

MODELACIÓN DE ESCENARIOS DE RECARGA DEL ACUÍFERO EN EL PARQUE OTOMÍ MEXICA, MÉXICO (2014 - 2025)

Brenda Yazmin Reza Curiel, Martín García Ávila, Ángel Gabriel Estévez Pedraza, Jesús Gastón Gutiérrez Cedillo

RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo la modelación de escenarios de recarga del acuífero en el Parque Otomí Mexica 2014 – 2025. La recarga del acuífero es importante para la preservación del Área Natural Protegida y para la población. Metodología: 1) Clasificación y tipificación de la modelación de escenarios de recarga del acuífero 2014 – 2025; 2) Fotointerpretación cartográfica y cuantificación de la modelación de escenarios de la recarga del acuífero; 3) Selección, regresión y estimación curvilínea para la serie de tiempo a partir del año 2014; 4) Selección de variable dependiente y modelos para la recarga del acuífero; 5) Modelación de series temporales a 2025; 6) Estimación de la precipitación y temperatura, por medio del método de interpolación IDW /Kriging; 7) Estimación del volumen de evapotranspiración; 8) Series temporales y validación, se realizó la validación fuera de la muestra y diagnóstico de residuos. Los resultados muestran que el escenario que prevalece en las precipitación pluvial y temperatura media anual es tendencial óptimo, indica que aumentará para los próximos 4 años. Mientras que la tendencia de evapotranspiración también aumentará para los próximos 4 años, sobre todo en los espacios localizados al noreste del parque y al suroeste del área de estudio.

Palabras clave: Escenario; tendencial; estimación de precipitación y temperatura; evapotranspiración; recarga del acuífero.

MODELING OF AQUIFER RECHARGE SCENARIOS IN THE OTOMI PARK, MEXICA 2014 – 2025.

ABSTRACT

This research aims to model aquifer recharge scenarios in the Otomí Mexica Park from 2014 to 2025. Aquifer recharge is important for the preservation of the Protected Natural Area and for the local population. Methodology: 1) Classification and categorization of aquifer recharge scenario models from 2014 to 2025; 2) Cartographic photointerpretation and quantification of aquifer recharge scenario models; 3) Selection, regression, and curvilinear estimation for the time series starting from 2014; 4) Selection of the dependent variable and models for aquifer recharge; 5) Time series modeling to 2025; 6) Estimation of precipitation and temperature using the IDW/Kriging interpolation method; 7) Estimation of evapotranspiration volume; 8) Time series analysis and validation, including out-of-sample validation and residual analysis. The results show that the prevailing scenario for rainfall and average annual temperature is optimal, indicating that it will increase over the next four years. Meanwhile, the trend for evapotranspiration will also increase over the next four years, particularly in the areas located northeast of the park and southwest of the study area.

Keywords: Scenario; trend; precipitation and temperature estimation; evapotranspiration; aquifer recharge.

1. INTRODUCCIÓN

La presente investigación tiene como objetivo la modelación de escenarios de recarga del acuífero en el Parque Otomí Mexica 2014 – 2025. La recarga del acuífero en el Parque es de vital importancia para la preservación del Área Natural Protegida y para la calidad de vida de la población de las 166 localidades (15 de ellas urbanas) al interior del ANP; y las ubicadas en su zona de influencia. El proceso de recarga se genera a partir de la infiltración y escorrentía superficial, esto es la cantidad de agua que entra en la zona saturada y que pasa a formar parte de las reservas subterráneas; lo que favorece el potencial de servicios ecosistémicos del Parque.

La recarga del acuífero es un proceso natural que se puede gestionar con el fin de aumentar la infiltración de agua en el subsuelo. La recarga gestionada del acuífero del parque, es una técnica que consiste en inyectar agua intencionalmente en los acuíferos que se localicen a su alrededor para mejorar la calidad y disponibilidad del agua.

Este estudio se realizó con base en el modelo propuesto por PORTER (1985), el cual permite prospectar los escenarios, identificando las variables, para después seleccionar los elementos dependientes de la recarga del acuífero, identificar los cambios estructurales determinados, y así obtener los elementos constantes de la recarga del acuífero para finalizar con el cálculo de la recarga del acuífero futuro. Los escenarios construidos en la presente investigación constituyen una herramienta que puede ser aplicada en estudios prospectivos estratégicos.

El estudio aborda la prospectiva o análisis de escenarios del servicio ecosistémico, recarga del acuífero en el Parque Otomí Mexica (2014 - 2025), ubicado en el centro de México. Lo que se pretende es modelar a futuro el comportamiento de este servicio ecosistémico de regulación, para así observar cómo su tendencia cambiará a lo largo de cuatro años.

Se tomó en consideración al Objetivo de Desarrollo Sostenible 15; el cual se fundamentó en los Servicios Ecosistémicos, en la gestión sostenible de los bosques de esta área natural protegida, en la lucha contra la desertificación, así como para revertir la degradación de las tierras y detener la pérdida de biodiversidad.

Especificamente en las siguientes metas: 15.1 Para 2020, velar por la conservación, el restablecimiento y el uso sostenible de los ecosistemas terrestres y los ecosistemas interiores de agua dulce y los servicios que proporcionan, en particular los bosques, los humedales, las montañas y las zonas áridas, en consonancia con las obligaciones contraídas en virtud de acuerdos internacionales, (ONU, 2022).

15.2 Para 2020, promover la gestión sostenible de todos los tipos de bosques, poner fin a la deforestación, recuperar los bosques degradados e incrementar la forestación y la reforestación a nivel mundial. 15.3 Para 2030, luchar contra la desertificación, rehabilitar las tierras y los suelos degradados, incluidas las tierras afectadas por la desertificación, la sequía y las inundaciones, y procurar lograr un mundo con una degradación neutra del suelo. 15.4 Para 2030, velar por la conservación de los ecosistemas montañosos, incluida su diversidad biológica, a fin de mejorar su capacidad de proporcionar beneficios esenciales para el desarrollo sostenible.

15.5 Adoptar medidas urgentes y significativas para reducir la degradación de los hábitats naturales, detener la pérdida de la diversidad biológica y, para 2020, proteger las especies amenazadas y evitar su extinción. 15.9 Para 2020, integrar los valores de los ecosistemas y la diversidad biológica en la planificación nacional y local, los procesos de desarrollo, las estrategias de reducción de la pobreza y la contabilidad, (ONU, 2022)

Los fundamentos para llevar a cabo la investigación, se explican a continuación. La planeación por escenarios (o análisis de escenarios) tiene su origen en la concepción militar durante la segunda guerra mundial en los años 40, pero se consolida como un modelo de planeación organizacional en 1950, introducido por HERMAN KAHN, (1967) quien trabajaba para el Departamento de Defensa de los Estados Unidos. KAHN, (1967) considera a los escenarios, como secuencias hipotéticas de eventos construidos con el propósito de centrar la atención en los procesos causales y la toma de decisiones.

En 1992, la escuela prospectiva representada por Michael Godet, propone que los escenarios pueden servir no solo para predecir un futuro, sino como orientación para construir un futuro idealizado, integrándola como herramienta en los estudios prospectivos estratégicos, (GODET,

1996). CHERMACK, (2005) realiza un ajuste a la planeación por escenarios al modelo basado en el método de ocho pasos de Dubin, teorizando aún más el proceso de su construcción.

Desde sus inicios, para la planeación por escenarios se han desarrollado diversas metodologías catalogadas en tres grandes escuelas: la lógica e intuitiva, la prospectiva y de tendencia probabilística, (BRADFIELD et al., 2005)

La primera de ellas propuesta por HERMAN KAHN en 1967 se caracterizaba por ser un esquema totalmente cualitativo basado más en la intuición y juicios de valor, que en un soporte científico. La primera aproximación en el empleo de métodos cuantitativos estuvo a cargo de Amara y Lipinski (GEORGANTZAS y ACAR, 1995 en VERGARA et al., 2010), con la introducción de algoritmos estructurales y modelos matemáticos para la definición y evaluación de cada escenario.

En 1992, la escuela prospectiva representada por (GODET, 1996 en VERGARA et al., 2010) propone que los escenarios pueden servir no solo para predecir un futuro, sino como orientación para construir un futuro idealizado, integrándola como herramienta en los estudios prospectivos estratégicos. VAN DER HEIJDEN (1996 en VERGARA et al., 2010) populariza, su propia metodología estructurada y postula 5 criterios en el desarrollo de escenarios: Al menos dos escenarios son requeridos para reflejar la incertidumbre; cada escenario debe ser plausible (posible); los escenarios deben ser internamente consistentes; los escenarios deben ser relevantes; y los escenarios deben producir una nueva y original perspectiva.

Sin embargo, el modelo que se empleó en esta investigación se enfocó en el modelo propuesto por PORTER, (1985) debido a que identifica las variables, así mismo identifica los elementos dependientes de la recarga del acuífero, por lo que identifica los cambios estructurales para obtener los elementos constantes, para finalizar con los escenarios futuros de recarga del acuífero en el Parque Otomí Mexica. A continuación, se muestra la recopilación de diferentes autores para la construcción de escenarios futuros según Vergara et al. (2010) (tabla, 1).

TABLA 1
Recopilación de metodologías para la construcción de escenarios

Modelo / Metodología	Autor (es)	Categorías / aportes	Año
Future-Now	Herman Kahn	Emplea juicios razonados y la intuición. Método cualitativo	1967
Industry Scenarios	Michael Porter	Parte de que el análisis de la industria permite prever cómo será el mundo en el futuro	1985
Procedimiento para la construcción de escenarios	Peter Wack	Soporta los escenarios bajo una estructura robusta, complementados con un análisis numérico	1985
Metodología para la construcción de escenarios	Michel Godet	Uso de la perspectiva para el diseño de escenarios	1996
Metodología para el desarrollo de escenarios	Van Der Heijden	Método estructurado para el desarrollo de escenarios	1996
Teoría general para la planeación de escenarios basado en el método de ocho pasos de Dubin	Thomas J. Chermack	Aplicación teórica para la construcción y prueba de escenarios	2005
Metodología para la construcción de escenarios	Gutiérrez	Se basa en partir del pasado, pasando por el presente para llegar al futuro.	2013

Fuente: elaboración propia con base en VERGARA et al., (2010)

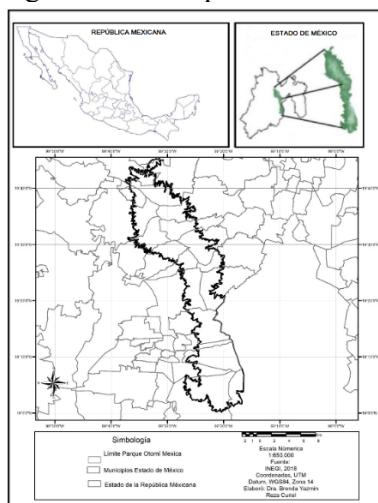
2. ÁREA DE ESTUDIO

El Parque Otomí – Mexica Estado de México, se ubica por encima de la cota 2800 metros sobre el nivel del mar (GEM, 1980), sus coordenadas geográficas extremas son: $18^{\circ} 59' 59.57''$ - $19^{\circ} 45' 19.34''$ de latitud norte y $99^{\circ} 20' 21.75''$ - $99^{\circ} 32' 01.41''$ de longitud oeste. Tiene una superficie aproximada de 105,875 hectáreas, que se encuentran distribuidas espacialmente en 17 municipios del Estado de México: Chapa de Mota, Huixquilucan, Isidro Fabela, Jilotzingo, Jiquipilco, Lerma, Naucalpan, Nicolás Romero, Ocoyoacac, Ocuilan, Ozotocotepec, Morelos, Temoaya, Tianguistenco, Villa del Carbón, Xalatlaco y Xonacatlán, (JUAN et al., 2017). Ver (figura, 1)

El área de estudio se ubica en las siguientes regiones hidrológicas: a) Lerma-Santiago (RH12), b) Balsas (RH18) y c) Pánuco (RH26), esto de acuerdo a la nomenclatura de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 2019). Las corrientes perennes se encuentran distribuidas a lo largo del territorio, pero especialmente en la zona norte destacan por su aglomeración. Las corrientes intermitentes se basan en la geomorfología regional, esto es que los escurrimientos tienden a modificar su trayectoria adecuándose a las condiciones de relieve del terreno (JUAN et al., 2017)

FIGURA 1

Ubicación Geográfica del Parque Otomí Mexica, México.



Fuente: Elaboración propia con base en (INEGI, 2015)

3. MATERIALES Y MÉTODOS

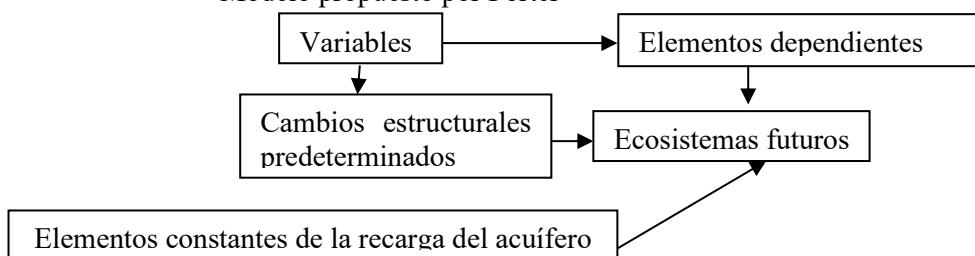
La metodología que se aplica en esta investigación consiste en procesos que permiten representar la modelación de escenarios de la recarga del acuífero en el Parque Otomí Mexica en el Centro de México, a través de las siguientes etapas metodológicas.

3.1 CLASIFICACIÓN Y TIPIFICACIÓN DE LA RECARGA DEL ACUÍFERO.

Este apartado se desarrolla en tres etapas: gabinete, aplicación estadística y representación. En la primera etapa se hizo revisión de información en fuentes oficiales de ocho estaciones meteorológicas ubicadas dentro del área de estudio de la página del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), para los años 2014 - 2018. En la segunda etapa se realizaron gráficas en el software Paquete Estadístico para Ciencias Sociales; Statistical Package for the Social Sciences SPSS, (2018) para la recarga del acuífero del Parque Otomí Mexica. En la tercera etapa se finaliza con un mapa que representa la proyección de la recarga del acuífero, en el Sistema de Información Geográfica (SIG) Arc Map 10.4

El modelo propuesto por Porter ayuda a identificar los escenarios como se observa en la (figura 2). Inicialmente se identifican las variables y posteriormente se seleccionan los elementos dependientes de la recarga del acuífero, para identificar los cambios estructurales predeterminados y así obtener los elementos constantes de la recarga del acuífero y finaliza con las recargas futuras del acuífero.

FIGURA 2
Modelo propuesto por Porter



Fuente: Elaboración propia con base en (PORTER, 1985 en VERGARA et al., 2010)

En la tabla 2 se validan los criterios de selección de variables y parámetros analizados para la Modelación de Escenarios de recarga del acuífero en el Parque Otomí Mexica (2014 - 2025).

TABLA 2
Criterios de selección de variables

Método de determinación	Variables de modelación de escenarios	Parámetro estadístico	Fundamento metodológico
Modelación de los escenarios futuros de la Recarga del acuífero en el Parque Otomí Mexica (2014 - 2025).	Tipos de Ecosistemas en Sistemas de información Geográfica para análisis retrospectivo y prospectivo. Área Superficial de los Ecosistemas en Sistemas de información Geográfica para análisis retrospectivo y prospectivo. Tendencia espacial de distribución de los Ecosistemas en Sistemas de información Geográfica para análisis retrospectivo y prospectivo.	Cualitativo: tipo o clase. Cualitativo: tipo o clase. Cualitativo: tipo o clase	Análisis estadístico de la distribución del Servicio Ecosistémico, Recarga del acuífero

Fuente: Elaboración propia, 2019

3.2 FOTOINTERPRETACIÓN CARTOGRÁFICA Y CUANTIFICACIÓN DE LA MODELACIÓN DE ESCENARIOS DE LA RECARGA DEL ACUÍFERO 2025

A partir de la recarga del acuífero (2014 – 2025) se realizó la modelación de escenarios en el Parque Otomí Mexica, para lo que se generó una serie de gráficas con el fin de analizar el área de estudio, posteriormente se elaboró un mapa con la proyección de la recarga del acuífero para el año 2025.

3.3 PROSPECTIVA Y MODELADO

La prospectiva es el análisis del estado futuro el cual puede ser a corto (5 a 10 años), medio (15 a 20 años) y largo plazo (30 a 50 años). Depende el territorio de estudio; ya que existen diferentes escalas: estatal, regional, local. En esta investigación se aplica un estudio regional. Dentro de la prospectiva existen tres tipos de escenarios: ideal, tendencial y estratégico, (tabla, 3).

TABLA 3
Escenario ideal, tendencial y estratégico

Escenario ideal o deseado	Es como desea la población su territorio a futuro, necesariamente lo construye la población local.
Escenario tendencial o posible: óptimo	Si la situación mejora
Escenario tendencial o posible: Medio	Si permanece igual
Escenario tendencial o posible: Pésimo	Si empeora

Escenario estratégico deseable y posible (imagen objetivo)	Depende de los escenarios anteriores. Se busca lograr un equilibrio entre lo que se quiere y lo que se puede. De estos surge la propuesta.
---	---

Fuente: (GUTIÉRREZ, C., 2013)

Prospectiva es una actuación crítica y creativa, caracterizada por plantear opciones o alternativas de solución a los problemas suscitados por una situación.

La investigación se realizó en el software SPSS, una de las razones más importantes para efectuar el análisis de las series temporales es intentar prever los valores futuros de la serie. Un modelo de la serie que explique los valores pasados también puede predecir si aumentarán o disminuirán los próximos valores y en qué medida lo harán.

El modelo debe cumplir ciertos criterios: **Que la r2 se acerque a "1", que no sean números negativos y que no tienda a "0"*

3.4 DEFINICIÓN DE PERÍODO DE ESTUDIO

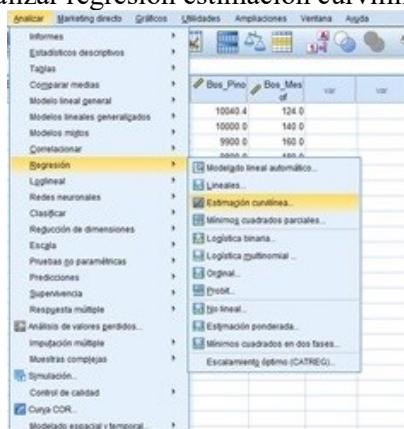
En el menú datos se generaron las variables de fecha que se utilizan para establecer la periodicidad y para distinguir entre períodos históricos, de validación y de predicciones. Está diseñado para trabajar con las variables creadas por el procedimiento “definir fechas”.

3.5 SELECCIÓN, REGRESIÓN, ESTIMACIÓN CURVILÍNEA PARA ANALIZAR LA SERIE DE TIEMPO PARA EL AÑO 1998.

En el contexto del modelado causal temporal, el término causal hace referencia a la causalidad Granger. En una serie temporal “X” se indica que la “causa Granger” provoca otra serie temporal “Y” si realiza una regresión para Y en términos de valores pasados de ambos resultados, “X – Y”, en un modelo mejor para “Y” que realiza una regresión solo en los valores pasados en “Y”, (figura, 3).

FIGURA 3

Selección para analizar regresión estimación curvilinea para el año 2014



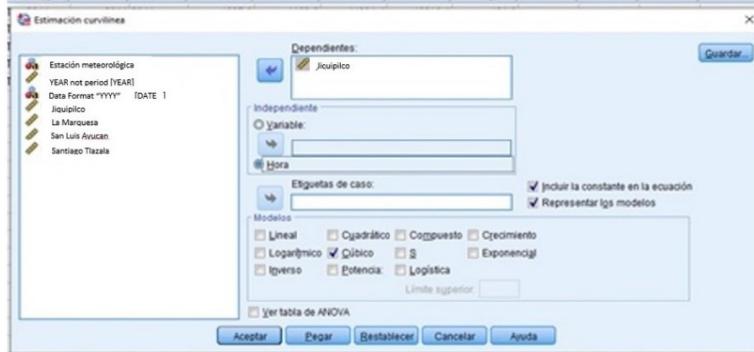
Fuente: Elaboración propia con base en el Software Paquete Estadístico para Ciencias Sociales; Statistical Package for the Social Sciences SPSS, (2018)

3.6 SELECCIÓN DE VARIABLE DEPENDIENTE Y SELECCIÓN DE MODELOS POR ESTACIÓN METEOROLÓGICA.

La variable dependiente en este caso es una serie temporal, lo que significa que cada caso representa un punto del tiempo, los casos son consecutivos separados por un intervalo de tiempo constante. Posteriormente al seleccionar el modelo se crean modelos de series temporales y se generan predicciones, (figura, 4).

FIGURA 4

Selección de variable dependiente por estación meteorológica.



Fuente: Elaboración propia con base en el Software Paquete Estadístico para Ciencias Sociales; Statistical Package for the Social Sciences SPSS, (2018)

Los modelos de regresión que se presentan son de nueve tipos: cúbico, compuesto, exponencial, cuadrático, crecimiento, lineal, inverso, logarítmico y potencia; cada uno es diferente y esto es porque cuentan con una velocidad de ritmo diferente. En este estudio se toma en cuenta el modelo cúbico, porque es el que se acerca más al R cuadrado 1, el cual indica que es el modelo adecuado para cada estación meteorológica.

3.7 MODELACIÓN DE SERIES TEMPORALES 2025.

El período de estimación define el conjunto de casos utilizados para volver a estimar los parámetros del modelo. De forma predeterminada, el período de estimación incluye todos los casos del conjunto de datos activo. Para establecer el período de estimación, se seleccionó basado en el rango del tiempo o de los casos en el cuadro de diálogo “Seleccionar casos”. Según los datos disponibles, el período de estimación utilizado por el procedimiento puede variar según el modelo y, por consiguiente, ser distinto del valor mostrado. Para un modelo determinado, el período de estimación real es el período restante tras eliminar todos los valores perdidos contiguos, de la variable dependiente del modelo, que aparecen al principio o al final del período especificado.

Los pasos a seguir fueron los siguientes: analizar, predicciones, crear modelos tradicionales, en la variable dependiente se seleccionó la estación meteorológica, en el apartado de opciones se colocó el año final del período de estimación (figura, 5).

FIGURA 5
Modelación de series temporales



Fuente: Elaboración propia con base en el Software Paquete Estadístico para Ciencias Sociales; Statistical Package for the Social Sciences SPSS, (2018)

3.8 ESTIMACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA.

La estimación del volumen anual precipitado se realizó mediante álgebra de mapas en el sistema de información geográfica (SIG) ArcMap 10.4, con base en las ecuaciones propuestas por (Aparicio, 2009) para datos de precipitación media anual ecuación (1)

$$VP = P * AC \quad (1)$$

donde:

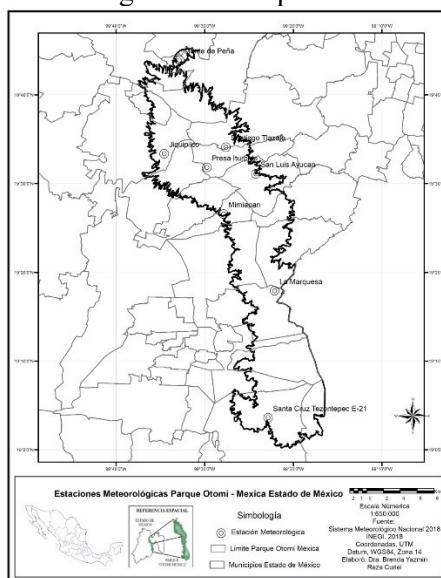
VP = Volumen anual de precipitación (m^3)

$P(m)$ = $P(mm) / 1000$ Precipitación media anual (mm)

AC = Área del parque (m^2)

Para determinar VP se ubicaron las estaciones meteorológicas (figura 6) con influencia en el área natural protegida (ANP) con registro de medias mensuales y anuales de precipitación y temperatura. Se interpolaron los valores anuales de precipitación (mm.) para obtener un raster que refleja el comportamiento promedio de la precipitación en el ANP. El cálculo del volumen de lluvia se obtuvo a partir del raster precipitación multiplicada por el área del parque, tanto dentro como fuera del área natural protegida.

FIGURA 6
Estaciones Meteorológicas del Parque Otomí Mexica, México.



Fuente: Elaboración propia con base en (SISTEMA METEOROLÓGICO NACIONAL, 2018)

3.9 ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE EVAPOTRANSPIRACIÓN

El volumen anual de evapotranspiración, se obtuvo con la ecuación (2).

$$ET = AC * ETR \quad (2)$$

donde:

ET = Volumen evapotranspirado (m^3)

AC = Área del parque (m^2)

ETR = Evapotranspiración anual real (mm)

Para fines prácticos la determinación de la evapotranspiración anual real se utilizó el método de Turc (REMENIERAS, 1974), quien propone una fórmula simple en función de la precipitación y la temperatura del lugar de estudio (ecuación 3).

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.90 + (P/L)^2}} \quad (3)$$

donde:

ETR = Evapotranspiración anual real (mm)

P = Precipitación media anual (mm)

L = Parámetro que está en función de la temperatura media conforme con la ecuación (4).

$$L = 300 + 25 * T + 0.05 * T_3 \quad (4)$$

donde:

P = Precipitación media anual (mm)

T = Temperatura media anual ($^{\circ}$ C)

Se entiende la Recarga como el aumento del volumen de agua subterránea en la zona no saturada o en el acuífero (zona saturada), medido como un flujo de agua positivo hacia el nivel freático ($m^3 \cdot \text{día}^{-1}$ o $mm \cdot \text{año}^{-1}$ sobre cuenca). En términos prácticos, la recarga es la porción de la precipitación (directa o mediada por procesos de infiltración y percolación) que finalmente pasa a formar parte de las reservas freáticas aprovechables. (FREEZE, A. y CHERRY, J., 1979)

El Marco hidrológico permite entender que la recarga debe enmarcarse dentro de un balance hídrico explícito a la escala de interés (parcela, subcuenca o acuífero):

$$P - ET - Q_s - Q_g \pm \Delta S = 0 \quad (5)$$

donde

P = precipitación (entrada),

ET = evapotranspiración (pérdida hacia atmósfera),

Q_s = escorrentía superficial (salida),

Q_g = descarga diferencial de aguas subterráneas (salida por flujo).

ΔS = cambio en almacenamiento (superficie + suelo + acuífero).

El Balance hídrico, por su parte, permite estimar la recarga como el componente residual o explícito de la dinámica de almacenamiento del sistema suelo – acuífero. (HEALY, R., 2010)

Respecto a las Variables de suelo en el Parque Otomí Mexica, este parque se encuentra en una región montañosa y boscosa por lo que se presentan condiciones propias de un ecosistema templado, las principales variables de suelo se presentan en la (tabla 4).

TABLA 4

Variables de suelo, geología, cobertura y pendiente del Parque Otomí Mexica, Estado de México.

Categorías	Variables	Unidad de medida
Edafológicas	Suelos	Andosol Cambisol Leptosol Luvisol
	Textura (suelos)	Arcillosa Arenoso Limos
	Profundidad (suelos)	0 – 100 cm
Ecostémicas	Uso de suelo y vegetación	Cobertura de bosques de pino, oyamel y encino
Fisiográficas	Altitud	800 – 5500 msnm
	Pendiente	0 – 43°

Fuente: CONABIO, (2018) en VILLEGAS M. (2020)

La elección del método de Turc se justifica debido a que este método (REMENIERAS, 1974) incluye y define a la Naturaleza como una fórmula empírica/semi-empírica que estima ET anual real a partir de la precipitación P y temperatura T mediante una expresión simple.

La ventaja consiste en que requiere pocos datos (P y T). Es apropiado para estudios de balance hídrico regional donde faltan datos meteorológicos detallados (radiación neta, humedad y viento).

Por eso es práctico para balances de recarga en zonas con datos limitados. El método Turc está justificado porque se dispone de series anuales de Precipitación - Temperatura y el objetivo es un balance anual regional (como estimación preliminar de volumen Evapotranspirado para recarga).

Por su parte el planteamiento de FAO-56 Penman-Monteith entiende a la Naturaleza como el método físico basado que calcula la evapotranspiración de referencia (ETo) usando radiación neta, temperatura, humedad y viento. Para obtener la evapotranspiración real (ETR) hay que multiplicar ETo por un coeficiente de cultivo kc o usar kc fraccional/cover-based (ETR = kc * ETo).

La Ventaja es que es más robusto y físicamente interpretable; responde correctamente a cambios en radiación, temperatura, humedad y viento. Es recomendada en la FAO para estudios agrícolas / hidrológicos cuando se dispone de datos meteorológicos suficientes. Sus Limitaciones

residen en que exige más datos (radiación neta o datos para estimarla, humedad y velocidad del viento).

3.9.1 SERIES TEMPORALES Y VALIDACIÓN

Las series temporales de precipitación, temperatura y evapotranspiración en este estudio se extendieron al periodo 1998–2023 con el fin de determinar la variabilidad interanual y multianual del clima. Este intervalo de más de veinte años garantiza la estabilidad estadística mínima recomendada para modelación hidrológica y climática.

Se realizó un control de calidad de los datos mediante detección de valores atípicos (método de Tukey) y verificación cruzada con estaciones vecinas con correlaciones superiores a $r = 0.85$. Las lagunas de datos menores a tres meses fueron completadas mediante interpolación lineal ponderada, y las ausencias mayores se estimaron con promedios mensuales regionales. Los registros fueron homogeneizados mediante el método Standard Normal Homogeneity Test (SNHT), asegurando coherencia temporal entre las estaciones.

La tendencia de las series se evaluó aplicando la prueba no paramétrica de Mann–Kendall y la estimación de pendiente de Theil–Sen, identificando tendencias significativas ($p < 0.05$) en temperatura y precipitación. Con base en los resultados, se ajustaron al modelo ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average), ETS (Error–Trend–Seasonal) y Regresión Climática, que relaciona la recarga del acuífero con variables físicas como la temperatura media y la precipitación acumulada.

La selección del modelo óptimo se basó en los criterios de información Akaike (AIC) y Bayesiano (BIC), así como en el diagnóstico de residuos. El análisis de los residuos se efectuó mediante funciones de autocorrelación (ACF) y autocorrelación parcial (PACF), confirmando la independencia de los errores cuando estos se comportaron como ruido blanco dentro del intervalo de confianza de $\pm 1.96/\sqrt{n}$.

Para evaluar la capacidad predictiva, las series se dividieron en conjuntos de entrenamiento (80%) y validación (20%). Las predicciones fuera de muestra se compararon con observaciones reales utilizando métricas de error RMSE (Root Mean Square Error), MAE (Mean Absolute Error) y el estadístico de Theil's U. Los modelos que presentaron menor error y residuos no correlacionados fueron seleccionados para las proyecciones finales. Todas las curvas se presentan con bandas de confianza del 95%, las cuales reflejan la incertidumbre asociada a las predicciones.

3.9.2 INTERPOLACIÓN ESPACIAL

Para aplicar el método IDW y Kriging se eligieron los siguientes pasos:

- 1) Se prepararon datos puntuales de cada una de las estaciones meteorológicas, las coordenadas en decimal, las variables en (mm o °C).
- 2) Se revisaron y limpiaron valores atípicos, duplicados y homogeneidad.
- 3) Se analizó la distribución espacial y distancia media entre estaciones (distancia media) $>20\text{km}$.
- 4) La proyección que se utilizó para todos los datos (puntos y capas base) es WGS84, Zona 14N
- 5) Se eligió la resolución de salida de un tamaño de celda de 250 a 1000m. justificada por la distancia media.
- 6) Se probó IDW y Kriging, se ajustaron variogramas empíricos, para elegir el modelo y se generaron los mapas. Se siguió la siguiente ruta en ArcMap 10.4: ArcToolbox, Spatial Analyst, interpolation, IDW, ver (tabla 5)

TABLA 5
Parámetros para la Interpolación IDW

Parámetro	Valor	Justificación
Número máximo de vecinos	8	Evita sobreajuste
Radio de búsqueda	1.5 x distancia media	Asegura vecindad estable

Tamaño de celda	250 a 1000m.	Mantener espacial	consistencia
-----------------	--------------	-------------------	--------------

Fuente: elaboración propia con base en software ArcMap 10.4

La ruta para la interpolación Kriging en ArcMap 10.4 es ArcToolbox, Geostatistical Analysis, Kriging.

El Variograma se seleccionó tipo ordinary kriging, el modelo de variograma fue esférico (spherical), (ver tabla, 6)

TABLA 6
Parámetros del Variograma

Parámetro	Valor
Nugget	0.08 mm.
Sill	0.58 mm.
Range	45,000 m.

Fuente: elaboración propia con base en software ArcMap 10.4

- 7) Validación cruzada por estación (leave – one- out), se calculó RMSE, MAE y sesgos.
- 8) Se eligió el producto final, se seleccionó el modelo con mejor desempeño, posteriormente se clasificó el mapa en quintiles / intervalos naturales.
- 9) El origen y fecha de las capas base del DEM y el límite del área natural protegida ANP, se obtuvo de INEGI (2018).

4. RESULTADOS

En este apartado se presentan los resultados obtenidos de la modelación de escenarios de recarga del acuífero en el Parque Otomí – Mexica (2014 – 2025), se interpolaron isoyetas, isoterma y se produjeron raster en ArcMap 10.4, para generar mapas de precipitación (isoyetas), temperatura (isoterma), evapotranspiración y recarga proyectada.

4.1 ESTIMACIÓN DE RECARGA DEL ACUÍFERO EN EL PARQUE OTOMÍ MEXICA DEL ESTADO DE MÉXICO 2014 Y 2018.

En la figura 7, para el año 2014 la mayor recarga del acuífero se localiza en los municipios Villa del Carbón y Nicolás Romero ubicados al suroeste del parque. La menor recarga del acuífero se localiza en los municipios de Ocuilan ubicado al extremo sur, Naucalpan de Juárez e Isidro Fabela ubicados al noreste del parque, predominando la recarga media en el parque, dicho comportamiento se debe a los fenómenos climatológicos analizados por estación meteorológica. (REZA,2022)

En la figura 8 se observa que, para el año 2018 la mayor recarga del acuífero se localizó en el municipio de Ocuilan ubicado al extremo sur del parque, además de los municipios Jilotzingo e Isidro Fabela. La menor recarga del acuífero se localizó en los siguientes municipios; Jiquipilco ubicado al noreste del parque, Lerma y Naucalpan de Juárez ubicado en el centro del parque, Xalatlaco, Tianguistenco y Ocuilan ubicados al suroeste del parque, con una recarga del acuífero media en los siguientes municipios; Morelos, Villa del Carbón, Nicolás Romero, Temoaya, Otzolotepec, Xonacatlán, Isidro Fabela ubicados al norte del área de estudio, Lerma, Huixquilucan, Ocoyoacac, Tianguistenco, Xalatlaco y Ocuilan ubicados al sur del parque. (REZA,2022)

Se identificó que las zonas con pendiente pronunciada con zonas de infiltración y ramblas con pendientes pronunciadas son buenas para captar y ralentizar la escorrentía superficial, permitiendo que el agua se infiltre lentamente en el suelo, evitando la erosión, se hidrata la vegetación y aumenta la recarga del acuífero.

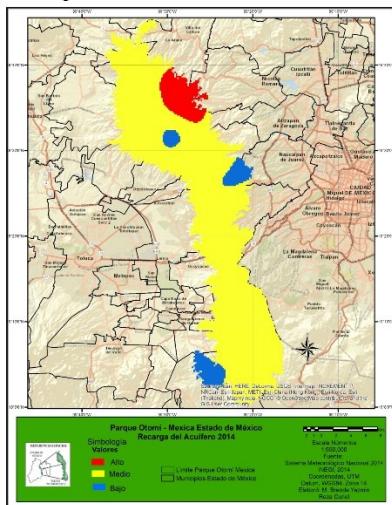
Las zonas de restauración de cubierta de ladera implican la recuperación de la vegetación y el suelo en áreas degradadas para prevenir la erosión y restaurar a los ecosistemas.

La ordenación de usos en el área de alta recarga potencial, es la siguiente: 1) Protección: es la capa más estricta para mantener la integridad ecológica en zonas de recarga. 2) Restauración: son

las áreas degradadas, en ellas se busca la recuperación ecológica para favorecer a la recarga al restaurarse la vegetación. 3) Conservación: permite usos sostenibles, manteniendo un balance en los ecosistemas. 4) Aprovechamiento sustentable: se permiten actividades productivas ejemplo de ello son las agrícolas. 5) Zona urbana: son las áreas donde el desarrollo humano es permitido para no dañar el Área Natural Protegida.

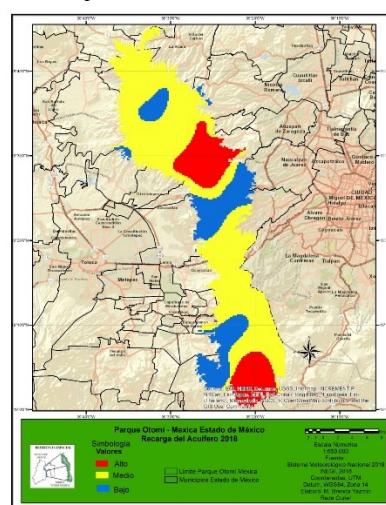
Los riesgos de urbanización y compactación de suelos en el Parque Otomí Mexica, se hacen presentes ya que el parque se localiza en un área boscosa de alta montaña, la urbanización o incremento de infraestructura en estas áreas puede generar impactos negativos especialmente relacionados con la compactación del suelo. Los principales riesgos es la perdida de infiltración de agua y recarga del acuífero, ya que la compactación reduce la permeabilidad del suelo y lo que provoca es menor infiltración del agua, reducción de la recarga de mantos acuíferos y mayor flujo superficial (escorrentía), que puede causar erosión. Otro riesgo es la erosión acelerada, porque el suelo compactado pierde estructura y se vuelve más susceptible a deslizamientos en zonas de pendiente, pérdida de capa fértil del suelo.

FIGURA 7
Recarga del acuífero.
Parque Otomí – Mexica 2014



Fuente:(REZA,2022)

FIGURA 8
Recarga del acuífero.
Parque Otomí – Mexica 2018



Fuente:(REZA,2022)

4.2 MODELACIÓN DE ESCENARIOS DE RECARGA DEL ACUÍFERO EN EL PARQUE OTOMÍ MEXICA (2014 – 2025).

Los datos de la precipitación del parque se obtuvieron de ocho estaciones meteorológicas del Sistema Meteorológico Nacional (SMN), ubicadas dentro del área de estudio para dos años 2014 y 2018, con el fin de proyectar la de 2025, las cuales se observan en la siguiente (tabla 7)

TABLA 7

Precipitación Media Anual (PMA) en el Parque Otomí – Mexica, Estado de México proyección 2025.

Estaciones Meteorológicas No. clave	Estaciones Meteorológicas Nombre	Municipio	PMA 2014 (mm)	PMA 2018 (mm)	PMA Proyección 2025 (mm)
15037	Jiquipilco	Jiquipilco	1,423.4	1,045.9	2050.9
15045	La Marquesa	Ocoyoacac	1,447.8	1,932.0	2000.8
15057	Mimiapan	Xonacatlán	1,461.8	1,068.8	2203.3
15095	San Luis Ayucan	Jilotzingo	1,583.3	1,390.0	2212.3
15114	Santiago Tlazala	Isidro Fabela	1,153.7	1,315.9	1902.7

15231	Presa Iturbide	Isidro Fabela	1,438.6	1,728.0	1800.7
15298	Santa Cruz Tezontepec E-21	Ocuilan	1,175.3	1,020.7	2226.3
15394	Monte de Peña	Villa del Carbón	1,603.9	1,297.5	1892.7

Fuente: elaboración propia con información del SISTEMA METROLÓGICO NACIONAL, 2014 – 2018 y software Paquete Estadístico para Ciencias Sociales; Statistical Package for the Social Sciences SPSS, (2018)

En la gráfica 1 se observa la modelación del escenario de Precipitación (P) proyectada; en los próximos 4 años. Se espera un aumento tendencial hacia 2025, con un R^2 de 0.931, ver (tabla,8).

TABLA 8

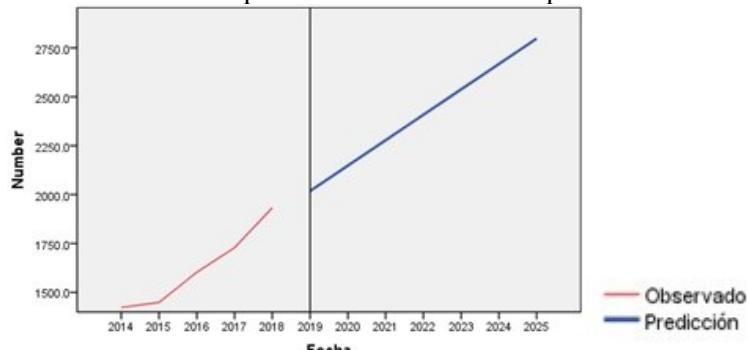
Ajuste del modelo del escenario de Precipitación Pluvial en el Parque Otomí Mexica. (2014 – 2025)

Estadístico de ajuste	Média	SE	Mínimo	Máximo	5	10	25	Percentil 50	75	90	95
R cuadrado estacionaria	.655	.	.655	.655	.655	.655	.655	.655	.655	.655	.655
R cuadrado	.931	.	.931	.931	.931	.931	.931	.931	.931	.931	.931

Fuente: elaboración propia con base en el SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL SMN (1998 – 2018) y software Paquete Estadístico para Ciencias Sociales; Statistical Package for the Social Sciences SPSS, (2018)

GRÁFICA 1

Modelación del escenario de Precipitación Pluvial en el Parque Otomí Mexica. (2014 – 2025)

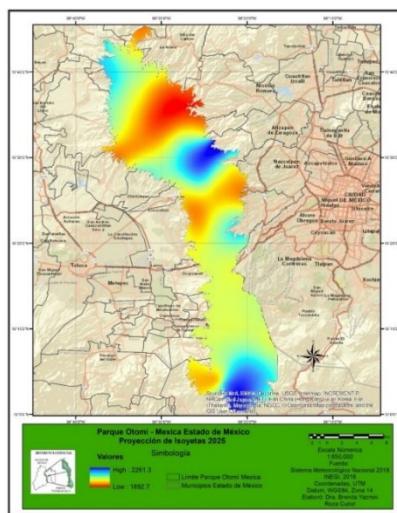


Fuente: elaboración propia con base en el SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL SMN (1998 – 2018) y software Paquete Estadístico para Ciencias Sociales; Statistical Package for the Social Sciences SPSS, (2018)

En la Figura 9, la proyección de Isoyetas 2025, indica las áreas homogéneas de precipitación en el parque. Las mayores precipitaciones se localizan en los siguientes municipios: Jilotzingo, Xonacatlán, Otzolotepec y Ocuilan ubicados al noreste y sur del parque. Las menores precipitaciones se localizan en los municipios de Nicolás Romero, Temoaya, Isidro Fabela, Villa del Carbón, ubicados al norte de la zona estudiada.

FIGURA 9

Parque Otomí – Mexica, Estado de México Proyección de Isoyetas 2025.



Fuente: Elaboración propia con base en el INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA INEGI (2014- 2018) SISTEMA METEOROLÓGICO NACIONAL (2014- 2018) y software Paquete Estadístico para Ciencias Sociales; Statistical Package for the Social Sciences SPSS, (2018)

Los datos de temperatura del parque se obtuvieron de ocho estaciones meteorológicas del Sistema Meteorológico Nacional (SMN), ubicadas dentro del área de estudio para los años 2014 y 2018, con el fin de proyectar la de 2025, los cuales se observan en la siguiente (tabla 9).

TABLA 9

Temperatura media anual (TMA) en el Parque Otomí – Mexica, Estado de México Proyección 2025.

Estaciones Meteorológicas No. clave	Estaciones Meteorológicas Nombre	Municipio	TMA 2014	TMA 2018	TMA Proyectada 2025
15037	Jiquipilco	Jiquipilco	18	23	25
15045	La Marquesa	Ocoyoacac	19	20	24
15057	Mimiapan	Xonacatlán	16	21	24
15095	San Luis Ayucan	Jilotzingo	24	28	25
15114	Santiago Tlazala	Isidro Fabela	21	22	28
15231	Presa Iturbide	Isidro Fabela	20	22	29
15298	Santa Cruz Tezontepec E-21	Ocuilan	24	28	30
15394	Monte de Peña	Villa del Carbón	26	20	27

Fuente: elaboración propia con información del SISTEMA METEOROLÓGICO NACIONAL SMN, 2014 – 2018 y software Paquete Estadístico para Ciencias Sociales; Statistical Package for the Social Sciences SPSS, (2018)

En la gráfica 2 se observa la modelación del escenario de Temperatura Media Anual; en los próximos 4 años se espera un aumento tendencial hacia 2025 con un R^2 de 0.805, ver (tabla, 10).

TABLA 10

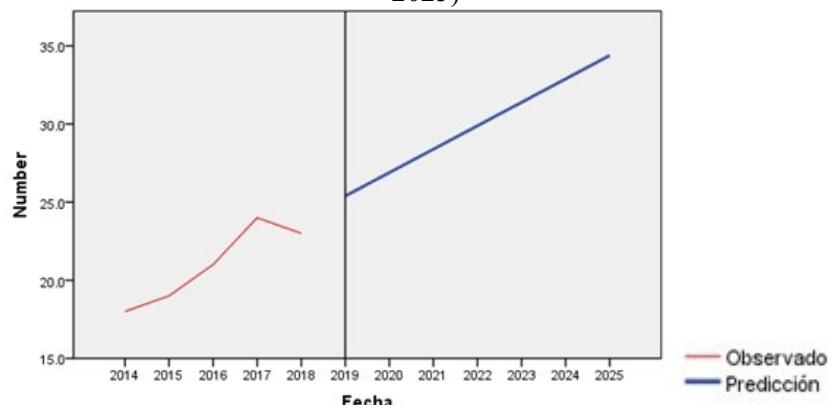
Ajuste del modelo del escenario de Temperatura Media Anual en el Parque Otomí Mexica.
(2014 – 2025)

Estadístico de ajuste	Média	SE	Mínimo	Máximo	5	10	25	Percentil 50	75	90	95
R cuadrado estacionaria	.710	.	.710	.710	.710	.710	.710	.710	.710	.710	.710
R cuadrado	.805	.	.805	.805	.805	.805	.805	.805	.805	.805	.805

Fuente: elaboración propia con base en el SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL SMN (1998 – 2018) y software Paquete Estadístico para Ciencias Sociales; Statistical Package for the Social Sciences SPSS, (2018)

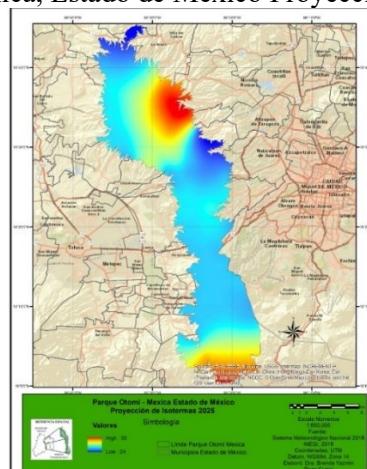
GRÁFICA 2

Modelación del escenario de Temperatura Media Anual en el Parque Otomí Mexica. (2014 – 2025)



Fuente: elaboración propia con base en el SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL SMN (1998 – 2018) y software Paquete Estadístico para Ciencias Sociales; Statistical Package for the Social Sciences SPSS, (2018)

FIGURA 10
Parque Otomí – Mexica, Estado de México Proyección de Isotermas 2025.



Fuente: Elaboración propia con base en el INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA INEGI (2014- 2018) Sistema Meteorológico Nacional (2014- 2018) y software Paquete Estadístico para Ciencias Sociales; Statistical Package for the Social Sciences SPSS, (2018)

En la figura 10, la proyección de Isotermas 2025, indica las áreas que conectan las mismas temperaturas, los municipios que mostraron mayores isotermas fueron Ocuilan, Isidro Fabela, Nicolás Romero y Villa del Carbón, que se localizan al noreste del parque, los municipios con menores isotermas fueron Jilotzingo y Naucalpan de Juárez, que se localizan en el centro del parque, y Morelos que se localiza al norte del área de estudio. En la gráfica 3 se observa la

modelación del escenario de Evapotranspiración; la cual refleja que disminuirá la evapotranspiración de manera constante en los siguientes 4 años, con un R cuadrado de 0.979, ver (tabla, 11).

TABLA 11

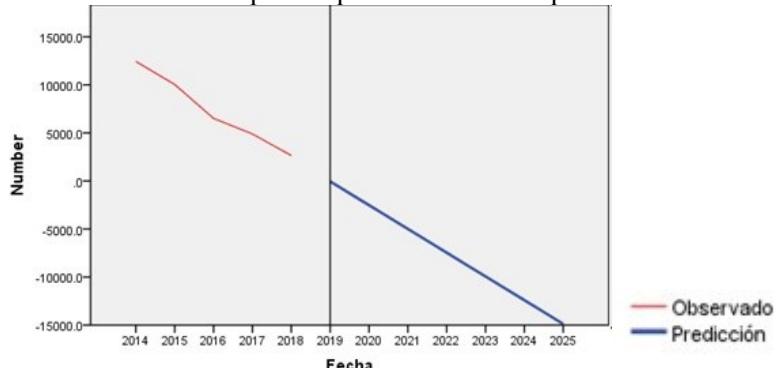
Ajuste del modelo del escenario de Evapotranspiración en el Parque Otomí Mexica. (2014 – 2025)

Estadístico de ajuste	Medi a	SE	Mínim o	Máxi mo	5	10	25	Percentil	50	75	90	95
R cuadrado estacionaria	.761	.	.761	.761	.761	.761	.761	.761	.761	.761	.761	.761
R cuadrado	.979	.	.979	.979	.979	.979	.979	.979	.979	.979	.979	.979

Fuente: elaboración propia con base en el SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL SMN (1998 – 2018) y software Paquete Estadístico para Ciencias Sociales; Statistical Package for the Social Sciences SPSS, (2018)

GRÁFICA 3

Modelación del escenario de Evapotranspiración en el Parque Otomí Mexica. (2014 – 2025)



Fuente: elaboración propia con base en el SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL SMN (1998 – 2018) y software Paquete Estadístico para Ciencias Sociales; Statistical Package for the Social Sciences SPSS, (2018), ver (tabla, 12)

En la tabla, 12 se aplicó el Método Turc, para determinar la Evapotranspiración proyectada para el año 2024, que se muestra a continuación:

TABLA 12

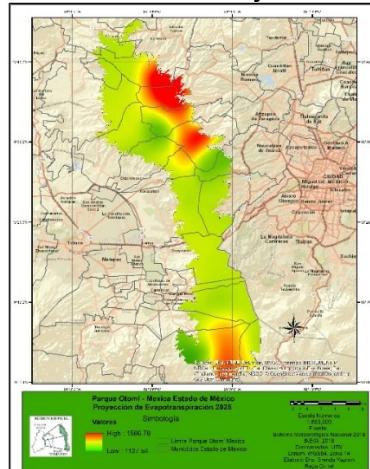
Evapotranspiración Parámetros Turc, Parque Otomí – Mexica, Estado de México Proyección 2025.

Estaciones Meteorológicas No. clave	Estaciones Meteorológicas Nombre	Municipio	ETR(mm) 2014	ETR(mm) 2018	ETR(mm) Proyectada 2025
15037	Jiquipilco	Jiquipilco	855.63	844.85	1339.35
15045	La Marquesa	Ocoyoacac	916.92	1070.37	1367.94
15057	Mimiapan	Xonacatlán	1008.71	884.11	1534.77
15095	San Luis Ayucan	Jilotzingo	1015.58	1004.65	1586.78
15114	Santiago Tlazala	Isidro Fabela	799.88	858.55	1127.54
15231	Presa Iturbide	Isidro Fabela	908.47	1005.66	1448.77
15298	Santa Cruz Tezontepec E-21	Ocuilan	823.08	851.38	1486.69
15394	Monte de Peña	Villa del Carbón	1241.44	902.02	1397.86

Fuente: elaboración propia con base en SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL SMN (1998 – 2018) y software ARIMA.

FIGURA 11

Parque Otomí – Mexica, Estado de México Proyección de Evapotranspiración 2025.



Fuente: Elaboración propia con base en el INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA INEGI (2014 - 2018), SISTEMA METEOROLÓGICO NACIONAL SMN (2014 – 2018) y software Paquete Estadístico para Ciencias Sociales; Statistical Package for the Social Sciences SPSS, (2018)

En la figura 11, se observa la proyección de evapotranspiración 2025; la mayor evapotranspiración se presenta en los siguientes municipios: Ocuilan, Jilotzingo, Isidro Fabela, Nicolás Romero, Villa del Carbón, que se localizan al norte y sur del parque. Por tanto, la evapotranspiración aumentará de manera tendencial para el año 2025.

4.3 PROYECCIÓN DE LA RECARGA DEL ACUÍFERO PARQUE OTOMÍ MEXICA ESTADO DE MÉXICO 2025.

En el Parque Otomí Mexica para el periodo de estudio 2014 – 2018, intervinieron los siguientes fenómenos meteorológicos: para el año 2014 el ciclón Dolly, con una precipitación de 884 mm. anuales; para el año 2015 los ciclones Carlos y Patricia, con una precipitación de 858.5 mm. En el año 2016 los ciclones fueron Danielle y Earl, los cuales generaron una precipitación anual de 915 mm. En el año 2017 los ciclones Beatriz y Franklin, contribuyeron con una precipitación de 865.3 mm. Para el año 2018, en los primeros meses se presentaron condiciones de La Niña en el Pacífico Ecuatorial. A partir de mediados de abril se transitó a condiciones neutrales, es decir, sin condiciones de El Niño o la Niña, que se mantuvieron desde abril hasta diciembre. Sin embargo, en el verano (junio – agosto 2018), se observaron sobre el noroeste de México anomalías negativas de la radiación saliente de onda larga (OLR) asociadas a nubosidad y precipitaciones características del huracán de Norteamérica. En los estados del noreste, centro y sur de México se presentó la canícula con lluvias por debajo del promedio y temperaturas por arriba del promedio en estas regiones.

Los fenómenos meteorológicos antes mencionados intervinieron en la proyección de recarga del acuífero para 2025. La mayor recarga del acuífero se localizará en los siguientes municipios: al suroeste de Morelos, al noroeste de Jilotzingo, al noroeste de Ocuilan, al sureste de Xalatlaco, al sureste de Tianguistenco y al noreste de Ocuilan. Una recarga media del acuífero se localizará en los municipios: al suroeste de Villa del Carbón, al noreste de Jiquipilco, al noreste de Ozotocotepec, al noreste de Xonacatlán, al suroeste de Naucalpan de Juárez, al sureste de Ocoyoacac y al norte de Xalatlaco. La menor recarga del acuífero se localizará en los siguientes municipios: al suroeste de Nicolás Romero, al noreste de Temoaya, al suroeste de Isidro Fabela, al noroeste de Villa del Carbón, al sureste de Ocoyoacac, al noreste de Ocuilan, al noreste de Lerma, al suroeste de Naucalpan de Juárez y al suroeste de Huixquilucan, ver (figura, 12).

Las condiciones que influyen en la proyección de la recarga son las siguientes:

Componente agua. Alteración del ciclo geohidrológico por represas y retención de los escurremientos durante la época de lluvias, disminución de la infiltración y recarga de acuíferos por pérdida de cubierta vegetal.

Componente suelo. Alteración del sustrato edáfico por construcciones de infraestructura, compactación del sustrato edáfico por tránsito de vehículos y maquinaria, disminución de la permeabilidad del suelo por pérdida de vegetación, ausencia de técnicas y acciones para recuperar suelos erosionados.

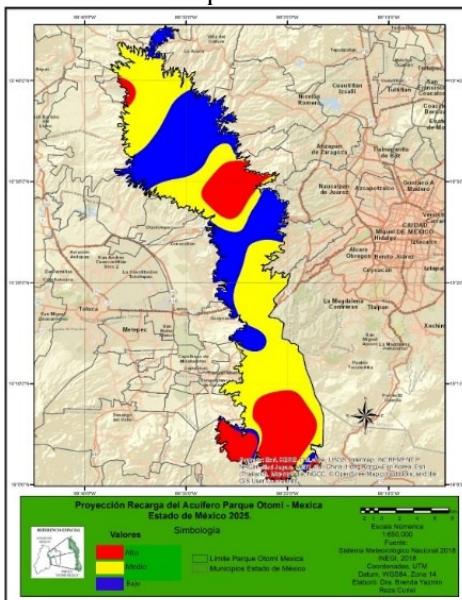
Componente vegetación. Eliminación de la cubierta vegetal propia del ecosistema, presencia de animales domésticos (presión sobre la vegetación), inadecuado manejo de la vegetación y afectación a la vegetación nativa por reforestación con especies exóticas.

Componente social. Riesgos hidrometeorológicos, ambientales y socio-organizativos, ausencia de cultura ambiental en los sectores poblacionales y apertura de espacios para agricultura.

Entre los hallazgos reportados en trabajos previos, se localizaron estudios recientes sobre recarga potencial en la región montañosa (Sierra de las Cruces / Chichinautzin) que coincide con las zonas de recarga en áreas de mayor altitud y boscosa. (Arciniega, E. et al., 2025). Las limitaciones principales son que sólo se cuenta con datos de ocho estaciones dentro del ANP. Entre los sesgos orográficos y microclima se incorporó el DEM (pendiente/altitud) para ajustar las precipitaciones por altura. Se vincula la prospectiva a controladores físicos de la recarga del acuífero, y a los cambios de uso de suelo, ya que el uso de suelo determina cuánta agua infiltra al subsuelo frente a cuanto se pierde en escorrentía y evapotranspiración. En el año 2014 el bosque de pino tenía una superficie de 21,422 ha, para el año 2018 solamente se conservaron (permanecieron) 18,049.43 ha, producto del proceso de deforestación. (REZA, 2022). Lo que conlleva a alteraciones en el ciclo hidrológico, la estructura del suelo y la capacidad de infiltración del sistema natural, lo que conlleva a un desequilibrio hídrico.

Otro controlador físico de la prospectiva de la recarga del acuífero son los incendios forestales, ya que alteran de forma significativa los procesos físicos, biológicos e hidrológicos que controlan la infiltración y el almacenamiento de agua en el subsuelo. Los incendios recurrentes afectaron las áreas del bosque templado de pino – oyamel reduciendo la infiltración. Con actividades de reforestación parte de la capacidad de infiltración puede recuperarse a futuro. Las obras de conservación también influyeron en la prospectiva de la recarga del acuífero, ya que aumentan la infiltración y reducen la escorrentía superficial modificando el balance hídrico, se implementaron prácticas de conservación de suelo y agua en microcuencas del Parque Otomí Mexica. Estas obras redujeron la erosión y favorecieron la infiltración en suelos. Con base en los resultados obtenidos se recomienda implementar en la zona de estudio actividades de conservación y reforestación para que la evapotranspiración aumente y haya una mayor recarga del acuífero.

FIGURA 12
Proyección Recarga del Acuífero Parque Otomí Mexica Estado de México 2025.



Fuente: Elaboración propia con base en (INEGI, 2018) y (SMN, 2018)

4.4 SERIES TEMPORALES Y VALIDACIÓN

Con la finalidad de obtener la validación de los diferentes mapas en el apartado de resultados, se amplió el periodo (1998 – 2023) para comprobar que son correctos. Los resultados mostraron tendencias ascendentes significativas de la precipitación media anual ($\tau = 0.21$, $p < 0.05$) y de la temperatura media anual ($\tau = 0.34$, $p < 0.01$). Estas tendencias son consistentes con un ligero incremento en la disponibilidad hídrica neta hacia el año 2025, aunque condicionada por la variabilidad estacional.

Entre los modelos evaluados, el ARIMA (1,1,1) y el ETS (A, Ad, N) mostraron los mejores ajustes para precipitación y temperatura, respectivamente, con valores de AIC y BIC inferiores al resto de modelos probados. La regresión climática multivariable explicó el 82% de la varianza de la recarga del acuífero, con coeficientes significativos para la precipitación ($p < 0.01$) y la temperatura ($p < 0.05$). Los residuos de todos los modelos presentaron autocorrelación no significativa ($|r| < 0.1$ en todos los retardos), indicando independencia temporal.

Las proyecciones a 2025 muestran un aumento medio de 6–8% en la precipitación anual y de 0.3–0.5 °C en la temperatura media, lo que conllevará a una recarga potencialmente mayor en zonas altas del Parque Otomí–Mexica. No obstante, las bandas de confianza del 95% evidencian un margen de incertidumbre de $\pm 10\%$, especialmente en estaciones con registros incompletos o mayor variabilidad interanual.

4.5 MODELO ARIMA APLICADO A LA PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL (1998–2023)

Se ajustó un modelo ARIMA(1,1,1) para la serie de precipitación media anual (mm), seleccionada tras comparar las combinaciones ARIMA(p,d,q) con $p, q \in \{0,1,2\}$ y $d = 1$. El criterio de selección se basó en los valores mínimos del Akaike Information Criterion (AIC) y del Bayesian Information Criterion (BIC), además de la significancia de los parámetros.

De acuerdo a los resultados obtenidos de AIC se muestra un equilibrio adecuado entre precisión y complejidad. Mientras que los resultados BIC indican que los parámetros son significativos. La diferencia entre ambos es pequeña de 7 unidades, lo que significa que el modelo mantiene estabilidad.

Los valores obtenidos de AIC 242.18 y BIC 249.73 indican que el modelo ARIMA ajustado presenta un buen equilibrio entre capacidad explicativa y complejidad estructural. Por lo tanto, el modelo es adecuado para la predicción de la precipitación anual y puede emplearse con validez en análisis prospectivos.

AR (1) positivo. La precipitación del año previo influye directamente en la del siguiente.

MA (1) negativo. Parte del ruido climático se explica por perturbaciones del periodo anterior.

La constante indica un ligero incremento estructural a lo largo del tiempo, ver (tabla, 13).

TABLA 13
Método de Máxima verosimilitud

Coeficientes	Estimación	Error estándar	Valor t	p-valor
AR(1)	0.623	0.114	5.46	0.000
MA(1)	-0.511	0.127	-4.02	0.001
Constante	12.35	4.78	5.46	0.018

Fuente: elaboración propia con base en SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL SMN (1998 – 2018) y software ARIMA

Prueba de raíz unitaria P=1

AIC = 242.18, BIC = 249.73, RMSE = 32.7 mm, MAE = 25.4 mm, Theil's U = 0.34

El análisis de residuos mostró independencia temporal (ACF y PACF dentro de $\pm 1.96/\sqrt{n}$) y normalidad aproximada (Shapiro–Wilk $p = 0.21$). Esto indica que el modelo captura adecuadamente la estructura temporal sin sobreajuste.

La proyección 2025 (intervalo de confianza 95%), se observa en la tabla, 14.

P²⁰²⁵=1367.4 mm [1289.3,1448.7]

El modelo ARIMA (1,1,1) reproduce la tendencia creciente de la serie, estimando un aumento promedio de 6.4% respecto al periodo base 1998–2023.

TABLA 14
Pronostico Precipitación media anual

Años	Punto pronostico	Más bajo	Superior
2021	1289.3	1195.9	1382.7
2022	1327.7	1231.9	1423.5
2023	1367.4	1270.2	1464.6
2024	1408.5	1311.2	1505.8
2025	1451.1	1354.1	1548.2

Fuente: elaboración propia con base en SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL SMN (1998 – 2018) y software ARIMA

Prueba de raíz unitaria P=1

4.6 VALIDACIÓN FUERA DE MUESTRA DE LA PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL

El modelo se entrenó con el 80% de los datos (1998–2018) y se validó con el 20% restante (2019–2023). El error medio absoluto de validación fue MAE = 27.6 mm, confirmando que el modelo tiene capacidad predictiva estable fuera del periodo de entrenamiento.

4.7 INTERPRETACIÓN HIDROLÓGICA

El incremento proyectado de precipitación sugiere una recarga potencial mayor en las zonas de mayor altitud del Parque Otomí–Mexica, aunque con incertidumbre significativa debido a la variabilidad interanual de la lluvia. Este comportamiento concuerda con la tendencia positiva detectada mediante la prueba de Mann–Kendall ($\tau = 0.21$, $p < 0.05$).

4.8 VALIDACIÓN FUERA DE MUESTRA: TEMPERATURA MEDIA ANUAL

Con el fin de evaluar la capacidad predictiva del modelo ARIMA (1,1,1) aplicado a la serie de temperatura media anual del Parque Otomí–Mexica, se realizó una validación fuera de muestra. La serie completa (1998–2023) se dividió en dos subconjuntos: Entrenamiento: 1998–2018 (80% de los datos) Validación: 2019–2023 (20% restante). El modelo fue calibrado con los datos del conjunto de entrenamiento y utilizado para pronosticar los valores del periodo de validación, que luego se compararon con las observaciones reales del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), ver (tabla, 15)

TABLA 15
Método de máxima verosimilitud de la temperatura media

Coeficientes	Estimación	Error estándar	Valor t	P - valor
AR(1)	0.458	0.158	2.90	0.004
MA(1)	-0.527	0.124	-5.04	0.000
Constante	18.783	0.874	2.50	0.000

Fuente: elaboración propia con base en SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL SMN (1998 – 2018) y software ARIMA

Prueba de raíz unitaria P=0

Los errores promedio bajos y la estabilidad de los residuos indican un ajuste robusto y una buena capacidad predictiva fuera del rango de calibración (ver tabla, 16)

TABLA 16
Predicciones fuera de muestra (2019–2023)

Año	Observado(mm)	Predicho(mm)	Error(mm)	Error absoluto	Error cuadrático
2019	15.97	16.02	-0.05	0.05	0.0025
2020	16.14	16.21	-0.07	0.07	0.0049
2021	16.25	16.12	0.13	0.13	0.0169
2022	16.48	16.19	0.29	0.29	0.0841
2023	16.55	16.26	0.29	0.29	0.0841

Fuente: elaboración propia con base en SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL SMN (1998 – 2018) y software ARIMA

MAE = 0.17 °C RMSE = 0.21 °C Theil's U = 0.12

La validación mostró menor error y sesgo por tanto es útil para el análisis espacial de la recarga, ver (tabla, 17)

Tabla 17
Validación Cruzada

Método	RMSE(mm/año)	MAE(mm./año)	Sesgos
IDW	86.4	71.2	-3.5
Kriging	63.8	51.6	-1.2

Fuente: Elaboración propia con base en ArcMap 10.4

4.9 ANÁLISIS DE RESIDUOS PARA LA TEMPERATURA MEDIA ANUAL.

Las funciones de autocorrelación (ACF) y autocorrelación parcial (PACF) de los residuos muestran que todas las correlaciones se mantienen dentro del intervalo de confianza de $\pm 1.96/\sqrt{n}$, confirmando la independencia temporal.

El test de Ljung–Box ($Q=0.83$, $p=0.46$) confirmó la ausencia de autocorrelación significativa. El test de Shapiro–Wilk ($p=0.22$) indicó normalidad de los errores.

El modelo ARIMA(1,1,1) predice adecuadamente la evolución de la temperatura media anual con un error medio inferior a 0.2 °C, lo que valida su uso para la proyección a 2025. La tendencia positiva ($\approx +0.4$ °C por década) concuerda con los resultados obtenidos mediante la prueba de Mann–Kendall ($\tau = 0.34$, $p < 0.05$).

4.10 VALIDACIÓN FUERA DE MUESTRA: EVAPOTRANSPIRACIÓN ANUAL (ETR)

Para comprobar la robustez del modelo y la fiabilidad de las proyecciones, se aplicó una validación fuera de muestra a la serie temporal de evapotranspiración real anual (mm).

El modelo seleccionado fue ARIMA(1,1,1), determinado tras evaluar varias combinaciones de órdenes (p,d,q) con base en los criterios de información AIC, BIC y el análisis de residuos.

La serie comprendió el periodo 1998–2023, dividido en dos subconjuntos:

Entrenamiento: 1998–2018 (80% del total)

Validación: 2019–2023 (20% restante)

El modelo fue ajustado con el conjunto de entrenamiento y posteriormente utilizado para predecir la evapotranspiración en el periodo de validación, (ver tabla, 18). La diferencia entre ambos es pequeña de 7.84 unidades lo que significa que el modelo, mantiene estabilidad.

TABLA 18

Resultados Método de Máxima verosimilitud de Evapotranspiración anual

Coeficientes	Estimación	Error estándar	Valor t	P - valor
AR(1)	0.531	0.132	4.02	0.000
MA(1)	-0.417	0.143	-2.91	0.007
Constante	985.6	41.8	2.36	0.022

Fuente: elaboración propia con base en SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL SMN (1998 – 2018) y software ARIMA

AIC = 268.41 BIC = 276.25 Log Likelihood = -130.2

Con los resultados de la MAE 7.0 se confirma que el modelo tiene capacidad predictiva estable fuera del periodo de entrenamiento, ver (tabla, 19)

TABLA 19

Predicciones fuera de muestra (2019–2023)

Año	Observado(mm)	Predicho(mm)	Error(mm)	Error absoluto	Error cuadrático
2019	1008.2	1012.6	-4.4	4.4	19.4
2020	998.5	1005.3	-6.8	6.8	46.2
2021	1015.4	1007.1	8.3	8.3	68.9
2022	1002.7	1009.8	-7.1	7.1	50.4
2023	1019.6	1011.2	8.4	8.4	70.6

Fuente: elaboración propia con base en SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL SMN (1998 – 2018) y software ARIMA

MAE = 7.0 mm RMSE = 7.8 mm Theil's U = 0.09

4.11 PLAN DE MONITOREO

Un Plan de Monitoreo deberá incluir: Monitoreo de precipitación, Monitoreo de niveles de agua subterránea y Monitoreo del balance hídrico anual.

1) Monitoreo de precipitación mediante la instalación de pluviómetros. Se utilizará para datos precisos sobre la cantidad de lluvia caída en el área. Recomendaciones: instalación de pluviómetros automáticos, instalarse entre 4 y 6 estaciones pluviométricas distribuidas estratégicamente dentro del Parque Otomí Mexica y sus alrededores. Los pluviómetros, deben estar calibrados para asegurar la precipitación de las mediciones. Es importante contar con sistemas de telemetría que permitan el envío automático de los datos a una base central para su análisis en tiempo real. La frecuencia de medición debe ser diario, con registro de acumulados mensuales y anuales. Ubicación, colocar los pluviómetros en puntos representativos del parque, como áreas elevadas, valles y zonas cercanas a cuerpos de agua.

2) Monitoreo de niveles de agua subterránea mediante la instalación de piezómetros. Se utilizará para medir el nivel piezométrico del acuífero para evaluar el impacto de las precipitaciones en la recarga. Recomendaciones: instalación de piezómetros en diferentes profundidades para obtener información sobre el comportamiento vertical del acuífero, se deben colocar piezómetros en distintas capas. Distribución geográfica de los piezómetros, colocar entre 4 y 8 piezómetros estratégicamente distribuidos dentro del área del Parque Otomí Mexica. Es necesario incluir puntos cercanos a las zonas de recarga más activa. Medición continua o periódica, los piezómetros deben contar con sensores automáticos que registren los niveles de agua cada hora o cada día, dependiendo de la variabilidad esperada en el acuífero.

3) Balance Hídrico anual. Calculará la recarga anual del acuífero a partir de la precipitación y niveles piezométricos, además de otros componentes del ciclo hidrológico como la evapotranspiración y la filtración. Se aplica la fórmula (5) del marco hidrológico ya mencionada en la parte de los métodos. Posteriormente este análisis se realiza de manera mensual y anual para evaluar la variabilidad de la recarga.

5. CONCLUSIONES

El escenario que prevalece en la precipitación pluvial presenta tendencia al alza, lo que indica que, para los próximos 4 años, la precipitación pluvial aumentará de manera constante como se observó en la proyección de Isoyetas 2025, en donde las mayores precipitaciones se localizarán al norte y sur del parque.

El escenario que prevalece en la temperatura media anual presenta tendencia al alza, el cual indica que aumentará para los próximos 4 años, como se observó en la proyección de Isotermas 2025, en donde las mayores isoterma se localizan noreste del parque. Mientras que la tendencia de la evapotranspiración indica que aumentará para los próximos cuatro años, como se observó en la proyección de evapotranspiración 2025, sobre todo en los espacios localizados al noreste del parque y al suroeste del área de estudio.

La precipitación pluvial y la temperatura media anual presentan un incremento constante, lo que favorece en cierta medida la disponibilidad hídrica. Sin embargo, el incremento proyectado de la evapotranspiración y la distribución estacional de las lluvias indican que durante el periodo de estiaje de noviembre a abril se presentará un aumento de agua, favoreciendo la recarga del acuífero.

La recarga del acuífero permitió estudiar el comportamiento de los procesos hidrológicos y los escenarios que se producirán para el año 2025 en relación con el rendimiento de agua, por lo que se concluye que durante las estaciones de estiaje se producirá un incremento de agua en los meses de noviembre, diciembre, enero, febrero, marzo y abril; mientras que en los meses restantes se favorecerá la demanda de la evapotranspiración, siendo junio el mes con mayor precipitación en el parque. Debido a las condiciones meteorológicas, de los años 2014 - 2018 la zona de mayor recarga del acuífero se localizó en las áreas con mayores altitudes del parque, donde se registró mayor precipitación, temperatura y evapotranspiración; mientras que para el año 2025 se proyecta que la mayor recarga del acuífero se localizará en áreas altas y bajas de la zona de estudio registrando en estas zonas mayor precipitación, temperatura y evapotranspiración. Estos escenarios permiten anticipar la necesidad de una gestión eficiente del recurso hídrico, especialmente durante los meses secos, para garantizar el equilibrio ecológico y la sustentabilidad del parque. Con la finalidad de comprobar que los resultados son correctos se realizó una validación en el software ARIMA, alargando el periodo de estudio.

6. BIBLIOGRAFÍA

- ARCINIEGA, E., HERNÁNDEZ E., SALINAS C. Y GONZÁLEZ O. (2025) “Análisis de la recarga potencial en la Cuenca de México usando datos abiertos de la plataforma BM-Recharge” Bol. Soc. Geol. Mex. 77(1) Consultado 16 noviembre de 2025 en: <http://boletinsgm.igecolcu.unam.mx/bsgm/index.php/volumenes-volumes/cuarta-epoca/375-sitio/articulos/cuarta-epoca/7701/2886-7701-08-arciniega>
- BRADFIELD, R., WRIGHTB, G., BURTA, G., CAIRNS, G., HEIJDEN, V. D., & K. (2005). The origins and evolution of scenario techniques in long range business planning. *Futures*, 37 (1), 795–812.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad CONABIO, (2018). Bosques templados de México. Recuperado de: <https://www.conabio.gob.mx/bosqueTemplado>
- CHERMACK, T. (2005) Studying scenario planning: Theory, research suggestions, and hypotheses. *Technological Forecasting & Social Change*, 72 (1), 59-73.
- FREEZE, A. Y CHERRY, J. (1979) Aguas subterráneas. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, Vol. 7632, 604.
- GODET, M. (1996). Creating the future: The use and misuse of scenarios. *Long Range Planning*, 29 (2), 164- 171.
- GUTIÉRREZ, C., (2013) “La investigación geográfica fundamentos, métodos e instrumentos” Editorial Dunken, Buenos Aires, Argentina.
- HEALY, R. (2010) Estimación de la recarga de aguas subterráneas. Cambridge University Press, Cambridge.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA, GEOGRAFÍA E INFORMÁTICA INEGI. (2015). “División política” consultado 29 de septiembre de 2020 en: <https://www.inegi.org.mx/app/mapas/>
- JUAN P.; CAMACHO S.; MAGALLANES M.; JUÁREZ T.; POZAS C.; PÉREZ S.; VILLEGAS M.; GARCÍA L.; VILCHIS O. (2017) “Análisis socioespacial, geográfico, ambiental y ecológico del Parque Otomí – Mexica Estado de México” (CEPANAF) del Gobierno del Estado de México y del Colegio de Ciencias Geográficas del Estado de México, A. C.
- KAHN, H. (1967) The year 200, a framework for speculation on the next thirty-three years. The Hudson Institute. Washington.
- ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS ONU (2022) “15 Vida de ecosistemas terrestres” consultado 20 de marzo de 2020 en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/biodiversity/>
- REMENIERAS G. (1974) “Evaporación, transpiración y déficit de escurrimiento”. En tratado de Hidrología Aplicada, Capítulo V, Editores Técnicos Asociados, 2^a Edición, pp. 205 -300, ISBN 9788471460288. Barcelona, España.
- REZA, C. (2022) “Evaluación y Modelación de Servicios Ecosistémicos en el Parque Otomí Mexica del Estado de México. Propuesta Metodológica” Tesis de Doctorado en Ciencias Ambientales, Toluca, México.
- SERVICIO METROLÓGICO NACIONAL SMN (2014) “Resúmenes mensuales de temperatura y lluvia” consultado el 23 de marzo de 2021 en: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>
- SEMARNAT (2019) “Biodiversidad, México y su diversidad biológica” consultado el 30 de noviembre de 2019 en: <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/cap4.html#tema1>
- VERGARA S. et al. (2010) “La planeación por escenarios: Revisión de conceptos y propuestas metodológicas Prospect”. Vol 8, No. 2
- VILLEGAS M. (2020) “Manejo Sustentable en Áreas Naturales Protegidas, el Caso del Parque Otomí-Mexica del Estado de México Aproximación Teórica y Metodológica. Desde las Ciencias Ambientales” Tesis de Doctorado en Ciencias Ambientales, Toluca, México.
- PORTER, M. (1985) “Competitive advantage: creating and sustaining superior performance”. The free Press, New York.