

Estimación espacio-temporal de la distribución de la recarga potencial en el Valle de Toluca

Space-time estimation of the distribution of potential recharge in the Toluca Valley

Cecilia Rodríguez-Campero^{1,*}, Jaime Garfias¹, Richard Martel², Ignacio Navarro-de León³

¹ Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA), Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, 50130, Edo. México, México.

² Institut National de la Recherche Scientifique (INRS-ETE), Quebec, QC G1K 9A9, Canadá.

³ Facultad de Ciencias de la Tierra (FCT-UANL), Universidad Autónoma de Nuevo León, 67700, Linares, Nuevo León, México.

* Autor para correspondencia: (C. Rodríguez-Campero) cecilia.campero@outlook.com

Cómo citar este artículo:

Rodríguez-Campero, C., Garfias, J., Martel, R., Navarro-de León, I., 2023, Estimación espacio-temporal de la distribución de la recarga potencial en el Valle de Toluca: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 75 (2), A080523. <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2023v75n2a080523>

Manuscrito recibido: 17 de Febrero de 2023.

Manuscrito corregido: 5 de Mayo de 2023.

Manuscrito aceptado: 8 de Mayo de 2023.

La revisión por pares es responsabilidad de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia CC BY-NC-SA (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>)

RESUMEN

El cálculo de la recarga potencial es un aspecto esencial en la gestión de recursos hídricos, planeación del desarrollo urbano/agrícola y la definición de las tasas de bombeo, a fin de prevenir o mitigar la sobreexplotación de acuíferos. En el Valle de Toluca, las altas tasas de extracción han inducido descensos piezométricos acompañados de un desbalance hídrico, al rebasar el volumen de recarga media anual. En este estudio, se desarrolló un balance de humedad del suelo a paso de tiempo 24 horas para la estimación de la recarga potencial histórica y futura. El periodo de análisis comprende de 1980 a 2021, y una proyección hasta 2050 con base en tres escenarios probables de precipitación, temperatura y crecimiento urbano. Los resultados indican un volumen promedio anual de recarga de 369.5 Mm³ con una tasa de 174.5 mm/año, alcanzando los 355.7 mm/año en épocas húmedas. La distribución espacial sugiere una recarga condicionada mayormente por la climatología en las zonas montañosas, mientras que, en el centro del Valle, se asocia con la modificación del uso del suelo. La expansión de la mancha urbana se posiciona como factor preponderante en el aumento de la escorrentía y el gradual decremento de la intercepción y la evapotranspiración real. La disminución en la recarga es una constante en los potenciales escenarios de recarga futura, en comparación con el histórico promedio, se proyecta un cambio negativo de 16.59%, 19.99% y 22.61% para los escenarios bueno, moderado y malo respectivamente. Las tasas de recarga potencial obtenidas constituyen un parámetro inicial en modelos de flujo y análisis regionales de la cuenca.

Palabras clave: Valle de Toluca, recarga potencial, balance de humedad del suelo, cambio de uso del suelo.

ABSTRACT

Estimating potential recharge is essential to water resource management, urban/agricultural development planning, and the definition of pumping rates to prevent or mitigate aquifer overexploitation. In the Toluca Valley, high extraction rates have induced piezometric declines accompanied by a water imbalance exceeding the average annual recharge volume. In this study, a daily soil moisture balance was developed for estimating historical and future potential recharge. The analysis period includes 1980 to 2021 and a projection until 2050 based on three probable scenarios of precipitation, temperature, and urban growth. The results indicate an average annual recharge volume of 369.5 Mm³ with a 174.5 mm/year rate, reaching 355.7 mm/year in wet seasons. The spatial distribution suggests a recharge conditioned in the mountainous areas mainly by the climatology and in the center of the Valley by the land use modification. Urban sprawl is a significant factor in increased runoff and the gradual decrease in interception and actual evapotranspiration. The decrease in recharge is a constant in the potential future recharge scenarios. Compared to the historical average, a negative change of 16.59%, 19.99%, and 22.61% is projected for the best, moderate, and bad scenarios, respectively. The potential recharge rates obtained are an initial parameter in regional basin flow models and analyses.

Keywords: Toluca aquifer, potential recharge, soil water balance, land use change.

1. Introducción

La disponibilidad media anual de un acuífero representa el volumen de agua que puede ser extraído sin alcanzar un estado de déficit. La evaluación de sistemas acuíferos en términos de disponibilidad media comprende un balance de entradas y salidas de agua, siendo la recarga el principal componente a determinar. A este respecto, el término de recarga se refiere al agua proveniente generalmente de la precipitación y que se infiltra en el suelo para reabastecer los acuíferos. Se distingue la recarga real que cruza efectivamente el nivel freático, en tanto que la recarga potencial representa el agua con posibilidad de dejar la zona radicular para convertirse eventualmente en recarga (Westenbroek *et al.*, 2018).

Las tasas de recarga son controladas por el clima, la topografía, la cobertura vegetal, el tipo y uso de los suelos, así como la profundidad de la zona radicular (Sanford, 2002). Por tales motivos, el cálculo in situ de la variable resulta complejo y costoso, siendo una alternativa la aplicación de métodos indirectos debido a la versatilidad en el manejo de la información, bajo costo y posibilidad de proyectar la recarga a futuro (Scanlon *et al.*, 2002; Mas *et al.*, 2014). En este rubro, destaca el método de balance de humedad del suelo, debido a la posibilidad de analizar individualmente las componentes del balance de agua (Bradbury *et al.*, 2017; Westenbroek *et al.*, 2021). Así, por ejemplo, el código Soil Water Balance SWB2 ha ganado dominio en la estimación de la recarga potencial en cuencas regionales con climas diversos, comprobándose en general, una buena correspondencia con las tasas de infiltración medidas in situ (Smith y Westenbroek, 2015; Johnson *et al.*, 2018; Trost *et al.*, 2018; Shuler *et al.*, 2021).

Los estudios de recarga potencial adquieren relevancia en cuencas con acuíferos sobreexplotados, como es el caso del Valle de Toluca, cuya extracción de agua subterránea comienza a inicios de 1950, con el fin de abastecer necesidades domésticas, industriales y agrícolas. El principal efecto asociado es la sobreexplotación del siste-

ma acuífero que, sin duda alguna, se manifiesta en la desaparición de pozos artesianos, desecación de lagunas, subsidencia regional y generación de fracturas (Esteller y Andreu, 2005; Calderhead *et al.*, 2010a; Calderhead *et al.*, 2010b; Castellazzi *et al.*, 2017). Aunque existen estudios previos de recarga potencial en el Valle de Toluca (Ortiz *et al.*, 2010; Calderhead *et al.*, 2012b; Pacheco, 2012; Salas, 2012; Sánchez, 2019), no se ha considerado aún la extensa variabilidad climatológica de la zona, ni la humedad remanente en el suelo que controla, en gran medida, la infiltración de agua. Del mismo modo, en los análisis existentes de proyección de la recarga, no se ha analizado, en general, el efecto asociado a la extensión de la mancha urbana.

El objetivo del presente estudio es estimar la recarga potencial histórica y futura en el Valle de Toluca mediante el modelo SWB2 y a su vez, considerando los efectos derivados del cambio climático, así como la modificación del uso del suelo. Este estudio proporciona información consistente referente al potencial de reabastecimiento de agua en el acuífero, útil en la toma de decisiones respecto a la planeación de extracción.

2. Descripción del área de estudio

El Valle de Toluca se localiza al centro de México a una altura promedio de 2,570 msnm, abarcando una extensión aproximada de 2,100 km² (Figura 1). El clima se clasifica como templado subhúmedo con una temperatura media anual que oscila entre 12 y 13 °C. Por su parte, la precipitación media anual ronda los 900 mm, concentrándose principalmente en los meses de mayo a octubre.

2.1. CONTEXTO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO

Los altos topográficos que delimitan naturalmente la cuenca son resultado de la actividad tectónica del Mioceno tardío y los sistemas de fallas del Pleistoceno al Holoceno, que originaron la Faja Volcánica Transmexicana (Ferrari *et al.*, 2000; García *et al.*, 2000). Estas estructuras correspon-

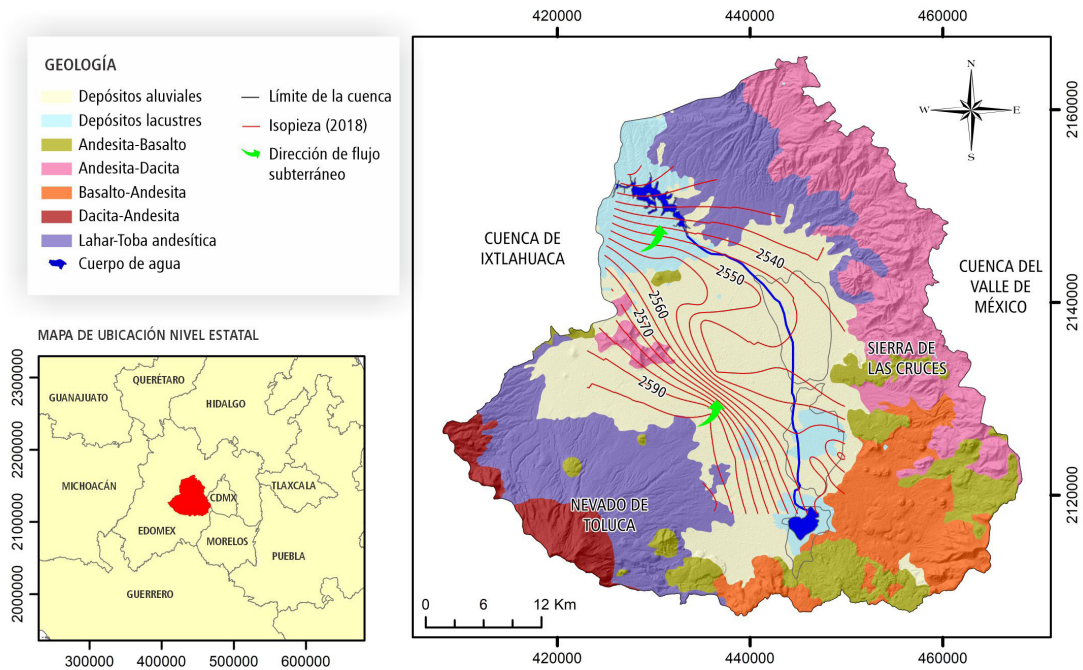


Figura 1 Ubicación geográfica del Valle de Toluca y geología superficial. Se muestran las isopiezas a partir de los registros piezométricos del año 2018 a una profundidad de sonda de 150 m.

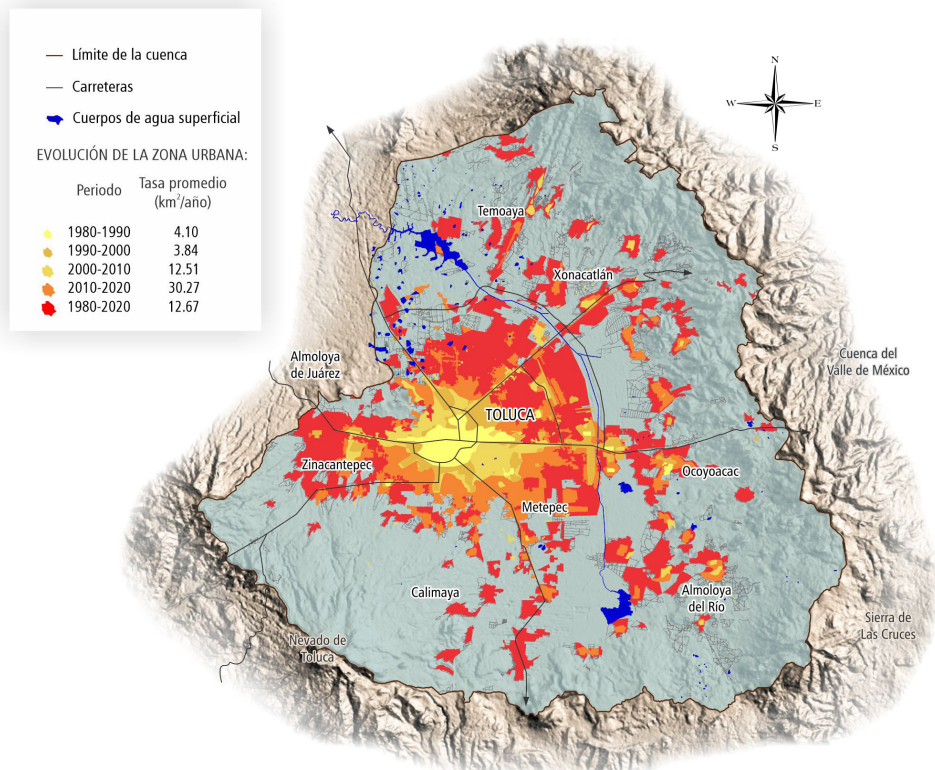


Figura 2 Crecimiento de la mancha urbana en el Valle de Toluca durante el periodo de 1980 a 2020, de acuerdo con los datos del INEGI y Globeland30. Análisis por década.

Tabla 1. Evolución en la extensión del uso de suelo con base en los datos publicados por el INEGI (1997, 2001) y Globeland30 (Chen et al., 2014) para el Valle de Toluca.

Uso de suelo	1980-1984		1985-1994		1995-2004		2005-2014		2015-2020	
	Área (km ²)	%	Área (km ²)	%	Área (km ²)	%	Área (km ²)	%	Área (km ²)	%
Cultivo	1419.4	67.0	1392.1	65.7	1183.2	55.9	1165.2	55.0	1045.1	49.3
Bosque	434.7	20.5	404.7	19.1	588.0	27.8	585.5	27.6	568.6	26.8
Pastizal	184.3	8.7	198.7	9.4	17.5	0.8	8.0	0.4	12.1	0.6
Matorral	7.4	0.4	4.7	0.2	26.9	1.3	39.9	1.9	66.8	3.1
Humedal	49.6	2.3	7.5	0.4	28.3	1.3	30.6	1.4	34.0	1.6
Cuerpo de agua	11.5	0.5	11.1	0.5	9.3	0.4	14.9	0.7	13.0	0.6
Superficie artificial	8.8	0.4	98.4	4.6	264.8	12.5	266.0	12.6	370.8	17.5
Área desnuda	2.3	0.1	1.0	0.0	0.3	0.0	8.2	0.4	7.9	0.4

den principalmente, al volcán Nevado de Toluca (4,560 msnm) en el flanco suroeste, y la Sierra de las Cruces (3,000 msnm) al este. En la base de la columna estratigráfica se identifican rocas ígneas (basaltos y andesitas), le sobreyacen depósitos piroclásticos de lahares, cenizas y pómez que afloran al pie de las sierras (Macías *et al.*, 1997). Finalmente, se depositan sedimentos granulares de origen aluvial y lacustre, que se interdigitan con materiales de origen volcánico.

Condicionado a la geología, el sistema acuífero se divide en una unidad inferior de rocas volcánicas fracturadas provenientes del Nevado de Toluca y la Sierra de las Cruces, además de un acuífero granular superior (Cervantes y Armienta, 2004; Calderhead *et al.*, 2010a; CONAGUA, 2015). Análogo a los patrones de lluvia, la mayor recarga ocurre en la Sierra de las Cruces a causa de los patrones de precipitación y el grado de fracturamiento de las rocas (Birkle *et al.*, 1998). En este contexto, el flujo subterráneo en condiciones

naturales se dirige al centro de la cuenca, posteriormente presenta una dirección S-N, similar al cauce del río Lerma hacia la cuenca de Ixtlahuaca/Atlaquemulco. Sin embargo, el estado hidrodinámico natural de la cuenca ha sido transformado desde principios de la década de los 50's. Las tasas de extracción de agua subterránea han ido en aumento, de modo específico, para abastecer las necesidades industriales, agrícolas y domésticas de una población creciente. Asimismo, la instalación de la batería de pozos del Sistema Lerma captura parte de la recarga proveniente de las serranías del este. Este acelerado ritmo de extracción de agua ha provocado un desequilibrio hidrológico siendo, en cualquier caso, insuficiente la recarga natural del sistema. El déficit en la disponibilidad media de agua se manifiesta hidrogeológicamente en la reconfiguración del patrón natural de flujo (Figura 1) y, en gran medida, el desarrollo de importantes conos de descenso piezométrico en la zona industrial del Valle de Toluca.

2.2. EVOLUCIÓN DEL USO DEL SUELO

La estratégica ubicación del Valle de Toluca en el centro del país y, muy especialmente, la cercanía con la ciudad de México ha favorecido el establecimiento de una de las principales zonas industriales del país. A la par del desarrollo industrial, el rubro demográfico presenta un crecimiento importante desde 1980 (Figura 2), alcanzado tasas promedio de hasta 30.27 km² por año durante la última década (INEGI, 1997, 2001; Chen *et al.*, 2014; Sun *et al.*, 2015). Como resultado, los usos del suelo destinados a cultivos han disminuido su extensión, dando lugar al establecimiento de superficies artificiales (Tabla 1).

3. Materiales y métodos

3.1. MODELO DE BALANCE HIDROLÓGICO SWB2

El modelo de balance de humedad del suelo SWB2 es un código de acceso libre, el cual ha sido desarrollado por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) para la estimación de la recarga potencial (Westenbroek *et al.*, 2018). El balance hídrico se basa en la modificación al método de Thornthwaite-Mather (Thornthwaite-Mather 1957), donde, la recarga potencial (Ecuación 1) representa el exceso de humedad del suelo fuera de la zona radicular (Ecuación 2 y 3).

$$R = \theta_i - \theta_r, \quad (1)$$

$$\theta_r = CAD \times PR, \quad (2)$$

$$\theta_i = \theta_{i-1} + P - I - E - ET_R, \quad (3)$$

siendo R (*in*) la recarga potencial, θ_i (*in*) la humedad del suelo en el día de simulación, θ_r la humedad de la zona radicular, CAD (*in*) la capacidad de agua disponible en el suelo después de sustraer la necesaria por la vegetación, PR (*fi*) la profundidad de raíces, θ_{i-1} (*in*) la humedad del día previo, P (*in*) la precipitación, I (*in*) la intercepción, E (*in*) la escorrentía y ET_R (*in*) la evapotranspiración real.

Las componentes del balance hídrico se estiman a pasos de tiempo de 24 horas en matrices cuadrangulares, cuyo esquema de cálculo comienza con: (1) Lectura de datos de precipitación y temperatura, (2) Intercepción, (3) Escorrentía, (4) Evapotranspiración potencial, (5) Evapotranspiración real, (6) Humedad del suelo. El código SWB2 se ejecuta en una terminal de comandos del Sistema Operativo a través de un archivo de control y una tabla de búsqueda (Figura 3). El análisis de la recarga en el Valle de Toluca se desarrolló para el periodo de 1980 a 2050, con modificaciones al uso del suelo en los años de 1980, 1985, 1995, 2005, 2013, 2020, 2030 y 2040 de acuerdo con los datos disponibles de INEGI y GlobeLand 30.

3.2. VARIABLES CLIMATOLÓGICAS

Los valores de precipitación, temperatura máxima y mínima, se compilaron del proyecto Daymet v. 4.0 (Thornton *et al.*, 2020), soportado por la NASA a través del Sistema de Información y Datos Científicos de la Tierra (ESDIS) con el Programa de Ecología Terrestre (<https://Daymet.ornl.gov>). Daymet es una serie de algoritmos para la interpolación por pesos ponderados de datos meteorológicos diarios, cuyas fuentes de datos en México son las estaciones de la red climatológica histórica mundial (GHCN), en conjunto con las estaciones del Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Las series climatológicas se descargaron en el formato matricial NetCDF con una resolución espacial de 1 km x 1 km y pasos de tiempo diarios durante el periodo de 1980 a 2020.

Para comprobar si la base de datos Daymet proporciona mediciones de precipitación y temperatura similares a las registradas por en las estaciones del SMN (<https://smn.conagua.gob.mx>), se llevó a cabo una relación promedio lineal entre los promedios anuales para el caso de la precipitación, y mensuales para la temperatura media, durante el periodo de 1981 - 2017. Del total de 21 estaciones climatológicas, se seleccionaron aquellas con el menor porcentaje de datos faltantes para completar las series de tiempo diarias respectivas (Tabla 2). A partir del coeficiente de correlación

entre estaciones, se delimitaron clústeres para el posterior tratamiento de relleno de datos (Figura 4).

En las series de precipitación se utilizaron pesos ponderados (Ecuación 4), aplicando la Generalización del coeficiente de correlación modificado con el método de ponderación de distancia inversa (Ecuación 5), que incluye, principalmente, el factor de la altura (Morales *et al.*, 2019),

$$Z_t = \sum_{i=1}^N W_i Z_i, \tag{4}$$

$$W_i = \frac{r_{it}^p d_{it}^{-q} h_{it}^{-s}}{\sum_{i=1}^N r_{it}^p d_{it}^{-q} h_{it}^{-s}} \tag{5}$$

donde, Z_t es el valor estimado de la precipitación para el punto t , N es el número de estaciones vecinas que conforman el clúster de estimación, W_i es el peso ponderado de la estación i -th, Z_i es el valor de precipitación observado en la estación i -th, r_{it}^p , d_{it}^{-q} y h_{it}^{-s} representan el coeficiente de correlación, la distancia y la diferencia de altura entre la estación en análisis t y las estaciones vecinas i -th, respectivamente. El exponencial p es el coeficiente de correlación de Pearson, q representa la influencia de la distancia en los datos cuyo valor fluctúa entre 1.0 y 6.0; en tanto que s es el grado de dominio de altura entre estaciones. De este modo, la precipitación media anual se comparó con el valor del pixel correspondiente a cada estación climatológica en los ráster Daymet.

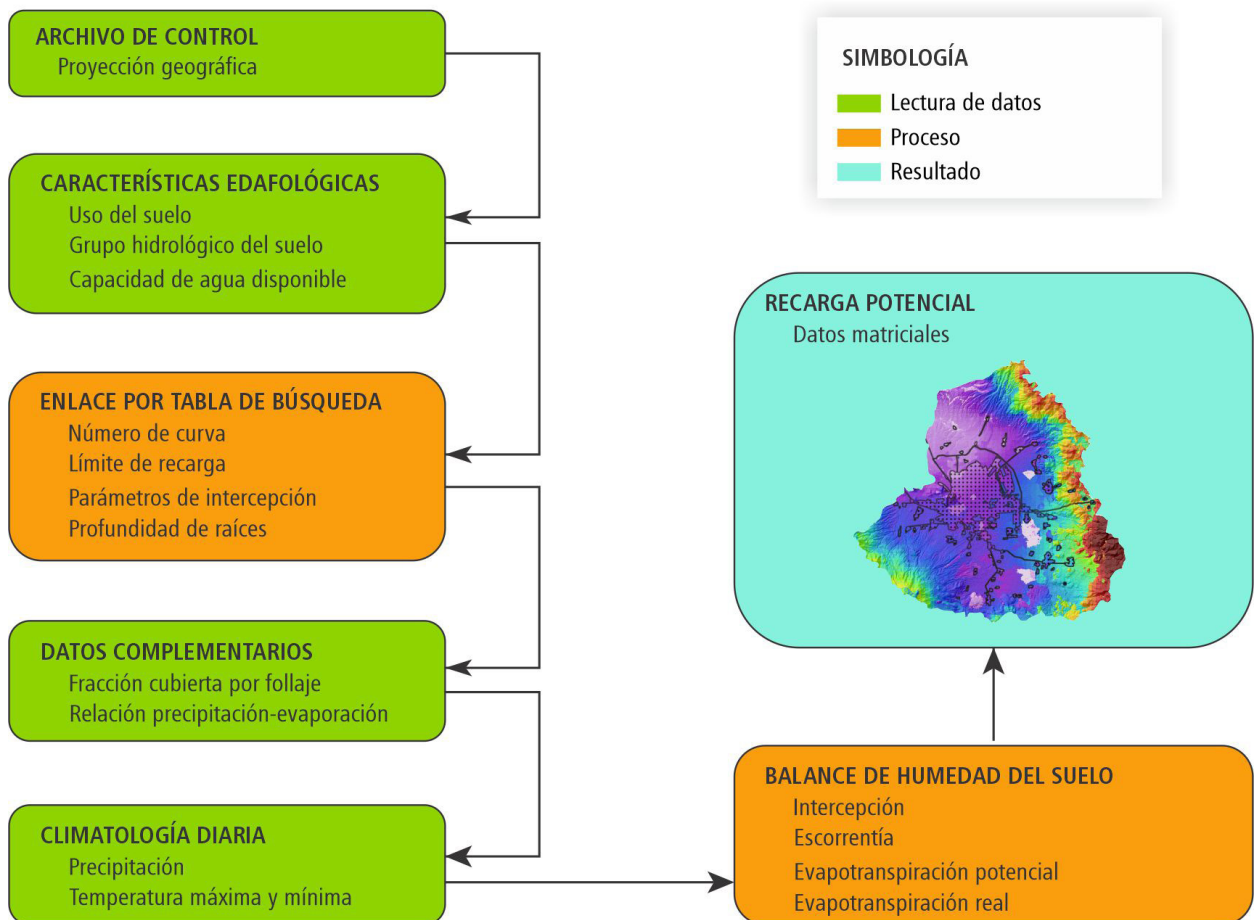


Figura 3 Diagrama de flujo del modelo de recarga SWB2 y datos de entrada.

Por otra parte, los conjuntos de temperatura máxima y mínima se completaron por regresiones ponderadas (Ecuación 6), aplicando un filtro gaussiano con una función lineal para equilibrar la diferencia altitudinal entre estaciones (Stahl *et al.*, 2006).

$$T_p = \frac{\sum_{i=1}^n w_i [T_i + b_0 + b_1(h_p - h_i)]}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (6)$$

donde T_p es la temperatura promedio (°C), T_i es la temperatura registrada en la estación vecina i , b_0 y b_1 son coeficientes de regresión entre estaciones, h_p es la altura de la estación de estudio (msnm), h_i es la altura en la estación vecina i , y n es el número de estaciones utilizadas en el análisis. El peso ponderado w_i se basa en la distancia entre estaciones considerando un filtro gaussiano (Ecuación 7).

$$w_i = \begin{cases} 0; & r > R_p \\ \exp \left[-\left(\frac{r}{R_p} \right)^2 \alpha \right] - e^{-\alpha}; & r \leq R_p \end{cases} \quad (7)$$

donde r es la distancia entre las estaciones de estudio (m), R_p es la distancia entre el punto de análisis y la estación más lejana dentro del clúster de evaluación, α es la constante de curvatura del filtro gaussiano con valores entre 1 y 7, para este caso se ajustó el valor de 1.

3.3. CÁLCULO DE LA INTERCEPCIÓN

Dado los extensos bosques que bordean la cuenca, la intercepción se analizó con el método de Gash modificado (Gash, 1979; Gash *et al.*, 1995), el cual, involucra la absorción de agua en el tallo, follaje y tronco. A las mallas de uso del suelo se les asignaron valores de fracción cubierta por follaje

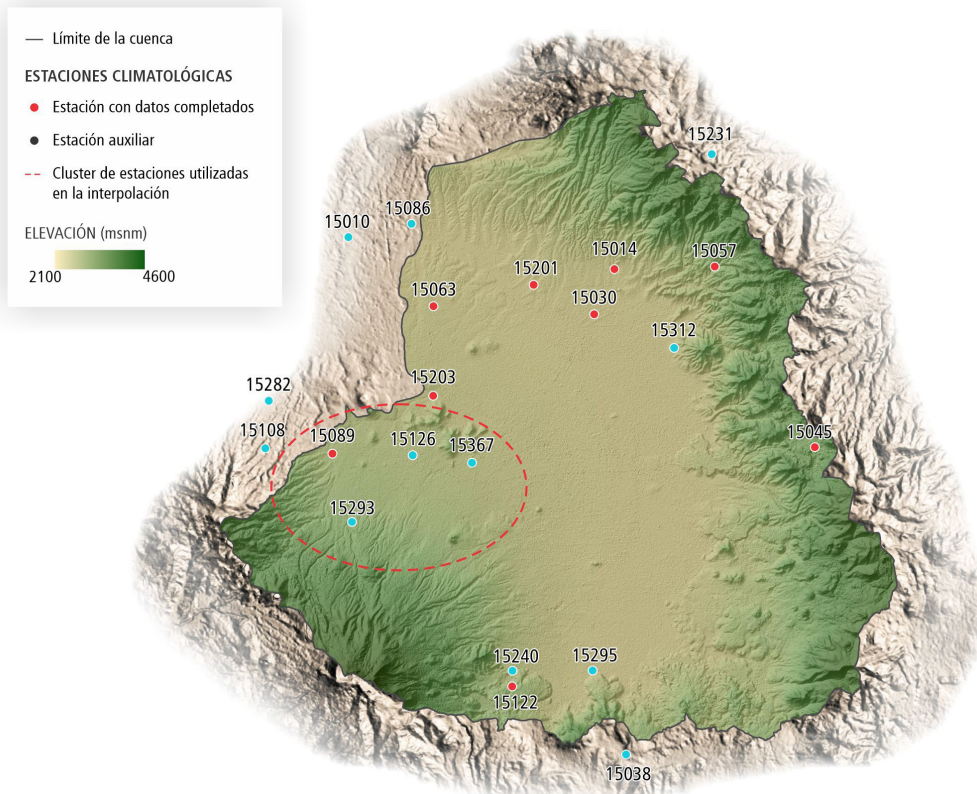


Figura 4 Ubicación de las estaciones climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional utilizadas en la comparación con los datos DAYMET de precipitación y temperatura.

Tabla 2. Estaciones climatológicas del Servicio Meteorológico Mexicano utilizadas en el análisis de precipitación y temperatura.

Clave	Nombre	Coordenada UTM X	Coordenada UTM Y
15010	Atotonilco	418552.2	2152131.8
15014	Capulhuac	443082.5	2149695.5
15030	Hacienda la Y	441290.9	2145736.0
15038	Joquicingo	444731.0	2106596.2
15045	La Marquesa	460835.5	2133910.8
15057	Mimiapan	451976.6	2149915.6
15063	Nueva Santa Elena	427060.6	2146464.0
15086	San Bernabé	425311.3	2153664.1
15089	San Francisco Tlalcalcalpan	418105.8	2133345.8
15108	Santa María del Monte	413326.4	2134892.6
15122	Tenango	434055.4	2112778.8
15126	Toluca (OBS)	425226.9	2133192.2
15201	Trojes	435962.6	2148305.3
15203	Calixtlahuaca	427028.5	2138472.0
15231	Presa Iturbide	452002.1	2159475.1
15240	San Francisco Putla	434060.1	2114100.5
15282	Tres Barrancas	416181.0	2138752.4
15293	San Juan de las Huertas	419859.6	2127282.3
15295	San Pedro Zictepec	441189.1	2114107.1
15312	Colonia Álvaro Obregón	448398.7	2142702.0
15367	Observatorio UAEM	430565.5	2132525.5

y relación evaporación-precipitación (Tabla 3), de acuerdo con Westenbroek *et al.*, (2018) y Salvador *et al.*, (2021). Los datos de captación en el tallo, follaje y tronco, que se especifican en la tabla de búsqueda (Tabla 4), se recopilaron de estudios realizados en bosques del estado de México (Bolaños *et al.*, 2021), cultivos de maíz (Nazari *et al.*, 2020) y pastizales (Couturier y Ripley, 1973).

3.4. CÁLCULO DEL ESCURRIMIENTO

El escurrimiento se estimó con el método del Número de Curva (CN), que relaciona la lluvia ante-

cedente, el tipo de suelo, el uso del suelo, la cobertura vegetal y la capacidad de infiltración del suelo. El Número de Curva puede variar entre 0-100, de acuerdo con el grupo hidrológico de suelo. A este respecto, los datos edafológicos (escala 1:250 000), publicados por el INEGI (2017), se categorizaron en grupos hidrológicos del suelo de acuerdo con el Soil Conservation Service (USDA, 2009). Para esta clasificación fueron consideradas las texturas y el contenido de finos registrados en la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (IUSS, 2015), para cada tipo de suelo.

Tabla 3. Valores de la fracción cubierta por follaje y relación precipitación- evaporación asignados a los datos matriciales de uso del suelo para el método de Gash.

Uso del suelo	Fracción cubierta por follaje	Relación precipitación- evaporación
Cultivo	0.84	0.03
Bosque	0.87	0.03
Pastizal	0.86	0.06
Matorral	0.82	0.03
Humedal	0.48	0.08
Cuerpo de agua	0.38	0.50
Superficie artificial	0.66	0.26
Tierra desnuda	0.10	0.50

Los grupos hidrológicos de suelo identificados comprenden del B al D, siendo el grupo B el predominante (62.66%) en la planicie del valle, representando un menor potencial de escurrimiento y una mayor tasa de infiltración. Por su parte, el grupo C (37.10%) corresponde a las áreas de basaltos y andesitas fracturadas. Finalmente, el grupo D (0.24%) se identificó en el alto del volcán Nevado de Toluca, y representa la zona con el mayor potencial de escurrimiento (Figura 5a). La selección del Número de Curva para las combinaciones de uso de suelo y grupo hidrológico (Tabla 4) retoma los valores propuestos para México, con base en las condiciones hidrológicas de la cuenca Lerma-Santiago (Hernández, 2014).

3.5. ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN BASADA EN LA HUMEDAD DEL SUELO

La evapotranspiración real (ET_p) se contempla como una función lineal de la evapotranspiración potencial (ET_p), y que, a su vez, depende la humedad diaria del suelo. La ET_p se calculó con el método de Hargreaves-Samani (Ecuación 8), debido a la validación global que posee en zonas con poca

información climatológica (Hargreaves y Samani, 1985; Allen *et al.*, 1998).

$$ET_p = 0.0023(T_{med} + 17.8)R_a\sqrt{T_{max} - T_{min}}, \tag{8}$$

donde, ET_p es el valor de referencia de la evapotranspiración ($mm/día$), T_{med} , T_{max} , T_{min} son las temperaturas diarias media, máxima y mínima correspondiente ($°C$) y R_a es la radiación solar incidente en un punto determinado de la atmósfera ($mm/día$). Los valores de radiación solar parten de estimaciones estándar que consideran la posición de la Tierra en relación con el Sol y la posición de la celda en correspondencia con la tierra. En tal sentido, se consideró la tabla de radiación solar propuesta por Allen *et al.*, (1998), con base en la latitud de cada celda y el día calendario de simulación. Por su parte, la ET_r (Ecuación 9) es igual a la diferencia de la humedad provisional (Ecuación 10) del suelo y la humedad del día de estudio (Ecuación 11),

$$ET_r = \theta_p - \theta_t, \tag{9}$$

$$\theta_p = \theta_{t-1} + P - I - E, \tag{10}$$

$$\theta_t = \theta_p \cdot e^{\left(\frac{ET_p}{\theta_r}\right)}, \tag{11}$$

donde θ_{t-1} es la humedad del día anterior (*in*), θ_p es la humedad provisional (*in*), θ_t es la humedad del día de estudio (*in*), y θ_r es la humedad de la zona radicular (Ecuación 2). De esta manera, se elaboró un ráster de capacidad de agua disponible (*CAD*) con base en el grid edafológico del INEGI y los valores de retención de agua propuestos por Thornthwaite y Mather (1957), (Figura 5b). El intervalo de datos oscila entre 10 – 28.3 cm/m, asignándose los mayores valores para la planicie de la cuenca y la zona de la Laguna de Almoloya.

3.6. PROBABLES ESCENARIOS FUTUROS DE CLIMA Y USO DE SUELO

3.6.1. Proyecciones de precipitación y temperatura

En mayor medida, la recarga se asocia con procesos hidrológicos superficiales como la precipi-

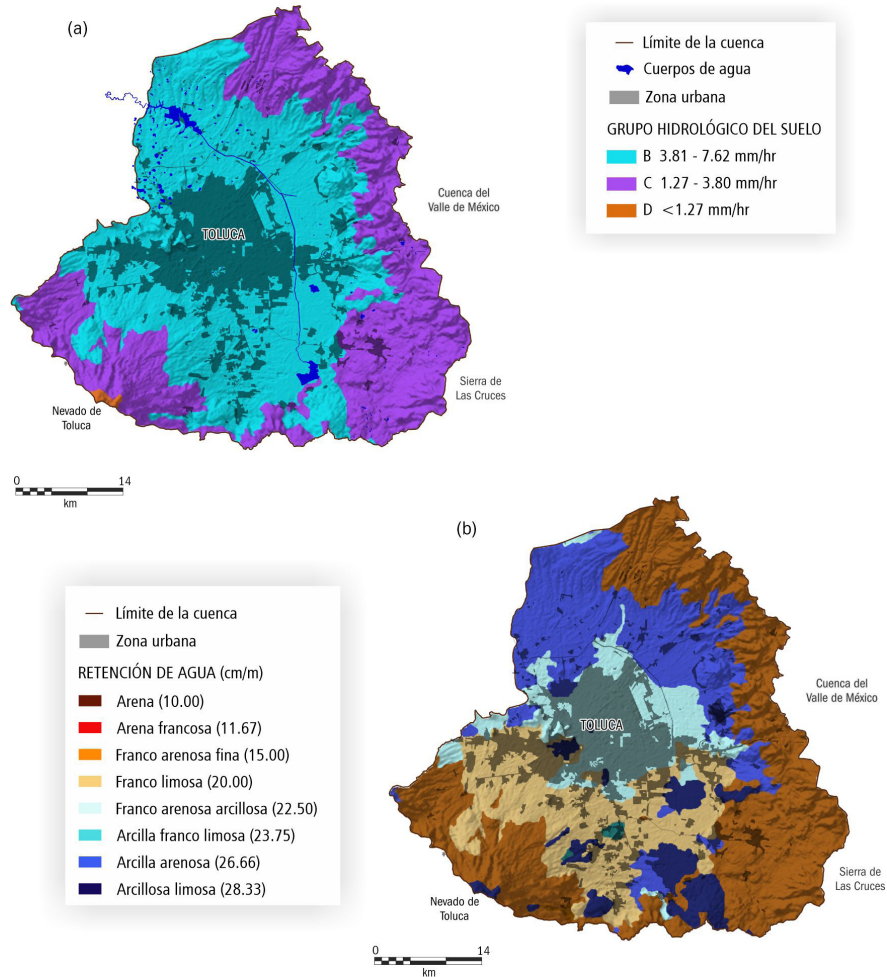


Figura 5 Datos de entrada al modelo de recarga SWB2: a) Delimitación de los grupos hidrológicos de suelos y tasas de infiltración, a partir de los datos edafológicos del INEGI (2014) y los parámetros propuestos por la USDA (2009), b) Distribución de la capacidad de retención de agua del suelo, basado en las texturas de suelo propuestas por el INEGI (2014).

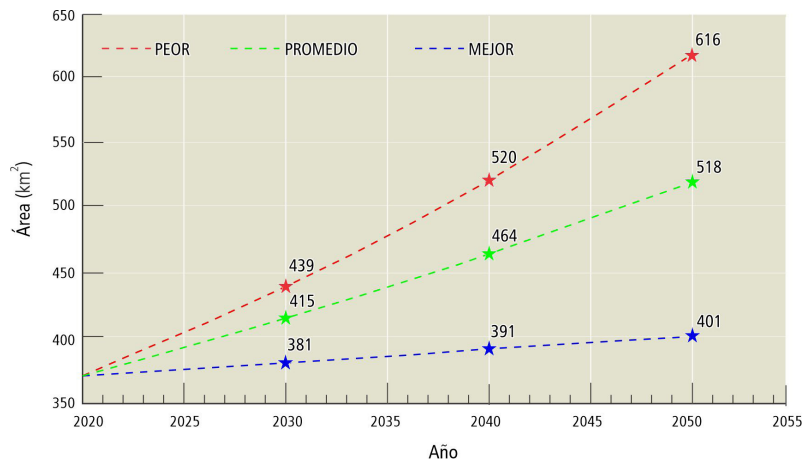


Figura 6 Proyecciones de la extensión de la mancha urbana del Valle de Toluca en Km² para los años 2030, 2040 y 2050, con base en las tasas de crecimiento de la población en el Valle de Toluca propuestas por Mendoza et al., (2019).

Tabla 4. Tabla de búsqueda utilizada en el modelo SWB2 para relacionar los parámetros de escorrentía, intercepción y recarga máxima en cada celda.

Uso del suelo	Número de Curva				Recarga máxima (cm)				Intercepción (cm)			Profundidad de raíz (cm)			
	A	B	C	D	A	B	C	D	Follaje	Tronco	F/T	A	B	C	D
Cultivo	69	78	84	87	10.1	1.0	0.5	0.2	0.07	0.01	0.30	99.9	64.0	58.8	57.60
Bosque	36	60	73	79	6.0	8.8	6.8	2.5	0.07	0.01	0.05	158.4	142.9	135.3	142.9
Pastizal	49	69	79	84	4.0	1.0	0.5	0.2	0.10	0	0	68.2	85.3	68.2	45.4
Matorral	68	79	86	89	5.4	3.8	1.2	0.5	0.07	0.01	0.05	74.6	85.3	74.6	49.6
Humedal	98	98	98	98	4.7	2.2	1.0	1.0	0	0	0	39.6	43.8	39.6	34.7
Cuerpo de agua	98	98	98	98	4.5	5.7	2.2	1.7	0	0	0	2.4	2.4	2.4	2.4
Superficie artificial	81	88	91	93	4.0	2.2	0.5	1.0	0	0	0	93.8	116.7	74.6	46.6
Tierra desnuda	77	86	91	94	4.0	0.6	0.2	0.1	0	0	0	1.00	1.00	1.00	1.00

*F/T: Fracción absorbida por el tallo

tación y la temperatura, que están estrechamente ligados al cambio climático. Tradicionalmente, en proyecciones de la recarga se utilizan modelos climáticos globales y regionales; sin embargo, la resolución de tales modelos a escala de cuenca añade incertidumbre a las estimaciones. Con el objetivo de disminuir esta incertidumbre, en este estudio se adopta lo propuesto por Jyrkama y Sykes (2007), donde las series de precipitación y temperatura históricas se modifican con base en predicciones. Se utilizaron las predicciones del Proyecto de Inter comparación de Modelos Acoplados Fase 6, CMIP6, que constituye la base del IPCC, 2021. Los valores fueron tomados del Atlas Interactivo (Gutiérrez *et al.*, 2021) disponible en <http://interactive-atlas.ipcc.ch>.

De acuerdo con el IPCC (2021), en México para el año 2100 es posible que se presenten las siguientes condiciones:

1. Disminución en la precipitación que varía entre 3.8% y 10.8%
2. Incremento en la temperatura media en el rango de 1.4 a 3.6°C

Las series climatológicas del periodo de 1990 a

2021 se modificaron siguiendo los escenarios planteados en la Tabla 5. De este modo, se asumió que el valor de las variables incrementa linealmente cada año, al multiplicar los datos diarios de precipitación, T_{min} , T_{med} y T_{max} por la fracción de factor correspondiente. En este contexto, la proyección de la recarga se extendió hasta el año 2050.

3.6.2. Proyecciones de crecimiento urbano

La expansión de la mancha urbana se analizó como una relación población - extensión de la mancha urbana (Ecuación 12) mediante la ecuación de Marshall (2007).

$$\frac{A_2}{A_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^n, \tag{12}$$

donde, A_1 y A_2 son las áreas de mancha urbana en los tiempos 1 y 2 respectivamente, P_1 y P_2 corresponden al tamaño de la población en los tiempos 1 y 2, n es el coeficiente de elasticidad población-área, que representa el área que ocuparán los nuevos residentes en comparación con los existentes. La determinación del valor n se derivó de los valores históricos de población registrados en el

Tabla 5. Combinación de escenarios planteados para la estimación de la recarga potencial futura, de acuerdo con las proyecciones de cambio climático para el 2100 (IPCC, 2021) y las tasas de crecimiento poblacional definidas por Mendoza et al., (2019).

Escenario	Descripción	Incremento anual de la precipitación	Incremento anual de la temperatura	Crecimiento poblacional anual
1.- Caso base	Datos históricos diarios de precipitación y temperatura en el periodo de 1992-2020	No aplica	No aplica	No aplica
2.- Mejor caso	Precipitación disminuye -3.8%, temperatura media aumenta +1.4°C	-0.047%	+0.017°C	+0.14%
3.- Caso moderado	Precipitación disminuye -7.2%, temperatura media aumenta +2.8°C	-0.090%	+0.035°C	+0.60%
4.- Peor caso	Precipitación disminuye -10.8%, temperatura media aumenta +3.6°C	-0.135%	+0.045°C	+0.91%

estudio de Delimitación de las Zonas Metropolitanas de México (SEDATU *et al.*, 2018) y las tasas de crecimiento promedio total proyectadas por Mendoza *et al.*, (2019) durante el periodo de 2020 al 2050. La población presentaría un aumento de 0.14%, 0.60% y 0.91% en el mejor, moderado y peor caso (Tabla 5), lo cual deriva en un crecimiento del área urbana de 8%, 40% y 66% (Figura 6). Con base en el ráster de uso del suelo del año 2020, se incrementó la extensión de la urbe mediante Sistemas de Información Geográfica. Lo anterior implica que las matrices de fracción cubierta por follaje y relación evaporación-precipitación, en particular, sean modificados de acuerdo con el uso del suelo en cada escenario futuro.

3.7. ARCHIVOS DE CONTROL

En el archivo de control (Datos suplementarios) se especifican la ubicación de los archivos de entrada/salida, los métodos de cálculo de cada variable y el enlace con la tabla de búsqueda. Con el objetivo de disminuir la carga computacional, el periodo total de análisis se dividió en ocho subperiodos, iniciando la simulación en 1980 para establecer las condiciones iniciales de humedad en el suelo. De tal manera, los subperiodos son: 1982-1984, 1985-1994, 1995-2004, 2005-2012, 2013-2020, 2021-

2030, 2031-2040 y 2041-2050, cada uno con su respectivo archivo de control. Como resultado de cada simulación se tiene un ráster de humedad del suelo, el cual se establece como condición inicial en el periodo siguiente.

Las unidades válidas en el SWB2 corresponden al sistema inglés, por consiguiente, se aplicó un factor de conversión a las entradas para obtener unidades en el Sistema Internacional. Como referencia, el cálculo de un periodo de 10 años tomó aproximadamente 90 minutos utilizando un equipo portátil con procesador AMD Ryzen 7 4800H con 2.90 GHz y 16.0 GB de RAM. Los resultados del modelo SWB2 en formato NetCDF fueron procesados para su análisis anual en el módulo Xarray del entorno PyCharm (JetBrains, 2021).

4. Resultados y discusión

4.1. COMPARACIÓN CLIMATOLÓGICA

La relación promedio de datos SMN/Daymet en las estaciones de estudio es de 0.95, con máximos y mínimos que oscilan entre 2.35 y 0.30 (Figura 7a). En general, las estaciones localizadas en los altos montañosos exhiben las menores relaciones, donde destaca la estación con clave 15122 con una relación promedio de 0.82. Los extremos ne-

gativos podrían atribuirse a los periodos de tiempo con lecturas nulas, ya que, a pesar del proceso de relleno de series, existen subperiodos donde no se registran datos en las estaciones del clúster. De hecho, esto es significativo particularmente en el análisis de la precipitación, ya que se realizó la comparativa SMN/Daymet con las sumatorias anuales, lo que podría derivar en una subestimación de la precipitación en los registros del SMN y un valor atípico SMN/Daymet. Cabe destacar la tendencia positiva en las relaciones posteriores al año 2012, que refleja una subestimación de la precipitación en la base de datos Daymet. A este respecto, los grids de precipitación del periodo 2013-2020 se incrementaron en un factor de 1.32.

En el análisis de la temperatura media, se compararon los valores promedio mensuales del regis-

tro SMN y la base Daymet, en cada estación de estudio (Figura 7b). Similar a la tendencia encontrada en el análisis de la precipitación, las estaciones aledañas a las serranías (15045, 15057, 15089 y 15122) presentan los diferenciales más importantes y mayores valores atípicos. Esto podría indicar una desigualdad en las estimaciones del SMN y Daymet, proporcional a la altura de la estación de estudio. No obstante, la evaluación mensual denota una diferencia media de 0.84°C entre los registros del SMN y los grids de Daymet que, para fines prácticos, resulta poco significativa para justificar un coeficiente de incremento en la temperatura. A este respecto, los valores de temperatura máxima y mínima de DAYMET se utilizaron en el balance hídrico sin tratamiento previo.

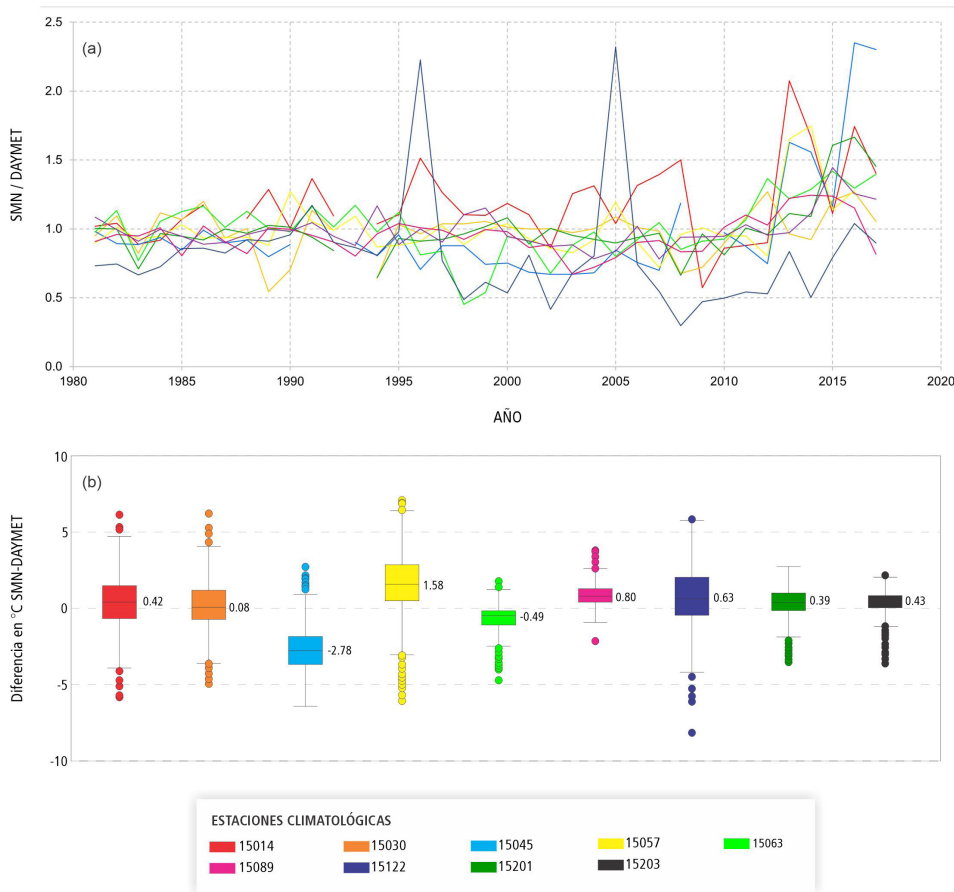


Figura 7 Comparación de las variables climatológicas obtenidas del análisis diario en las estaciones del SMN y las reportadas en los datos matriciales Daymet durante el periodo de 1981 a 2017. a) Relación de la precipitación anual, b) Diagrama de caja y bigotes construido a partir de las diferencias de la temperatura media mensual. La simbología es válida para las figuras 7a y 7b.

4.2. RECARGA POTENCIAL HISTÓRICA

Las simulaciones del balance hídrico durante 1980 a 2021 resultan en láminas de recarga que varían espacialmente a razón del uso del suelo, tipo de suelo, así como tasas de precipitación. El volumen promedio anual de recarga potencial en la cuenca ronda los 369.5 Mm³ con una tasa de infiltración de 174.5 mm/año. A primera vista, las componentes anuales del balance hidrológico siguen el comportamiento de la precipitación, como sucede en cuencas con recarga mayormente controlada por la topografía (Sanford, 2002). No obstante, aunque la principal recarga del sistema acuífero de Toluca proviene de la captación de agua en las serranías fracturadas, la recarga vertical en el

Valle fluctúa bajo efectos derivados del cambio de uso del suelo.

Referente a las variables climatológicas, las tasas de precipitación oscilan entre 1,353 mm/año y 756 mm/año con ciclos secos en los intervalos 1982-1992 y 2012-2020, así como ciclos húmedos en 1993-2011, siendo el año 2005 anormalmente seco (Figura 8). Destaca el descenso de la precipitación posterior a 2012, a pesar del factor de incremento aplicado a las mallas de precipitación. En el caso de la temperatura, se observa un alza en las temperaturas máxima y mínima a partir del año 2012, que explica el incremento en la ET_p (Figura 8). Por el contrario, la ET_r exhibe una tendencia negativa posterior al 2012 a medida que la precipitación se reduce.

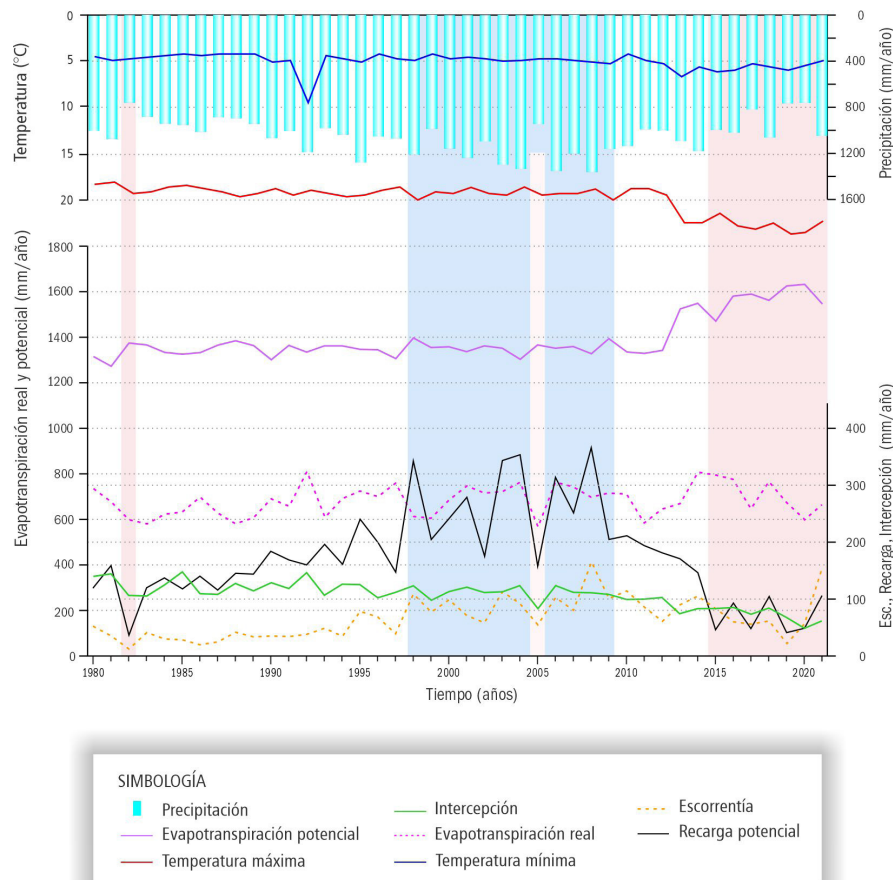


Figura 8 Tasas promedio anuales de las componentes del balance hídrico obtenidas en el modelo SWB2 durante 1980-2021. Las áreas ensombrecidas en azul y rojo denotan el aumento/decremento en la recarga respectivamente.

De la evolución del uso del suelo, se observa un crecimiento de la mancha urbana de 0.4% en 1980 a 17.5% en 2020, que limitó las zonas de cultivo y pastizal, reduciéndolas de 17.7% a 8.1% (Tabla 1). Dentro de los efectos asociados, el incremento en la escorrentía de ~200% durante 1995-2012, se atribuye a la impermeabilización parcial o total del suelo, posterior a tal periodo, la disminución de la variable corresponde también a la baja precipitación. La intercepción, del mismo modo, expone una ligera disminución hasta el 2020, que concuerda con la gradual reducción de los usos del suelo con parámetros de intercepción asignados en el método Gash (Gash *et al.*, 1995). Esta combinación de cambios ejerce, igualmente, un potente efecto en la ET_p , ya que, al incrementarse la escorrentía e intercepción, la θ_p tendería a disminuir.

En cuanto a la distribución espacial de la recarga potencial, la variación en las zonas montañosas estaría más estrechamente relacionada a factores climatológicos, mientras que, en áreas del valle, los cambios del uso del suelo ejercen mayor influencia. En cada análisis, destaca la baja recarga en celdas asignadas a usos artificiales, muy a pesar del 85% de impermeabilidad asignado a tales celdas (Figura 9). Finalmente, el tipo de suelo, la textura, y la capacidad de retención de agua intervienen en la distribución de la recarga, siendo las porciones de arcilla limosa en el centro del Valle una limitante en la infiltración.

4.3. PROYECCIÓN DE LA RECARGA POTENCIAL

Los resultados de las proyecciones de recarga se presentan como porcentajes de cambio con respecto a la serie promedio histórica de 1980 al 2021 (Figura 10). Los cambios en las precipitaciones corresponden a los derivados de las predicciones del IPCC, que oscilan entre -3.80% en el mejor caso y -10.80% en el peor escenario (Figura 10 a-d). Similar al análisis de la recarga histórica, estos valores condicionan directamente el desarrollo de los demás parámetros hidrológicos. En los tres escenarios, la evapotranspiración real disminuye en las serranías a causa de la disminución en la

precipitación; sin embargo, la zona del valle presenta un cambio positivo atribuido al incremento en las temperaturas (Figura 10 e-10h). Análogo al comportamiento histórico, el escurrimiento se intensifica en las celdas cuyo uso del suelo fue modificado a superficie urbana, en estos pixeles el cambio llega a superar el 100 % (Figura 10 i-10l). Finalmente, la recarga expone cambios negativos en todos los casos, en menor o mayor medida, de acuerdo con el escenario de análisis. El porcentaje de cambio promedio con respecto a la serie 1992-2021 es de -16.59%, -19.99% y -22.61% para el mejor, promedio y peor escenario respectivamente (Figura 10 m-10p).

4.4. COMPARACIÓN CON ESTUDIOS PREVIOS

A partir de este estudio se obtienen resultados que se sitúan en los intervalos de recarga obtenidos en trabajos previos en el Valle de Toluca, con diferencias, principalmente, asociadas a la discretización espacial/temporal y los métodos de cálculo (Tabla 6). En comparación con el trabajo realizado por Calderhead *et al.*, (2012b), los volúmenes de recarga difieren, sobre todo, por la distribución de datos climatológicos y el periodo de tiempo utilizado en ambos estudios. A este respecto, los años con los extremos de precipitación obtenidos en la presente investigación no se sitúan dentro del análisis efectuado por Calderhead *et al.*, (2012b), lo que supone un factor preponderante en la diferencia en los valores de la recarga. En la proyección de la recarga, los cambios se relacionan con los factores de incremento/decremento utilizados en los posibles escenarios futuros.

Haciendo alusión al trabajo de Pacheco (2012), la recarga para los años 1985, 1996 y 2009 es de 302.1 Mm³, 258.3 Mm³ y 335.1 Mm³, en tanto que, con el modelo SWB2 los valores obtenidos son de 251.3 Mm³, 421.3 Mm³ y 419.4 Mm³, para los mismos años de estudio. Las diferencias se relacionan con los pasos de tiempo en el balance hídrico, ya que el empleo de escalas mensuales puede subestimar hasta un 25% la recarga frente a escalas diarias (Rushton y Ward, 1979). En este contexto, el año 1985 corresponde a un periodo

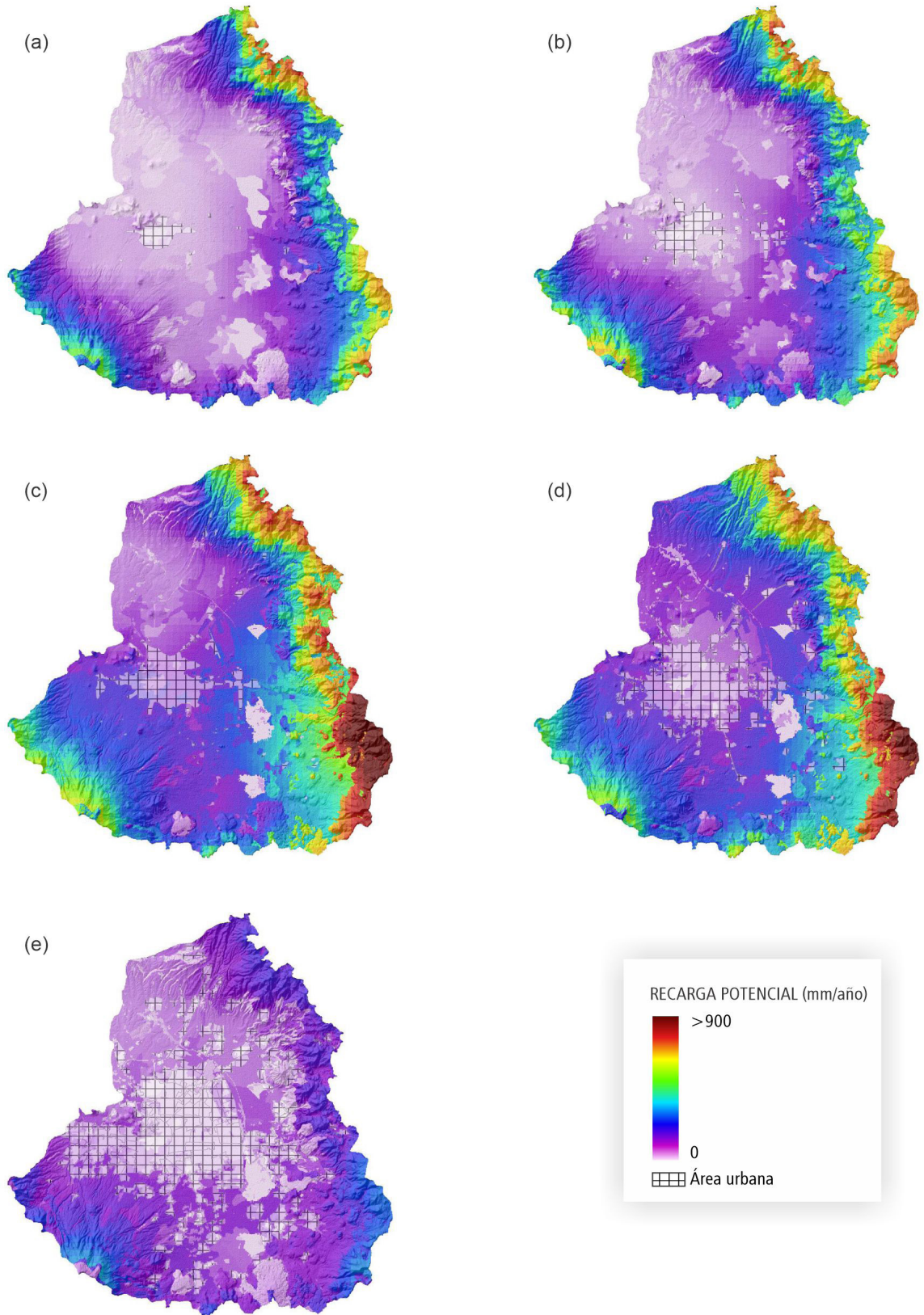


Figura 9 Distribución espacial de la recarga potencial obtenida del modelo de recarga SWB2. Se muestran los volúmenes y tasas promedio anuales para los periodos a) 1980-1984; b) 1985-1994; c) 1995-2004; d) 2005-2012; e) 2013-2021.

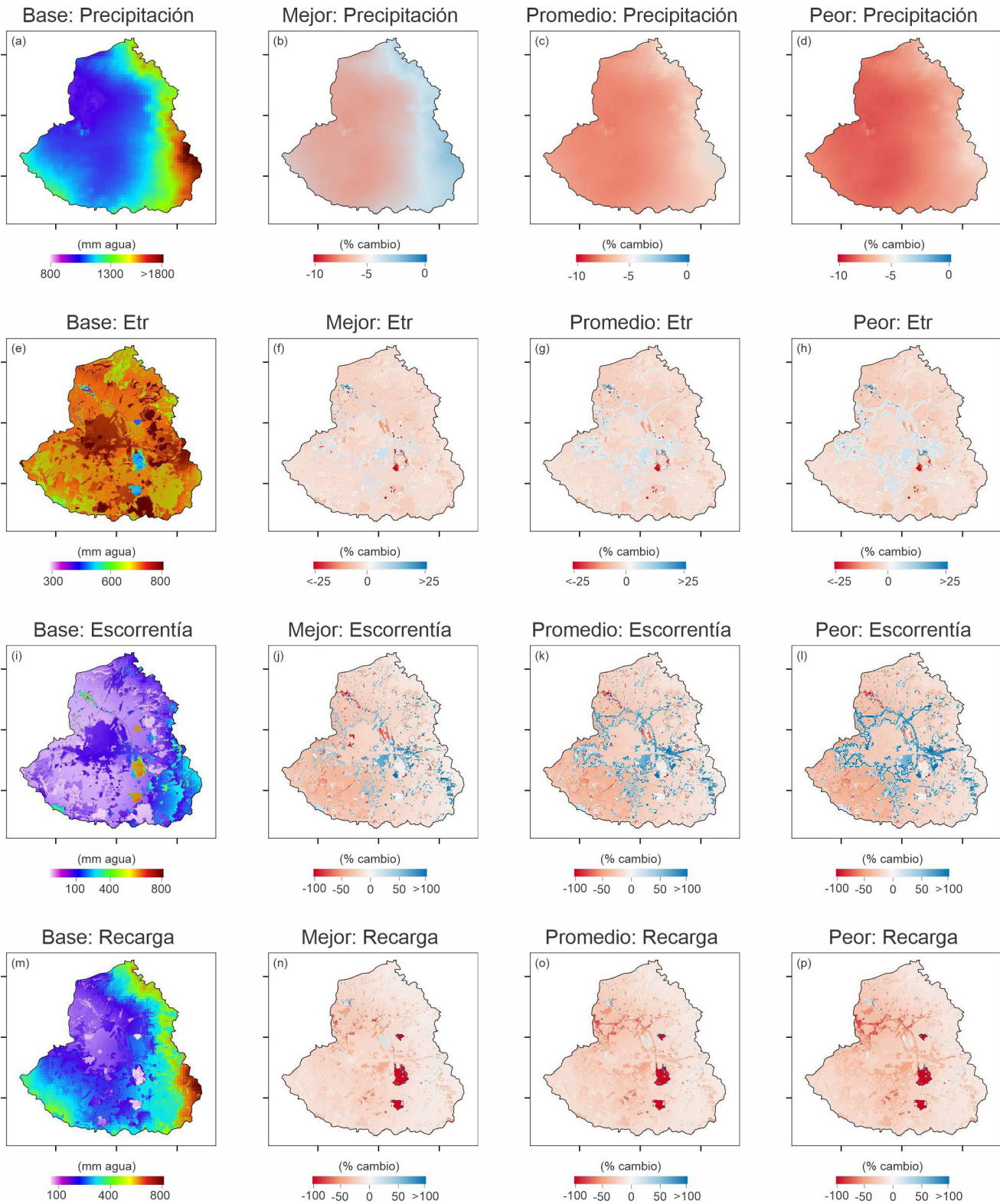


Figura 10 Distribución espacial de variables del balance hidrológico para escenarios futuros. Las estimaciones de recarga histórica corresponden al promedio anual de 1980-2021 (a), (e), (i), (m), mientras que las proyecciones de recarga para 2022-2050 se muestran como porcentajes de cambio con respecto al promedio histórico para el peor escenario (b), (f), (j), (n), el escenario promedio (c), (g), (k), (o), y el peor escenario (d), (h), (l), (p).

Tabla 6. Comparación de los volúmenes de recarga estimados en este estudio y los desarrollados en estudios previos en la cuenca del Valle de Toluca.

Autor	Periodo	Frecuencia	Código	Método	Recarga (Mm ³ /año)
Ortiz <i>et al.</i> , 2010	1993 - 2008	Mensual	N/E	Balance hídrico	318.0
Calderhead <i>et al.</i> , 2012b	1969 - 2000	Diaria	HELP 3	Balance hídrico	376.2
	2000 - 2050				Mejor: 367.4 Moderado: 361.0 Peor: 288.0
Pacheco, 2012	1985	Anual	SIG	Balance hídrico	1985: 302.1
	1996				1996: 258.3
	2009				2009: 335.1
Salas, 2012	2002-2010	Mensual	SIG	Balance hídrico	218.03
Sánchez, 2019	1984-1996	Mensual	Terrset ArcGIS	Balance hídrico	564.0
	2010-2015				614.0
Este estudio, 2022	1980-2021	Diaria	SWB2	Balance hídrico	369.5
	2022-2050				Mejor: 352.8 Moderado: 342.3 Peor: 333.9

de bajas precipitaciones, limitando la humedad diaria del suelo y el agua disponible para percolación. En las predicciones de recarga para los años 2015 y 2020 se aplicaron tasas de precipitación y evapotranspiración constantes (Pacheco, 2012), no obstante, en este estudio se utilizan los registros de precipitación históricos que muestran descensos pluviométricos para tales años, derivando en una diferencia en más del 200% en la recarga.

Las tasas de recarga más altas para el Valle de Toluca se presentan en el estudio de Sánchez (2019), contrariamente a lo esperado en balances hídricos mensuales, tal como se argumenta en los estudios de Pacheco (2012) y Salas (2012). Con áreas de estudio de 2,738 km² (Sánchez, 2019) y 2,100 km² en este estudio, la extensión en el polígono utilizado supondría la discrepancia en los volúmenes de recarga.

En análisis previos se señala la recarga como un porcentaje de la precipitación, que oscila entre 30% y 40% para la Sierra de las Cruces (Ortega y

Farvolden, 1989). Sin embargo, en este estudio se ha encontrado una relación de hasta el 50% durante las épocas húmedas, atribuido al método de balance que considera la humedad del día anterior, lo cual conlleva un aumento de la conductividad hidráulica del suelo en los periodos húmedos.

4.5. LIMITANTES DEL MODELO Y RECOMENDACIONES

El modelo SWB2 no contempla el tránsito del agua en la zona no saturada hasta el nivel freático, lo cual se manifiesta en diferencias entre la recarga potencial obtenida y la recarga real (Dripps y Bradbury, 2007; Anderson *et al.*, 2015). Por otro lado, la aplicación de un esquema de calibración basado en la separación del flujo base de hidrogramas (Smith y Westenbroek, 2015; Bradbury *et al.*, 2017) resulta inviable para el Valle de Toluca debido a la poca interacción hidrológica entre el río Lerma y el sistema acuífero. Otros estudios, recomiendan igualar la evapotranspiración y la

escorrentía, considerando que la mayor parte de la escorrentía sea evaporada a efectos del clima semiárido-templado (Calderhead, 2009). Las tasas de evapotranspiración obtenidas son significativamente altas en comparación con las tasas de escorrentía, de manera que la calibración a partir de dichos parámetros resulta descartada.

La validez de los resultados de modelos de balance hídrico es proporcional a la calidad de los datos de entrada, siendo preferible el uso de datos obtenidos de métodos directos en el área de estudio. A este respecto, se recomienda la medición puntual de la retención de agua en las zonas arcillosas y arena arcillosas, puesto que, los altos valores de porosidad registrados pueden sugerir una mayor retención de agua de la utilizada en este trabajo. Del mismo modo, conviene perfeccionar las proyecciones de cambio de uso del suelo, al incluir modificaciones a cada uso de suelo además del artificial, mediante modelos que incluyan la estructura urbana, el clima y la topografía.

5. Conclusiones

Este estudio examina las componentes de un balance hídrico diario en el Valle de Toluca para la estimación de la recarga potencial en un contexto espacial y temporal. A partir del modelo SWB2 se analizaron los volúmenes y tasas de recarga desde 1980, al igual que una proyección futura al año 2050. El volumen promedio histórico de recarga obtenido es de 369.5 Mm³, el cual se ubica en el rango promedio reportado en estudios previos.

La gran heterogeneidad de las tasas de recarga se apoya, en primera instancia, en la variabilidad pluviométrica, así como, en la modificación del uso del suelo. A este respecto, en las zonas montañosas, los factores climatológicos ejercen un mayor dominio, ya que es donde ocurre la mayor captación de agua. El gradual incremento en la temperatura media se refleja en la evapotranspiración potencial, mientras que, la precipitación está más estrechamente relacionada con la evapotranspiración real. Por su parte, el área de la planicie presenta modificaciones al uso del suelo, mayor-

mente relacionadas con la impermeabilización del suelo, como consecuencia del crecimiento urbano. El crecimiento de la mancha urbana tiene una relación directa con la reducción de cultivos y pastizales, lo que ha conllevado a una menor intercepción, evapotranspiración real y un incremento en la escorrentía de hasta 200%.

Los escenarios planteados para la proyección de la recarga potencial combinan una disminución general en la precipitación y un incremento en la superficie urbana, de acuerdo con predicciones de cambio climático y crecimiento demográfico para el centro de México. Los resultados advierten un descenso en la recarga de 16.59%, 19.99% y 22.61% para el mejor, moderado y peor caso respectivamente. El factor preponderante de cambio corresponde al crecimiento urbano, plasmado mayormente en los valores de escorrentía de las áreas de reciente impermeabilización.

El aumento en la demanda de agua subterránea denota la importancia de aplicar métodos detallados que, de modo específico, profundicen en la dinámica de reabastecimiento del sistema acuifero, con énfasis en la distribución espacial y temporal de la recarga. En este sentido, la aplicación de valores generalizados de recarga a nivel regional resulta inexacto, ya que, por lo general, no se logra describir todos los procesos involucrados en la estimación de la recarga. Por su parte, la proyección de la recarga constituye una herramienta útil y, de hecho, de mucho apoyo en la planeación del ordenamiento de la población y planeación sustentable de la extracción de agua.

Contribuciones de los autores

Conceptualización, análisis de datos y redacción del manuscrito original: CRC. Desarrollo técnico, análisis de datos, revisión del borrador original: JG. Revisión del borrador original: RM. Revisión del borrador original: IN.

Financiamiento

Este estudio fue realizado con fondos del CONACYT a través del otorgamiento de una beca doctoral.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Autónoma del Estado de México por el soporte brindado para esta investigación.

Conflictos de interés

Los autores declaran la inexistencia de conflictos de interés.

Referencias

- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., Smith, M., 1998, Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements: Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, 174 p.
- Anderson, M., Woessner, W., Hunt, R., 2015, Applied groundwater modeling simulation of flow and advective transport, 2nd: Netherlands, Elsevier, 533 p. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-21563-7>
- Birkle, P., Torres, V., González, E., 1998, The water balance for the Basin of the Valley of Mexico and implications for future water consumption: *Hydrogeology Journal*, 6, 500-517. <http://dx.doi.org/10.1007/s100400050171>
- Bolaños, C., Prado, J., Silván, J., Vázquez, M., Madrigal, J., Martínez, A., 2021, Estimating rainfall interception of *pinus hartwegii* and *abies religiosa* using analytical models and point cloud: *Forests*, 12, 866. <https://doi.org/10.3390/f12070866>
- Bradbury, K., Fienen, M., Kniffin, M., Krause, J., Westenbroek, S., Leaf, A., Barlow, P., 2017, Groundwater flow model for the Little Plover River basin in Wisconsin's Central Sands: Wisconsin Geological and Natural History Survey Bulletin 111, 82 p.
- Calderhead, A., 2009, Pumping effects on land subsidence: assessment using field data, remote sensing and numerical modeling: Canada, Université du Québec, PhD. Thesis
- Calderhead, A., Martel, R., Garfias, J., Rivera, A., Therrien, R., 2010a, Pumping effects on land subsidence in the Toluca Valley, Mexico: Land Subsidence, Associated Hazards and the Role of Natural Resources Development, in Proceedings of EISOLS 2010: Querétaro, Mexico, IAHS Publ, 339.
- Calderhead, A., Martel, R., Alasset, P., Rivera, A., Garfias, J., 2010b, Land subsidence induced by groundwater pumping, monitored by D-InSAR and field data in the Toluca Valley, Mexico: *Canadian Journal of Remote Sensing*, 36 (1), 9-23. <http://dx.doi.org/10.5589/m10-024>
- Calderhead, A., Martel, R., Garfias, J., Rivera, A., Therrien, R., 2012b, Pumping dry: and increasing groundwater budget deficit induced by urbanization, industrialization, and climate change in an over-exploited volcanic aquifer: *Environmental Earth Sciences*, 66, 1753-1767. <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-011-1398-9>
- Castellazzi, P., Garfias, J., Martel, R., Brouard, C., Rivera, A., 2017, InSAR to support sustainable urbanization over compacting aquifers: The case of Toluca Valley, Mexico: *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 63, 33-44. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2017.06.011>
- Cervantes, A., Armienta, M., 2004, Influence of faulting on groundwater quality in Valle del Mezquital, Mexico: *Geofísica Internacional*, 43 (3), 477-493. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2004.43.3.960>
- Chen, J., Ban, Y., Li, S., 2014, China: Open access to Earth land-cover map: *Nature*, 514, 7523, 434-434. <http://dx.doi.org/10.1038/514434c>
- Comisión Nacional del Agua, 2015, Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Valle de Toluca (1501): Estado de México. Gerencia de aguas subterráneas,

- Subgerencia de evaluación y ordenamiento de acuíferos, 37 p.
- Couturier, D., Ripley, E., 1973, Rainfall interception in mixed grass prairie: Canadian Journal of Plant Science, 53(3), 659-663. <http://dx.doi.org/10.4141/cjps73-130>
- Dripps, W., 2003 The spatial and temporal variability of groundwater recharge within the Trout Lake basin of Northern Wisconsin: USA, University of Wisconsin – Madison, PhD. Thesis.
- Esteller, M., Andreu, J., 2005, Anthropogenic effects on hydrochemical characteristics of the Valle de Toluca aquifer (central Mexico): Hydrogeology Journal, 13, 378-390. <http://dx.doi.org/10.1007/s10040-004-0395-4>
- Ferrari, L., Conticelli, S., Vaggelli, G., Petrone, C., Manetti, P., 2000, Late Miocene volcanism and intra-arc tectonics during the early development of the Trans-Mexican Volcanic Belt: Tectonophysics, 318, 161-185. [http://dx.doi.org/10.1016/S0040-1951\(99\)00310-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0040-1951(99)00310-8)
- García, A., Macías, J., Garduño, V., 2000, Miocene to recent structural evolution of the Nevado de Toluca volcano region, Central Mexico: Tectonophysics, 318, 281-302. [http://dx.doi.org/10.1016/S0040-1951\(99\)00316-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0040-1951(99)00316-9)
- Gash, J., 1979, An analytical model of rainfall interception by forests: Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 105, (443), 43-55. <https://doi.org/10.1002/qj.49710544304>
- Gash, J., Lloyd, C., Lachaud, G., 1995, Estimating sparse forest rainfall interception with an analytical model: Journal of Hydrology, 170(1), 79-86. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02697-N](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02697-N)
- Gutiérrez, J., Jones, R., Narisma, G., Alves, L., Amjad, M., Gorodetskaya, I., Grose, M., Klutse, N., Krakovska, S., Li, J., Martínez-Castro, D., Mearns, L., Mernild, S., Ngo-Duc, T., van den Hurk, B., Yoon, J., 2021, Atlas. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change: UK, Cambridge University Press. <http://dx.doi.org/10.1017/9781009157896>
- INEGI, 2017, Diccionario de datos edafológicos: escala 1:250000: versión 4 / Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México, 72 p.
- INE – INEGI, 1997, Uso del suelo y vegetación, escala 1:250000, serie I (continuo nacional), escala: 1:250000. Instituto Nacional de Ecología - Dirección de Ordenamiento Ecológico General e Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Digitalización de las cartas de uso del suelo y vegetación elaboradas por INEGI entre los años 1980-1991 con base en fotografías aéreas de 1968-1986: México, D. F., INEGI.
- INEGI, 2001, Uso del suelo y vegetación, escala 1:250000, serie II (continuo nacional), escala: 1:250000: Aguascalientes, México, Dirección General de Geografía, Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- IPCC, 2021, Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change: UK, Cambridge University Press. <http://dx.doi.org/10.1017/9781009157896>
- IUSS Working Group WRB, 2015, Base referencial mundial del recurso suelo 2014, Actualización 2015. 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: Roma, FAO.
- JetBrains, 2021, Software JetBrains (Versión 2021.2.2).
- Johnson, A., Engott, J., Bassiouni, M., Rotzoll, K., 2018, Spatially distributed groundwater recharge estimated using a water-budget model for the Island of Maui, Hawaii, 1978–2007: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2014–5168, 53p. <http://dx.doi.org/10.3133/sir20145168>
- Jyrkama, M., Sykes, J., 2007, The impact of climate change on spatially varying groundwater recharge in the grand river watershed (Ontario): *Journal of Hydrology*, 338, 237-250. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.02.036>
- Macías, J., Arce, J., García, P., Siebe, C., Espindola, J., Komorowski, J., Scott, K., 1997, Late Pleistocene–Holocene cataclysmic eruptions at Nevado de Toluca and Jocotitlan volcanoes, Central Mexico, en Link, K.P., Kowallis, B.J. (Eds.), *Proterozoic to Recent Stratigraphy, Tectonics, and Volcanology*, Utah, Nevada, southern Idaho and Central Mexico: USA, Brigham Young University, Geology Studies, 42, 493–528.
- Marshall, J., 2007, Urban Land Area and Population Growth: A New Scaling Relationship for Metropolitan Expansion: *Urban Studies*, 44(10), 1889-1904. <http://dx.doi.org/10.1080/00420980701471943>
- Mas, J., Kolb, M., Paegelow, M., Camacho, M., Houet, T., 2014, Inductive pattern-based land use/cover change models: A comparison of four software packages: *Environmental Modelling & Software*, 51, 94-111. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.09.010>
- Mendoza, A., Corona, R., Galicia, L., García V., 2019, Proyecciones poblacionales y económicas bajo diferentes escenarios para México: *Papeles de Población*, 25, 9-44. <https://doi.org/10.22185/24487147.2019.99.02>
- Morales, J., Horta, F., Segovia, I., Robles, A., Hernández, J., 2019, Analysis of a new spatial interpolation weighting method to estimate missing data applied to rainfall records: *Atmósfera*, 32, (3), 237-259. <http://dx.doi.org/10.20937/ATM.2019.32.03.06>
- Nazari, M., Sadeghi, S., Van Stan ll, J., Chaichi, M., 2020, Rainfall interception and redistribution by maize farmland in central Iran: *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 27. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100656>
- Ortega, A. Farvolden, R., 1989, Computer analysis of regional groundwater flow and boundary conditions in the basin of Mexico: *Journal of Hydrology*, 110, 271-294. [http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694\(89\)90192-3](http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694(89)90192-3)
- Ortiz, F., Morales, G., Quentin, E., Díaz, V., 2010, Estimación de la recarga en el acuífero del Valle de Toluca México y su distribución espacial, en X Congreso Latinoamericano de Hidrogeología: Caracas, Venezuela. 8 p.
- Pacheco, K., 2012, Cuantificación de la recarga regional bajo cambios temporales del uso de suelo por deforestación e incremento de la superficie urbana: Toluca, México, Universidad Autónoma del Estado de México, Tesis de maestría, 135 p.
- Rushton, K., Ward, C., 1979, The estimation of groundwater recharge: *Journal of Hydrology*, 41(3-4), 345–361. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(79\)90070-2](https://doi.org/10.1016/0022-1694(79)90070-2)
- Salas, J., 2012, Determinación espacial de la recarga en un acuífero mediante el diseño e instalación de instrumentación en pozos de monitoreo y un modelo numérico unidimensional de la infiltración en la zona vadosa: Toluca, México, Universidad Autónoma del Estado de México, Tesis Doctoral, 186p.
- Salvador, J., Bolaños, M., Palacios, E., Palacios, L., López, A., Muñoz, J., 2021, Estimación de la fracción de cobertura vegetal y contenido de nitrógeno del dosel en maíz mediante sensores remotos: *Terra Latinoamericana*, 39, 1-11. <https://doi.org/10.28940/terra>

- v39i0.899
- Sánchez, J., 2019, Estimación espacio-temporal de la recarga de agua subterránea mediante métodos de balance hídrico en el Acuífero del Valle de Toluca : Toluca, México, Universidad Autónoma del Estado de México, Tesis de Maestría, 126p.
- Sanford, W., 2002, Recharge and groundwater models: an overview: *Hydrogeology Journal*, 10, 110-120. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0173-5>
- Scanlon, B., Healy, R., Cook, P., 2002, Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge: *Journal of Hydrogeology*, 10, 18-39. <https://doi.org/10.1007/s10040-0010176-2>
- SEDATU, CONAPO, INEGI, 2018, Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2015, México, CONAPO, 283 p.
- Shuler, C., Brewington, L., Kadi, A., 2021, A participatory approach to assessing groundwater recharge under future climate and land-cover scenarios, Tutuila, American Samoa: *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 34, 100785. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100785>
- Smith, E., Westenbroek, S., 2015, Potential groundwater recharge for the State of Minnesota using the Soil-Water-Balance model, 1996-2010: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2015-5038, 85 p. <http://dx.doi.org/10.3133/sir20155038>
- Stahl, K., Moore R., Floyer J., Asplin M., McKendry I., 2006, Comparison of approaches for spatial interpolation of daily air temperature in a large region with complex topography and highly variable station density: *Agricultural and Forest Meteorology*, 139 (3-4), 224-226. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.07.004>
- Sun, Y., Zhao S., Qu W., 2015, Quantifying spatiotemporal patterns of urban expansion in three capital cities in Northeast China over the past three decades using satellite data sets: *Environmental Earth Sciences*, 73, 7221 - 7235. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3901-6>
- Thorntwaite, C., Mather, J., 1957, Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance: *Publications in Climatology*, 10 (3), 1-104.
- Thornton, M., Shrestha, R., Wei, Y., Thornton, P., Kao, S., Wilson, B., 2020, Daymet: Daily Surface Weather Data on a 1-km Grid for North America, Version 4: Tennessee, USA ORNL DAAC. <https://doi.org/10.3334/ORNLDAAC/1840>
- Trost, J., Roth, J., Wesenbroek, S., Reeves, H., 2018, Simulation of potential groundwater recharge for the glacial aquifer system east of the Rocky Mountains, 1980-2011, using the Soil-Water-Balance model: U.S. Geological Survey Scientific Report 2018-5080, 51 p. <https://doi.org/10.3133/sir20185080>
- USDA, 2009, Hydrologic Soil Groups. Chapter 7 in National Engineering Handbook. Part 630 Hydrology. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, 13 p.
- Westenbroek, S., Engott, J., Kelson, V., Hunt, R., 2018, SWB Version 2.0 – A soil-water-balance code for estimating net infiltration and other water budget components: U.S. Geological Survey, Report 6, 118 p. <https://doi.org/10.3133/tm6A59>
- Westenbroek, S., Nielsen, M., Ladd, D., 2021, Initial estimates of net infiltration and irrigation from a soil-water-balance model of the Mississippi Embayment Regional Aquifer Study Area: U.S. Geological Survey, Report 1008, 29 p. <https://doi.org/10.3133/ofr20211008>