validación. Con el modelo calibrado se procede a realizar una o varias simulaciones, que son comparadas con observaciones de precipitación y caudal. A partir de los estadísticos de desempeño, la simulación del sistema se puede calificar como buena, regular o pobre. Es importante considerar que estas validaciones son, en realidad, validaciones condicionales (Beven y Young, 2013).

2.5 Estadística de prueba

El análisis estadístico sirve al investigador para la comprobación de sus hipótesis, debe ser utilizado de manera apropiada de acuerdo con los objetivos y el diseño del estudio. Para elegir la prueba estadística es necesario tomar en cuenta 3 aspectos: el diseño de la

investigación, el número de mediciones y la escala de medición de las variables (Flores et al., 2017).

En una serie de medidas de una magnitud cualquiera, el error aleatorio siempre estará presente, y si bien resulta incontrolable, es de algún modo cuantificable, de manera que podemos calcular su valor numérico y con ello el rango de incertidumbre de las medidas realizadas, lo cual nos permitirá definir la calidad de las mismas.

Al error así cuantificado le llamaremos error absoluto, se representa en general, por Δx y debe ser expresado en las mismas unidades que la magnitud medida x . De esta manera tendremos

$$\text{valor medido} = x \pm \Delta x$$

lo cual nos indica que el verdadero valor de la medida debe encontrarse dentro del intervalo $x - \Delta x < \text{verdadero valor} < x + \Delta x$

Error relativo: El error relativo se expresa como el cociente entre el error absoluto y el valor medido. Lo representaremos por ε_r , es decir

$$\varepsilon_r = \frac{\Delta x}{x} \quad (1)$$

Error porcentual: Como pueden verse el error relativo es un número adimensional y generalmente mucho menor que la unidad, por ello frecuentemente se expresa en forma de porcentaje multiplicándolo por 100, y dando el resultando en tanto por ciento del valor medido.

$$\varepsilon_p(\%) = 100 * \varepsilon_r = 100 * \frac{\Delta x}{x} \quad (2)$$

Capítulo 3 . Metodología

Se propone realizar una la simulación hidrológica a partir del código de modelación SWB, calibrado con datos del año el año 2010 seleccionado con base en la mayor disponibilidad de datos hidrométricos. La calibración se realiza mediante los parámetros de raíz efectiva, recarga máxima, numero de curva y el volumen de escurrimiento directo de 3 estaciones. Una vez calibrado se realiza la simulación de tres periodos compuestos de 5 años (2001 – 2005), 4 años (2006 – 2009) y 6 años (2010-2015). Cabe mencionar que el tiempo de ejecución del modelo fue de 24 horas por cada año simulado. En los tres periodos los parámetros que se consideran constante para la simulación son: la dirección de flujo, la capacidad de agua disponible del suelo y los grupos hidrológicos del suelo. Los parámetros que se modifican para cada periodo son: los datos climáticos y el uso de suelo. De los resultados de la simulación de cada periodo, se obtuvieron láminas de evapotranspiración real anual, recarga potencial anual y escurrimiento superficial anual. Para lograr lo anterior se requiere del siguiente proceso (Sección 3.1).

3.1 Estimación de la recarga potencial

Para la estimación espacial y temporalmente de la recarga en este trabajo se utilizó el programa SWB desarrollado por Dripps y Bradbury (2010), dicho modelo utiliza información disponible de suelo, cobertura de suelo, topografía y datos climáticos para estimar la distribución espacial y temporal de la recarga de agua subterránea a escala de cuenca en áreas húmedas templadas. El SWB es un modelo determinista cuasi-tridimensional que simula la recarga diaria realizando un balance diario del agua del suelo y utiliza un Sistema de Información Geográfica (SIG) para configurar la malla del modelo y postprocesar sus resultados. El modelo contabiliza los procesos de precipitación, evapotranspiración, interceptación, escurrimiento superficial, almacenamiento de humedad del suelo y deshielo por medio del uso de un SIG .

Para calcular la recarga, el código del SWB utiliza el método modificado de Thornthwaite-Meter (Servicio Geológico de Estados Unidos [USGS], 2010) para contabilizar el agua en el suelo. La recarga se calcula de forma separada para cada celda de la malla en el dominio del modelo. Las fuentes y sumideros de agua dentro de cada celda se determinan a partir de datos

climáticos y características del paisaje (tipo de suelo, cobertura del suelo, topografía); la recarga se calcula como las diferencias entre el cambio en la humedad del suelo y fuentes y sumideros (USGS, 2010).

$$\text{recarga} = (\text{precipitación} + \text{deshielo} + \text{flujo de entrada}) - (\text{intercepción} + \text{flujo de salida} + \text{ET}) - \Delta \text{ humedad de suelo}$$

El método de número de curva define al escurrimiento en relación con las diferencias entre precipitación y un término de “abstracción inicial”. Conceptualmente, el término de abstracción inicial representa la sumatoria de todos los procesos que pudieran actuar para reducir el escurrimiento, incluyendo la intercepción por las plantas y hojas caídas, almacenamiento por depresión e infiltración. Para calcular el volumen de escurrimiento se usa la ecuación 3.

$$R = \frac{(P - I_a)^2}{[P + (S_{max} - I_a)]} \quad P > I_a \quad (3)$$

donde

R es el escurrimiento, en pulgadas.

P es la precipitación diaria, en pulgadas.

S_{max} es la capacidad de retención máxima de humedad del suelo, en pulgadas y

I_a es la abstracción inicial, la cantidad de precipitación que puede caer antes de que cualquier escurrimiento se genere, en pulgadas.

El término de abstracción inicial (I_a) se relaciona con el término de almacenamiento (S_{max}) como sigue:

$$I_a = 0.2S_{max} \quad (4)$$

El término de almacenamiento máximo se define por el número de curva para el tipo de uso de suelo bajo consideración:

$$S_{max} = \left(\frac{1,000}{CN} \right) - 10 \quad (5)$$

El número de curva se ajusta dependiendo de que tanta precipitación ha ocurrido en un periodo de cinco días previos. La cantidad de precipitación que ha caído en los cinco días previos se usa para describir las condiciones de humedad del suelo; se definen tres clases de

condiciones de humedad y se llaman condiciones de escurrimiento antecedente I, II y III, definidos como se muestra en la tabla 3-1.

Tabla 3-1. Definición de las condiciones de escurrimiento antecedente usados por el código SWB (USGS, 2010)

Condición	Humedad del suelo	Temporada latente	Temporada de crecimiento
I	Seco	< 0.05	< 1.4
II	Intermedio	0.5 – 1.1	1.4 – 2.1
III	Cerca de la saturación	> 1.1	> 2.1

Cuando los suelos están cercano a lo saturado, con una condición de escurrimiento antecedente III, el número de curva para la celda de la malla se ajusta hacia arriba de la condición de escurrimiento antecedente II (ecuación 6), generalmente se contabilizan cantidades observadas de escurrimiento más altas cuando la precipitación cae sobre suelos saturados:

$$CN_{ARC(III)} = \frac{CN_{ARC(II)}}{(0.427+0.00573 \cdot CN_{ARC(II)})} \quad (6)$$

Inversamente, cuando los suelos están secos, como en una condición de escurrimiento antecedente I, los números de curva se ajustan hacia abajo de la condición de escurrimiento antecedente II (ecuación 7) para reflejar el incremento en las tasas de infiltración de los suelos secos.

$$CN_{ARC(III)} = \frac{CN_{ARC(II)}}{(2.281+0.01281 \cdot CN_{ARC(II)})} \quad (7)$$

Entre las condiciones “seca” y “cercana a saturada” esta la condición de escurrimiento antecedente II, lo cual representa una relación lluvia escurrimiento promedio para condiciones moderadas de humedad del suelo.

El rango de números de curva va de 0 a 100. Si un rango útil de número de curva se define con un mínimo de 30 y un máximo de 98, el término de almacenamiento máximo (S_{max}) varía de un valor bajo de aproximadamente 0.2 pulgadas a un valor alto de 23 pulgadas. El uso de un término de abstracción inicial de $0.2S_{max}$ implica que entre 0.04 y 4.6 pulgadas de precipitación podrían caer antes de que inicie el escurrimiento.

El código del SWB también considera el análisis para el suelo congelado mediante el uso de un índice de suelo congelado continuo, o CFGI, en este trabajo esta opción no se utiliza ya que en la región de estudio (Cuenca Alto Grijalva) no se presentan estas condiciones.

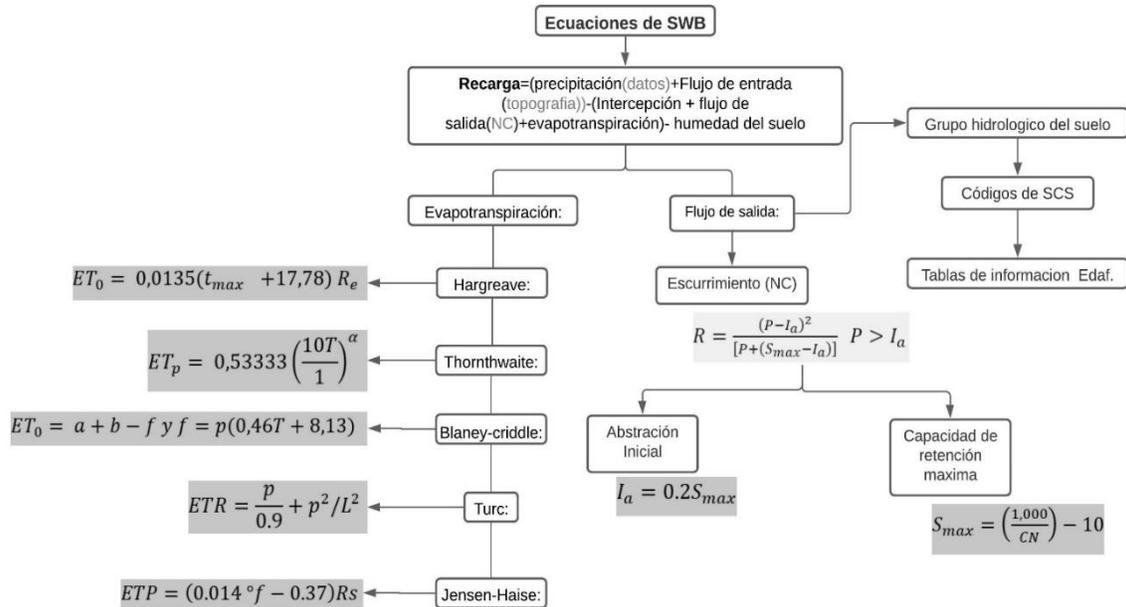


Figura 3.1.-Ecuaciones y variables que modela SWB.

3.1.1 Insumos del modelo SWB

El modelo requiere datos climatológicos tabulares y datos de la superficie terrestre mallasados para calcular el balance de agua y estimar la recarga para cada celda de la malla.

Tabla 3-2. Datos de superficie terrestre mallasado

Datos:
Grupo hidrológico de suelo
Uso de suelo/cobertura del suelo
Capacidad disponible del agua del suelo
Dirección de flujo de agua superficial

Además de los datos mallasados de la superficie terrestres (tabla 3-2), el modelo requiere datos climatológicos diarios tabulares o mallasados (tabla 3-3).

Tabla 3-3. Datos climáticos tabulares o mallados.

Datos:	Unidad de medida:
Precipitación diaria	In
Temperatura promedio del aire	°F
Temperatura máxima y mínima del aire	°F
Adicionales:	
Velocidad promedio diaria del viento	%
Humedad relativa promedio diaria	%
Humedad relativa máxima diaria	%
Porcentaje diario posible del sol	%

3.1.2 Tablas de consulta (Look table)

Las tablas, sirven de referencia en el cálculo de parámetros de las celdas de la malla. El modelo SWB genera dos tablas:

1.-Tabla de consulta de propiedades de uso de suelo y tierra.

Esta proporciona las propiedades de uso del suelo, el número de la NRCS, la profundidad de enraizamiento, la interceptación y la información de la recarga diaria máxima específica para cada cobertura de uso de suelo propuesta por Anderson II descritas por Dripps (2003) (figura 3.2).

*LU_lookup_WISCLAND_w_forested_hillslope - sin(109): Bloc de notas

Archivo Edición Formato Ver Ayuda

NUM_LANDUSE_TYPES 12

NUM_SOIL_TYPES 4

NOTE: Although the numbers contained in this table fall within reasonable ranges, they may not be appropriate for your particular project. Please review each value for appropriateness before proceeding!

# LU code	Description	CURVE NUMBER				MAX RECHARGE				Interception (growing season)				Interception (Non-growing season)				Reference		
		ANC II	ANC II	ANC II	ANC II	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D			
100	1 URBAN/DEVELOPED	**	**	**	**															
100	1.2 zonas urbanas	0.65	98	98	98	99	0.60	0.28	0.20	0.10	0	0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	210-VI-TR-55 Second Ed. June 1986	2/3 of Table 10,	
112	2.1.2 agricultura (straight row, good condition)	**	**	**	**	64	75	83	86	0.70	0.30	0.20	0.15	0	0	2.0	2.0	2.0	1.90	210-VI-TR-55 Second Ed. June 1986
105	3 Pastizales (assume pasture, good condition)	**	**	**	**	55	73	82	89	0.70	0.30	0.20	0.15	0	0	2.0	2.0	2.0	1.90	SCS Nat Eng Handbook Section 9, Table 10, TM 1957; Deep-rooted crops
107	4 Selvas bajas y medianas caducifolias (assume good condition)	**	**	**	**	39	63	67	70	0.70	0.30	0.20	0.15	0.07	0	4.5	4.5	4.0	4.0	SCS Nat Eng Handbook Section 9, 2004
101	4.1 bosques de coníferas	**	**	**	**	52	62	69	0.70	0.30	0.20	0.15	0.07	0	4.5	4.5	4.0	4.0	SCS Nat Eng Handbook Section 9, 2004	
104	4.2.2 Bosques de Latifoliadas (roble)	**	**	**	**	36	52	62	69	0.70	0.30	0.20	0.15	0.08	0	4.5	4.5	4.0	4.0	SCS Nat Eng Handbook Section 9, 2004
103	4.3 Bosques mixtos caducifolio conifero	**	**	**	**	40	60	70	76	0.70	0.30	0.20	0.15	0.07	0	4.5	4.5	4.0	4.0	SCS Nat Eng Handbook Section 9, Table 10, TM 1957; Deep-rooted crops
110	5 Cuerpos de agua	**	**	**	**	100	100	100	100	0.70	0.30	0.20	0.15	0	0	0	0	0	0	Dripps
106	6 Humedales	**	**	**	**	96	96	96	96	0.70	0.30	0.20	0.15	0	0	2.0	2.0	2.0	2.0	SCS Nat Eng Handbook Section 4, 1964
102	6.2.2 Bosque de galería	**	**	**	**	40	64	70	76	0.70	0.30	0.20	0.15	0	0	4.5	4.5	4.0	4.0	SCS Nat Eng Handbook Section 4, 1964
111	7 Sin vegetación	**	**	**	**	76	84	88	91	0.70	0.30	0.20	0.15	0	0	1.0	1.0	1.0	1.0	210-VI-TR-55 Second Ed. June 1986
108	8 Hatorrales	**	**	**	**	49	66	70	76	0.70	0.30	0.20	0.15	0	0	2.1	2.1	2.1	1.90	SCS Nat Eng Handbook Section 4, 1964 Table 10, TM 1957; Deep-rooted crops

Figura 3.2.- Estructura de la tabla de consulta de cobertura de uso del suelo.

2.-Matriz de retención de agua en el suelo para una posible pérdida potencial de agua.

Esta tabla contiene valores de retención de agua propuesta por Thornthwaite-Mather (1957), en la que relacionan la pérdida de agua potencial acumulada con la humedad retenida para diferentes capacidades del suelo-agua. No debe ser modificada por el usuario.

3.1.3 Ejecución del modelo

Una vez integrados los datos de entrada, el siguiente paso consiste en la configuración del modelo, en donde se establecen los parámetros bajo los cuales se procederá a realizar la modelación (figura 3.3). Este procedimiento se realiza mediante la edición del archivo Control_recharge_altogrijalva2010.ctl que se puede hacer en cualquier editor de archivos de texto plano, considerando los siguientes aspectos principales:

- a) Model domain definition: se definen las características de las mallas (número de filas y columnas, coordenadas extremas, tamaño de pixel o resolución espacial).
- b) Flow direction: se indica el nombre de la malla que corresponde a las direcciones de flujo.
- c) Soil group: se ingresa el nombre de la malla de los grupos hidrológicos de suelos.
- d) Land use/cover classification: indicar el nombre de la malla que tiene la codificación de la cobertura de uso de suelo y vegetación;
- e) Base soil water capacity: dar el nombre de la malla correspondiente a la capacidad de retención de humedad de los suelos;
- f) Evapotranspiration method: se elige el método para el cálculo de la evapotranspiración, en este caso, se eligió el método de Hargreaves-Samani (1985).
- g) Begin solution: sección en la que se inicia la corrida del modelo indicando el archivo tabular de los datos climáticos que corresponda al año de análisis. Las matrices de datos en formato ráster, deben estar en un mismo directorio, en este caso denominado 'input'; en tanto que la información tabular en archivos de texto, debe ir en un directorio denominado 'climate'; en todo caso, la estructura de directorios debe estar al interior de la carpeta que contiene al programa ejecutable principal del modelo.

```

Control_recharge_altogrijalva2010: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
#ESTIMACION DE LA RECARGA PARA LA CUENCA ALTO GRIJALVA, MEXICO
#CONFIGURADO EL 12 JUNIO DE 2020
#SOFIA GUADALUPE DIAZ PALACIOS
#PROYECTO: Cuenca Alto Grijalva - IMTA
#AÑO DE EVALUACION : 2010
#-----
# SWB Model annotated control file
#
# This test case covers a grid centered on the Black Earth Creek
# watershed in south-central Wisconsin. Atmospheric data for this
# case is derived from the climate station at the Dane County
# Regional Airport.
#
#-----
# MODEL DOMAIN DEFINITION
#
# Definition of the model domain. Units of meters are assumed.
# All subsequent input grids must match the specified model domain exactly.
#
#           Lower LH Corner      Upper RH Corner      Grid
#           |-----|           |-----|           Cell
#           NX  NY  X0           Y0           X1           Y1           Size
GRID 4390 3830 456234.3509 1651428.5878 675734.3509 1842928.5878 50.0
#-----
# LENGTH UNITS
#
# Must specify whether grid coordinate are given in METERS or FEET.
# This affects conversion of values from inches to acre-ft.

GRID_LENGTH_UNITS METERS
#-----
# OUTPUT CONTROL

# If running SWB in batch mode, it may be desirable to turn off the
# daily mass balance summary that is normally printed to the screen.

```

Figura 3.3.- Archivo de configuración Control_recharge_altogrijalva2010.ctl de SWB.

Capítulo 4 . Caracterización de la cuenca Alto Grijalva.

4.1 Ubicación del área de estudio

La cuenca alta del río Grijalva o Grijalva -La Concordia se localiza al suroeste de México y al noreste de Guatemala con una superficie de 13,043.81 km² y 5,404.47 km² respectivamente. La cuenca inicia su travesía en los departamentos Huehuetenango, San Marcos y Quetzaltenango en Guatemala para finalizar en el estado de Chiapas en el territorio mexicano, al mismo que le pertenecen 24 municipios con una población de 1,222,181 habitantes. La presa la angostura de ubica geográficamente en latitud 16°24'5.41" N y longitud 92°46'42.78" O, lugar donde desemboca la cuenca Alto Grijalva

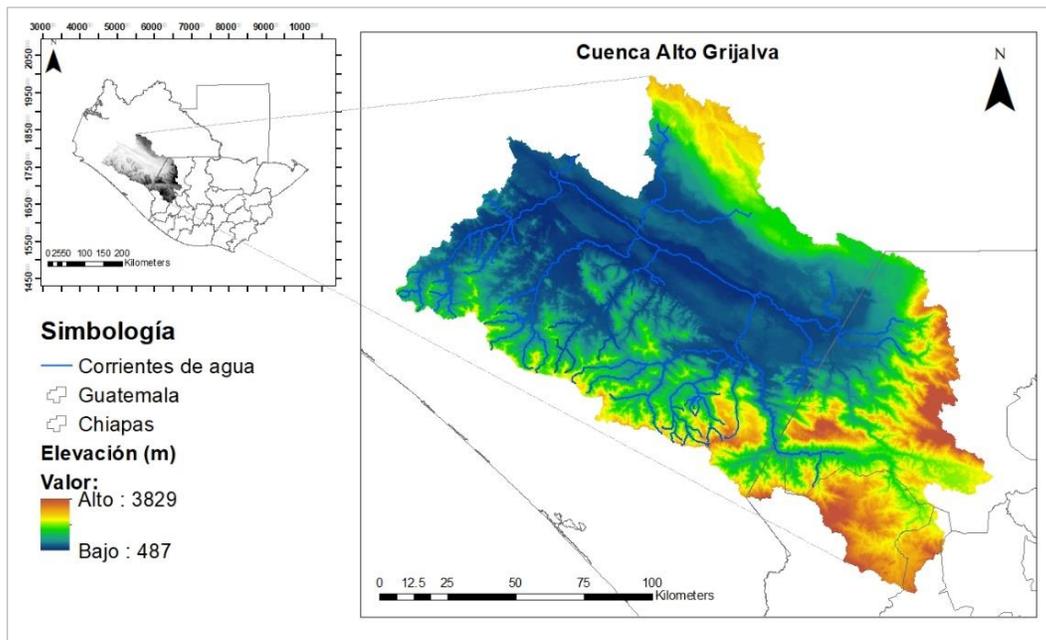


Figura 4.1.- Localización del área de estudio. Fuente: Elaboración propia

4.2 Edafología

Los suelos predominantes en el Alto Grijalva (tabla 4-1) obtenidos del sistema de mapeo digital de suelos SoilGrids (figura 4.2) se presentan a continuación con la caracterización de acuerdo a Driessen y Dudal (1989) recuperado de Soils Hydrology (1994);

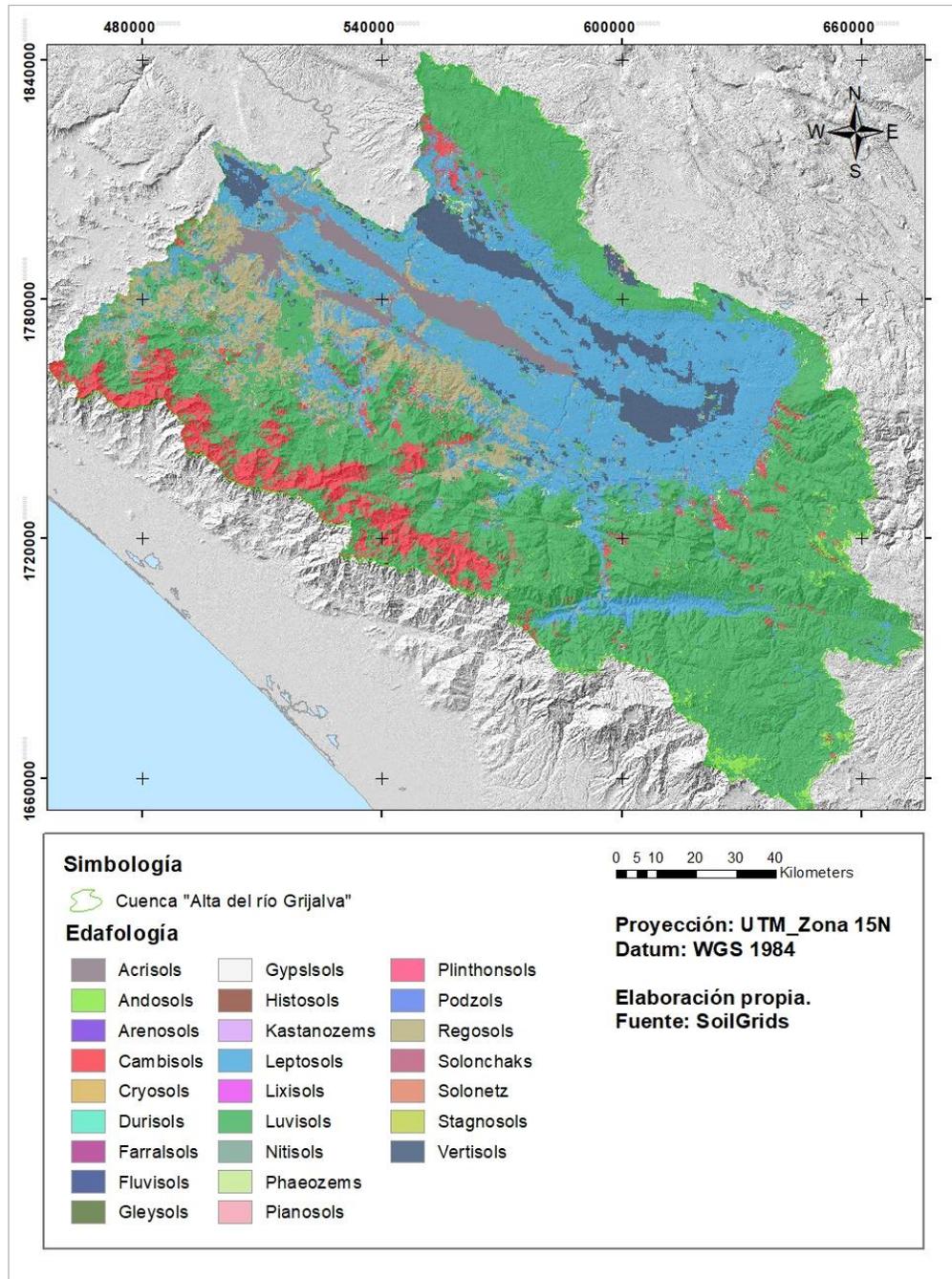


Figura 4.2.- Edafología cuenca Alto Grijalva. Fuente: Elaboración propia.

- **LUVISOLS** (latín *luere* = Wash) Suelos sobre sedimentos no consolidados, frecuentemente sobre loess, donde la arcilla ha sido arrastrada desde la superficie del suelo para acumularse en el horizonte B árgico. Tienen estructura de miga dentro de la capa superior del suelo y estructura cúbica a bloque en el horizonte B. La mayoría

están bien drenados, pero algunos horizontes B obstruyen la percolación, lo que provoca un anegamiento periódico dentro del perfil.

- LEPTOSOLS (griego *leptos* = *shallow*) Suelos poco profundos débilmente desarrollados sobre roca dura influenciados frecuentemente durante su génesis por la erosión. Sus propiedades están determinadas principalmente por la naturaleza de la naturaleza del material original y el clima. A poca profundidad, se drenan libremente.
- REGOSOLS (griego *rhegos* = *blanket*) Suelos poco profundos muy poco desarrollados con ligera acumulación de materia orgánica procedente de material no consolidado de la intemperie. Los procesos de formación del suelo duraron poco tiempo o se vieron obstaculizados por condiciones climáticas extremas (desértico o permafrost). Sus propiedades están relacionadas con el clima y la naturaleza de la roca meteorizada.
- CAMBISOLS (latín *cambiare* = *change*) Suelos con distinto horizonte B donde es dominado meteorizado y no se produce lixiviación ni acumulación. Aunque sus propiedades varían ampliamente, la formación estructural del horizonte B siempre es distinta.
- ACRISOLS (latín *acris* = *very acid*) Suelos ácidos fuertemente meteorizados de los trópicos que tienen colores de costra subsuperficial rojos y amarillos. Los horizontes plintita y gléyico a veces son evidentes. Después de la deforestación, la estructura débil del suelo da paso a la formación de costras en la superficie del suelo y a tasas de infiltración reducidas. El anegamiento a menudo ocurre en las depresiones locales.
- ANDOSOLS, constituyen uno de los grupos de suelos de referencia para la producción agrícola en el mundo por su elevada fertilidad potencial (IUSS Working Group WRB, 2015). La relación que tienen con zonas volcánicas permiten actividades forestales, agrícolas y frutícolas bajo diferentes manejos tanto orgánicos como inorgánicos, y con diferentes sistemas de labranza: convencional, tradicional, mínima o cero (Tapia-Vargas *et al.*, 2001; Velásquez-Valle *et al.*, 2006, 2007; Muñoz-Villalobos *et al.*, 2011).
- PHAEZEMES, suelos rojizos de las regiones de praderas/pasto con una alta saturación de bases (ricos en nutrientes), pero en los que los rasgos de acumulación de carbonatos secundarios no suelen ser visibles (WRB, 1998).

- VERTISOL, suelos arcillosos por antonomasia, que albergan una alta proporción de arcillas expansivas (se hinchan en contacto con el agua). (WRB,1998).

Dentro de la cuenca se encuentran otros tipos de suelo con menos de 0.01% de área presente en la cuenca. Estos suelos en general están compuestos por sedimentos vinculado al hidromorfismo, arcillas y arenas las cuales brindan un balance en la conductividad de los suelos dentro de la cuenca. Los suelos con mayor extensión territorial, se caracterizan en 2 grupos, los primeros pertenecen a suelos con alto contenido de nutrientes, y el segundo con suelos compuestos por rocas que impiden la actividad agrícola, pero mantiene actividades de pastoreo, desarrollados en regiones montañosas.

Tabla 4-1. Edafológica de la cuenca Alto Grijalva. (SoildGrids)

Edafología:	Área en Km²:	%
Acrisols	557.6875	3.0236
Andosols	138.17	0.7491
Arenosols	0.215	0.0012
Cambisols	1320.355	7.1585
Cryosols	0.4525	0.0025
Ferralsols	0.67	0.0036
Fluvisols	0.05	0.0003
Gleysols	0.1125	0.0006
Gypsisols	0.655	0.0036
Histosols	0.1025	0.0006
Kastanozems	0.3975	0.0022
Leptosols	4752.53	25.7666
Lixisols	1.2625	0.0068
Luvissols	9137.6475	49.5413
Nitisols	0.275	0.0015
Phaeozems	61.7375	0.334Acr7
Pianosols	5.4775	0.0297
Plinthosols	0.4175	0.0023
Podzols	0.9825	0.0053
Regosols	1532.3675	8.3080
Solonchaks	0.125	0.0007
Solonetz	1.1075	0.0060
Stagnosols	0.1625	0.0009
Vertisols	931.5125	5.0503

4.3 Orografía

El Alto Grijalva se ubica en la Depresión Central de Chiapas, es una extensa zona semiplana bordeada por las sierras del sur de Chiapas y volcanes de Centroamérica, que conforman lo

que más comúnmente se llama Sierra Madre de Chiapas. La Sierra Madre es una estructura inclinada de manera desigual; desciende abruptamente hacia la costa de Chiapas y con menor pendiente hacia la depresión central. Es más elevada hasta unos 3 000 msnm, en su porción sureste debido a un mayor levantamiento relativo. Su altitud disminuye paulatinamente hacia el noroeste (1000-1500 m), con su punto más bajo al suroeste de Cintalapa, en los límites con Oaxaca, y asciende nuevamente a más de 1500 m junto a la sierra de Los Chimalapas (Waibel 1946; INEGI 2007). Como se observa en la figura 4.1, la diferencia de altitud en la cuenca, desde el punto más bajo al más elevado es de 3 340 m. En el borde sureste de la cuenca, en Guatemala, el principal macizo montañoso es el de la sierra de los Cuchumatanes, con altitudes mayores de 3 800 m. En ella nacen los ríos Selegua, Azul y Nenton, que se unen al río Lagartero y forman el río San Gregorio, ya en la Depresión Central, dentro de México (García, 2010). El afluente guatemalteco más meridional es el Cuilco, que proviene de los departamentos de San Marcos y Huehuetenango y Quetzaltenango.

4.4 Hidrología

El río Grijalva nace en Guatemala en la sierra de Cuchumatanes, donde recibe el nombre de Nentón, al entrar a México, se le incorporan los ríos Lagartero y Selegua, que al fluir forman el río presa la Angostura. Por otro lado, el río Cuilco, cuyo origen se sitúa también en la República de Guatemala, baja de la sierra del Soconusco y se une al río Tepizaca en México dando origen al río Grijalva recorriendo la Depresión Central de Chiapas, donde sus aportaciones son primero reguladas a través de la presa La Angostura. La cuenca Alto Grijalva pertenece a la región Hidrológica N°30 denominada Grijalva-Usumacinta, conforme a la NOM-011-CONAGUA-2000. El cauce principal de La subregión Hidrológica, es el Río Grijalva, que tiene una longitud total de aproximadamente 700 kilómetros (Documento Oficial de la Federación [DOF], 2002).

La cuenca está integrada por 12 subcuencas (tabla 4.2), de las cuales 11 de ellas tienen principal aporte a la cuenca Presa la Angostura (figura 4.2), los escurrimientos de la cuenca alta del río Grijalva forman parte de una gran aportación al embalse de la Central Hidroeléctrica Belisario Domínguez (La Angostura) que representa el embalse más grande del país con una capacidad aproximada de 10,727 hectómetros cúbicos de agua (CONAGUA, 2008).

Tabla 4-2. Cuencas pertenecientes a la subregión hidrológica Alto Grijalva (SIALT, 2021)

Nombre:	Área (Km ²):	Perímetro (km):	Tipo:	Corriente principal:	
				Pendiente (%):	Sinuosidad:
Lagartero:	485.94	117.42	Exorreica	14.81	1.71
Yahuayita:	1001.6	195.45	Exorreica	50.2	1.45
Zacualpa:	895.78	153.4	Exorreica	48.27	1.93
Tapizaca:	723.17	196.7	Exorreica	50.49	2.00
Selegua:	533.99	130.79	Exorreica	14.81	1.61
San Miguel:	254.21	90.38	Exorreica	19.51	2.01
La Concordia:	976.67	182.29	Exorreica	37.73	1.43
Aguacatenco:	2230.59	316.14	Exorreica	1.37	2.58
Aguazurco:	595.97	123.89	Exorreica	41.06	1.98
San Pedro:	1060.16	196.81	Exorreica	1.89	1.48
Grande o Salinas:	719.97	148.1	Exorreica	2.67	1.44
Presa la Angostura:	3566.06	589.7	Exorreica	15.44	1.63

4.5 Hidrogeología

Según el sistema de Información Geográfica de Acuíferos y Cuencas (SIGACUA). La cuenca Alto Grijalva está compuesto por 3 acuíferos; La Trinitaria que se localiza al noreste de la cuenca, Chicomuselo al sureste y La Frailesca al centro-oeste (figura 4.3).

El acuífero 0706 La Frailesca, se localiza en los pequeños valles, entre la roca alterada y la capa de material redepositado, de textura granular. La recarga del acuífero es por infiltración directa del agua de lluvia sobre la depresión, así como también de la parte aluvial al pie de la Sierra Madre de Chiapas o Macizo Granítico de Chiapas. Debido a las características de los depósitos aluviales y a su funcionamiento hidráulico, este acuífero se considera de tipo libre (CONAGUA, 2020).

De igual manera el acuífero 0708 La Trinitaria, se encuentra alojado en los materiales clásticos no consolidados, de origen sedimentario que por sus características litológicas conforman un acuífero de tipo libre, de espesor variable. Litológicamente pertenece a la unidad de depósitos continentales cuaternarios que se encuentran alojados en las inmediaciones de los principales ríos; Grijalva, Santa Inés y San Vicente. Constituidos principalmente por arcillas, arenas y gravas, desarrollando terrazas de geometría angosta, mientras que sobre planicies de inundación se encuentran básicamente materiales limo-arcillosos. El espesor de esta unidad es limitado, con un promedio de 8 metros y un máximo

de 50 metros, por lo que se puede deducir que en general esta secuencia no constituye un acuífero de importancia, el cual es destinado básicamente para abastecer las necesidades de uso doméstico de comunidades rurales, por medio de excavaciones poco profundas y medios mecánicos de extracción (CONAGUA, 2020).

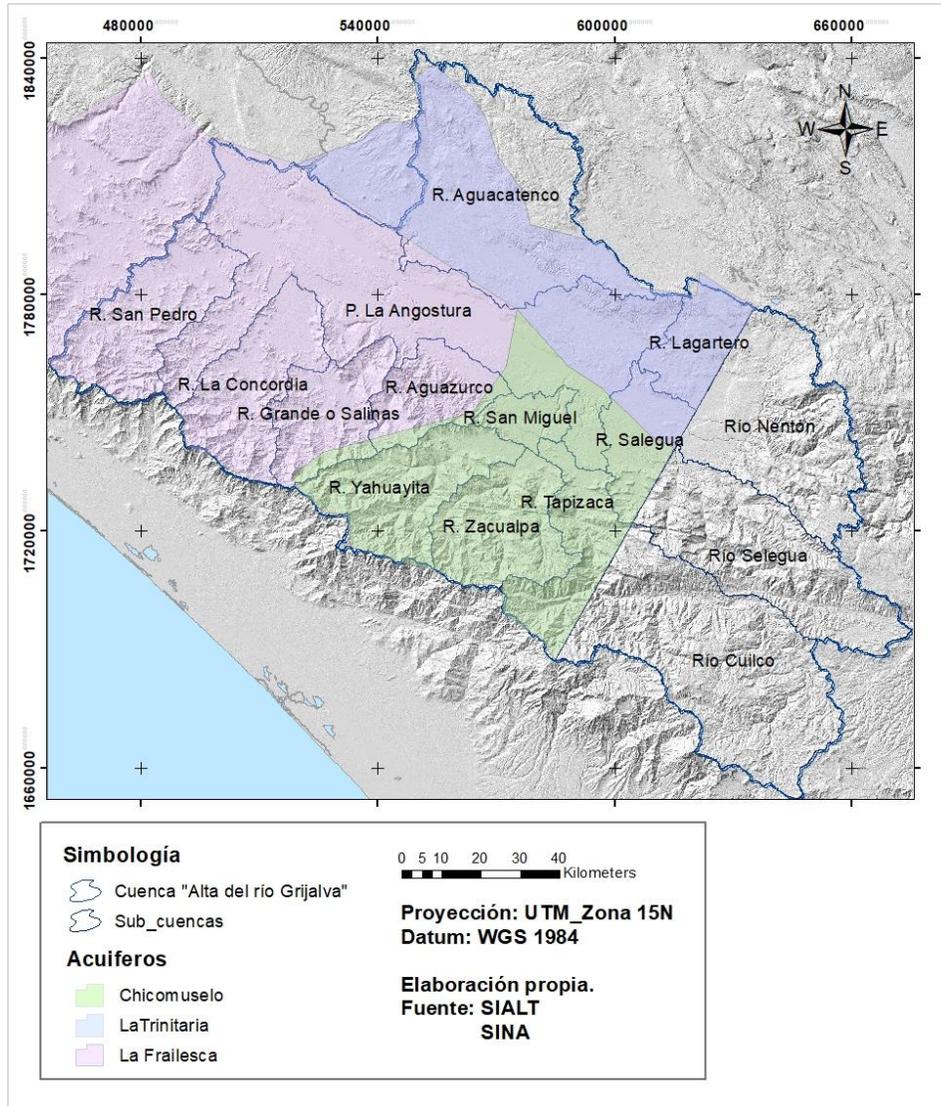


Figura 4.3.- Hidrografía y acuíferos de la cuenca Alta Grijalva. Fuente: Elaboración propia.

El acuífero 0714 Chicomuselo, se encuentra alojado dentro de los materiales clásticos no consolidados de origen sedimentario, que por sus características litológicas conforman un acuífero de tipo libre. Éste presenta una estructura irregular en su posición topográfica, constituyendo un acuífero con variaciones laterales en su granulometría, que le confieren variaciones en su potencial de explotación. Se localizan en las planicies de inundación de los

principales ríos: Grijalva, San Miguel y San Gregorio, Los cuales están conformados por arcillas, limos, arenas y gravas, desarrollando terrazas de geometría angosta. El espesor de esta unidad es limitado con un promedio de 5 a 10 metros y un máximo de 30 metros, por lo que se puede deducir que en general esta secuencia no constituye un acuífero de importancia. Los volúmenes extraídos destinan básicamente a satisfacer las necesidades del uso doméstico abrevadero, por medio de excavaciones poco profundas y medios mecánicos de extracción (CONAGUA, 2020).

4.6 Clima

El clima dominante perteneciente a la Depresión Central y a la Sierra Madre de Chiapas para el Alto Grijalva varía entre templado húmedo, cálido húmedo, templado y cálido subhúmedo. Se presentan temperaturas de 4°C ubicados en la cima del volcán Tacaná, hasta las 38°C en las zonas más bajas. Resulta complejo establecer una temperatura exacta para esta zona, ya que el clima sufre severas modificaciones debido al variable relieve (Mónica *et al.*, 2011).

Las lluvias se concentran durante el verano e inicios del otoño y con una larga temporada seca. Solo en las partes más altas de la Sierra Madre de Chiapas se distribuye lluvias en verano, especialmente en su porción sureste. La lluvia aumenta gradualmente hasta niveles generales mayores de 2 000 mm y un máximo de 3 500 mm en las partes más altas del sureste de la Sierra. En Guatemala, tanto en la continuación de la Sierra Madre como en los Cuchumatanes la precipitación alcanza 2 000 mm (Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología de Guatemala [INSIVUMEH], s.f.). Un rasgo común con la región del golfo de México es la ocurrencia de ciclones. En la Sierra Madre han ocurrido eventos de inundaciones y deslaves como los sucedidos en Motozintla de Mendoza en 1998, provocados por las lluvias extraordinarias de la depresión tropical Earl y repetidos en 2005 por el huracán Stan (Caballero *et al.*, 2006; Vázquez-Sánchez 2008). Por otro lado, en Guatemala la influencia de ondas del este, genera la mayor parte de la precipitación, donde el 95% de la precipitación es de origen tropical. Un estudio de evaluación de sequía de la cuenca Grijalva-Usumacinta de la CONAGUA (2014), a través del método SPI (índice de precipitación estandarizado por sus siglas en inglés) muestra que en la cuenca alta del río Grijalva durante los meses de octubre diciembre del año 2000 al 2006 se presentaron sequías que van de modera, severa a extrema en el último año.

4.7 Análisis de los materiales

La recopilación de información cartográfica del presente trabajo fue obtenida a través de consultas de páginas web y la colaboración de un especialista de la Universidad de San Marcos en Guatemala.

A través del Simulador de Flujos de Aguas de Cuencas Hidrográficas (SIALT) en el territorio mexicano y el Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación (MAGA) de Guatemala, se obtuvieron los archivos vectoriales que delimitan la cuenca Alto Grijalva y los principales cauces de aportación. Los archivos vectoriales de uso y cobertura de suelo se obtuvieron de MAGA, del Sistema Nacional de Información y Gestión Forestal (SNIGF) y del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). La edafología de la zona se extrajo del SoilGrids250m 2.0 archivo ráster de clasificación y textura de suelos.

El modelo digital de elevaciones se obtuvo a través del proyecto internacional Misión Topográfica de Radar Aerotransportado por sus siglas en inglés SRTM coordinado entre la Agencia Nacional de Inteligencia- Geoespacial (NGA), y la Agencia Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA).

Los datos climatológicos fueron recuperados del (INSIVUMEH, organismo público de la República de Guatemala), y la CONAGUA a través del sistema de base de datos climatológico nacional (CLICOM) los datos hidrométricos se obtuvieron del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) pertenecientes a la CONAGUA.

Tabla 4-3. Información geográfica tabular y espacial utilizada.

Tipo	Formato	Versión	Escala	Clave carta	Fuente	Nombre
Uso y cobertura del suelo	Shaperfile	2010 2001 2006	1:50 000	N/A	MAGA(2010)	Cobertura vegetal y uso de la tierra
Uso y cobertura del suelo	Shaperfile	Serie III, IV.	1:250 000	D15B11-63 D15A19,29,39 E15c89 E15d81-84	INEGI (2001, 2006)	Conjunto de datos vectoriales
Uso y cobertura del suelo	Shaperfile	Serie V. 2010	1:50 000	D15B11-63 D15A19,29,39 E15c89 E15d81-84	SNIGF(2012)	Conjunto de datos vectoriales
Edafología	Ráster (TIFF)	2006	1:250 000	N/A	WRB (2006) Soil Groups.	Physical soil properties

						and soil classification
Modelo digital de elevación.	Ráster (TIFF)	N/A	30 m	World elevation data	STRM	World elevation data 1 second arc number
Límite de la cuenca.	Shaperfile	Edición 2.0	1:50 000	RH30F	SIALT (2010)	Red hidrográfica escala 1:50 000
Datos climatológicos	Tabulares	2001-2015	N/A	N/A	CLICOM	Base de datos climatológica nacional.
Datos hidrométricos	Tabulares	2010	N/A	N/A	BANDAS	Base de datos hidrométricas.

4.6.1 Uso de suelo y vegetación

La metodología para la clasificación de suelos se realiza en 4 etapas que inicia con la interpretación preliminar, basada en la obtención de imágenes RGB, donde son identificados los polígonos de uso de suelo. Posterior se realiza la verificación de campo en 2 puntos, recopilación de informe a detalle y recopilación de datos cualitativos, como es el tipo de vegetación y actividades específicas de la tierra. Se finaliza con el análisis e integración de la información para iniciar con la edición de la información vectorial (INEGI, s.f.).

INEGI a partir de 1978 ha elaborado cartografía sobre la cubierta vegetal y el uso del suelo en México, que se ha generado en diversas escalas 1:50 000, 1:250 000 y 1: 1 000 000. Esta información, con excepción de la 1:50 000, cuenta con cobertura del territorio nacional. En la tabla 4.4 se puede consultar la disponibilidad de información de uso de suelo y vegetación para el territorio mexicano.

Tabla 4-4. Disponibilidad de información de uso de Suelo y vegetación (INEGI, 2017).

Tema/Escala	1:50 000	1:250 000	1:250 000	1:1 000 000	1:1 000 000
	Cartografía impresa	Conjunto de datos individuales	Continuo nacional	Conjunto de datos individuales	Continuo nacional
Uso de suelo y vegetación	Serie única 806 cartas	Series I (1985), II (1993), III (2002), IV (2007) 144 conjuntos de datos	Series I (1985), II (1993), III (2002), IV (2007), V (2011), VI (2014) Un conjunto nacional	Series I (1978) Y II (2003) 12 conjuntos de datos	Series I (1978) Y II (2003) un conjunto nacional

La Información Vectorial de las Cartas de Recursos Forestales 1: 50 000, obtenidas a través de clasificación supervisada sobre imágenes RapidEye (2011-2012), son generadas como

parte de los Inventarios Estatales Forestales y de Suelos (IEFyS); realizadas en colaboración con INEGI, muestra los tipos de vegetación de todas las comunidades vegetales del territorio nacional a una resolución espacial de cuatro hectáreas como unidad mínima cartografiable.

MAGA desde el 2003 ha elaborado mapas de cobertura vegetal y uso de la tierra a nivel nacional a escala 1:50 000 de la República de Guatemala para los años 2003, 2010 y 2011, con el fin de actualizar los distintos usos de suelo y vegetación, de tal forma que el mapa resultante pueda servir como una “línea de base” de proyectos futuros dentro de la materia.

Para la caracterización de la cobertura de uso de suelo y vegetación para el año de calibración (2010) y el periodo (2011-2015), se utilizó la serie V de SNIGF y versión 2010 de MAGA a escala de 1:50 000, del producto denominado “Uso y cobertura del suelo”. Para los periodos 2001 - 2005 y 2006 - 2009 utilizaron la serie III y IV del INEGI a escala de 1:250 000 y versión 2003, 2006 de MAGA a escala 1:50 000. Este producto, indica las condiciones actualizadas para cada año definido correspondiente a lo largo del territorio perteneciente de la cuenca Alto Grijalva sobre los diferentes tipos de vegetación, así como la ocupación en las actividades sobre el suelo durante el periodo comprendido del año 2001-2015. Los conjuntos de datos de uso de suelo se codificaron con apoyo de la metodología del TR-55 (Félix, 2014), proporcionando el archivo vectorial de uso de suelo para la cuenca Alto Grijalva en una sola escala y tamaño de celda en archivo tipo ráster a convertir a través de un sistema de información geográfica, para su posterior conversión al formato tipo ASCII. Los conjuntos de datos de uso de suelo sin codificar se encuentran en el Anexo A: Tablas complementarias, ubicada en el último capítulo de este documento.

4.6.2 Edafología

La caracterización edafológica se realizó mediante la capa WRB (2006) Soil Groups y propiedades físicas del suelo a escala 1:250 000, que representa la distribución geográfica de los tipos de suelo en el territorio perteneciente de la cuenca Alto Grijalva. La clasificación de suelo está definida con la base referencial mundial del recurso suelo 2007 (WRB, 2007) publicada por la ISRIC - World Soil Information, legalmente registrado como Centro Internacional de Información y Referencia de Suelos.

SoilGrids es un sistema para el mapeo digital de suelos global que utiliza métodos de aprendizaje automático de última generación para mapear la distribución espacial de las propiedades del suelo en todo el mundo. Los modelos de predicción de SoilGrids se ajustan utilizando más de 230 000 observaciones del perfil del suelo de la base de datos WoSIS y una serie de variables ambientales. Las variables se seleccionaron de un grupo de más de 400 capas ambientales de productos derivados de la observación de la tierra y otra información ambiental, incluido el clima, la cobertura terrestre y la morfología del terreno. Los resultados de SoilGrids son mapas globales de propiedades del suelo a seis intervalos de profundidad estándar (de acuerdo con el grupo de trabajo de GlobalSoilMap IUSS y sus especificaciones) a una resolución espacial de 250 metros (ISRIC, 2020).

4.6.3 Grupo hidrológico del suelo

El método del número de curva es un modelo empírico que estima la escorrentía superficial generada por un aguacero, bajo diferentes tipos de suelo y de cubierta vegetal, desarrollado a mediados del siglo XX por el USDA (SCS, 1991). Su aplicación, se basa en establecer los grupos hidrológicos de suelo desde el punto de vista de su comportamiento respecto a la escorrentía, característica que se determina en función de la textura del suelo, la profundidad y su capacidad de infiltración.

Los cuatro grupos hidrológicos de suelo son (NRCS, 2007):

Grupo A: Suelos que tiene bajo potencial de escurrimiento aun cuando estén húmedos. Tienen menos del 10% de arcilla y más del 90% de arena y/o gravas. Son suelos de texturas arenosas o de gravas, y pueden tener textura más fina si el suelo presenta una buena estructura de agregados, baja densidad aparente y/o más del 35% de fragmentos rocosos. En todos los horizontes la conductividad hidráulica a saturación es superior a $144 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, si la capa impermeable se encuentra a más de 50 cm o el nivel freático se encuentra a más de 60 cm. Suelos con más de 100 cm de profundidad deben tener una conductividad hidráulica a saturación superior a $36.1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$.

Grupo B: Se trata de suelos con moderada capacidad de infiltración cuando se encuentran saturados. Poseen de un 10 a un 20% de arcilla y de un 50 a un 90% de arena. Tiene texturas franco - arenoso o arenoso – franca, y pueden tener texturas más finas si la estructura presenta buenos agregados, baja densidad aparente y/o más del 35% de fragmentos rocosos. La

conductividad hidráulica a saturación del horizonte más impermeable, en una profundidad hasta 50 cm, esta entre 36.1 y 144 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$. La profundidad del suelo hasta una capa impermeable es superior a 50 cm o el nivel freático se encuentra a más de 60 cm. Los suelos de más de 100 cm de profundidad hasta el nivel freático o hasta la capa impermeable deben tener una conductividad hidráulica a saturación mayor de 14.5 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ en todo el perfil, pero menor de 36.1 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$.

Grupo C: Son suelos de escasa capacidad de infiltración una vez saturados. Tienen de un 20 a un 40% de arcilla y menos de 50% de arena. Poseen textura franca, franco –limosa, franco – arcillo – arenosa, franco-arcillosa y franco arcillo-limosa; o textura arcillosa, arcillo – limosa o arcillo arenosa, si la estructura presenta buenos agregados, baja densidad aparente y/o más del 35 % de fragmentos rocosos. La conductividad hidráulica a saturación del horizonte más impermeable, hasta 50 cm de profundidad, esta entre 3.6 y 36.1 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$. La profundidad a una capa impermeable es mayor de 50 cm o el nivel freático se encuentra a más de 60 cm. Aquellos suelos con más de 100 cm de profundidad hasta el nivel freático o hasta la capa impermeable deben tener una conductividad hidráulica a saturación mayor de 1.5 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ en todo el perfil, pero menor de 14.5 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$.

Grupo D: En este grupo los suelos presentan un elevado potencial de escorrentía cuando están completamente saturados de humedad. El movimiento del agua a través del suelo es limitado o muy limitado. Tienen más de un 40 % de arcilla y menos de un 50% de arena. Son suelo de textura arcillosa. Pueden presentar fenómenos de expansión – contracción. Poseen una profundidad menor de 50 cm a la capa impermeable o menos de 60 cm al nivel freático. Para suelos con una capa impermeable a una profundidad entre 50 y 100 cm la conductividad hidráulica a saturación del horizonte más impermeable es inferior a 3.6 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$. Suelos que tengan más de 100 cm de profundidad hasta el nivel freático o la capa impermeable deben tener una conductividad hidráulica a saturación inferior de 1.5 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ en todo el perfil.

Para asignar a un suelo determinado hay que considerar su composición, su textura y la profundidad del nivel freático. Con el apoyo de la tabla 4-5 de grupos hidrológicos del suelo del SCS y las propiedades edafológicas se realizó la codificación del grupo hidrológico del suelo para la cuenca Alto Grijalva.

Tabla 4-5. Grupos hidrológicos del suelo (SCS, 1964 en Bradbury et al, 2000)

Grupo hidrológico del suelo	Infiltración cuando están muy húmedos.	Características	Textura
A	Rápida	Alta capacidad de infiltración >76 mm/h	Arenosa Arenosa – limosa
B	Moderada	Capacidad de infiltración 76-38 mm/h	Franca Franco –arcillosa –arena Franco limosa
C	Lenta	Capacidad de infiltración 36-13 mm/h	Franco – arcillosa Franco –arcillo –limosa Arcillo - arenosa
D	Muy lenta	Capacidad de infiltración < 13 mm/h	Arcillosa

4.6.4 Capacidad de agua disponible del suelo

En el manual del software SWB se encuentra la tabla 4-6 de capacidad de agua disponible estimada para varios grupos de textura de suelo (Westenbroek et al., 2010), el modelo SWB utiliza información del suelo, para calcular una capacidad máxima de agua del suelo que se calcula como;

$$\text{Capacidad máxima de agua del suelo} = \text{capacidad de agua del suelo disponible} \times \text{profundidad de la zona de la raíz}$$

Por medio de un sistema de información geográfica y las propiedades edafológicas de la cuenca Alto Grijalva se realizó la asignación de los valores correspondiente a las texturas del suelo presentes en la zona, generando como resultado el formato tipo ráster codificado para su posterior conversión al formato tipo ASCII.

Tabla 4.6.-Capacidades de agua disponibles estimadas para varios grupos de textura de suelo. (Westenbroek et al., 2010)

Textura de la tierra	Capacidad de agua disponible (Pulgada por pie)
Arena	1.20
Arena arcillosa	1.40
Franco arenoso	1.60
Franco arenoso fino	1.80
Franco arenoso muy fino	2.00
Marga	2.20

Textura de la tierra	Capacidad de agua disponible (Pulgada por pie)
Franco limoso	2.40
Limo	2.55
Franco arcilloso arenoso	2.70
Franco arcilloso limoso	2.85
Marga arcillosa	3.00
Arcilla arenosa	3.20
Arcilla limoso	3.40
Arcilla	3.60

4.6.5 Modelo digital de elevaciones

Los datos SRTM se organizan en celdas rasterizadas individuales, o mosaicos, cada uno cubriendo un grado por un grado en latitud y longitud. El espaciado de muestra para puntos de datos individuales es 1 segundo de arco, 3 segundos de arco o 30 segundos de arco, lo que se conoce como SRTM1, SRTM3 y SRTM30 respectivamente. Dado que un segundo de arco en el ecuador corresponde aproximadamente a 30 metros en horizontal. En cierta medida, el SRTM1 y SRTM3 a veces se denominan datos de "30 metros" o "90 metros" (SRTM, 2000).

Para fines de este trabajo se obtuvo el ráster SRTM3 a 30 metros para la cuenca Alta Grijalva, del mosaico de capas N14W091.hgt, N14W092.hgt, N14W093, N15W091.hgt, N15W092.hgt, N15W093, N16W091.hgt, N16W092.hgt y N16W093 del directorio de Sur-América.

4.6.6 Dirección del flujo

Con el apoyo de un sistema de información geográfica, y el modelo digital de elevación se realizó la codificación de las direcciones del flujo del terreno donde existen ocho direcciones de salida válidas que se relacionan con las ocho celdas adyacentes hacia donde puede ir el flujo. Este enfoque comúnmente se denomina el modelo de flujo de ocho direcciones (D8) y sigue un acercamiento presentado en Jenson y Domingue (1988).

4.6.7 Datos hidrometeorológicos

Los datos climáticos que requiere el presente estudio, fueron recuperados de INSIVUMEH y CLICOM, los cuales fueron evaluados con metodologías de calidad, homogeneidad y relleno de datos faltantes lo cual pretende brindar; confiabilidad y certidumbre en los datos resultantes. Los datos hidrométricos fueron recuperados del BANDAS, las estaciones a

trabajar fueron seleccionadas según el porcentaje de datos disponibles con respecto al año de calibración 2010.

4.6.8 Datos climáticos

La precipitación y las temperaturas máximas y mínimas fueron homogeneizadas mediante el paquete de R CLIMATOL el cual contiene funciones para el control de calidad, homogeneización y relleno de datos faltantes en un conjunto de series de cualquier variable climática. La metodología se basa en el relleno de datos ausentes; desde sus inicios está enfocado a rellenar mediante estimaciones calculadas a partir de las series más próximas y se adapta el método de Paulhus y kohier (1952) para rellenar precipitaciones diarias mediante promedios de valores cercanos (Guijarro, 2018).

CLIMATOL calcula parámetros con datos disponibles en cada serie, para posterior rellenar los datos ausentes usando las medias y desviaciones estándar provisionales, repite el proceso ya con las series rellenadas, se vuelve a calcular los datos anterior mente ausentes usando los nuevos parámetros lo que dará lugar a nuevas medias y nuevas desviaciones estándar repitiendo el proceso hasta que ninguna media cambia y al redondearla con la precisión inicial de los datos.

Una vez estabilizadas las medias, todos los datos se estandarizan y se procede a estimarlos mediante la ecuación 6 modelo de regresión lineal, denominado eje mayor reducido o regresión ortogonal en los que la recta se ajusta minimizando las distancias de los puntos medidas en dirección perpendicular a la misma. Las series de anomalías permiten: controlar las series y eliminar las anomalías que superen un umbral predefinido, comprobar su homogeneidad a través de la aplicación Standard Normal Homogeneity Test (SNHT) (Alexanderson, 1986).

$$\hat{y} = \frac{\sum_{j=1}^{j=n} w_j x_j}{\sum_{j=1}^{j=n} w_j} \quad (6)$$

en la que \hat{y} es un dato estimado mediante los correspondientes n datos x_j más próximos disponibles en paso temporal, y w_j es el peso asignado a cada uno de ellos.

Con las series homogeneizadas se procede a crear los archivos NetCDF mediante un código lenguaje de programación, para fines de esta investigación se ejecutó con el lenguaje de Python en el que la metodología del código consistía en la interpolación de los datos diarios para cada variable climatológica mediante el método *spline* el cual estima valores usando una función matemática que minimiza la curvatura general de la superficie, lo que resulta en una superficie suave que pasa exactamente por los puntos de entrada, proporciona archivos ráster diarios; compactado los a un formato NetCDF de salida con las dimensiones correspondiente al rectángulo de cobertura para el modelo.

Capítulo 5 . Diseño y calibración del balance de agua de suelo

5.1 Parámetros del modelo

El análisis de las coberturas de información vectorial y ráster se realizó mediante los softwares ArcGIS 10.5, QGIS 3.20.1, Global Mapper v18.0 y un lenguaje de programación de alto nivel Python. El proceso de la información se detalla a continuación:

- ❖ **Recopilación de información:** Se realizó la búsqueda de información existente y disponible para la zona de estudio, tomando en cuenta la proporción de las escalas y fechas de elaboración concordante a los periodos de simulación para ambos territorios.
- ❖ **Homologación del sistema de referencia espacial:** En la integración de la base de datos geoespacial, se utilizó información de diferente fuente, fecha de publicación y marco de referencia. Por ello, fue necesario hacer la homologación, ajustando sistemas de coordenadas y de referencia a datum World Geodetic System 1984 con sistema de coordenadas Universal Transversal de Mercator asignando Zona 15 norte. (WGS_1984_UTM_Zona 15N).
- ❖ **Homologación de los límites geográficos:** Se ejecutaron procesos geoespaciales para delimitar las capas temáticas y cartas topográficas acorde con los límites espaciales que ocupa el polígono de la cuenca alto Grijalva.
Dimensiones del formato tipo ráster de entrada:
Tamaño de celda (x, y): 50,50
Columnas y filas: 4390,3830
- ❖ **Análisis de la información:** Se realizaron procedimientos de análisis espacial de las entidades temáticas, operaciones algebraicas y algoritmos matemáticos para la obtención de las características geométricas y morfométrica de la cuenca y sub-cuencas que le pertenecen.

5.1.1 Cobertura del suelo

El parámetro de uso de suelo, se analizó en 3 escenarios uno para cada periodo comprendido (2001-2005), (2006-2009) y (2010-2015) para evaluación del impacto de la variabilidad

espacial y temporal en la recarga potencial. Los porcentajes mostrados en la tabla 5-1 están sujetos a las escalas de las cartas de uso de suelo disponibles en ambos territorios nacionales y deben ser manejados con sensibilidad.

Periodo (2001-2005)

En el primer periodo de análisis no se encontró presencia de humedales dentro de la superficie de la cuenca (figura 5.1). El 40.33 % del área se encontraba predominada por la agricultura, cabe mencionar que dentro de la cuenca Alto Grijalva se encuentra la región socioeconómica VI la Frailesca que es considerada el “granero” de Chiapas por ser la región agrícola más importante de la entidad en la producción de granos básicos, principalmente de maíz. Las características ecológicas y geográficas como el clima, el tipo de relieve, los niveles de pluviosidad y las redes fluviales, han sido aprovechadas al máximo para el desarrollo de la agricultura y la ganadería a nivel regional y estatal (Martínez, 2011). Solo el 37.28 % pertenecen a las zonas boscosas que son conformadas por coníferas, bosques de galería, mixto caducifolio conífero, y latifoliadas. La zona urbana hace una pequeña presencia del 0.49% y 17.80 % con ocupación en pastizales y matorrales.

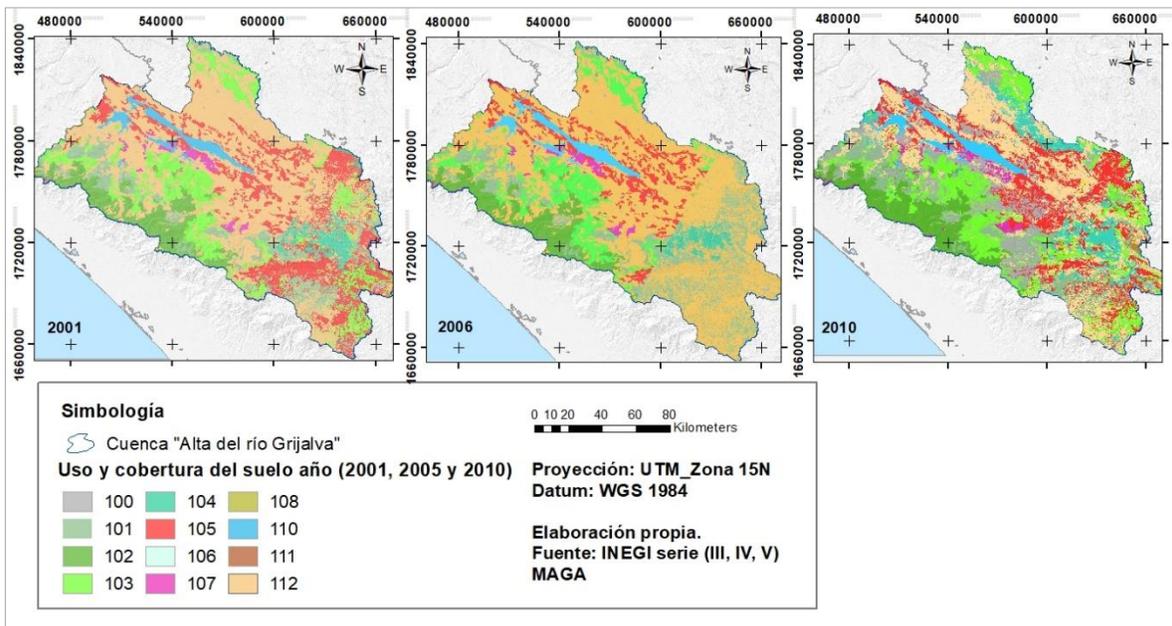


Figura 5.1.- Uso y cobertura del suelo cuenca Alto Grijalva (2001, 2006 y 2010). Fuente: Elaboración propia

Periodo (2006-2009)

Durante este periodo se observa un aumento 12% de las superficies dedicadas a la agricultura (figura 5.1), este aumento esta atribuido a los programas de reconversión agrícola y su pertinencia en el marco de la soberanía alimentaria (Flores, 2019). El decremento de las zonas boscosas en este periodo fue 1.37% considerada a la clasificación; mixto caducifolio conífero y latifoliadas. Los pastizales y matorrales aumentaron al doble su ocupación con el 17.80%, mientras que las zonas urbanas se mantuvieron en el porcentaje del periodo anterior.

Periodo (2010-2015)

El análisis del uso de suelo para este periodo, comprendió a su vez al correspondiente al año de calibración (2010). Se encontró que en la cuenca Alto Grijalva predominan las zonas boscosas (figura 5.1) con el 41.24% de ocupación, el mayor aumento presentado fue en la clasificación mixto caducifolio conífero y latifoliadas en territorio mexicano, durante este periodo se presentaron un grupo de programas en favor a la reforestación por parte de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), dentro de las entidades que lograron mayores índices de hectáreas reforestadas se encuentra Chiapas en el periodo 2013-2015 (CONAFOR, 2016). En la república de Guatemala el aumento es considerado en bosques de galería y latifoliadas, principalmente por la generación del cultivo de café, ya que la característica física de este cultivo permite la clasificación en el grupo de latifoliadas. La agricultura tubo un nuevo descenso del 26.12 % debido al cambio de cultivo de granos básicos a frutales como lo son; el aguacate y el café, según el anuario estadístico de la producción agrícola sector rural Chiapas 2015, como se menciona anteriormente este cultivo es considerado por sus características físicas dentro del grupo de latifoliadas. Por otra parte, durante este periodo se observa que las zonas urbanas presentan un incremento del 11.79%, siendo el crecimiento demográfico del periodo 2000-2015 de un 41.9%, en el territorio mexicano, según los registros del Censo de Población y Vivienda 2000, 2010 y Encuesta Intercensal 2015. Mientras que el territorio de pastizales y matorrales bajaron a un 3% en comparación al periodo anterior.

Tabla 5-1. Distribución territorial de la clasificación de usos de suelo para la cuenca Alto Grijalva (México- Guatemala). Fuente (INEGI, MAGA)

Código:	Uso de suelo:	de Área en Km ² (2001):	% Área	Área en Km ² (2006):	% Área	Área en Km ² (2010):	% Área
100	Zonas Urbanas	90.287	0.49	90.997	0.49	2,265.747	12.28
101	Coníferas	2,149.217	12.19	2,945.630	15.97	1,598.520	8.67
102	Bosques de galería	1,301.815	7.60	1,395.370	7.57	1,656.080	8.98
103	Mixto caducifolio conífero	2,659.205	14.42	1,893.662	10.27	3,063.480	16.61
104	Latifoliadas	566.607	3.07	387.425	2.10	1,286.917	6.98
105	Pastizales	3,265.587	17.70	1,229.130	6.66	2,746.252	14.89
106	Humedales	4.230	0.02		0.00		0.00
107	Selvas altas y medianas	251.102	1.36	236.667	1.28	256.580	1.39
108	Matorrales	18.262	0.10	12.487	0.07	15.582	0.08
110	Cuerpos de agua	499.092	2.71	538.507	2.92	576.552	3.13
111	Desprovisto de vegetación	212.50	0.00	2,857.00	0.02	86.330	0.47
112	Agricultura	7,438.900	40.33	9,711,785	52.65	4,892.477	26.53
	Superficie total	18,444.520		18,444,520		18,444.520	

5.1.2 Dinámica de cambio

En el análisis de la dinámica de cambio se realizó una reclasificación de uso y coberturas del suelo de la cuenca Alto Grijalva, de cada territorio nacional que conforma la cuenca. La clasificación quedo de la siguiente manera, forestal lo conforman las áreas pertenecientes a las coníferas, bosques de galería, mixtos caducifolios coníferos, latifoliadas y selvas altas y medias. A los pastizales se le unió las áreas de matorrales y se generó una nueva clasificación denominada “otros” compuestos por las áreas desprovisto de vegetación y humedales, quedando sin modificación la clasificación de los usos urbano, agrícola y cuerpo de agua. La capa de uso de suelos para el periodo (2010 -2015) en el territorio de Guatemala permite la

anexión de los cultivos de aguacate, café y cítricos a la superficie de agricultura, los cuales fueron evaluados en el grupo de las latifoliadas por sus características físicas bióticas.

Para el periodo (2001-2005) al periodo (2006-2009) en el territorio mexicano (tabla 5-2), se observa un aumento de 131.62 km² en territorio agrícola, por lo contrario, en los pastizales se observa una disminución de -108.06 km², al igual la superficie forestal presenta una disminución de -186.97 km².

Tabla 5-2. Razón de cambio de los periodos comprendidos del (2001 - 2005) y (2004 - 2009) México.

Clasificación :	Área en km² (2001-2005):	Área en km² (2006-2009):	Razón de cambio en km²:
Urbano:	55.02	56.02	1.00
Agricultura:	6,006.34	6,137.96	131.62
Forestal:	5,160.29	4,973.33	-186.97
Pastizales:	1,348.77	1,240.72	-108.06
Cuerpos de agua:	480.14	518.65	38.51
Otros:	0.11	2.86	2.74

En el periodo (2006 - 2009) al periodo (2010 – 2015) en el territorio mexicano (tabla 5-3) se presentó un aumento en la superficie forestal de 711.18 km². Dicha superficie se cree apporto el aumento de 821.11 km² en los pastizales como se observa en la figura 5.2 y 5.3. El cambio de granos básicos a frutales y la desagrarización dentro de este periodo generó una disminución del -1570.01 km² de territorio agrícola, los bosques presentaron un aumento de 711.18 km² mientras las superficies urbanas aumentaron 132.53 km². Este análisis debe tratarse con reserva debido a la diferencia de escalas entre cada periodo (tabla 4-3).

Tabla 5-3. Razón de cambio de los periodos comprendidos del (2006 - 2009) y (2010 - 2015) México.

Clasificación :	Área en km² (2006-2009):	Área en km² (2010-2015):	Razón de cambio en km²:
Urbano:	56.02	188.55	132.53
Agricultura:	6,137.96	4,567.95	-1570.01
Forestal:	4,973.33	5,684.50	711.18
Pastizales:	1,240.72	2,061.83	821.11
Cuerpos de agua:	518.65	472.49	-46.17
Otros:	2.86	0.21	-2.65

En el análisis del periodo (2001 – 2005) al periodo (2010 – 2015) en México (tabla 5-4) la principal disminución del uso de suelo fue el agrícola con -1,438.39 km² que representa el 11.02% del área total de la cuenca. El mayor aumento fue en los pastizales con 713.06 km² equivalentes al 5.46% del área total de la cuenca. También se presentó una disminución de -524.21 km² en la superficie forestal y un aumento de 133.53 km² el territorio urbano para el periodo 2010 -2015 existía 3.4 veces más territorio urbano que el periodo (2001 -2005). Este análisis debe tratarse con reserva debido a la diferencia de escalas entre cada periodo (tabla 4-3).

Tabla 5-4. Razón de cambio de los periodos comprendidos del (2001 - 2005) y (2010 - 2015) México.

Clasificación :	Área en km² (2001-2005):	Área en km² (2010-2015):	Razón de cambio en km²:
Urbano:	55.02	188.55	133.53
Agricultura:	6,006.34	4,567.95	-1,438.39
Forestal:	5,160.29	5,684.50	524.21
Pastizales:	1,348.77	2,061.83	713.06
Cuerpos de agua:	480.14	556.49	76.49
Otros:	0.11	0.21	0.10

Para el territorio de Guatemala en los periodos comprendidos del (2001 – 2005) y (2006 – 2009) (tabla 5-5) muestran el mayor aumento en áreas de agricultura de 2150.24 km² y una disminución significativa de -1935.38 km² en los pastizales, el territorio urbano se mantuvo estable, mientras que el uso forestal disminuyó -90.97 km². Es importante mencionar la incertidumbre de los datos recuperados para el periodo (2006 – 2009) en este territorio y por ende a la dinámica de cambio que se genera entre ellos.

Tabla 5-5. Razón de cambio de los periodos comprendidos del (2001 - 2005) y (2006 - 2009) Guatemala.

Clasificación :	Área en km² (2001-2005):	Área en km² (2006-2009):	Razón de cambio en km²:
Urbano:	35.11	35.14	0.03
Agricultura:	1,432.43	3,582.67	2,150.24
Forestal:	1,966.53	1,875.56	-90.97
Pastizales:	1,936.36	0.98	-1,935.38
Cuerpos de agua:	19.02	20.00	0.98
Otros:	4.34	0.00	-4.34

Una vez mencionado la incertidumbre en el análisis del periodo (2006 – 2009) se observa en la dinámica de cambio con el periodo (2010 -2015), la disminución de las áreas agrícolas de -638.94 km², al igual que las áreas forestales con -172.44 km², por otro lado, el aumento de la superficie en los pastizales de 659.02 km² al igual que el territorio urbano con un aumento de 14.85 km² tabla 5-6

Tabla 5-6. Razón de cambio de los periodos comprendidos del (2006 - 2009) y (2010 - 2015) Guatemala.

Clasificación :	Área en km² (2006 - 2009):	Área en km² (2010 - 2015):	Razón de cambio en km²:
Urbano:	35.14	50.00	14.85
Agricultura:	3,582.67	2,944.73	-637.94
Forestal:	1,875.56	1,703.12	-172.44
Pastizales:	0.98	660.00	659.02
Cuerpos de agua:	20.00	20.07	0.07
Otros:	0.00	6.12	6.12

En el análisis del periodo (2001 – 2005) al periodo (2010 – 2015) (tabla 5-7) se observa el principal aumento en las áreas de agricultura de 1,512.30 km² y una disminución significativa en los pastizales de -1,276.36 km² seguidas de las áreas forestales donde la disminución es de -263.41 km², mientras que las áreas urbanas incrementaron 14.88 km². Las certidumbres de los datos de estos periodos permiten un análisis de la razón de cambio más confiable para este territorio, pero deben ser tratados con reserva por los procesos que le anteceden.

Tabla 5-7. Razón de cambio de los periodos comprendidos del (2001 - 2005) y (2010 - 2015) Guatemala.

Clasificación :	Área en km² (2001-2005):	Área en km² (2010- 2015):	Razón de cambio en km²:
Urbano:	35.11	50.00	14.88
Agricultura:	1,432.43	2,944.73	1,512.30
Forestal:	1,966.53	1,703.12	-263.41
Pastizales:	1,936.36	660.00	-1,276.36
Cuerpos de agua:	19.02	104.07	85.05
Otros:	4.34	6.12	1.78

5.1.2 Grupo hidrológico del suelo

Los grupos hidrológicos del suelo predominantes en la cuenca Alto Grijalva son el grupo B y C (figura 5.2) debido a las texturas que predominan en la zona compuesta por franco,

arcillosa, arenosa y limosa, suelos que tiene similar comportamiento frente a la generación de escorrentía, estas 2 texturas aportan una capacidad de infiltración moderada como se observa en la *tabla 4.5.- Grupos hidrológicos del suelo*, con valores en el grupo B de 76-38 mm/h y en el grupo C de 36-13 mm/h. Los grupos D y A no tiene mayor presencia (tabla 5-8).

Tabla 5-8. Distribución territorial del grupo hidrológico del suelo para la cuenca Alto Grijalva.

Grupo hidrológico	Área Km2	Área %
1: A	0.265	0.001
2: B	16,714.127	90.61
3: C	1,728.442	9.37
4: D	1.685	0.009
Superficie total:	18,444.519	100

5.1.3 Capacidad de agua disponible del suelo

En la tabla 5-9 Se muestran los 9 tipos de texturas de suelo existentes en la cuenca Alto Grijalva en donde se observa (figura 5.3) que predomina el franco arenoso fino con el 57.88% de extensión territorial, este suelo, tiene una capacidad de agua disponible de 1.80 (in/ft). Seguido de la arcilla limosa con capacidad de 3.40 (in/ft) y con el 30.69% de ocupación territorial. La tercera textura predominante es la arcilla con 3.60 (in/ft) en su capacidad de agua disponible y 7.20 % de su extensión territorial. A esta última textura le siguen las arenas, franco arenoso, franco arenoso muy fino, marga, franco arcilloso arenoso y franco arcilloso con superficies menores a los 620 km² contando desde el 3.35 % hasta el 0.001% de la superficie total de la cuenca.

Tabla 5-9. Distribución territorial de las capacidades de agua disponibles estimadas para la cuenca Alto Grijalva. (Westenbroek et al., 2010).

Textura del suelo:	Capacidad de agua disponible (Pulgadas por pie):	Área en km²	Área en %
Arena	1.20	618.512	3.35
franco arenoso	1.60	150.63	0.81
Franco arenoso fino	1.80	10,675.807	57.88
Franco arenoso muy fino	2.00	3.285	0.017

Textura del suelo:	Capacidad de agua disponible (Pulgadas por pie):	Área en km ²	en %
Marga	2.20	0.265	0.001
Franco arcillo arenoso	2.70	5.395	0.02
Franco arcilloso	3	0.655	0.003
Arcilla limosa	3.40	5,661.667	30.69
Arcilla	3.60	1,328.302	7.20
Superficie total:		18,444.52	100

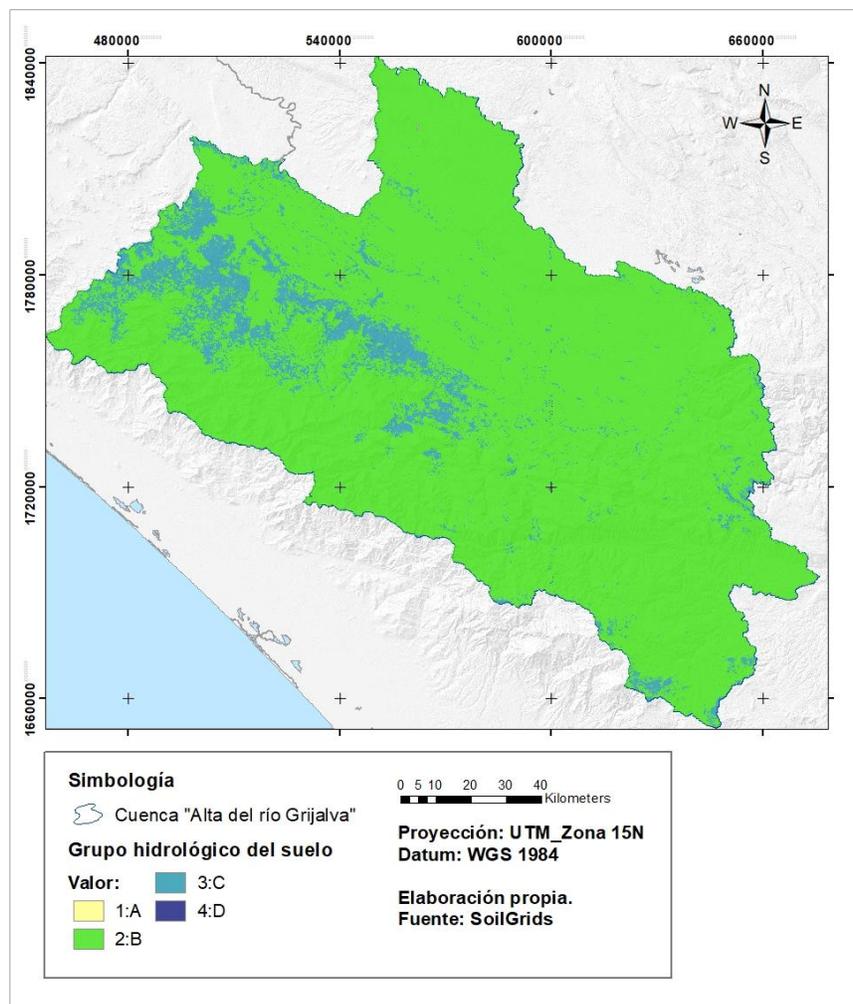


Figura 5.2.- Grupo Hidrológico del suelo cuenca Alto Grijalva

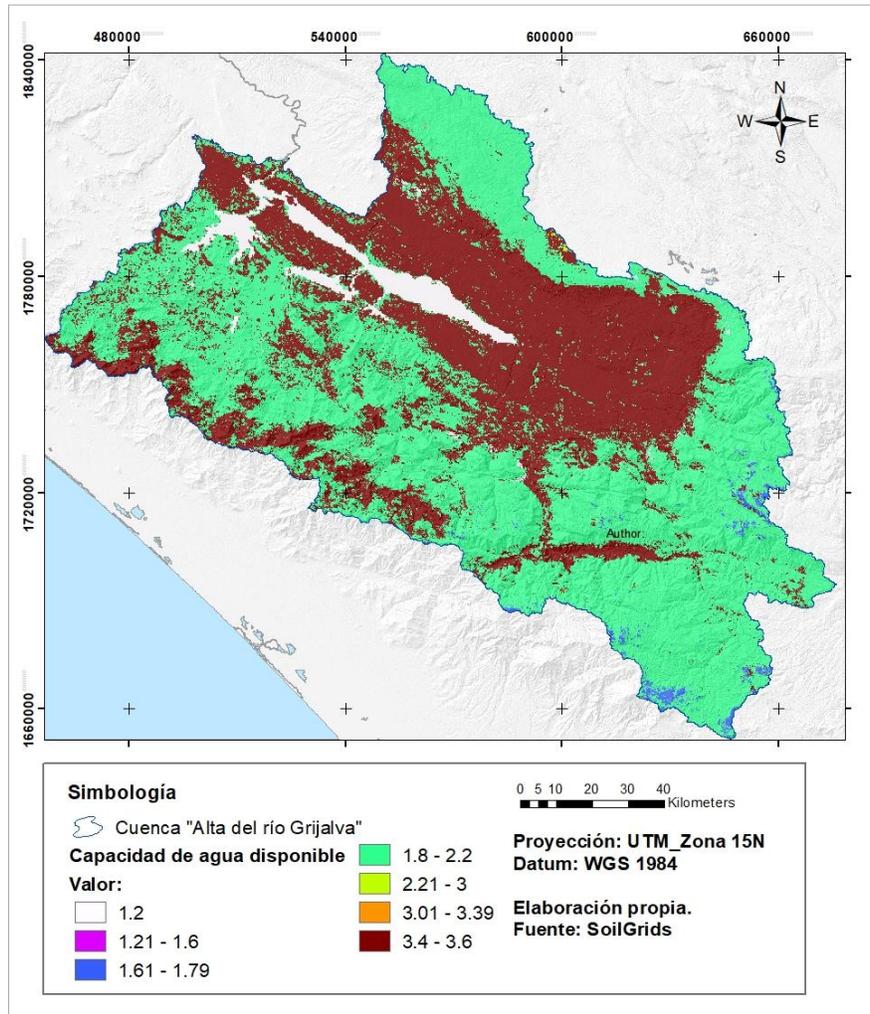


Figura 5.3.- Capacidad de agua disponible del suelo (pulgadas por pie) cuenca Alto Grijalva

5.1.4 Dirección del flujo

Dentro de la cuenca Alto Grijalva se encuentran los 8 códigos de dirección de flujo (figura 5.4) donde se puede observar la topografía la cual otorga la dirección de flujo con respecto al descenso más pronunciado o caída máxima que condicionan el escurrimiento dentro de la cuenca desde cada celda.

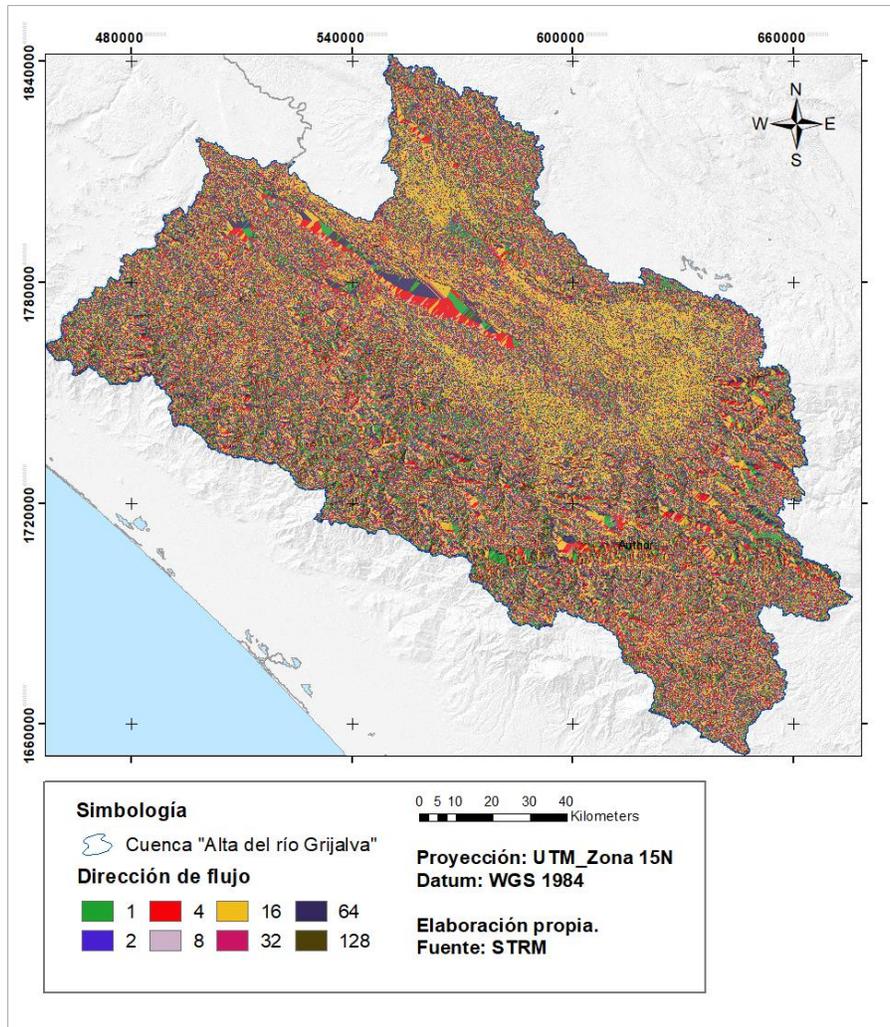


Figura 5.4.- Dirección de flujo cuenca Alto Grijalva

5.1.5 Datos Climatológicos

En el territorio mexicano para el área de la cuenca Alto Grijalva se cuentan con 27 estaciones climatológicas suspendidas y 29 operando y para el territorio guatemalteco se cuentan con 2 dentro de la zona de estudio, las cuales fueron analizadas por los métodos antes descritos quedando un total de 18 estaciones pertenecientes a la cuenca Alto Grijalva y 27 estaciones cercanas que cubren el área del rectángulo de cobertura para el modelo SWB.

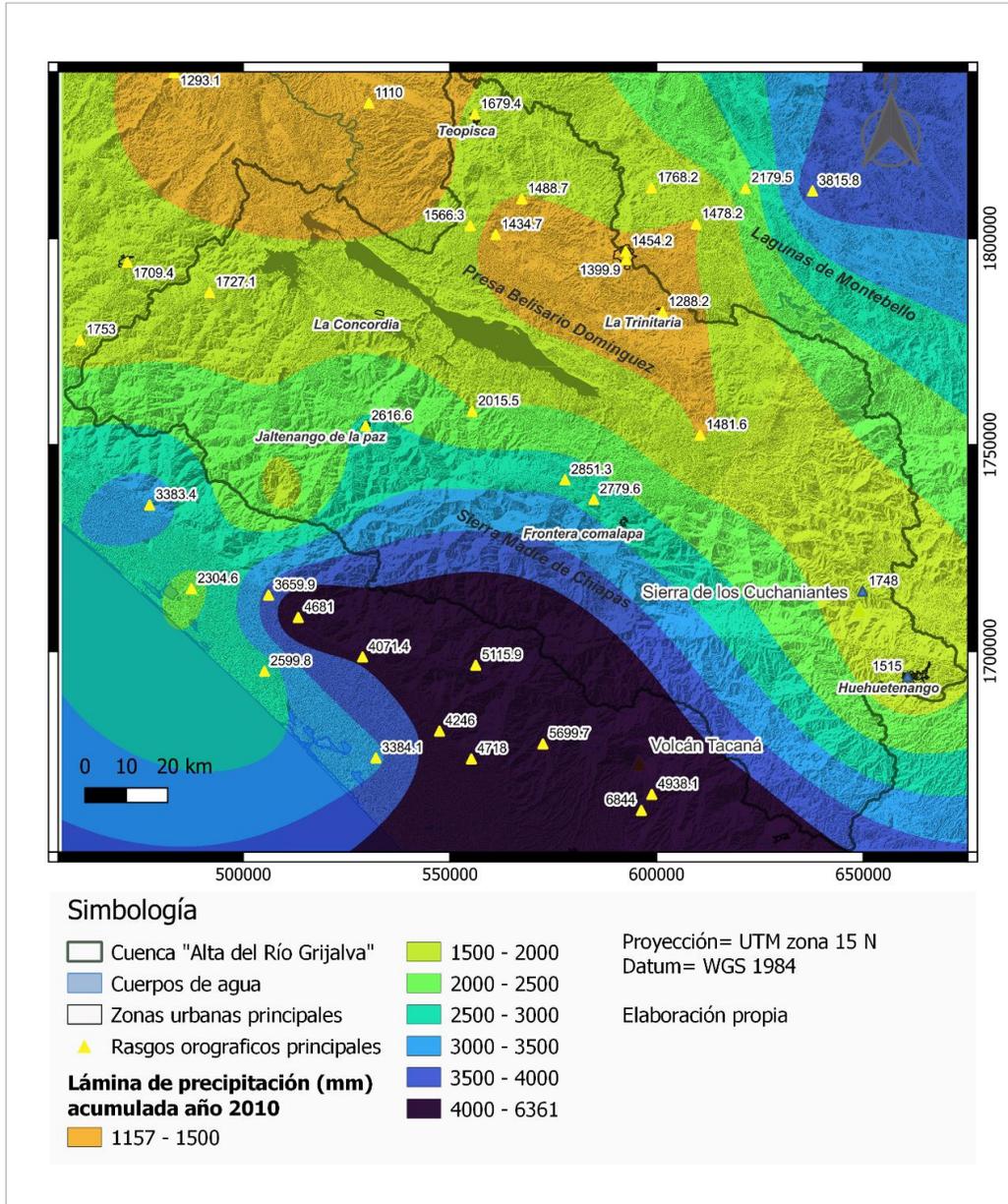


Figura 5.5.- Precipitación acumulada del año 2010 en la cuenca Alto Grijalva.

Análisis año 2010. Para fines de calibración del modelo se seleccionó el año 2010 debido a la disponibilidad de los datos hidrométricos, una vez calibrado se realizó el análisis de cada periodo a simular. SWB trabaja con un paso de tiempo diario, los cuales son interpolados y quedan guardados en un archivo de formato NetCDF. En la figura 5.5 se muestra la variabilidad de los valores de precipitación acumulada del año 2010 de la cuenca Alto Grijalva el cual se obtiene de la sumatoria de las interpolaciones diarias (365 días) y como se puede observar los valores coinciden satisfactoriamente con los acumulados calculados

manualmente de las estaciones climatológicas. Se obtuvieron como valor mínimo 1157 mm y un máximo 6361 mm. Los valores mínimos en la cuenca son principalmente al norte entre Teopisca y la Trinitaria, mientras que los valores máximos son presentados al sur de la cuenca donde se localiza la sierra Madre de Chiapas y volcán Tacaná.

Estimación de la precipitación diaria del periodo (2001 – 2005). Las interpolaciones de los datos diarios del periodo 2001 – 2005 (1826 días continuos) se almacenan en un archivo NetCDF como formato de entrada en el modelo SWB. Con apoyo de los acumulados anuales obtenido de la sumatoria de las interpolaciones diarias, se realizó el mapeo de la precipitación media del periodo 2001 - 2005 (figura 5.6), donde se puede observar que en este periodo las láminas de precipitación fueron inferiores a las del 2010, con una mínima de 795 mm ubicada en la Trinitaria y una máxima de 3110 mm en la zona alta de la Sierra Madre de Chiapas, y representa el 67% de lámina de precipitación máxima del año 2010 dentro de la cuenca Alto Grijalva.

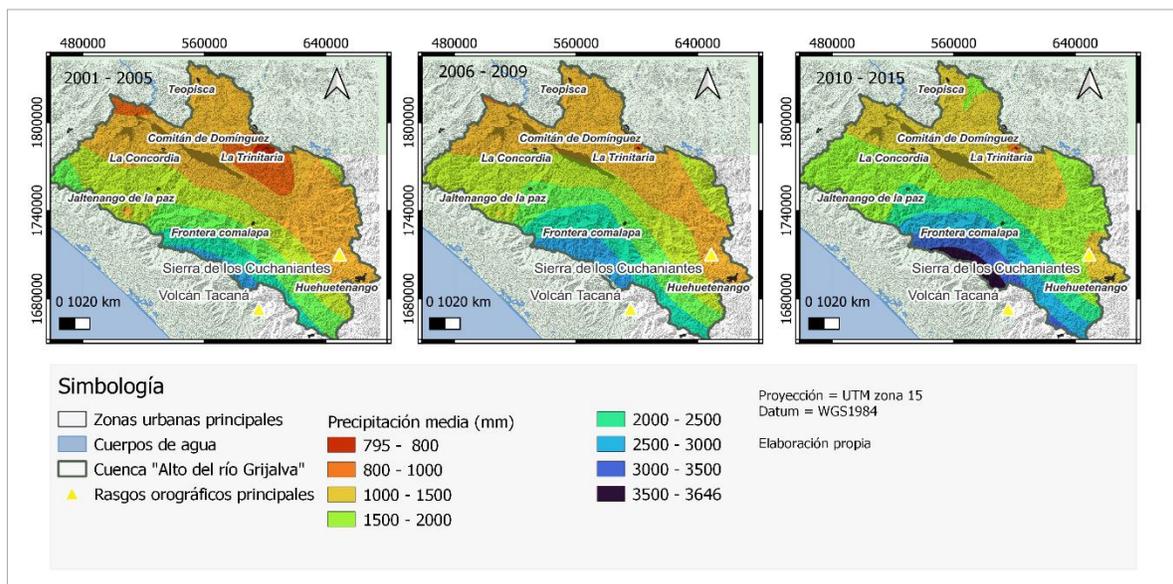


Figura 5.6.- Precipitación media acumulada periodos 2001 – 2005, 2006 – 2009 y 2010 – 2015 cuenca Alto Grijalva

Estimación de la precipitación diaria del periodo (2006 – 2009). Las interpolaciones de los datos diarios del periodo 2006 – 2009 (1461 días continuos) se almacenan en un archivo NetCDF como formato de entrada en el modelo SWB. Con apoyo de los acumulados anuales obtenido de la sumatoria de las interpolaciones diarias, se realizó el mapeo de la precipitación media del periodo 2006 - 2009 (figura 5.6), donde podemos observar que los

comportamientos de las láminas de precipitación fueron similares al periodo anterior, pero con diferente variabilidad espacial ya que presentan una mínima de 999 mm ubicada en la Trinitaria y una máxima de 3335 mm incrementando 200 mm con respecto a las láminas del periodo anterior y presentándose en las zonas altas de la Sierra Madre de Chiapas.

Estimación de la precipitación diaria del periodo (2010 – 2015). Las interpolaciones de los datos diarios del periodo 2010 – 2015 (2191 días continuos) se almacenan en un archivo NetCDF como formato de entrada en el modelo. Con apoyo de los acumulados anuales obtenido de la sumatoria de las interpolaciones diarias, se realizó el mapeo de la precipitación media del periodo 2010 - 2015 (figura 5.6), donde se observa que la precipitación máxima de la cuenca Alto Grijalva para este periodo tuvo un nuevo incremento en comparación al periodo anterior 2006 -2009 de 311 mm y de 511 mm con respecto el periodo 2001 -2005, la precipitación media mínima es de 997 mm y la máxima de 3646 mm, esta última equivale el 73% con respecto a la lámina de precipitación del año 2010. En la figura 5.6 se observa la variabilidad espacial de las láminas de precipitación para este periodo donde las láminas predominantes fueron de los 1000 mm a los 2000 mm.

Datos climatológico periodos 2001-2005. Para el análisis de la tendencia climatológica de la cuenca Alto Grijalva del periodo 2001 – 2015 se utilizaron los datos climatológicos temperatura máxima, mínima y precipitación que se encuentran en las interpolaciones diarias continuas de cada periodo (2001 – 2005, 2006 – 2009, 2010 – 2015) almacenados en los archivos NetCDF como formato de entrada en el modelo SWB, mismo proceso que se realizó para los datos climáticos del año de calibración 2010. Del análisis se elaboraron las gráficas de precipitación acumulada mensual y temperatura media mensual máxima y mínima.

Durante el periodo 2001-2015 las temperaturas medias mensual máximas fueron superiores a los 40°C en la cuenca y se presentaron en dos momentos entre octubre 2002 - julio 2004 y enero – agosto 2015, la media mensual máxima mínima se mantuvo entre los 15°C y 20°C (figura 5.7), mientras que la media mensual máxima máxima se ubica entre los 42°C y 35°C. Como se puede observar en la gráfica la temperatura media mensual máxima en la cuenca Alto Grijalva oscila entre los 20°C y 35°C, con una media mensual de 29°C durante este periodo. Es importante mencionar que la diferencia de temperaturas en una misma fecha del año es debida a la variabilidad de la temperatura en el espacio, las estaciones meteorológicas

ubicadas en la depresión central de Chiapas es decir al norte de la cuenca presentan las temperaturas máximas más altas de este periodo, mientras que las máximas bajas se ubican en la Sierra Madre de Chiapas.

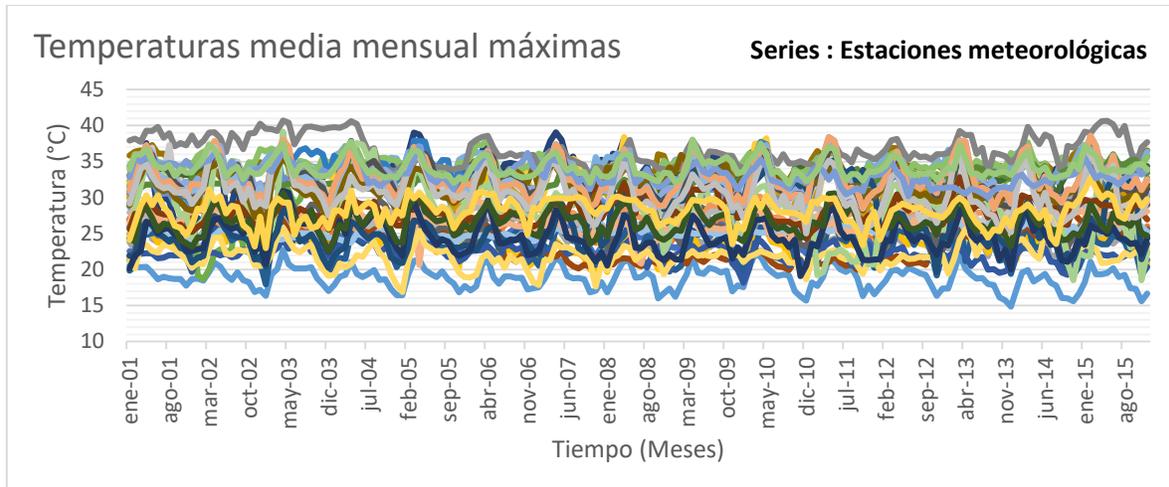


Figura 5.7.- Tendencia de las temperaturas medias mensuales máximas en la cuenca Alto Grijalva

La temperatura media mensual mínima de la cuenca Alto Grijalva se encuentra entre rangos de los 25°C y 0°C (figura 5.8) donde se observan que las medias mensuales mínimas mínimas se presentan entre los meses de noviembre – febrero durante los 15 años, mientras que las máximas mínimas se presentan los meses de abril – septiembre, registrando una media mínima mensual de 16°C en el periodo 2001 -2015 en la cuenca Alto Grijalva. Como ya se mencionó la variabilidad de registros de temperatura mínima en las mismas fechas se debe a la variabilidad espacial climatológica en la superficie de la cuenca.

En el análisis de la precipitación acumulada mensual de la cuenca Alto Grijalva (figura 5.9), se identificó que los años más secos son el 2001, 2003, 2009 con precipitaciones acumuladas mensuales máximas de 800 mm en los meses más lluviosos junio - septiembre, mientras los años más lluviosos con precipitaciones superiores a los 1200 mm son; 2005 con el paso del huracán Stan y Wilma, 2010 con la tormenta tropical Agatha y Matthew, 2011 con la depresión tropical “Doce – E” y el 2012 con el huracán Carlotta (Atlas Climatológico de ciclones tropicales en México).

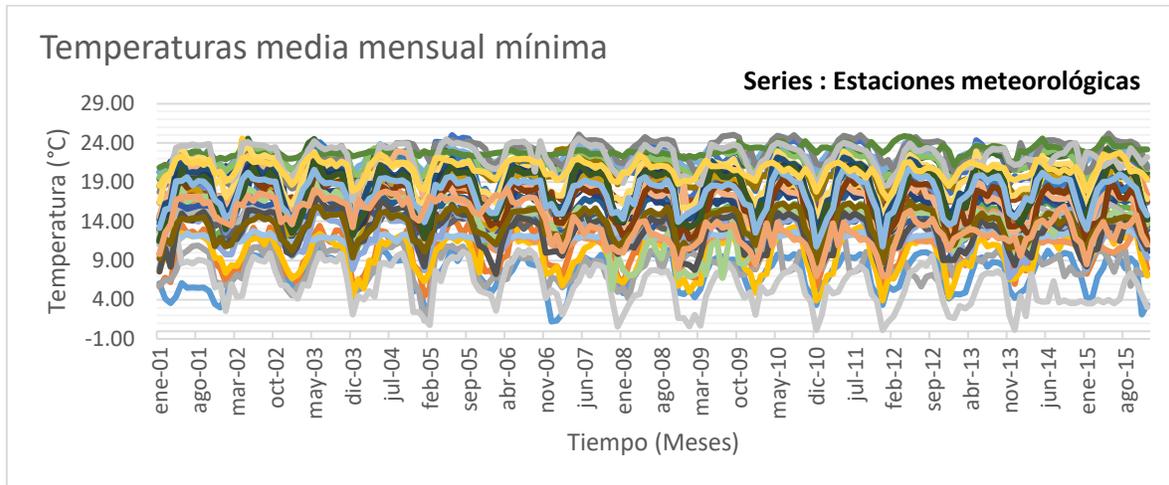


Figura 5.8.- Tendencia de las temperaturas medias mensuales mínimas en la cuenca Alto Grijalva

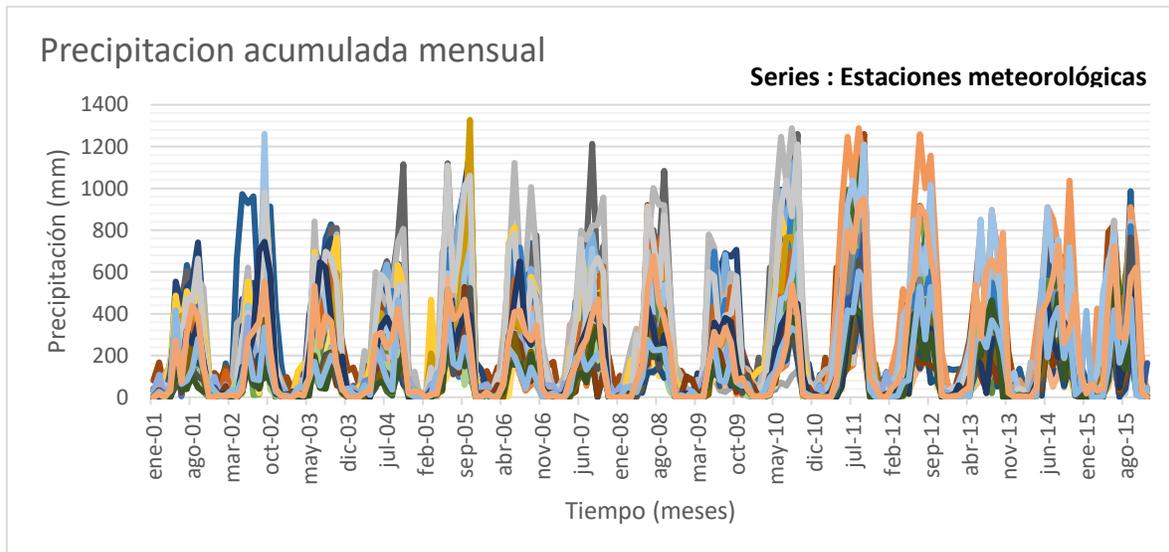


Figura 5.9.- Tendencia de la precipitación acumulada mensual en la cuenca Alto Grijalva

5.2 Calibración

Realizado el análisis de la disponibilidad de los datos hidrométricos de la cuenca Alta Grijalva se seleccionó el año 2010 ya que contiene la mayor información disponible dentro del periodo (2001 – 2015). Una vez diseñado el modelo de simulación SWB para la cuenca Alta Grijalva se procedió a realizar la calibración de este modelo, el cual consistió en la comparación de los volúmenes del flujo directo de las cuencas de aportación donde se localizan las estaciones hidrométricas contra los volúmenes de las láminas de escurrimiento superficial obtenidas del modelo SWB. Para la estimación del flujo directo se utilizó la herramienta de análisis WHAT disponible en la Web. Mientras que para el cálculo de los volúmenes de las láminas de escurrimiento superficial se utilizaron herramientas de un

sistema de información geográfica (QGIS) y los polígonos de aportación de las estaciones hidrométricas. Los parámetros para la calibración dentro del modelo son la raíz efectiva del cultivo, recarga máxima diaria y el número de curva. A continuación, se describen a detalle los procesos realizados para la calibración.

5.2.1 Análisis hidrométrico

En la figura 5.10 se presenta la ubicación de las tres estaciones hidrométricas utilizadas en la obtención de datos hidrométricos del año 2010 para el proceso de calibración del modelo. Dos de los polígonos de aportación de las estaciones hidrométricas se encuentran en territorio Mexicano de las cuales la estación 30187 se ubica en el municipio de Venustiano Carranza con un área de 123.16 km², mientras que la estación 30195 que se ubica en el municipio Ángel Albino Corzo con un área de 465 km², la tercera estación cuenta con una superficie donde la mayoría se encuentra en Guatemala y una pequeña parte de territorio Mexicano su punto de aforo se localiza en el municipio de Frontera Comalapa y cuenta con una extensión territorial de 1521.87 km². Las estaciones hidrométricas fueron delimitadas a través del Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas (SIALT).

5.2.2 Estimación del flujo directo

WHAT, hidrografía automatizada como herramienta de análisis en la web basada en SIG, considera dos módulos de separación basados en filtros digitales, el BFLOW y los filtros Eckhardt. Un componente estadístico fue también desarrollado para proporcionar información fundamental para el análisis de frecuencia de flujo y el análisis de series de tiempo. Después de la validación, los dos métodos de filtro digital en el sistema WHAT se ejecutaron para 50 estaciones de aforo. Los valores del coeficiente de Nash-Sutcliffe comparando los resultados de los dos métodos de filtro digital fueron superiores a 0,91 para las 50 estaciones de medición, lo que sugiere que el flujo base filtrado con el método de filtro de Eckhardt generalmente coincidirá con el flujo base medido.

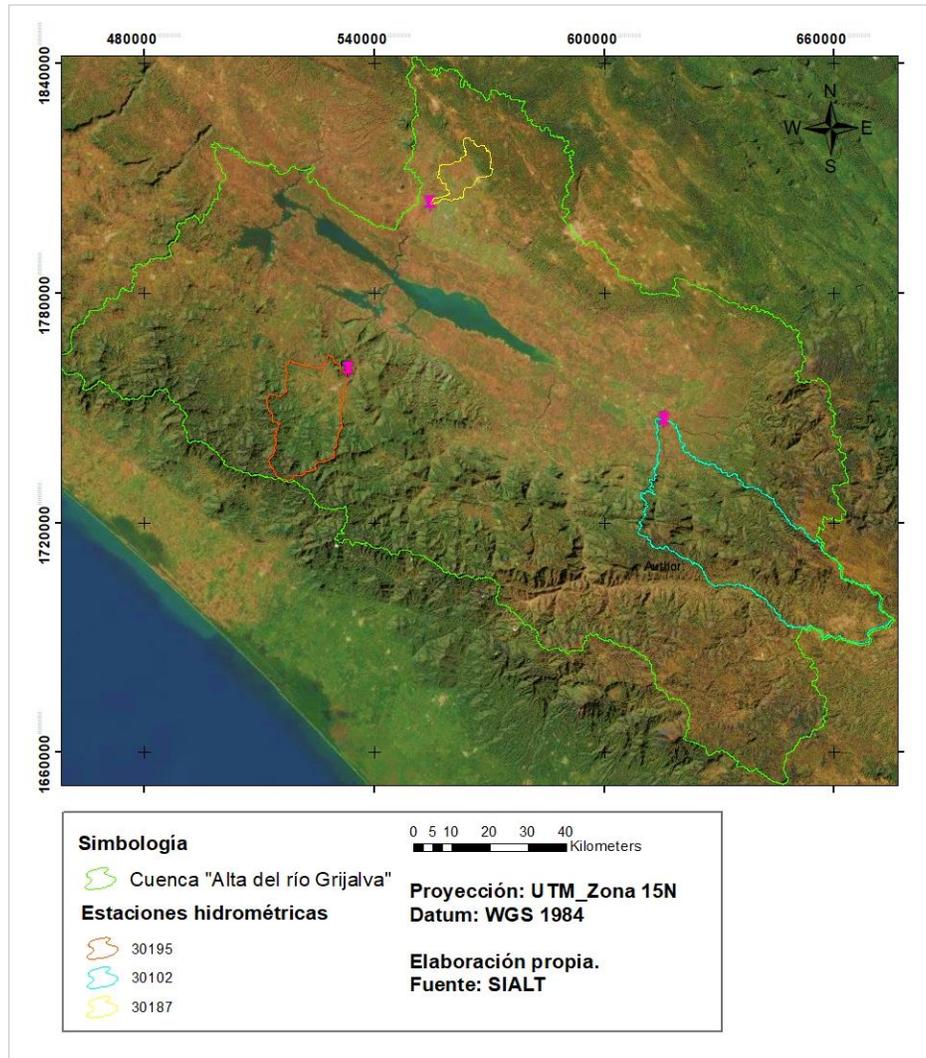


Figura 5.10.- Cuencas de aportación de las estaciones hidrométricas

Eckhardt (2005) propuso la forma general de un filtro digital considerando un parámetro de filtro digital y BFI_{max} (valor máximo de la relación a largo plazo de base caudal a caudal total) (Ecuación 6).

$$b_t = \frac{(1 - BFI_{max})\alpha + b_{t-1} + (1 - \alpha) \times BFI_{max} \times Q_t}{1 - \alpha \times BFI_{max}} \quad (6)$$

Donde b_t es el flujo base filtrado en el paso de tiempo t ; b_{t-1} es el flujo base filtrado en el paso de tiempo $t-1$; BFI_{max} es el valor máximo de la relación a largo plazo de caudal base a caudal total; α es el parámetro de filtro; y Q_t es el caudal total en el paso de tiempo t . BFI_{max} es una nueva variable introducida en el digital método de filtro de Eckhardt (2005). Para

reducir la influencia subjetiva del uso de BFI_{max} en la separación del flujo base, se estimaron valores BFI_{max} representativos para diferentes situaciones hidrológicas e hidrogeológicas comparando el flujo base de los métodos de separación convencionales con los del filtro digital Eckhardt. Eckhardt (2005) propuso el uso de valores BFI_{max} de 0,80 para arroyos perennes con acuíferos porosos, 0.50 para corrientes efímeras con acuíferos porosos, y 0,25 para arroyos perennes con acuíferos de roca dura. Estos valores se obtuvieron a través de la aplicación y validación de Eckhardt (2005) de su enfoque de filtrado en las cuencas hidrográficas de Pensilvania, Maryland, Illinois y Alemania.

Con apoyo del programa en línea web herramienta de análisis hidrográfico con el método de filtro digital recursivo (Eckhardt, 2004), ingresando un BFI_{max} de 0.50 debido a la hidromorfometría de la red hidrográfica en la cuenca Alto Grijalva, la cual está compuesta de 11 subcuencas con condición de corriente intermitente, 1 subcuenca con corriente perenne y con 3 acuíferos porosos. Se obtuvo la separación del flujo base y el escurrimiento de cada estación hidrométrica la cual puede ser consultada en la figura 5.11- 5.13 donde se presentan los hidrogramas de cada estación hidrométrica.

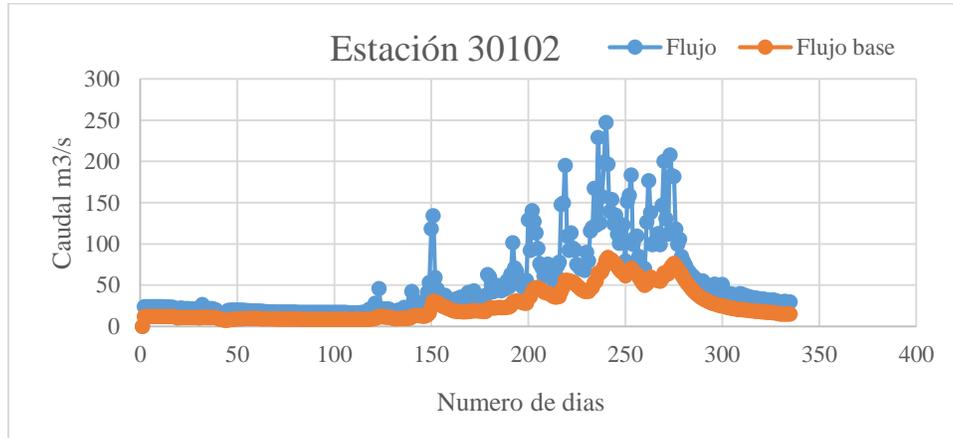


Figura 5.11.- Hidrogramas estación hidrométrica 30102

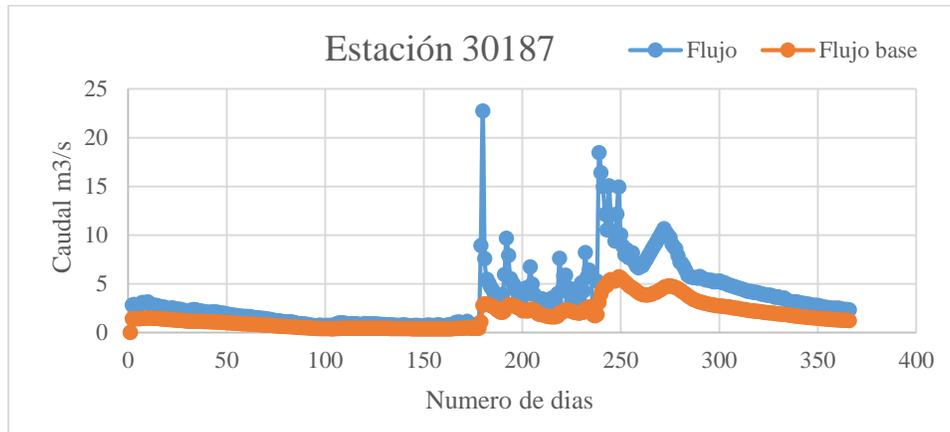


Figura 5.12.- Hidrogramas estación hidrométrica 30187

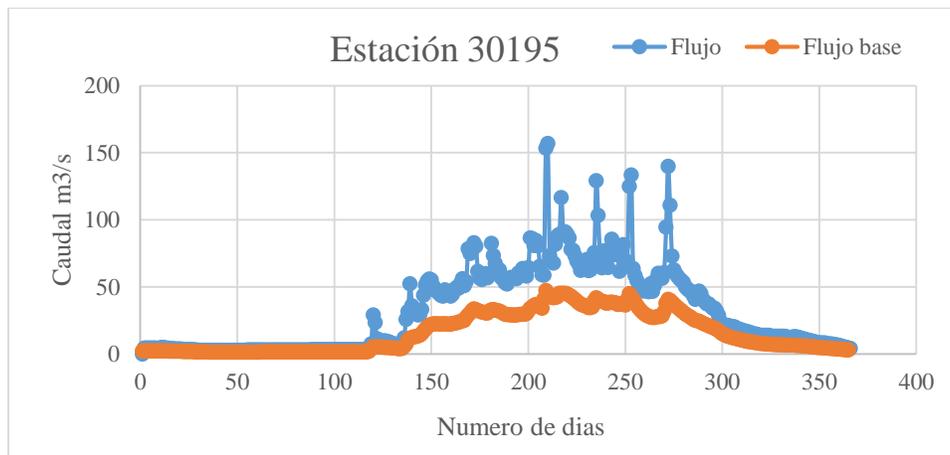


Figura 5.13.- Hidrogramas estación hidrométrica 30195

5.2.3 Diseño del modelo SWB año 2010

Los archivos de entrada del modelo SWB para la cuenca Alto Grijalva del año 2010 año de calibración son; uso y cobertura del suelo del año 2010 (figura 5.1) y el grupo hidrológico del suelo (figura 5.2), capacidad de agua disponible en el suelo (figura 5.3) y dirección del flujo (figura 5.4), en formato tipo ASCII con un tamaño de celda de (50 x 50) metros. Los datos climáticos fueron integrados en el modelo por medio de un archivo NetCDF que almacena las interpolaciones diarias del año 2010 en formato tipo ASCII de los datos climáticos de las 45 estaciones climatológicas pertenecientes a la cuenca Alto Grijalva. Una vez listo los archivos de entrada se inicia la ejecución del modelo el cual para el año 2010 realizo un tiempo de ejecución de 1428.02 minutos, mediante un equipo de cómputo con procesador Intel® Xeon® Processor E5-1660 v3 y una RAM de 32.0 GB. Los archivos de

salida que el modelo otorga son las láminas de escurrimiento superficial anual (figura 5.14), recarga potencial anual (figura 5.15) y evapotranspiración real anual (figura 5.16). Con la ayuda del sistema de información geográfica QGIS y los polígonos de aporte de las tres estaciones hidrométricas (figura 5.10) obtuvieron los volúmenes de escurrimiento superficial el cual se comparó con los volúmenes de flujo directo de las tres estaciones hidrométricas (tabla 5-11), el cual se obtuvo con el apoyo del software de uso libre WHAT. Tras el análisis de los parámetros de la recarga máxima diaria, raíz efectiva del cultivo y numero curva por grupo hidrológico del suelo para la cuenca Alto Grijalva se logró obtener porcentajes de error inferiores al 10%. En la tabla 5-10 se encuentran los valores de los parámetros una vez calibrado el modelo SWB para la cuenca Alto Grijalva.

Tabla 5-10. Valor de los parámetros de calibración del modelo SWB para la cuenca Alto Grijalva.

Código	Uso y cobertura del suelo	Numero de curva				Recarga máxima (Pulgada por día)				Raíz efectiva (Pies)			
		A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
100	Zonas urbanas	98	98	98	99	0.60	0.28	0.20	0.10	1.00	1.00	1.00	1.00
101	Bosques de coníferas	36	52	62	69	0.70	0.30	0.20	0.15	4.50	4.50	4.00	4.00
102	Bosques de galería	40	64	70	76	0.70	0.30	0.20	0.15	4.50	4.50	4.00	4.00
103	Bosques mixtos	40	60	70	76	0.70	0.30	0.20	0.15	4.50	4.50	4.00	4.00
104	Bosques latifoliadas	36	52	62	69	0.70	0.30	0.20	0.15	4.50	4.50	4.00	4.00
105	Pastizales	55	73	82	89	0.70	0.30	0.20	0.15	2.00	2.00	2.00	1.90
106	Humedales	96	96	96	96	0.70	0.30	0.20	0.15	2.00	2.00	2.00	2.00
107	Selvas bajas y medianas	39	63	67	70	0.70	0.30	0.20	0.15	4.00	4.00	4.00	4.00
108	Matorrales	49	66	70	76	0.70	0.30	0.20	0.15	2.10	2.10	2.10	1.90
110	Cuerpos de agua	100	100	100	100	0.70	0.30	0.20	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00
111	Sin vegetación	76	84	88	91	0.70	0.30	0.20	0.15	1.00	1.00	1.00	1.00
112	Agricultura	64	75	83	86	0.70	0.30	0.20	0.15	2.00	2.00	2.00	1.90

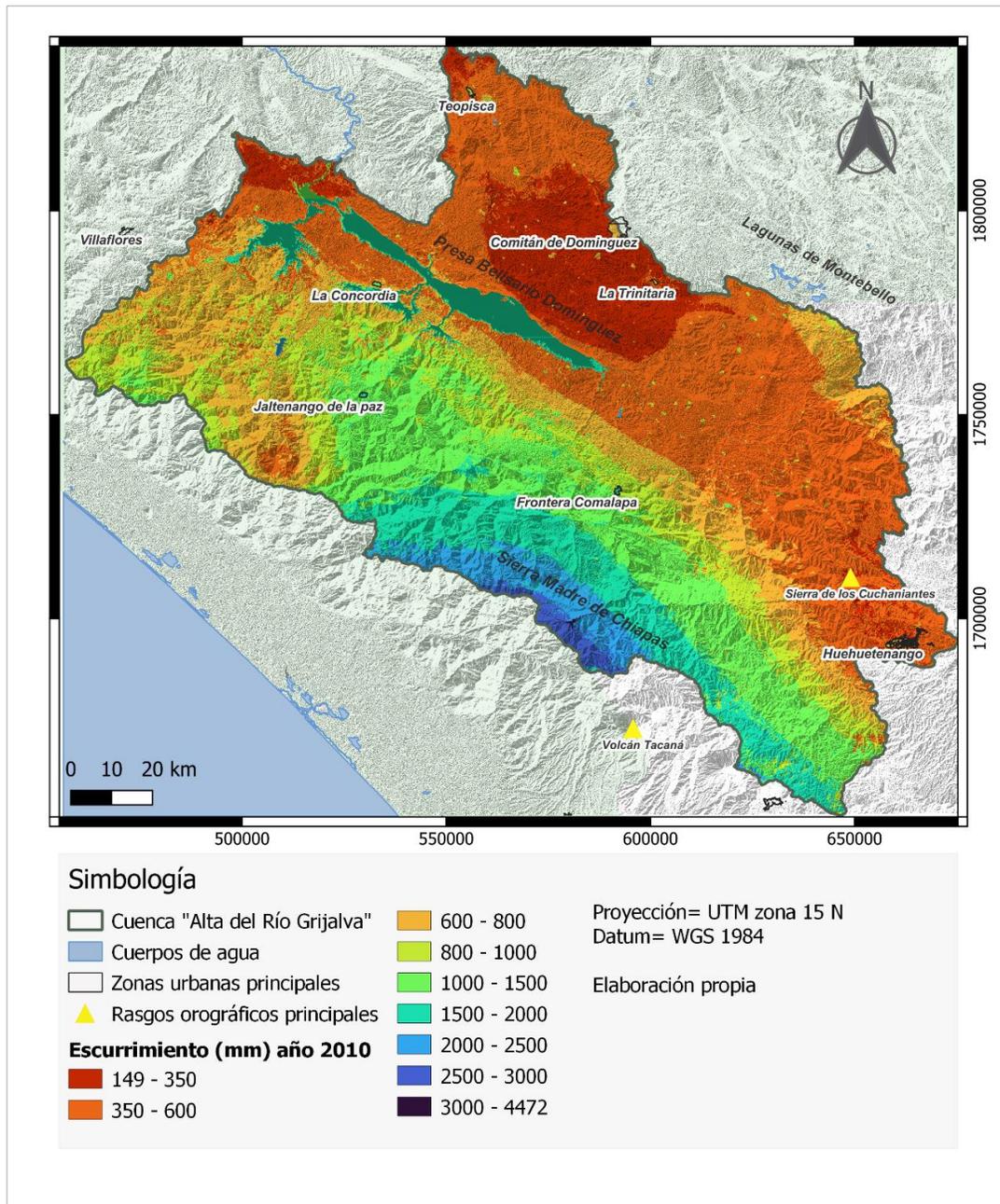


Figura 5.14.- Láminas de escurrimiento superficial año 2010 cuenca Alto Grijalva

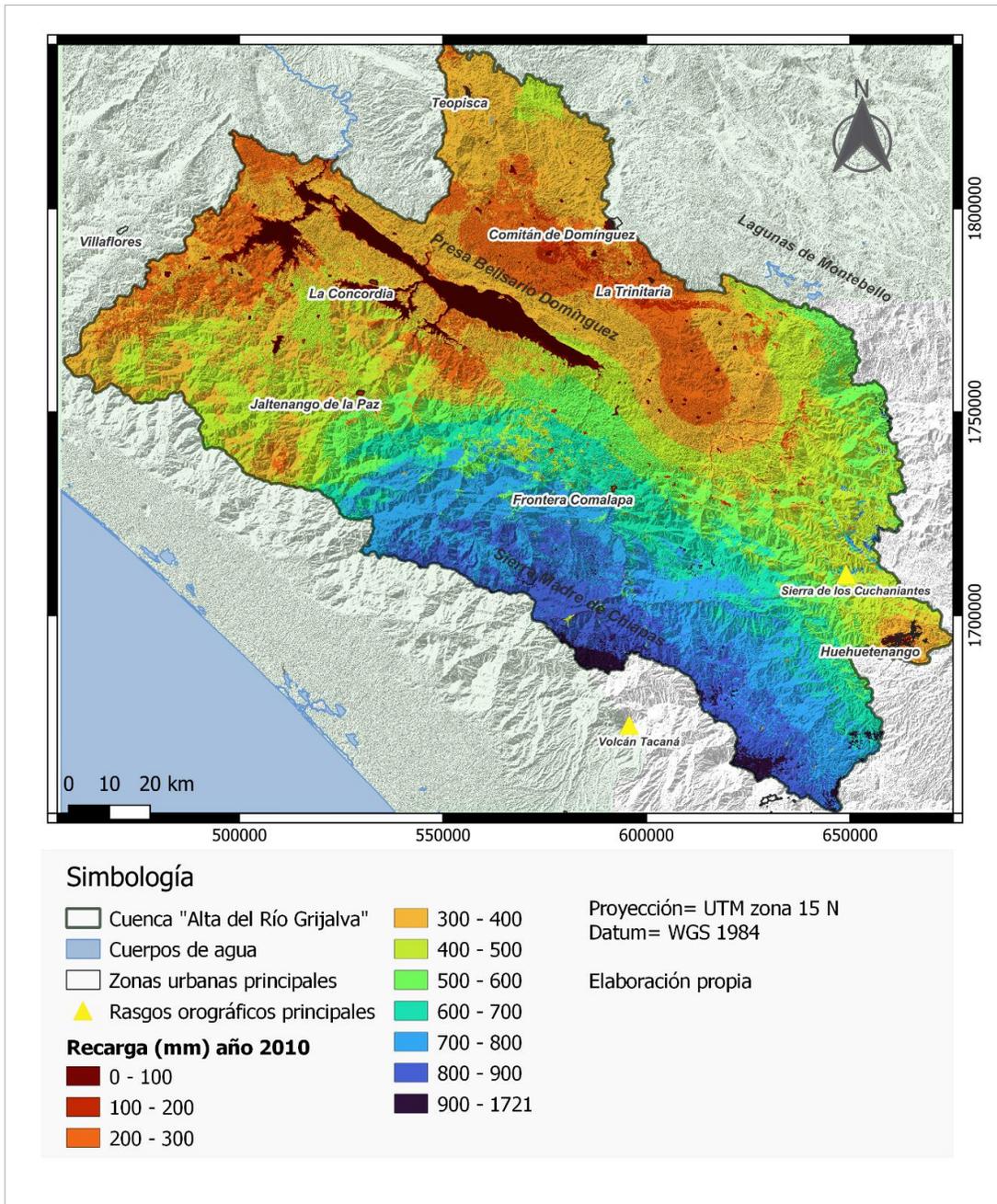


Figura 5.15.- Láminas de recarga potencial año 2010 cuenca Alto Grijalva

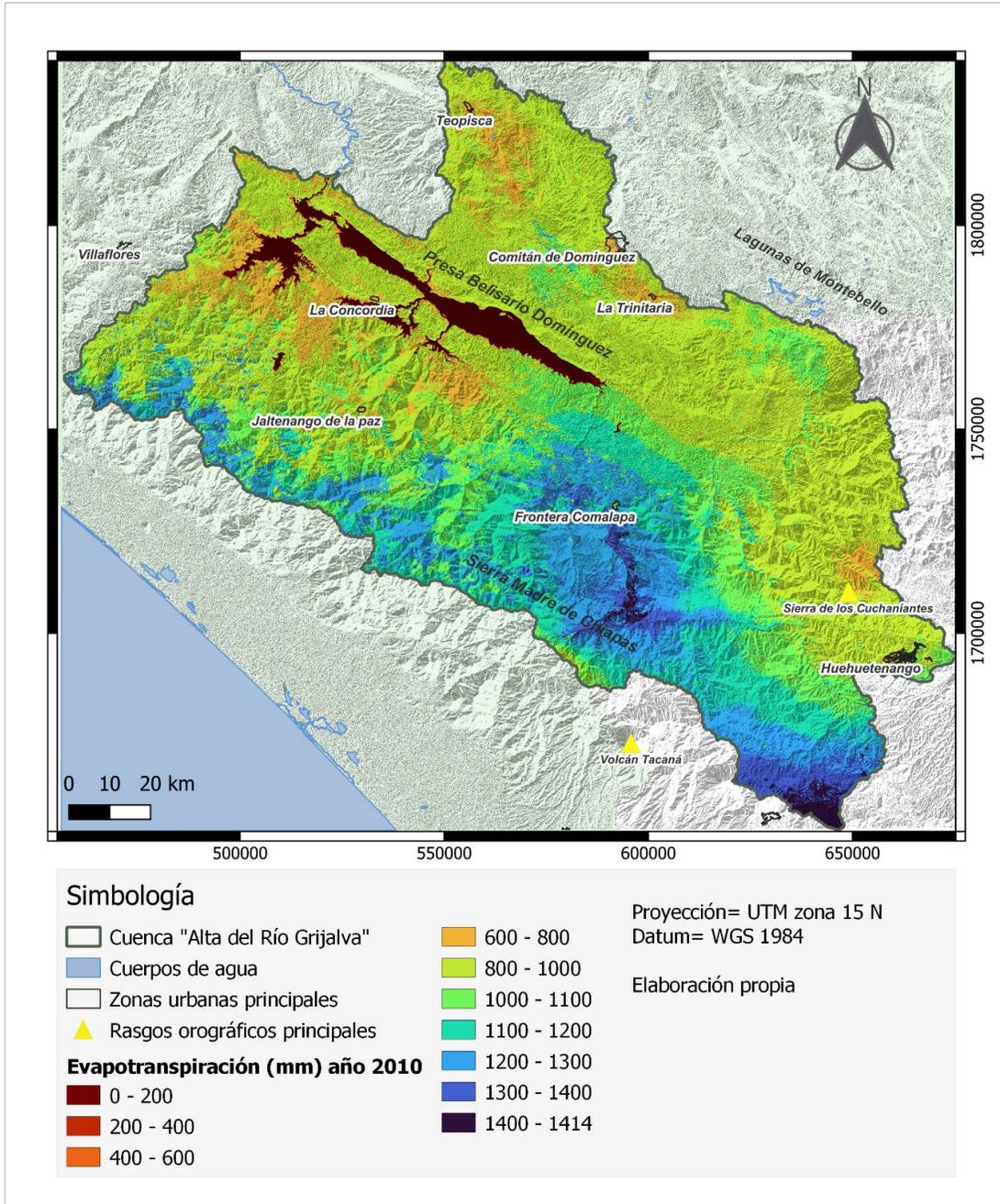


Figura 5.16.- Láminas de evapotranspiración real año 2010 cuenca Alto Grijalva

5.2.4 Comparación de los resultados simulados vs observados

Mediante los polígonos de aporte de cada estación hidrométrica se realizó la obtención de los volúmenes de escorrentía superficial anual simulado con SWB, mismo que se evaluaron contra el escurrimiento directo a partir del análisis de los hidrogramas (figura 5.11-13) obtenidos de las estaciones hidrométricas.

$$\% \text{ Error} = \frac{|\text{valor aprox.} - \text{valor exact.}|}{\text{valor exact.}} \times 100 \quad (7)$$

Para la calibración del modelo se utilizaron los parámetros “caudal directo” contra “escurrimiento simulado”, con la fórmula del porcentaje de error (formula 7) se obtuvieron los siguientes resultados para cada estación; -9.25% para la estación 30102, 3.24% para la estación 30187 y 7.36% para la 30195 (tabla 5-11).

Tabla 5-11. Volúmenes de aportación y porcentajes de error resultantes de la calibración.

Estación:	Caudal directo	Escurrimiento	Error (Volumen m3)	Error (%)
	estimado: Hidrograma (m ³)	simulado: SWB (m ³)		
30102	738,858,776.39	807,252,511.4	-68,393,735.02	-9.25
30187	55,680,279.46	53,875,990.97	1,804,288.49	3.24
30195	501,555,963.30	464,622,756.13	36,933,207.17	7.36

5.2.5 Diseño de modelo SWB para los periodos de simulación

Una vez calibrado el modelo SWB, se procedió a correr los 3 periodos (2001-2005), (2006-2009), (2010-2015) con los datos disponibles para cada uno de ellos. Los parámetros de entrada que cambian son el uso de suelo, la precipitación y la temperatura máxima y mínima diaria. Una vez realizada las corridas exitosamente se realizó el pos-procesamiento de los resultados obteniendo la cartografía de los parámetros hidrológicos: Lámina de recarga potencial, lámina de escurrimiento superficial, lámina de evapotranspiración real para los 15 años comprendidos en los 3 periodos de la cuenca Alto Grijalva las cuales se pueden consultar en la sección de Anexos B: “Mapas de los parámetros del ciclo hidrológico” ubicados al final de este documento.

Periodo de simulación 2001 – 2005. Para el diseño del periodo de simulación 2001 – 2005, los archivos de entrada del modelo SWB para la cuenca Alto Grijalva están conformados por el uso y cobertura del suelo del año 2001 (figura 5.1) y el grupo hidrológico del suelo (figura 5.2), capacidad de agua disponible en el suelo (figura 5.3) y dirección del flujo (figura 5.4), en formato tipo ASCII con un tamaño de celda de 50 x 50 metros. Los datos climáticos son integrados en un archivo NetCDF que almacena las interpolaciones diarias del periodo 2001 – 2005 en formato tipo ASCII con datos climáticos de las 45 estaciones climatológicas pertenecientes a la cuenca Alto Grijalva. Una vez listo los archivos de entrada se inicia la

ejecución del modelo el cual para el periodo 2001 – 2005 se realizó para un tiempo de ejecución de 7100 minutos. Los archivos de salida como las láminas de evapotranspiración real anuales, escurrimientos superficiales anuales, recargas potenciales anuales que se encuentran en el apartado de “Anexos B” de este documento.

Periodo de simulación 2006 – 2009. Para el diseño del periodo de simulación 2006 – 2009 los archivos de entrada del modelo SWB para la cuenca Alto Grijalva que cambiaron en diferencia del periodo anterior son; uso y cobertura del suelo del año 2006 (figura 5.1) y los datos climáticos integrados en archivo NetCDF que almacena las interpolaciones diarias del periodo 2006 – 2009 en formato tipo ASCII de los datos climáticos de las 45 estaciones climatológicas pertenecientes a la cuenca Alto Grijalva. Una vez listo los archivos de entrada se inició la ejecución del modelo el cual para el periodo 2006 - 2009 realizo un tiempo de ejecución de 3856.44 minutos, generando los archivos de salida como las láminas de evapotranspiración real anuales, escurrimiento superficial anuales, recarga potencial anuales que se encuentran en el apartado de “Anexos B” de este documento.

Periodo de simulación 2010- 2015. Los archivos de entrada del modelo SWB para la cuenca Alto Grijalva del periodo 2010 - 2015 que se modificaron con respecto a los anteriores periodos fueron, uso y cobertura del suelo del año 2010 (figura 5.1) y los datos climáticos en archivo NetCDF que almacena las interpolaciones diarias del periodo 2010 - 2015 en formato tipo ASCII de los datos climáticos de las 45 estaciones climatológicas pertenecientes a la cuenca Alto Grijalva. Una vez actualizados los archivos de entrada se inicia la ejecución del modelo el cual para el periodo 2010 - 2015 realizo un tiempo de ejecución de 3638.88 minutos, generando los archivos de salida como las láminas de evapotranspiración real anuales, escurrimiento superficial anuales, recarga potencial anuales que se encuentran en el apartado de “Anexos B” de este documento.

Capítulo 6 . Resultados

A través del análisis y procesamiento con herramientas de los sistemas de información geográfica se visualizaron los resultados del modelo SWB, es decir, las láminas de escurrimiento superficial, recarga potencial y evapotranspiración real, así como los volúmenes de aportación de cada parámetro del ciclo hidrológico y con respecto a los grupos hidrológicos del suelo y usos y coberturas del suelo a continuación descrita.

6.1 Análisis del balance hídrico por periodo

6.1.1 Periodo 2001 – 2005

Lámina de escurrimiento superficial media anual 2001 – 2005. En la lámina de escurrimiento superficial media anual del periodo 2001 -2005 (figura 6.1) podemos observar la variación espacial en las láminas de escurrimiento de la cuenca para este periodo, la cual está altamente relacionada con el comportamiento climatológico de la zona, los escurrimientos máximos medios anuales van de los 1000 mm – 1961 mm y se ubican en la zona alta de la Sierra Madre de Chiapas donde las precipitaciones medias anuales superan los 2 500 mm, por otro lado el escurrimiento mínimo medio anual se ubica en el centro de la cuenca y alrededor de La Trinitaria donde el escurrimiento va de 22 mm – 350 mm. En su mayoría se logra observar que la lámina de escurrimiento medio anual predominante va de los 100 -800 mm en este periodo.

Lámina de recarga potencial media anual 2001 – 2005. Los valores estimados para la lámina de recarga potencial media anual indican que para el periodo (2001-2005) existe una variabilidad en la recarga potencial donde los valores van de los 0 a 1448 mm, una lámina aproximadamente 26% menor que la lámina de escurrimiento superficial del mismo periodo. Los valores mínimos de la recarga potencial media anual (0-100 mm) se ubican en La Trinitaria y alrededores, mientras que las recargas medias (100 – 500 mm) se ubican al este entre Teopisca y La Concordia y al oeste entre las lagunas de Montebello y la sierra de los Cuchaniantes. En la figura 6.2 se puede observar que los valores máximos (500 -1448 mm) de la recarga potencial media anual van ascendiendo desde el sur de Villaflores hasta el sur de Huehuetenango, donde las láminas superiores a los 800 mm se encuentran alrededor del volcán Tacana.

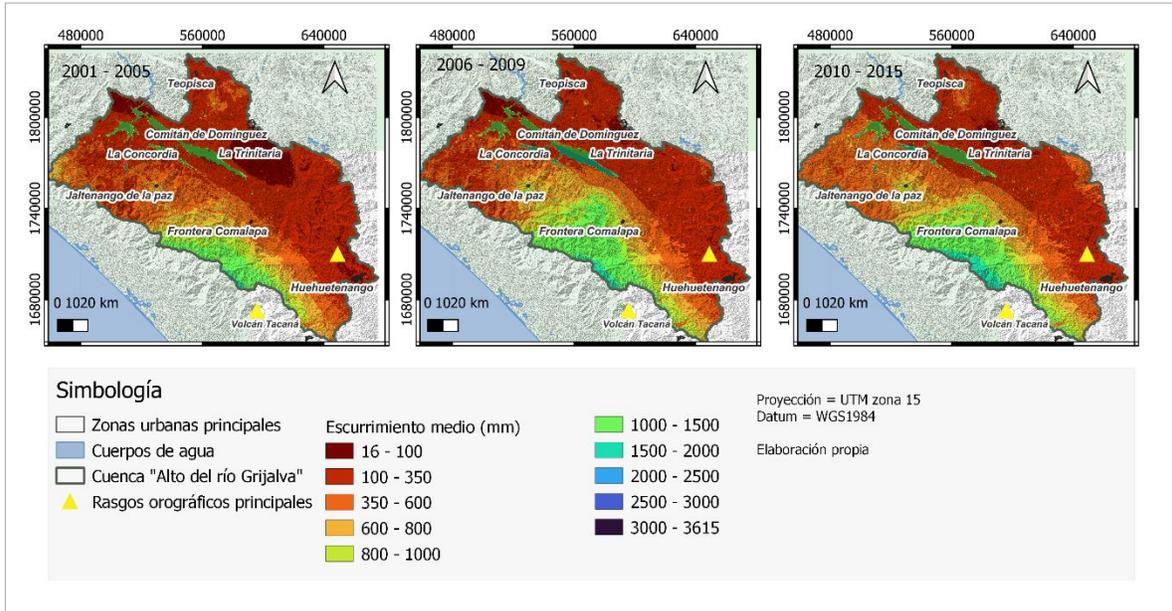


Figura 6.1.- Lámina de escurrimiento medio anual en el periodo (2001 – 2005, 2006 – 2009 y 2010 -2015)

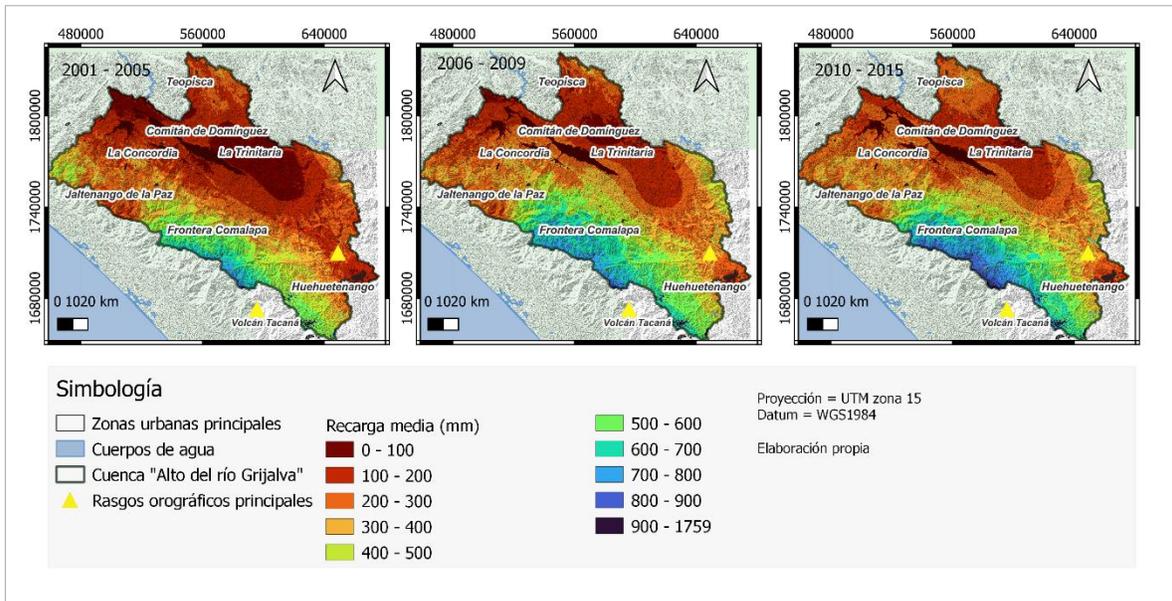


Figura 6.2.- Lámina de recarga media anual en el periodo (2001 – 2005, 2006 – 2009 y 2010 -2015)

Lámina de evapotranspiración real media anual 2001 – 2005. Los valores de evapotranspiración real (ET) media van de 0 a 1395 mm (figura 6.3) para este periodo, los valores máximos de 1300 – 1395 mm se encuentra en las zonas altas de la Sierra Madre de Chiapas y sur de Teopisca, estos valores representan el 55% de la lámina de precipitación. La (ET) desciende conforme la pendiente disminuye. Los valores mínimos tienen mayor presencia en zonas urbanas con valores de 0 a 200 mm, estos valores van en aumento en los

alrededores de Comitán de Domínguez, La Trinitaria y Sierra de los Cuchaniantes donde los valores se encuentran entre los 600 mm – 800 mm, mientras que la lámina de evapotranspiración real media anual predominante es de 800 – 1100 mm.

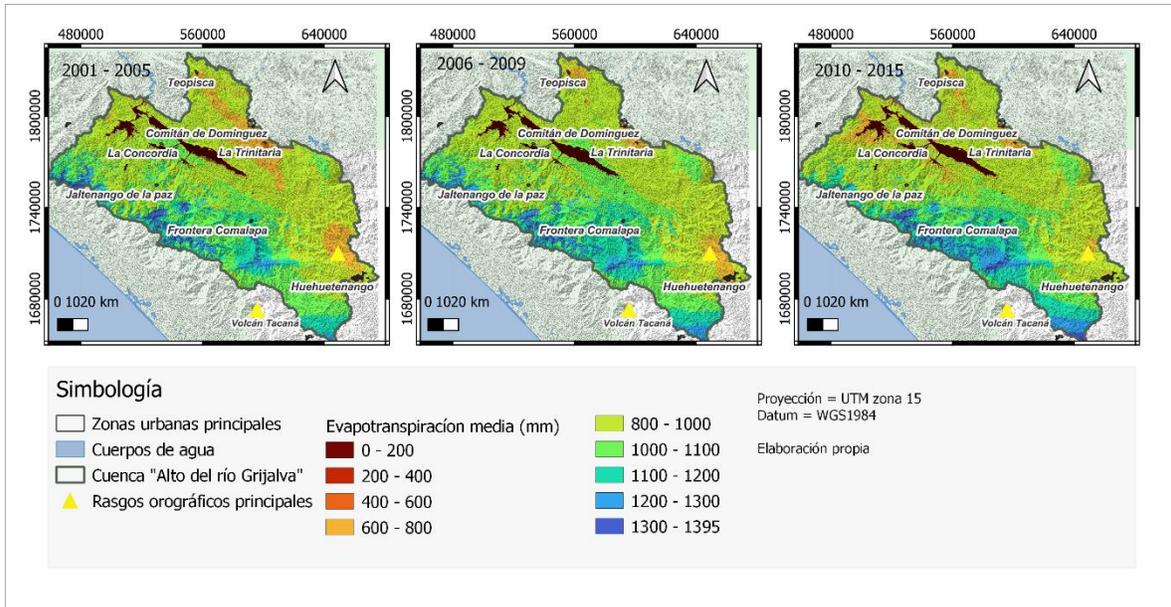


Figura 6.3.- Lámina de evapotranspiración real media anual en el periodo (2001 – 2005, 2006 – 2009 y 2010 -2015)

Coefficiente de escurrimiento superficial media anual 2001 – 2005. La fracción de la lámina de precipitación media que se convierte en escurrimiento superficial medio anual del periodo 2001 – 2005 presento un rango de valor de los 0.01 a los 0.60 y más. Los coeficientes mínimos dados son de 0.01 – 0.05 ubicados al norte de la cuenca en La Trinitaria, sur de las lagunas de Montebello y en la Sierra de los Cuchaniantes. El coeficiente de escurrimiento superficial medio máximo se presentó con valores que van de los 0.60 – 1. La variabilidad de las láminas de precipitación media y las láminas de escurrimiento superficial medio dan como resultado la variabilidad del coeficiente de escurrimiento medio dentro de la cuenca. Como se observa en las figuras 6.4 los valores predominantes son 0.10 – 0.30 al noroeste y noreste de la cuenca entre Teopisca y Huehuetenango, y valores entre 0.30 – 0.50 al suroeste y sureste de la cuenca entre Villaflores y norte del volcán Tacaná. El coeficiente que supera un valor de 0.60 indicativo de la presencia de cuerpos de agua.

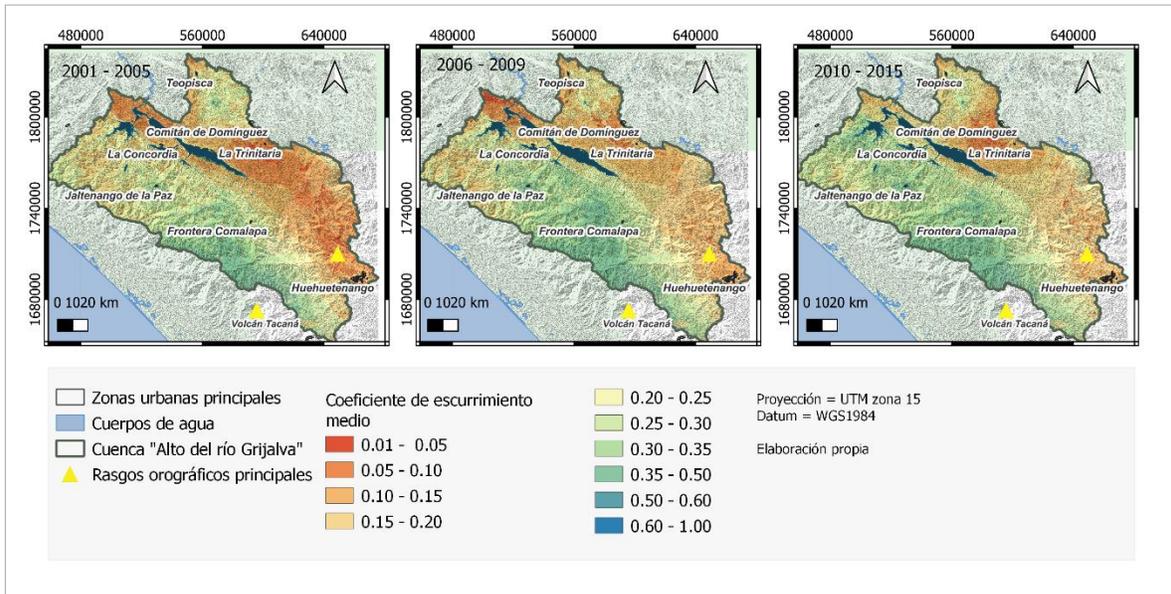


Figura 6.4.- Coeficiente de escurrimiento medio periodo (2001 – 2005, 2006 – 2009 y 2010 -2015)

Coefficiente de recarga potencial media anual 2001 – 2005. La fracción de la lámina de recarga potencial que forma parte de la lámina de precipitación va de 0.00 a 0.41 para el periodo 2001 – 2005. El coeficiente de recarga media que predominan en la cuenca va de 0.15 – 0.30, este periodo tiene mayor presencia de valores mínimos de 0.00 a 0.09 ubicados en La trinitaria, Comitán de Domínguez y norte de la concordia (figura 6.5). Los valores mínimos de 0.00 – 0.03 están ubicados en las zonas urbanas de la cuenca y las máximas de 0.35 – 0.41 ubicadas al este del volcán Tacana.

Coefficiente de evapotranspiración real media anual 2001 – 2005. La fracción de lámina de precipitación media que se convierte en evapotranspiración real representa la fracción mayor con valores superiores a los 0.80. Para el periodo (2001 – 2005) se obtuvieron coeficiente de evapotranspiración real máximos superiores a los 0.90 principalmente ubicados alrededor y norte de la presa la angostura. Para este periodo las máximas van del 0.50 a 0.80 distribuidos sobre todo la cuenca. Por otro lado, los valores mínimos se ubican al sur en la Sierra Madre de Chiapas. Este periodo presentó mayor estrés hídrico en la cuenca Alto Grijalva debido a las láminas de precipitación pequeñas y temperaturas máximas en comparación de los otros periodos donde la precipitación fue mayor (figura 6.6). En la figura 6.7 se muestran los porcentajes y volúmenes de los parámetros del ciclo hidrológico del periodo 2001 – 2005.

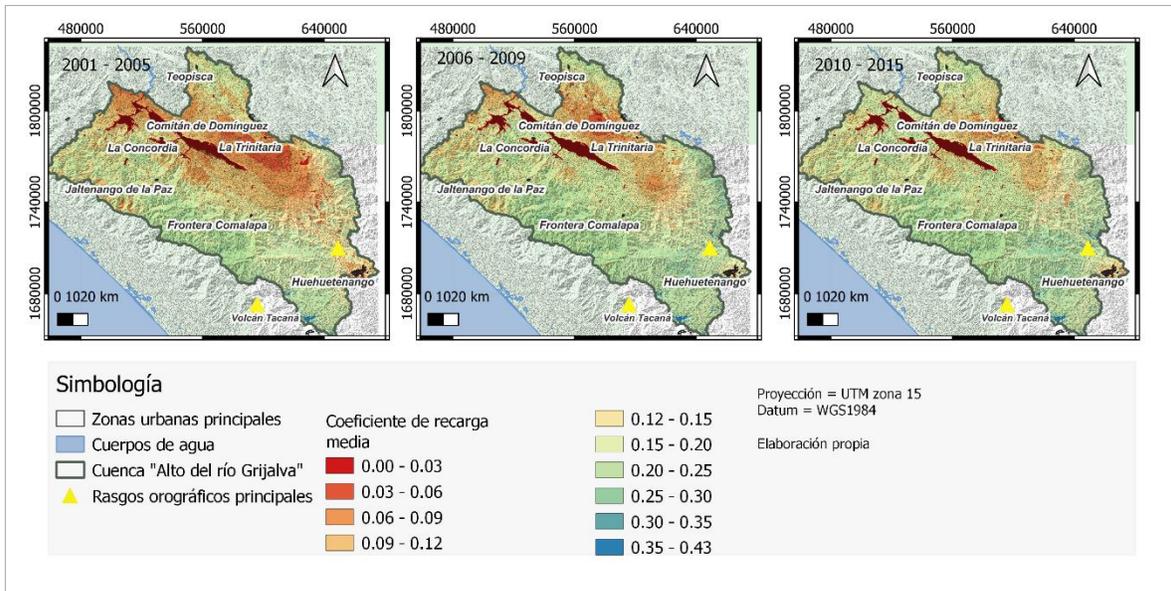


Figura 6.5.- Coeficiente de recarga media periodo (2001 – 2005, 2006 – 2009 y 2010 -2015)

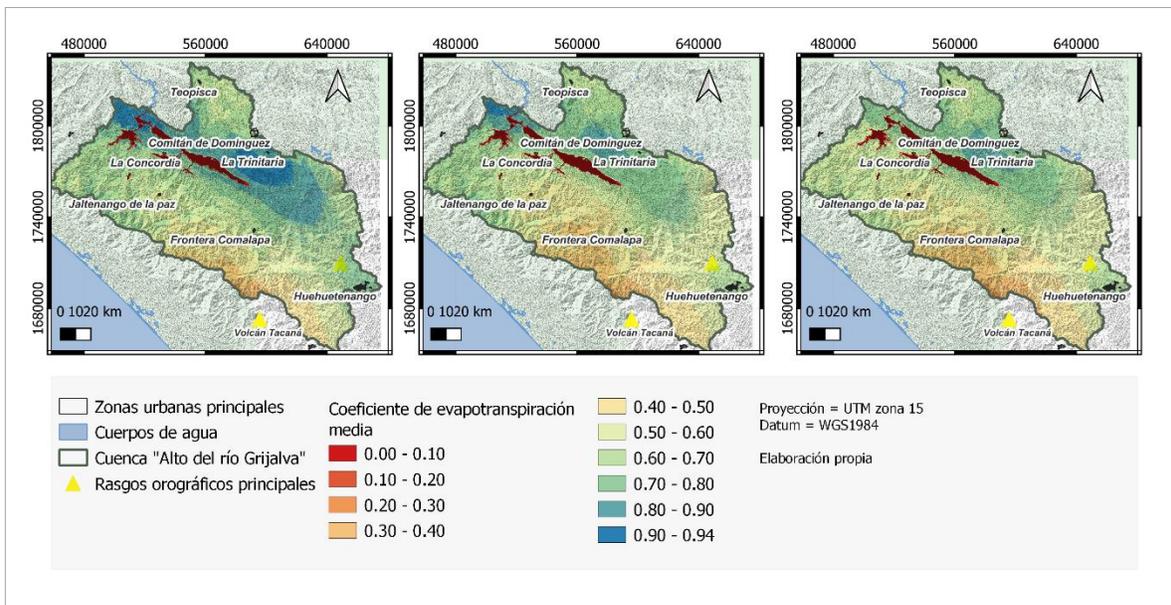


Figura 6.6.- Coeficiente de evapotranspiración media periodo (2001 – 2005, 2006 – 2009 y 2010 -2015)

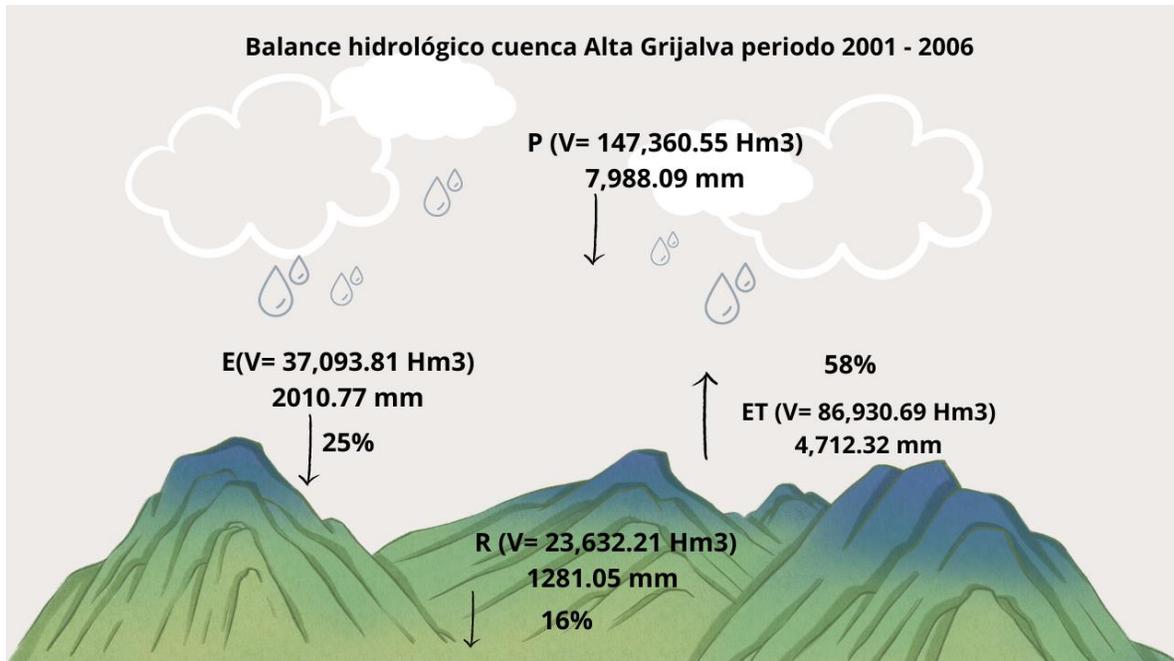


Figura 6.7.- Balance hidrológico cuenca Alta Grijalva periodo 2001 -2005

6.1.2 Periodo 2006 – 2009

Lámina de escurrimiento superficial media anual 2006 – 2009. La lámina de escurrimiento medio del periodo (2006-2009) aumentó 190 mm en comparación al periodo anterior (figura 6.1), la lámina de escurrimiento medio máxima fue de 2151 mm, ubicada en la zona alta de la Sierra Madre de Chiapas. La lámina de escurrimiento medio anual mínimo fue entre 16 mm -100 mm con presencia territorial mínima dispersa en comparación al periodo anterior ubicada en Comitán de Domínguez y la Trinitaria. La lámina de escurrimiento medio anual predominante en extensión territorial para este periodo va de 100 mm -350 mm al norte de la cuenca, mientras que en el sur oscilo entre los 350 mm – 800 mm.

Lámina de recarga potencial media anual 2006 – 2009. La lámina de la recarga media del periodo (2006 -2009) (figura 6.2) varía espacialmente, en la parte noroeste de la cuenca las láminas de recarga media son de 0 mm – 100 mm con presencia en Comitán de Domínguez, mientras que en sus alrededores se presentan láminas de 300 mm – 400 mm y en la parte suroeste oscilan entre 100 mm – 500 mm al igual que al suroeste entre lagunas de Montebello y Huehuetenango. Las láminas de recarga media máximas se observan al sur de la cuenca en

la Sierra madre de Chiapas donde alcanza valores entre 600 mm hasta 1562 mm, lo que equivale a un 27% menos que la lámina de escurrimiento superficial del mismo periodo.

Lámina de evapotranspiración real media anual 2006 – 2009. La lámina de evapotranspiración real media del periodo (2006 – 2009) se mantiene dentro de los rangos del periodo anterior con valores que van de los 0 mm a los 1395 mm. Las láminas de evapotranspiración media se presentan en las partes más altas de la cuenca no solo en la Sierra Madre de Chiapas sino también al sur de Villaflores y Jaltenango con máximas que van de 1300 mm a 1395 mm y mínimas de 0 mm -200 mm ubicadas principalmente en las zonas urbanas de la cuenca, la lámina de evapotranspiración real media que más extensión territorial ocupa es de 800 a los 1100 mm, como se observar en la figura 6.3.

Coefficiente de escurrimiento superficial media anual 2006 – 2009. Para la fracción de lámina de precipitación media que se convierte en escurrimiento superficial del periodo (2006-2009) se presentan en un mismo rango de valor que van de los 0.01 a los 0.60 y más. Se presentaron coeficientes mínimos de 0.01- 0.05 con ubicación en Comitán de Domínguez, Trinitaria y al norte de la concordia (figura 6.4). Las láminas máximas fueron de 0.60 – 1, localizadas principalmente en cuerpos de agua y zonas urbanas. Los valores predominantes son 0.15 – 0.30 al noroeste y noreste de la cuenca entre Teopisca y Huehuetenango, y valores entre 0.30 – 0.50 al suroeste y sureste de la cuenca entre Villaflores y norte del volcán Tacana.

Coefficiente de recarga potencial media anual 2006 – 2009. La fracción de la lámina de recarga potencial que forma parte de la lámina de precipitación va de 0.00 a 0.41 para el periodo 2006 – 2009. El coeficiente de recarga media que predominan en la cuenca va de 0.15 – 0.30, este periodo tiene presencia de valores mínimos de 0.00 a 0.09 ubicados en los alrededores de Comitán de Domínguez y Trinitaria (figura 6.5). Los valores mínimos de 0.00 - 0.03 están ubicados en las zonas urbanas de la cuenca y las máximas de 0.35 -0.41 ubicadas al este del volcán Tacana.

Coefficiente de evapotranspiración real media anual 2006 – 2009. La fracción de lámina de precipitación media que se convierte en evapotranspiración real representa la fracción mayor con valores superiores a los 0.80. Para el periodo (2006 – 2009) (figura 6.6) se obtuvieron coeficiente de evapotranspiración real máximos superiores a los 0.90 principalmente ubicados alrededor y norte de la presa la angostura. Los valores de coeficiente

de (ET) predominantes para este periodo se dividen en dos grupos, uno que va del 0.60 a 0.80 distribuidos al norte de la cuenca y el segundo que va de los 0.30 a 0.60 en la zona centro de la cuenca altura de Jaltenango la paz y la sierra de los cuchuniates. Por último, los valores mínimos 0 - 0.20 se ubican al sur en la Sierra Madre de Chiapas. En la figura 6.8 se visualizan los porcentajes y volúmenes de los parámetros del ciclo hidrológico del periodo 2006 – 2009.

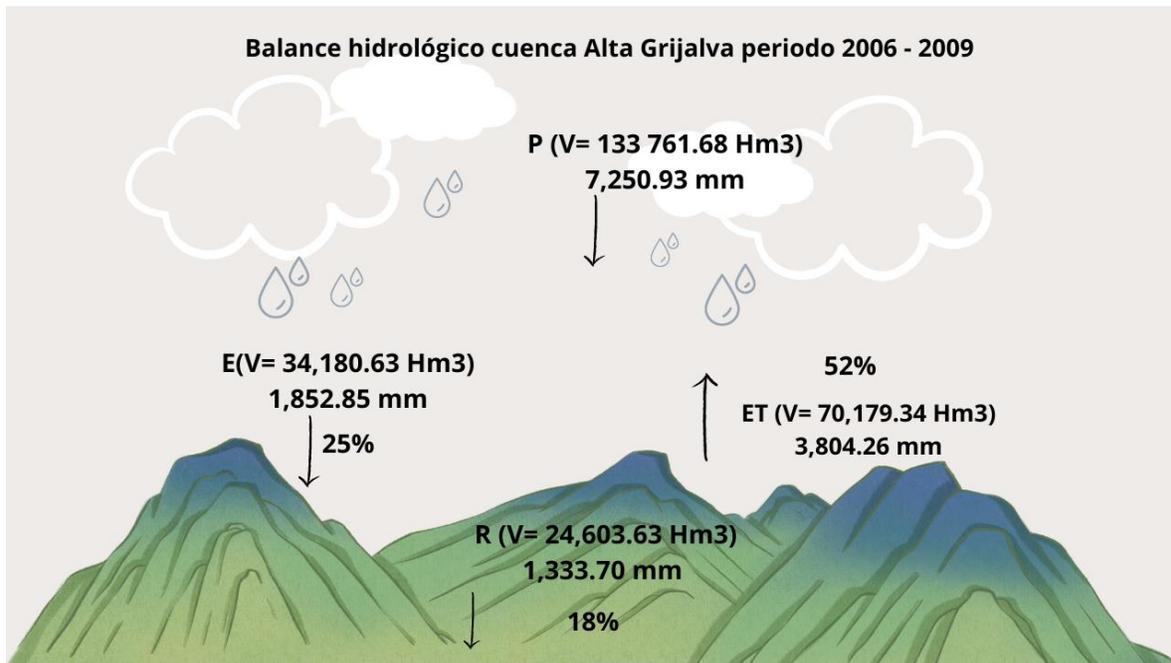


Figura 6.8.- Balance hidrológico cuenca Alta Grijalva periodo 2006 - 2009

6.1.3 Periodo 2010 – 2015

Lámina de escurrimiento superficial media anual 2010 – 2015. La variación espacial de la lámina de escurrimiento medio anual del periodo (2010 -2015) fue impactada por las depresiones tropicales presentadas en este periodo en los años 2010, 2011 y 2012 ya que la lámina de escurrimiento superficial aumento 1654 mm en comparación con el primer periodo. La lámina de escurrimiento medio mínima se presentó en Comitán de Domínguez con 44 mm a 100 mm. En la figura 6.1 se puede observar una variabilidad de la lámina de escurrimiento medio de 100 – 350 mm desde el noroeste en Teopisca hasta el sureste en Huehuetenango, mientras que al suroeste se observa la variación espacial en las láminas de escurrimiento de la cuenca desde el municipio de Villaflores hasta el municipio de Frontera Comalapa que oscilan entre 350 mm a los 800 mm, y desde las faldas hasta la cima de la

Sierra Madre de Chiapas se encuentran láminas de escurrimiento medio máximas de 1000 mm hasta los 2500 mm.

Lámina de recarga media superficial media anual 2010 – 2015. En la lámina de recarga media anual del periodo 2010 -2015 (figura 6.2) se puede observar la variación espacial en las láminas de recarga media de la cuenca para este periodo, las recargas medias anuales máximas van de los 900 – 1759 mm es decir 29% menos con respecto a las láminas de escurrimiento medio para este periodo. Estas láminas máximas se ubican en la zona alta de la Sierra Madre de Chiapas y en las pendientes que la componen la lámina de recarga va de los 700 – 900 mm. Por otro lado, la recarga media anual mínima se ubica en el centro, alrededor de La trinitaria y Comitán de Domínguez donde la recarga va de los 0 mm – 100 mm. La variabilidad de las láminas de recarga en el resto de la superficie de la cuenca Alto Grijalva se observa que van de los 200 – 600 mm.

Lámina de evapotranspiración real media anual 2010 – 2015. En las láminas de ET media anual del periodo 2010 - 2015 (figura 6.3) se presentan valores mínimos que van del 0 mm – 200 mm y valores máximos de 1300 – 1394 mm. Los valores de evapotranspiración real media máxima de 1200 mm a 1394 mm de este periodo se hacen presente a las faldas y zonas altas de la Sierra Madre de Chiapas y territorio de Guatemala al este del volcán Tacana y las láminas evapotranspiración real media mínimas de los 0 mm a los 400 mm en las zonas urbanas. Las láminas de 1000 – 1100 mm predominan sobre la superficie de la cuenca Alto Grijalva para este periodo.

Coefficiente de escurrimiento superficial media anual 2010 – 2015. Para la fracción de lámina de precipitación media que se convierte en escurrimiento superficial para el periodo (2010 – 2015) se presentó un mismo rango de valores en comparación a los periodos anteriores que van de los 0.01 a los 0.60 y más. Los valores mínimos del periodo 2010 – 2015 se presentó escasamente con valores 0.03 – 0.05 únicamente en Comitán de Domínguez y la Trinitaria. Mientras que los coeficientes máximos fueron de 0.60 – 1 localizadas principalmente en zonas urbanas y cuerpos de agua. Como se observa en la figura 6.4. Los valores predominantes son 0.15 – 0.30 al noroeste y noreste de la cuenca entre Teopisca y Huehuetenango, y valores entre 0.30 – 0.50 al suroeste y sureste de la cuenca entre Villaflores y norte del volcán Tacana.

Coefficiente de recarga potencial media anual 2010 – 2015. La fracción de la lámina de recarga potencial que forma parte de la lámina de precipitación va de 0.00 a 0.43 para el periodo 2010 – 2015. El coeficiente de recarga media que predominan en la cuenca va de 0.15 – 0.30, este periodo tiene mayor presencia de valores mínimos de 0.00 a 0.09 ubicados en los alrededores del municipio Comitán de Domínguez y el municipio La Trinitaria (figura 6.5). Los valores de coeficiente mínimos de 0.00 – 0.03 están ubicados en las zonas urbanas de la cuenca y los coeficientes máximos de 0.35 – 0.41 ubicadas al este del volcán Tacana.

Coefficiente de evapotranspiración real media anual 2010 – 2015. La fracción de lámina de precipitación media que se convierte en evapotranspiración real (ET) representa la fracción mayor con valores superiores a los 0.80. Para el periodo 2010-2015 (figura 6.6) las máximas fueron de 0.80 – 0.89 con poca presencia en Comitán de Domínguez y La Trinitaria, los valores de coeficiente de (ET) predominantes para este último periodo fueron de 0.40 a 0.70, mientras que en los periodos 2001 – 2005 y 2006 – 2009 van del 0.50 a 0.80 distribuidos sobre todo la cuenca. Por otro lado, los valores mínimos (0.10 – 0.30) se ubican al sur en la Sierra Madre de Chiapas. En la figura 6.9 se visualizan los porcentajes y volúmenes de los parámetros del ciclo hidrológico del periodo 2010 – 2015.

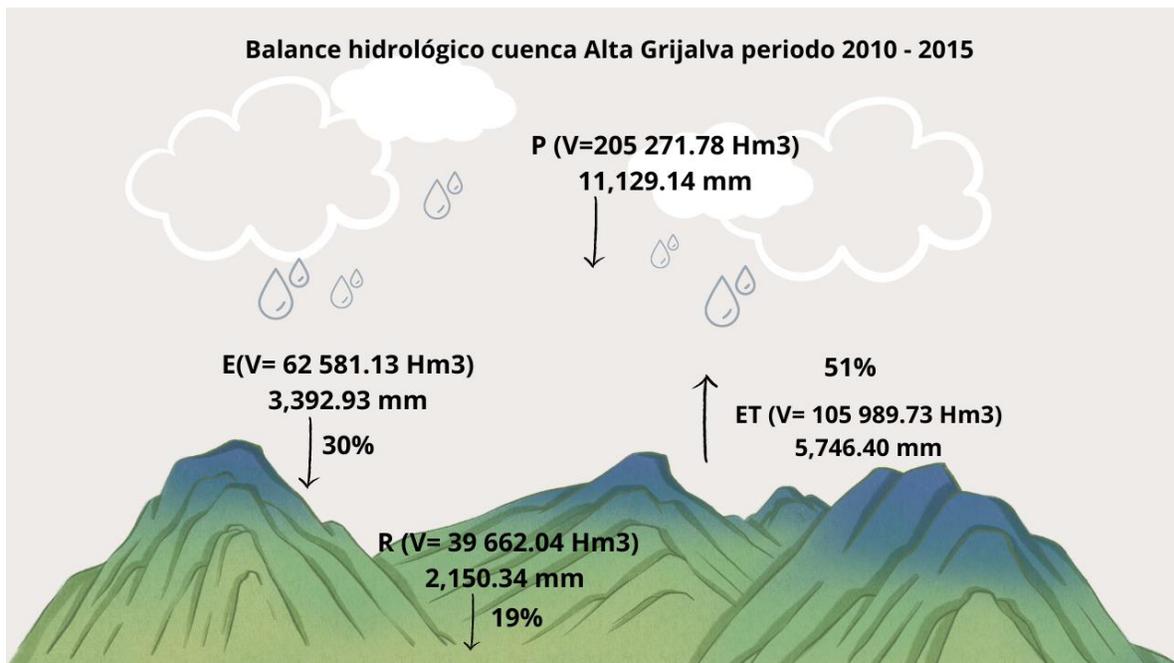


Figura 6.9.- Balance hidrológico cuenca Alta Grijalva periodo 2010 - 2015

6.2 Volúmenes estimados de las variables del ciclo hidrológico por grupo hidrológico y por uso de suelo para cada periodo.

Para el análisis de los volúmenes de precipitación escurrimiento superficial, recarga potencial y evapotranspiración real de la cuenca Alto Grijalva para cada periodo se graficaron los volúmenes anuales para cada año dentro de los 3 periodos (2001 – 2005), (2006 – 2009), (2010 – 2015). En el primer periodo (figura 6.10) el volumen de escurrimiento del 2005 fue el superior con $12,661.08 \text{ hm}^3$, lo mismo para la recarga con $6,198.15 \text{ hm}^3$ y la precipitación con $35,741.19 \text{ hm}^3$, pero para la evapotranspiración real el año que registro mayor volumen fue el 2001 con $17,938.68 \text{ hm}^3$. Los años que registraron menor volumen de escurrimiento superficial es el 2001 con $5,262.61 \text{ hm}^3$, pero en la recarga potencial, evapotranspiración real y precipitación al año con menor volumen registrado fue el 2002 con $3,867.50 \text{ hm}^3$, $16,554.77 \text{ hm}^3$ y $25,604.81 \text{ hm}^3$ respectivamente.

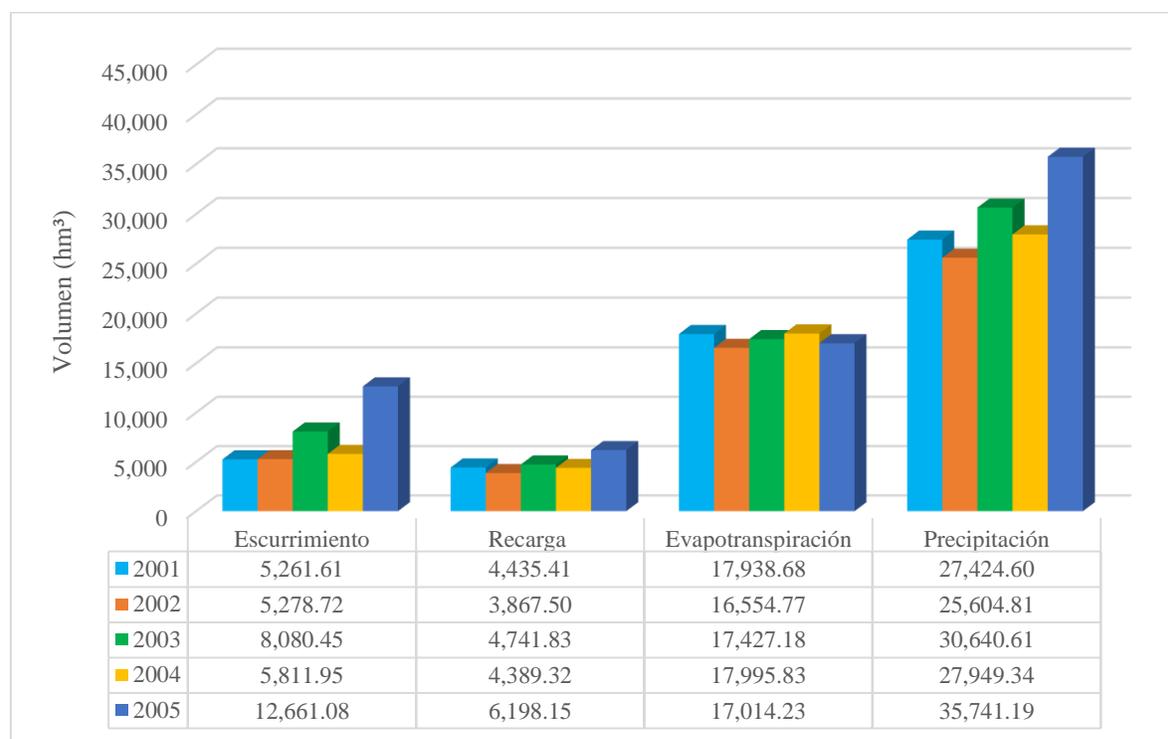


Figura 6.10.- Análisis del volumen de aportación de cada parámetro del ciclo hidrológico del periodo (2001 -2005) en la cuenca Alto Grijalva

En el periodo 2006 - 2009 se presentó una variación anual con respecto a los valores máximos para cada parámetro del ciclo hidrológico, como se puede observar en la figura 6.11 el volumen de escurrimiento superficial máximo fue en el año 2007 con $10,146.99 \text{ hm}^3$, el

volumen de precipitación y recarga potencial máximo fue de 39,708.32 hm^3 , y 8,954.62 Hm^3 respectivamente en el año 2008 y el volumen máximo de evapotranspiración real fue en el año 2006 con 18,887.62 hm^3 ,. El año que presentó valores mínimos en este periodo fue el 2009 con 6,316.55 hm^3 , de escurrimiento superficial, 3,570.12 hm^3 , en el recarga potencial y 27,300.28 hm^3 , de precipitación. Únicamente para la evapotranspiración real el volumen mínimo registrado fue en el año 2007 con 16,269.58 hm^3 ,.

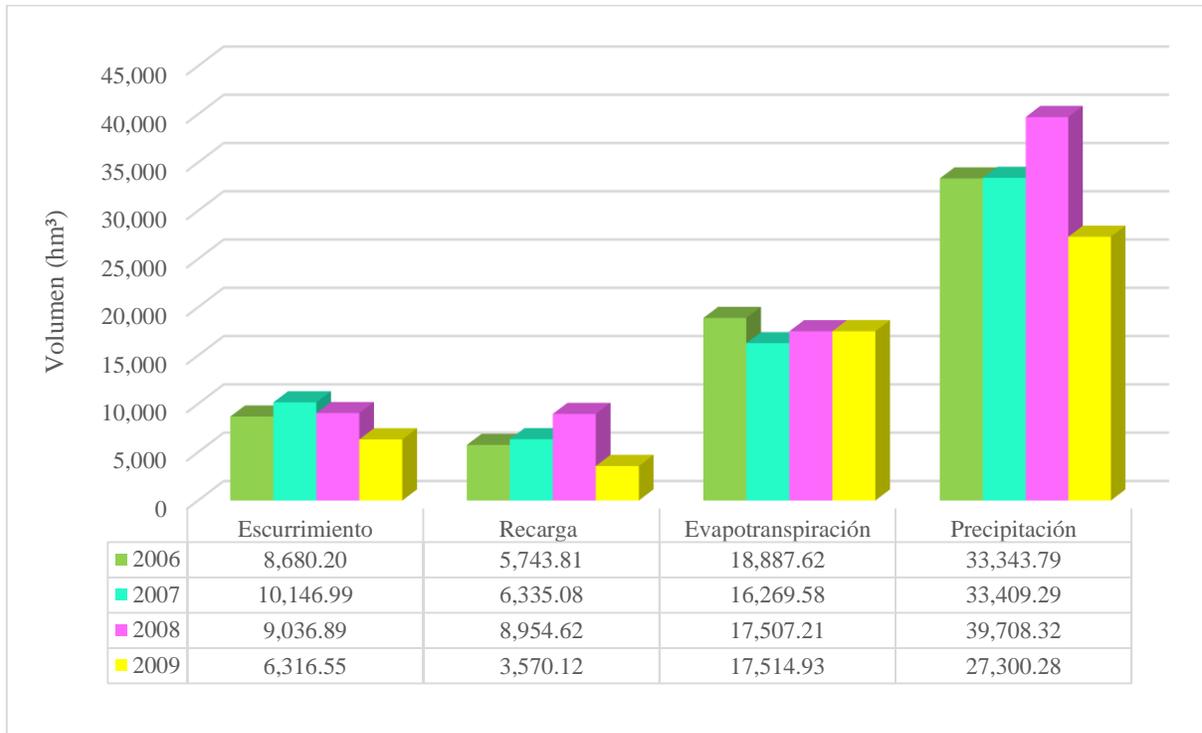


Figura 6.11.- Análisis del volumen de aportación de cada parámetro del ciclo hidrológico del periodo (2006 -2009) en la cuenca Alto Grijalva

En el análisis del último periodo comprendido del 2010 – 2015 (figura 6.12) se encontró que el volumen escurrimiento superficial máximo fue en el año 2010 con 15,199.83 hm^3 , y la mínima de 7,921.03 hm^3 en el año 2012. El volumen de la recarga potencial máxima se presentó en 2010 con 9,830.97 hm^3 y la mínima en el año 2015 con 3,295.00 hm^3 . Para este periodo la evapotranspiración real máxima fue de 18,695.64 hm^3 en el 2014 y la mínima de 16,392.30 hm^3 en el 2011. El año con mayor volumen de precipitación fue el año 2010 con 41,925.48 hm^3 y el volumen mínimo se presentó en el 2015 con 25,351.28 hm^3 .

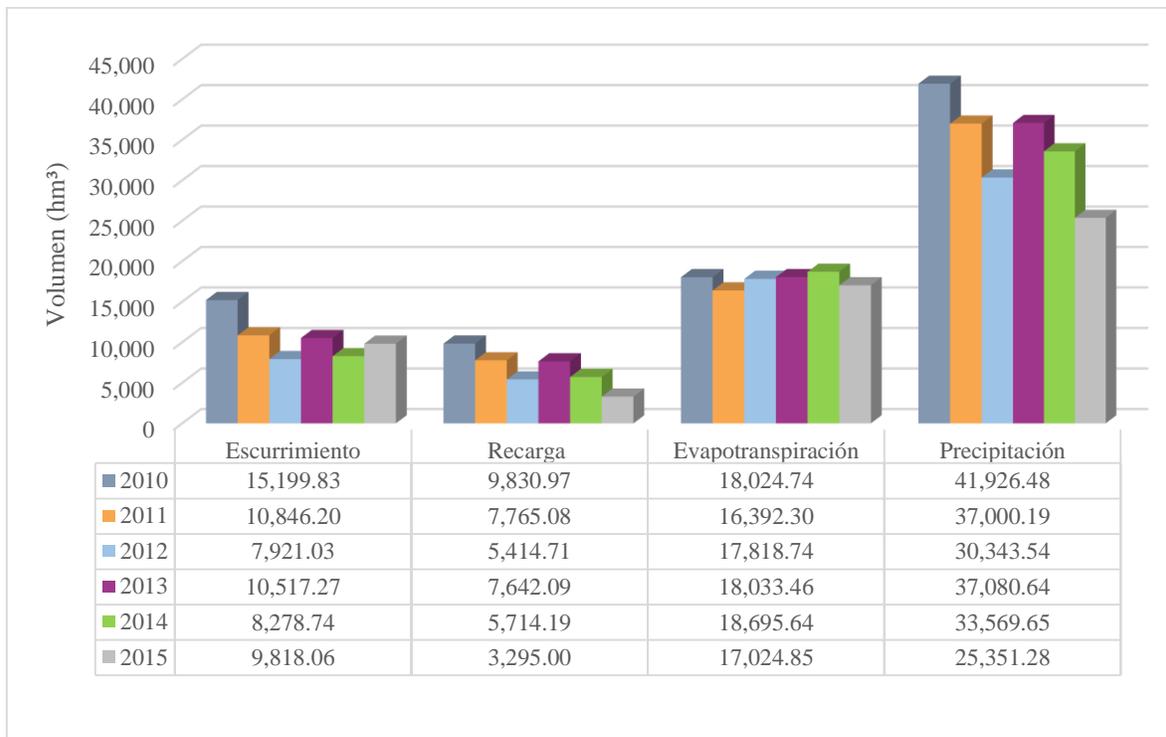


Figura 6.12.- Análisis del volumen de aportación de cada parámetro del ciclo hidrológico del periodo (2010 -2015) en la cuenca Alto Grijalva

Para el análisis de los volúmenes en relación con el grupo hidrológico del suelo se realizó la extracción y gráfica de los volúmenes de aportación para cada periodo (2001 – 2005), (2006 -2009) y (2010 – 2015). El grupo hidrológico II genero mayor volumen de aportación en los 3 periodos de los cuales en el periodo 2010 – 2015 presento los volúmenes máximos de escurrimiento superficial, recarga potencial y evapotranspiración real con $8,901.67 \text{ hm}^3$, 5862.73 hm^3 y $15,811.98 \text{ hm}^3$ respectivamente (figura 6.13 – 6.15). Seguido del grupo hidrológico III en el mismo periodo con 986.76 hm^3 , 502.43 hm^3 y 1492.78 hm^3 respectivamente para cada parámetro. Por otro lado, el grupo I registró los volúmenes menores en los 3 periodos, siendo el periodo 2001 – 2005 los volúmenes mínimos de escurrimiento superficial, recarga potencial y evapotranspiración con 0.16 Hm^3 , 0.10 Hm^3 y 0.17 hm^3 respectivamente.

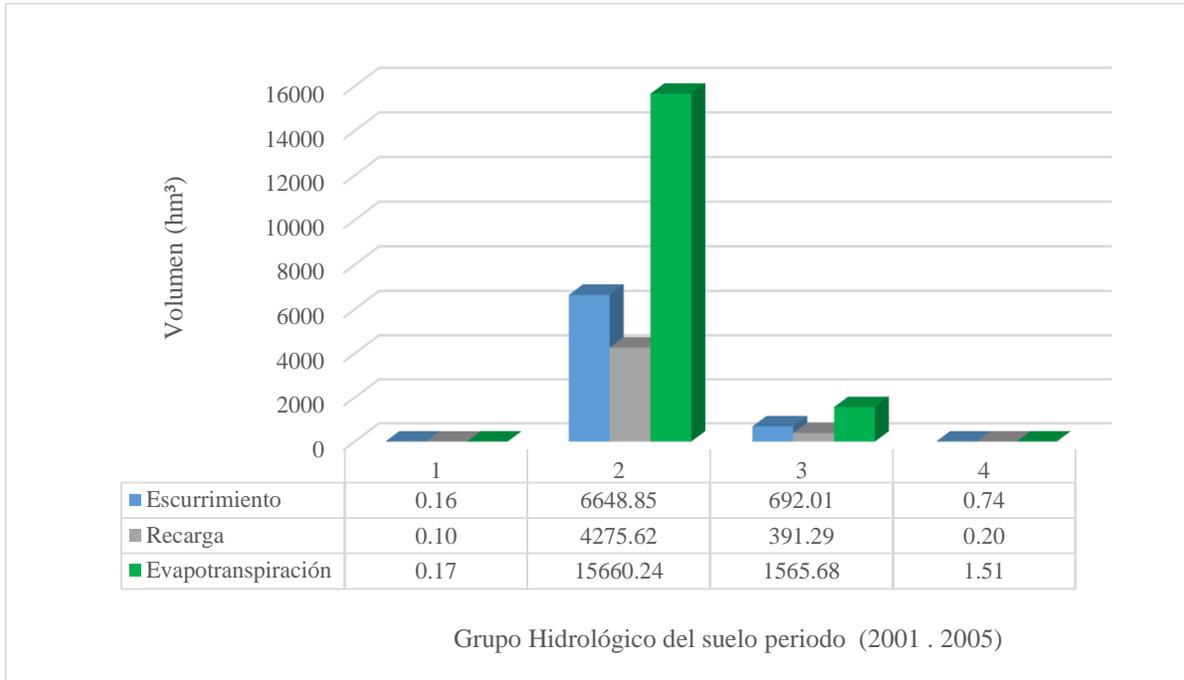


Figura 6.13.- Análisis de los volúmenes de aportación con respecto a los grupos hidrológicos del suelo del periodo (2001 -2005) en la cuenca Alto Grijalva

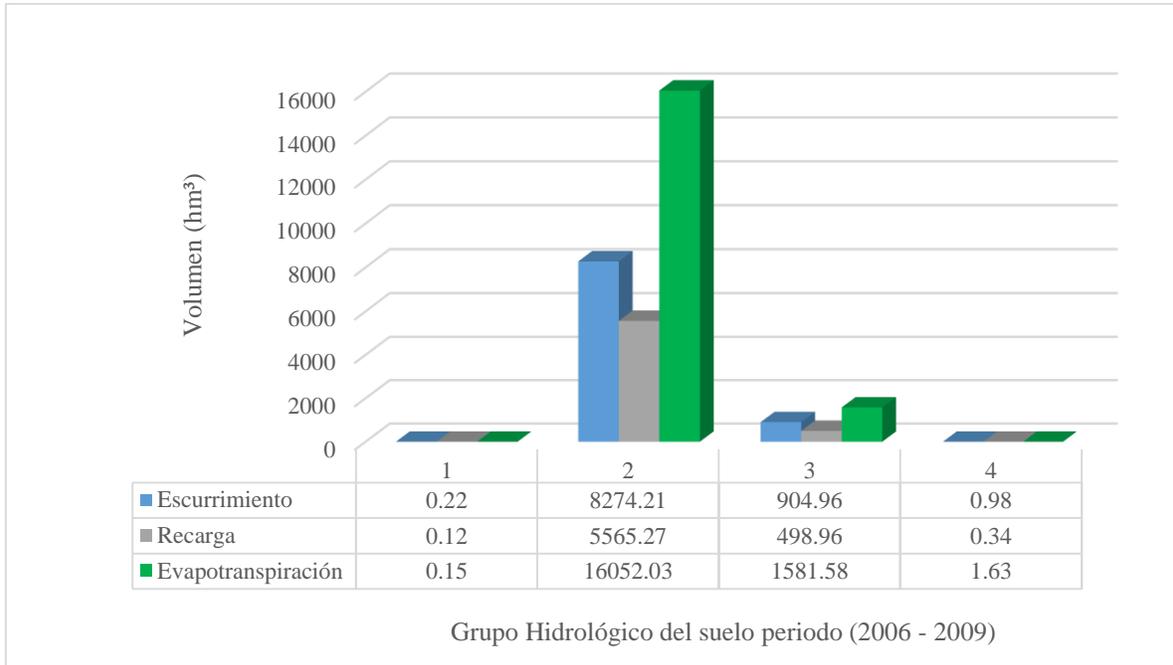


Figura 6.14.- Análisis de los volúmenes de aportación con respecto a los grupos hidrológicos del suelo del periodo (2006 -2009) en la cuenca Alto Grijalva

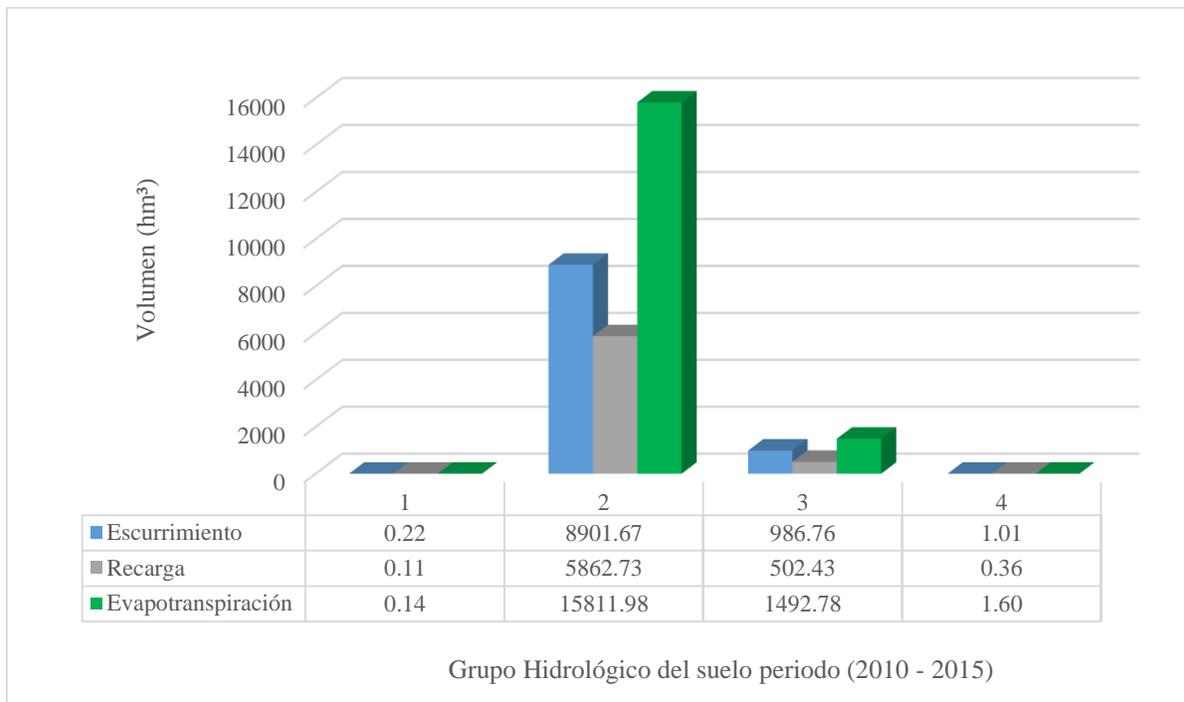


Figura 6.15.- Análisis de los volúmenes de aportación con respecto a los grupos hidrológicos del suelo del periodo (2010 -2015) en la cuenca Alto Grijalva

Los resultados anteriores están altamente relacionados con la superficie que posee cada grupo hidrológico del suelo por lo que se realizó el análisis de la relación volumen/superficie para conocer el grupo hidrológico del suelo que favorece en cada parámetro del ciclo hidrológico, (figura 6.16 – 6.18), para los tres periodos (2001 – 2005), (2006 – 2009) y (2010 – 2015). En los cuales se observó que el grupo (1) favorece el esguerrimiento superficial con $0.60 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$, $0.84 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$, y $0.82 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$ respectivamente, al igual para la recarga potencial el grupo (1) favorecida con $0.38 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$, $0.44 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$ y $0.42 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$ respectivamente para cada periodo. La evapotranspiración real se ve favorecido con el grupo (2) y (4), en el periodo (2001 – 2005) el grupo (2) favorece con $0.94 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$, para el periodo (2006 – 2009) favorece el grupo (4) con $0.97 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$ y por último el periodo 2010 -2015 favorece los dos grupos hidrológicos (2) y (4) ambos con $0.95 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$.

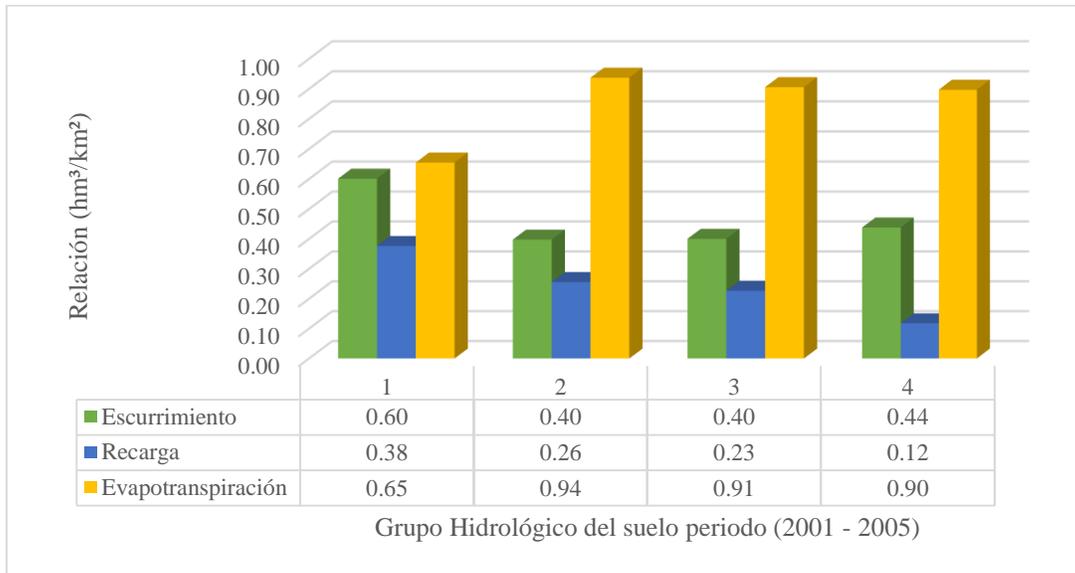


Figura 6.16.- Relación volumen/superficie del grupo hidrológico del suelo periodo (2001 – 2005) en la cuenca Alto Grijalva

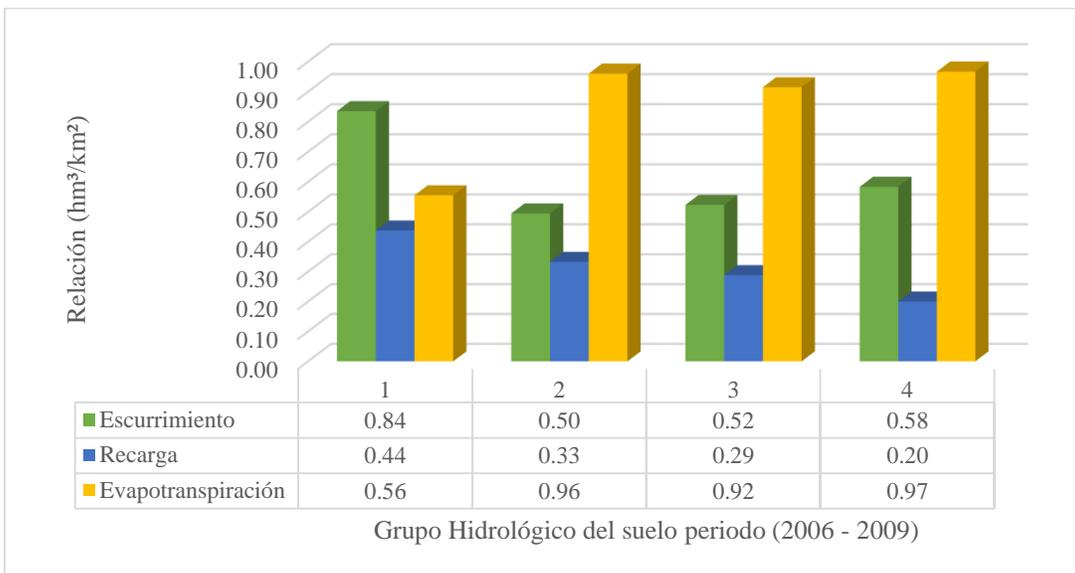


Figura 6.17.- Relación volumen/superficie del grupo hidrológico del suelo periodo (2006 –2009) en la cuenca Alto Grijalva

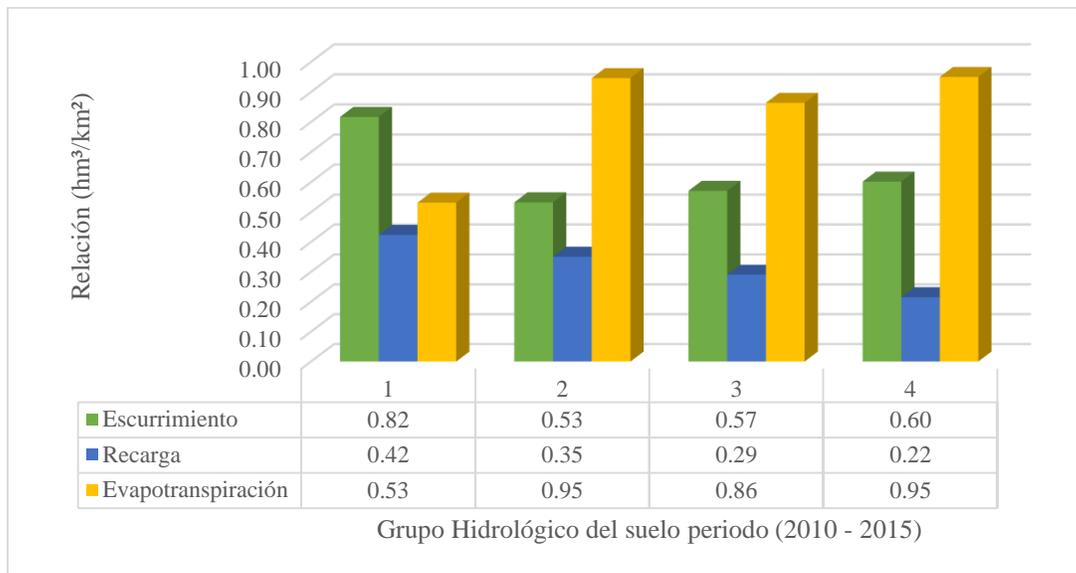


Figura 6.18.- Relación volumen/superficie del grupo hidrológico del suelo periodo (2010 – 2015) en la cuenca Alto Grijalva

Para el análisis de los volúmenes de aportación en relación a los usos y coberturas de suelo, se realizó la extracción y gráfica de los volúmenes de aportación para cada periodo (2001 – 2005), (2006 -2009) y (2010 – 2015) con respecto a cada extensión territorial nacional debido a la incertidumbre de los datos disponibles en el territorio de Guatemala, es importante mencionar que los resultados presentados a continuación están altamente relacionados con la extensión territorial que poseen dentro de la cuenca para cada nación (tabla 5-1), por tal motivo se realizó un análisis de relación volumen sobre superficie, para conocer el uso de suelo que satisface más los parámetros del ciclo hidrológico.

En el periodo (2001 – 2005) en México (figura 6.19), la cobertura de suelo con mayor aportación volumétrica en el escurrimiento superficial y la recarga potencial fue la cobertura forestal con 2392.08 hm^3 y 1558.65 hm^3 respectivamente. Mientras que, para la evapotranspiración real la agricultura generó mayor volumen de aportación con 5595.98 hm^3 .

En el análisis de la relación volumen/superficie encontramos que el uso de suelo que favorece la escorrentía durante este periodo es el cuerpo de agua con 1.28 (hm^3/km^2) (figura 6.20) seguido del uso urbano con 0.73 (hm^3/km^2) y dejando en tercer lugar al uso forestal con 0.46 (hm^3/km^2), mientras que para la recarga y evapotranspiración real el uso forestal favorece con

0.30 (hm^3/km^2) y 1.02 (hm^3/km^2) respectivamente, seguido de la agricultura con 0.22 (hm^3/km^2) y 0.94 (hm^3/km^2) respectivamente.

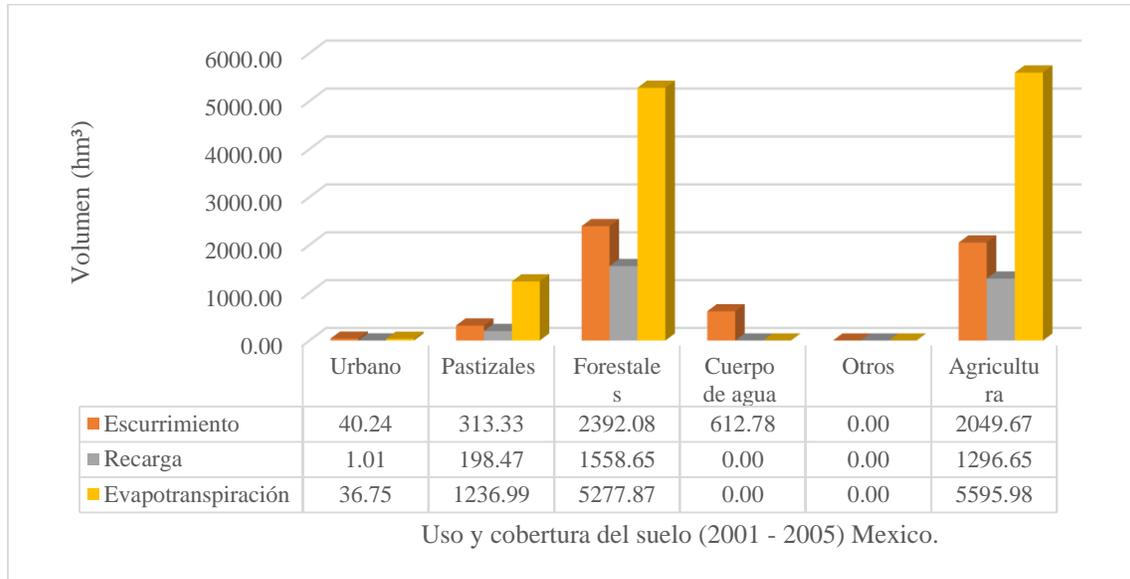


Figura 6.19.- Análisis de los volúmenes de aportación con respecto al uso y cobertura del suelo periodo (2001 -2005) en la cuenca Alto Grijalva (México)

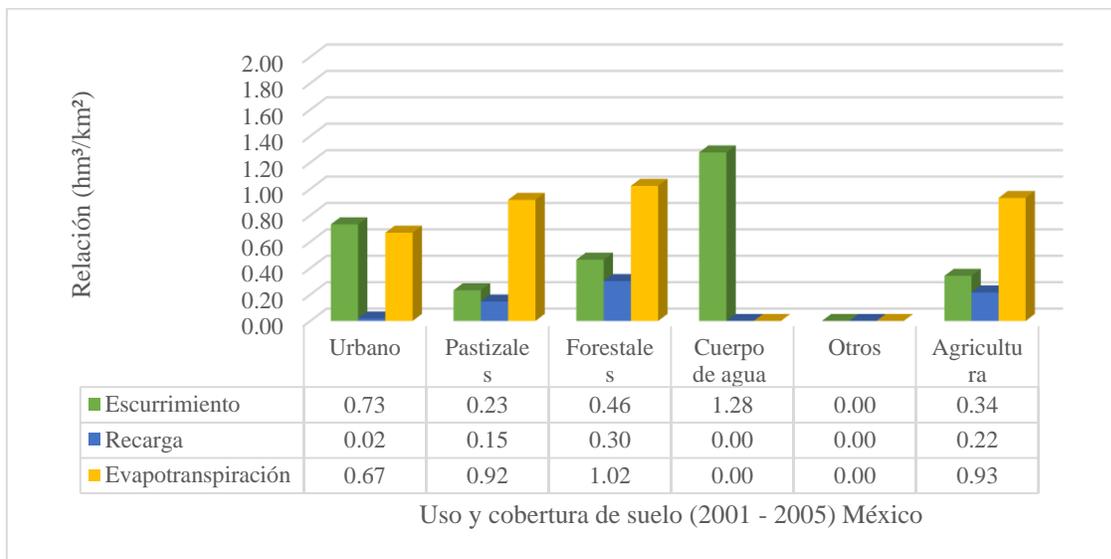


Figura 6.20.- Relación volumen/superficie de los usos y coberturas del suelo periodo (2001 – 2005) en la cuenca Alto Grijalva (México)

Para el periodo 2006 – 2009 la cobertura de suelo con mayor volumen de aportación en esguerrimieuto superficial y evapotranspiración real es el uso agrícola con 2677.33 hm^3 y

5700.08 hm^3 respectivamente, mientras que para la recarga potencial el uso forestal generó mayor aporte con 3286.94 hm^3 (figura 6.21).

En el análisis de la relación volumen/superficie para este periodo se observó que los usos de suelo que favorecen la escorrentía son el cuerpo de agua, el uso urbano y el uso forestal con 1.42 (hm^3/km^2), 1.15 (hm^3/km^2) y 0.48 (hm^3/km^2) respectivamente (figura 6.13), mientras que para la recarga fue el uso forestal y la agricultura con 0.37 (hm^3/km^2) y 0.28 (hm^3/km^2) respectivamente, por otro lado la evapotranspiración real se vio favorecida en la cobertura forestal y pastizales con 1.05 (hm^3/km^2) y 0.98 (hm^3/km^2) respectivamente.

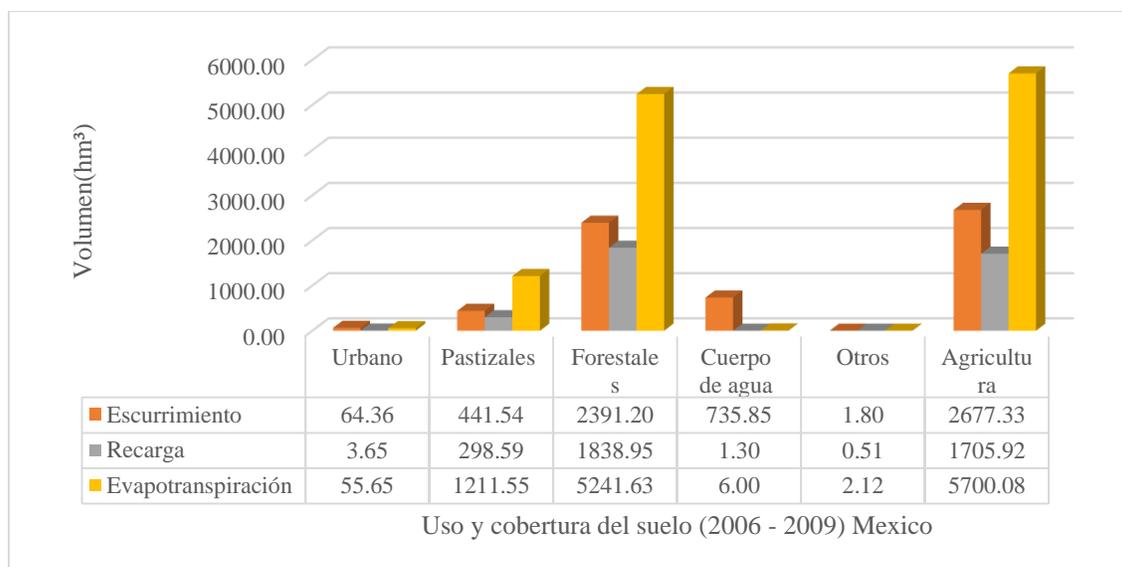


Figura 6.21.- Análisis de los volúmenes de aportación con respecto al uso y cobertura del suelo periodo (2006 -2009) en la cuenca Alto Grijalva (México)

En el último periodo (2010 – 2015) se presentaron aportes superiores en la cuenca Alto Grijalva en el territorio mexicano en comparación a los periodos anteriores, (figura 6.14). La cobertura forestal generó los mayores volúmenes de aportación en los tres parámetros del ciclo hidrológico con 3455.51 hm^3 de esguerrimiento superficial, 2143.04 hm^3 de recarga potencial y 5698.33 hm^3 en la evapotranspiración real.

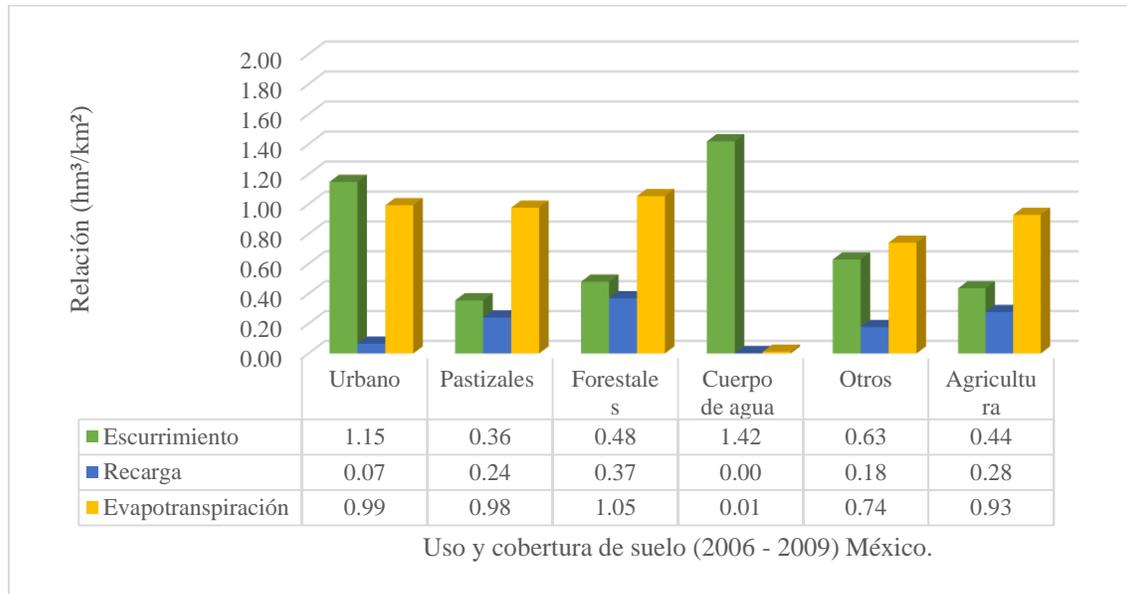


Figura 6.22.- Relación volumen/superficie de los usos y coberturas del suelo periodo (2006 – 2009) en la cuenca Alto Grijalva (México)

En el análisis de volumen / superficie (figura 6.15), los cuerpos de agua, los pastizales y la cobertura forestal favorecieron el escurrimiento con $1.67 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$, $0.82 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$ y $0.61 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$, mientras que para la recarga potencial y la evapotranspiración real los usos de suelo que favorecieron de nueva cuenta fueron los pastizales con $0.50 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$ y $1.45 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$ seguido de la cobertura forestal con $0.38 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$ y $1.00 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$ respectivamente.

En el análisis volumétrico en el territorio de Guatemala durante el periodo (2001 -2005) se observa que los pastizales generaron mayor aportación en el escurrimiento y recarga potencial con 748.17 hm^3 y 636.34 hm^3 respectivamente, mientras que para la evapotranspiración real el mayor aporte fue generado por la cobertura forestal con 1966.67 hm^3 (figura 6.16).

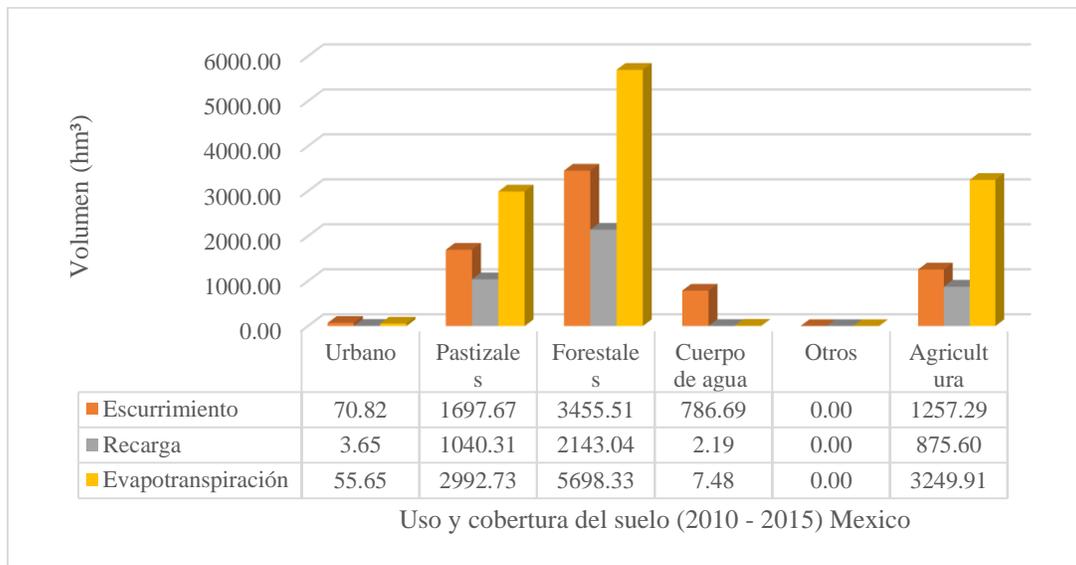


Figura 6.23.- Análisis de los volúmenes de aportación con respecto al uso y cobertura del suelo periodo (2010 -2015) en la cuenca Alto Grijalva (México)

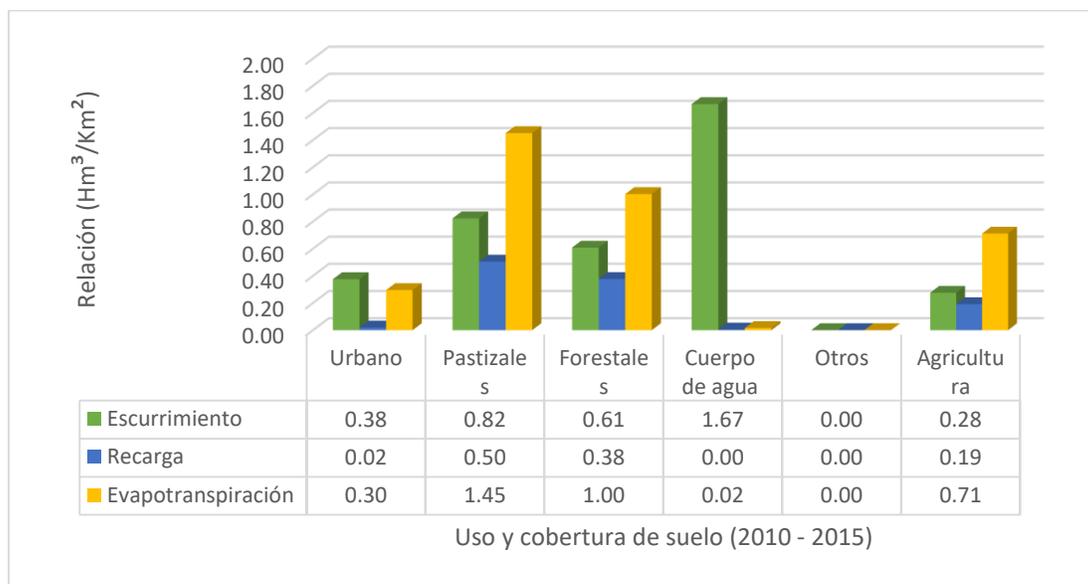


Figura 6.24.- Relación volumen/superficie de los usos y coberturas del suelo periodo (2010 – 2015) en la cuenca Alto Grijalva (México)

En el análisis de la relación de volumen / superficie para Guatemala durante el periodo (2001 - 2005) (figura 6.17) se observó que el uso urbano y la agricultura favorecieron el escurrimiento con $0.65 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$ y $0.40 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$ respectivamente. Mientras que para la recarga potencial fue la agricultura con $0.34 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$ seguida de los pastizales con $0.33 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$. Por otro la cobertura forestal y los pastizales favorecieron la evapotranspiración real con $1.00 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$ y $0.97 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$ respectivamente.

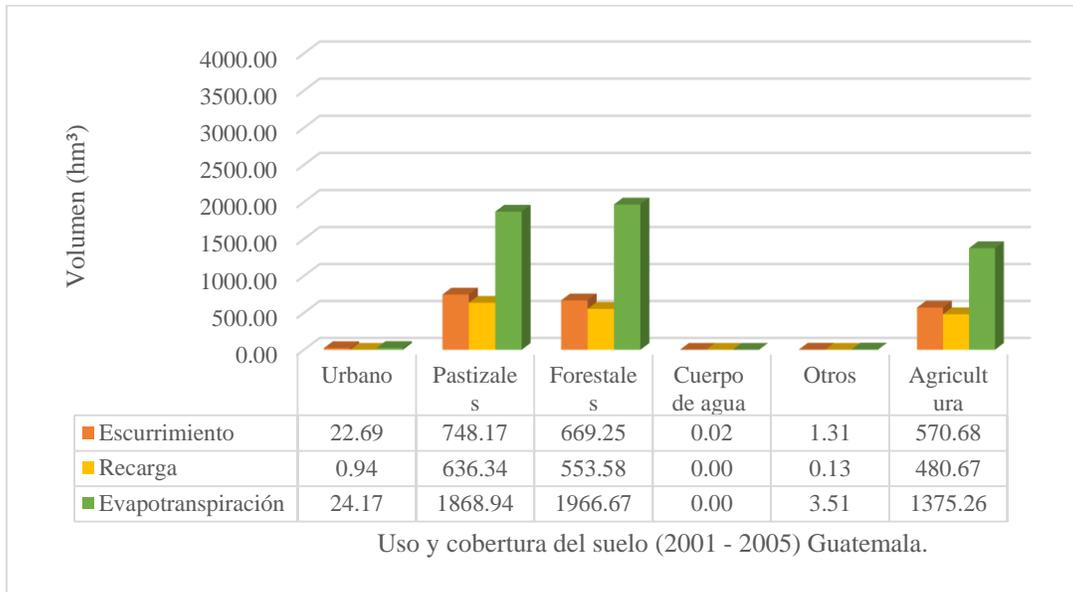


Figura 6.25.- Análisis de los volúmenes de aportación con respecto al uso y cobertura del suelo periodo (2001 -2005) en la cuenca Alto Grijalva (Guatemala)

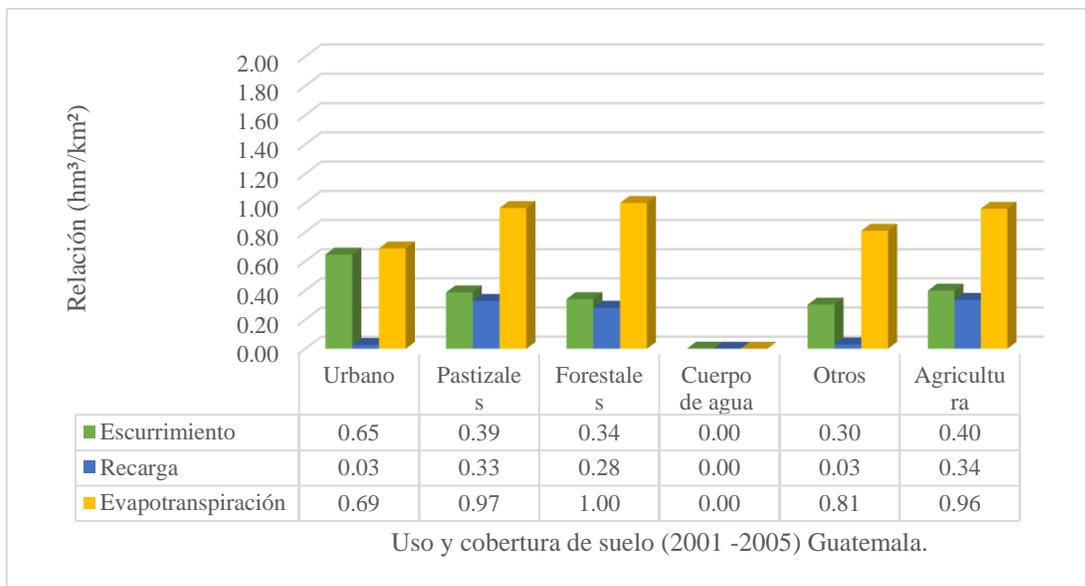


Figura 6.26.- Relación volumen/superficie de los usos y coberturas del suelo periodo (2001 – 2005) en la cuenca Alto Grijalva (Guatemala)

Para el análisis de los volúmenes de aportación para el periodo 2006 -2009 se observa (figura 6.18) que la agricultura generó valores máximos con 2721.72 hm³ en el escurrimiento superficial, 1581.02 hm³ en la recarga potencial y 3721.66 hm³ en la evapotranspiración real. Como se puede observar para este periodo en el territorio de Guatemala la agricultura contiene más del 66.28% del territorio (tabla 5-6).

La relación volumen /superficie para el periodo (2006 – 2009) en Guatemala se observó que en los tres parámetros del ciclo hidrológico, el escurrimiento superficial, la recarga potencial y la evapotranspiración real se favorecieron principalmente por la agricultura con 0.76 (hm^3/km^2), 0.44 (hm^3/km^2) y 1.26 (hm^3/km^2) respectivamente, seguido de la cobertura forestal con 0.36 (hm^3/km^2), 0.37 (hm^3/km^2) y 1.08 (hm^3/km^2) respectivamente (figura 6.19).

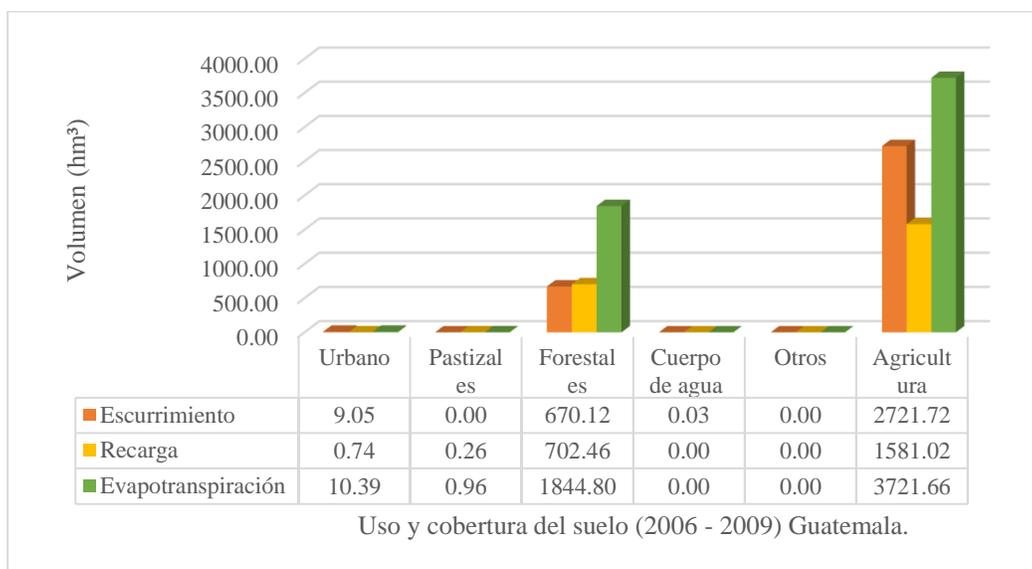


Figura 6.27.- Análisis de los volúmenes de aportación con respecto al uso y cobertura del suelo periodo (2006 -2009) en la cuenca Alto Grijalva (Guatemala)

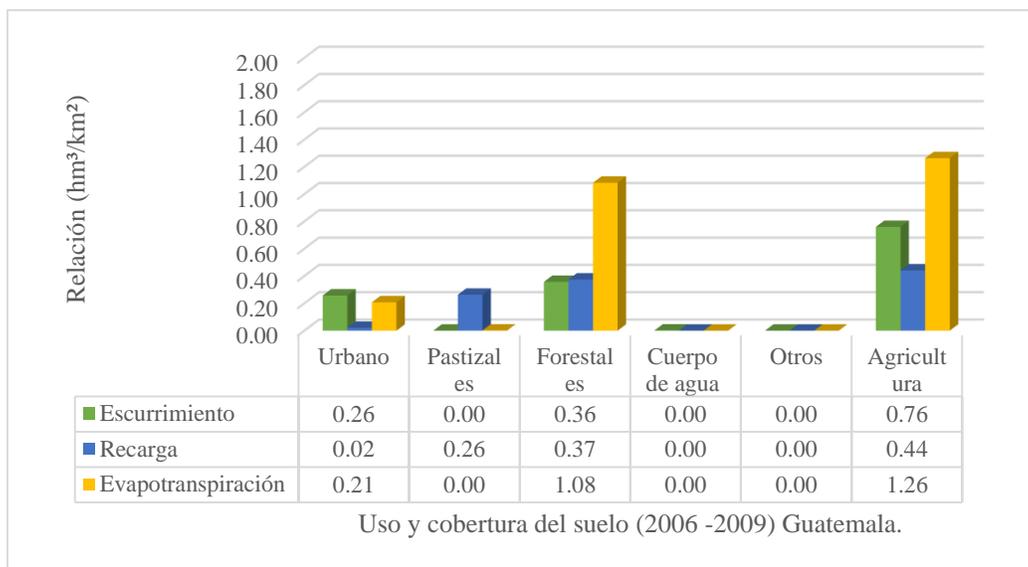


Figura 6.28.- Relación volumen/superficie de los usos y coberturas del suelo periodo (2006 – 2009) en la cuenca Alto Grijalva (Guatemala)

Por último en el periodo (2010 -2015) en el análisis volumétrico con respecto al uso y cobertura del suelo se observa que el uso forestal generó mayor aporte (figura 6.29) con 1103.72 hm³ en el escurrimiento superficial, 957.83 hm³ en la recarga potencial y 2326.61 hm³ en la evapotranspiración real. Por otro lado, en el análisis de la relación volumen/superficie se observa que los pastizales generaron mayor aporte con 0.92 (hm³/km²) en el escurrimiento superficial, 0.82 (hm³/km²) en la recarga potencial y 1.94(hm³/km²) en la evapotranspiración real, seguido de la cobertura forestal con aportaciones de 0.65 (hm³/km²) , 0.56 (hm³/km²)y 1.37 (hm³/km²) respectivamente (figura 6.21).

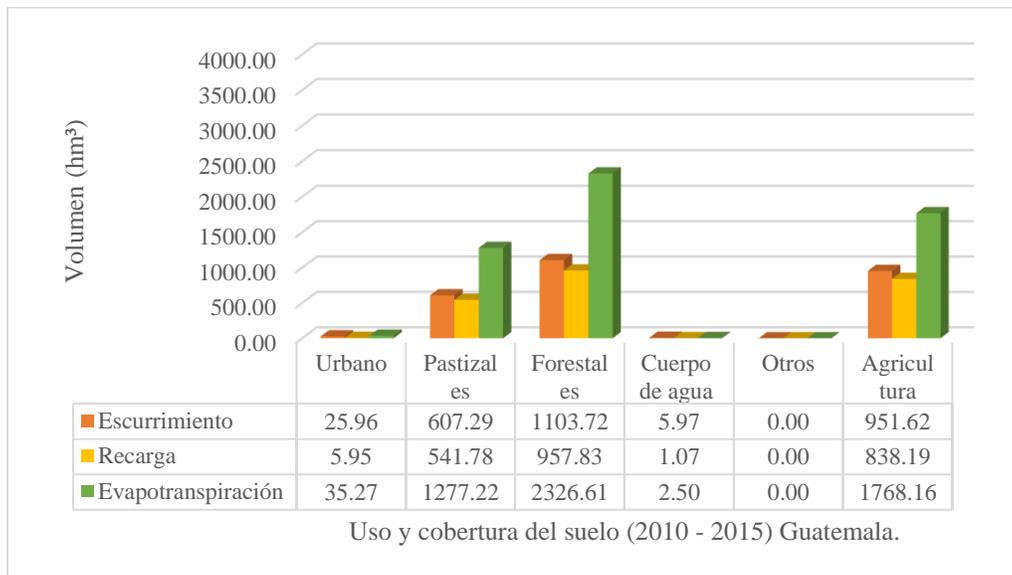


Figura 6.29. Análisis de los volúmenes de aportación con respecto al uso y cobertura del suelo periodo (2010 -2015) en la cuenca Alto Grijalva (Guatemala)

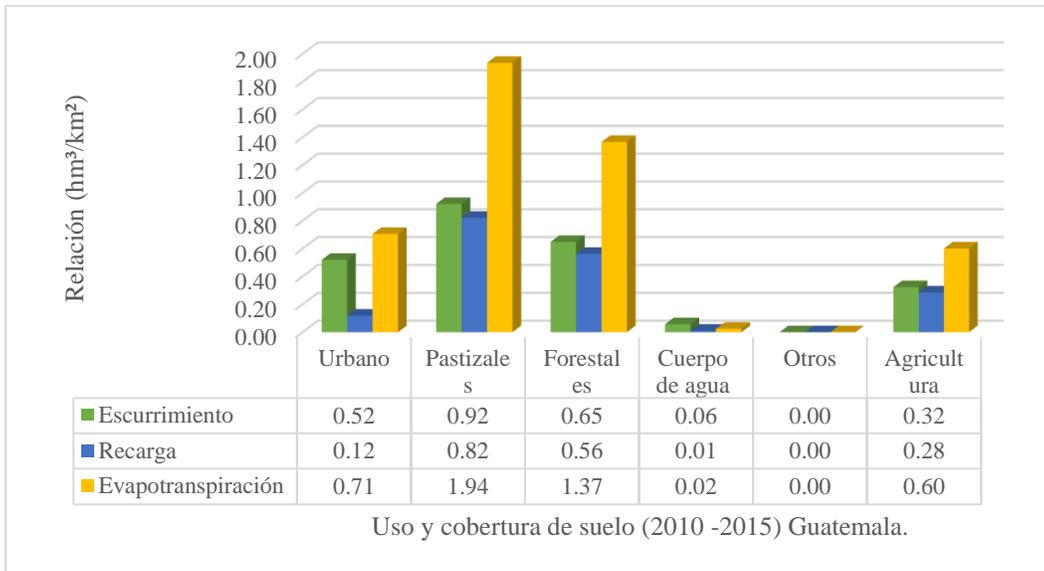


Figura 6.30. Relación volumen/superficie de los usos y coberturas del suelo periodo (2010 – 2015) en la cuenca Alto Grijalva (Guatemala)

Capítulo 7 . Discusión

El año 2010 registró una lluvia total de $41,926.48 \text{ hm}^3$ (figura 6.12), esta precipitación es la más alta del periodo de estudio 2001 – 2015 y en consecuencia en este mismo año se registró un volumen de escurrimiento superficial de $15,199.83 \text{ hm}^3$ el cual es mayor en comparación a los diferentes años del periodo de estudio, este volumen representa un 39% del volumen de precipitación del año 2010. El periodo 2010 – 2015 se caracterizó por ser el periodo donde hubo mayor escurrimiento superficial en la cuenca Alto Grijalva con un 30% del volumen precipitado. Los periodos 2001 – 2005 y 2006 – 2009 (figura 6.10 y 6.11) obtuvieron el 25% de escurrimiento superficial del volumen precipitado, este porcentaje es bastante próximo al obtenido en el balance hídrico realizado por Ketema y Broder, (2009) donde se encontró que de la precipitación anual el 20% representa al escurrimiento superficial. Estos porcentajes se cuantificaron del total de los volúmenes por periodo cabe mencionar que la variabilidad espacial y temporal de este parámetro en la cuenca indica que existen zonas donde estos porcentajes son menores con el 1% al 5% y otras donde el rango es de entre 60% y 100% este último porcentaje se debe a las zonas ubicadas en los cuerpos de agua donde el total de la precipitación se vuelve escurrimiento (figura 6.1). Los porcentajes de escurrimiento superficial que cuentan con mayor extensión territorial son del 30% al 50% en los tres periodos, mismos valores predominantes se reportan en el estudio de la estimación de escurrimiento superficial realizado por Flores *et al.*, (2003). El comportamiento de la variabilidad espacial y temporal de las láminas de escurrimiento superficial varían de acuerdo a cada periodo de estudio, en la parte norte de cuenca para el periodo 2001 – 2005 (figura 6.1) las láminas de escurrimiento superficial van de los 22 mm – 350 mm las cuales menores respecto al periodo 2006 – 2009 (figura 6.1) con láminas del 16 mm – 350 mm, sin embargo, para el periodo 2010 – 2015 (figura 6.1) tuvo un nuevo incremento a 44 mm – 350 mm. El comportamiento es distinto para la zona este y oeste de la cuenca donde para el periodo 2001 – 2005 se presentaron láminas de 22 mm – 350 mm menores con respecto al periodo 2006 – 2009 y 2010 -2015 con láminas de 100 mm – 600 mm. Por otro lado, en la zona sur de la cuenca se presentan láminas superiores a las zonas anteriores, en el periodo 2001 -2005 se presentaron láminas que van de los 600 mm -1500 mm las cuales son menores con respecto al periodo 2006 – 2009 donde los valores van de los 800 mm – 2000 mm, y estas aumentaron

para el periodo 2010 – 2015 con 600 mm – 3000 mm. La variabilidad de las láminas de escurrimiento en los distintos periodos de estudios se debe a la distribución de la precipitación en el espacio y tiempo en donde se presentan precipitaciones mínimas las láminas son menores en comparación a las zonas donde la precipitación fue mayor y por ende la lámina de escurrimiento es mayor. En la relación de la fracción de la lluvia que se convierte en escurrimiento se analizó que en la parte norte de la cuenca en el periodo (2001 – 2005) (figura 6.4) los valores van del 0.01 – 0.25 al igual que en la parte oeste donde los valores van de 0.01 a 0.20, mientras que en la parte este de la cuenca incrementa el valor (0.10 – 0.30), en conjunto los coeficientes de las diferentes zonas son menores en comparación al sur donde la fracción aumenta a 0.30 – 0.60, los coeficientes máximos obtenidos se presentan principalmente en zonas urbanas y cuerpos de agua donde todo lo que se precipita se vuelve escurrimiento. Para el periodo 2006 – 2009 (figura 6.4) los coeficientes mínimos (0.01 – 0.20) se continuaron registrando al norte de la cuenca, al igual que al oeste (0.05 – 0.20), los coeficientes incrementan (0.30 – 0.50) al sur de la cuenca, mientras que las máximas (0.60 – 1.05) se ubican en las zonas urbanas y cuerpos de agua. El comportamiento para el periodo 2010 – 2015 (figura 6.4) es similar debido que el norte de la cuenca se encuentran los valores más bajos principalmente entre Comitán de Domínguez y La Trinitaria (0.03 – 0.30) al igual que al oeste (0.05 – 0.25), mientras que al oeste y sur los valores van de 0.25 a 0.50, los valores máximos (0.60 – 1.04) se ubican en las zonas urbanas donde el coeficiente de infiltración es bajo favoreciendo al escurrimiento y en los cuerpos de agua donde todo lo que se precipita escurre.

En el análisis del volumen de escurrimiento superficial por grupo hidrológico del suelo, se encontró que el volumen de escurrimiento superficial del grupo I pasa de 0.16 hm³ en el periodo 2001 – 2005 (figura 6.13) a 0.22 hm³ en el periodo 2006 – 2009 (figura 6.14) el cual representa un aumento del 37.5%, sin embargo para el periodo 2010 – 2015 (figura 6.15) el volumen disminuye a 0.11 el cual representa una disminución del 50%. El volumen del grupo hidrológico II paso de 6648.85 hm³ del periodo 2001 – 2005 a 8274.21 hm³ del periodo 2006 – 2009 el cual representa un aumento del 24.4%, en el periodo 2010 – 2015 continua aumentado con 8901.67 hm³ lo que equivale a un aumento del 7%. El volumen de escurrimiento superficial para el grupo hidrológico III inicio en el periodo 2001 – 2005 con 692.01 hm³ el cual aumento a 904.96 hm³ en el periodo 2006 – 2009 el cual representa un

aumento del 30% el cual continuó en aumento para el periodo 2010 – 2015 con 986.76 hm³ lo equivalente al 9%. Y por último en el volumen de escurrimiento superficial del grupo hidrológico IV pasó de 0.74 hm³ del periodo 2001 – 2005 a 0.98 hm³ del periodo 2006 – 2009 el cual representa 32% de aumento, el cual continuó en aumento para el periodo 2010 -2015 con 1.01 hm³ el cual represento el 3% de aumento. El grupo hidrológico II fue el que generó mayor volumen de escurrimiento superficial en los tres periodos sin embargo cabe mencionar que es el que tiene mayor extensión territorial dentro de la cuenca Alto Grijalva, y el de menor volumen de aportación y de extensión territorial fue grupo hidrológico I, por lo que para poder establecer una igualdad con respecto a los volúmenes de aportación se procedió a dividirlos entre el área de aportación que cada grupo hidrológico le corresponde. De este análisis podemos observar que el grupo hidrológico I es que genera mayor aportación en el periodo 2001 – 2005 (figura 6.16) este género 0.60 (hm³/km²) para el periodo 2006 – 2009 (figura 6.17) esta relación aumento a 0.84 (hm³/km²) lo que representa un incremento de 24 Hm³ mientras que para el periodo 2010 – 2015 (figura 6.18) disminuyó a 0.82 (hm³/km²) es decir 0.02 hm³ menos con respecto al periodo anterior. El segundo en generar mayor volumen de aportación debido a su relación volumen/ superficie fue el grupo hidrológico IV con 0.44(hm³/km²), 0.58(hm³/km²)y 0.60 (hm³/km²) en el periodo (2001 – 2005), (2006 – 2009) y (2010 – 2015) respectivamente, seguidos del grupo III y II para el periodo (2001 – 2005) que generaron 0.40 (hm³/km²), para el periodo 2006 – 2007 y 2010 – 2015 el tercero fue el grupo III con 0.52 (hm³/km²) y 0.57 (hm³/km²) respectivamente. Y por último el grupo II con 0.53 y 0.50 (hm³/km²) respectivamente. Es importante mencionar que en este comportamiento intervienen la variabilidad espacial y temporal de los usos de suelo y de las variables meteorológicas del periodo 2001 -2015, como se explica a continuación.

El análisis del volumen de escurrimiento superficial con respecto al uso de suelo se realizó para cada territorio nacional perteneciente a la cuenca Alto Grijalva donde en México se encontró que en el periodo 2001 – 2005 (figura 6.19) el uso forestal generó mayor volumen de aportación con 2392.08 hm³, seguido de la agricultura con 2049.67hm³ y cuerpos de agua con 612.78 hm³, ya dentro de los uso que menor volumen generó para el periodo son los

pastizales con 313.33hm^3 y el uso urbano el que generó menor volumen de aportación con 40.24 hm^3 . En el periodo 2006 – 2009 (figura 6.21) el uso de suelo que mayor volumen generó fue la agricultura con 2677.33 hm^3 el cual aumento un 30% en comparación al periodo anterior, seguido del uso forestal con 2391.20 el cual disminuyo un 1%, y los cuerpos de agua que aumentó un 20% su volumen, los usos de suelo que generaron menor volumen de escurrimiento para este periodo fueron los pastizales y el uso urbano con 441.56 hm^3 y 64.36 hm^3 respectivamente los cuales aumentaron un 40% y 59% con respecto al periodo anterior. Para el periodo 2010 – 2015 (figura 6.14) el uso de suelo que genero mayor volumen de escurrimiento superficial fue el uso forestal (3455.51 hm^3) que tuvo un aumento con respecto al periodo anterior del 44%, seguido de los pastizales (1697.67 hm^3) los cuales aumentaron un 284% y la agricultura (1257.29 hm^3) la cual disminuyo un 53% con respecto al periodo anterior. Los usos de suelo que generaron menor volumen de escurrimiento para este periodo fueron los cuerpos de agua (786.69 hm^3) y el uso urbano (70.82 hm^3) los cuales tuvieron un aumento del 6% y 10% respectivamente.

El análisis del volumen de escurrimiento superficial de Guatemala se encontró que en el periodo 2001 – 2005 (figura 6.16) fueron los pastizales que generaron mayor volumen de aportación con 748.17 hm^3 , seguido del uso forestal con 669.25 hm^3 y la agricultura con 570.68 hm^3 , y los uso que menor volumen generaron para este periodo son; el uso urbano con 22.69 hm^3 , el uso otros con 1.31 hm^3 y por último los cuerpos de agua con 0.02 hm^3 . Para el periodo 2006 – 2009 (figura 6.18) el uso de suelo que mayor volumen genero fue la agricultura con 2721.72 hm^3 el cual aumento un 376 % en comparación al periodo anterior, seguido del uso forestal con 670.12 hm^3 el cual disminuyo un 0.1%, y el uso urbano que disminuyó un 39% su volumen con respecto al periodo anterior, este periodo no tuvo registro para los pastizales y otros, mientras que para los cuerpos de agua generó únicamente 0.03 hm^3 . Para el periodo 2010 – 2015 (figura 6.21) el uso de suelo que genero mayor volumen de escurrimiento superficial fue el uso forestal (1103.72 hm^3) que tuvo un aumento con respecto al periodo anterior del 64%, seguido de la agricultura con 951.62 hm^3 el cual disminuyo 65% y los pastizales que con 607.29 hm^3 . Los usos de suelo que generaron menor volumen de escurrimiento para este periodo fueron el uso otros con 33.31 hm^3 , el uso urbano con 25.96 hm^3 y cuerpo de agua con 5.97 hm^3 los cuales aumentaron más del 100% con

respecto al periodo anterior. De este análisis se encuentra que el uso de suelo que genera mayor aporte de escurrimiento superficial en la cuenca analizada del lado de México es el uso forestal y en Guatemala es la agricultura seguido del uso forestal, sin embargo, se debe considerar intervienen diferentes factores en este análisis como la extensión territorial con la que cuentan cada uso de suelo, así como las variables meteorológicas de la zona. Para poder establecer una igualdad con respecto a los volúmenes de aportación de cada uso de suelo se procedió a dividirlos entre el área de aportación que cada uso de suelo le corresponde. De este análisis podemos observar que el área de la cuenca en el lado de en México los cuerpos de agua generan mayor volumen de escurrimiento superficial de $1.28 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$, $1.42 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$ y $1.67 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$ en el periodo 2001 – 2005, 2006 -2009 y 2010 – 2015 respectivamente. Seguido del uso urbano con $0.73 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$ y $1.15 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$ para el periodo 2001 – 2005 y 2006 – 2009 respectivamente, ya que para el periodo 2010 -2015 fue el uso forestal con $0.82 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$. El tercer uso de suelo que mayor volumen de escurrimiento superficial aporta es el forestal para el periodo 2001 – 2005 y 2010 -2015 con $0.46 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$ y $0.61 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$, mientras que para el 2006 – 2009 fue el uso otros con $0.63 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$. Y el cuarto uso de suelo que mayor volumen de escurrimiento superficial genero para el periodo 2001 – 2005 fue la agricultura con $0.34 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$, el periodo 2006 – 2009 fue el uso forestal con $0.48 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$ y para el periodo 2010 – 2015 fue el uso urbano con $0.38 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$. Para el territorio de Guatemala el comportamiento fue distinto como se observa los usos que generaron mayor volumen de escurrimiento superficial fueron el uso urbano para el periodo 2001 – 2005 con $0.65 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$, para el periodo 2006 – 2009 fue la agricultura con $0.76 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$ y para el periodo 2010 – 2015 fueron los pastizales $0.92 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$, el segundo uso fue la agricultura con $0.40 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$ para el periodo 2001-2005 y el uso forestal con $0.36 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$ y $0.65 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$ para los periodos 2006 – 2009 y 2010 – 2015. El tercer uso de suelo fueron los pastizales con 0.39 para el periodo 2001 – 2005 y uso urbano con $0.26 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$ y $0.52 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$ para el periodo 2006 – 2009 y 2010 – 2015. Y El cuarto uso de suelo fue el forestal para el periodo 2001 -2005 con $0.34 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$, el

periodo 2006 – 2009 no presento más usos de aportación y para el periodo 2010 – 2015 fue los cuerpos de agua con $0.06(\text{hm}^3/\text{km}^2)$. Como se menciona en Ketema y Broder, (2009) la escorrentía aumenta a medida que el suelo se vuelve más pesado y se encuentre la ladera alta y zona de alta precipitación.

Como ya se mencionó anteriormente el año 2010 se caracterizó por ser la precipitación más alta del periodo de estudio (2001 – 2015) y en consecuencia en este mismo año se registró un volumen de recarga potencial de $9,830.97 \text{ hm}^3$ el cual es mayor en comparación a los diferentes años del periodo de estudio, este volumen representa un 23% del volumen de precipitación del 2010. El periodo 2010 – 2015 se caracterizó por ser el periodo donde hubo mayor recarga potencial en la cuenca Alto Grijalva con un 19% del volumen precipitado. El periodo 2001 – 2005 (figura 6.19) obtuvo el 16% y 2006 – 2009 (figura 6.20) el 18% de recarga potencial del volumen precipitado. Valores similares se obtuvieron en el trabajo de Timothy *et al.*, (2019) quienes obtuvieron que del 19% al 26% el volumen de precipitación se convierte en recarga. Estos porcentajes son cuantificados del total de los volúmenes por periodo cabe mencionar que la variabilidad espacial y temporal de este parámetro (figura 6.2, 6.8 y 6.14) en la cuenca indica que existen zonas donde estos porcentajes son menores con el 0% al 3% y otras donde el rango incrementa a más del 35%. Los porcentajes que cuentan con mayor extensión territorial son del 15% al 30%. El comportamiento de la variabilidad espacial y temporal de las láminas de recarga potencial varían de acuerdo a cada periodo de estudio en la parte norte para el periodo 2001 – 2005 (figura 6.2) las láminas de recarga potencial van de los 0 mm a los 200 mm, menores respecto al periodo 2006 – 2009 (figura 6.2) y periodo 2010 – 2015 (figura 6.2) que van de 0 mm a 300 mm. El comportamiento es distinto para la zona este de la cuenca donde para el periodo 2001 – 2005 se presentaron láminas de 100 mm a 500 mm y al oeste con 100 mm a 600 mm menores con respecto al periodo 2006 – 2009 al este con láminas de 100 mm a 400 mm y al oeste mayores de 200 mm a 600 mm, aumentando para el periodo 2010 – 2015 con láminas al este que van de los 200 mm a 500 mm y al oeste de 300 mm – 600 mm. Por otro lado, en la zona sur de la cuenca se presentan láminas superiores a las zonas anteriores en el periodo 2001 -2005 se presentaron láminas de recarga potencial que van de los (500 mm -1448 mm), menores con respecto al periodo 2006 – 2009 donde los valores van de los 500 mm – 1562 mm, las cuales aumentaron para el periodo 2010 – 2015 (500mm – 1759 mm). La variabilidad de las láminas

de escurrimiento en los distintos periodos de estudios se debe a la distribución de la precipitación en el espacio en donde se presentan precipitaciones mínimas las láminas de recarga potencial son menores en comparación a las zonas donde la precipitación fue mayor y por ende la lámina de recarga potencial es mayor. En la relación de la fracción de la lluvia que se convierte en recarga potencial se analizó que en la parte norte de la cuenca en el periodo (2001 – 2005) (figura 6.5) los valores van del 0.03 – 0.25 al igual que en la parte este y oeste donde los valores van de 0.03 a 0.20, menores en comparación al sur (0.25 – 0.41), los coeficientes mínimos obtenidos se presentan principalmente en zonas urbanas y cuerpos de agua donde no ocurre recarga directa de la precipitación o las condiciones de uso de suelo evitan la infiltración. Para el periodo 2006 – 2009 (figura 6.5) los coeficientes mínimos (0.00 – 0.03) se continuaron registrando al norte de la cuenca, mientras que al este los coeficientes incrementaron (0.06 – 0.20), al igual que al oeste y al sur de la cuenca (0.15 – 0.41), mientras que las mínimas se ubican en las zonas urbanas y cuerpos de agua. El comportamiento para el periodo 2010 – 2015 (figura 6.5) es similar debido que el norte de la cuenca se encuentran los valores más bajos (0.03 – 0.20) y al oeste (0.09 – 0.25), mientras que al este y sur los valores van de 0.20 a 0.43, los valores mínimos (0.00 – 0.03) se ubican en las zonas urbanas y cuerpos de agua donde el uso de suelo no permite la recarga.

En el análisis de el volumen de la recarga potencial por grupo hidrológico del suelo, el volumen de la recarga potencial del grupo I pasa de 0.10 hm³ en el periodo 2001 – 2005 (figura 6.13) a 0.12 hm³ en el periodo 2006 – 2009 (figura 6.14) el cual representa un aumento del 20% , sin embargo para el periodo 2010 – 2015 (figura 6.15) el volumen disminuye a 0.11 el cual representa una disminución del 9%. El volumen del grupo hidrológico II pasó de 4275.62 hm³ del periodo 2001 – 2005 a 5565.27 hm³ del periodo 2006 – 2009 el cual representa un aumento del 30%, en el periodo 2010 – 2015 continua aumentado con 5862.73 hm³ lo que equivale a un aumento del 5%. El volumen de la recarga potencial para el grupo hidrológico III inicio en el periodo 2001 – 2005 con 391.29 hm³ el cual aumento a 498.96 hm³ en el periodo 2006 – 2009 el cual representa un aumento del 27% el cual continúo en aumento para el periodo 2010 – 2015 con 502.43 hm³ lo equivalente al 0.6%. Y por último en el volumen la recarga potencial del grupo hidrológico IV paso de 0.20 hm³ del periodo 2001 – 2005 a 0.34 hm³ del periodo 2006 – 2009 el cual representa 70%

de aumento, el cual continuó en aumento para el periodo 2010 -2015 con 0.36 hm^3 el cual represento el 5% de aumento. El grupo hidrológico II fue el que generó mayor volumen sin embargo cabe mencionar que es el que tiene mayor extensión territorial, y el de menor volumen de aportación y de extensión territorial fue grupo hidrológico I, por lo que para poder establecer una igualdad con respecto a los volúmenes de aportación se procedió a dividirlos entre el área de aportación que cada grupo hidrológico le corresponde. De este análisis podemos observar que el grupo hidrológico I es que genera mayor aportación en el periodo 2001 – 2005 (ver figura 6.16) este generó $0.38 (\text{hm}^3/\text{km}^2)$ para el periodo 2006 – 2009 (ver figura 6.17) aumento a $0.44 (\text{hm}^3/\text{km}^2)$ lo que representa un incremento de 6 Hm^3 mientras que para el periodo 2010 – 2015 (ver figura 6.18) disminuyó a $0.42 (\text{hm}^3/\text{km}^2)$ es decir 0.02 hm^3 menos con respecto al periodo anterior. Con respecto a los demás grupos hidrológicos del suelo para el periodo 2001 – 2005 el grupo II genero $0.26(\text{hm}^3/\text{km}^2)$ y el grupo III genero $0.23 (\text{hm}^3/\text{km}^2)$ y IV genero $0.12 (\text{hm}^3/\text{km}^2)$, para el periodo 2006 – 2009 el grupo II genero $0.33(\text{hm}^3/\text{km}^2)$ seguido del grupo III con $0.29 (\text{hm}^3/\text{km}^2)$ y el grupo IV $0.20 (\text{hm}^3/\text{km}^2)$, por último para el periodo 2010 – 2015 el grupo II genero $0.35 (\text{hm}^3/\text{km}^2)$ seguido del grupo III con $0.29 (\text{hm}^3/\text{km}^2)$ y por último el grupo IV con 0.22 . Es importante mencionar que en este comportamiento intervienen la variabilidad espacial y temporal de los usos de suelo y de los datos meteorológicos del periodo 2001 -2015. Huili et al., (2012) sostiene que; la cantidad de la recarga varía a medida que cambia el uso de la tierra y la textura del suelo por lo que no se debe descuidar las diferentes respuestas de diversos usos de la tierra y textura del suelo.

El análisis del volumen de recarga potencial con respecto al uso de suelo se realizó para cada territorio nacional donde en México donde se encontró que en el periodo 2001 – 2005 (figura 6.28) el uso forestal genero mayor volumen de aportación con 1558.65 hm^3 , seguido de la agricultura con 1296.65 hm^3 y pastizales con 198.47 hm^3 , el uso que menor volumen genera para este periodo es el uso urbano con 1.01 hm^3 . En el periodo 2006 – 2009 (figura 6.21) el uso de suelo que mayor volumen de recarga potencial genero fue el uso forestal 1838.95 hm^3 el cual aumento un 17% en comparación al periodo anterior, seguido de la agricultura con

1705.92 hm³ el cual aumento un 31%, y los pastizales con 298.59 hm³ que aumentó un 50% su volumen, los usos de suelo que generaron menor volumen de escurrimiento para este periodo fueron los cuerpos de agua, uso urbano y otros con 1.30hm³, 3.65 hm³ y 0.51 hm³ respectivamente los cuales aumentaron un 100%, 261% y 100% con respecto al periodo anterior. Para el periodo 2010 – 2015 (figura 6.24) el uso de suelo que genero mayor volumen de recarga potencial fue el uso forestal (2143.04 hm³) que tuvo un aumento con respecto al periodo anterior del 16%, seguido de los pastizales (1040.31 hm³) los cuales aumentaron un 248% y la agricultura (875.60 hm³) la cual disminuyo un 48% con respecto al periodo anterior. Los usos de suelo que generaron menor volumen de escurrimiento para este periodo fueron el uso urbano (3.65 hm³) y los cuerpos de agua (2.19 hm³) tuvieron un aumento del 68 %.

El análisis del volumen de recarga potencial con respecto al uso de suelo del territorio de Guatemala se encontró que en el periodo 2001 – 2005 (figura 6.16) fueron los pastizales que generaron mayor volumen de aportación con 636.34 hm³, seguido del uso forestal con 553.58 hm³ y la agricultura con 480.67 hm³, y con los uso que menor volumen generaron para este periodo son el uso urbano con 0.94 hm³, el uso otros con 0.13 hm³. Para el periodo 2006 – 2009 (figura 6.18) el uso de suelo que mayor volumen genero fue la agricultura con 1581.02 hm³ el cual aumento un 228 % en comparación al periodo anterior, seguido del uso forestal con 702.46 el cual aumento un 26%, y el uso urbano con 0.74 hm³ que disminuyó un 21% su volumen con respecto al periodo anterior, siendo los pastizales que para este periodo generaron menor volumen de recarga potencial con 0.26 hm³. Este periodo no tuvo registro para el uso otros. Para el periodo 2010 – 2015 (figura 6.29) el uso de suelo que genero mayor volumen de recarga potencial fue el uso forestal (957.83 hm³) que tuvo un aumento con respecto al periodo anterior del 36%, seguido de la agricultura con 951.62 hm³ el cual disminuyo 46% y los pastizales con 541.78 hm³ aumentó un 108%. Los usos de suelo que generaron menor volumen de escurrimiento para este periodo fueron el uso otros con 37.33 hm³, el uso urbano con 5.95 hm³ y cuerpo de agua con 1.07 hm³ aumentando un más del 100% con respecto al periodo anterior. De este análisis se encuentra que el uso de suelo que genera mayor aporte de recarga potencial en México es el uso forestal y en Guatemala son los pastizales, la agricultura y la cobertura forestal, se considera que la diferencia de uso

de suelo que favorece la recarga potencial varían por la extensión territorial que contiene cada uno de ellos en los diferentes periodos de análisis. Para ello se estableció una igualdad con respecto a los volúmenes de aportación se procedió a dividirlos entre el área de aportación que cada uso de suelo le corresponde. De este análisis podemos observar que en Guatemala la agricultura genera mayor volumen de recarga potencial de $0.34 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$ (hm^3/km^2), $0.44 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$ en el periodo 2001 – 2005, 2006 -2009 respectivamente, mientras que para el periodo 2010 – 2015 los pastizales genero mayor volumen de recarga potencial con $0.82 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$. El segundo uso fueron los pastizales con $0.33 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$ para el periodo 2001 – 2005 y para el periodo 2006 – 2009 y 2010 – 2015 fue el uso forestal con $0.37 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$ y $0.56 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$ respectivamente. El tercer uso de suelo con mayor volumen de recarga potencial aporta es el forestal para el periodo 2001 – 2005 con $0.28 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$, para el periodo 2006 – 2009 son los pastizales con $0.26 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$ y el periodo 2010 -2015 fue la agricultura con 0.28 . Y el cuarto uso de suelo que mayor volumen de recarga potencial genero para el periodo 2001 – 2005 fue el uso urbano y otros con $0.03 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$ en ambos, el periodo 2006 – 2009 fue el uso urbano con $0.02 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$ y para el periodo 2010 – 2015 fue el uso urbano con $0.12 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$. Para el territorio de México el comportamiento fue distinto como se observa los usos que generaron mayor volumen de recarga potencial fue el uso forestal para el periodo 2001 – 2005 y 2006 - 2009 con $0.30 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$ y $0.37 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$ respectivamente, y para el periodo 2010 - 2015 fueron los pastizales con $0.50 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$, el segundo uso fue la agricultura con $0.22 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$ y $0.28 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$ para el periodo 2001-2005 y 2006 – 2009 respectivamente y para el periodo 2010 – 2015 fue el uso forestal con $0.38 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$. El tercer uso de suelo fueron los pastizales con $0.15 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$ y $0.24 \text{ (Hm}^3/\text{Km}^2)$ para el periodo 2001 – 2005 y 2006 – 2009 y la agricultura con $0.19 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$ para el periodo 2010 – 2015. Y El cuarto uso de suelo fue el uso urbano para el periodo 2001 -2005 y 2010 – 2015 con 0.02 en ambos periodos, mientras que para el periodo 2006 – 2009 fue el uso otros con $0.18 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$. Del análisis de volumen entre superficie se encontró que para México los usos de suelo que mayor aporte de recarga potencial tiene es el uso forestal

y pastizales, mientras que para el territorio de Guatemala fue la agricultura y los pastizales, estos resultados guardan relación con lo que sostiene (Erick *et al.*, 2011) con respecto a las tasas de recarga potencial que tienen efecto positivo en pastizales, bosques y tierras de cultivo, la disminución de estas tierras con el aumento de la superficie urbana y los asentamientos urbanos son la principal razón de la disminución de las tasas de recarga. Sin embargo, existen fugas en los sistemas de distribución de abastecimiento y aguas residuales que podrían generar que la recarga aumentará.

La evapotranspiración real que genero mayor volumen fue el del año 2006 con $18,887.62 \text{ hm}^3$ (figura 6.11) el cual represento un 56% del volumen de precipitación del mismo año. El periodo 2006 – 2009 se caracterizó por ser el periodo donde hubo mayor evapotranspiración real en la cuenca Alto Grijalva con un 52% del volumen precipitado. El periodo 2001 – 2005 (figura 6.10) obtuvo el 46% y 2010 – 2015 (figura 6.21) el 51% de evapotranspiración real del volumen precipitado. Estos porcentajes son cuantificados del total de los volúmenes por periodo cabe mencionar que la variabilidad espacial y temporal de este parámetro en la cuenca indica que existen zonas donde estos porcentajes son menores con el 0% al 10% y otras donde el rango incrementa a más del 90%. Los porcentajes que cuentan con mayor extensión territorial son del 40% al 90% (figura 6.6). El comportamiento de la variabilidad espacial y temporal de las láminas de evapotranspiración real varían de acuerdo a cada periodo de estudio en la parte norte para los tres periodos de estudio 2001 - 2005 (figura 6.3), 2006 – 2009 y 2010 - 2015 las láminas de evapotranspiración real van de los 600 mm a los 1000 mm, los valores anteriores también se presentan para el lado este de la cuenca a excepción del periodo 2010 - 2015 láminas de evapotranspiración real van de los 600 mm a los 1100 mm. Por lo contrario, al oeste los valores de las láminas van de 800 - 1395 para el periodo 2001 – 2005 y 2006 – 2009 mm, mientras que para el periodo 2010 – 2015 los valores disminuyeron con láminas de 600 - 1300. El comportamiento de la zona sur es similar al del oeste, pero con mayor extensión territorial en los valores máximos, en esta zona se presentaron láminas de 1000 -1395 mm para los 3 periodos de simulación. La variabilidad de las láminas de evapotranspiración real en los distintos periodos de estudios se debe a la distribución de la precipitación en el espacio en donde se presentan precipitaciones mínimas las láminas son menores en comparación a las zonas donde la precipitación fue mayor y por ende la lámina de escurrimiento es mayor. En la relación de la

fracción de la lluvia que se convierte en evapotranspiración real se analizó que en la parte norte de la cuenca en el periodo (2001 – 2005) (figura 6.6) los valores van del 0.50 – 0.94 al igual que en la parte oeste, mientras que al este los valores van de 0.60 a 0.90. La zona sur de la cuenca para los 3 periodos (2001-2005, 2006-2009 y 2010-2015) se presentaron los mismos valores de 0.20 – 0.50 los cuales son coeficientes menores en comparación a los presentados en las diferentes zonas mencionadas, los coeficientes mínimos obtenidos se presentan principalmente en zonas urbanas y cuerpos de agua donde no ocurre recarga directa de la precipitación o las condiciones de uso de suelo evitan la infiltración. Para el periodo 2006 – 2009 (figura 6.11) los coeficientes máximos (0.60 – 0.91) se continuaron registrando al norte y oeste de la cuenca, y al este los coeficientes disminuyeron (0.50 – 0.80), mientras que las mínimas se ubican en las zonas urbanas y cuerpos de agua. El comportamiento para el periodo 2010 – 2015 (figura 6.12) es similar debido que el norte y oeste de la cuenca se encuentran los valores más altos (0.50 – 0.89) y al este disminuyeron (0.40 – 0.70), los valores mínimos (0.00 – 0.30) se ubican en las zonas urbanas.

En el análisis de el volumen de la evapotranspiración real por grupo hidrológico del suelo, el volumen de la evapotranspiración real del grupo I pasa de 0.17 hm³ en el periodo 2001 – 2005 (figura 6.13) a 0.15 hm³ el periodo 2006 – 2009 (figura 6.14) el cual representa una disminución del 11 %, sin embargo para el periodo 2010 – 2015 (figura 6.15) el volumen disminuye a 0.14 hm³ el cual representa una disminución de 0.01 hm³. El volumen del grupo hidrológico II paso de 15660.24 hm³ del periodo 2001 – 2005 a 16052.03 hm³ del periodo 2006 – 2009 el cual representa un aumento del 2%, en el periodo 2010 – 2015 disminuyó con 15811.98 hm³ es decir 2% menos volumen. El volumen de la evapotranspiración real para el grupo hidrológico III inicio en el periodo 2001 – 2005 con 1565.68 hm³ el cual aumentó a 1581.58 hm³ en el periodo 2006 – 2009 el cual representa un aumento del 1% para después disminuir en el periodo 2010 – 2015 con 1492.78 hm³ lo equivalente al 6%. Y por último en el volumen la evapotranspiración real del grupo hidrológico IV paso de 1.51 hm³ del periodo 2001 – 2005 a 1.63 hm³ del periodo 2006 – 2009 el cual representa 7% de aumento, el cual disminuyó para el periodo 2010 -2015 con 1.60 hm³ es decir 2% menor volumen. El grupo hidrológico II fue el que generó mayor volumen sin embargo cabe mencionar que es el que tiene mayor extensión territorial, y el de menor volumen de aportación y de extensión territorial fue grupo hidrológico I, por lo que

para poder establecer una igualdad con respecto a los volúmenes de aportación se procedió a dividirlos entre el área de aportación que cada grupo hidrológico le corresponde. De este análisis podemos observar que el grupo hidrológico II es el que genera mayor aportación en el periodo 2001 – 2005 (figura 6.16) este género $0.94 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$ pero para el periodo 2006 – 2009 (figura 6.17) fue el grupo hidrológico IV con $0.97 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$ mientras que para el periodo 2010 – 2015 (figura 6.18) fueron los grupos II y IV con $0.95 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$ es decir 0.02 hm^3 menos con respecto al periodo anterior. Con respecto a los demás grupos hidrológicos del suelo para el periodo 2001 – 2005 el grupo III genero $0.91 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$ y el grupo IV genero $0.90 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$ y I genero $0.65 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$, para el periodo 2006 – 2009 el grupo II genero $0.96 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$ seguido del grupo III con $0.92 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$ y el grupo I con $0.56 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$. Por último para el periodo 2010 – 2015 el grupo III generó $0.86 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$ seguido del grupo I con $0.53 \text{ (hm}^3/\text{km}^2)$. Es importante mencionar que en este comportamiento intervienen la variabilidad espacial y temporal de los usos de suelo y de las variables meteorológicas del periodo 2001 -2015.

El análisis del volumen de evapotranspiración real con respecto al uso de suelo se realizó para cada territorio nacional donde en México se encontró que en el periodo 2001 – 2005 (figura 6.20) la cobertura agricultura genero mayor volumen de aportación con 5595.98 hm^3 seguido de la cobertura forestal con 5277.87 hm^3 y pastizales con 1236.99 hm^3 , el uso que género menor volumen para este periodo es el uso urbano con 36.75 hm^3 . En el periodo 2006 – 2009 (figura 6.21) el uso de suelo que mayor volumen de evapotranspiración real fue la agricultura 5700.08 hm^3 el cual aumento un 7% en comparación al periodo anterior, seguido del uso forestal con 5241.63 hm^3 el cual aumentó un 1%, y los pastizales con 1211.55 hm^3 que disminuyó un 3% su volumen, los usos de suelo que generaron menor volumen de escurrimiento para este periodo fueron el uso urbano, los cuerpos de agua y otros con 55.65 hm^3 , 6.00 hm^3 y 2.12 hm^3 respectivamente los el uso urbano incremento 51%, mientras que los cuerpos de agua y otros no generaron aporte con respecto al periodo anterior. Para el periodo 2010 – 2015 (figura 6.24) el uso de suelo que genero mayor volumen de evapotranspiración real fue el uso forestal (5698.33 hm^3) que tuvo un aumento con respecto

al periodo anterior del 8%, seguido de la agricultura (3249.91 hm³) los cuales disminuyeron un 42% y los pastizales (2992.73 hm³) la cual aumento un 147% con respecto al periodo anterior. Los usos de suelo que generaron menor volumen de evapotranspiración real para este periodo fueron el uso urbano (55.65 hm³ igual que el periodo anterior y los cuerpos de agua (7.48 hm³) que tuvo un aumento del 24%. Timothy *et al.*, (2019) menciona que la infiltración anual disminuye a medida que aumenta el desarrollo, la ET anual también disminuye a medida que el nivel del desarrollo urbano aumenta porque las áreas impermeables no contribuyen a la ET.

El análisis de la evapotranspiración real de Guatemala se encontró que en el periodo 2001 – 2005 (figura 6.25) fueron el uso forestal que generaron mayor volumen de aportación con 1966.67 hm³, seguido de los pastizales con 1868.94 hm³ y la agricultura con 1375.26 hm³, y con los uso que menor volumen generaron para este periodo son el uso urbano con 24.17 hm³, el uso otros con 3.51 hm³. Para el periodo 2006 – 2009 (figura 6.27) el uso de suelo que mayor volumen genero fue la agricultura con 3721.66 hm³ el cual aumento un 170 % en comparación al periodo anterior, seguido del uso forestal con 1844.80 Hm³ el cual disminuyó un 7%, y el uso urbano con 10.39 hm³ que disminuyó un 57% su volumen con respecto al periodo anterior, siendo los pastizales que para este periodo generaron menor volumen de evapotranspiración real con 0.96 hm³. Este periodo no tuvo registro para el uso otros. Para el periodo 2010 – 2015 (figura 6.29) el uso de suelo que genero mayor volumen de evapotranspiración real fue el uso forestal (2326.61 hm³) que tuvo un aumento del con respecto al periodo anterior del 26%, seguido de la agricultura con 1768.16 hm³ el cual disminuyo 52% y los pastizales que con 1277.22 hm³. Los usos de suelo que generaron menor volumen de escurrimiento para este periodo fueron el uso otros con 75.86 hm³, el uso urbano con 35.27 hm³ y cuerpo de agua con 2.50 hm³ aumentando un más del 100% con respecto al periodo anterior. De este análisis se encuentra que el uso de suelo que genera mayor volumen de evapotranspiración real en México y Guatemala fue la agricultura y uso forestal, se considera que la diferencia de uso de suelo que favorece la evapotranspiración real varían por la extensión territorial que contiene cada uno de ellos en los diferentes periodos de análisis. Para ello se estableció una igualdad con respecto a los volúmenes de aportación se procedió a dividirlos entre el área de aportación que cada uso de suelo le

corresponde. De este análisis podemos observar que en México el uso forestal genera mayor volumen de evapotranspiración real de $1.02 \text{ (hm}^3/\text{km}^2\text{)}$, $1.05 \text{ (hm}^3/\text{km}^2\text{)}$ en el periodo 2001 – 2005 (ver figura 6.29), 2006 -2009 (ver figura 6.31) respectivamente, mientras que para el periodo 2010 – 2015 los pastizales genero mayor volumen de recarga potencial con $1.45 \text{ (hm}^3/\text{km}^2\text{)}$. El segundo uso fue la agricultura con $0.93 \text{ (hm}^3/\text{km}^2\text{)}$ para el periodo 2001 – 2005, para el periodo 2006 – 2009 fue el uso urbano con $0.99 \text{ (hm}^3/\text{km}^2\text{)}$ y para el 2010 – 2015 fue el uso forestal con 1.00 . El tercer uso de suelo con mayor volumen de evapotranspiración real aporta son los pastizales para el periodo 2001 – 2005 y 2006 – 2009 con $0.92 \text{ (hm}^3/\text{km}^2\text{)}$ y $0.98 \text{ (hm}^3/\text{km}^2\text{)}$ respectivamente, y el periodo 2010 -2015 fue la agricultura con $0.71 \text{ (hm}^3/\text{km}^2\text{)}$. Y el cuarto uso de suelo que mayor volumen de evapotranspiración real genero para el periodo 2001 – 2005 fue el uso forestal y urbano con $1.02 \text{ (hm}^3/\text{km}^2\text{)}$ y $0.67 \text{ (hm}^3/\text{km}^2\text{)}$ respectivamente, el periodo 2006 – 2009 fue la agricultura y otros con $0.93 \text{ (hm}^3/\text{km}^2\text{)}$ y 0.74 respectivamente. Para el periodo 2010 – 2015 fue el uso urbano con $0.30 \text{ (hm}^3/\text{km}^2\text{)}$. Para el territorio de Guatemala el comportamiento fue distinto como se observa el uso que genero mayor volumen de evapotranspiración real fue el uso forestal para el periodo 2001 – 2005 (figura 6.26) con $1.00 \text{ (hm}^3/\text{km}^2\text{)}$ y agricultura para el periodo 2006 – 2009 (figura 6.28) con $1.26 \text{ (hm}^3/\text{km}^2\text{)}$, mientras que para el periodo 2010 – 2015 (ver figura 6.30) fueron los pastizales con 1.94 , el segundo uso fueron los pastizales con $0.97 \text{ (hm}^3/\text{km}^2\text{)}$ para el periodo 2001-2005 y uso forestal para el periodo 2006 – 2009 y 2010 - 2015 con $1.08 \text{ (hm}^3/\text{km}^2\text{)}$ y $1.37 \text{ (hm}^3/\text{km}^2\text{)}$ respectivamente. El tercer uso de suelo fue agricultura con $0.96 \text{ (hm}^3/\text{km}^2\text{)}$ para el periodo 2001 - 2005 y para el periodo 2006 – 2009 y 2010 -2015 las zonas urbanas con $0.21 \text{ (hm}^3/\text{km}^2\text{)}$ y $0.71 \text{ (hm}^3/\text{km}^2\text{)}$ respectivamente. Y El cuarto uso de suelo fue el uso otros para el periodo 2001 -2005 con $0.81 \text{ (hm}^3/\text{km}^2\text{)}$, para el periodo 2006 – 2009 no hubo un cuarto uso y para el 2010 – 2015 fue la agricultura con $0.60 \text{ (hm}^3/\text{km}^2\text{)}$. Del análisis de volumen entre superficie se encontró que para México los usos de suelo que mayor aporte

de recarga potencial tiene es el uso forestal y pastizales y en Guatemala son el uso forestal y agricultura.

Capítulo 8 . Conclusiones y recomendaciones

8.1 Conclusiones

En este trabajo se representó el comportamiento de los componentes del ciclo hidrológico; precipitación, escurrimiento superficial, recarga potencial y evapotranspiración real, en la cuenca Alto Grijalva ubicada al sur este del país entre México y la república de Guatemala. Con estos resultados como base, se construyó un modelo con el programa SWB.

Las conclusiones que se obtuvieron con respecto a la variabilidad espacial y temporal de las láminas de cada componente del ciclo hidrológico son las siguientes:

1. Múltiples factores intervienen en la variabilidad espacial y temporal de la cuenca Alto Grijalva, como lo son los ciclones, las estaciones del año y principalmente se ve condicionada por la temperatura, la humedad, y la presión atmosférica, debido en que las zonas de alta pendiente con temperaturas bajas donde la cobertura vegetal promueve la humedad se presentan las láminas máximas de precipitación a diferencia de las zonas donde la altitud es menor y la temperatura es máxima la precipitación es mínima.
2. La orografía y la precipitación de cuenca Alto Grijalva es importante en la formación del escurrimiento superficial, en zonas de alta pendiente como la Sierra de Madre de Chiapas se presentan las láminas de escurrimiento superficial máximas y al norte de la cuenca en la depresión central se ubican las láminas mínimas de escurrimiento superficial y precipitación.
3. La recarga potencial se define por las temperaturas máximas, la precipitación y el uso y cobertura del suelo, las láminas de máximas de recarga se ubican donde la precipitación es alta y las temperaturas son bajas principalmente con cobertura forestal, mientras que las láminas de recarga mínima se ubican donde se presenta baja precipitación y alta temperatura con cobertura de suelo urbano y agrícola.
4. La heterogeneidad de la evapotranspiración real se atribuye a la combinación de dos procesos a la evaporación y la transpiración, donde la evaporación es condicionada

con los efectos de la radiación, la temperatura y las características del suelo, mientras que para la transpiración lo definen los factores vegetales. Por tal motivo la variabilidad espacial y temporal en la evapotranspiración está altamente definida con la precipitación y el uso y cobertura de suelo, las láminas (ET) mínimas se presentaron en zonas con láminas de precipitación mínima y de uso urbano, mientras que las máximas se presentaron donde se ubican en la cobertura forestal principalmente en bosques de galería.

Conclusiones con respecto a la variabilidad espacial y temporal de la fracción de la lámina de precipitación que se convierte en escurrimiento superficial, recarga potencial y evapotranspiración real.

1. Los valores de los coeficientes de escurrimiento superficial, recarga potencial y evapotranspiración real son satisfactorios debido a la proporcionalidad que posee cada uno en el balance del ciclo hidrológico para la cuenca Alto Grijalva.
2. La variabilidad espacial y temporal de los coeficientes de escurrimiento superficial está definido por el volumen de precipitación y el potencial de escurrimiento de cada zona que conforma la cuenca entre mayor sea la pendiente y el volumen de precipitación mayor será el coeficiente de escurrimiento. Los usos de suelo urbano también influyen de forma importante en coeficientes de escurrimiento altos.
3. La variabilidad de los coeficientes de recarga potencial está definida por el volumen de precipitación y los usos y coberturas del suelo es decir la capacidad de la permeabilidad de cada zona, como en las zonas urbanas donde los coeficientes son nulos o en los bosques como la Sierra Madre de Chiapas donde los coeficientes son mayores.
4. La variabilidad espacial y temporal de los coeficientes de evapotranspiración están definidos por el uso y cobertura del suelo, como se pudo analizar las zonas de alta pendiente donde es favorecida el escurrimiento o suelos forestales donde la retención del agua de la raíz impide la evapotranspiración el coeficiente es menor es decir la fracción de la precipitación que se vuelve evapotranspiración real es menor en comparación de las zonas donde la cobertura posee raíces son pequeñas y las temperaturas son altas se favorece al volumen de evapotranspiración.

Conclusiones con respecto a los volúmenes de precipitación, escurrimiento superficial, recarga potencial y evapotranspiración real en cada parámetro del ciclo hidrológico.

1. Los volúmenes de la precipitación y la recarga potencial están altamente relacionados entre sí, puesto que el incremento o decremento de la precipitación impacta ya sea positivo o negativamente la recarga potencial.
2. El comportamiento del volumen de la evapotranspiración real no es relativo a los volúmenes de la precipitación, el volumen de evapotranspiración real se mantiene estable sin presentar mayores cambios volumétricos en los distintos años dentro del periodo 2001 – 2015.
3. El volumen de escurrimiento superficial no siempre es equivalente al volumen de precipitación debido a los cambios de las extensiones territoriales de los distintos usos y cobertura del suelo que modifican el potencial de escorrentía para cada periodo.

Conclusiones con respecto a los volúmenes de aportación en relación al grupo hidrológico del suelo en cada parámetro del ciclo hidrológico.

1. La relación del grupo hidrológico del suelo B con la evapotranspiración real es favorecida en comparación de los otros componentes del ciclo hidrológico dentro de la cuenca Alto Grijalva ya que favorece a los volúmenes de evapotranspiración real y es el grupo con mayor extensión territorial y por ende mayor volumen de aportación.
2. El grupo hidrológico A y C favorecen los volúmenes de escurrimiento superficial, y al poseer extensiones territoriales pequeños su aportación volumétrica con respecto a este parámetro es menor en la cuenca Alto Grijalva.
3. La recarga potencial es favorecida con el grupo hidrológico del suelo A que cuenta con poca superficie dentro de cuenca, seguido del grupo hidrológico B contando con la mayor extensión territorial de los cuatro grupos hidrológicos, permite un equilibrio y buena aportación volumétrica en este parámetro para la cuenca Alto Grijalva.

Conclusiones con respecto a los volúmenes de aportación en relación a los usos y coberturas del suelo en cada parámetro del ciclo hidrológico.

1. A pesar de que cada uso y cobertura del suelo favorece al volumen de aportación de alguno de los parámetros del ciclo hidrológico, los volúmenes de aportación de cada

- uno de ellos estarán condicionados a la extensión territorial que poseen dentro de la cuenca Alto Grijalva.
2. Por su potencial de escorrentía normalmente los cuerpos de agua y las zonas urbanas favorecen el volumen de escurrimiento superficial en la cuenca Alto Grijalva.
 3. Para la cuenca Alto Grijalva los uso y coberturas de suelo que favorecen la recarga potencial y la evapotranspiración real son los pastizales, la cobertura forestal y la agricultura.

Considerando el análisis relación volumen/superficie y los volúmenes de aportación se concluye que el periodo (2010 - 2015) genero mayor volumen de recarga representando el 19% del volumen precipitado, considerando que durante este periodo se presentaron las mejores condiciones para satisfacer la recarga, entonces se considera que el grupo hidrológico A y B al poseer una alta relación volumen/superficie durante este periodo benefician a la recarga potencial al igual que los usos y coberturas de suelo; pastizales, cobertura forestal y agricultura, usos con mejor relación volumen/ superficie durante el periodo (2010 - 2015). Cabe mencionar que los efectos del clima también favorecieron la recarga en el periodo (2010 - 2015) ya que fue el periodo con mayor volumen de precipitación y con temperaturas moderadas según el análisis de tendencia de las medias.

6.2 Recomendaciones

Las siguientes recomendaciones abordan los elementos que se consideran puedan brindar una mejor certidumbre a los resultados que genera el modelo SWB para la cuantificación de los parámetros del ciclo hidrológico en especial la recarga potencial.

Los elementos de entrada que se buscan mejorar son:

- Considerando la calidad y las escalas de las capas de uso de suelo disponibles para cada nacionalidad, se recomienda realizar el análisis del uso de suelo con imágenes satelitales anuales que conformen la cuenca de estudio con el fin de identificar los objetos disyuntos que la constituyen y cambian en espacio y tiempo anualmente, obteniendo como resultado una clasificación supervisada anual.
- La combinación de estaciones meteorológicas y las imágenes satelitales que poseen información meteorológica podrían brindar una mejor cobertura en la variabilidad

espacial y temporal de las temperaturas máximas y mínimas y la precipitación que se presentan en la cuenca de estudio.

Con respecto a las metodologías aplicadas:

- Se sugiere realizar un análisis de las metodologías (IDW, Kriging y Spline) de interpolación de los datos climáticos con el fin de identificar la mejor representación, distribución y variabilidad espacial de la precipitación y las temperaturas máximas y mínimas. en la c
- Existen metodológicas para el cálculo de la evapotranspiración real más completos que los aplicados en esta tesis por lo que se sugiera incrementar la búsqueda de los elementos que se necesiten para la aplicación de métodos más completos que brinde mayor certidumbre cuantificación de este parámetro.

En los trabajos conjuntos:

- En la homogeneización de los datos climáticos se sugiere mantener sensibilidad en los parámetros a considerar en el proceso, que no alejen de la realidad la tendencia climática de la zona de estudio.
- Con respecto a la calibración del modelo, se sugiere obtener información hidrométrica completa para cada año del periodo a simular para brindar más certidumbre a los resultados del modelo SWB.

Capítulo 9 . Referencias

Alberto Linés Escardó, (2010). *Clima y cambio climático*. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Pág. 1- 12

Francisco Javier Aparacio (1989). *Fundamentos de hidrología superficial*. Limusa .

Alexandersson H (1986): A homogeneity test applied to precipitation data. *Jour. of Climatol.*, 6:661-675

Beven, K. (2012). “Rainfall-Runoff Modelling. The Primer”. *John Wiley & Sons Ltd*. West Sussex, England.

Beven, K. J., Young, P. (2013). A guide to good practice in modeling semantics for authors and referees. *Water Resources Research* 49: 5092–5098.

Breña Puyol, A. F., & Jacobo Villa, M. A. (2006). *Fundamentos de la Hidrología Superficial*. Ciudad de México: Universidad Autónoma Metropolitana.

Caballero, L., J.L. Macías, A. García-Palomo, G.R. Saucedo, L. Borselli, D. Sarocchi y J.M. Sánchez. (2006). The September 8-9, 1998 rain triggered flood events at Motozintla, Chiapas, Mexico. *Springer*. 39: 103-106.

Carabias Julia, (2008). La cuenca del Grijalva, *Reforma*. Recuperado de: <https://ceiba.org.mx/que-hacemos/blogs-opinion-editorial/julia-carabias-lillo/la-cuenca-del-grijalva/>

Cabrera, J. (2015). *Modelos Hidrológicos*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ingeniería Civil.

Chavarría, F. (2009). Diseño de Relleno Sanitario para el municipio de San Ramón. Departamento de Matagalpa.

Chappell, N. A.; Bidin, K. and Tych, W. (2001). Modelling rainfall and canopy controls on net-precipitation beneath selectively-logged tropical forest. *Plant Ecol*. 153:215-229.

Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). Hidrología Aplicada. (M. E. Suárez R., Ed., & J. G. Salgarriaga, Trad.) Santafé de Bogotá: *McGrawHill Interamericana*, S. A

CONAGUA. (2014). “Programa de medidas preventivas y de mitigación de la sequía en el consejo de cuenca de los ríos Grijalva y Usumacinta”. Organismo Frontera Sur

CONAGUA. (2008). *Estadística del agua en México*. Comisión Nacional del Agua. Coyoacán, México, D.F.

CONAFOR. (2012). *Programa de restauración forestal de cuencas hidrográficas prioritarias*. Zapopan, Jalisco. México. Comisión Nacional Forestal.

Cuevas, M., Garrido, A., Pérez Damián, J. L., & Iura González, D. (2010). Estado actual de la vegetación en las cuencas de México. En H. Cotler Ávalos, Las cuencas hidrográficas de

México. *Diagnóstico y priorización* (págs. 50- 58). Ciudad de México: Pluralia Ediciones e Impresiones S.A. de C.V.

De Vries, J. J., y Simmers, I. (2002). “Groundwater recharge: An overview of processes and challenges.” *Hydrogeol. J.*, 10(1), 5–17.

Diario oficial de la federación de México (17 de abril 2002). Acuerdo por el que se da a conocer los estudios técnicos de aguas nacionales superficiales de las subregiones hidrológicas Alto Grijalva, Medio Grijalva y Bajo Grijalva de la región hidrológica No.30 Grijalva-Usumacinta. Recuperado de <http://dof.gob.mx>

Dripps, W.R. (2003). *The spatial and temporal variability of ground water recharge*. Ph.D. diss., Department of Geology and Geophysics, University of Wisconsin–Madison

Dripps W.R. Hunt R.J. Anderson M.P (2006). Estimación de tasas de recarga con elemento analítico estimación de modelos y parámetros. *Ground Water*. Vol. 44, No. 1—

Drips W. R. y K. R. Bradbury, (2010). The spatial and temporal variability of groundwater recharge in a forested basin in northern Wisconsin. *Hydrological Processes*, 24, 283-392,

Dudley, N. y Stolton, S. (2003). Running pure: the importance of forest protected areas to drinking water. *A research report for the World Bank and WWF Alliance for Forest Conservation and Sustainable Use*. Banco Mundial, Washington, DC.

Estilita Ruiz Romera, Miren Martínez Santos (s/f). *Hidrología aplicada; Infiltración y humedad del suelo*.

FAO, (s/f). “Evapotranspiración del cultivo”. Estudio FAO, *Riego y drenaje* #56. Pag.3

FAO–UNESCO. (1971–1981). *Soil map of the world 1:5 000 000*. 10 Volumes. Paris, UNESCO.

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) (2003), Land and water development division. Recuperado de <http://www.fao.org/landandwater/agll/landuse/landusedef.stm>

FCAS (Fondo de Cooperación para Agua y Saneamiento), (2017). *La importancia de las aguas subterráneas en la gestión integrada de los recursos hídricos: aplicaciones prácticas en proyectos de cooperación internacional para el desarrollo*.

Félix Hernández Jiménez (2014). “Obtención del número de curva (NC) para la república mexicana mediante el uso de sistemas de información geográfica, aplicando la metodología del TR-55”. Universidad Nacional Autónoma de México.

Flores Ruiz E, Miranda-Novales MG, Villasís-Keever MÁ. (2017) El protocolo de investigación VI: cómo elegir la prueba estadística adecuada. *Estadística inferencial*. Rev Alerg Mex. 2017;64(3):364-370

Flores, M.L. (2019). Los alcances en la producción agrícola chiapaneca. Una reflexión sobre la soberanía alimentaria en la región. *Región y sociedad*, 31, e1177. doi: 10.22198/rys2019/31/1177

Flores-López, H.E.; Ramírez-Vega, H.; Byerly-Murphy, K.F.; Ruiz-Corral, J.A.; Martínez-Sifuentes, J.A.; Díaz-Mederos, P.; Alemán-Martínez, V. (2003) Estimación de escurrimiento superficial en la cuenca El Jihuite, *México Terra Latinoamericana*, vol. 21, núm. 3, julio-septiembre, 2003, pp. 389-400 Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. Chapingo, México

Foster, S. S. D., Morris, B. L., and Chilton, P. J. (1999). "Groundwater in urban development-A review in the linkages and concerns." *Impacts of urban growth on surface water and groundwater quality*, J. B. Ellis ed., IAHS, Wallingford, U.K., 3-12

F. Javier Sánchez San Román (septiembre 2017). *Hidrología Superficial y subterránea*. Departamento de Geología. Universidad de Salamanca. España (pag.1).

French, M. A., and Silvestri, S. (1999). *Ground-water recharge and aquifer potential for Cape May County*, New Jersey, New Jersey Department of Environmental Protection, New Jersey Geological Survey, Trenton, NJ.

García-García, A. (2010). *Instituciones y pluralismo legal: la hidropolítica en la cuenca transfronteriza Grijalva (1950-2010)*. Tesis de Doctorado, El Colegio de la Frontera Sur, San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, México.

García, E. M. (2006). *Efecto de la estructura de la copa en la partición de lluvia de tres especies arbustivas en clima semiárido*. Tesis Doctoral. Departamento de Biología Vegetal y Ecología. Universidad de Almería. España. 118-119 pp.

Gray. D. McKay, and J. M. Wigham. (1973). Energy, evaporation, and evapotranspiration. *Principles of Hydrology*, DM gray (Ed.), Water Information Center, New York, 3.1-3.66

Guijarro, J. A. (2015) CLIMATOL: *Software libre para la depuración y homogeneización de datos climatológicos*. Centro Meteorológico en Illes Balears, Instituto Nacional de Meteorología. Pág. 493 – 502.

Guijarro, J. A. (2018). Homogeneización de series climáticas con Climatol 3.0. *Agencia Estatal de Meteorología*. Delegación en Islas Baleares, España.

Guijarro, J.A. (March 2021) Homogenization of climatic series with Climatol.V.3.1.1. State Meteorological Agency (AEMET).

Héctor P. V. Mario G. E. Neptalí R. M. David Álvarez S. Karim M.C. (2014) *Características físico- bióticas de la cuenca del rio Grijalva*. Colegio frontera sur. Pag.29-77.

Hölscher, D. Köhler L., van Dijk, y Bruijnzeel, L. (2004). The importance of epiphytes to total rainfall interception by a tropical montane rain forest in Costa Rica. *J. Hydrol.* 292(1-4):308-322.

Huili Gong & Yun Pan & Yongxin Xu (2012). Variación espacio-temporal de la recarga de agua subterránea en respuesta a la variabilidad en la precipitación, el uso de la tierra y el suelo en la cuenca de Yanqing, Beijing, China. *Hydrogeology Journal*. pag 1331-1340

Hydar Ebrahimi, Reza Ghazavi y Haji Karimi. (2016) Estimation of groundwater recharge from the rainfall and irrigation in an arid environment using inverse modeling approach and rs. *Water Resour Manage*. pag. (1939-1951)

INSIVUMEH (s/f). Atlas climatológico de Guatemala, Isoyetas promedio Anual. Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. Guatemala, Guatemala. Disponible en: http://www.insivumeh.gob.gt/hidrologia/ATLAS_HIDROMETEOROLOGICO/Atlas_Clima.htm

IMTA, (Julio 2020). Variabilidad espacial y temporal de la recarga potencial en cuencas hidrográficas forestales Pro-bosque. Recuperado de: <https://www.gob.mx/imta/es/articulos/variabilidad-espacial-y-temporal-de-la-recarga-potencial-en-cuencas-hidrograficas-forestales-probosque>

INEGI (s/f). Metodología para la obtención de información de la serie II de uso del suelo y vegetación. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo/#Metadatos>

INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático) (2007). La cuenca de los ríos Grijalva y Usumacinta. Recuperado de: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/402/cuencas.html#:~:text=La%20cuenca%20del%20Grijalva%20Usumacinta%20se%20localiza%20en%20el%20sureste,el%204.7%25%20del%20territorio%20nacional.>

IUSS Working Group WRB. (2015). Base referencial mundial del recurso suelo. 2014. Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos. *Informes sobre recursos mundiales de suelos 106*. FAO, Roma.

Jean-François Mas, Alejandro Velázquez y Stéphane Couturier (2009), La evaluación de los cambios de cobertura/ uso del suelo en la República Mexicana. *Investigación ambiental*. (1). 23-29.

Jenson, S. y J. Domingue. (1988). "Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis". *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 54 (11): 1593–1600.

Jean-François Mas, Alejandro Velázquez y Stéphane Couturier (febrero 2009). La evaluación de los cambios de cobertura/ uso del suelo en la República Mexicana. *Investigación ambiental* 2009 • 1 (1): 23-39

Ketema Tilahun & Broder J. Merkel (2009). Estimation of groundwater recharge using a GIS-based distributed water balance model in Dire Dawa, Ethiopia. *Hydrogeology Journal*

17: 1443–1457, Department of Hydrogeology, Technische Universität Bergakademie Freiberg, Germany

Kumar C.P. (2003). Estimation of Ground Water Recharge Using Soil Moisture Balance Approach. National Institute of Hydrology.

K. Eckhardt (2005). How to construct recursive digital filters for baseflow separation. *Hydrological Processes*. <https://doi.org/10.1002/hyp.5675>

Loescher, W. H.; Powers, J. S. and Oberbauer, S. F. (2002). Spatial variation of throughfall volume in an oldgrowth tropical wet forest, Costa Rica. *J. Tropical Ecol.* 18:397-407.

Martinez Cuero, Julieta. (2011). Desagrarización del campo chiapaneco. ENCRUCIJADAS. *Revista Critica de Ciencias Sociales*. N°1, 2011, pp. 106

(MAGA) Ministerio de Agricultura Ganaderia y Alimentación (2003). *Mapa de cobertura vegetal y uso de la tierra a escala 1:50,000 de la República de Guatemala Año 2003*. Memoria tecnica y descripción de resultados.

McDonald, R. y Shemie, D. (2014). Urban water blueprint: mapping conservation solutions to the global water challenge. *The Nature Conservancy*.

Meyer, S. C. (2005). “Analysis of base flow trends in urban streams, northeastern Illinois, USA.” *Hydrogeol. J.*, 13, 871–885.

Miguel Murillo Llanes. (2010). *El escurrimiento superficial, Metodos para su estimación en conservación de suelos*. Ministerio de Desarrollo Rural y Tierras La paz – Bolivia. Pag.1.

M. A. Moreno, B. E. Vieux, (2013). Estimation of spatio-temporally variable groundwater recharge using a rainfall-runoff model. *Journal of Hydrologic Engineering*. Pag 237-249.

Pan Y., Gong H., Zhou D., Li X., Nakagoshi N. (2011). Impact of Land Use Change on Groundwater Recharge in Guishui River Basin, *China*. Springer. Pag.734-743"

Pсахem (Julio 2020). *Variabilidad espacial y temporal de la recarga potencial en cuencas hidrográficas forestales Pro-bosque*. Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos del Estado de México.

Redacción. (Última edición: 1 de febrero del 2021). Definición de Edafología. Recuperado de: <https://conceptodefinicion.de/edafologia/>. Consultado el 10 de noviembre del 2021

Ríos, Mauricio José, Prado-Hernández, Víctor, Romero-Bautista, Alejandro, Reyes-López, Delfino, & Pascual-Ramírez, Fermín. (2019). Estimación de la disponibilidad hídrica en la cuenca del lago de Zirahuén. *Tecnología y ciencias del agua*, 10(3), 275-288. Epub 21 de abril de 2021. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-03-11>

Scanlon, B. R., Dutton, A., and Sophocleous, M. A. (2003). Groundwater recharge in Texas, *Texas Water Development Board*, Austin, TX.

SEMARNAT(Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales), (2007). *El manejo Integral de Cuencas en México*. Pág. 11-18.

SCS (1991). *Engineering field handbook*. Chapter 2. SCS, Washington D.C.

Sinoquet, H.; Le Roux, X. (2000). Short term interactions between tree foliage and the aerial environment: An overview of modelling approaches available for tree structure-function models. *Ann. For. Sci.* 57: 477-496.

Soil Survey Staff. (1972). Soil taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. 2nd Edition. *Agric. Handbook* 436.

Sophocleous, M. A. (1991). "Combining the soil-water-balance and waterlevel fluctuation methods to estimate natural ground-water recharge: Practical aspects." *J. Hydrol.* (Amsterdam), 124(3-4), 229-241.

Soorooshian, S., y Guptan V. (1995). Model Calibración in; computer models of watershed hidrology. *Water resources publications*,11,30.

Springgay, E., Casallas, S., Janzen, S. y Brito, V. (2019). The forestwater nexus: an international perspective. *Forests*.

Tapia-Vargas, Tiscareño-López, J. Stone, J. Oropeza-Mota, y M. Velázquez-Valle. (2001). Tillage system effects on runoff and sediment yield in hillslope agriculture. *Field Crop Res.* 69: 173-182.

Timothy O. Erickson y Heinz G. Stefan. (2009). Natural Groundwater Recharge Response to Urbanization: Vermillion River Watershed, Minnesota. *J. Water Resour.*

Vázquez-Sánchez, M.A. (2008). *Zonas afectadas por el huracán Stan, en las regiones, Istmo costa, sierra y soconusco. Investigación para su ordenamiento*. El Colegio de la Frontera Sur/ Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología del Estado de Chiapas/Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas/Comisión de Áreas Naturales Protegidas/ Instituto de Desarrollo Sustentable en Mesoamérica A. C., San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, México.

Vargas H. Espinosa M. Marcial R. Solís D. Castillejos K. (diciembre 2014). Características físico-bióticas de la cuenca del río Grijalva. *Researchgate*, cap1, 29.

Walski, T., Chanse, D., Savie, D, Grayman, W., Beckwith, S., y Koelle, e. (2007). *Advanced water distribution Modeling and management* Bentley intitute press.

Waibel, L. (1946). *Ediciones de la Sociedad Mexicana de Geografía y Estadística*. México, Distrito Federal, México.

MuthuKrisbman, S. Jon Harbor, Kyoung J., y Bernard A. Engel (2006) Caibration of a simple rainfall-runoff Model for Long-term Hydrogical Impact Evaluation. *URISA Journal* • Vol. 18, No. 2

Anexo A. Tablas complementarias

Homologación de la clasificación de los usos de suelo de Guatemala a la clasificación mexicana.

CÓDIGO	CLASIFICACIÓN	USO DE GUATEMALA	SUELO
100	Zonas urbanas	Escombreras o vertederos	Otros comercios y servicios
		Base militar	Cementerio
		Pista de aterrizaje	centro comercial
		Pista de aterrizaje	Complejo industrial
		Hospital	Áreas turísticas
		Instalación deportiva	Beneficios
		Instalación educativa	Tejido urbano
		101	Bosques de coníferas.
		Conífera	
102	Bosque mesófilo		
103	Coníferas y latifoliadas	Bosques mixtos	
104	Latifoliadas	Bosques latifoliados	café y cardamomo
		Latifoliado	Cítricos
		Aguacate	Frutales deciduos
		Arboles dispersos	mango
		Café	Hule
105	Selvas bajas		
106	Manglar		
107	Selvas altas y medianas		
108	Otras áreas forestales	Huerto	
		Vivero	
110	Cuerpos de agua	Rio	
		Lago o laguna etc.	
111	Desprovisto de vegetación	playas, dunas, arenales	Rocoso o lavas
		Zona quemada	lotificaciones
		Zona de extracción minera	
112	Agricultura		

	Agroindustria	Espacios con vegetación
	Arroz	mosaico de cultivos
	Pasto cultivado	Otras hortalizas
	Pasto natura	Caña de azúcar
	Granos básicos	Banano

Anexo B: Mapas de los parámetros del ciclo hidrológico.

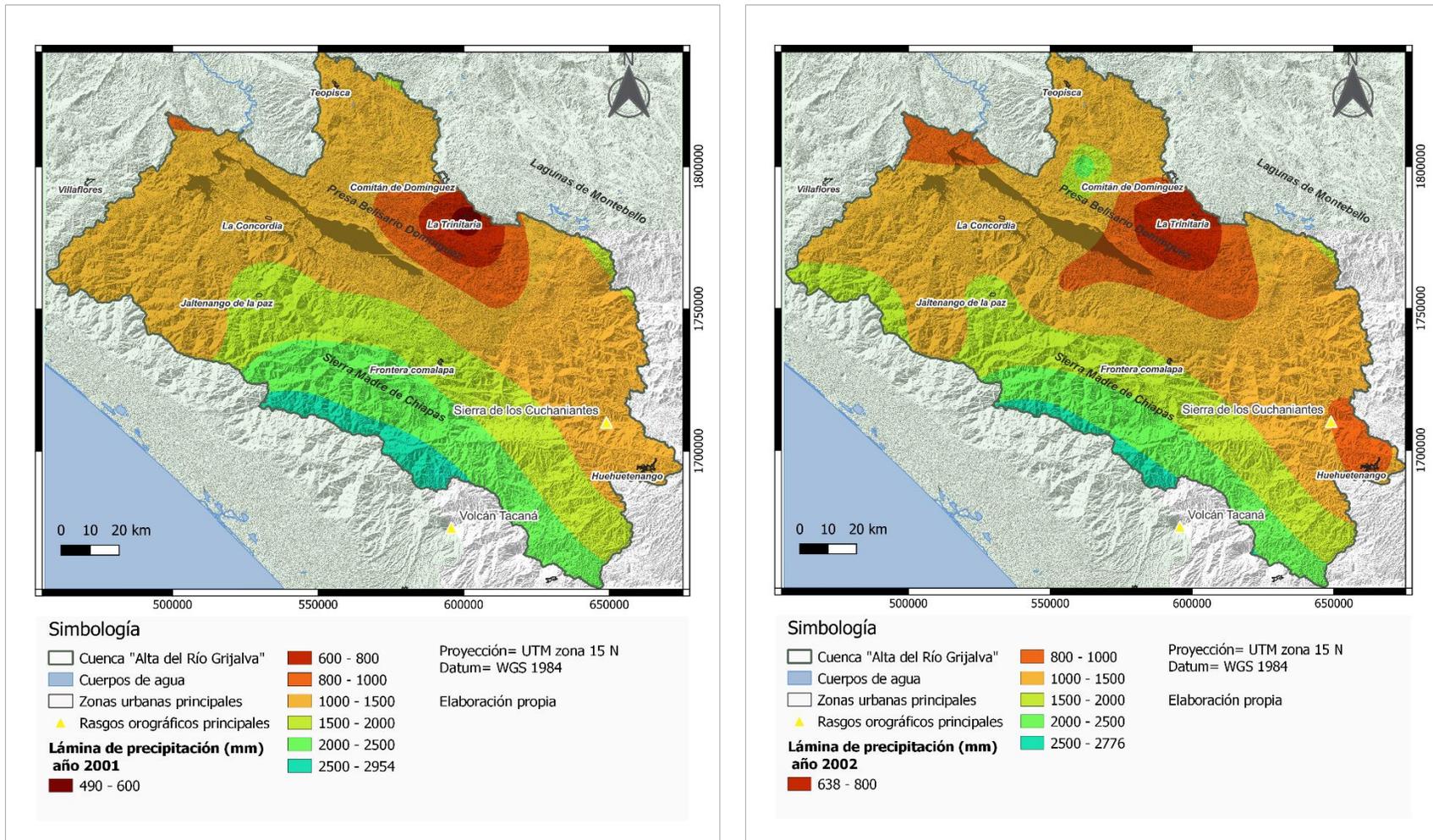


Figura B-1.- Láminas de precipitación (mm) año 2001 y 2002 cuenca "Alto Grijalva".

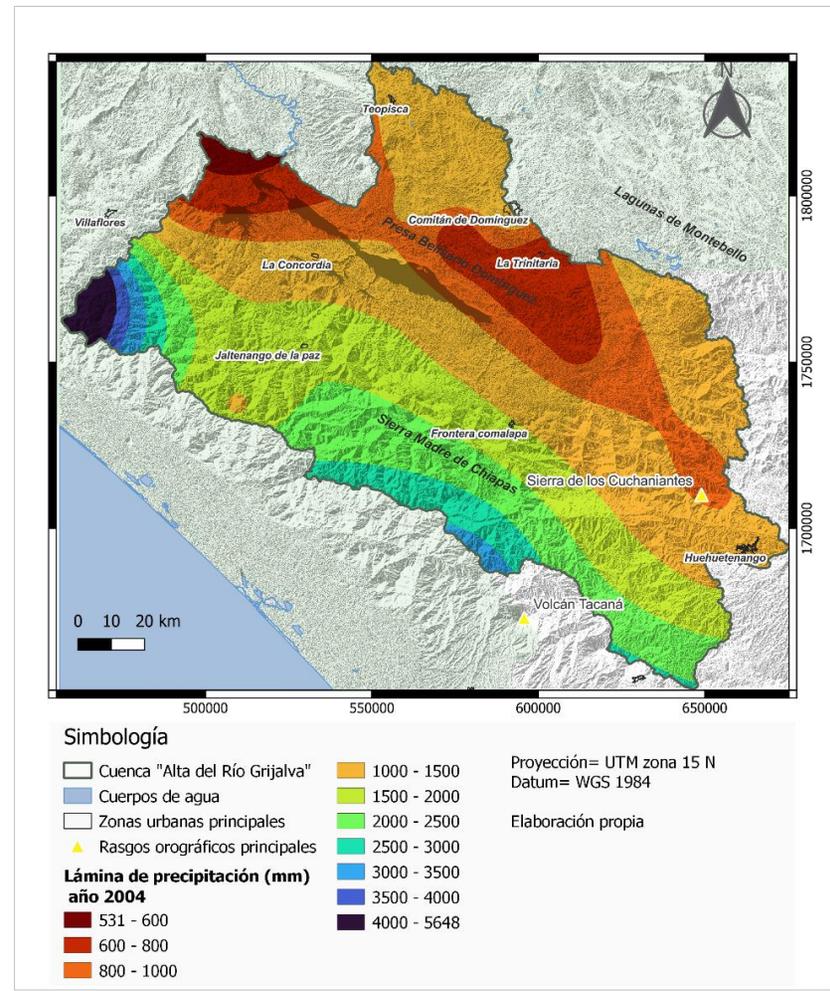
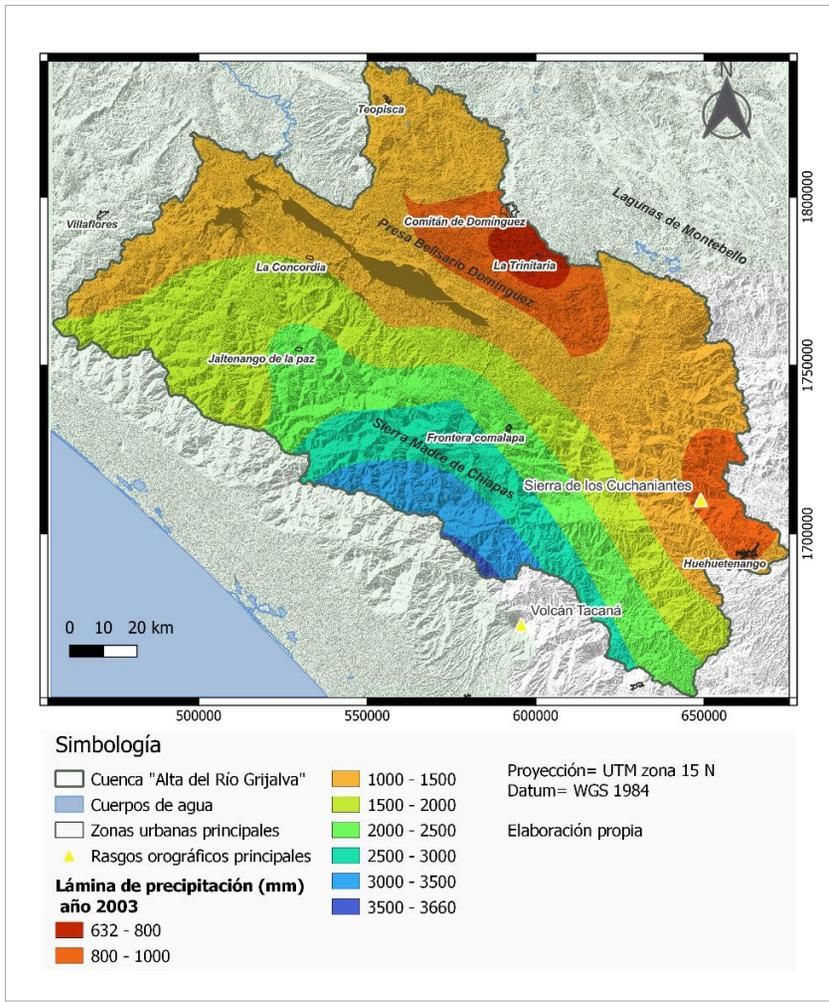


Figura B-2.- Láminas de precipitación (mm) año 2003 y 2004 cuenca "Alto Grijalva".

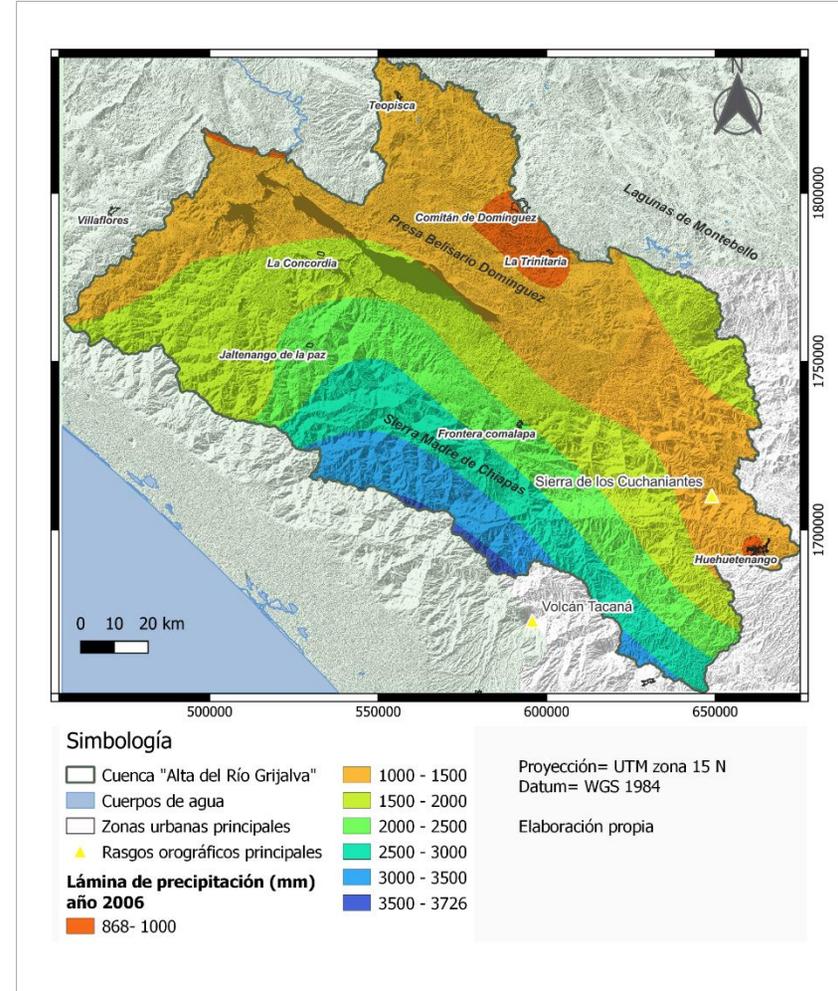
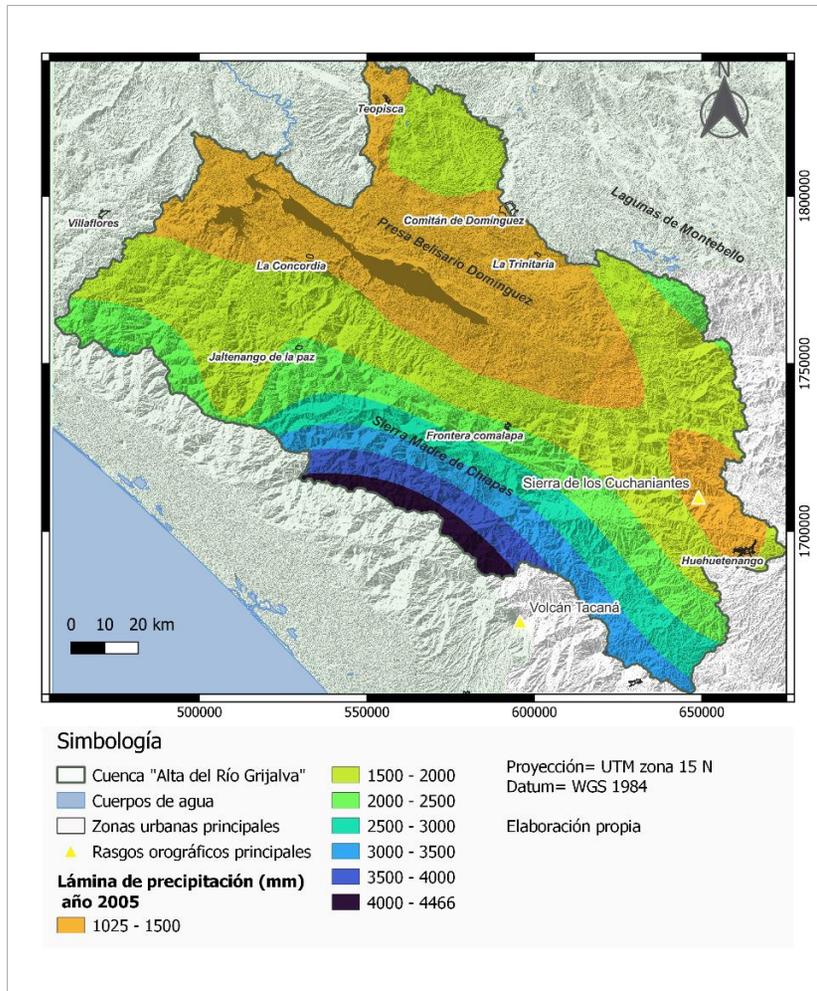


Figura B-3.- Láminas de precipitación (mm) año 2005 y 2006 cuenca "Alto Grijalva".

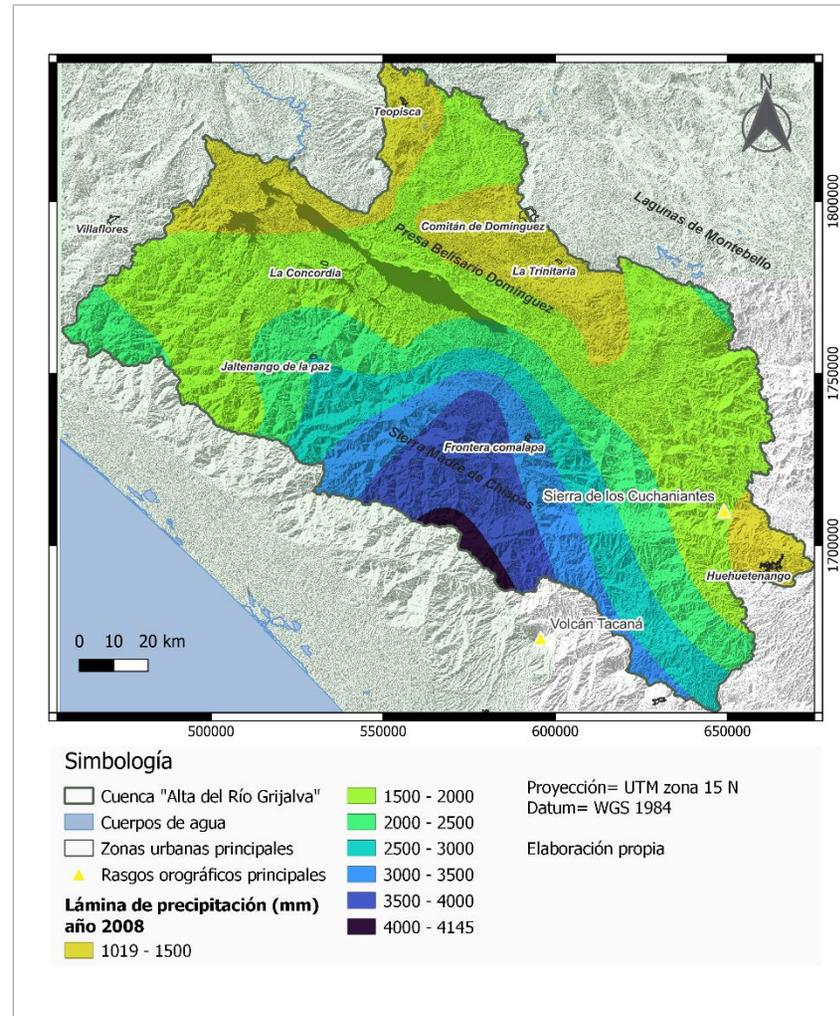
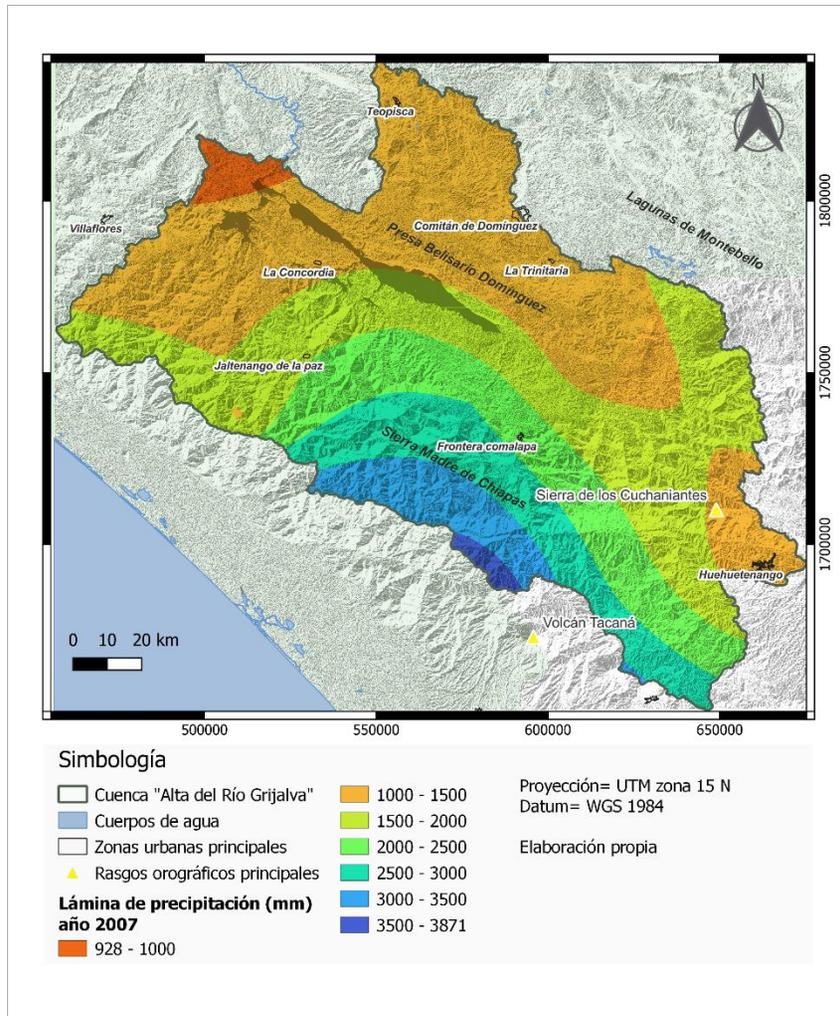


Figura B-4.-Láminas de precipitación (mm) año 2005 y 2006 cuenca "Alto Grijalva".

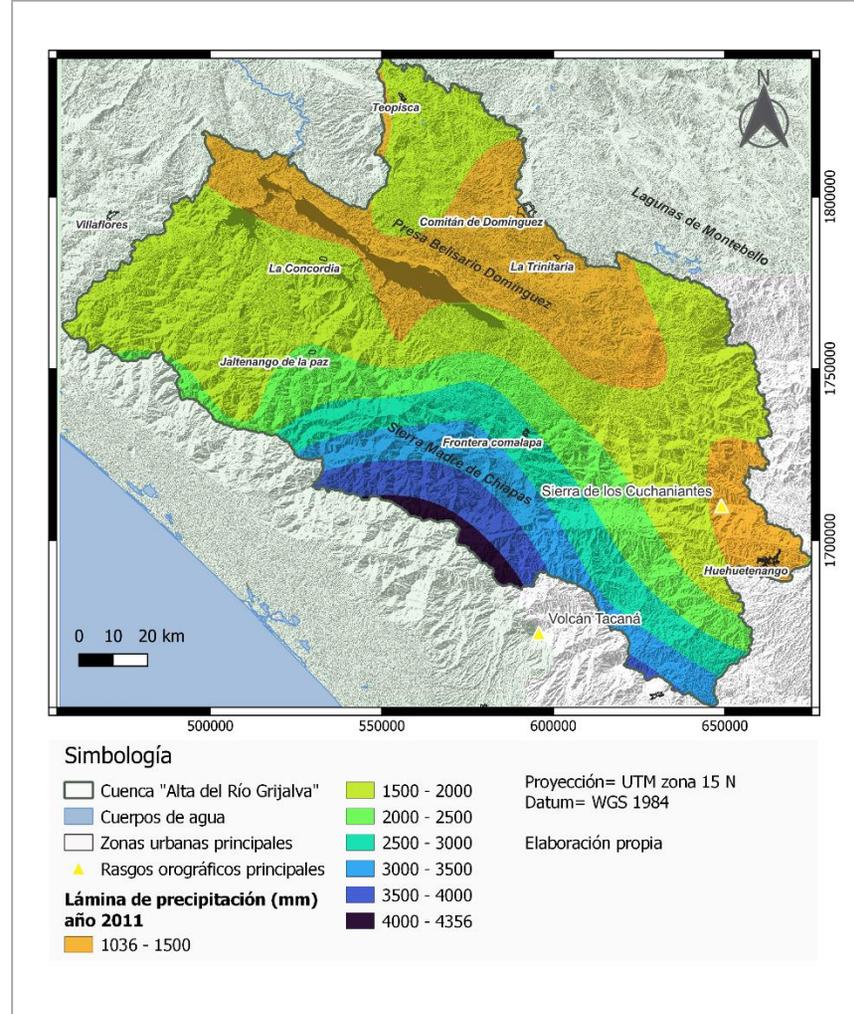
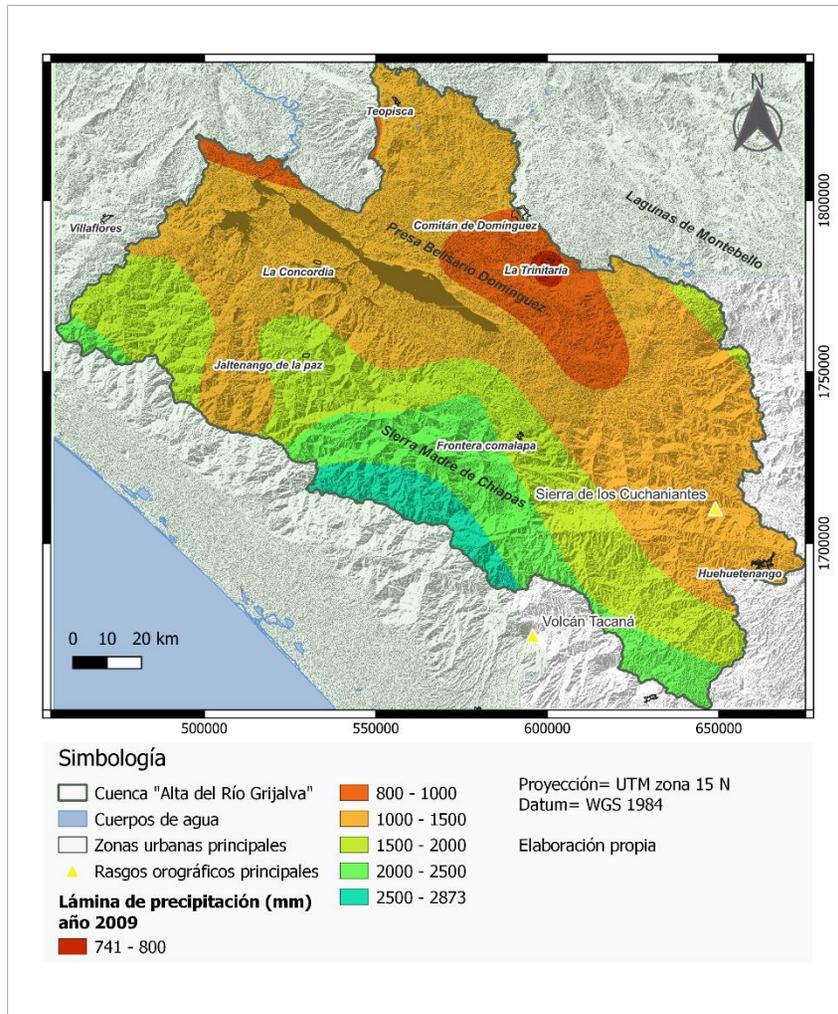


Figura B-5.- Láminas de precipitación (mm) año 2009 y 2011 cuenca "Alto Grijalva".

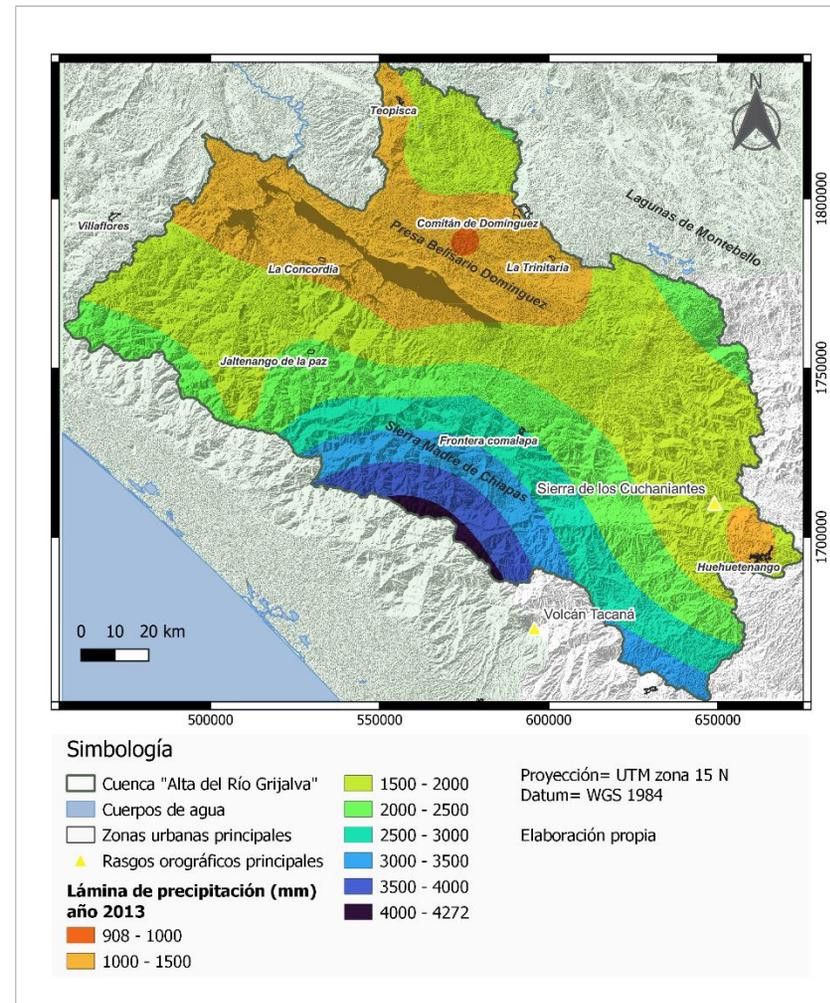
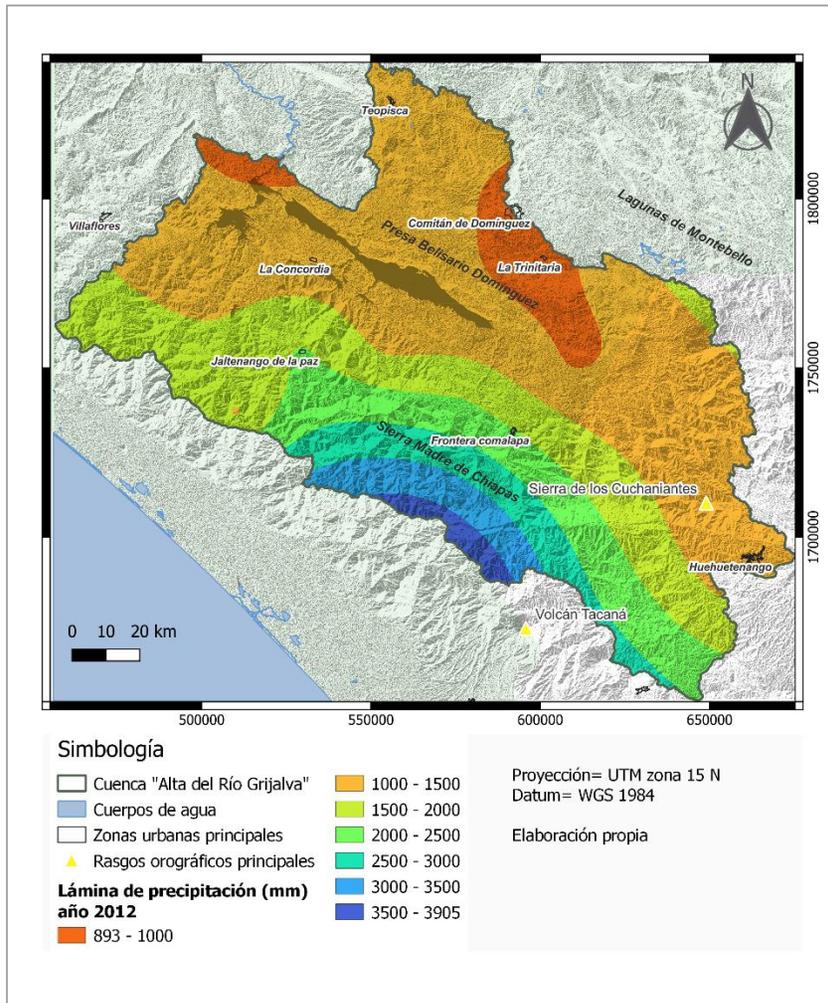


Figura B-6.- Láminas de precipitación (mm) año 2012 y 2013 cuenca "Alto Grijalva".

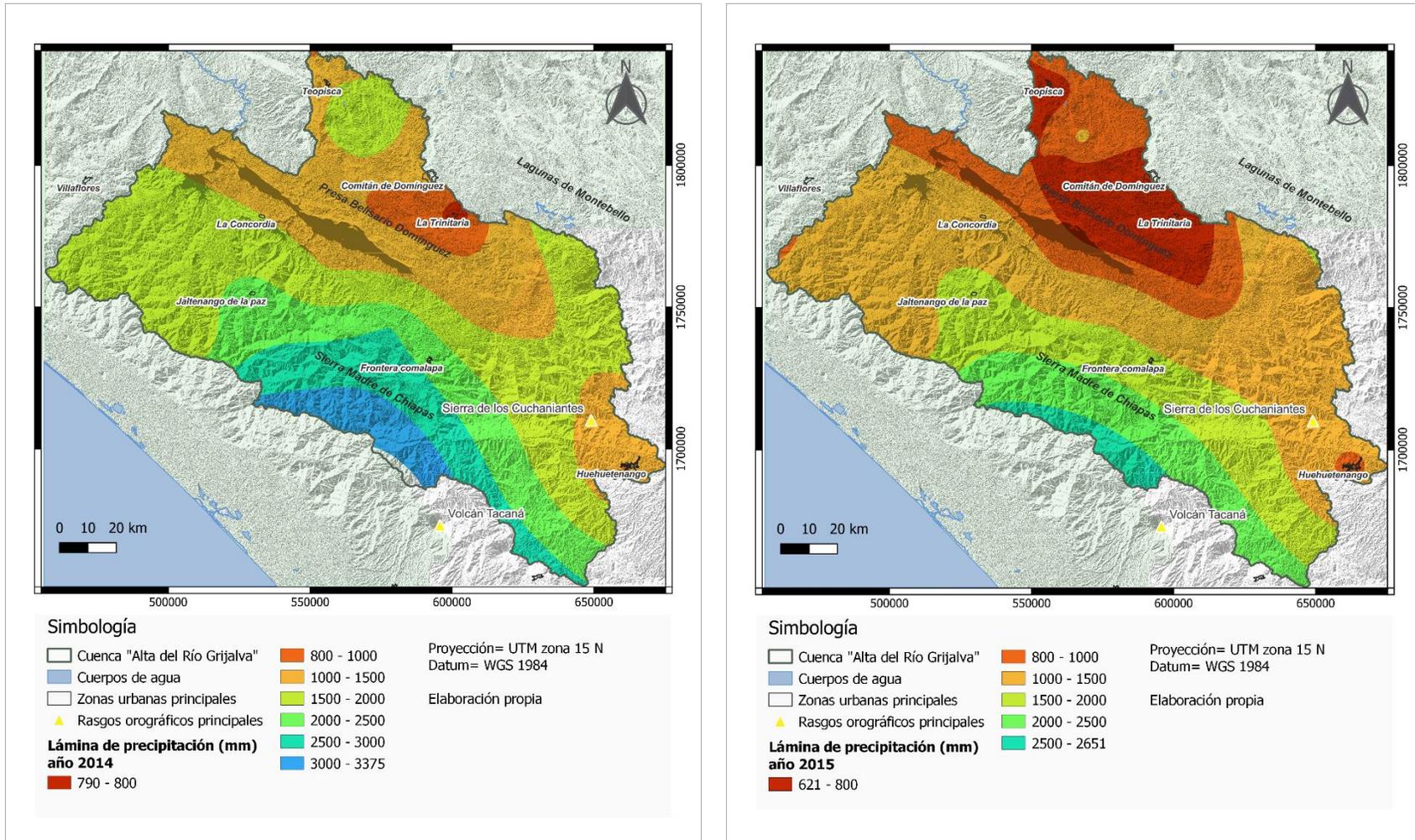


Figura B-7.-Láminas de precipitación (mm) año 2012 y 2013 cuenca "Alto Grijalva".

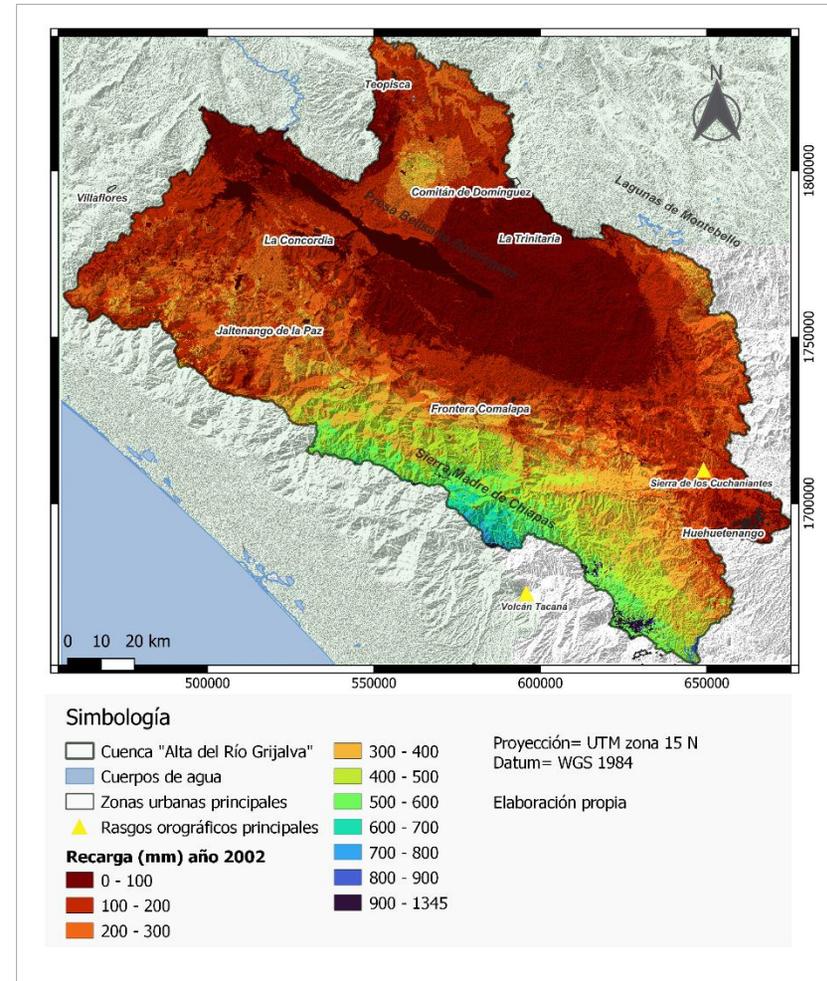
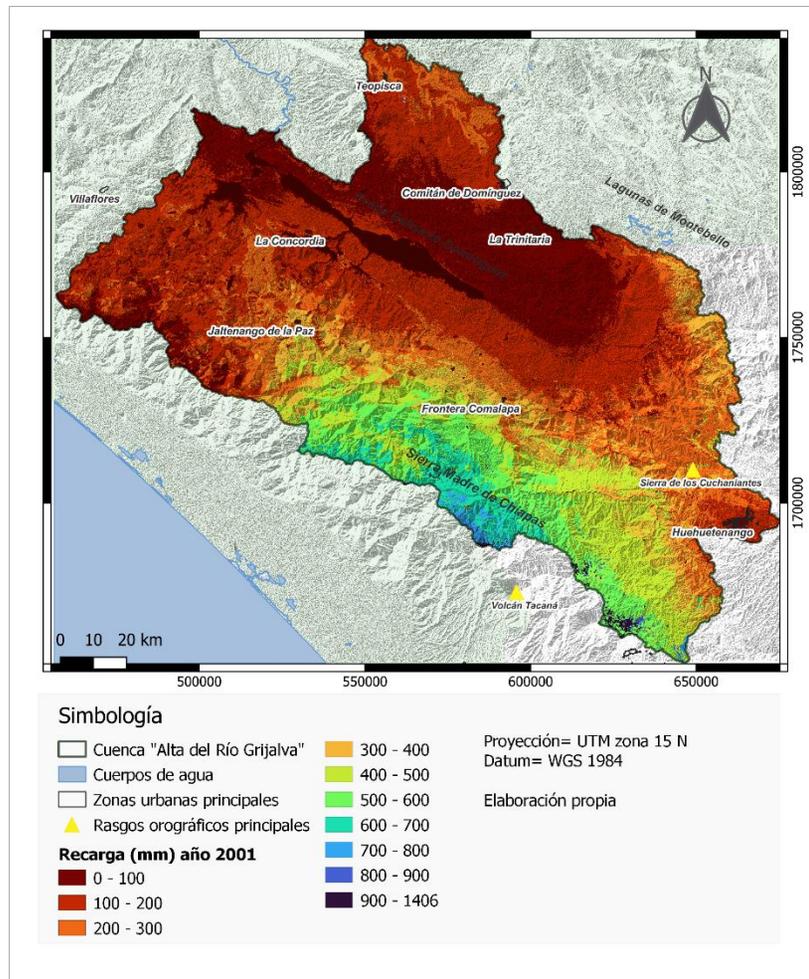


Figura B-8.- Láminas de recarga potencial (mm) año 2001 y 2002 cuenca "Alto Grijalva".

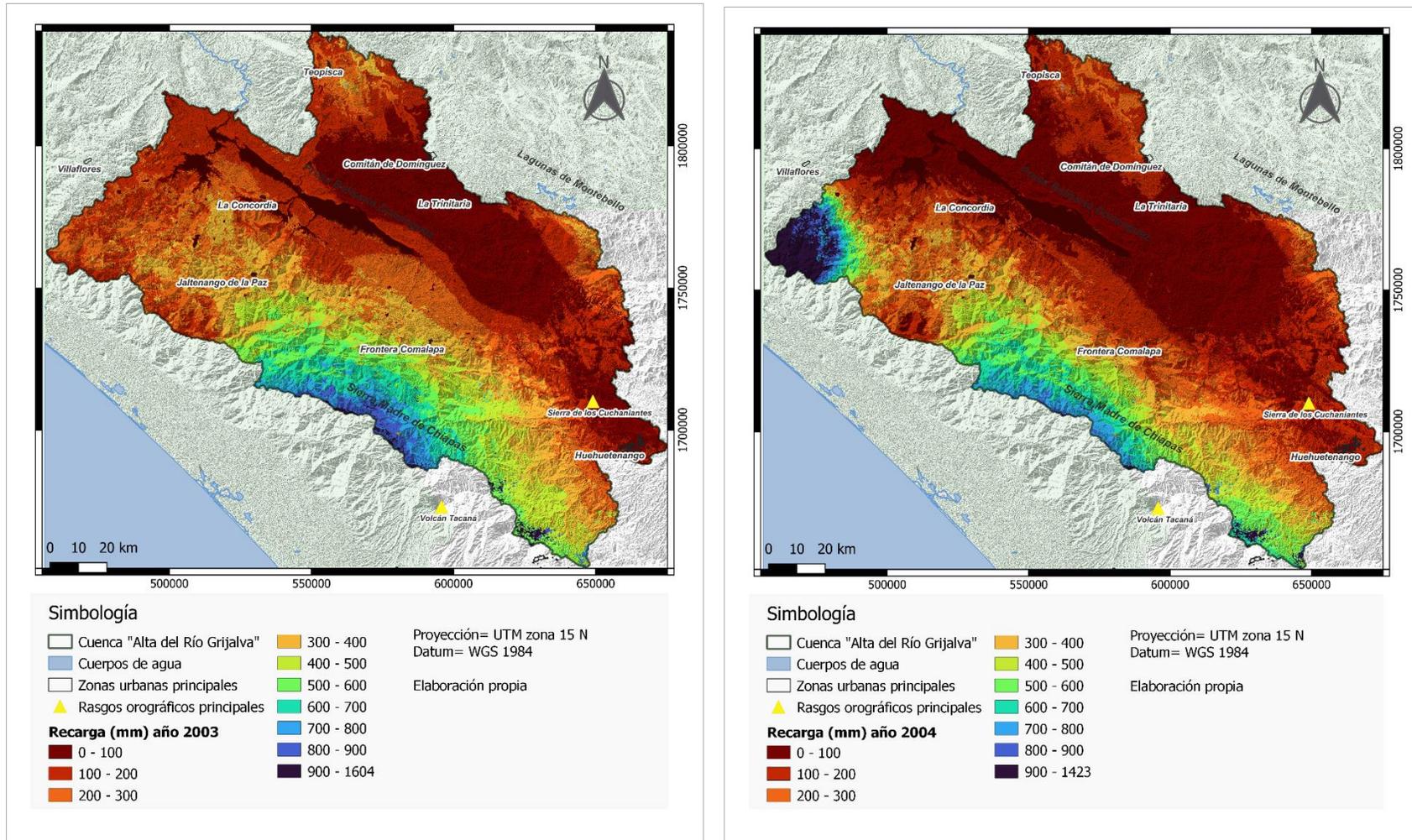


Figura B-9.- Láminas de recarga potencial (mm) año 2003 y 2004 cuenca "Alto Grijalva".

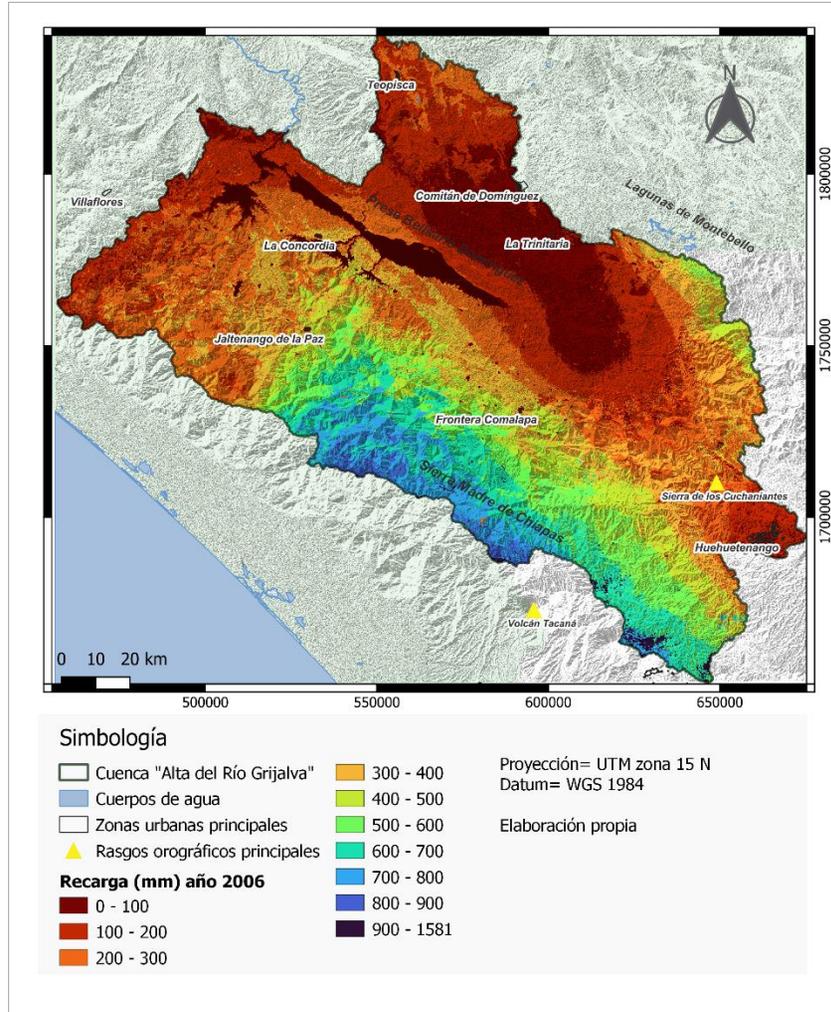
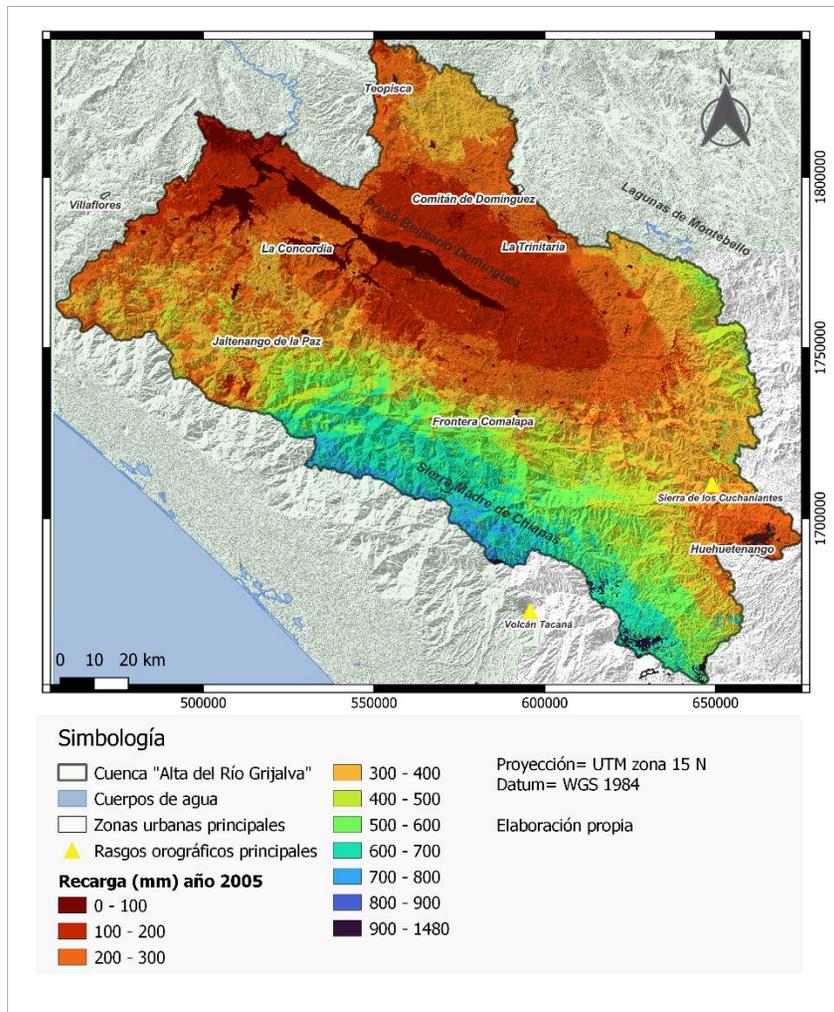


Figura B-10.- Láminas de recarga potencial (mm) año 2005 y 2006 cuenca "Alto Grijalva".

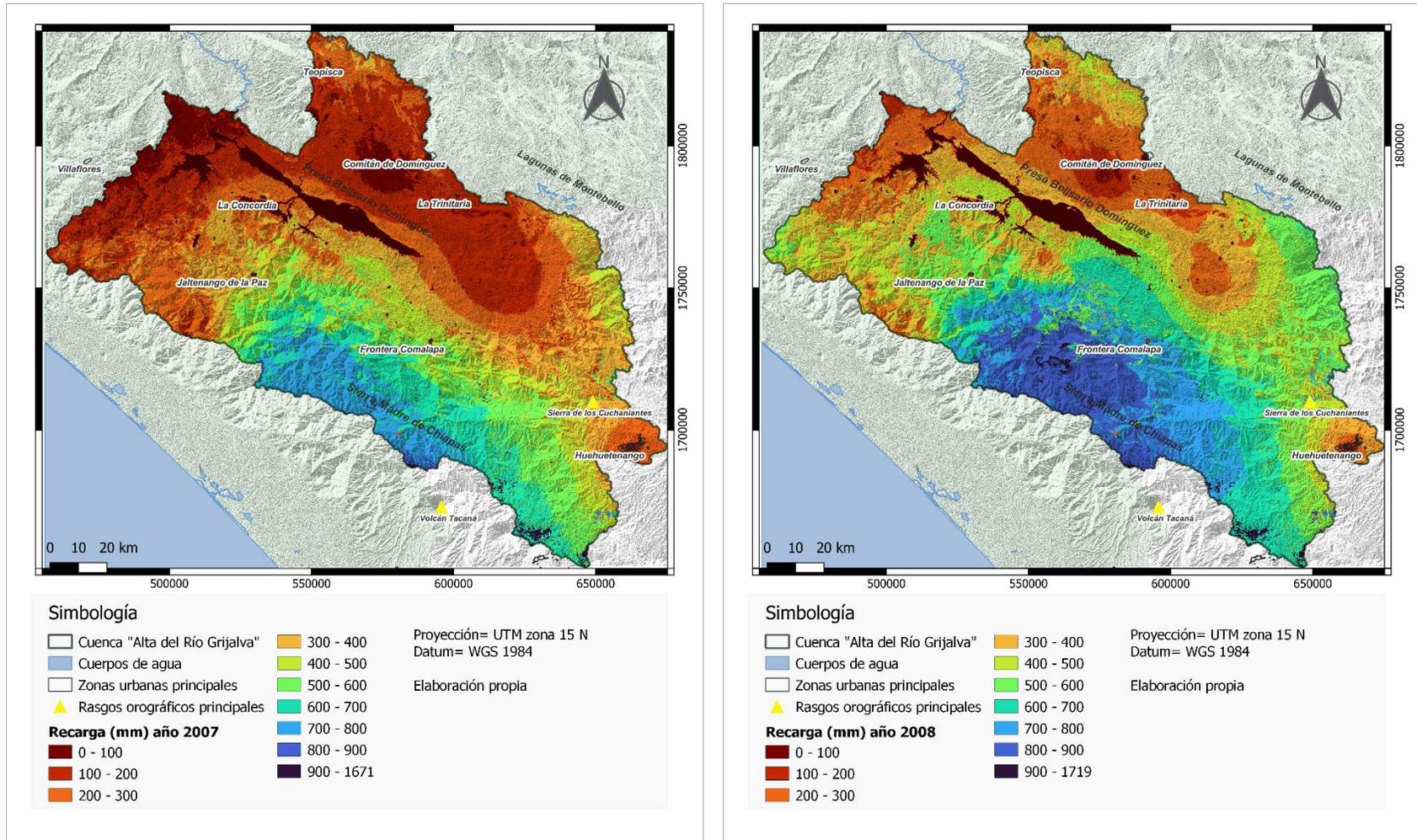


Figura B-11.-Láminas de recarga potencial (mm) año 2007 y 2008 cuenca "Alto Grijalva".

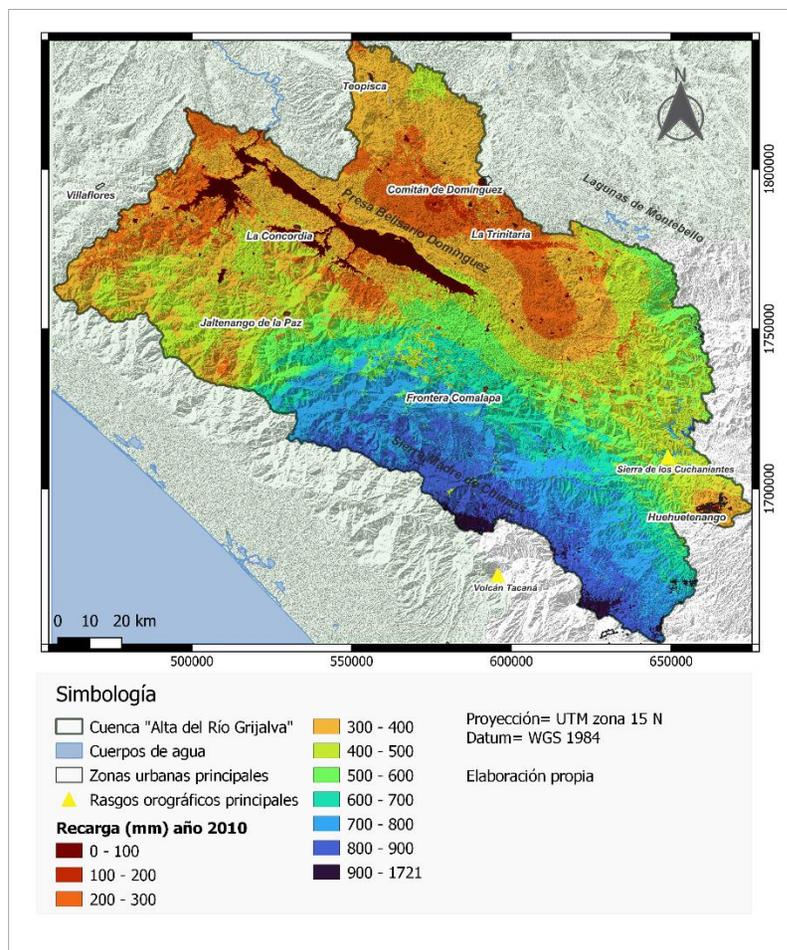
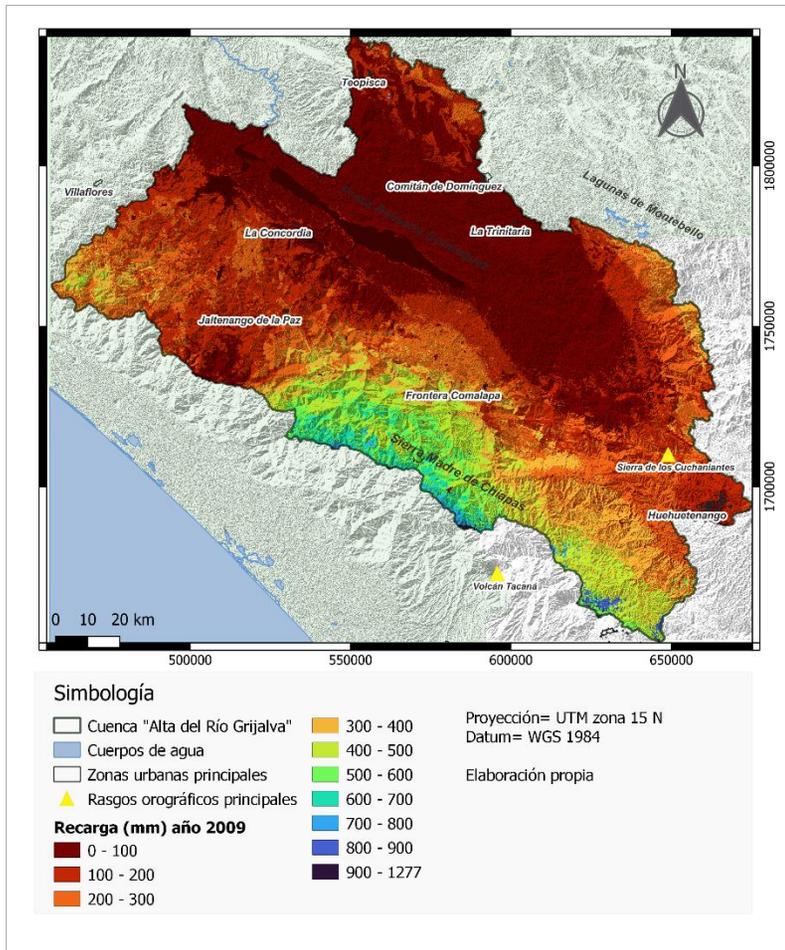


Figura B-12.-Láminas de recarga potencial (mm) año 2009 y 2010 cuenca "Alto Grijalva".

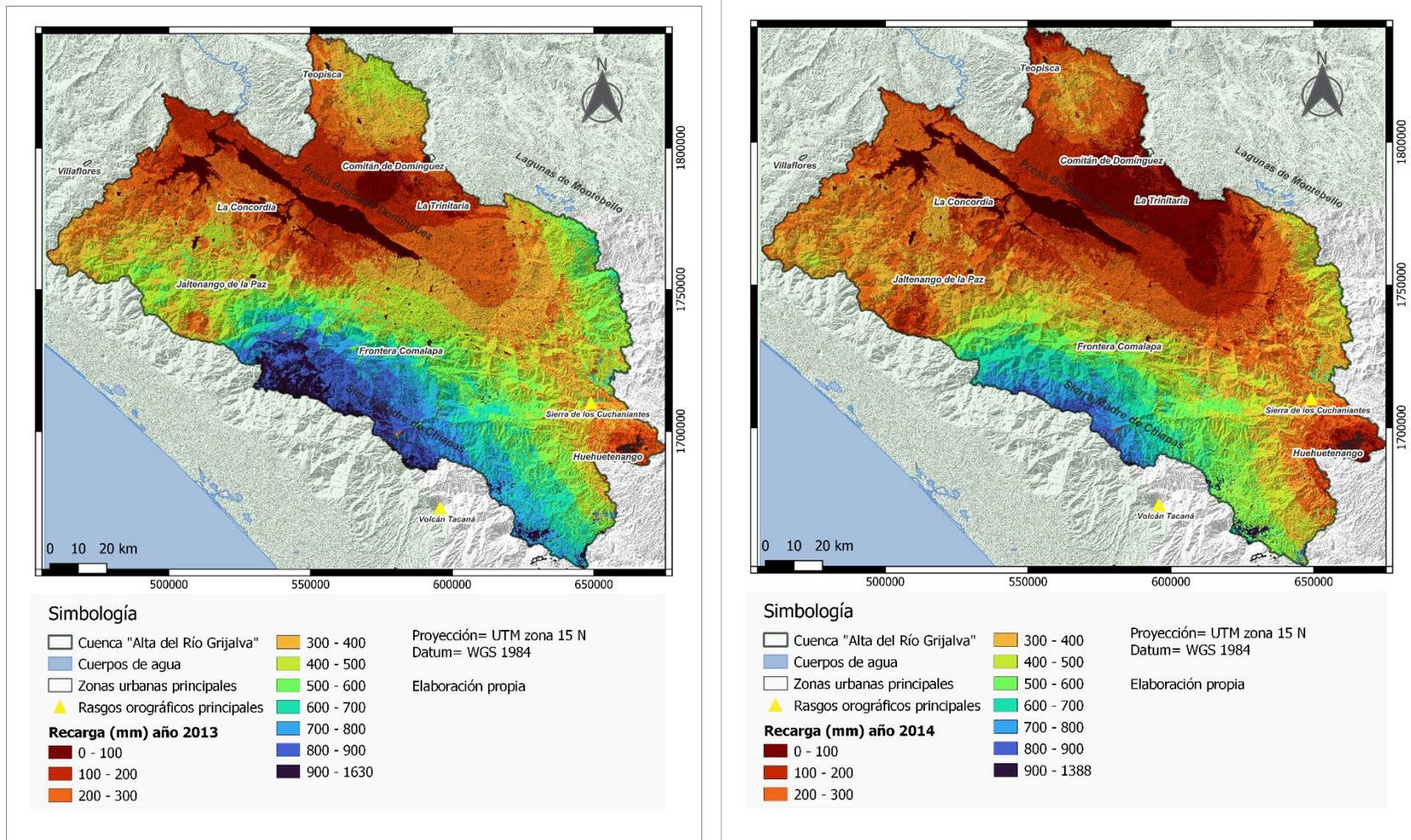


Figura B-13.-Láminas de recarga potencial (mm) año 2011 y 2012 cuenca "Alto Grijalva".

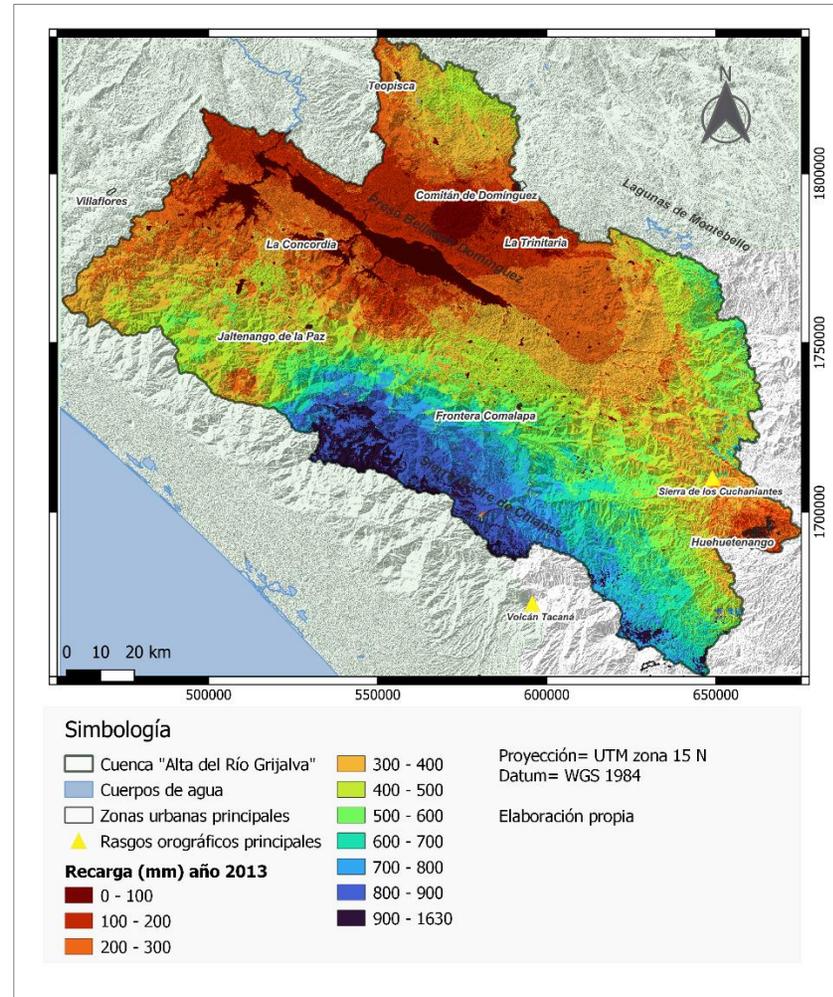
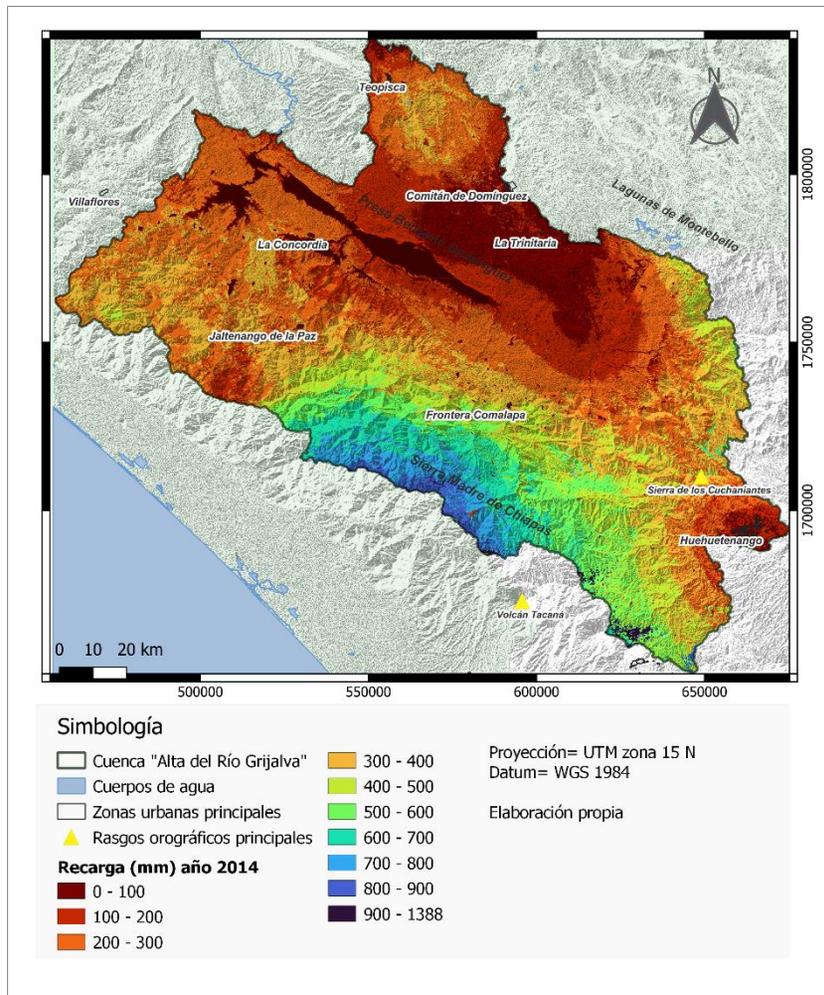


Figura B-14.-Láminas de recarga potencial (mm) año 2013 y 2014 cuenca "Alto Grijalva".

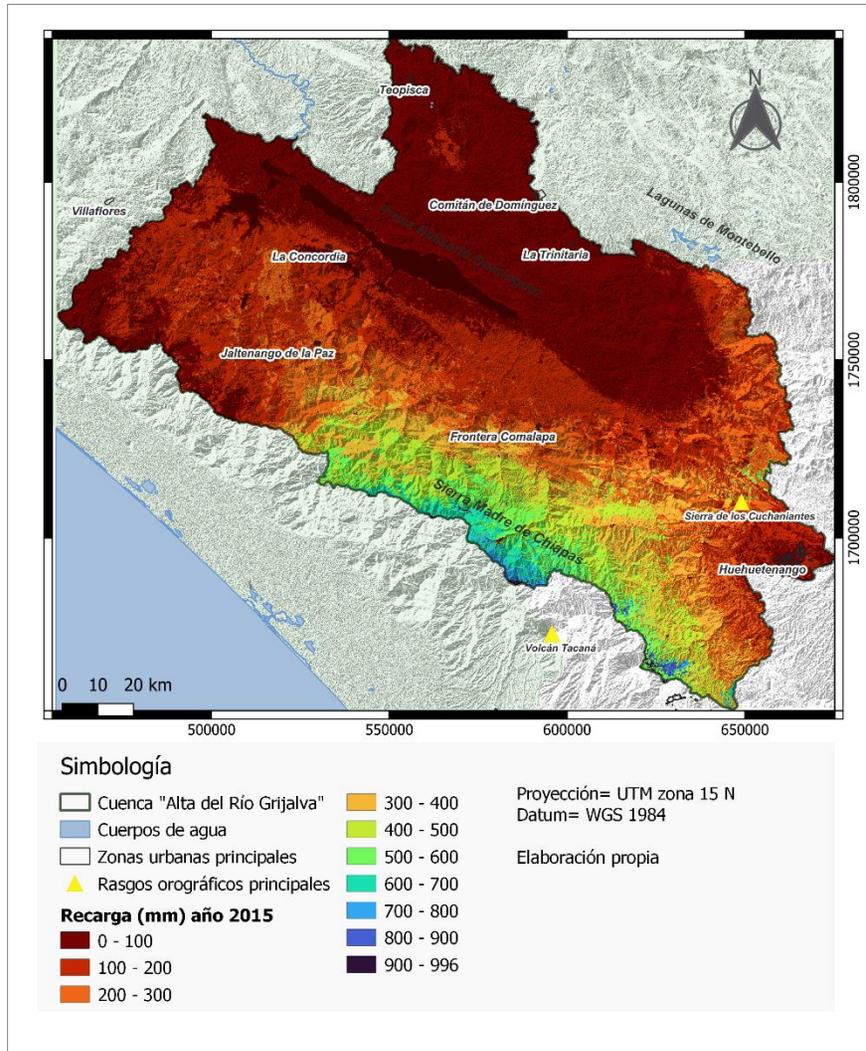


Figura B-15.-Lámina de recarga potencial (mm) año 2015 cuenca "Alto Grijalva".

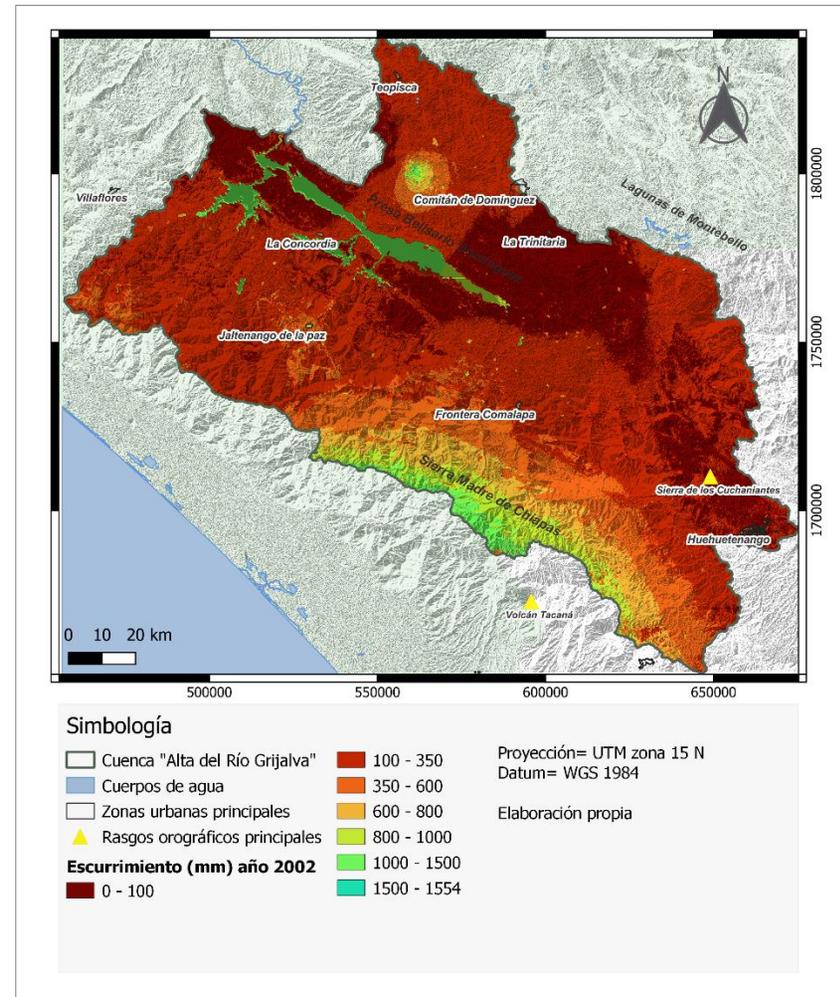
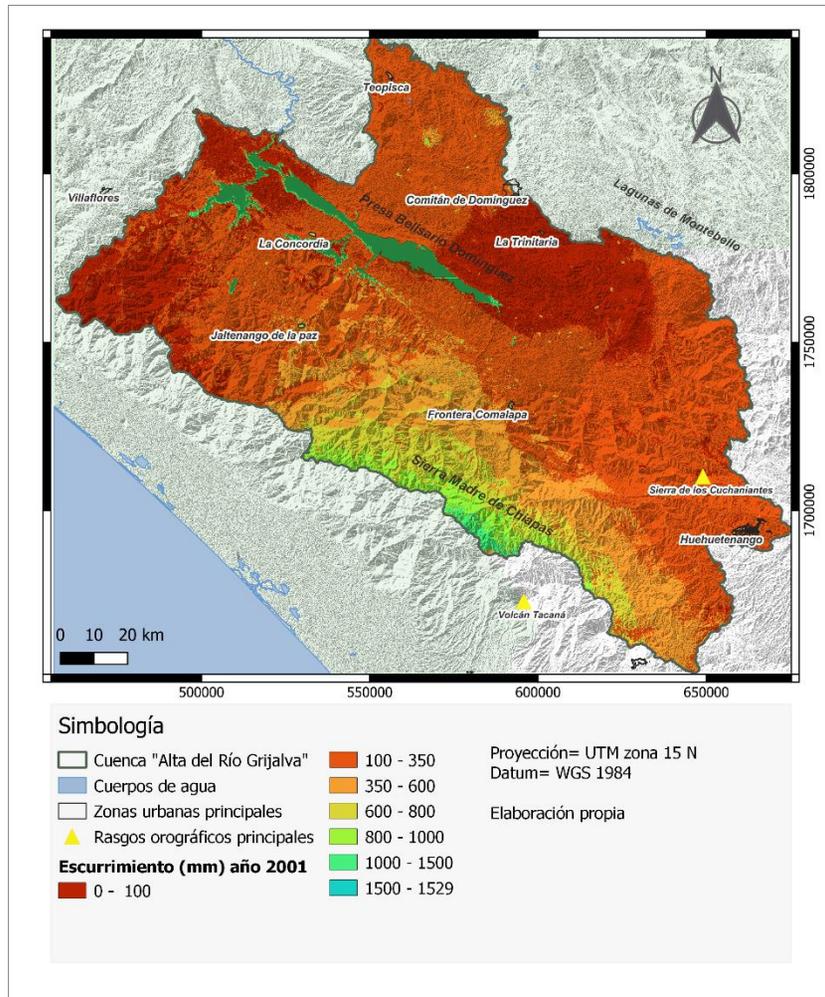


Figura B-16.- Lámina de escorrentamiento superficial (mm) año 2001 y 2002 cuenca "Alto Grijalva".

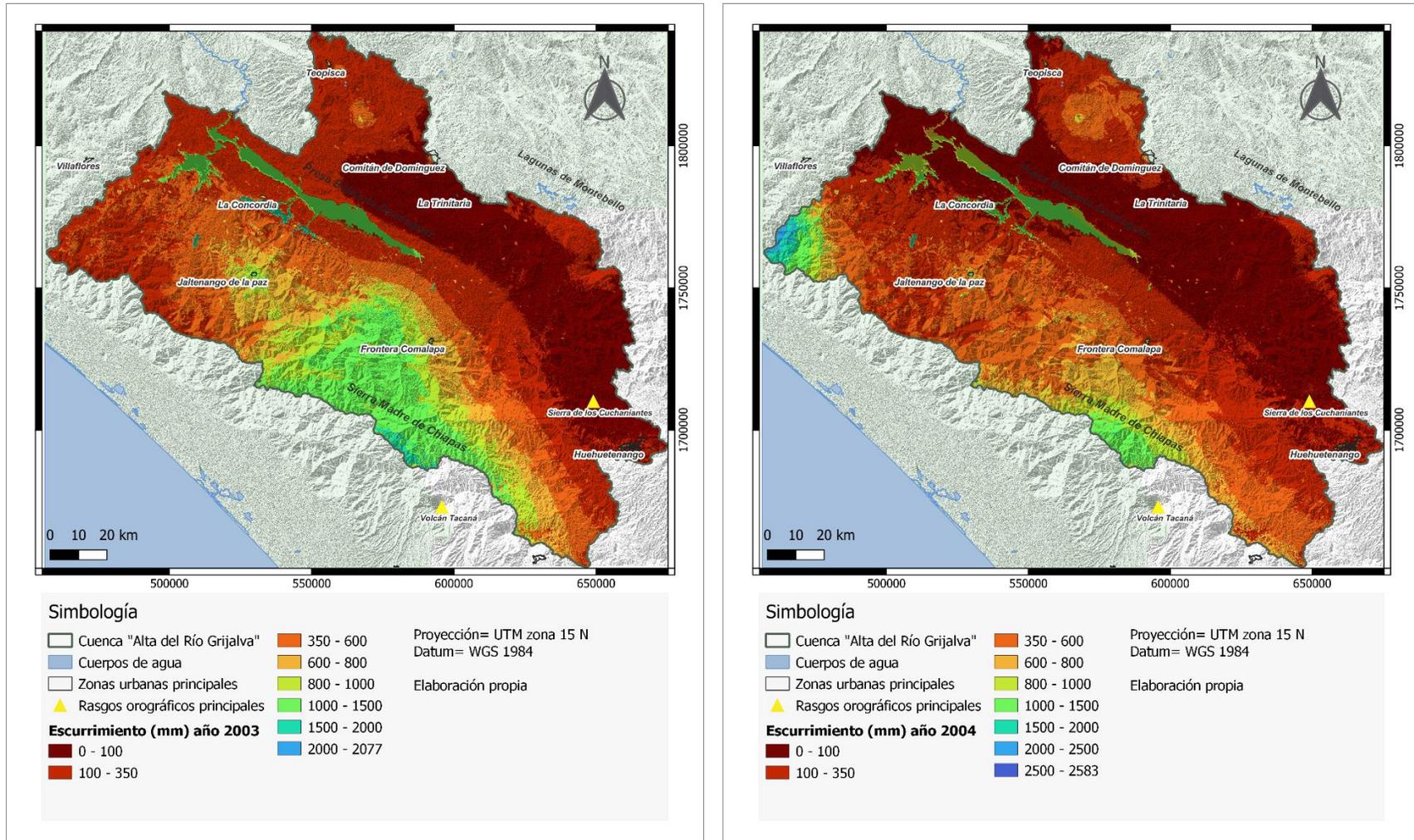


Figura B-17.- Lámina de escorrentamiento superficial (mm) año 2003 y 2004 cuenca "Alto Grijalva".

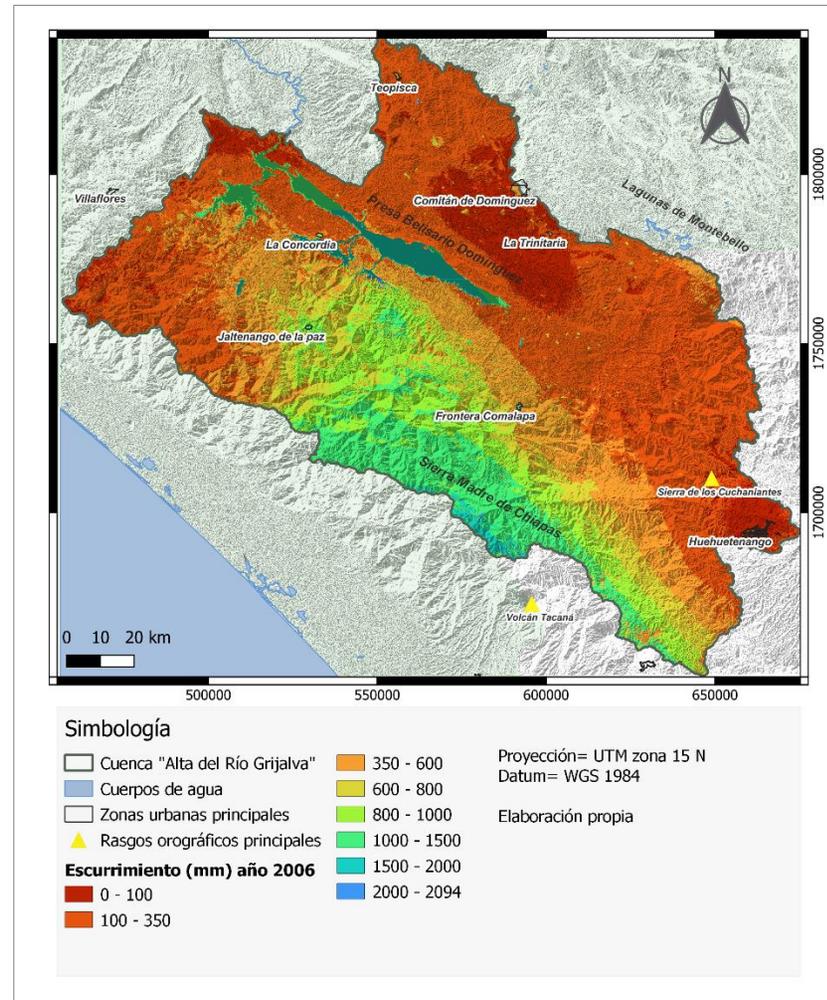
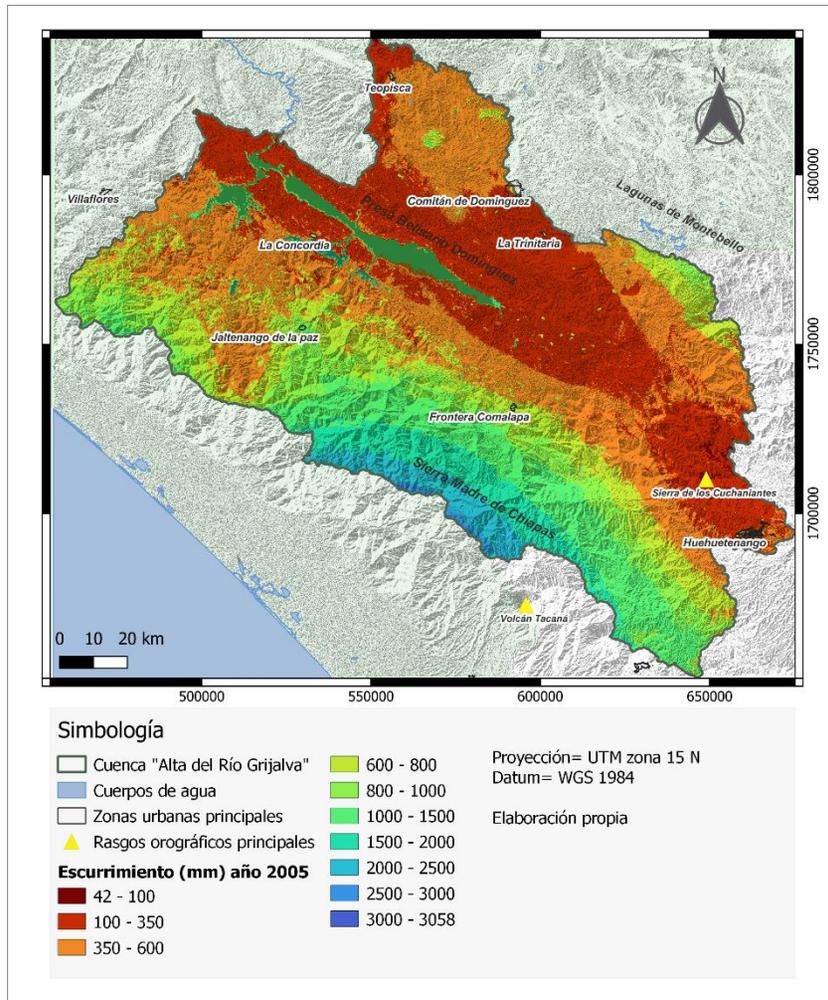


Figura B-18.- Lámina de escurrencimiento superficial (mm) año 2005 y 2006 cuenca "Alto Grijalva".

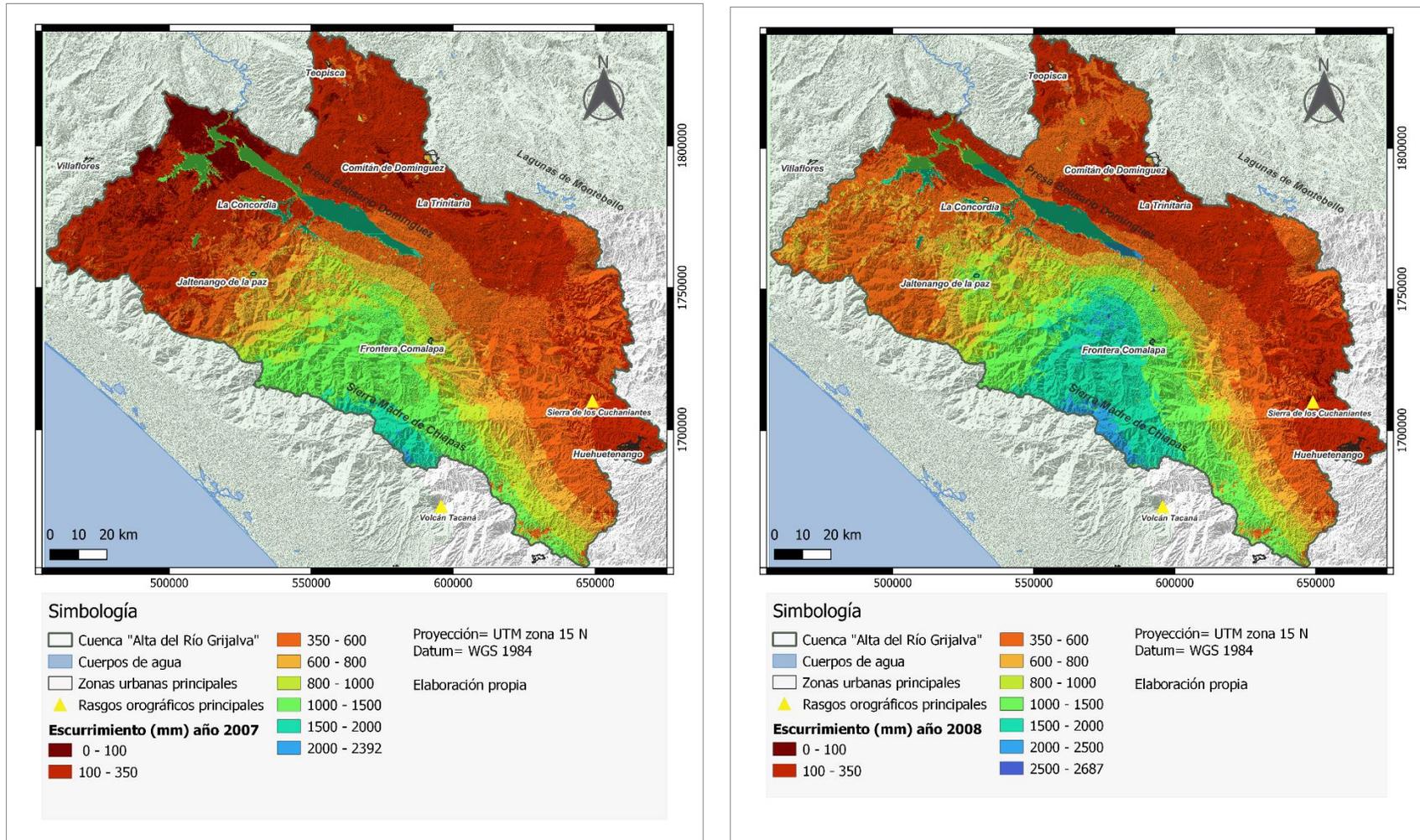


Figura B-18.- Lámina de escorrentamiento superficial (mm) año 2007 y 2008 cuenca "Alto Grijalva".

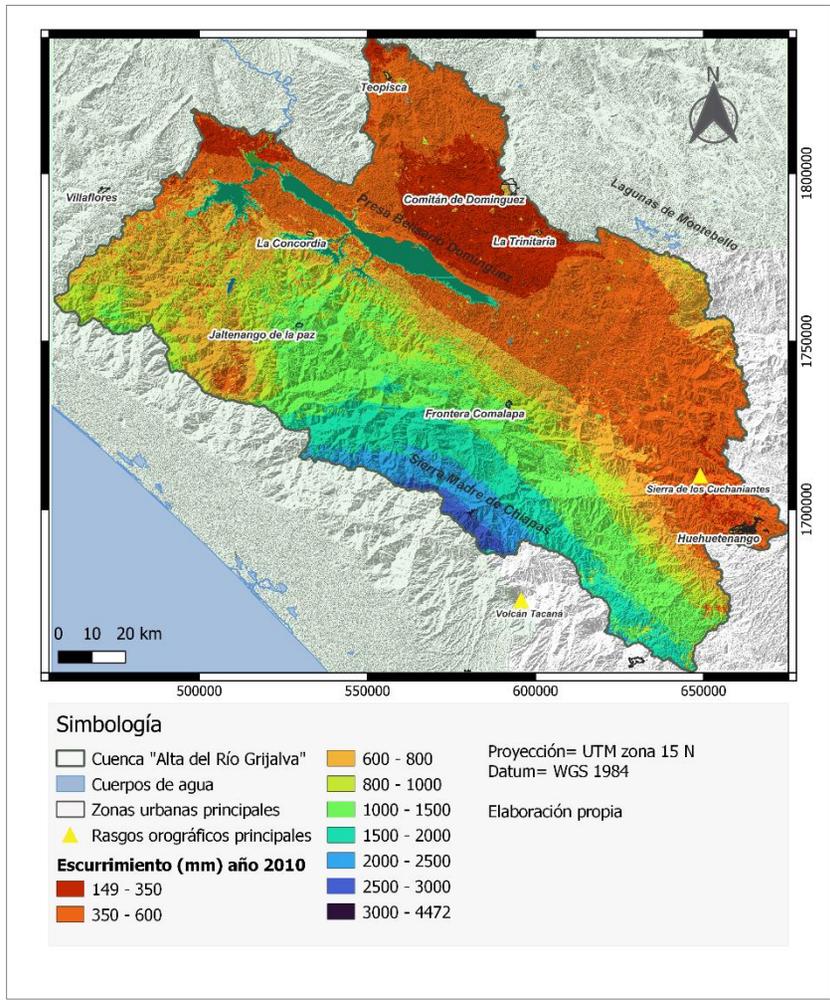
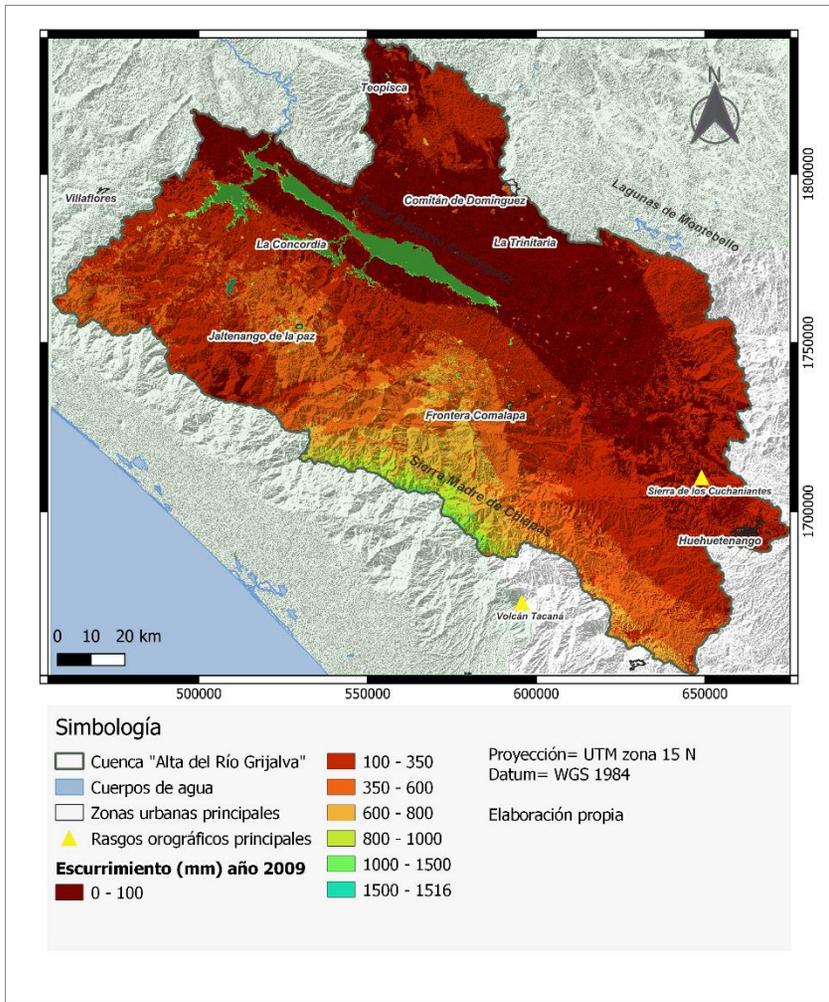


Figura B-19.- Lámina de escorrentamiento superficial (mm) año 2009 y 2010 cuenca "Alto Grijalva".

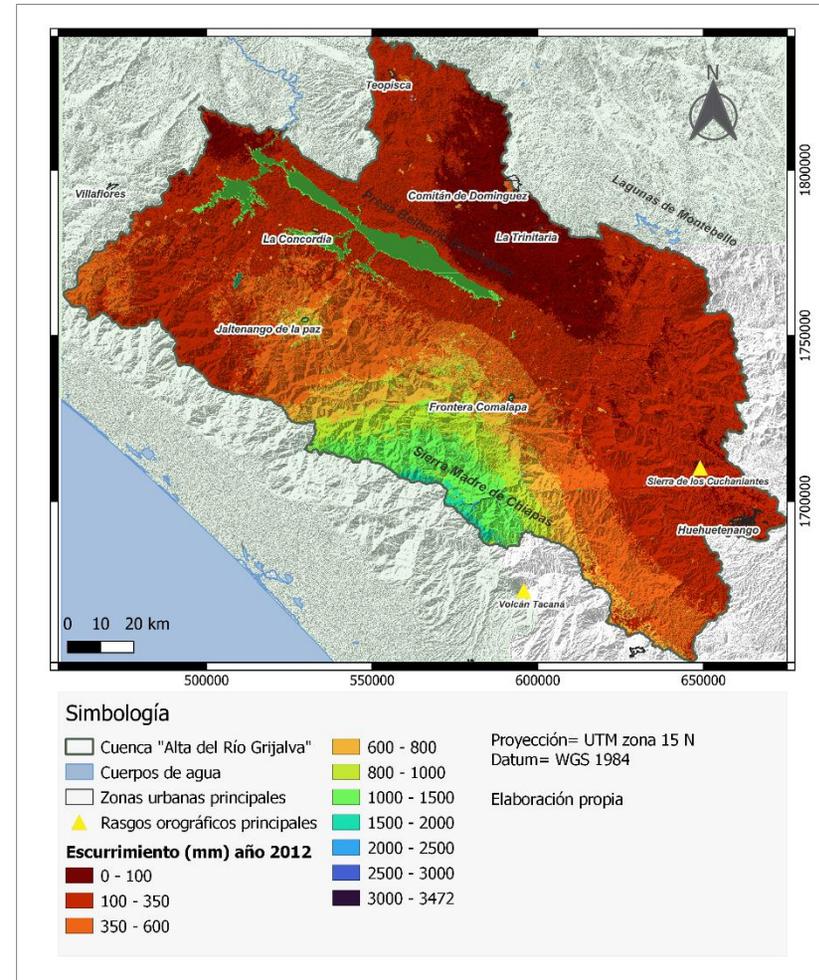
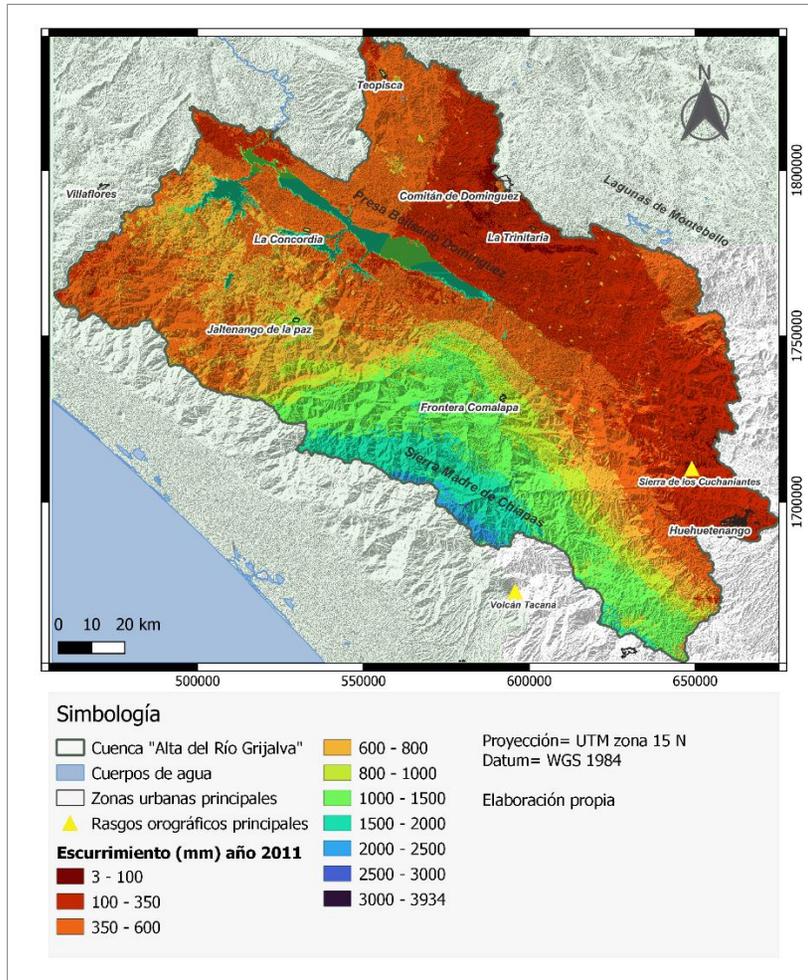


Figura B-20.- Lámina de escorrentamiento superficial (mm) año 2011 y 2012 cuenca "Alto Grijalva".

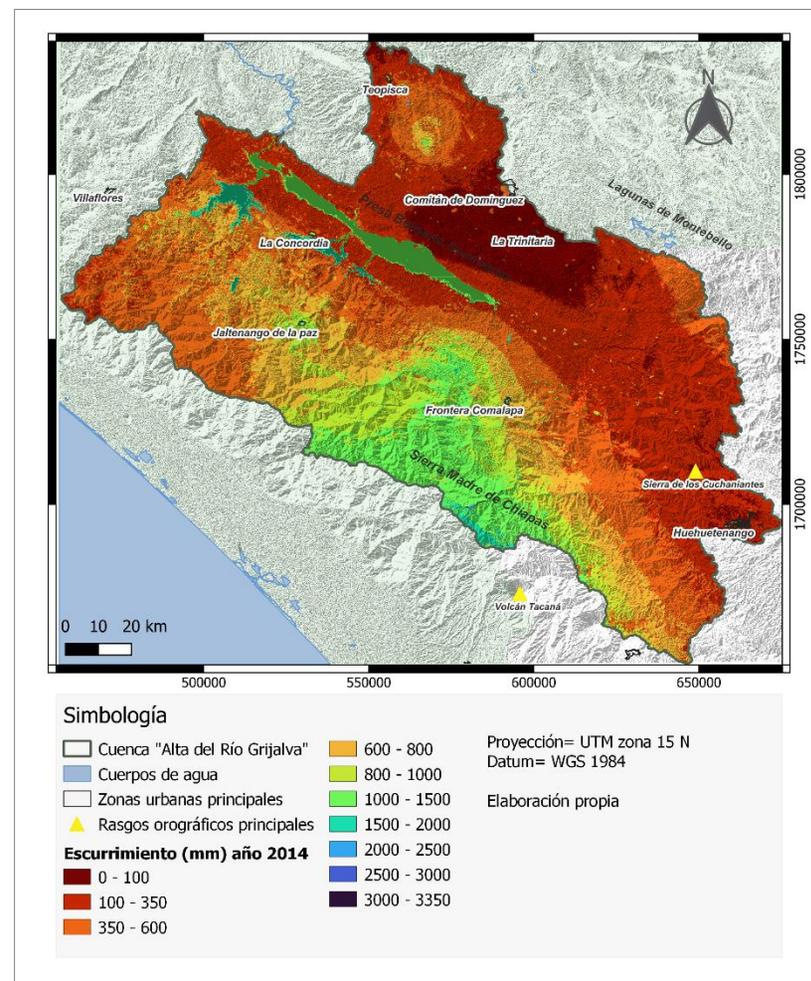
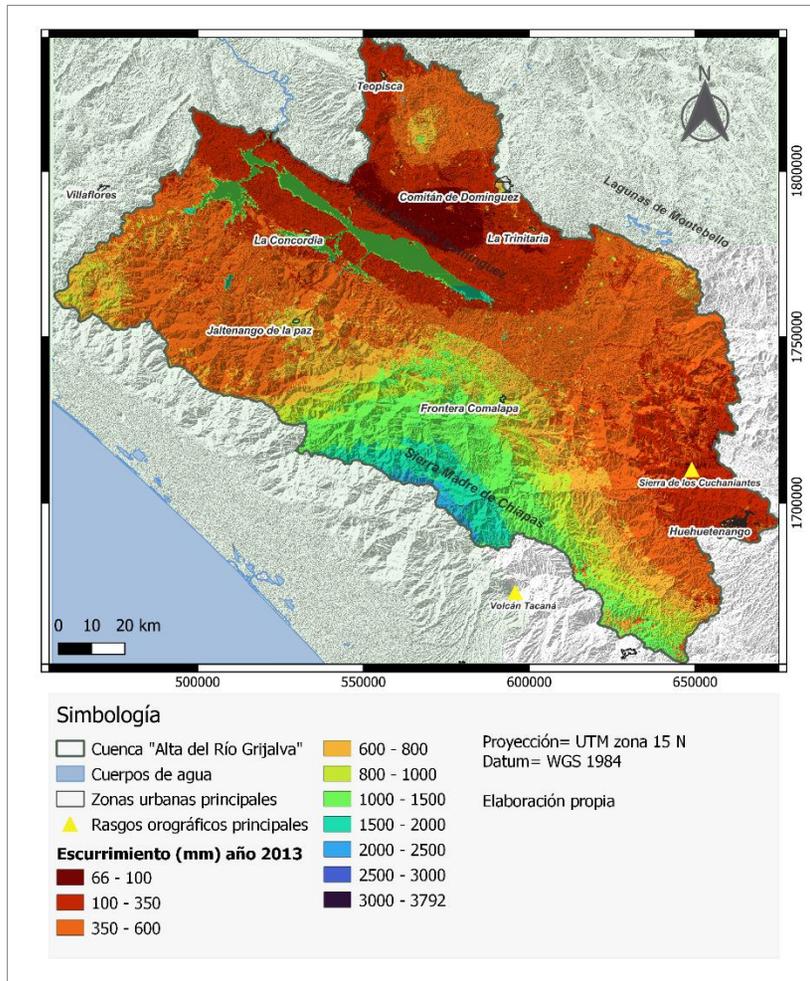


Figura B-21.- Lámina de escorrentamiento superficial (mm) año 2013 y 2014 cuenca "Alto Grijalva".

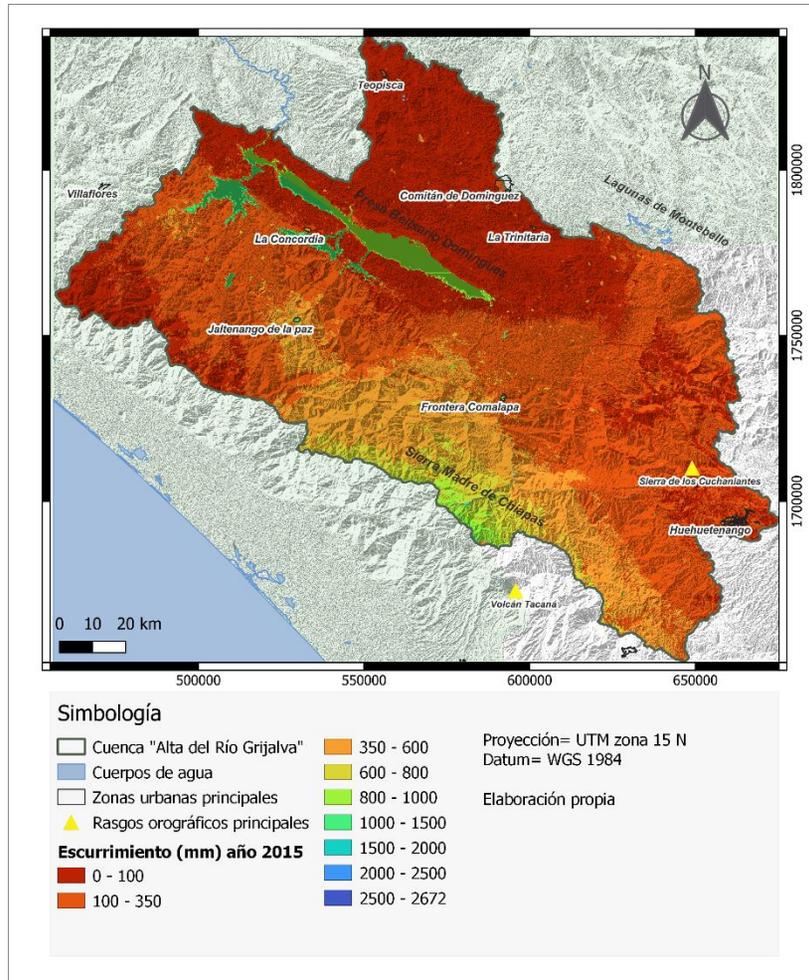


Figura B-22.- Lámina de escurrimiento superficial (mm) año 2015 cuenca "Alto Grijalva".

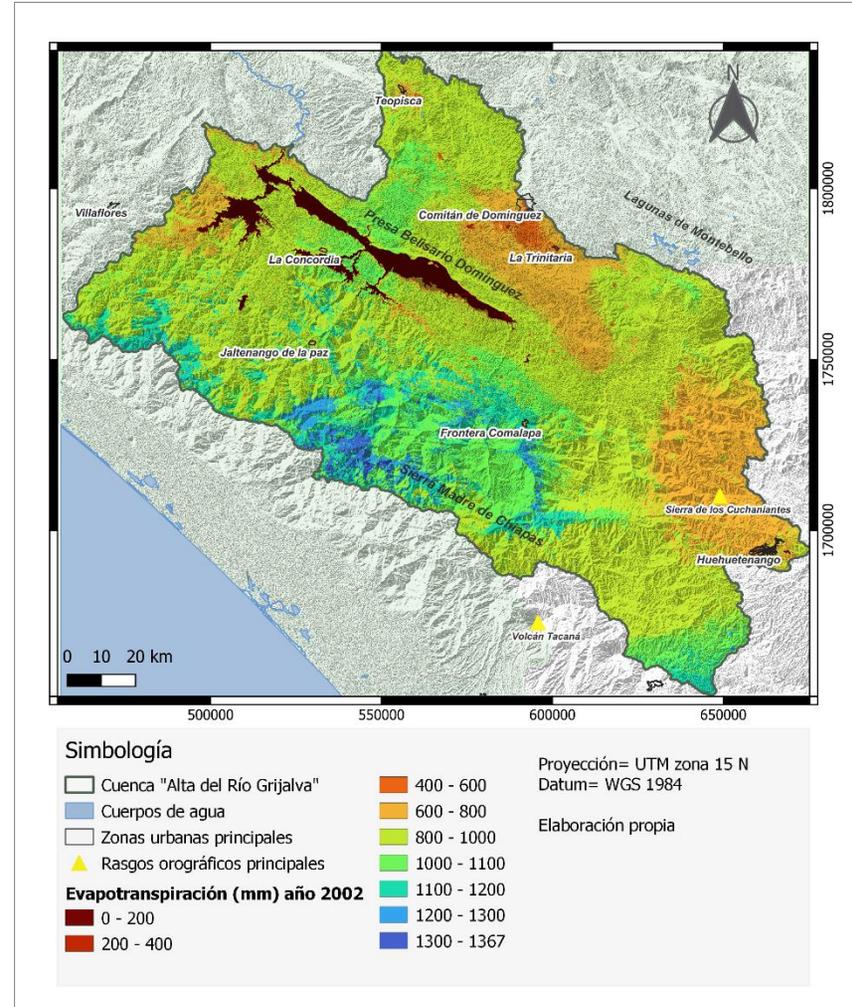
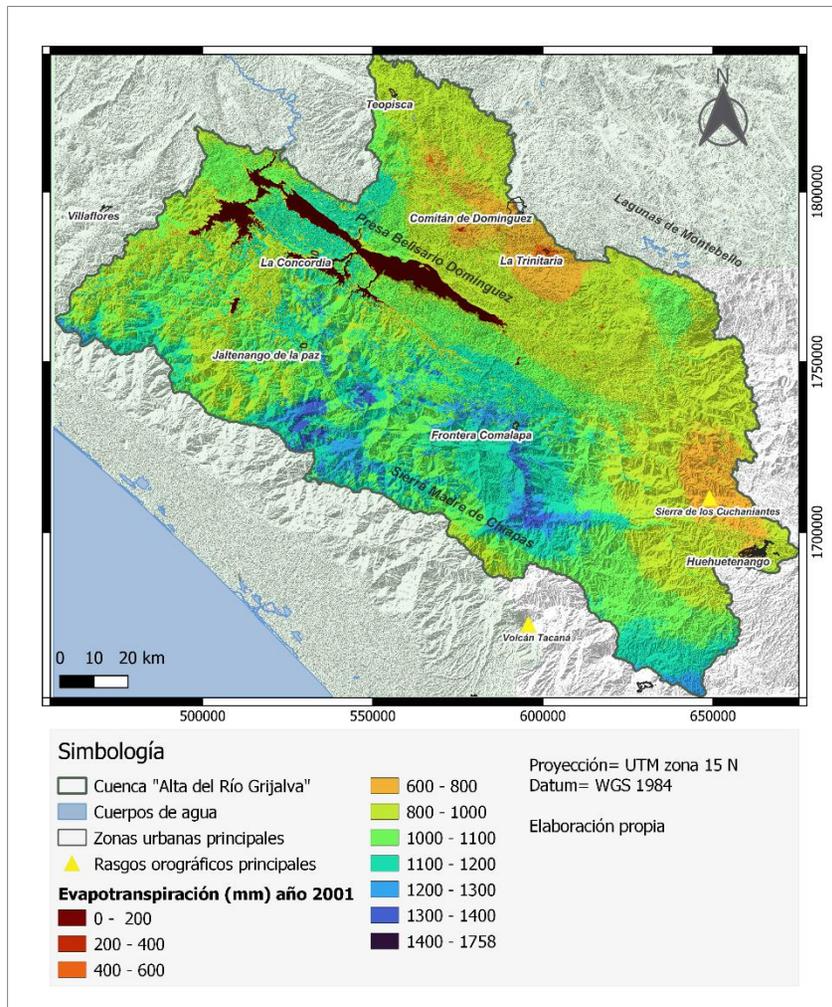


Figura B-23.- Láminas de evapotranspiración año 2001 y 2002 cuenca Alto Grijalva.

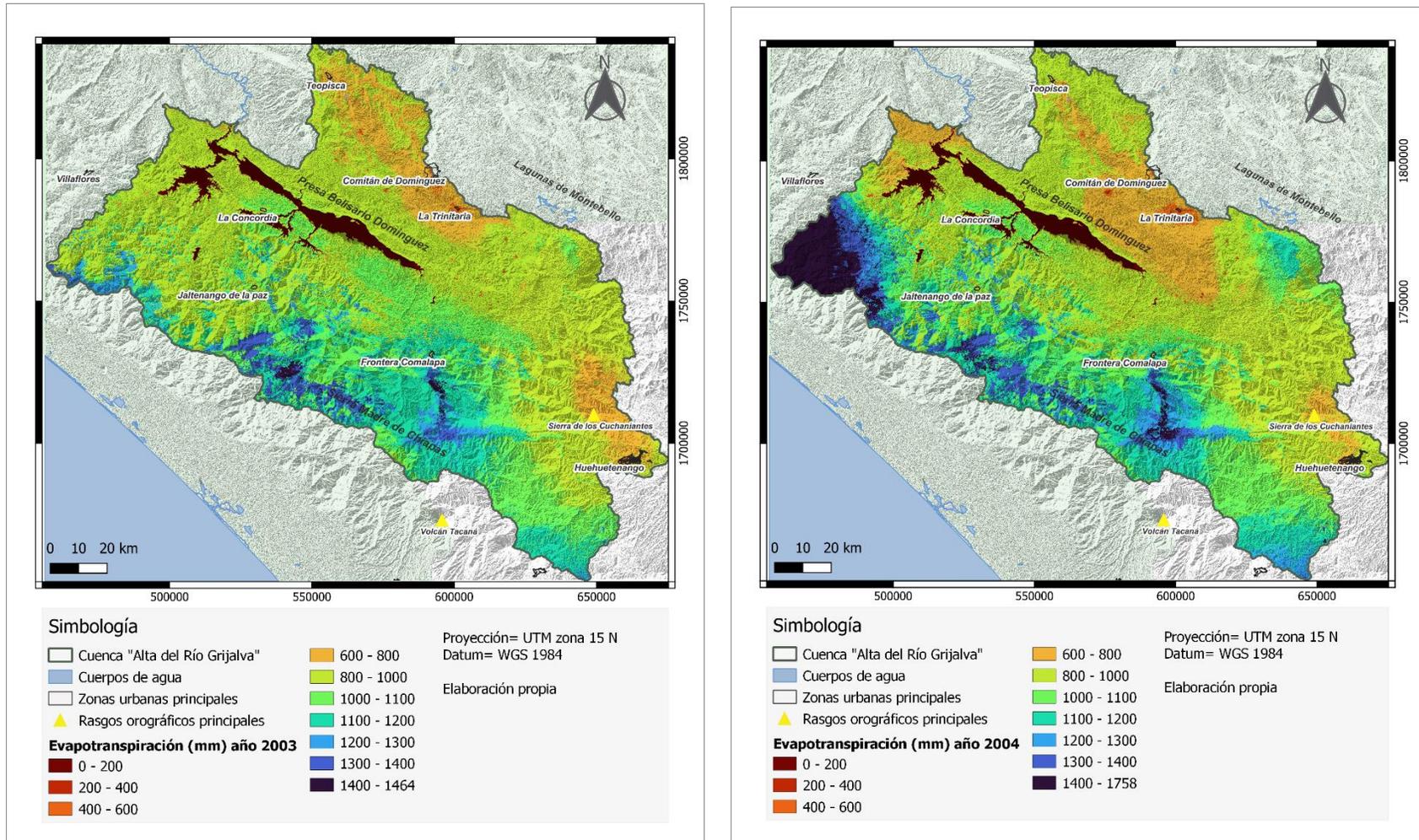


Figura B-24.- Láminas de evapotranspiración año 2003 y 2004 cuenca Alto Grijalva.

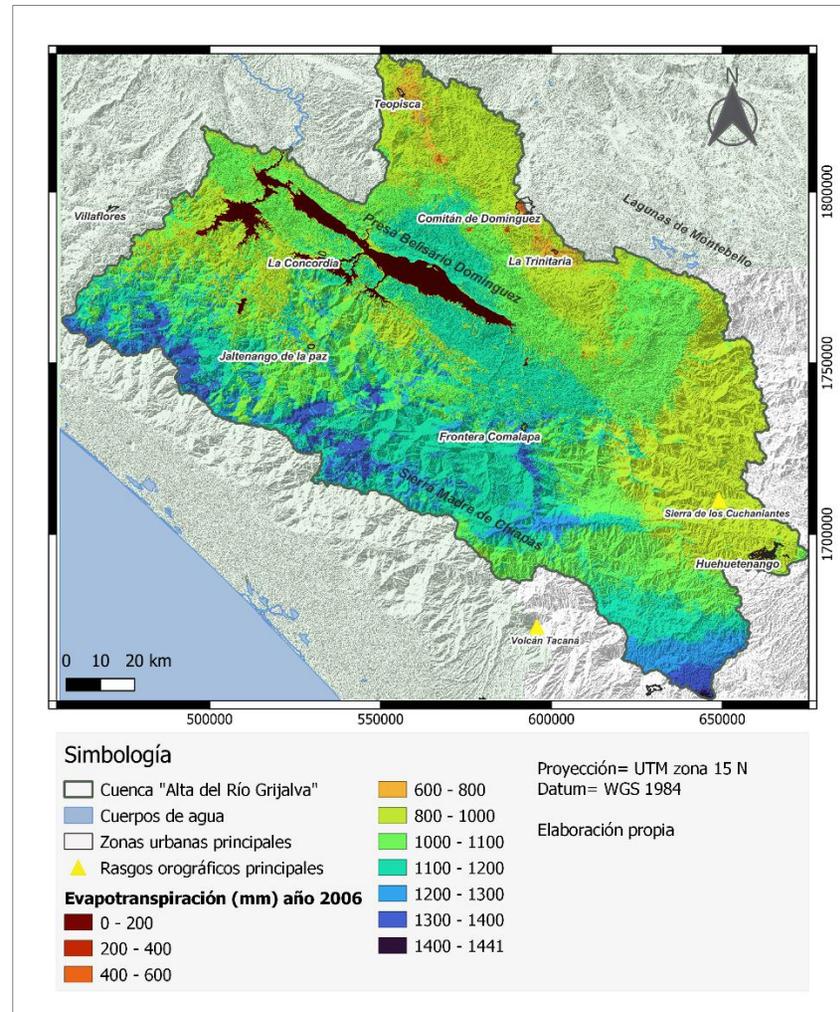
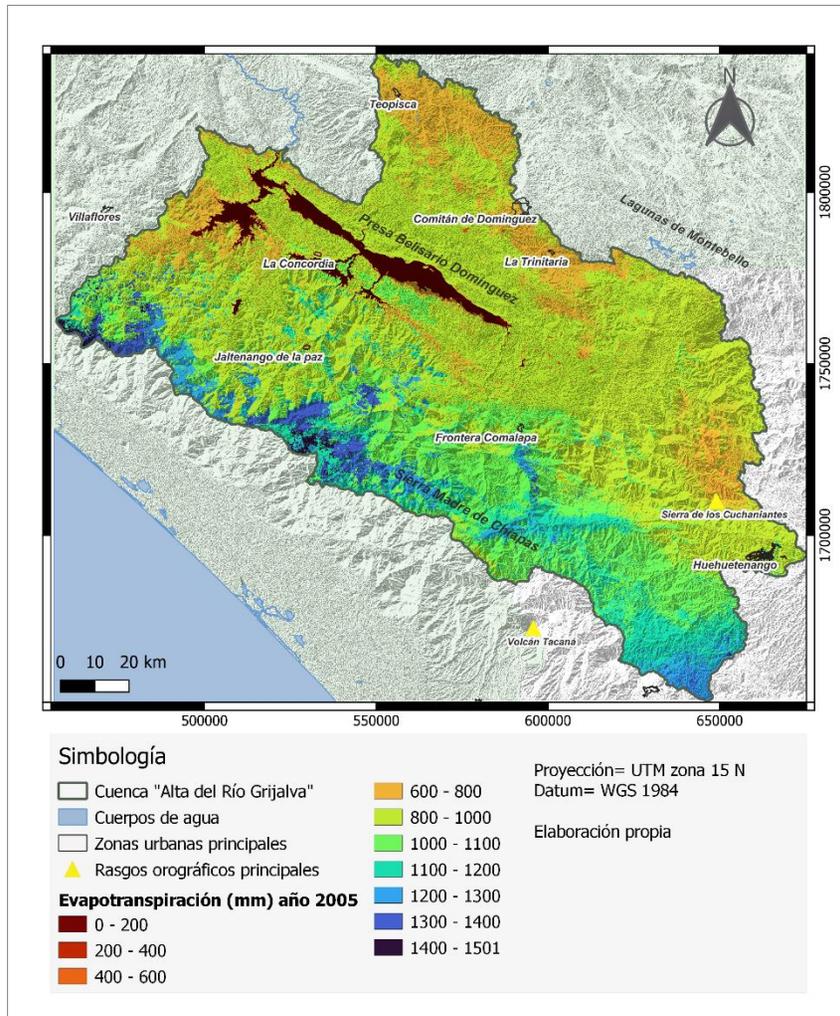


Figura B-25.- Láminas de evapotranspiración año 2005 y 2006 cuenca Alto Grijalva.

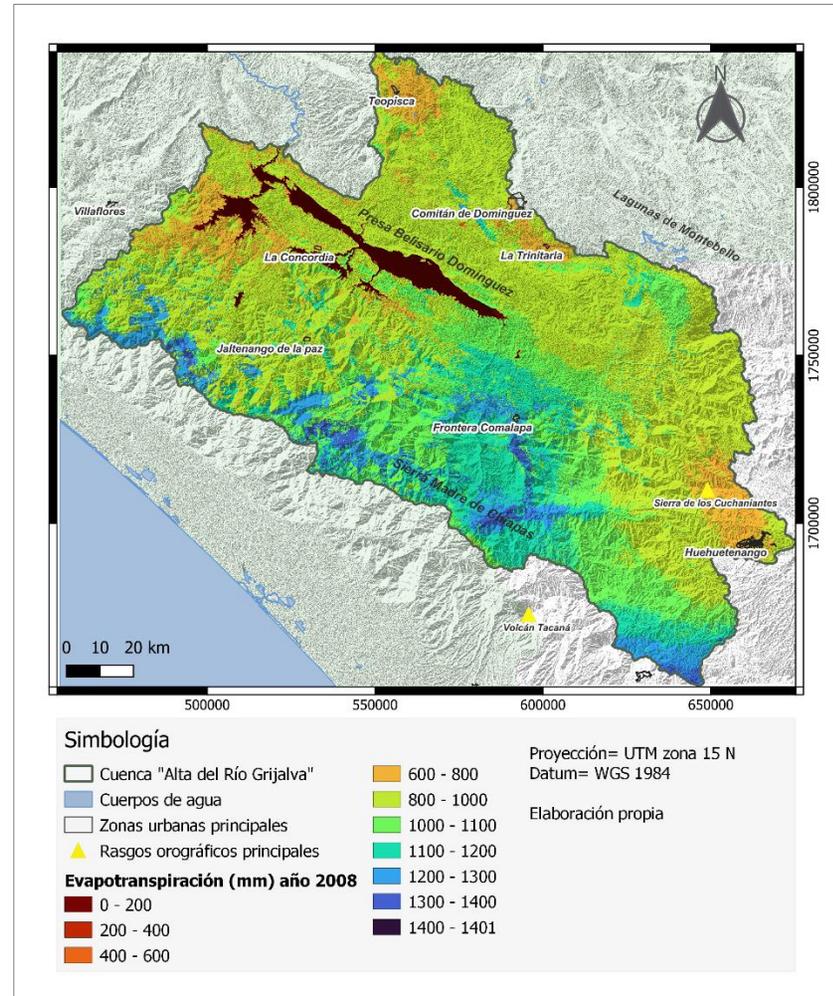
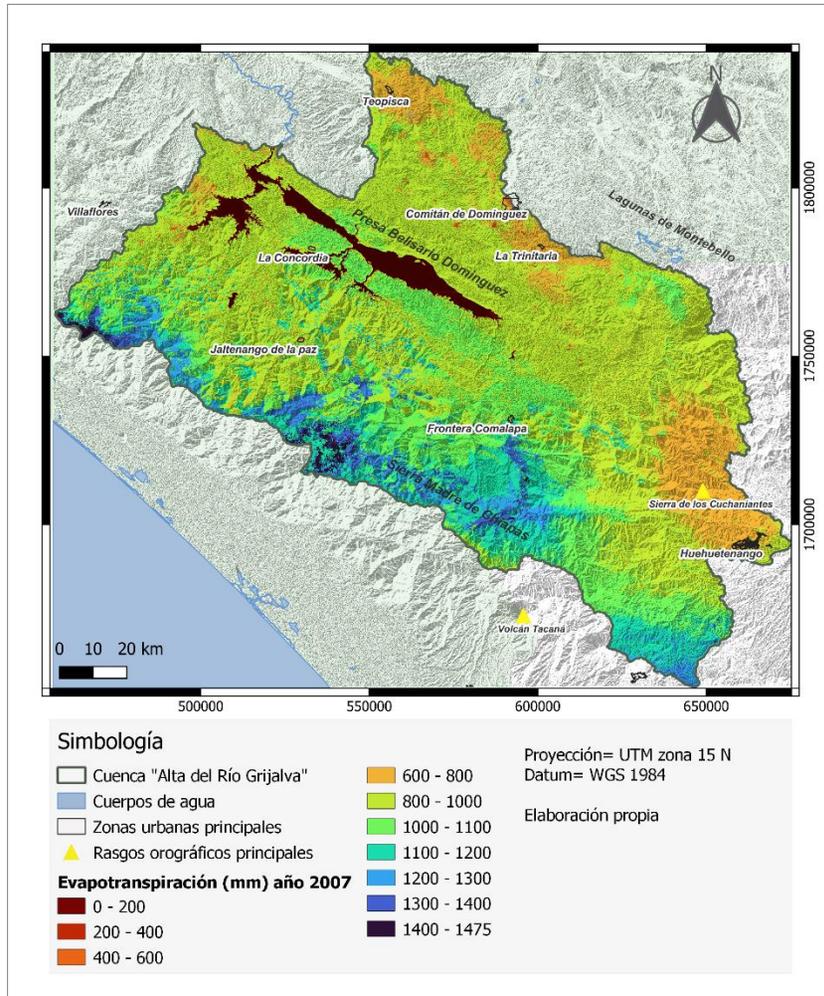


Figura B-26.- Láminas de evapotranspiración año 2007 y 2008 cuenca Alto Grijalva.

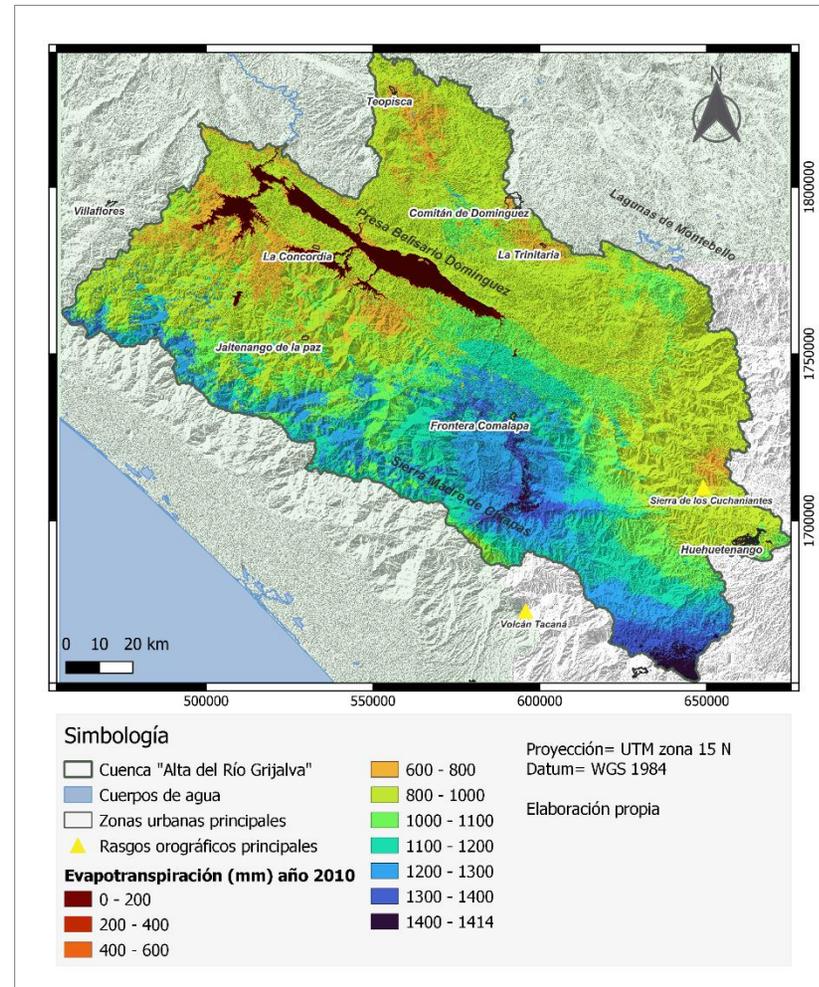
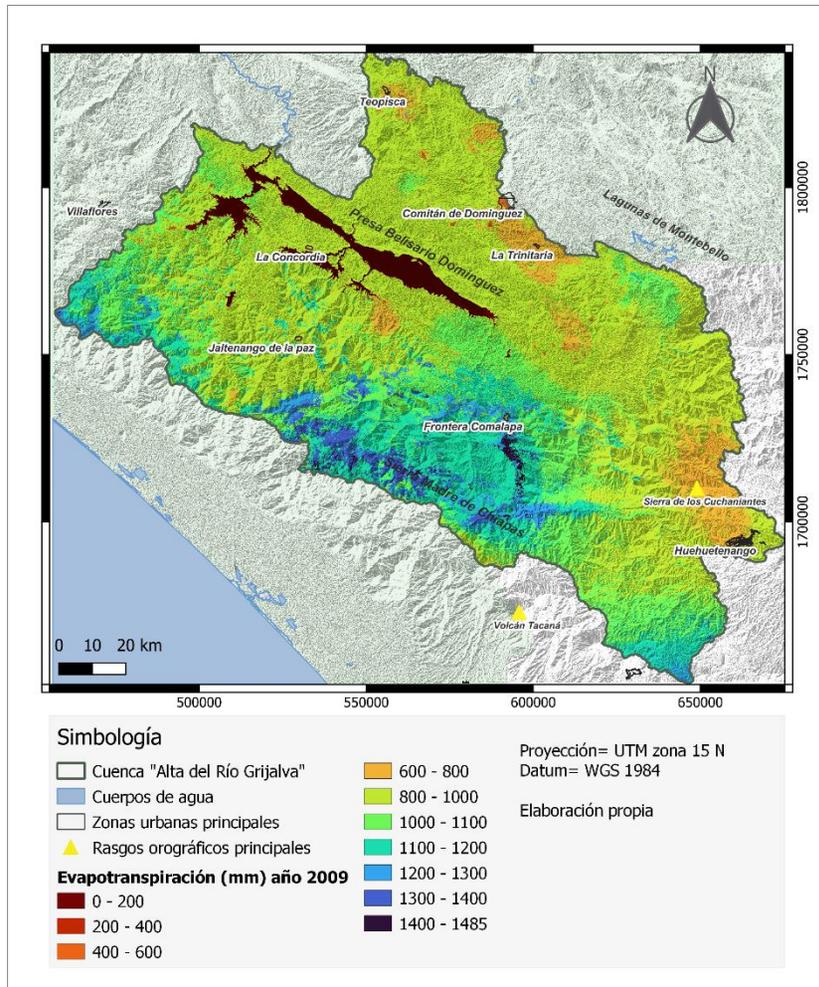


Figura B-27.- Láminas de evapotranspiración año 2009 y 2010 cuenca Alto Grijalva.

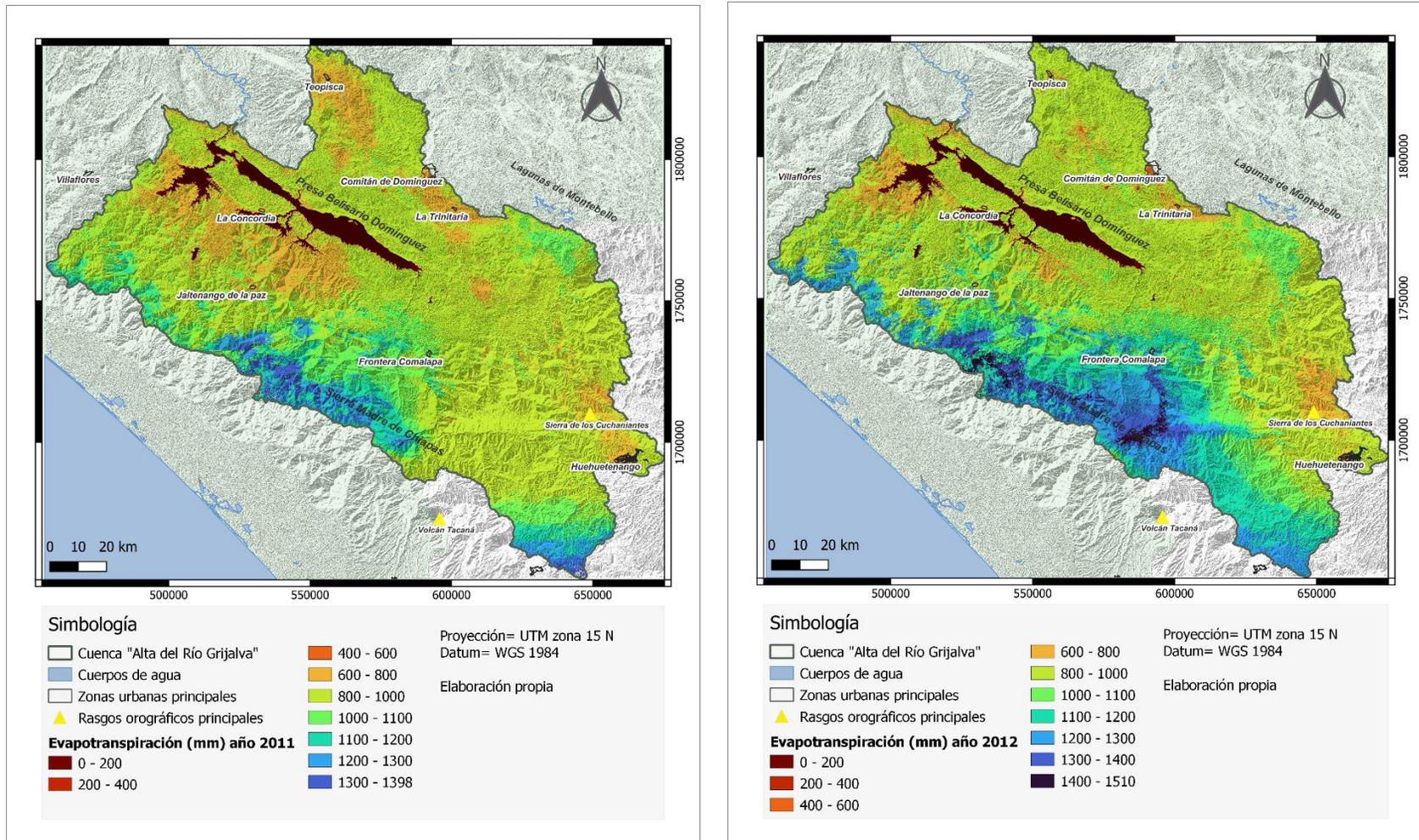


Figura B-28.- Láminas de evapotranspiración año 2011 y 2012 cuenca Alto Grijalva.

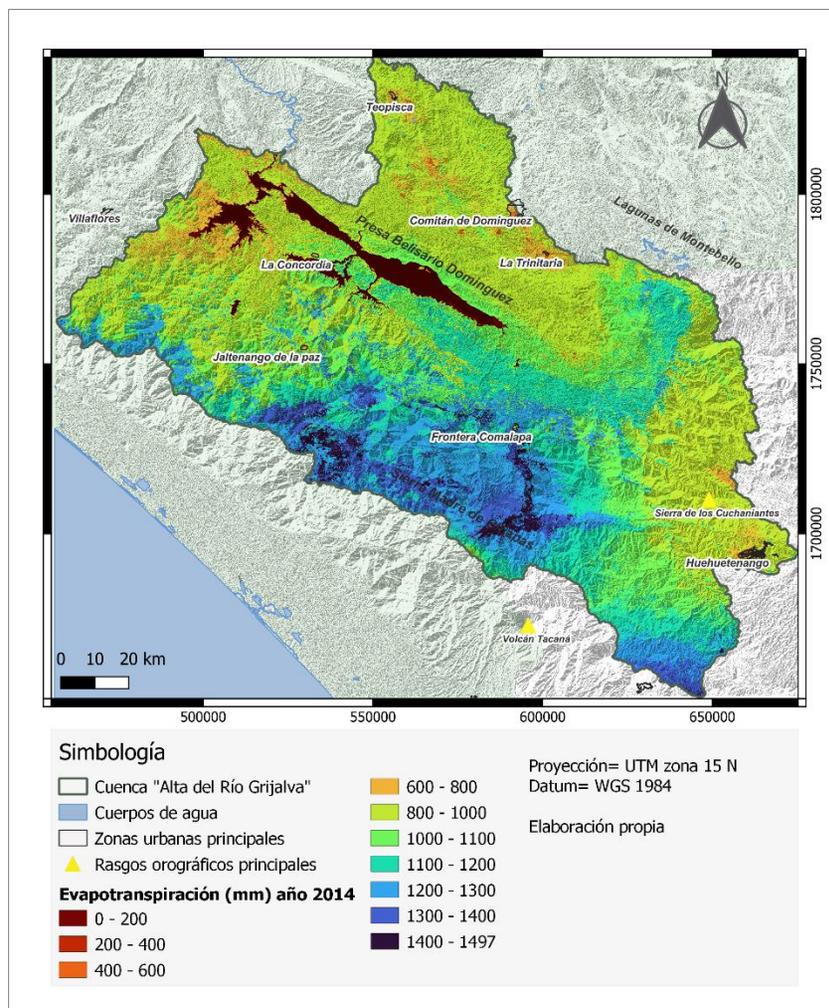
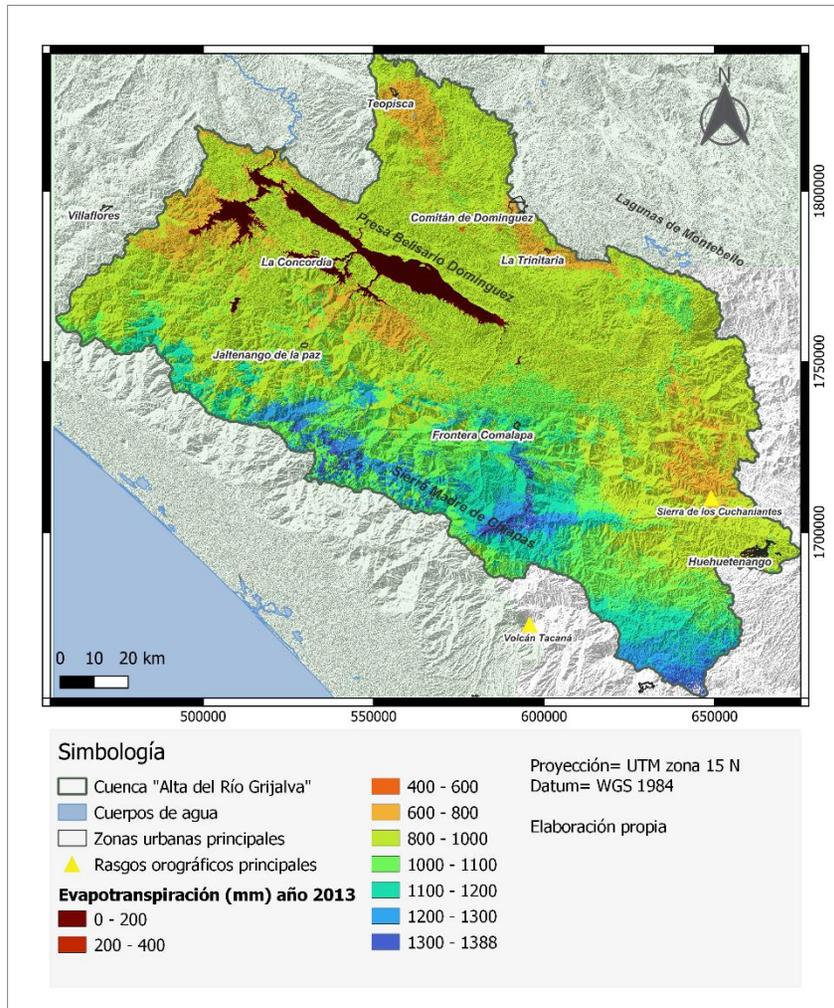


Figura B-29.- Láminas de evapotranspiración año 2013 y 2014 cuenca Alto Grijalva.

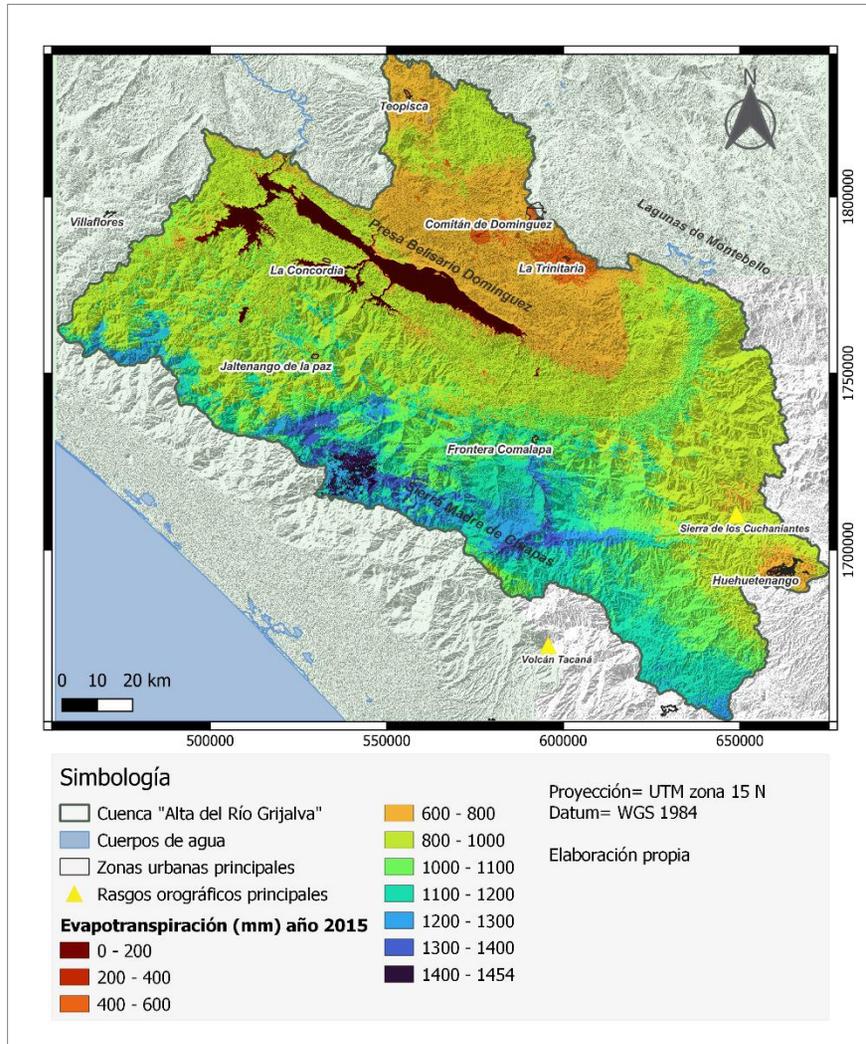


Figura B-30.- Láminas de evapotranspiración año 2015 cuenca Alto Grijalva.

Anexo C: Mapas de coeficientes

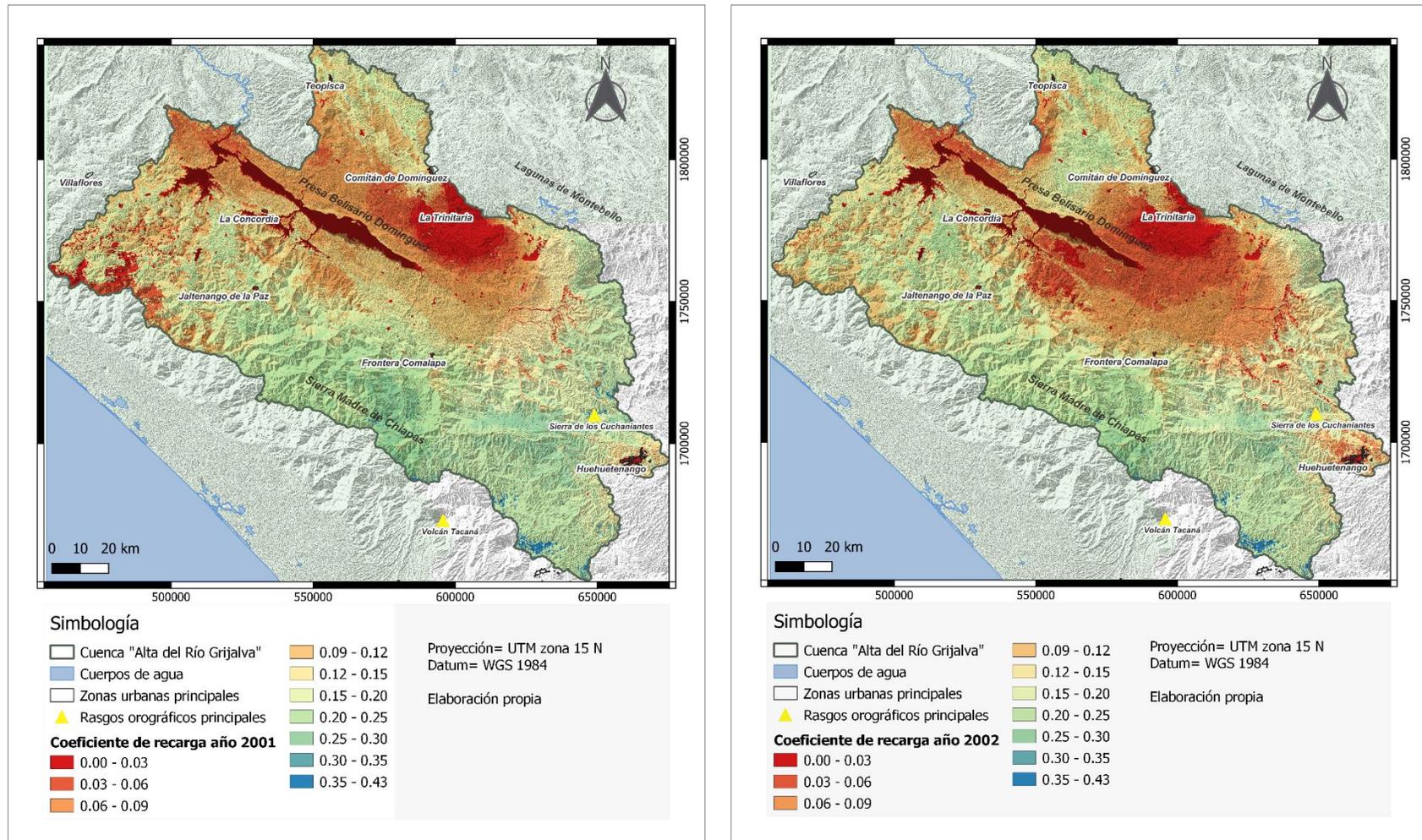


Figura C-1.- Coeficiente de recarga potencial año 2001 y 2002 cuenca Alto Grijalva.

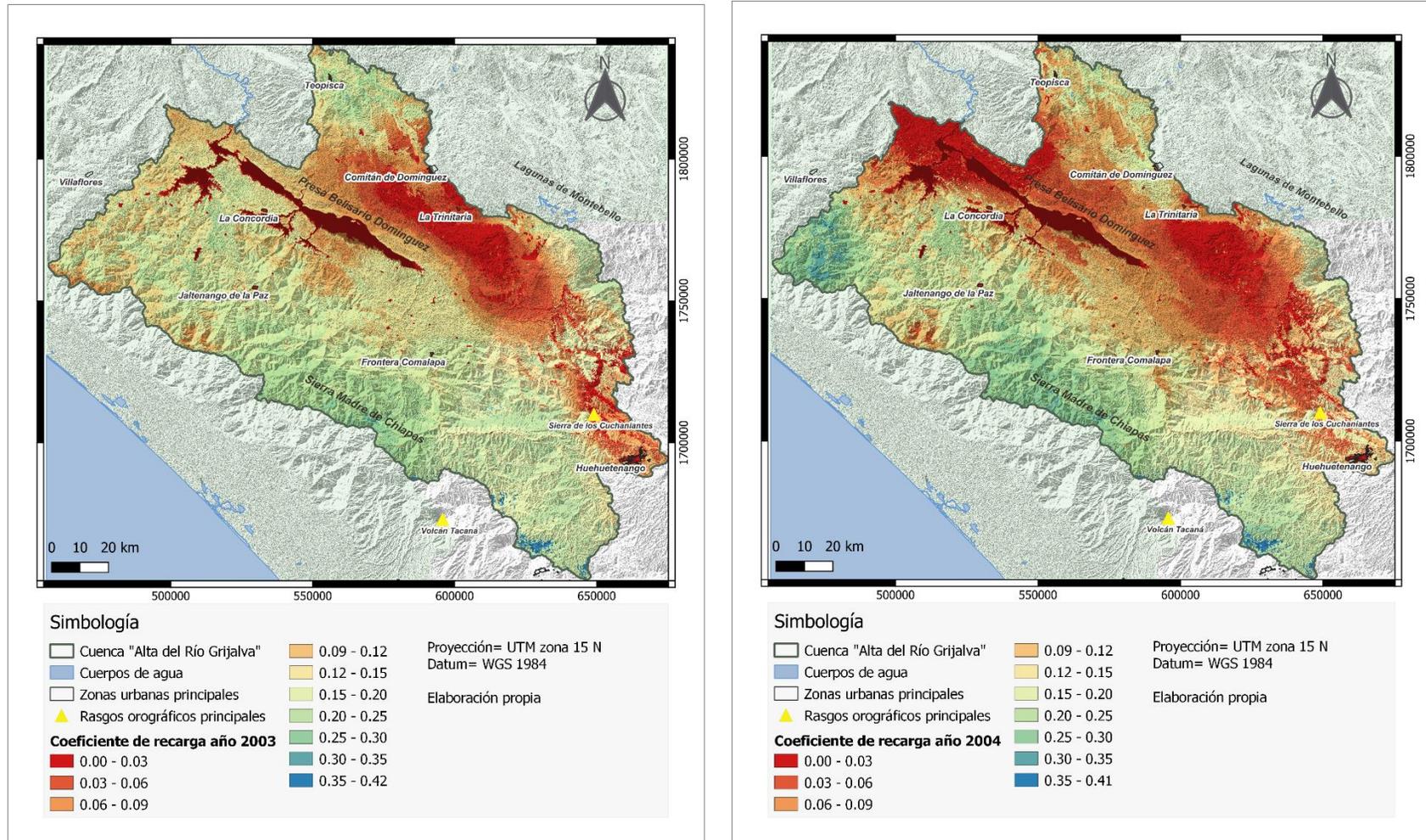


Figura C-2.- Coeficiente de recarga potencial año 2003 y 2004 cuenca Alto Grijalva.

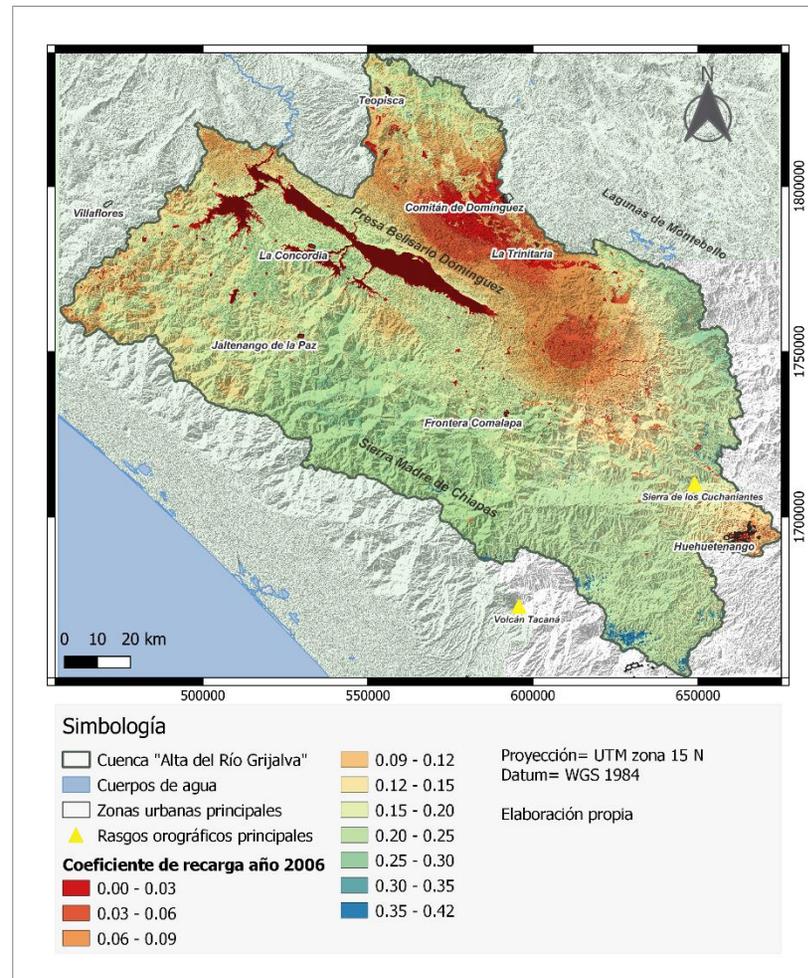
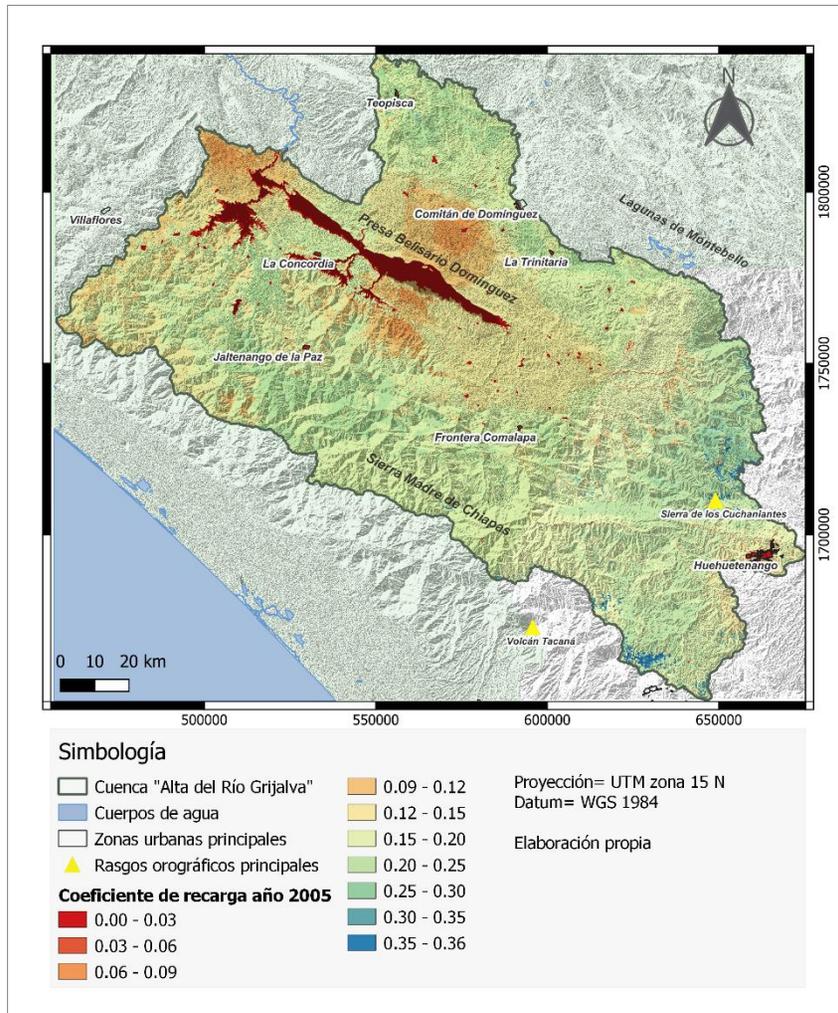


Figura C-3.- Coeficiente de recarga potencial año 2005 y 2006 cuenca Alto Grijalva.

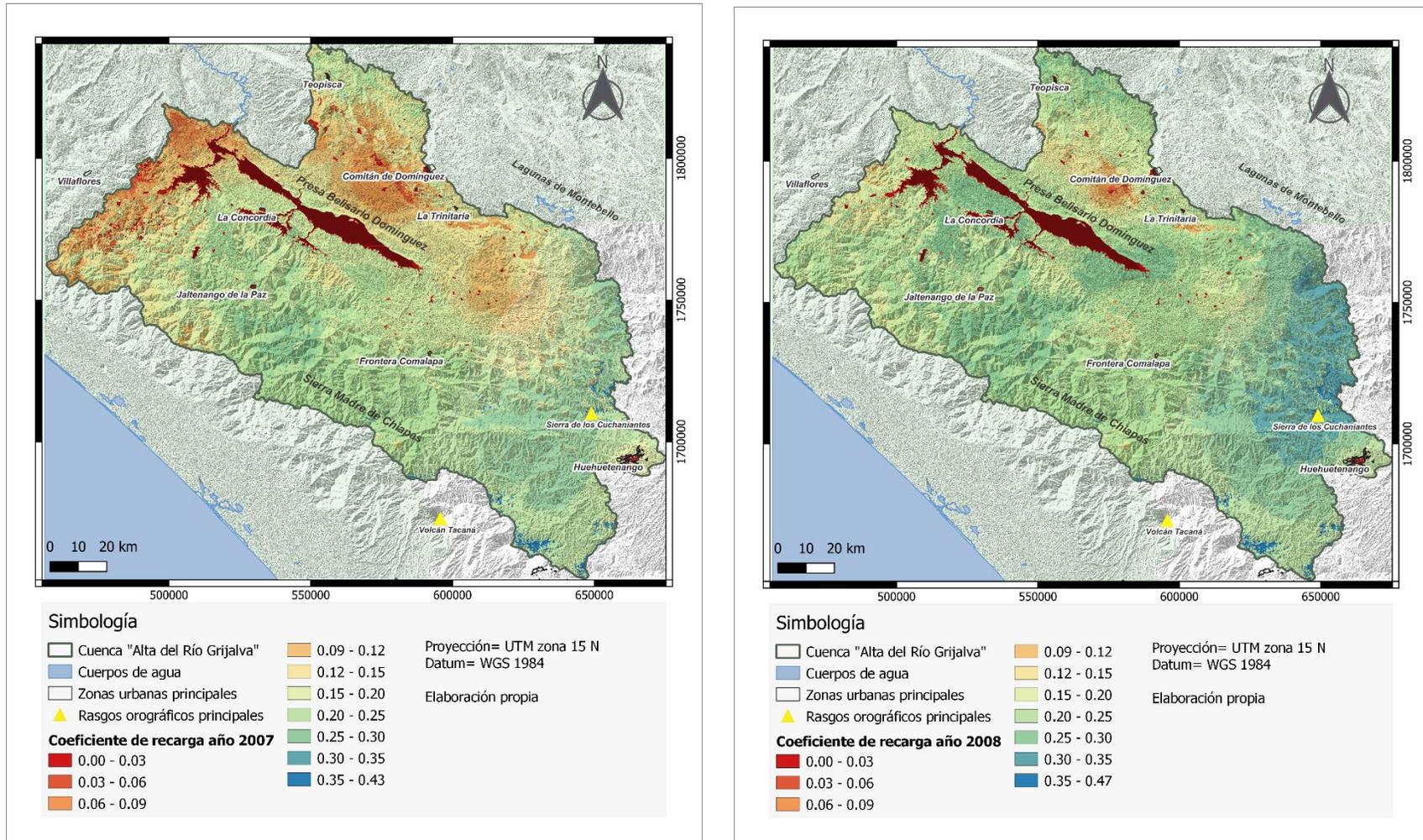


Figura C-4.- Coeficiente de recarga potencial año 2007 y 2008 cuenca Alto Grijalva.

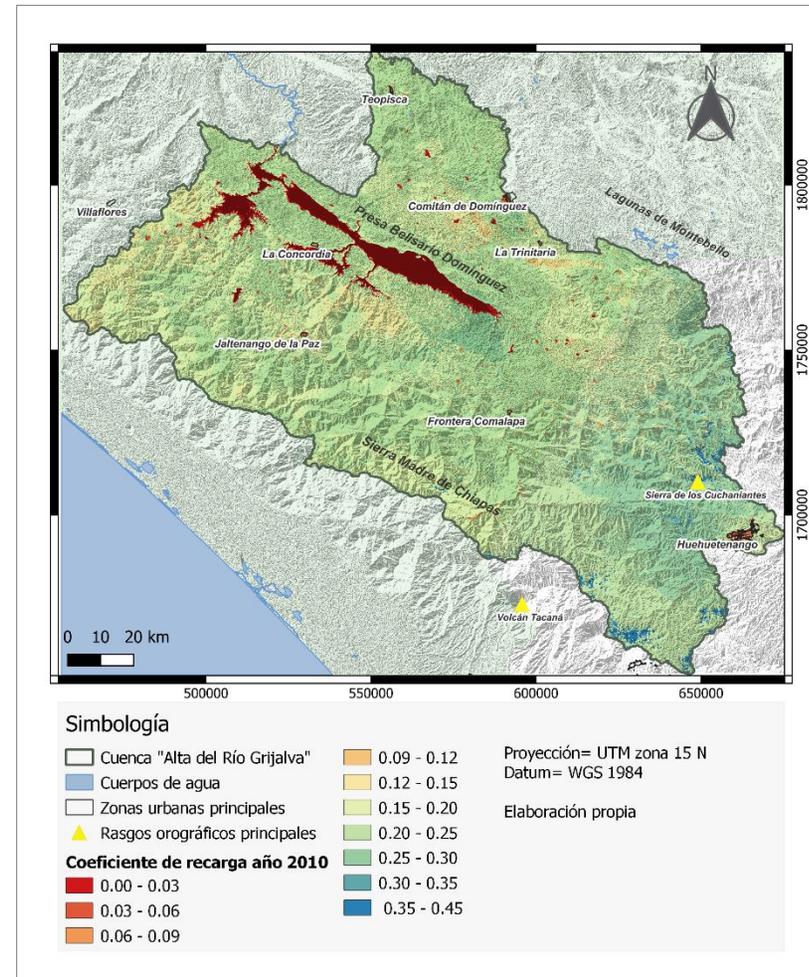
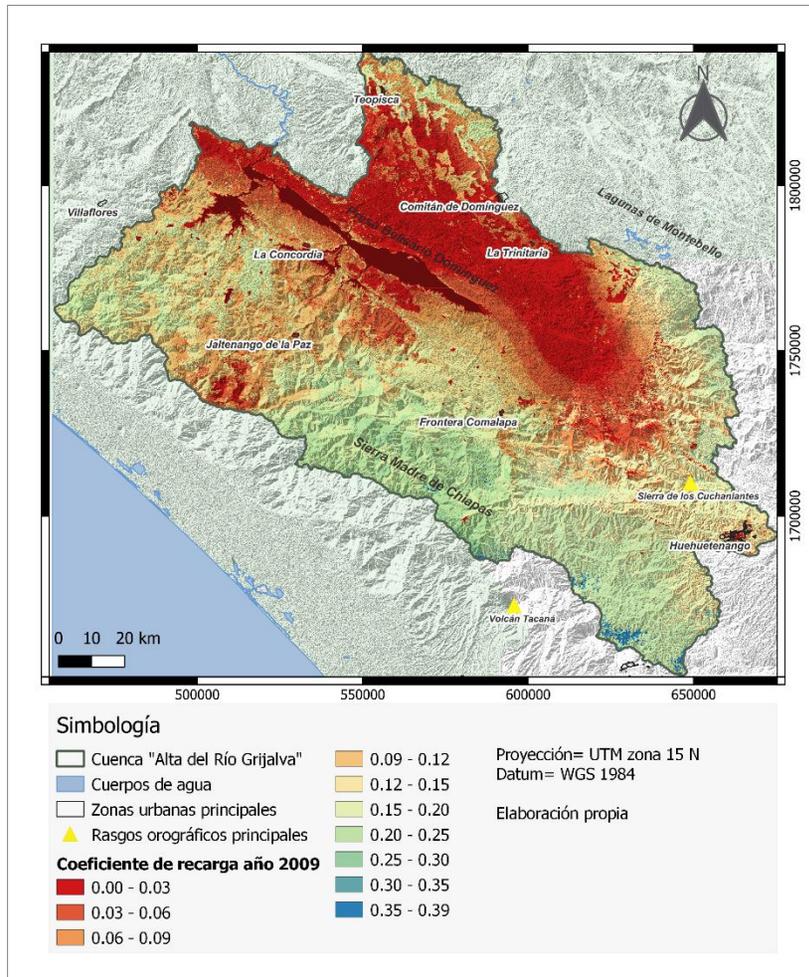


Figura C-5.- Coeficiente de recarga potencial año 2009 y 2010 cuenca Alto Grijalva.

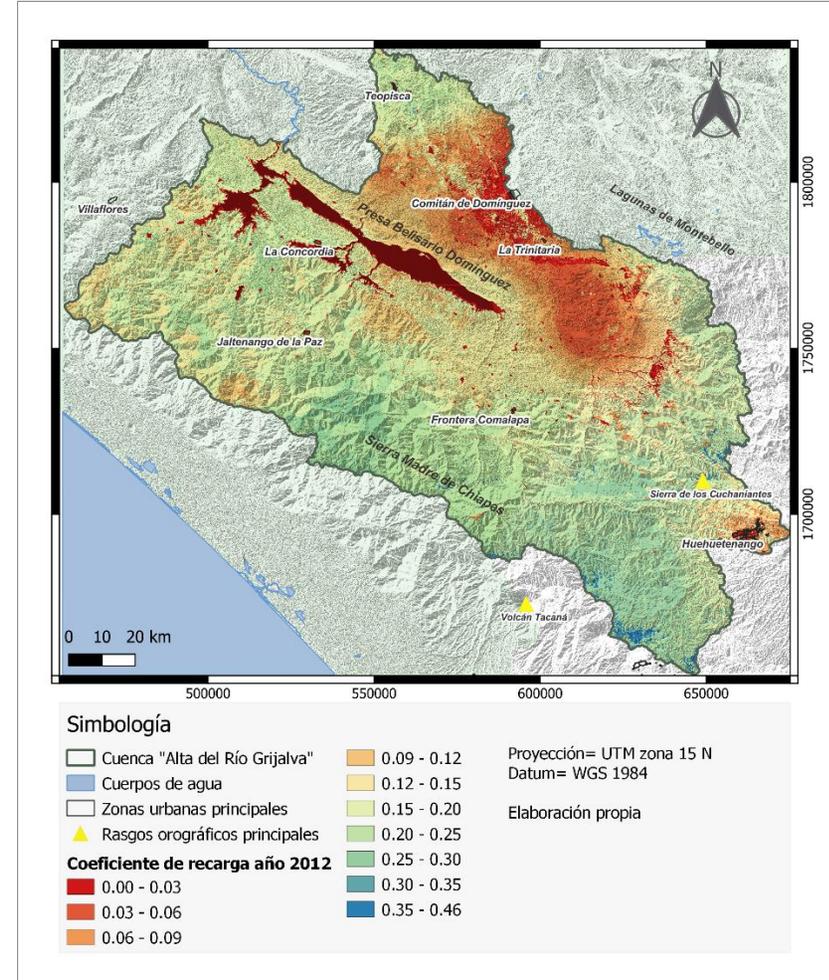
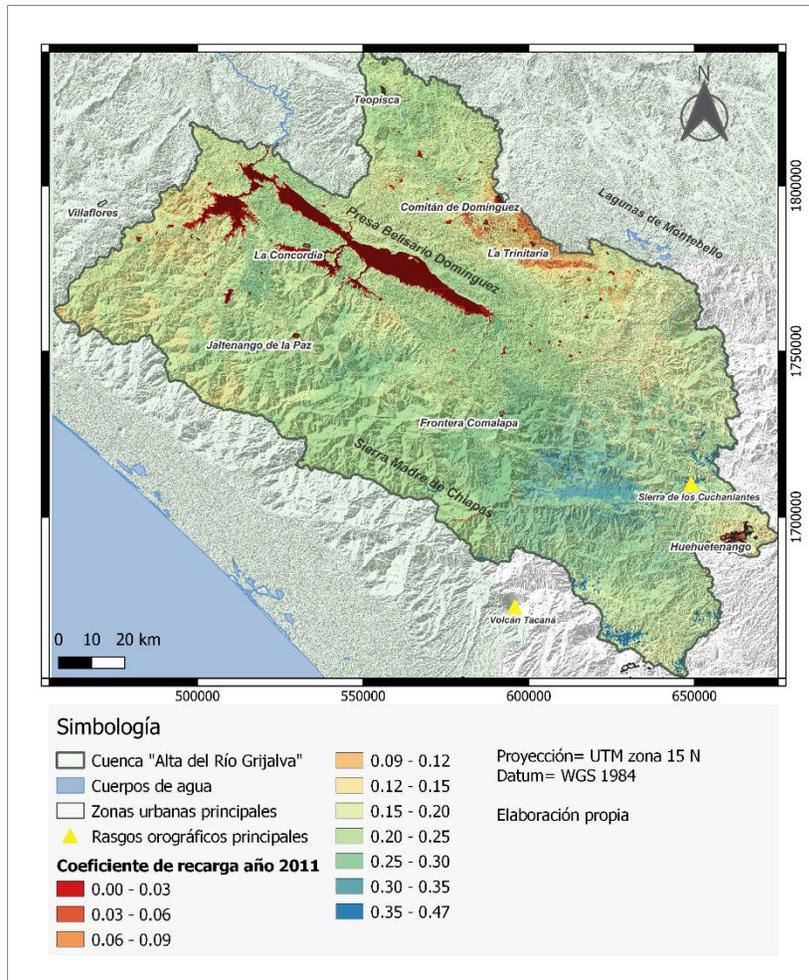


Figura C-6.- Coeficiente de recarga potencial año 2011 y 2012 cuenca Alto Grijalva.

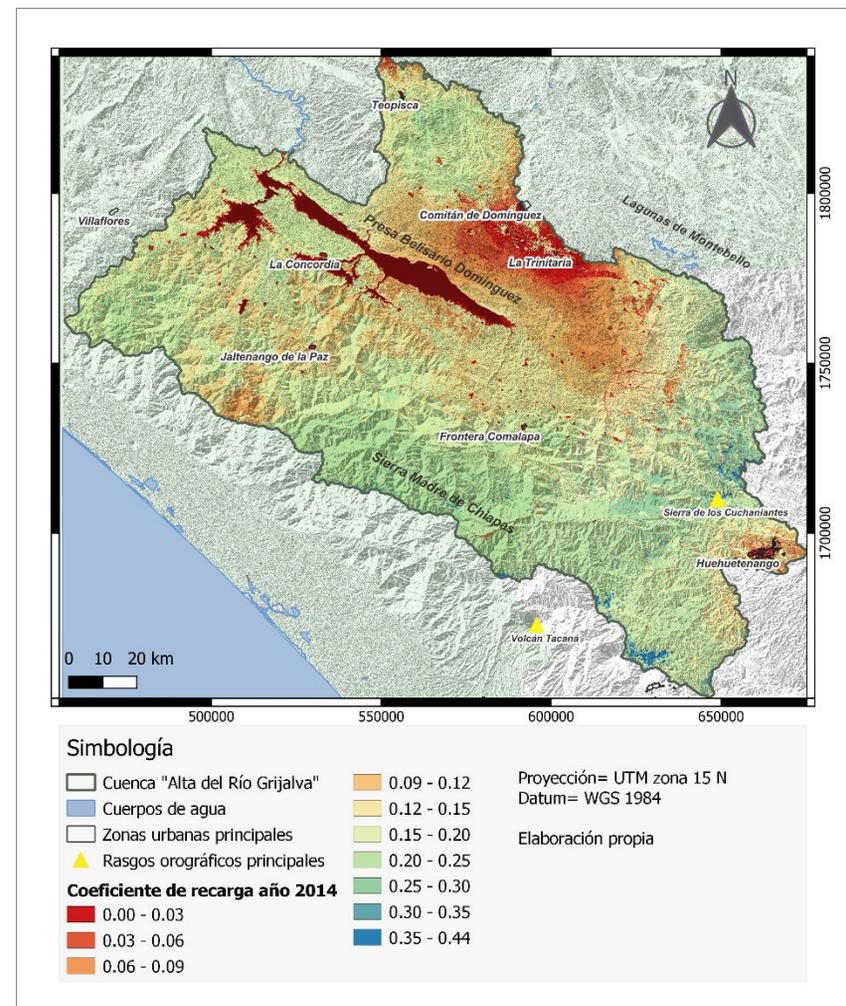
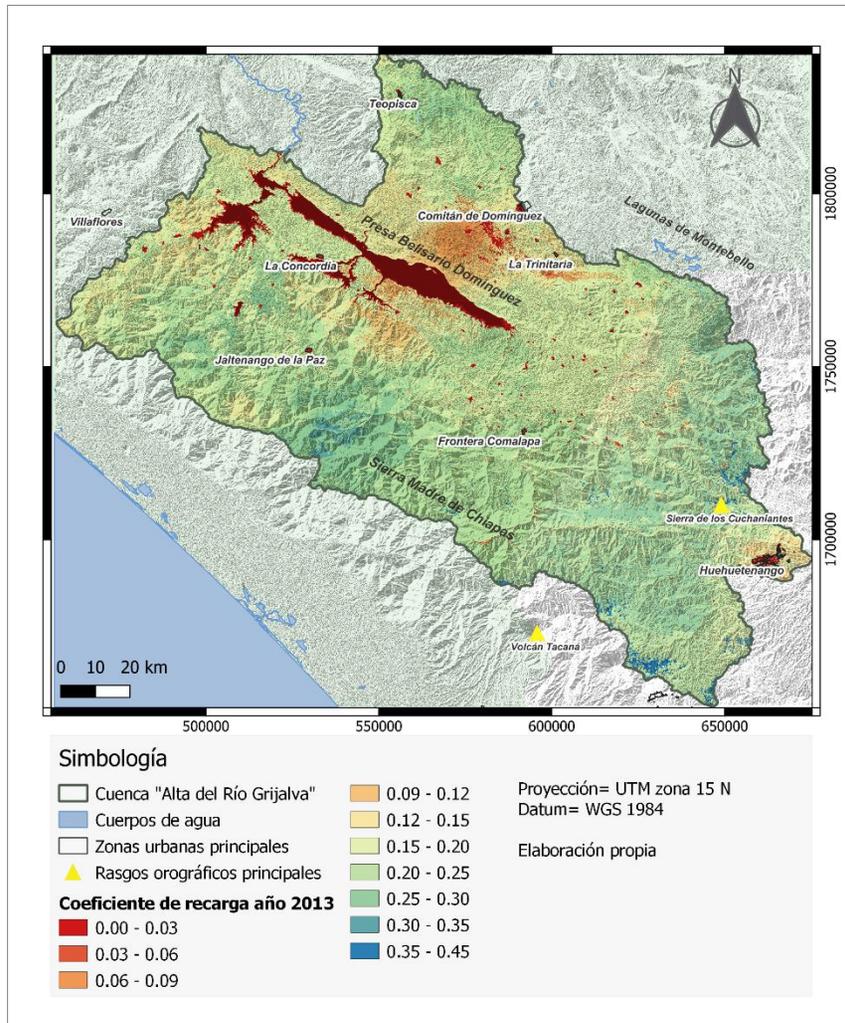


Figura C-7.- Coeficiente de recarga potencial año 2013 y 2014 cuenca Alto Grijalva.

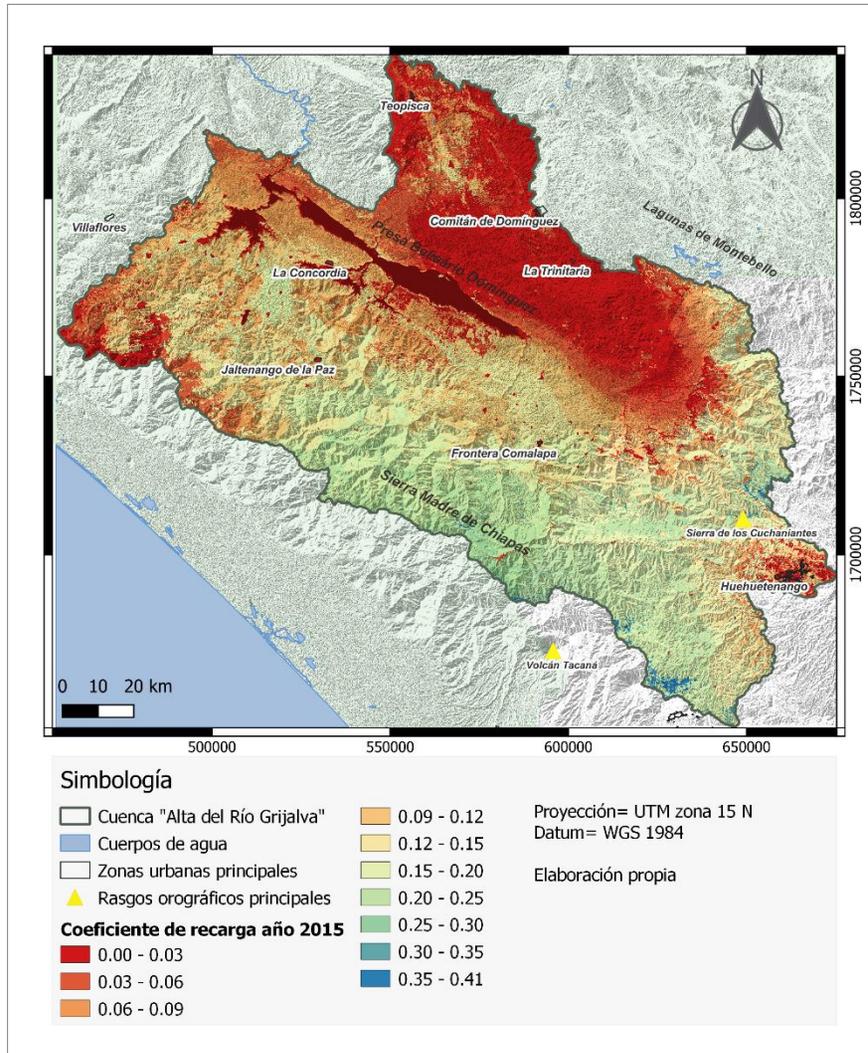


Figura C-8.- Coeficiente de recarga potencial año 2015 cuenca Alto Grijalva.

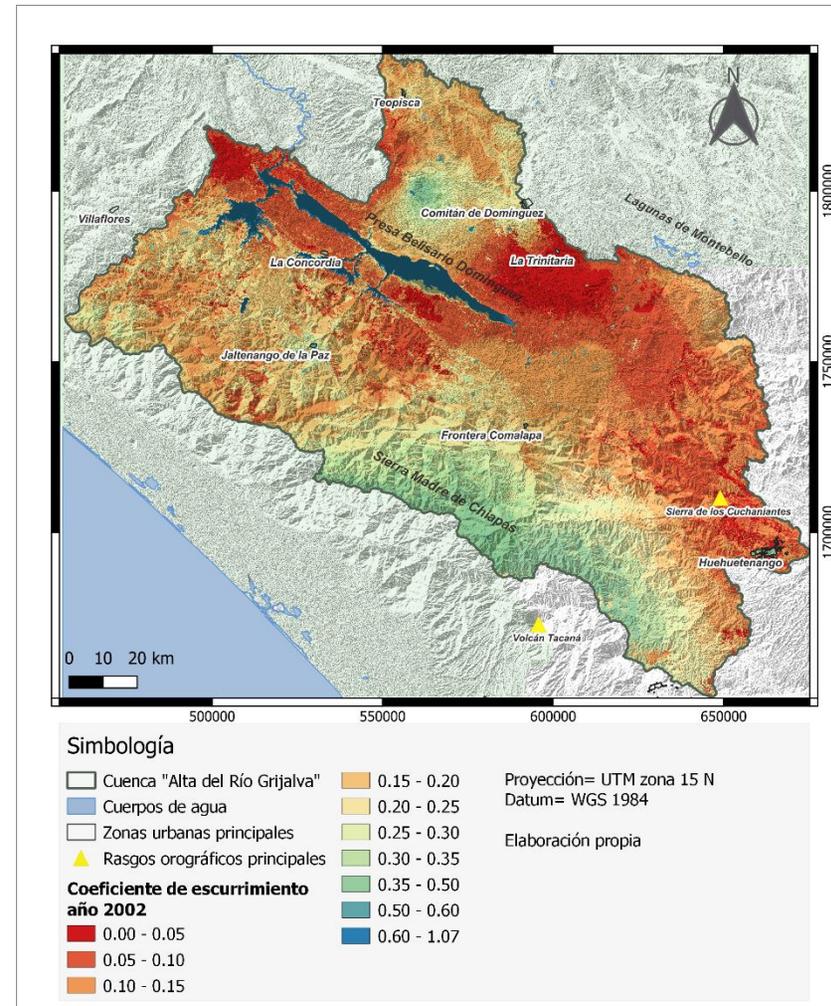
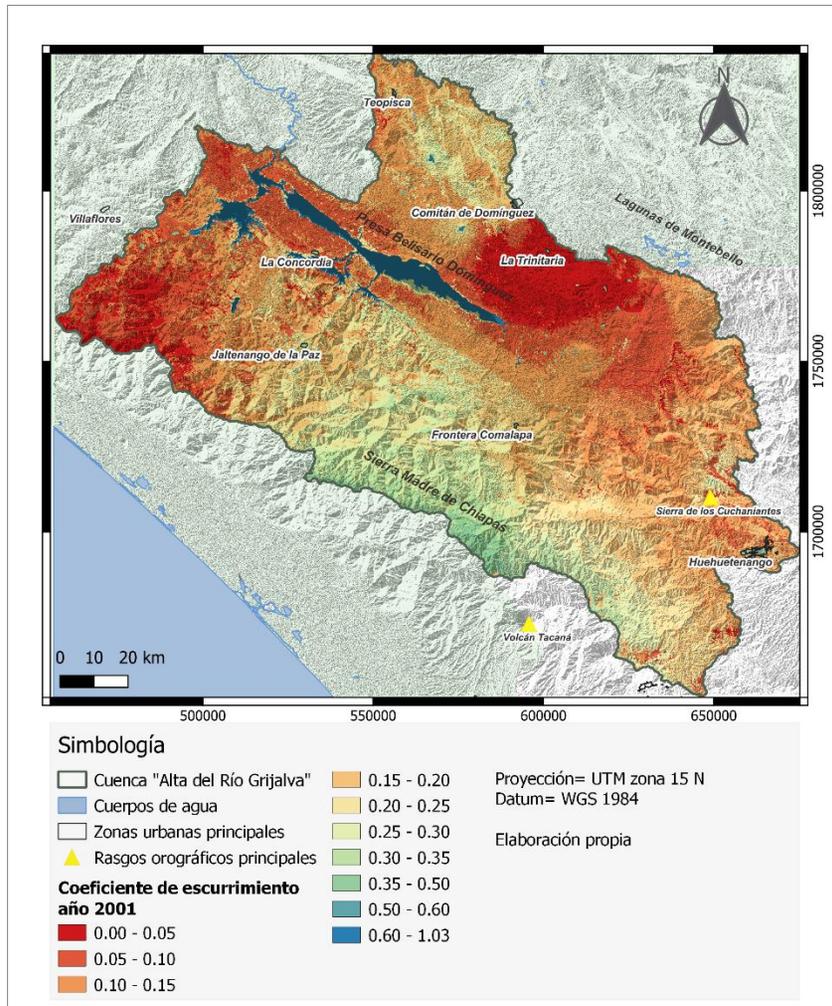


Figura C-9.- Coeficiente de escurrimiento superficial año 2001 y 2002 cuenca Alto Grijalva.

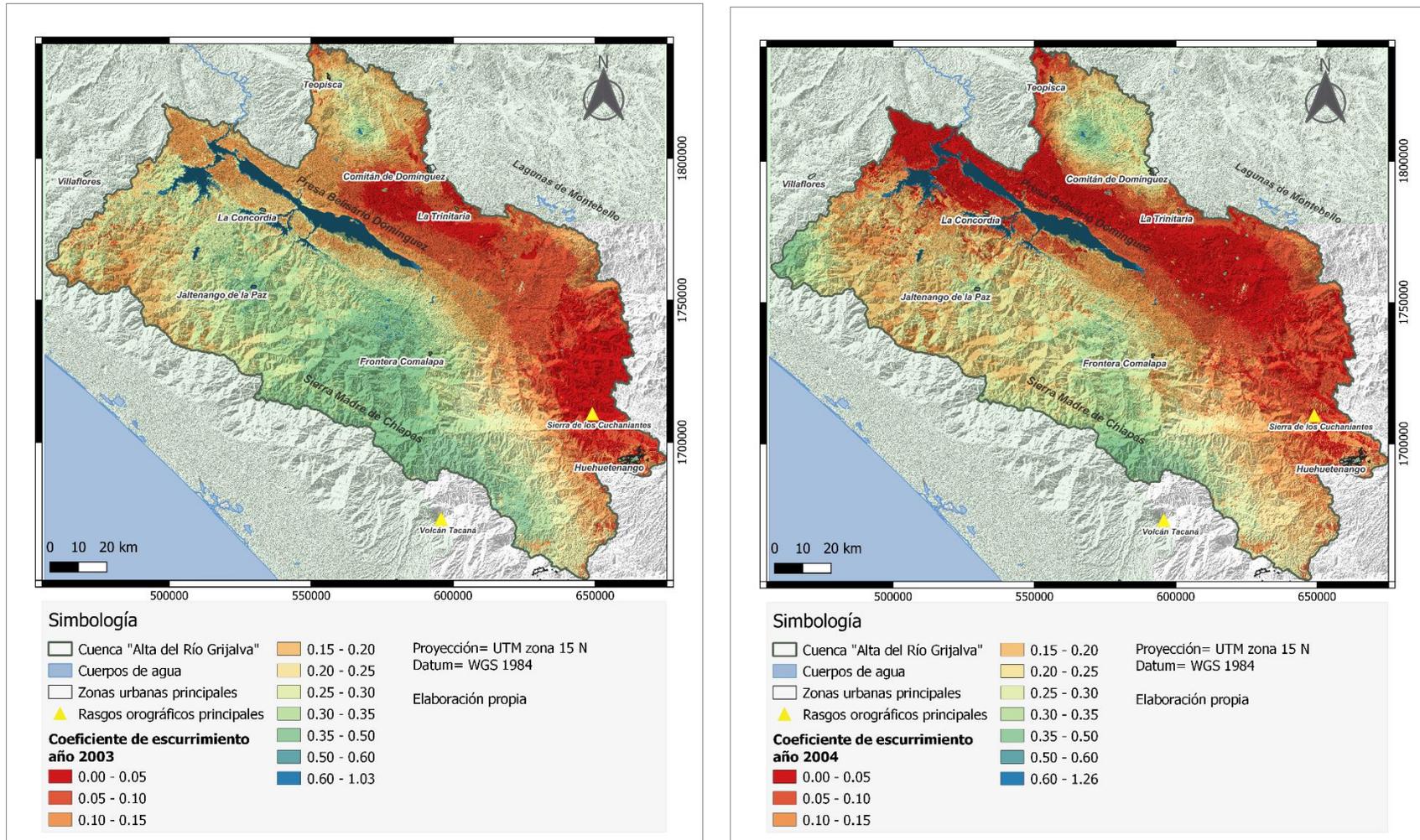


Figura C-10.- Coeficiente de escurrimiento superficial año 2003 y 2004 cuenca Alto Grijalva.

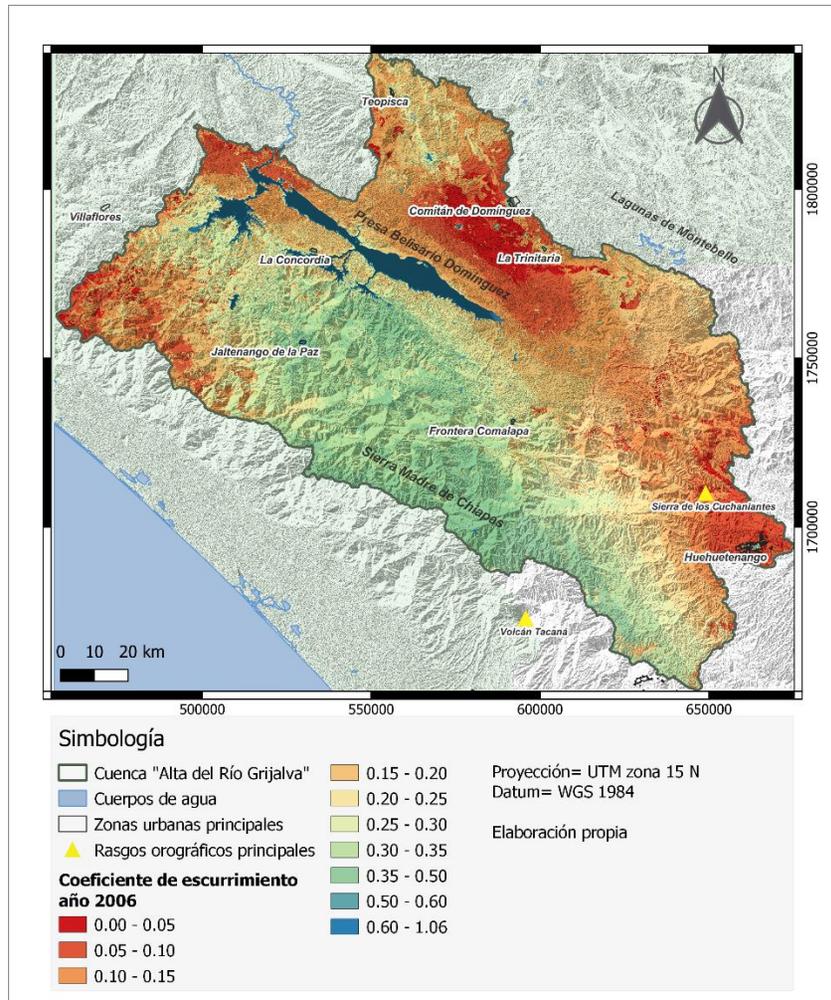
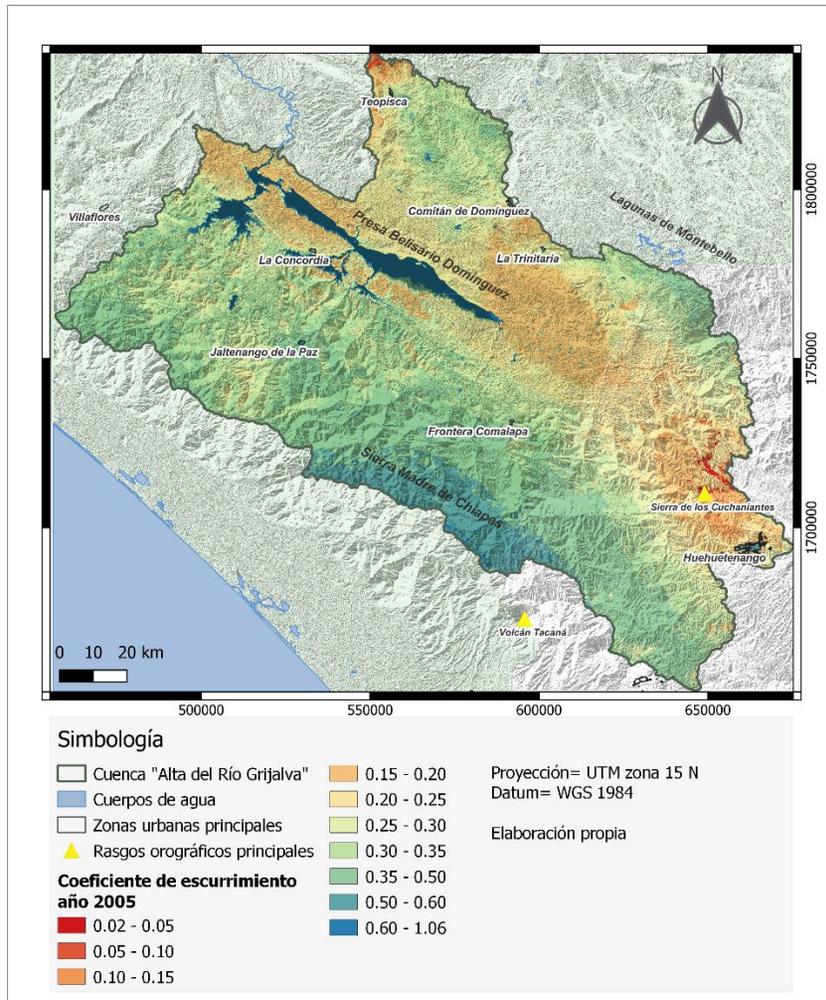


Figura C-11.- Coeficiente de escurrimiento superficial año 2005 y 2006 cuenca Alto Grijalva.

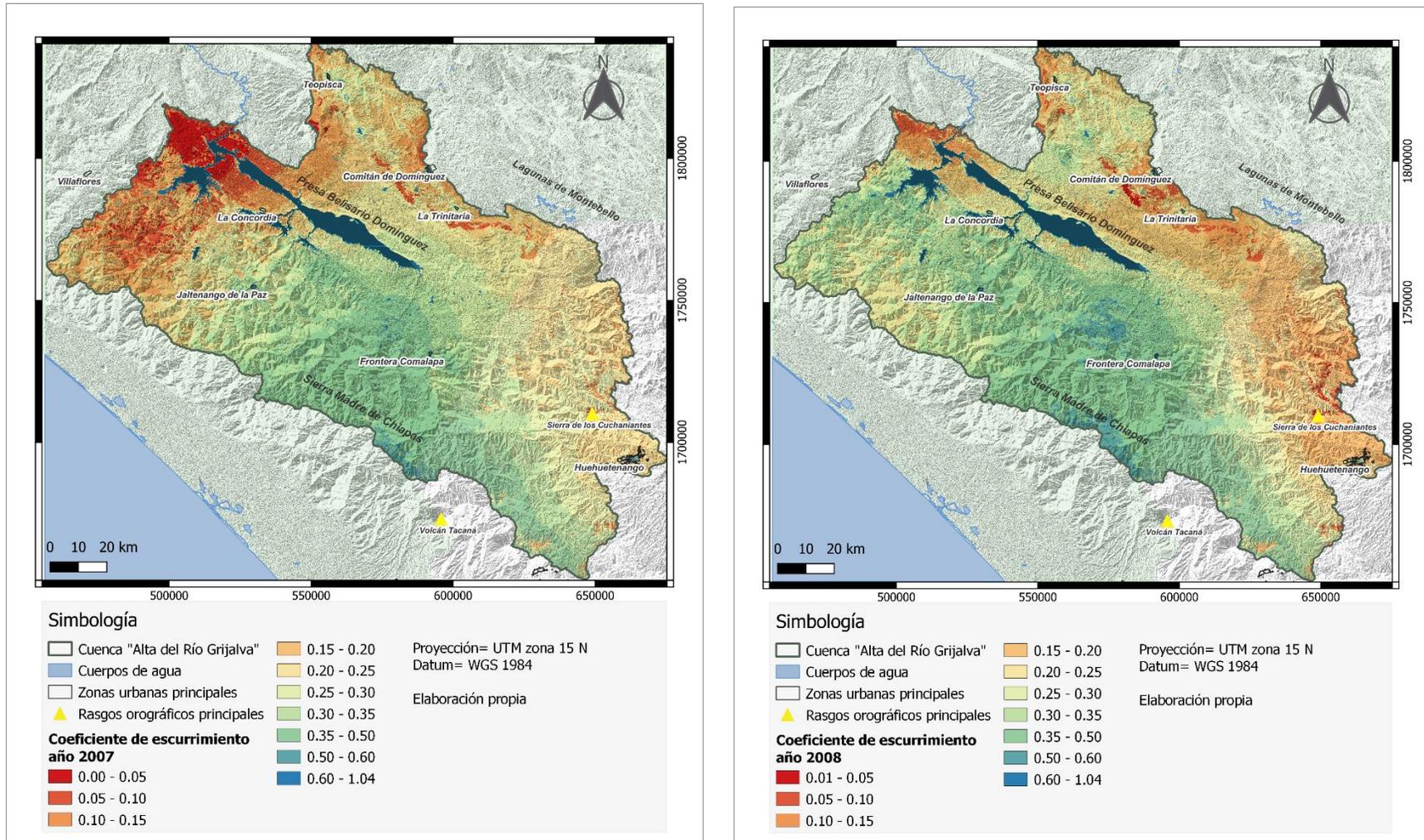


Figura C-12.- Coeficiente de escurrimiento superficial año 2007 y 2008 cuenca Alto Grijalva.

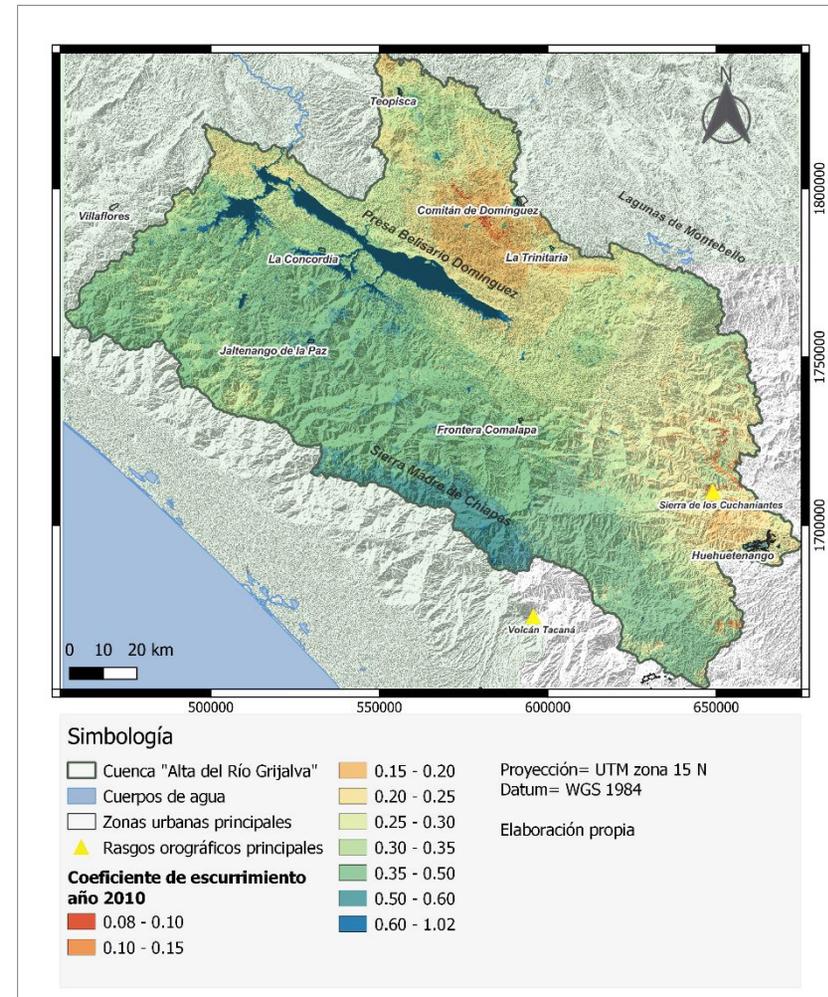
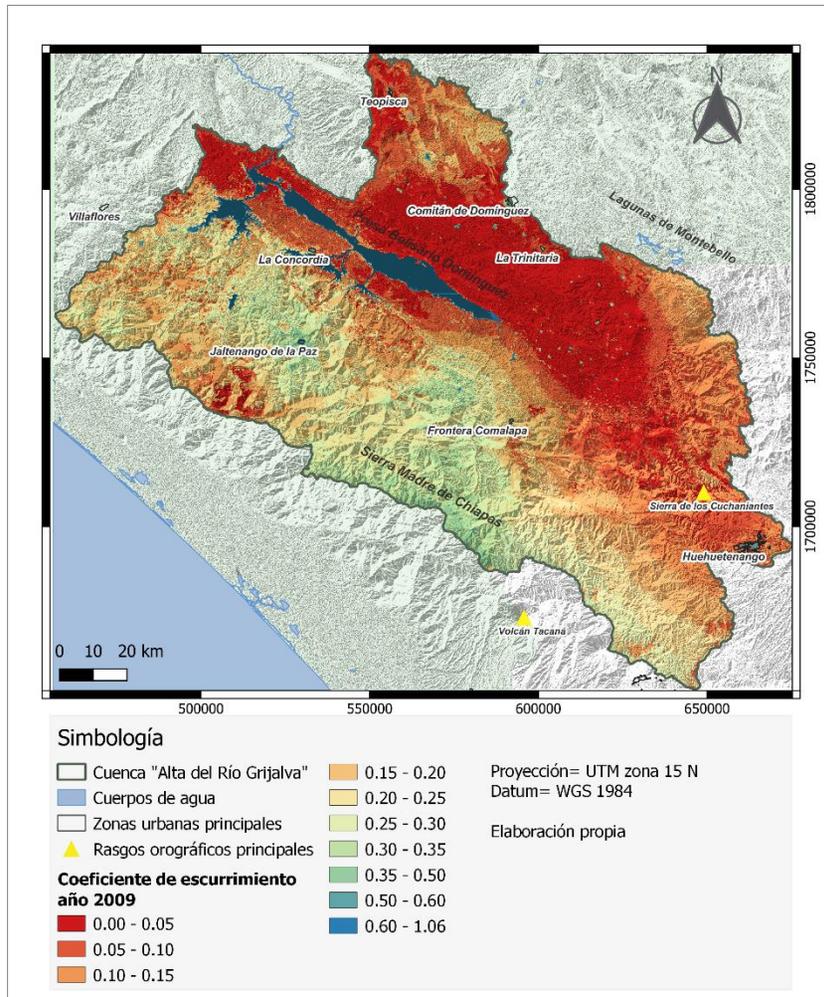


Figura C-13.- Coeficiente de escurrimiento superficial año 2009 y 2010 cuenca Alto Grijalva.

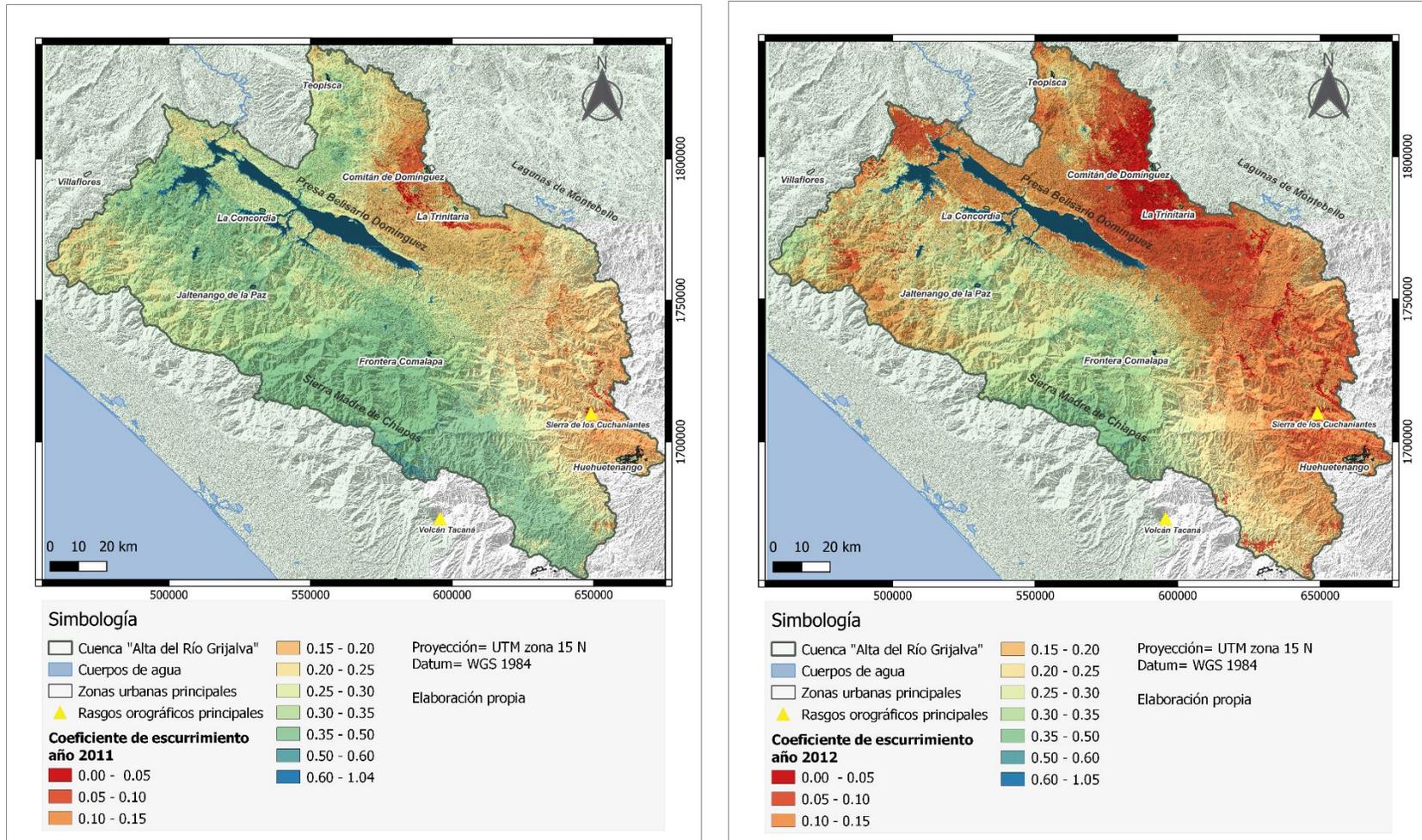


Figura C-14.- Coeficiente de escurrimiento superficial año 2011 y 2012 cuenca Alto Grijalva.

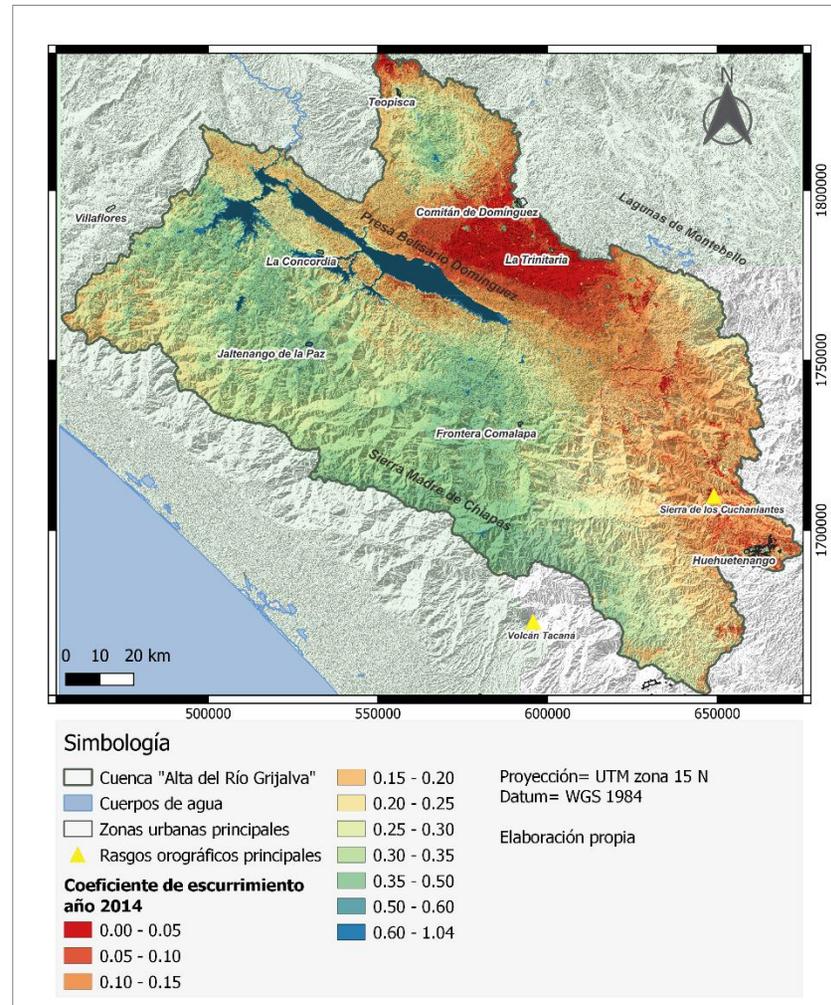
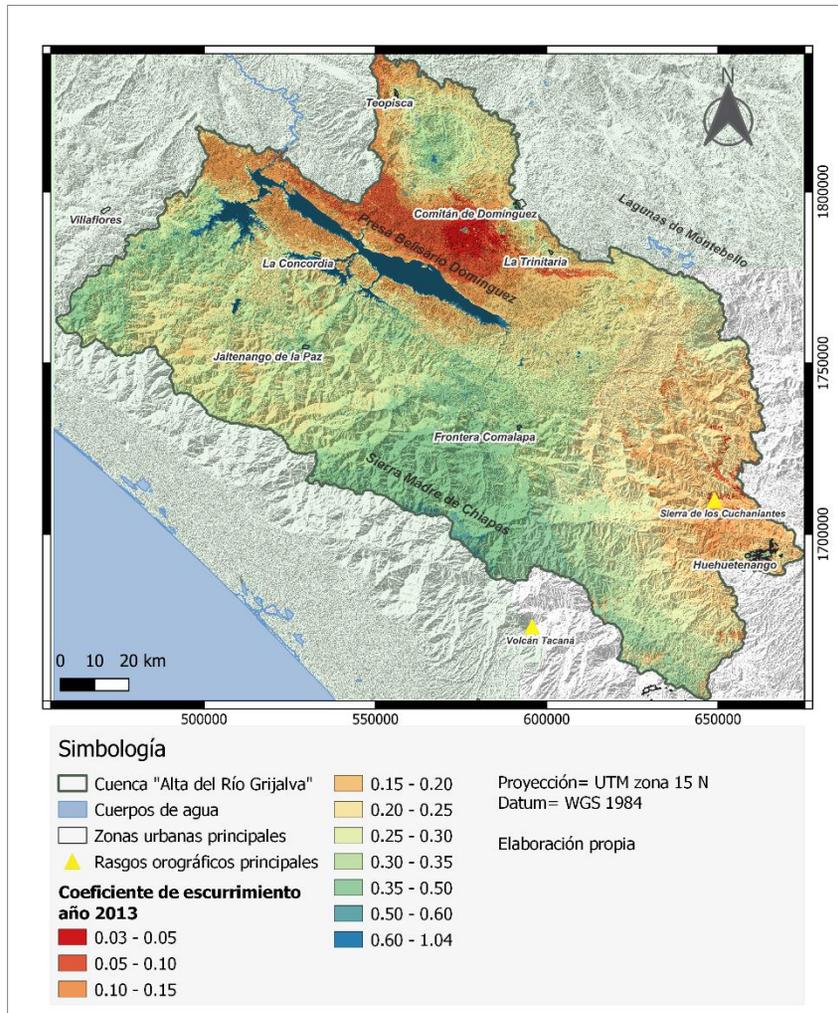


Figura C-15.- Coeficiente de escurrimiento superficial año 2013 y 2014 cuenca Alto Grijalva.

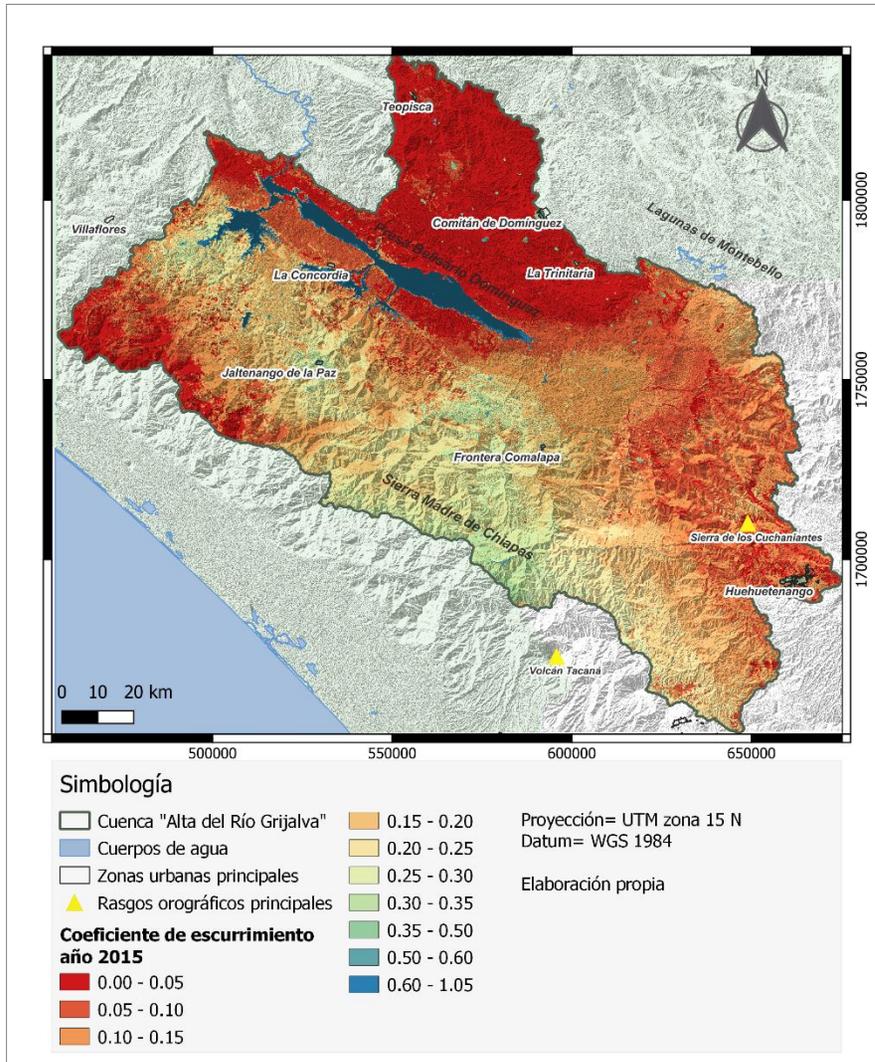


Figura C-16.- Coeficiente de escurrimiento superficial año 2015 cuenca Alto Grijalva.

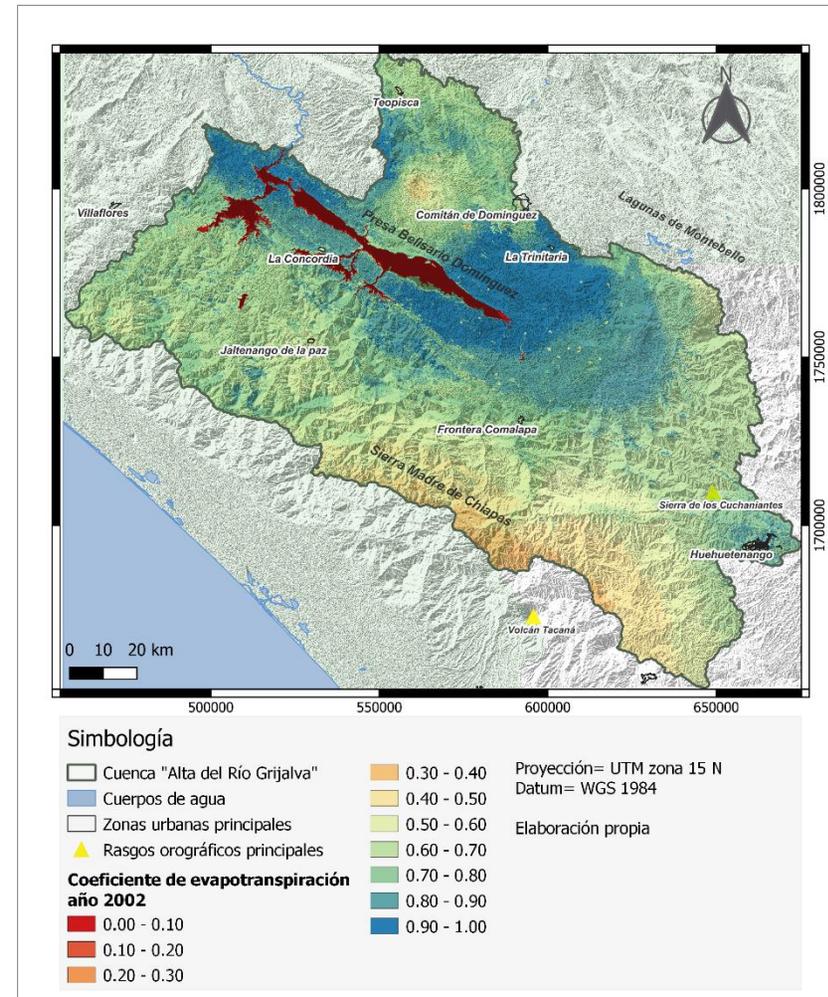
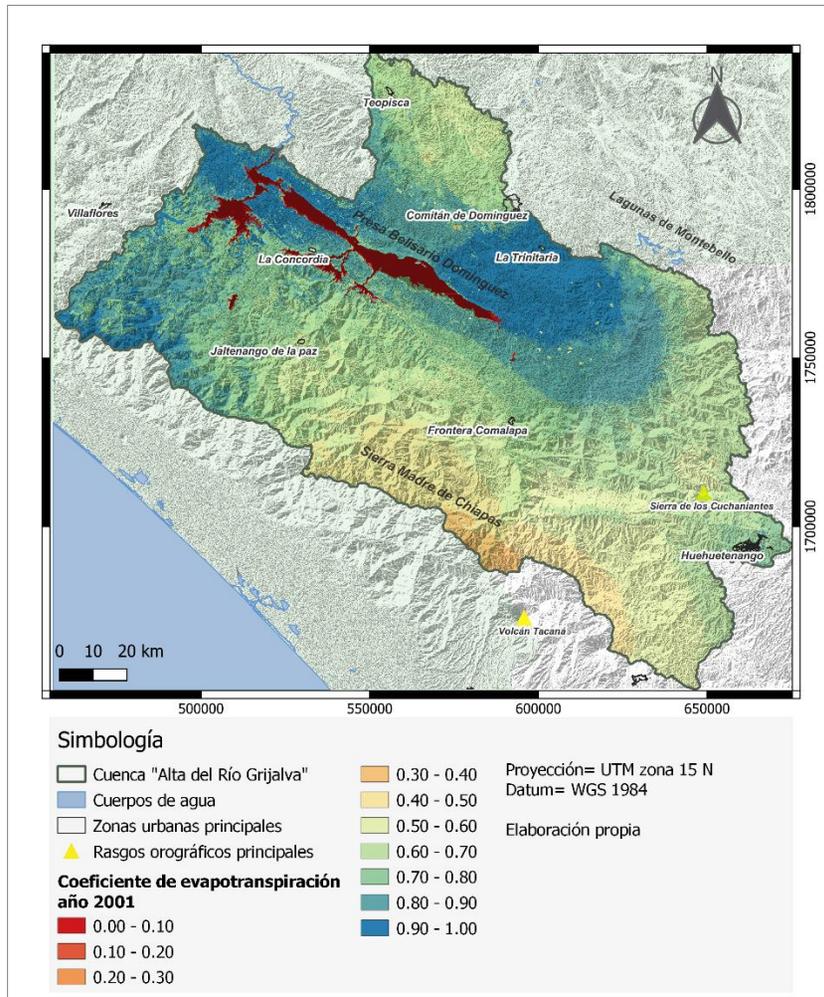


Figura C-17.- Coeficiente de evapotranspiración real año 2001 y 2002 cuenca Alto Grijalva.

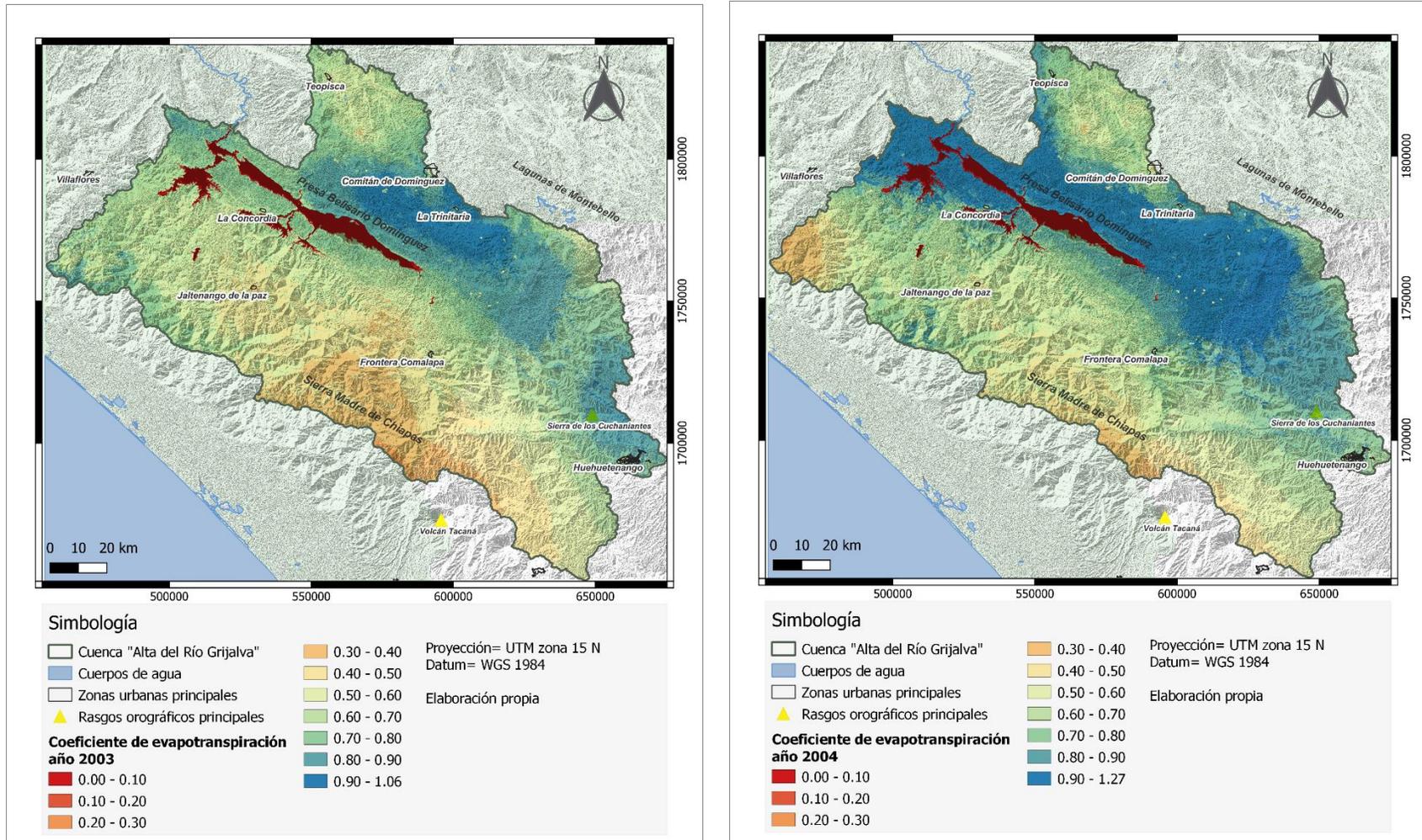


Figura C-18.- Coeficiente de evapotranspiración real año 2003 y 2004 cuenca Alto Grijalva.

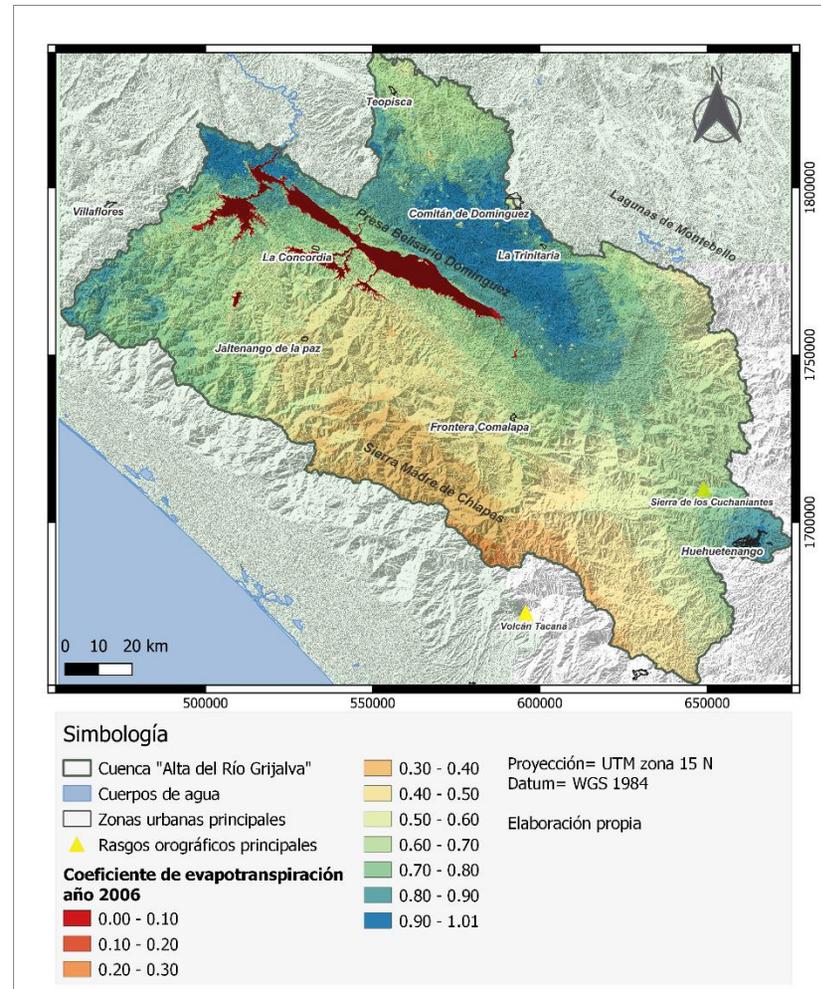
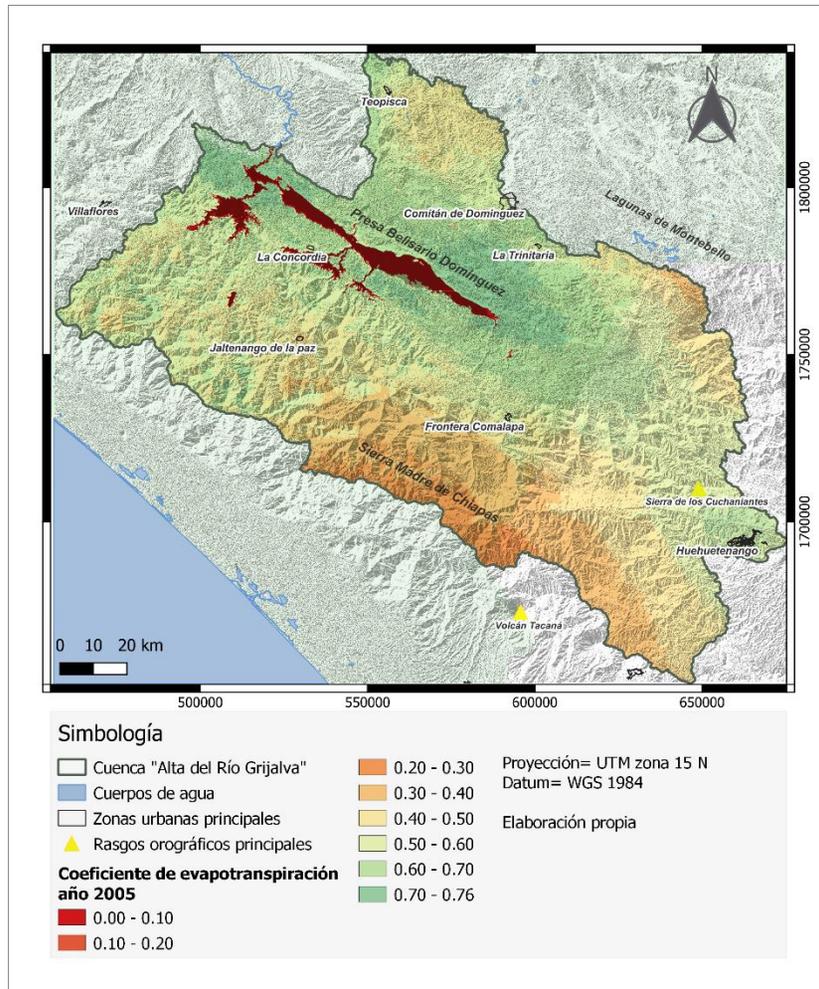


Figura C-19.- Coeficiente de evapotranspiración real año 2005 y 2006 cuenca Alto Grijalva.

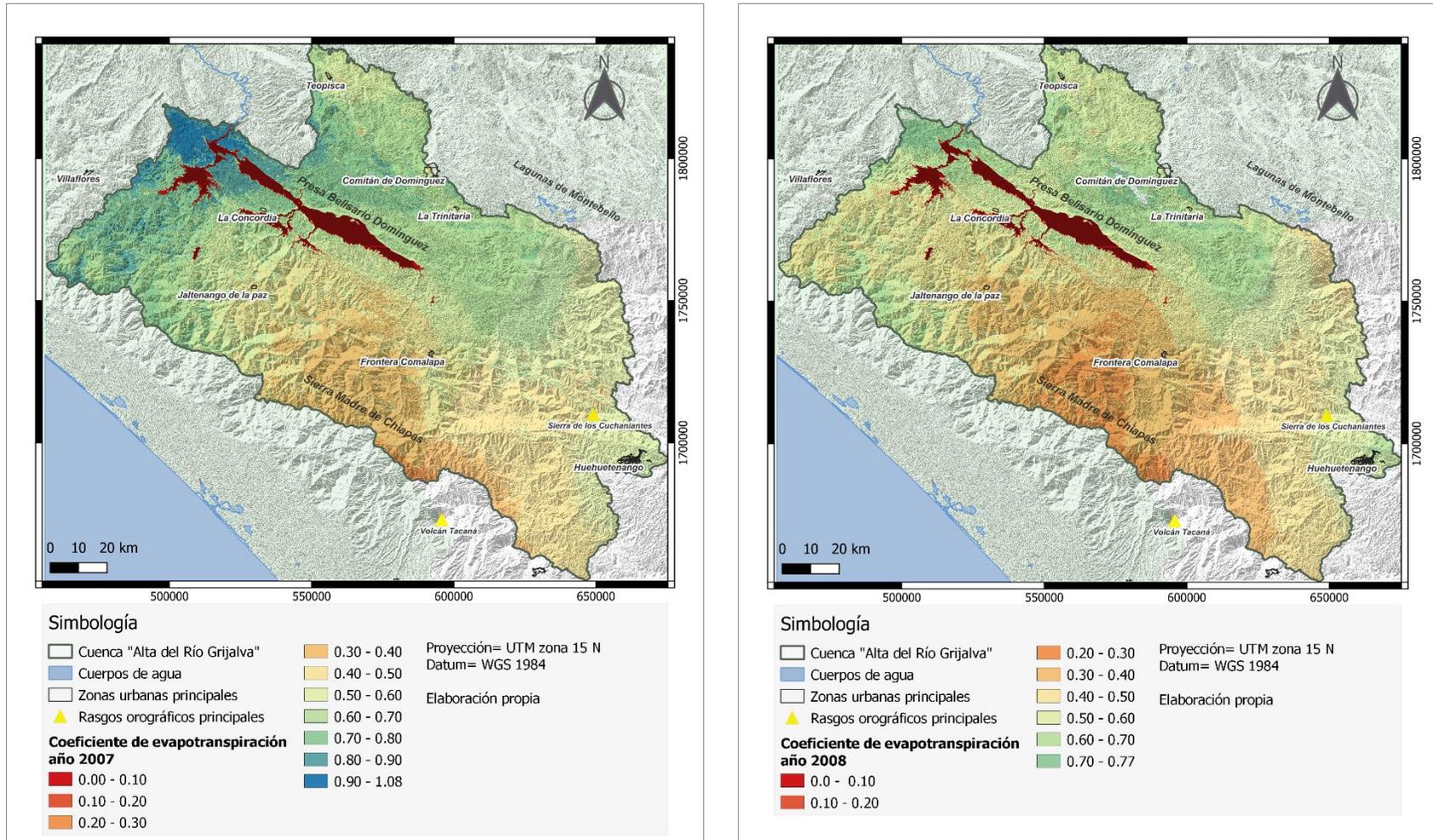


Figura C-18.- Coeficiente de evapotranspiración real año 2007 y 2008 cuenca Alto Grijalva.

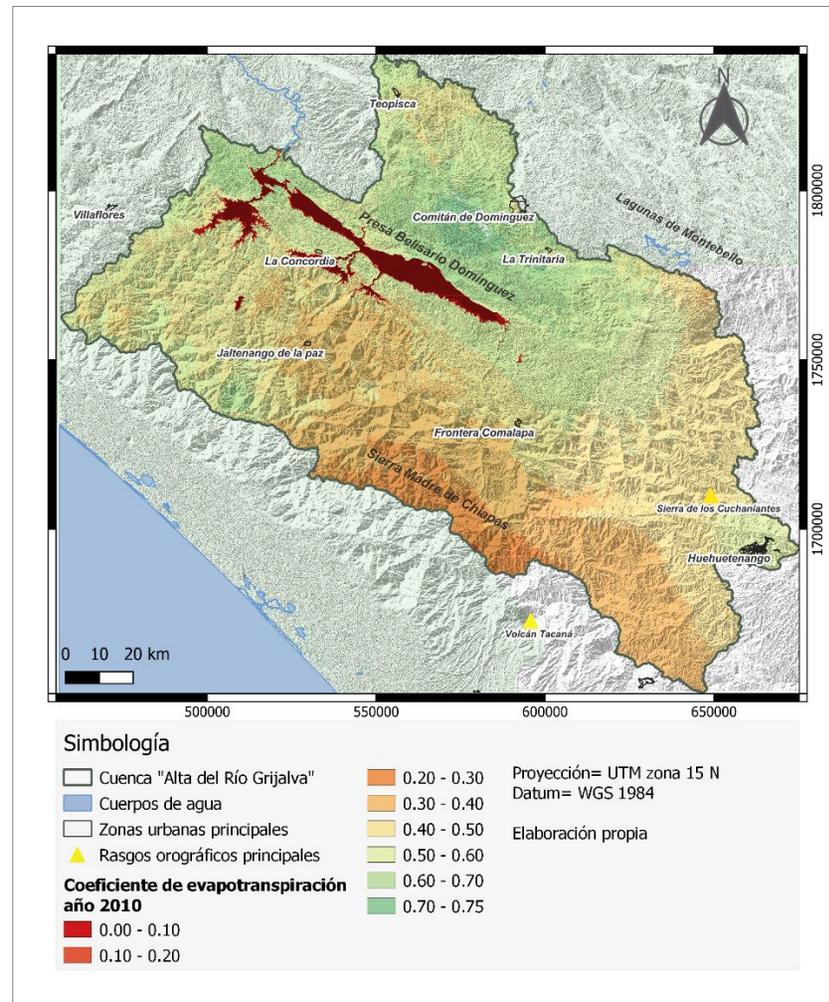
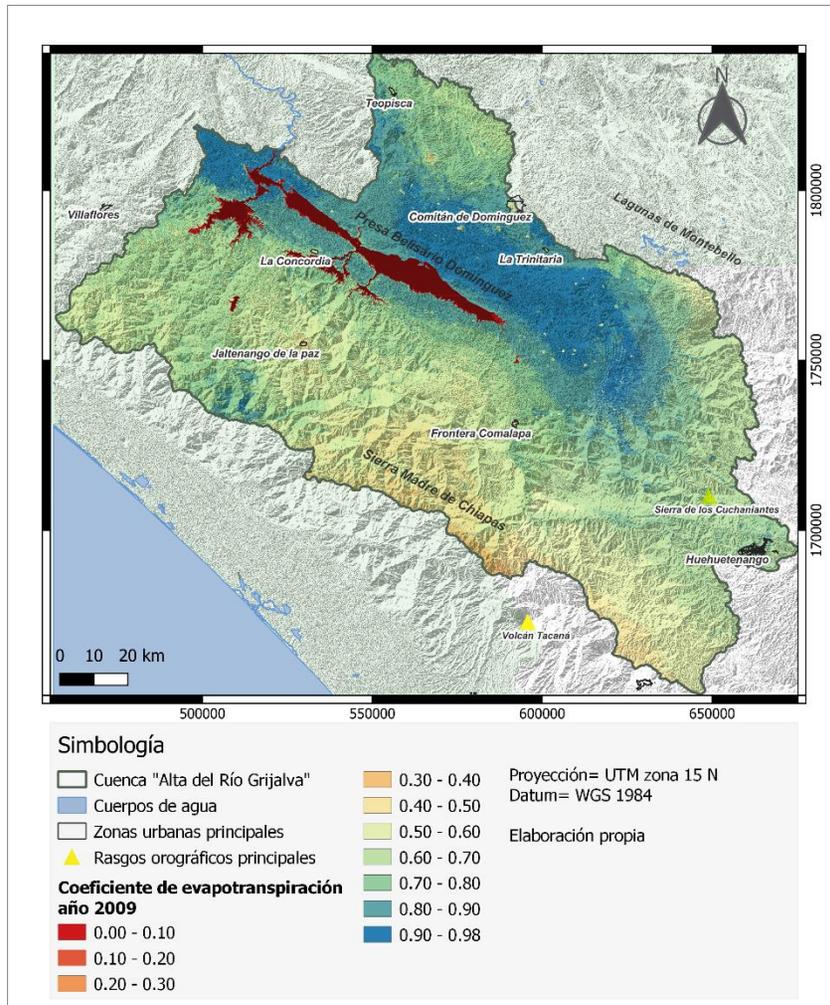


Figura C-19.- Coeficiente de evapotranspiración real año 2009 y 2010 cuenca Alto Grijalva.

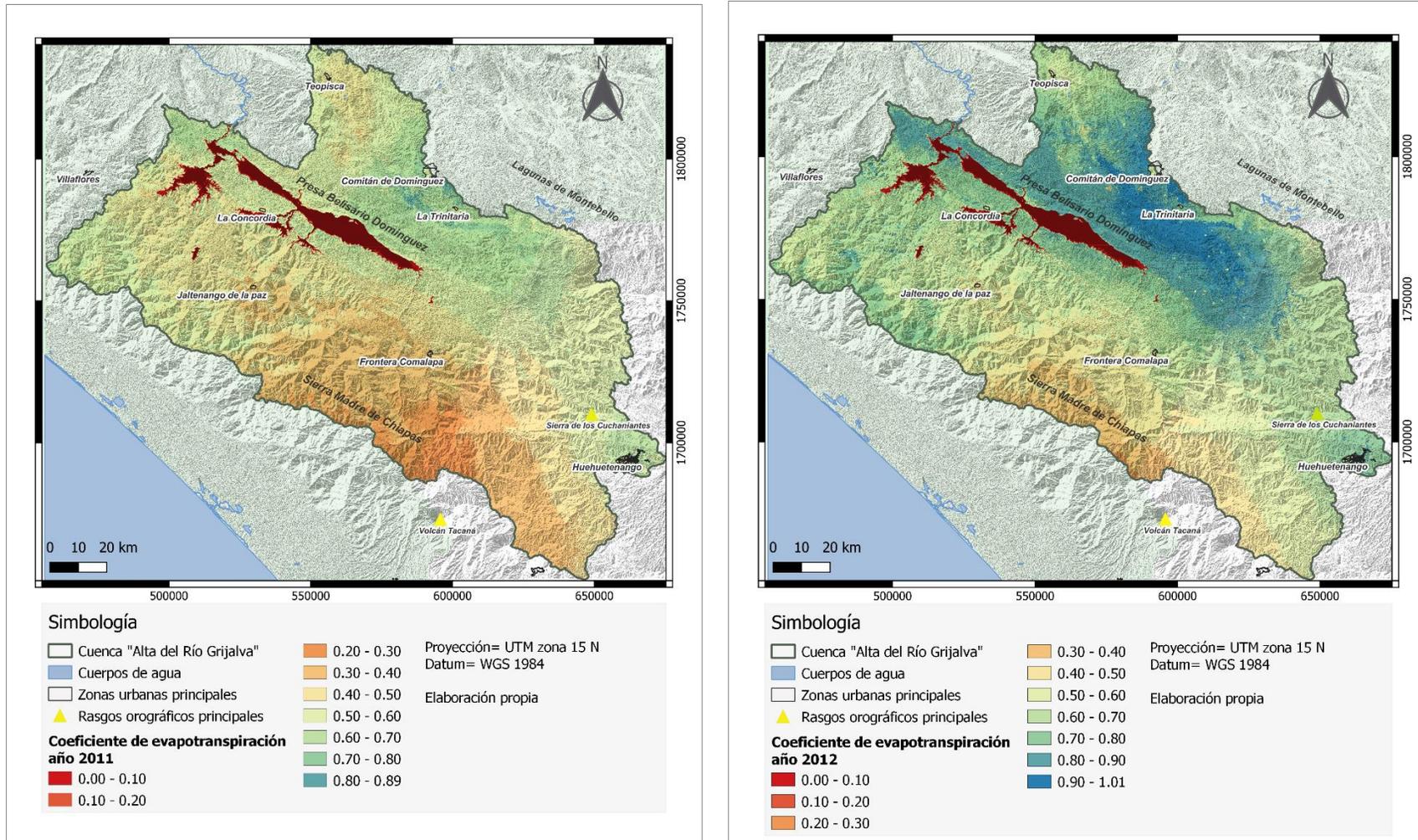


Figura C-20.- Coeficiente de evapotranspiración real año 2011 y 2012 cuenca Alto Grijalva.

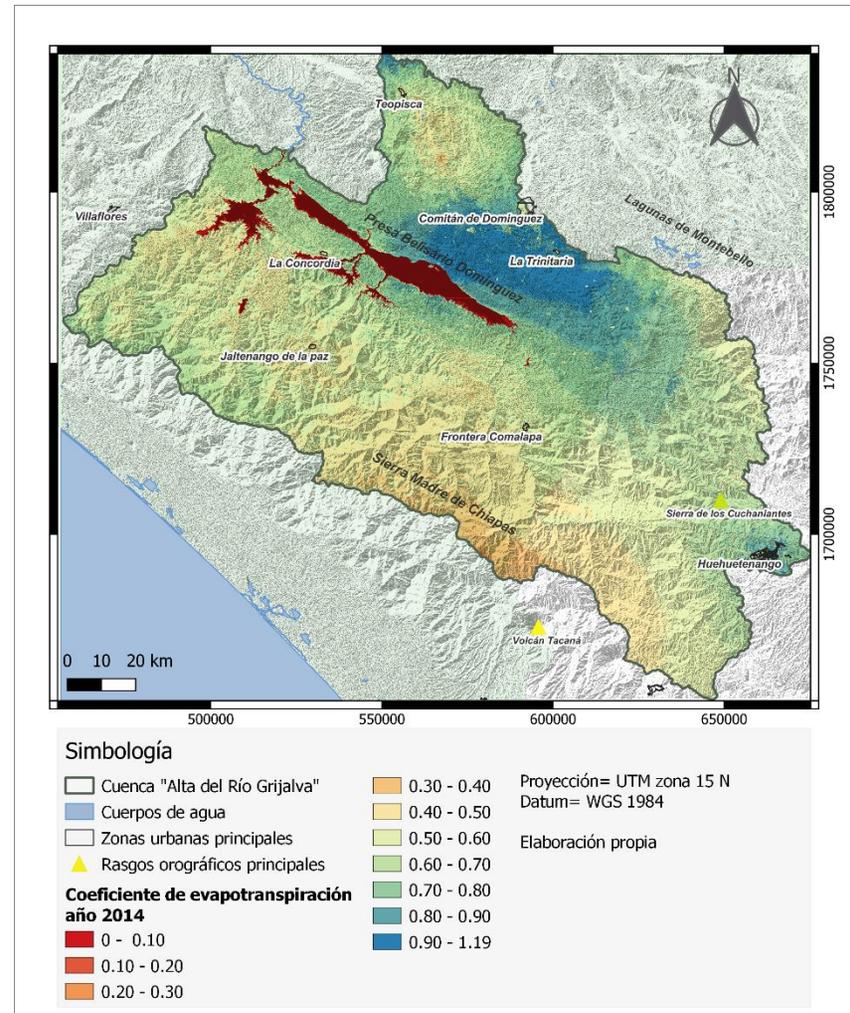
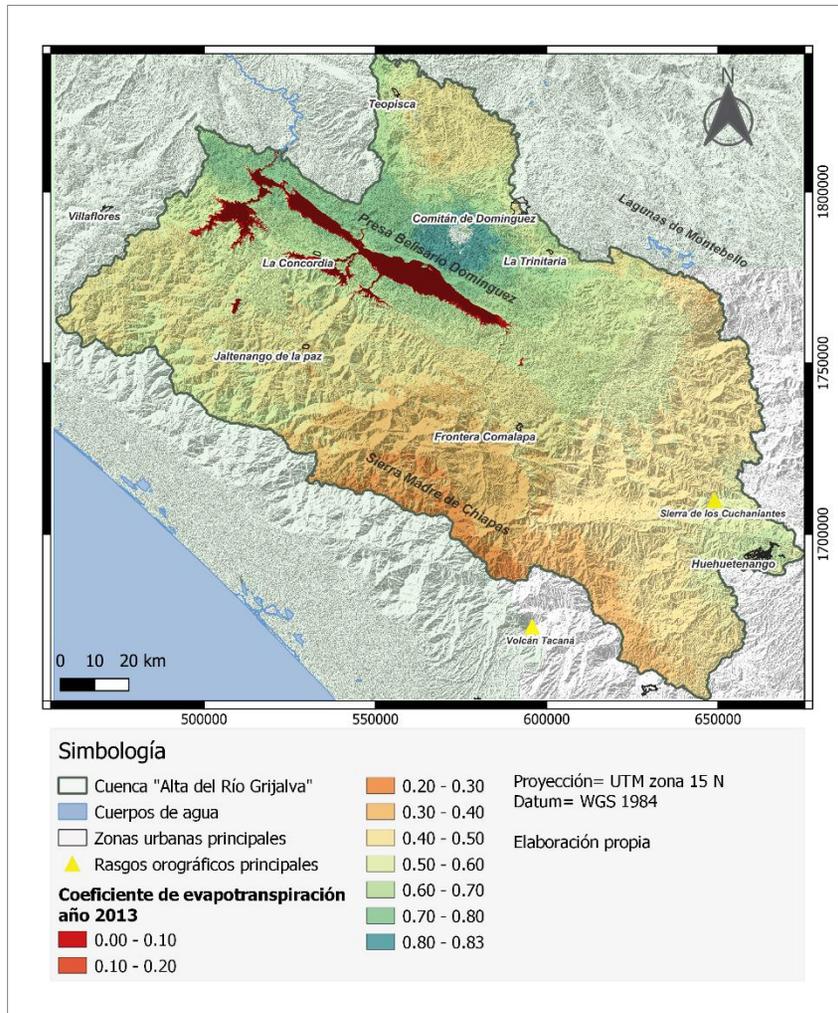


Figura C-21.- Coeficiente de evapotranspiración real año 2013 y 2014 cuenca Alto Grijalva.

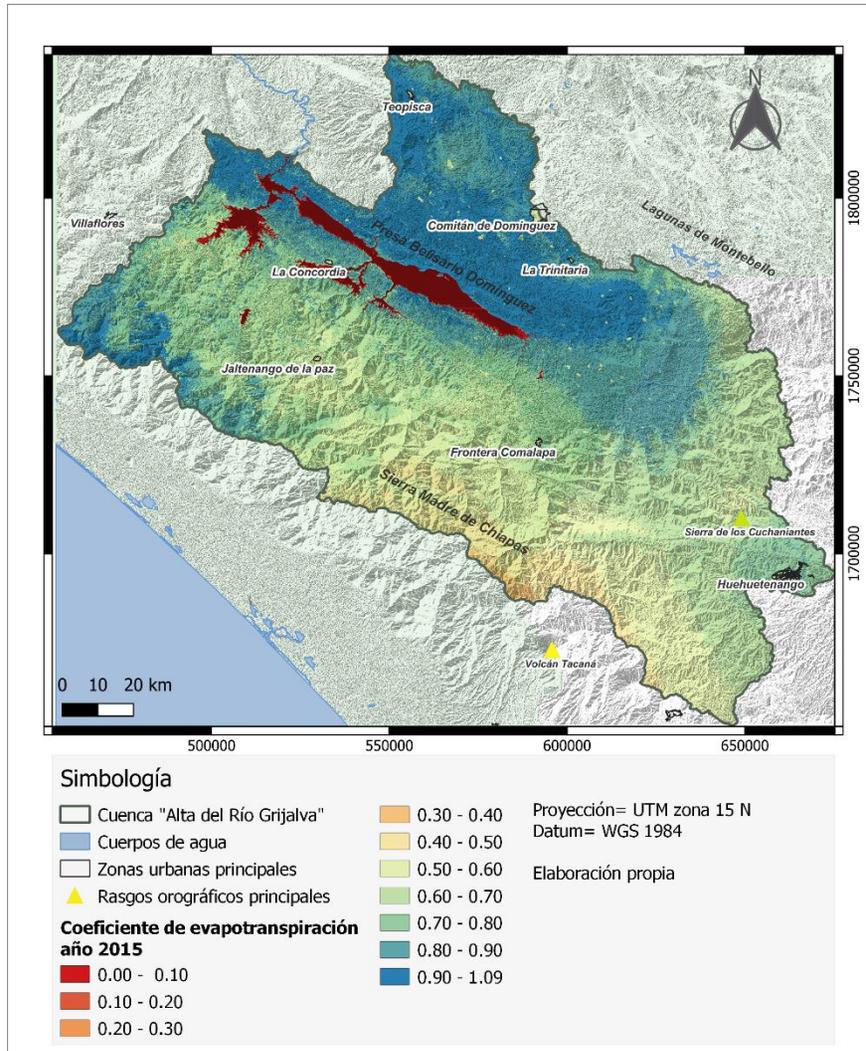


Figura C-22.- Coeficiente de evapotranspiración real año 2015 cuenca Alto Grijalva.

