



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DIVISIÓN DE CIENCIAS FORESTALES

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

**DISPONIBILIDAD HÍDRICA ACTUAL Y FUTURA EN EL ORIENTE
DEL VALLE DE MÉXICO**

TESIS

Que como requisito parcial para obtener el grado de

MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta: OMAR CAMACHO PONCE

Bajo la supervisión de: DR. ALEJANDRO ISMAEL MONTERROSO
RIVAS

Chapingo, Estado de México, enero de 2020.



DISPONIBILIDAD ACTUAL Y FUTURA EN EL ORIENTE DEL VALLE DE
MÉXICO

Tesis realizada por **OMAR CAMACHO PONCE** bajo la supervisión del Comité
Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para
obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS

Director:



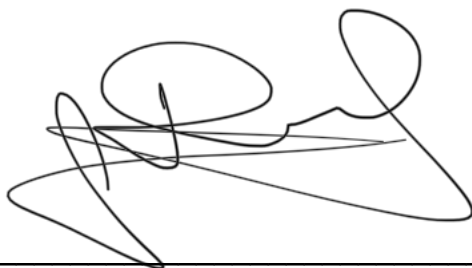
DR. ALEJANDRO ISMAEL MONTERROSO RIVAS

Asesor:

LUZ JUDITH R.E.

DRA. LUZ JUDITH RODRIGUEZ ESPARZA

Asesor:



DR. JESÚS DAVID GÓMEZ DÍAZ

| | |
|--|----|
| CONTENIDO | |
| RESUMEN GENERAL | X |
| ABSTRACT | XI |
| INTRODUCCIÓN GENERAL | 1 |
| REVISIÓN DE LITERATURA | 3 |
| Modelación Hidrológica | 3 |
| Tipos de modelos hidrológicos | 3 |
| Aplicación de modelos hidrológicos | 4 |
| Cambio Climático | 7 |
| Escenarios de cambio climático | 10 |
| Literatura citada | 11 |
| ÁREAS DE IMPORTANCIA HIDROLÓGICA Y FORESTAL EN EL ORIENTE DEL VALLE DE MÉXICO | 16 |
| Resumen | 16 |
| Introducción | 17 |
| Materiales y método | 19 |
| Resultados | 24 |
| Literatura citada | 32 |
| Anexos | 36 |
| PROPUESTA DE ALGORITMO PARA LA ESTIMACIÓN AUTOMATIZADA DEL BALANCE HÍDRICO MEDIANTE EL ALGORITMO THORNTHWAITTE EN R | 47 |
| Introducción | 47 |
| Materiales y método | 48 |

| | |
|--------------------------------|----|
| Resultados | 49 |
| Conclusiones | 84 |
| Literatura citada | 84 |

LISTA DE CUADROS

| | |
|--|----|
| Cuadro 1: Diferencias entre los parámetros de entrada bajo escenarios de cambio climático respecto al actual. | 26 |
| Cuadro 2: Valores medios anuales de los parámetros del balance hídrico bajo escenarios de cambio climático. | 27 |
| Cuadro 3: Resumen del modelo de regresión logística múltiple. | 29 |
| Cuadro 4: Error de entrenamiento del clasificador. | 30 |
| Cuadro 5: Estaciones meteorológicas descriptivas del área de estudio. | 36 |
| Cuadro 6: Modelos de regresión lineal de las isothermas en el oriente del Valle de México. | 36 |
| Cuadro 7: Estadísticos de precipitación media anual en las AIC del oriente del Valle de México. | 80 |
| Cuadro 8: Estadísticos de evapotranspiración media mensual en las AIC del oriente del Valle de México. | 81 |
| Cuadro 9: Estadísticos de diferencia entre precipitación y evapotranspiración potencial mensual en las AIC del oriente del Valle de México. | 81 |
| Cuadro 10: Estadísticos de almacenamiento de agua mensual en las AIC del oriente del Valle de México. | 82 |
| Cuadro 11: Estadísticos de excedente de agua mensual en las AIC del oriente del Valle de México. | 82 |
| Cuadro 12: Estadísticos de déficit de agua mensual en las AIC del oriente del Valle de México. | 82 |
| Cuadro 13: Estadísticos de cambio en el almacenamiento de agua mensual en las AIC del oriente del Valle de México. | 83 |
| Cuadro 14: Estadísticos de evapotranspiración actual mensual en las AIC del oriente del Valle de México. | 83 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: : Valores mensuales del balance hídrico: Escenario actual. | 25 |
| Figura 2: Clasificación de la importancia hídrica en las AIC. | 31 |
| Figura 3: Mapa de áreas de conservación forestal en el oriente del Valle de México. | 31 |
| Figura 4: Áreas de importancia hídrica en el oriente del valle de México: Escenario Actual. | 37 |
| Figura 5: Áreas de importancia hídrica en el oriente del valle de México: Escenario CRNRMCM45. | 38 |
| Figura 6: Áreas de importancia hídrica en el oriente del valle de México: Escenario CRNRMCM85. | 39 |
| Figura 7: Áreas de importancia hídrica en el oriente del valle de México: Escenario GFDL45. | 40 |
| Figura 8: Áreas de importancia hídrica en el oriente del valle de México: Escenario GFDL85. | 41 |
| Figura 9: Áreas de importancia hídrica en el oriente del valle de México: Escenario HADGEM45. | 42 |
| Figura 10: Áreas de importancia hídrica en el oriente del valle de México: Escenario HADGEM85. | 43 |
| Figura 11: Áreas de importancia hídrica en el oriente del valle de México: Escenario MPI45. | 44 |
| Figura 12: Áreas de importancia hídrica en el oriente del valle de México: Escenario MPI85. | 45 |
| Figura 13: Áreas de importancia hídrica en el oriente del valle de México: Predicción. | 46 |

DEDICATORIA

A la familia Camacho Ponce, mi familia, por ser la piedra angular en la construcción de mi persona, por brindarme aquellos valores necesarios para desarrollarme como un ser humano pleno y otorgarme los medios para materializar mis metas. A la familia Huerta Musil por su apoyo y guía durante esta etapa académica y emocional.

AGRADECIMIENTOS

A mi comité de tesis, el Dr. Alejandro Monterroso por su tiempo y objetividad dentro del desarrollo de mi investigación, a la Dra. Luz Rodríguez, por su inalcanzable sentido por la docencia y sus acertadas observaciones, y el Dr. David Gómez, por su amistad y aportes durante mi formación académica. A la Universidad Autónoma Chapingo y a la coordinación de posgrado de Ciencias Forestales por la oportunidad de continuar con mi formación académica y profesional. Agradezco a la Comisión Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico destinado a mi formación científica, haciendo posible la realización de la presente investigación y consecuentemente, fomentar el sector científico y tecnológico del país.

DATOS BIBLIOGRÁFICOS

Datos personales

| | |
|---------------------|---------------------|
| Nombre | Omar Camacho Ponce |
| Fecha de nacimiento | 14 de marzo de 1994 |
| Lugar de nacimiento | Ciudad de México |
| CURP | CAPO940314HDFMNM01 |
| Profesión | Agrónomo |
| Cédula profesional | 10879983 |

Desarrollo académico

| | |
|--------------|---|
| Bachillerato | Preparatoria agrícola, UACH |
| Licenciatura | Ingeniero en Recursos Naturales Renovables, UACH |

DISPONIBILIDAD HÍDRICA ACTUAL Y FUTURA EN EL ORIENTE DEL VALLE DE MÉXICO

RESUMEN GENERAL

La presión sobre los recursos hídricos y la modificación de la estructura climatológica global, han afectado la disponibilidad hídrica en el oriente del Valle de México, por lo que esta investigación tiene el objetivo de proponer áreas de conservación forestal, de acuerdo con las condiciones hidrológicas bajo escenarios de cambio climático. Se generó un algoritmo basado en el método Thornthwaite, para la cuantificación automatizada del balance hídrico; se zonificaron las áreas de influencia climática del oriente del valle de México; donde se evaluó la disponibilidad hídrica con el algoritmo generado, sobre escenarios de cambio climático CMIP5, respecto a las condiciones climáticas actuales; se propusieron áreas de conservación forestal, con la clasificación estadística de los parámetros hídricos, basado en la importancia hidrológica de las áreas generadas. Se obtuvieron 58 áreas de influencia climática, con tendencia a la disminución de la disponibilidad hídrica debido a incrementos en el déficit y disminución en el excedente de agua en 75.6 y 283.5 milímetros anuales, respectivamente, de acuerdo con los escenarios evaluados. El clasificador mostró un rendimiento del 94.4%, estableciendo 11 áreas con alta importancia hídrica conformadas principalmente por bosques de oyamel (*Abies religiosa* (Kunth) Shldl. & Cham. El algoritmo cuantificó satisfactoriamente los balances hídricos, mostrando su eficiencia en función de la memoria de acceso aleatorio del ordenador y a la cantidad de unidades de respuesta evaluadas. Se infiere, que la disponibilidad hídrica se mostrará afectada en un futuro cercano, causado por la disminución de la precipitación y la alteración de la distribución del recurso hídrico, mostrando riesgos a sequías y avenidas para cualquiera de los escenarios de cambio climático. Los resultados muestran que la importancia hidrológica está en función de la cobertura vegetal y la textura edáfica del territorio; asimismo, se prevé la disminución de la disponibilidad hídrica como consecuencia de la alteración de los regímenes de lluvia, afectando los procesos productivos y naturales en el área metropolitana de México, por lo que se recomienda la conservación de áreas forestales debido a su condición de alta importancia hídrica bajo cualquier escenario de cambio climático.

Palabras Clave: Modelación hidrológica, Balance Hídrico, Cambio Climático, Clasificación Estadística, Conservación Forestal.

CURRENT AND FUTURE WATER AVAILABILITY IN MEXICO VALLEY

ABSTRACT

Pressure on water resources and modification of the global climate structure has affected water availability in the east of the Valley of Mexico. This research has the objective of proposing areas for forest conservation according to the hydrological conditions under current and future climate change scenarios. An algorithm based on the Thornthwaite method was generated for the automated quantification of water balance; the east Valley of México was zonified into climatic influence areas using criteria in which water availability was evaluated with the algorithm generated under CMIP5 climate change scenarios with respect to the current climatic conditions; forest conservation areas were proposed based on statistical classification using water parameters and the hydrological importance of the generated areas. 58 areas of climatic influence were obtained, with a tendency to the decrease of water availability due to increases in the deficit and decrease in water surplus by 75.6 and 283.5 mm annually, respectively. The classifier showed a 94.4% efficiency, establishing 11 areas with high water importance mainly conformed of true fir (*Abies religiosa* (Kunth) Shldl. & Cham. forests. The algorithm successfully quantified the water balances, showing its efficiency based on the random-access memory of the computer and the number of response units evaluated. It is inferred that water availability will be affected in the near future, due to the alteration in the distribution and quantity of water resources, showing risks to floods and decrease in the recharge of the aquifer for any of the climate change scenarios. Results show that the hydrological importance is a function of the vegetation cover and the edaphic texture of the territory; likewise, the decrease in water availability is expected as a result of the alteration of rainfall regimes, which will affect the productive and natural processes in the metropolitan area of Mexico, so the conservation of forest areas is recommended due to their high water importance under any climate change scenario.

Keywords: Hydrological modeling, Water Balance, Climate Change, Statistical Classification, Forest Conservation.

INTRODUCCIÓN GENERAL

La presión sobre los recursos hídricos, la modificación de la estructura de los ecosistemas por las actividades antropológicas (Moss, 2010), y el cambio climático, han provocado alteraciones sobre los procesos hidrológicos (Zhang, 2018) y por ende, la disponibilidad hídrica (Koutroulis et al., 2019), comprometiendo la productividad de los ecosistemas (Deng, Liu, Wang, Shao, & Wang, 2019) y agroecosistemas (Bellard, Bertelsmeier, Leadley, Thuiller, & Courchamp, 2012); así como las condiciones socioeconómicas del entorno (Dufresne et al., 2013).

Entre las principales afectaciones ligadas al recurso hídrico a través de dicho cambio climático, se encuentra la modificación en la estructura del ciclo hidrológico, pues el cambio en las temperaturas y la precipitación, alteran la estructura biológica, el régimen y distribución de lluvias, el incremento en las tasas de evaporación y evapotranspiración (Ospina-Noreña, Domínguez-Ramírez, Vega-Rodríguez, Darghan-Contreras, & Rodríguez-Molano, 2017); en consecuencia, la polarización de las condiciones de humedad (Held & Soden, 2006), la disponibilidad de los recursos hídricos, lo cual afecta de manera directa a la productividad del sistema biológico (Lu, Bai, Li, & Wang, 2019) y las actividades humanas.

Lo anterior, implica que la evaluación de la disponibilidad hídrica requiere la construcción de escenarios a partir de la modelación de sistemas climáticos, (Lafontaine, Hay, Viger, Regan, & Markstrom, 2015), lo cual, permite evaluar la respuesta de los elementos relacionados a la dinámica hidrológica bajo diversas condiciones; en el caso de las condiciones climáticas futuras, se encuentran los modelos de circulación global propuestos por el CMIP5 (IPCC, 2014).

Por tanto, la importancia de esta investigación se justifica en la necesidad de evaluar los cambios en la disponibilidad hídrica en el sistema ambiental, representado a partir de diversas unidades de respuesta conformadas por las áreas de influencia climática tomando como base los escenarios potenciales de cambio climático respecto al estado de un escenario inalterado como eje de control del análisis espacio temporal, permitiendo observar la alteración del ciclo hidrológico, a través de la simulación del flujo del agua, la identificación y análisis de los componentes del ciclo hidrológico y la cuantificación de la

influencia ambiental y humana sobre este, permitiendo establecer una pauta para determinar las bases de un enfoque prospectivo en el que se analice los efectos de conservación forestal, como propuesta de manejo de los recursos hídricos en el Oriente del Valle de México; esto, bajo la premisa de que el cambio climático, disminuirá la disponibilidad hídrica, por lo cual, es necesaria la planeación territorial para controlar tales efectos, a partir del enfoque de conservación de ecosistemas.

Por lo anterior, el objetivo de esta investigación fue evaluar la disponibilidad hídrica en el oriente del Valle de México mediante la cuantificación del balance hídrico mensual bajo condiciones actuales y en distintos escenarios de cambio climático para proponer áreas de conservación forestal de importancia hidrológica.

REVISIÓN DE LITERATURA

Modelación Hidrológica

Entre las principales herramientas para representar la dinámica del ciclo hidrológico, se encuentra la modelación hidrológica, dada como una herramienta eficiente para simular los procesos hidrológicos (Xiong, Xu, Ren, Huang, & Huang, 2019) a partir de la integración de elementos ambientales estrechamente ligados al comportamiento hidrológico (Fei & Dudhia, 2001).

Dicha modelación, puede ser simulada a partir de distintos enfoques metodológicos bajo ciertas condiciones del entorno, permitiendo evaluar la distribución, comportamiento y manejo de los recursos hídricos en aquellas situaciones donde existen situaciones de conflicto dado diversos intereses (Schramm & Schramm, 2018), tales como el crecimiento poblacional y el cambio climático; esto, con base en un enfoque de análisis espacial para atender diversos objetivos para el manejo territorial (Pagliero, Bouraoui, Diels, Willems, & McIntyre, 2019), principalmente en cuencas hidrológicas (Moriasi et al., 2007); permitiendo tomar en consideración a las características biofísicas del entorno como piedra angular para el análisis del contexto histórico de evaluación y la toma de decisiones a un nivel escalar (Arnold, Srinivasan, Muttiah, & Williams, 1998).

Puesto que la construcción del modelo atiende a la representación del ciclo hidrológico bajo condiciones definidas por el ambiente, el nivel de la respuesta del modelo está basado en la composición de los elementos considerados dentro modelo hidrológico, de los cuales se modelan aquellos parámetros que forman parte de la dinámica hídrica, por lo que es importante, contar con aquellos datos que den la suficiente robustez al modelo generado.

Tipos de modelos hidrológicos

Los modelos hidrológicos están conformados por aquellos que simulan el ciclo hidrológico a través de la representación física, abstracta, determinística, probabilística o paramétrica de un entorno dado. La presentación física se construye mediante el establecimiento de prototipos; los modelos abstractos, son aquellos que representan dicho proceso de manera abstracta, ya sea de manera empírica o teórica (Mendoza, Bocco, Bravo, Siebe, & Ortiz, 2002), los cuales, se generan a partir de modelos conceptuales, dados como la

representación matemática de los procesos hidrológicos y ligados por una secuencia espaciotemporal; por otro lado, los modelos determinísticos, son modelos que permiten generar variables de respuesta de manera invariable a partir de una estructura matemática causa-efecto, pues las variables de entrada se encuentran en el espacio determinista, eliminando los agentes de incertidumbre; los probabilísticos, permiten generar la representación de los parámetros físicos estocásticos o determinísticos (Brooks, Ffolliott, & Magner, 2013) del fenómeno hidrológico, estos modelos son calibrados a partir de las observaciones del proceso hidrológico y construidos a partir de una distribución a priori de los parámetros; y los modelos paramétricos, hacen uso de estimaciones paramétricas de los componentes del ciclo hidrológico, a partir de expresiones matemáticas para cada uno de ellos, haciendo uso de una muestra de datos relacionados con relación a cada parámetro .

Asimismo, los modelos hidrológicos, se clasifican de acuerdo con la escala de respuesta del análisis en modelos globales y modelos distribuidos (Mendoza et al., 2002); por un lado, los modelos agregados esta constituidos como aquellos que tienen una escala de análisis global de la unidad territorial de estudio; mientras que el enfoque espacialmente distributivo, parte de un análisis basado en la regionalización territorial, permitiendo la integración de unidades para el análisis total del proceso hidrológico; en casos de cuencas no calibradas, donde no se cuenta con datos de verificación y validación de los parámetros del balance hídrico, la regionalización de cuencas para establecer los parámetros más importantes de los modelos hidrológicos puede resultar útil dado que permite un análisis con base en las características espacio temporales del entorno (Pagliero et al., 2019).

Aplicación de modelos hidrológicos

Tomando en cuenta las ventajas de análisis de la modelación hidrológica a partir de modelos espacialmente distribuidos y a la versatilidad de la construcción de los modelos paramétricos, se han analizado aquellos modelos utilizados frecuentemente en el análisis espaciotemporal del recurso hídrico, permitiendo calcular cada uno de los parámetros, en función de cada unidad de respuesta puesto que la cuantificación de los parámetros

del ciclo hidrológico, están dados como funciones de las características variables en el tiempo de la cuenca (Deng et al., 2019).

Una forma de estimación de los parámetros del modelo hidrológico es la utilización de la calibración a partir de métodos de regresión lineal o no lineal (tal como lo es "weighted and sequential regressions"), lo cual, permite estimar cada uno de los parámetros del modelo de manera independiente; y la regionalización a partir de los elementos más importantes del balance hidrológico con el uso de herramientas de agrupamiento supervisado, tal como lo es componentes principales (Zhang et al., 2018). Asimismo, el Partial Least Squares Regression permite establecer las características fisiográficas más importantes en el componente hidrológico (Pagliero et al., 2019).

Tomando en cuenta que algunos de los parámetros de los modelos hidrológicos son tanto estacionarios como no estacionarios, hay que tomar en cuenta que estos pueden variar temporalmente, principalmente por causas relacionadas a las actividades humanas y a la variabilidad climática (Deng et al., 2019). El método ensemble Kalman filter (EnKF) permite estimar los parámetros basado en observaciones de variables estacionarias, analiza las correlaciones entre los parámetros estimados, se construye un conjunto de parámetros y se prueba el rendimiento de los modelos.

Para que el modelo sea confiable, debe tener una sólida construcción con parámetros representativos. Dichos parámetros a veces son considerados como constantes, esto, tomando en cuenta que las cuencas tienen un proceso estacionario, sin embargo, los parámetros no son estacionarios, pues en el contexto hidrológico, existe una dinámica asequible con la interacción humana mediante procesos como la urbanización, la agricultura, el cambio en el uso de la tierra, entre otros (Deng et al., 2019). Entre los métodos de modelación hidrológica no estacionaria, se encuentran el "differential split sample test" (Klemeš, 1986), el cual toma en cuenta datos históricos y son divididos en subgrupos siendo que los parámetros se calibran para cada periodo; el "sequential data assimilation" tal como el EnKF, permite estimar los parámetros y estados de las variables hidrológicas de un modelo; los métodos de "time varying covariates", permiten establecer los parámetros de acuerdo a una función de covariables a nivel estacional, anual o decenal (Deng et al., 2019).

Otro de los modelos paramétricos de distribución espacial del balance hidrológico más utilizados, se encuentra el modelo “abcd”, el cual, toma en cuenta elementos importantes de la precipitación. Dicho modelo toma en cuenta el almacenamiento de humedad en el suelo, así como el almacenamiento de agua subterránea, dando como salidas flujo superficial y subterráneo del agua, entre las entradas de información que requiere el modelo, se encuentra la precipitación y la evapotranspiración potencial de la cuenca estudiada (Zhang et al., 2018).

En resumen, se estimaron los parámetros variantes en el tiempo, EnKF; se analizaron las correlaciones entre los parámetros estimados y las características de la cuenca (vegetación, clima, topografía); construir las funciones a través de un análisis de regresión.; finalmente, se eligió el modelo de función de parámetros usando índices hidrológicos como el índice de Nash.

La medición de los componentes del ciclo hidrológico in situ, puede ser poco eficientes dado que dichas medidas no pueden representar un fenómeno en una gran escala espacial, por lo que frecuentemente es utilizada la percepción remota en escalas pequeñas debido a que pueden presentar un menor error e incertidumbre (Moreira et al., 2019), el cual, permite la observación de la superficie terrestre y la atmosfera con base en el esquema de regionalización espacial, mientras que en grandes escalas, la percepción remota puede tener mayor error e incertidumbre por lo cual es necesario generar métodos in situ o paramétricos, a partir del desarrollo de metodologías ad hoc a la escala de estudio.

De acuerdo con Moreira et al. (2019), es posible la estimación de componentes del ciclo hidrológico a partir del satélite GRACE (2002) para cuantificar el almacenamiento de agua terrestre; el Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) y el Multi-Source Weigthed-Esemble Precipitation (MSWEP) para el caso de la precipitación; y el MODIS Global Evapotranspiration Project (MOD16) y el Global Land Surface Evapotranspiration: The Amsternam Methodology (GLEAM), La estimación de precipitación se hace a partir de la observación media mensual, mientras que la evapotranspiración de MOD16 se basa en el algoritmo Penman-Monteith y GLEAM en Priestley-Taylor un cuadrante de 0.5°.

El desempeño del modelo se puede medir a través de la eficiencia Kling-Gupta, la eficiencia Nash-Suftcliffe y el error del balance hídrico (WBE). Se puede medir la contribución de los efectos de cambio climático con una simple ecuación de proporciones. Se ha determinado que la actividad humana y el cambio climático puede generar una disminución en el escurrimiento superficial en casi un 10%, por lo que dichos elementos propician los eventos de sequía (Zhang et al., 2018).

Deng et al., (2019), establecen que tomar en cuenta a la evapotranspiración y la capacidad de almacenamiento de agua como parámetros variables en el tiempo, pueden generar un buen rendimiento de un modelo de dos parámetros, enfocado en la determinación del balance hídrico bajo un periodo mensual, obteniendo como respuesta el escurrimiento mensual.

Entre algunos de los modelos interdisciplinarios que permiten modelar diversos aspectos relacionados con los procesos hidrológicos, se encuentran el SWAT, VIC, TOPKAPI, SWATMOD, GSFLOW y el MIKE SHE, sin embargo, muchos de esos modelos no simulan con precisión los efectos de la agronomía sobre los procesos hidrológicos tales como la dinámica agua-suelo, el crecimiento de cultivos, entre otros.

Cambio Climático

El cambio climático está determinado como un cambio en la estructura y dinámica de los patrones climáticos expresados en variaciones de los valores medios de los parámetros meteorológicos en un largo lapso del tiempo (IPCC, 2013) debido a consecuencias de los procesos naturales o antropogénicos.

Entre los efectos del cambio climático se encuentra la disminución de áreas terrestres, la dinámica productiva de los agroecosistemas, la productividad humana, impactos en la salud humana, afectaciones en el turismo (Matsumoto, 2019), pues de acuerdo con (Seto, Fragkias, Güneralp, & Reilly, 2011), entre las causas del cambio climático de origen antropogénico, se encuentra la urbanización, las actividades productivas, el cambio de cobertura vegetal y uso de suelo, entre otros; así mismo, la urbanización tiene efectos sobre la condición climatológica de la zona (Darmanto, Varquez, Kawano, & Kanda, 2019). Por otro lado, existe evidencia de que el aumento en las emisiones de dióxido de

carbono en el siglo XXI, propician el calentamiento global y por tanto, el cambio climático (Cox, Betts, Jones, Spall, & Totterdell, 2000).

Entre los efectos del cambio climático se encuentra la alteración de los distintos sectores socioeconómicos y ambientales tales como la dinámica productiva de los agroecosistemas y ecosistemas, impactos en la salud humana, afectaciones en el turismo, ente otros (Matsumoto, 2019).

Lo anterior se basa en que el cambio climático se expresa en distintos componentes del entorno, tales como en la modificación sistemática de la estructura de los biomas (Parmesa G, 2003), pues existe evidencia de que el aumento en la temperatura global a fines del siglo XX, ha generado cambios en la distribución, dinámica y estructura de las especies silvestres (G Walter, 2002; Bellard, 2012); incrementos en la frecuencia de olas de calor (Schar, 2002); repercusiones en las condiciones socioeconómicas del entorno (Ziegler, 2019), tales como la salud (Woodward, 2019), alimentación (Matsumoto, 2019), o el crecimiento económico, incluso en países desarrollados (Du, D, 2017).

Dichas alteraciones, se expresan de igual manera sobre la productividad de los ecosistemas y agroecosistemas. Por un lado el cambio en la estructura climática afecta la provisión de servicios ambientales (Zarrineh, Abbaspour, & Holzkämper, 2019) por parte de los ecosistemas, tal y como es la provisión de agua y conservación del suelo (Hu, Gao, & Batunacun, 2019). Los agroecosistemas, tienden a disminuir sus rendimientos agropecuarios, debido a la baja productividad derivada de la reducción de insumos hídricos por parte de los organismos, así como de los cambios y afectaciones en las prácticas culturales de los productores agrícolas y pecuarios (Cochrane, Lewis, Engdaw, Thornton, & Welbourne, 2019).

Asimismo, existe evidencia de que el cambio climático puede generar afectaciones culturales, pues la disminución de la productividad agrícola de la tierra, actividad la cual tiene alta elasticidad sobre el mercado puede provocar alteraciones en la dinámica económica local y, por tanto, exista migración de agricultores a áreas de mayor dinámica económica (Zarrineh, Abbaspour, & Holzkämper, 2019).

En el sector salud, existe evidencia de que el cambio climático está ligado con la mortalidad debido a que las alteraciones en las temperaturas extremas, generan problemas en el sistema cardiovascular (Onozuka, Gasparrini, Sera, Hashizume, & Honda, 2019).

Económicamente, el cambio en las condiciones climáticas conlleva la necesidad de tomar medidas de adaptación lo cual, requiere de grandes inversiones, especialmente en país en desarrollo. Consecuentemente, dichas medidas requiere uso de alternativas para disminuir los impactos ambientales generados por el cambio climático, por lo que se es necesario el desarrollo de tecnología energética con bajo uso de carbón que permita prevenir costos sociales (Chen, Liu, & Cheng, 2019), sin embargo, tales alternativas requieren de una alta inversión económica y humana para la investigación, creación e implementación de tecnología.

Asimismo, la necesidad de adaptación al cambio climático en todos los sectores socioeconómicos, demanda un alto costo en la implementación de medidas que permitan disminuir los riesgos y afectaciones generadas por el cambio climático (Zarrineh et al., 2019).

Finalmente, se ha mostrado que el valor de los ecosistemas se encuentra afectado, pues la disminución de los servicios ambientales, se encuentran en función de la productividad del ecosistema, se estima que existe una pérdida de servicios ecosistémicos de entre \$ 4.3 y \$ 20.2 billones de dólares al año en el mundo (Costanza et al., 2014).

Desde una perspectiva ambiental, se observa que el cambio en la estructura meteorológica provocada por el cambio climático repercute en las condiciones del clima, pues el calentamiento global tiene efectos sobre la dinámica del flujo de la masa de aire, el transporte de humedad, el transporte de calor, entre otros; que a su vez, genera una alteración sobre la dinámica del vapor de agua como consecuencia de las elevadas tasas de evaporación y evapotranspiración (Ospina-Noreña et al., 2017), generando una distribución extrema de los recursos hídricos (Held & Soden, 2006).

Escenarios de cambio climático

El estudio del cambio climático, permite la evaluación del impacto en los cambios de los regímenes meteorológicos, y con ello, el papel y la dinámica de la mitigación sobre dichos cambios (Matsumoto, 2019), para ello, son utilizados aquellos modelos que permitan simular las condiciones climáticas, bajo diversas perspectivas en el futuro, que, en convergencia con la utilización de métodos cartográficos de interpolación climática en la superficie terrestre, permite el análisis espacial de las condiciones del entorno climático (Hijmans, Cameron, Parra, Jones, & Jarvis, 2005), bajo múltiples escenarios espaciales y temporales.

La construcción de escenarios climáticos se puede generar a partir de modelos matemáticos que simulen las condiciones de la estructura meteorológica, tal y como son los modelos CMIP5, o bien, mediante la proyección de las variables meteorológicas a partir de modelos probabilísticos a ciertas dimensiones dadas (Farjad, Gupta, Sartipizadeh, & Cannon, 2019).

Entre los modelos más utilizados para dicho fin, son utilizados los modelos generales de circulación (MGC) propuestos por el CMIP5 a distintos forzamientos radiativos, es decir, a distintos niveles de emisiones de radiación. Dicho forzamiento, permite evaluar relaciones entre las emisiones proyectadas y fenómenos relacionados con el clima tales, por ejemplo, las relaciones entre las condiciones sistema climático y salud (Onozuka et al., 2019); el cambio de cobertura vegetal y uso de suelo en el sector productivo; las afectaciones económicas del cambio climático, entre otros.

Asimismo, los modelos de circulación global permiten generar escenarios de análisis climático a un nivel espacial dinámico, excluyendo aquellos efectos micro climáticos de manera local (Darmanto et al., 2019) a diferentes escalas espaciales.

Literatura citada

- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. (1998). Large Area Hydrologic Modeling and Assessment Part I: Model Development. *Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 73–89.
- Bellard, C., Bertelsmeier, C., Leadley, P., Thuiller, W., & Courchamp, F. (2012). Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecology Letters*, 15(4), 365–377. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2011.01736.x>
- Brooks, K. N., Ffolliott, P. F., & Magner, J. A. (2013). *Hydrology and the management of watersheds*. (4th ed.; K N Brooks, P. F. Ffolliott, H. M. Gregersen, & L. F. DeBano, Eds.). Ames, USA: Iowa State University Press.
- Chen, Y., Liu, A., & Cheng, X. (2019). Quantifying economic impacts of climate change under nine future emission scenarios within CMIP6. *Science of The Total Environment*, 134950. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134950>
- Cochrane, L., Lewis, S. C., Engdaw, M. M., Thornton, A., & Welbourne, D. J. (2019). Using farmer-based metrics to analyze the amount, seasonality, variability and spatial patterns of rainfall amidst climate change in southern Ethiopia. *Journal of Arid Environments*, 104084. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2019.104084>
- Costanza, R., de Groot, R., Sutton, P., van der Ploeg, S., Anderson, S. J., Kubiszewski, I., ... Turner, R. K. (2014). Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, 26(1), 152–158. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.04.002>
- Cox, P. M., Betts, R. A., Jones, C. D., Spall, S. A., & Totterdell, I. J. (2000). Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature*, 408(6809), 184–187. <https://doi.org/10.1038/35041539>
- Darmanto, N. S., Varquez, A. C. G., Kawano, N., & Kanda, M. (2019). Future urban climate projection in a tropical megacity based on global climate change and local urbanization scenarios. *Urban Climate*, 29. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100482>

- Deng, C., Liu, P., Wang, W., Shao, Q., & Wang, D. (2019). Modelling time-variant parameters of a two-parameter monthly water balance model. *Journal of Hydrology*, 573, 918–936. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.04.027>
- Dufresne, J. L., Foujols, M. A., Denvil, S., Caubel, A., Marti, O., Aumont, O., ... Vuichard, N. (2013). Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model: From CMIP3 to CMIP5. In *Climate Dynamics* (Vol. 40). <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1636-1>
- Farjad, B., Gupta, A., Sartipizadeh, H., & Cannon, A. J. (2019). A novel approach for selecting extreme climate change scenarios for climate change impact studies. *Science of the Total Environment*, 678, 476–485. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.218>
- Fei, C., & Dudhia, J. (2001). Coupling an Advanced Land Surface – Hydrology Model with the Penn State – NCAR MM5 Modeling System . Part I : Model Implementation and Sensitivity. *American Meteorological Society*, 129(1), 569–585.
- Held, I. M., & Soden, B. J. (2006). Robust responses of the hydrological cycle to global warming. *Journal of Climate*, 19(21), 5686–5699. <https://doi.org/10.1175/JCLI3990.1>
- Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G., & Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25(15), 1965–1978. <https://doi.org/10.1002/joc.1276>
- Hu, Y., Gao, M., & Batunacun. (2019). Evaluations of water yield and soil erosion in the Shaanxi-Gansu Loess Plateau under different land use and climate change scenarios. *Environmental Development*, 100488. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2019.100488>
- IPCC. (2013). *Cambio Climático 2013: Bases Físicas*. Retrieved from https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=16439#.Xd7o2m5FxPY
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Retrieved from <https://www.ipcc.ch/>

- Klemeš, V. (1986). Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrological Sciences Journal*, 31(1), 13–24. <https://doi.org/10.1080/02626668609491024>
- Koutroulis, A. G., Papadimitriou, L. V., Grillakis, M. G., Tsanis, I. K., Warren, R., & Betts, R. A. (2019). Global water availability under high-end climate change: A vulnerability based assessment. *Global and Planetary Change*, 175, 52–63. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.01.013>
- Lafontaine, J. H., Hay, L. E., Viger, R. J., Regan, R. S., & Markstrom, S. L. (2015). Effects of Climate and Land Cover on Hydrology in the Southeastern U.S.: Potential Impacts on Watershed Planning. *Journal of the American Water Resources Association*, 51(5), 1235–1261. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12304>
- Lu, S., Bai, X., Li, W., & Wang, N. (2019). Impacts of climate change on water resources and grain production. *Technological Forecasting and Social Change*, 143, 76–84. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.01.015>
- Matsumoto, K. (2019). Climate change impacts on socioeconomic activities through labor productivity changes considering interactions between socioeconomic and climate systems. *Journal of Cleaner Production*, 216, 528–541. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.127>
- Mendoza, M., Bocco, G., Bravo, M., Siebe, C., & Ortiz, M. A. (2002). Modelamiento hidrológico espacialmente distribuido: una revisión de sus componentes, niveles de integración e implicaciones en la estimación de procesos hidrológicos en cuencas no instrumentadas. *Investigaciones Geográficas*, 47, 36–58. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112002000100004&nrm=iso
- Moreira, A. A., Ruhoff, A. L., Roberti, D. R., de Arruda Souza, V., da Rocha, H. R., & de Paiva, R. C. D. (2019). Assessment of terrestrial water balance using remote sensing data in South America. *Journal of Hydrology*, 575, 131–147. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.05.021>
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Liew, M. W. Van, Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in

- Watershed Simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50(3), 885–900.
- Onozuka, D., Gasparrini, A., Sera, F., Hashizume, M., & Honda, Y. (2019). Future projections of temperature-related excess out-of-hospital cardiac arrest under climate change scenarios in Japan. *Science of the Total Environment*, 682, 333–339. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.196>
- Ospina-Noreña, J. E., Domínguez-Ramírez, C. A., Vega-Rodríguez, E. E., Darghan-Contreras, A. E., & Rodríguez-Molano, L. E. (2017). Analysis of the water balance under regional scenarios of climate change for arid zones of Colombia. *Atmosfera*, 30(1), 63–76. <https://doi.org/10.20937/ATM.2017.30.01.06>
- Pagliero, L., Bouraoui, F., Diels, J., Willems, P., & McIntyre, N. (2019). Investigating regionalization techniques for large-scale hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 570, 220–235. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.12.071>
- Schramm, V. B., & Schramm, F. (2018). An approach for supporting problem structuring in water resources management and planning. *Water Resources Management*, 32(9), 2955–2968. <https://doi.org/10.1007/s11269-018-1966-9>
- Seto, K. C., Fragkias, M., Güneralp, B., & Reilly, M. K. (2011). A meta-analysis of global urban land expansion. *PLoS ONE*, 6(8). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0023777>
- Xiong, L., Xu, X., Ren, D., Huang, Q., & Huang, G. (2019). Enhancing the capability of hydrological models to simulate the regional agro-hydrological processes in watersheds with shallow groundwater: Based on the SWAT framework. *Journal of Hydrology*, 572, 1–16. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.02.043>
- Zarrineh, N., Abbaspour, K. C., & Holzkämper, A. (2019). Integrated assessment of climate change impacts on multiple ecosystem services in Western Switzerland. *Science of The Total Environment*, 135212. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135212>

Zhang, D., Zhang, Q., Qiu, J., Bai, P., Liang, K., & Li, X. (2018). Intensification of hydrological drought due to human activity in the middle reaches of the Yangtze River, China. *Science of The Total Environment*, 637–638, 1432–1442.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.121>

**ÁREAS DE IMPORTANCIA HIDROLÓGICA Y FORESTAL EN EL ORIENTE DEL
VALLE DE MÉXICO**
**HYDROLOGICAL AND FORESTRY RELEVANT ZONES IN THE EAST OF VALLEY
OF MEXICO**

Omar Camacho-Ponce¹, Alejandro Ismael Monterroso-Rivas¹, Luz Judith Rodriguez-Esparza², Jesús David Gómez-Díaz¹

¹Universidad Autónoma Chapingo. km. 38.5 Carretera México-Texcoco, Chapingo, México. ²Universidad Autónoma de Aguascalientes. Avenida Universidad 940, C.U., 20130 Aguascalientes, Ags.

Ideas destacadas:

- El valle de México ejerce fuerte presión sobre sus recursos hídricos.
- Se realizó un balance hídrico con enfoque actual y futuro de cambio climático.
- El método de clasificación incluyó un modelo de regresión logística múltiple.
- Se proponen áreas con importancia hidrológica y forestal.

Resumen

Introducción. La presión socioeconómica del área metropolitana de México sobre los recursos hídricos y la modificación climática de la región conlleva la necesidad de evaluar aquellas áreas con importancia hidrológica para su conservación.

Objetivo. Analizar parámetros hidrológicos en el oriente del Valle de México bajo condiciones actuales y de cambio climático para proponer áreas de conservación forestal con relevancia hidrológica.

Métodos. Se delimitaron las áreas de influencia climática (AIC) de la región; se aplicó el método de Thornthwaite modificado bajo un algoritmo que estima de manera automatizada los parámetros del balance hídrico. Se construyeron escenarios de cambio climático a partir de los modelos de circulación global MGC, CMIP5, y se hizo una comparación del balance hídrico de los escenarios de cambio climático respecto al escenario actual. Se generó un modelo de regresión logística múltiple como método de

clasificación para proponer áreas con alta importancia hidrológica y se propusieron áreas de conservación dado los resultados de dicho modelo.

Resultados. De 58 AIC generadas, 14 mostraron alta producción de servicios ambientales hidrológicos. Los balances hidrológicos bajo condiciones de cambio climático mostraron un incremento de 75.6 milímetros anuales de déficit y una disminución de 283.5 milímetros anuales en el excedente de agua; mostrando al MGC GFDL45 como el escenario más alterado y al CNRM85 como el más conservador. El modelo de regresión logística múltiple tuvo eficiencia de 94% clasificando 11 áreas forestales con alta importancia hídrica.

Conclusión. Es posible realizar balances hidrológicos que sirvan como base para proponer áreas de conservación forestal e hidrológica.

Palabras clave: balance hídrico; cambio climático; sequía, disponibilidad hídrica, clasificación estadística

Introducción

Los eventos hidrológicos extremos deben estudiarse ya que observan cambios que se asocian al cambio en el medio ambiente (Zhang et al., 2018) principalmente. Los cambios derivan de la modificación de los ecosistemas a través de las actividades antropológicas y de la dinámica natural del ambiente. De acuerdo con el IPCC (2013) el incremento de temperatura global y regional es inevitable, pues proyecciones generadas a través de escenarios con alto nivel de confianza estiman que existirá un incremento de al menos 1.5°C en la temperatura para finales del siglo XXI. Asimismo, se espera una distribución extrema de los recursos hídricos, incrementando las sequías y las inundaciones.

Estos fenómenos de calentamiento global y cambio en la distribución del agua son consecuencia del cambio climático, el cual es considerado como un proceso en el que se muestra variación de los valores medios de los componentes climáticos en largos lapsos de tiempo, atribuidos a los procesos naturales de los sistemas ambientales o a la actividad antropológica de manera directa o indirecta (Moss et al., 2010). Se genera alteración de los regímenes atmosféricos, con consecuencias regionales en las

condiciones ambientales, puesto que la alteración de la composición atmosférica fomenta los cambios en la proporción de carbono y nitrógeno en la estructura geológica y edafológica de la tierra (litósfera); el cambio en la cobertura vegetal; la acumulación de gases de efecto invernadero; entre otros.

Adicionalmente, este fenómeno, de manera horizontal con la presión sobre los recursos naturales hidrológicos, tiene sólidos efectos sobre la dinámica hidrológica, tal y como es la disminución en la precipitación media, lo cual, impacta sobre el flujo de la masa de aire, el transporte de humedad, el transporte de calor, entre otros; asimismo, existe una alteración sobre la dinámica del vapor de agua como consecuencia de las elevadas tasas de evaporación y evapotranspiración (Ospina-Noreña, Domínguez-Ramírez, Vega-Rodríguez, Darghan-Contreras, & Rodríguez-Molano, 2017), afectando el flujo de radiación y en consecuencia, la polarización de las condiciones de humedad (Held & Soden, 2006), así como la disponibilidad de los recursos hídricos.

Por esta razón, el cambio climático es un fenómeno relacionado con la estructura de los regímenes atmosféricos, en el que se alteran aquellos procesos del medio biofísico; generando un riesgo potencial en la modificación de la biosfera a través de cambios en la dinámica y estructura ecológica, hecho que afecta de manera directa a la productividad del sistema biológico (Lu, Bai, Li, & Wang, 2019), y por tanto, repercute en la dinámica del sistema socioeconómico (Du, Zhao, & Huang, 2017).

El análisis de los fenómenos generados por implicación del cambio climático requiere su representación a través de herramientas cuantitativas que permitan simular los procesos de manera homologa a la realidad. Es por ello, que la evaluación de los antecedentes históricos en conjunto con la modelación de sistemas climáticos (Lafontaine, Hay, Viger, Regan, & Markstrom, 2015), son fundamentales para la cuantificación de aquellos parámetros, que cuenten con la robustez necesaria, para la generación de una respuesta ad hoc a los resultados esperados para la interpretación del sistema y de las interacciones evaluadas.

Por lo anterior, este estudio tiene la finalidad de evaluar la disponibilidad hídrica en el oriente del Valle de México mediante la cuantificación del balance hídrico mensual bajo condiciones actuales y en distintos escenarios de cambio climático para proponer áreas de conservación forestal y de importancia hidrológica.

Materiales y método

Área de estudio. Se seleccionaron microcuencas pertenecientes a la región hidrológica RH26Dp (INEGI, 2014) con alto índice de superficie forestal. Se procesó el modelo digital de elevación con resolución de 15 por 15 metros por píxel de la región hidrológica administrativa Oriente del Valle de México y se delimitaron las microcuencas. El área de estudio está conformada por cinco microcuencas de los ríos: Papalotla, Chapingo, Coxacoaco, Texcoco y Xalapango. Colinda al norte con la microcuenca del río Teotihuacán, al sur con la microcuenca del río San Berna, al este con el vaso del ex lago de Texcoco y al oeste con el estado de Tlaxcala. La altitud del área va de los 2200 a los 4200 msnm, con una altitud media de 2650 msnm y una pendiente media del 14%. Tiene una extensión territorial de aproximadamente 42,754 hectáreas, las cuales está conformadas principalmente por áreas agrícolas (alrededor del 46%), áreas forestales (30% del área) con dominancia de bosque de pino, encino, oyamel, vegetación secundaria y bosque cultivado. Alrededor de 15% de superficie corresponde a áreas de pastizal y matorral, el 8% a asentamientos humanos y el resto a áreas sin vegetación aparente (INEGI, 2017).

Áreas de Influencia Climática. Las unidades territoriales de evaluación estuvieron basadas en los modelos hidrológicos espacialmente distribuidos, lo cual, permite la generación de múltiples respuestas, en las cuales se cuantificó la disponibilidad hídrica del territorio. La generación de dichas unidades territoriales estuvo basada a partir de la zonificación con base en la generación de Áreas de Influencia Climática (en adelante AIC), las cuales, estuvieron conformadas por las áreas de rangos de precipitación media anual y temperatura media anual.

En principio, se recolectó aquella información climatológica perteneciente al área de influencia climática, lo cual, permitió la evaluación espacio temporal de las unidades territoriales de respuesta basadas en la dinámica climática de la región. Entre las fuentes de información climática utilizadas para tal fin durante el periodo entre el 1ro de enero de 1950 y el 31 de diciembre de 2015 se encuentran 20 estaciones meteorológicas (Anexo 1).

Los rangos de precipitación media mensual se realizó mediante la interpolación de la información de precipitación, a partir de la generación de isoyetas basado en el método de analogías y análisis de la relación entre la cantidad de lluvia y los sistemas de circulación de viento global y regional (Gómez et al., 2008). Los rangos de temperatura media anual estuvieron basados en la generación de isotermas, las cuales, se construyeron a partir de modelos de regresión lineal con la forma:

$$Y=(\beta_0+\beta_1X+\varepsilon) \quad (1),$$

donde Y es la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) estimada, β_0 está dada como el intercepto del modelo, β_1 el rango adiabático, X la altura del territorio y ε es el error. Lo anterior a partir de las 20 estaciones meteorológicas del área de influencia, esto, a fin de determinar el rango adiabático de la zona.

Balance Hídrico. Los modelos de simulación de balance hidrológico se desarrollaron a partir de la generación de un algoritmo propuesto en R, el cual, está basado en la metodología Thornthwaite modificado (Ospina-Noreña et al. 2017) para la estimación mensual de parámetros hídricos bajo escenarios de cambio climático. Lo anterior permitió la generación de un balance hídrico para cada una de las Áreas de Influencia Climática, a través de un modelo centrado en la dinámica del agua en el suelo y la atmosfera.

El modelo usa como insumos principales la precipitación y la evapotranspiración media mensual del área de estudio. A partir del Atlas Climático Digital de México (Fernandez-Eguiarte, Zavala-Hidalgo, & Romero-Centeno, 2019) se extrajeron las variables de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima para cada una de las AIC. Para calcular la evapotranspiración potencial se utilizó el método de Penman-Monteith modificado por FAO (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006).

El desarrollo del algoritmo comienza en la determinación de los meses húmedos y secos del año, lo cual, se establece mediante la cuantificación de la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración potencial, siendo que aquellos meses en los que $Pp - ET_o < 0$ son lo meses secos, mientras que de lo contrario serán meses húmedos. Posteriormente se cuantifica la reserva de agua almacenada (AL), la cual, se expresa como:

$$AL_{i=1,\dots,12}=AL_{i-1}+(Pp_{i=1,\dots,12}-ET_{o_{i=1,\dots,12}}). \quad (3)$$

Cuando existen meses húmedos de manera consecutiva, aumenta la retención de agua en el suelo en función de su capacidad de almacenamiento de agua (CAP) pero si existen más salidas que entradas, comúnmente cuando existen varios meses secos, dicha retención disminuye y se asume que la humedad almacenada es nula, por lo que el cálculo comienza con el primer mes húmedo del año, considerando al mes anterior con una reserva nula, por lo que el almacenamiento de ese mes es la diferencia positiva entre Pp y ETo y para el cálculo del siguiente mes esta dado por el almacenamiento del mes anterior y la diferencia entre Pp y ETo del mes actual.

Dado que el almacenamiento de agua utilizable en el suelo no es uniforme, pues depende de las características del territorio, se ponderó los valores de CAP , de acuerdo con los valores en mm (Monterroso Rivas & Gómez 2003) en función de la cobertura vegetal, la textura del suelo y la superficie de cada una de las AIC.

De acuerdo con el modelo presentado se establece que en caso de que $AL > (CAP)$, existirá un excedente de agua, que, de acuerdo con el método Thornthwaite, está compuesto por la infiltración de agua en el suelo considerada como recarga del manto acuífero y el escurrimiento superficial, dentro del algoritmo, se establece que $Exd = AL - CAP$, cuando el valor es mayor de 0, mientras que AL se actualiza al valor de CAP , de otra manera, si Al está por debajo de 0, se asignará el valor de 0 a AL , y la diferencia, se determinará como Déficit de agua (DEF), finalmente, si el valor de Al se encuentra entre 0 y CAP , Al es equivalente al resultado obtenido por formula 3 hasta que el ciclo anual se completa.

Finalmente, se cuantificó la variación entre la reserva y el almacenamiento de agua (ΔAl), se calculó con base en el resultado de la diferencia entre los valores de AL_i y AL_{i-1} , si dicho valor resulta positivo, se considera que existe reemplazo de humedad de suelo, si este es negativo, se asume la humedad del suelo es utilizada.

Escenarios de cambio climático. Un escenario de cambio climático es la diferencia entre un escenario climático y el clima actual. Para este estudio, se determinaron las variables meteorológicas de temperaturas mensuales promedio máximas, mínimas y medias de las condiciones y futuras actuales a partir del geoprocesamiento cartográfico del Atlas Climático Digital de México (Fernandez-Eguiarte et al., 2019) para cada uno de

los centroides de las AIC. Los escenarios de cambio climático, basados en los Modelos Generales de Circulación (MGC) de *Couple Model Intercomparison Project Phase 5* (CMIP5, 2013) y forzamientos radiativos o trayectorias representativas de concentraciones (RCP) bajo las condiciones de altas y bajas emisiones (RCP 8.5 y RCP 4.5 respectivamente) con una resolución espacial de 30" con un horizonte futuro cercano para el periodo 2015-2039, esto, con objetivos de planeación de manera horizontal con los planes de desarrollo y otros instrumentos de política pública ambiental y de gestión territorial.

Clasificación. El proceso de clasificación es aquel en que se predice y asigna a una observación, una categoría de un conjunto dado, asumiendo que las variables de respuesta a obtener son cualitativas. Algunos métodos de clasificación predicen la probabilidad de cada una de las categorías de una variable cualitativa, como la base para hacer la asignación de una observación a una clase dada (James, Witten, Hastie, & Tibshirani, 2013). Entre los clasificadores de uso generalizado tal y como es en la regresión logística, se utiliza a un conjunto de observaciones de entrenamiento $(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$, para construir el clasificador. En este caso, se utilizó el conjunto de datos pertenecientes a los parámetros del balance hídrico de cada una de las Áreas de Influencia Climática, para determinar la "Importancia" o "No importancia hidrológica" de dicha área, partiendo del método de regresión logística múltiple. Dicha importancia se determinó en aquellas AIC en las que el excedente hídrico (EXD) fue positivo y con déficit de humedad (DEF) nulo o con valor de 0. Se asume que en aquellas áreas donde existe excedente hídrico se proporciona un servicio hídrico de recarga del manto acuífero y se generan escurrimientos superficiales. Estos últimos pueden ser manejados para distintos propósitos productivos y que al no existir un déficit de agua la distribución espaciotemporal de los recursos hídricos reduce el efecto de la presencia de eventos hidrológicos extremos, particularmente de la sequía.

La regresión logística modela la probabilidad de que, Y pertenezca a una determinada categoría, es decir, se modela la relación entre $p(X) = P(Y = 1|X)$ y X . Si se utilizara un modelo de regresión lineal los valores obtenidos pueden ser mayores a uno o menores a 0. Asimismo, si se tuvieran más de dos variables la asignación de una variable ficticia a

cada categoría podría generar un error, pues las relaciones entre dichas variables serían distintas.

Dado que la construcción del modelo predictor requiere que la variable de respuesta sea binaria, en este caso como Importancia hidrológica y No importancia hidrológica, se requiere determinar la probabilidad de que dicha categoría sea una u otra, donde $Y \{0 = ImportanciaHidrológica, 1 = SinImportanciaHidrológica\}$, siendo que si $Y < 0.5$, existe Importancia Hidrológica en la AIC, y por el contrario, no existe Importancia Hidrológica si no se cumple dicha restricción. Dado la función logística:

$$\text{Prob}(x) = \frac{e^{-(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_n x_n)}}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_n x_n)}} \quad (4),$$

donde x_n son cada una de las variables del balance hídrico, dados por la precipitación (Pp), la evapotranspiración de referencia (ET_0), la evapotranspiración real (ETR), el almacenamiento de agua (AL), el excedente de agua (EXD) y el déficit de agua (DEF); mientras que los β son los coeficientes de cada una de las variables; para hacer estimaciones, es necesario calcular cada uno de los coeficientes de dichas variables. Como los coeficientes β son desconocidos, requieren ser estimados basados en los datos de entrenamiento disponibles, para ello, es utilizado el método de máxima verosimilitud ajustado al modelo de regresión logística donde las estimaciones para β son tal que la probabilidad predicha $p(x_i)$ estimada de la categoría evaluada, corresponda lo más cerca posible a la observación:

$$L(\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_n) = \prod_{i:Y_i=1} p(x_i) \prod_{i:Y_i=0} (1 - p(x_i)) \quad (5).$$

Se asume que las variables son independientes entre sí mismas, por lo que el cálculo de dichos parámetros resulta del producto de las probabilidades individuales de que un elemento pertenezca a la categoría Sin Importancia Hídrica $p(x_i)$ por las probabilidades de que dichos elementos pertenezcan a la categoría "Importancia Hidrológica" dada como $1 - p(x_i)$.

Con los parámetros calculados, se pueden hacer inferencias en la clasificación de los elementos; puesto que (1) puede expresarse como equivalente de:

$$\frac{p(x)}{1-p(x)} = 1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_n x_n)} \quad (6)$$

y aplicando el logaritmo a dicha igualdad, tenemos que:

$$\log \frac{p(x)}{1-p(x)} = (\beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_n x_n), \quad (7)$$

el logit dado cómo la función de una regresión logarítmica, expresa un cambio de X de manera logística en $p(X)$, generando valores de entre 0 y 1 dado los coeficientes calculados con la función de máxima verosimilitud.

Una vez generado el modelo, y evaluada el rendimiento de este mediante el error de entrenamiento, se aplicó el clasificador sobre la media de los parámetros bajo todas las condiciones de cambio climático y el escenario inalterado, a las cuales fueron calculados los balances hídricos de cada una de las AIC y con ello, se propusieron como áreas prioritarias de conservación forestal, aquellas con una probabilidad mayor al 50%, de pertenecer a la categoría de “Importancia hidrológica” dado las probabilidad de llegar a cualquiera de esos escenarios y que dentro de su estructura territorial, contara con áreas forestales bajo cualquier clase de dinámica ecológica.

Resultados

Áreas de influencia climática. Se obtuvieron 58 Áreas de Influencia Climática divididas en 22 clases de combinaciones entre los rangos de precipitación a cada 100 milímetros y de temperatura a cada un °C. Las isoyetas generadas muestran una distribución de los rangos de precipitación los 500 y los 1000 milímetros dentro de la región, mientras que las isotermas, fueron construidas a partir del análisis y cuantificación de los modelos de regresión lineal para cada rango de temperatura mensual y anual (Anexo 2), mostrando valores de entre 4 y 17°C en la zona de estudio.

Balance hídrico actual. La simulación del balance hídrico bajo las condiciones climatológicas actuales muestra que la disponibilidad hídrica se encuentra estrechamente ligada a la capacidad de almacenamiento de agua del territorio (Pervez & Henebry, 2015), siendo que, la interacción entre la composición ecológica y la estructura edafológica, muestra que las áreas forestales, representadas principalmente por ecosistemas de alta densidad con un bajo coeficiente de escurrimiento (Lafontaine et al., 2015); y, los suelos de textura media (Blanco-Sepúlveda, 2009); generan las condiciones que permiten una mayor capacidad de almacenamiento de agua. En la Figura 1 se muestran como ejemplo las variables del balance hídrico generalizadas para la zona de estudio.

De acuerdo con los parámetros calculados, se estima una precipitación media anual de 751 milímetros, mientras que, los parámetros de evapotranspiración potencial y real se conforman por una lámina de 837 y 1033 milímetros anuales. El modelo mostró que el oriente del Valle de México tiene un almacenamiento de hasta 205 milímetros mensuales, generando un excedente de agua de hasta 92 milímetros y registra un déficit de 196 milímetros de agua.

La disponibilidad hídrica se muestra en función de las condiciones meteorológicas de la región, pues se observa que existe un mayor excedente en el periodo de verano-otoño, siendo la época en la que existe una mayor acumulación de precipitación y menores tasas de evapotranspiración potencial y real, incluso, se muestra una intersección entre las variables de evapotranspiración y excedente durante el mes de septiembre, mostrando un equilibrio en la demanda del sistema y la generación de servicios ambientales hidrológicos (SAH); mientras que por el contrario, durante la época de invierno-primavera existe mayor déficit de agua, fenómeno ligado a las altas tasas de evapotranspiración potencial y real, puesto que la cantidad de precipitación es prácticamente nula, condicionando la disponibilidad de recursos hídricos, a la capacidad de almacenamiento de cada una de las AIC, según su composición territorial.

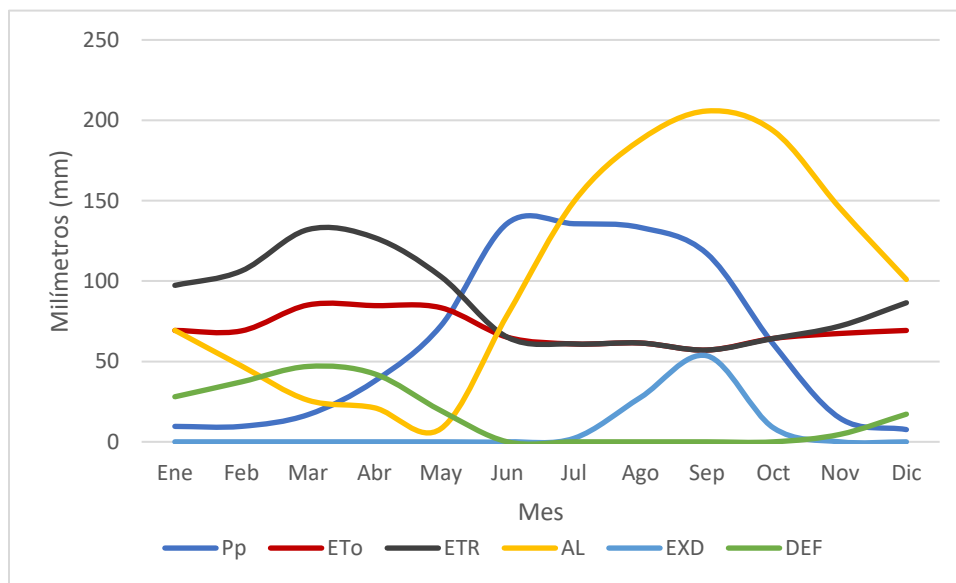


Figura 1: : Valores mensuales del balance hídrico: Escenario actual. Donde Pp=precipitación, Eto= Evapotranspiración potencial, ETR= Evapotranspiración real, Al= Almacenamiento de agua, EXD= Excedente de Agua y DEF= Déficit de agua. Fuente: Elaboración propia.

Lo anterior permite observar que el balance hídrico y la simulación de los procesos hidrológicos (Xiong, Xu, Ren, Huang, & Huang, 2019), permiten el análisis espaciotemporal del manejo de los recursos hídricos y de la variabilidad del entorno (Deng, Liu, Wang, Shao, & Wang, 2019); así como sus efectos sobre las unidades territoriales analizadas (Moriasi et al., 2007), para facilitar el procesos de planeación y toma de decisiones en áreas regionalizadas (Pagliero, Bouraoui, Diels, Willems, & McIntyre, 2019). Lo anterior es posible a partir de entradas de información fácilmente disponible tal y como es la precipitación y la evapotranspiración (Zhang et al., 2018).

Escenarios de cambio climático. Dado las condiciones evaluadas dentro de los escenarios de cambio climático, es posible hacer un análisis espacio temporal de la disponibilidad hídrica con la implementación del algoritmo propuesto, lo cual, muestra la aplicabilidad del modelo hídrico bajo circunstancias de precariedad de datos. Sin embargo, la respuesta de dicho modelo varía en función del "optimismo" en la generación de emisiones, tan solo después de la "agresividad" de los MGC.

De acuerdo con la construcción de escenarios, existen cambios significativos en las condiciones climáticas del oriente del Valle de México (Cuadro 1), puesto que las afectaciones al transporte de humedad generadas por los cambios de temperatura y precipitación asociados al cambio climático (Held & Soden, 2006); muestran efectos sobre la evapotranspiración potencial con un incremento de 95 milímetros anuales.

Cuadro 1: Diferencias entre los parámetros de entrada bajo escenarios de cambio climático respecto al actual.

| Modelo | Tmed (°C) | Pp (mm) | Eto (mm) |
|-------------------------|------------------|----------------|-----------------|
| cnrm-cm5 RCP45-r1i1p1 | 0.76 | -79.64 | 52.00 |
| cnrm-cm5 RCP85-r1i1p1 | 0.90 | 39.28 | 43.71 |
| gfdl-esm2g RCP45-r1i1p1 | 1.82 | -86.81 | 164.44 |
| gfdl-esm2g RCP85-r1i1p1 | 1.80 | -49.21 | 136.61 |
| hadgem2-es RCP45-r1i1p1 | 1.47 | -47.33 | 100.67 |
| hadgem2-es RCP85-r1i1p1 | 1.56 | -21.38 | 102.14 |
| mpi-esm-lr RCP45-r3i1p1 | 1.29 | -6.83 | 79.56 |
| mpi-esm-lr RCP85-r3i1p1 | 1.39 | -15.19 | 76.45 |
| Max | 1.82 | 39.28 | 164.44 |
| Percentil 75 | 1.62 | -13.10 | 110.76 |
| Media | 1.37 | -33.39 | 94.45 |
| Percentil 25 | 1.19 | -56.81 | 70.34 |

Min 0.76 -86.81 43.71

Fuente: Elaboración propia.

La simulación del modelo hidrológico en condiciones de cambio climático (Cuadro 2), muestran al MGC GFDL y forzamiento radiativo de 4.5, como el escenario con menor disponibilidad hídrica, con un déficit de agua de 384, mientras que el modelo CNRM se muestra como uno de los modelos con mayor excedente, y uno de los menores déficit de agua, sin embargo, se muestra una tendencia a la disminución del excedente con 75 milímetros en promedio.

Cuadro 2: Valores medios anuales de los parámetros del balance hídrico bajo escenarios de cambio climático.

| Modelo | Pp (mm) | Eto (mm) | ETR (mm) | ΔPP (mm) | RSTO (mm) | EXD (mm) | DEF (mm) |
|-------------------------|---------|----------|----------|------------------|-----------|----------|----------|
| Actual | 751.03 | 837.11 | 1032.92 | -86.07 | 1233.79 | 91.99 | 195.81 |
| cnrm-cm5 RCP45-r1i1p1 | 671.40 | 889.11 | 1175.97 | -217.71 | 922.32 | 62.93 | 286.87 |
| cnrm-cm5 RCP85-r1i1p1 | 790.31 | 880.82 | 1098.57 | -90.51 | 1264.74 | 118.18 | 217.75 |
| gfdl-esm2g RCP45-r1i1p1 | 664.22 | 1001.55 | 1386.17 | -337.32 | 813.79 | 49.18 | 384.62 |
| gfdl-esm2g RCP85-r1i1p1 | 701.83 | 1001.55 | 1355.63 | -299.72 | 805.95 | 55.69 | 354.08 |
| hadgem2-es RCP45-r1i1p1 | 703.71 | 937.78 | 1245.00 | -234.08 | 985.51 | 70.41 | 307.22 |
| hadgem2-es RCP85-r1i1p1 | 729.66 | 939.25 | 1221.03 | -209.59 | 989.94 | 59.01 | 281.79 |
| mpi-esm-lr RCP45-r3i1p1 | 744.21 | 916.67 | 1175.93 | -172.46 | 1115.84 | 84.85 | 259.26 |
| mpi-esm-lr RCP85-r3i1p1 | 735.84 | 913.56 | 1177.47 | -177.72 | 1084.18 | 88.35 | 263.91 |
| Max | 790.31 | 1001.55 | 1386.17 | -86.07 | 1264.74 | 118.18 | 384.62 |
| Percentil 75 | 744.21 | 939.25 | 1245.00 | -172.46 | 1115.84 | 88.35 | 307.22 |
| Media | 721.36 | 924.15 | 1207.63 | -202.80 | 1024.01 | 75.62 | 283.48 |
| Percentil 25 | 701.83 | 889.11 | 1175.93 | -234.08 | 922.32 | 59.01 | 259.26 |
| Min | 664.22 | 837.11 | 1032.92 | -337.32 | 805.95 | 49.18 | 195.81 |

Donde Pp=precipitación, Eto= Evapotranspiración potencial, ETR= Evapotranspiración real, ΔPP = diferencia entre precipitación y evapotranspiración potencial, Al= Almacenamiento de agua, RSTO= Almacenamiento de agua, EXD= Excedente de Agua y DEF= Déficit de agua. Fuente: Elaboración propia.

El comportamiento espaciotemporal de los parámetros hidrológicos, muestran una tendencia a la disminución de la disponibilidad hídrica considerando al Excedente de agua como la principal fuente productiva de SAH, siendo que las áreas con bosque de oyamel, son las que presentan mejores condiciones para la generación de SAH dado que la densidad vegetativa y la presencia de suelos con textura media principalmente; mientras que, el Déficit de agua se agudiza en áreas que ya presentan este elemento tal

y como es en áreas con agricultura y pastizales mientras que áreas con bosque de pino, comienzan a ser afectadas por este fenómeno.

La relación entre el Almacenamiento y el Déficit de agua atiende de manera directa al cambio en la precipitación y, sobre todo, a la temperatura, afectando directamente a la evapotranspiración potencial, puesto que, si se considera un uso del suelo idéntico al actual, las condiciones meteorológicas afectarán de manera directa la capacidad de regulación del suelo sobre el agua.

Lo anterior, sugiere alteraciones en la recarga del manto acuífero y en las avenidas generadas, pues la disminución en la Capacidad de Almacenamiento y el cambio en los regímenes de precipitación, pueden provocar la ocurrencia de eventos hidrológicos extremos tales como la disminución de agua superficial disponible (Zhang et al., 2018) traducido en sequías y por tanto, el incremento del Déficit de agua; generando que en periodos con excedencia de agua, el recurso hídrico se subutilice para cubrir los requerimientos de agua en el ecosistema o bien, se acumule de tal manera que el suelo sature rápidamente su capacidad de infiltración y genere avenidas con un manejo más complejo al escenario climático actual provocando inundaciones (Arnell & Gosling, 2016). Dicha disminución de la disponibilidad hídrica (Koutroulis et al., 2019), tiene repercusiones directas sobre los elementos derivados de la productividad de los ecosistemas tales como la biodiversidad (Bellard, Bertelsmeier, Leadley, Thuiller, & Courchamp, 2012); y de los agroecosistemas, hecho, traducido en la disminución de la producción agropecuaria (Lu et al., 2019); lo cual, generará conflictos sobre la distribución y manejo de los recursos hídricos (Ospina-Noreña et al., 2017).

Lo anterior, muestra que la aplicación de los escenarios CMIP5, permiten contextualizar las condiciones futuras del sistema ambiental y socioeconómico (Dufresne et al., 2013) y sus fenómenos derivados, sobre la condición de los componentes hidrológicos a distintas escalas temporales, por lo cual, la aplicación de la modelación hidrológica, de manera horizontal con la aplicación de dichos escenarios, constituyen una herramienta adecuada para la toma de decisiones (Fowler, Blenkinsop, & Tebaldi, 2007), tal y como lo es en la aplicación del modelo bajo condiciones climáticas actuales.

Propuesta de áreas de conservación hidrológico-forestal. La determinación de las áreas de conservación forestal, a partir de la producción de SAH, requirió la evaluación del método de clasificación estadística con el método de regresión logística múltiple propuesto (Cuadro 3).

Cuadro 3: Resumen del modelo de regresión logística múltiple.

| Coefficientes | Estimate | Std. Error | z value | Pr(> z) |
|-----------------------------------|-----------------|-------------------|----------------|--------------------|
| Intercepto | -24.55 | 5.18 | -4.74 | 0.00 |
| Precipitación media anual (mm) | 1447000.00 | 2266000.00 | 0.64 | 0.52 |
| Evapotranspiración potencial (mm) | -657800.00 | 1861000.00 | -0.35 | 0.72 |
| Evapotranspiración real (mm) | -788700.00 | 1188000.00 | -0.66 | 0.51 |
| Agua disponible (mm) | -1447000.00 | 2266000.00 | -0.64 | 0.52 |
| Almacenamiento de agua (mm) | -0.01 | 0.00 | -5.50 | 0.00 |
| Excedente de agua (mm) | 0.01 | 0.01 | 1.76 | 0.08 |
| Déficit de agua (mm) | 788700.00 | 1188000.00 | 0.66 | 0.51 |

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con el modelo, se observa que los valores más bajos de p – *value*, están asociados con el almacenamiento y el excedente de agua, sin embargo, los coeficientes de ambos parámetros son cercanos a cero. Por tanto, no existe evidencia significativa que indique que el aumento de un parámetro por sí mismo condicione la baja o alta importancia hidrológica, debido a que como sugiere la función de máxima verosimilitud, cada uno de los estos provienen de una muestra aleatoria e independientes entre sí (James et al., 2013); siendo que lo coeficientes obtenidos son resultado de la interacción de dichos parámetros.

Para verificar el rendimiento de dicho modelo de regresión, se determinaron las AIC de entrenamiento que fueron correctamente clasificadas, siendo que, a pesar de que los parámetros no muestran significancia, se predijeron correctamente 94 áreas con importancia hidrológica, mientras que 5 fueron clasificadas como áreas sin importancia hidrológica incorrectamente, mientras que, 399 AIC fueron catalogadas sin Importancia Hidrológica siendo que 24, fueron catalogadas erróneamente como áreas de importancia hidrológica.

Cuadro 4: Error de entrenamiento del clasificador.

| Predicción | Importancia Hidrológica | Sin Importancia Hidrológica |
|-----------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| Importancia Hidrológica | 94 | 5 |
| Sin Importancia Hidrológica | 24 | 399 |

Fuente: Elaboración propia.

Dado que este método se enfoca en la clasificación y no en la asociación directa de los parámetros con una variable de respuesta, se toma en consideración el error de entrenamiento para determinar la eficiencia del modelo, siendo que, tuvo un acierto del 94.4% (Cuadro 4) mostrando al clasificador como aceptable dada las condiciones del experimento.

La aplicación del método de clasificación sobre los balances promedios de las AIC de los distintos escenarios, generaron un total de 11 áreas de importancia hidrológica (Figura 2 y Anexo 3), siendo que, bajo todas las condiciones evaluadas (Figuras 4-13), estas AIC mantienen dicho carácter, por lo que se proponen como áreas de conservación forestal (Figura 13). Lo anterior, se fundamenta en la composición territorial de las AIC, pues la importancia hidrológica mantiene una relación vegetal y edáfica; pues las AIC clasificadas están conformadas principalmente por áreas forestales compuestas por bosques de oyamel, con una textura edáfica franco-arenosa principalmente. Dicha interacción establece las condiciones que fomentan la recarga del manto acuífero y permiten el manejo de escurrimientos, pues al no presentar déficit de agua, la distribución de agua podría mantenerse de manera regular evitando avenidas instantáneas dado un evento de precipitación.

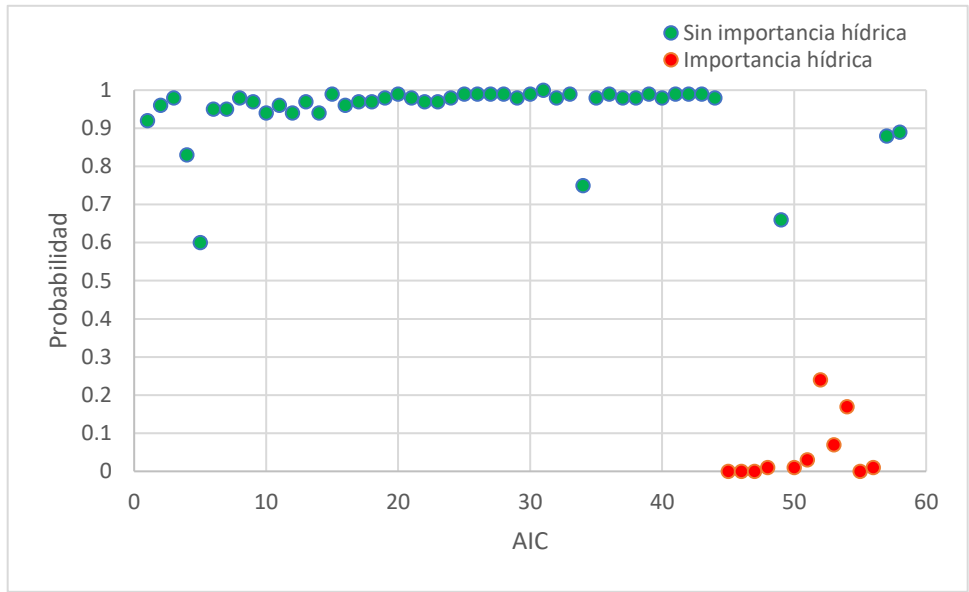


Figura 2: Clasificación de la importancia hídrica en las AIC. Elaboración: Fuente propia.

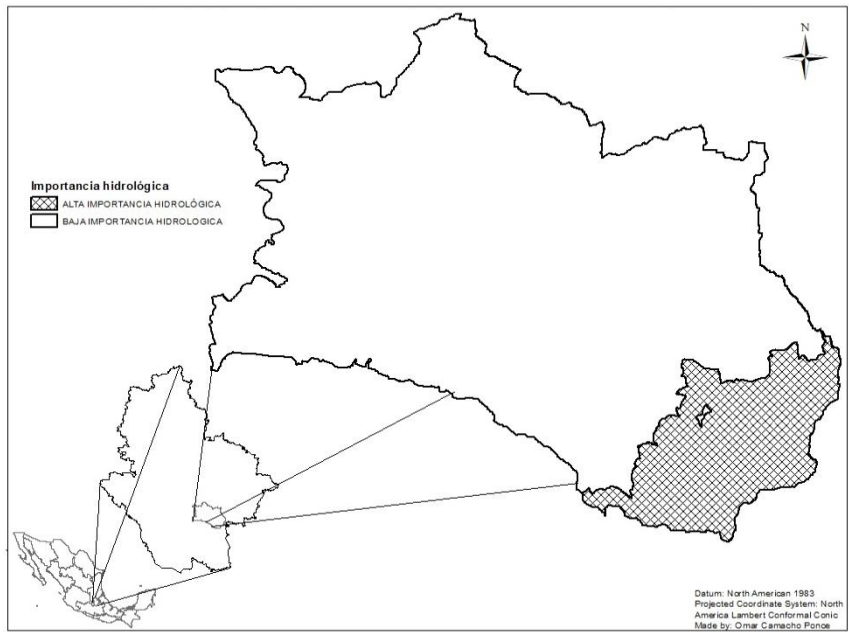


Figura 3: Mapa de áreas de conservación forestal en el oriente del Valle de México. Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

La zonificación de áreas de influencia climática permite evaluar la disponibilidad hídrica bajo un enfoque distributivo, permitiendo el análisis espaciotemporal de un sistema, bajo

múltiples condiciones. La aplicación del método Thornthwaite, permite cuantificar el balance hidrológico de forma sintetizada y eficaz para fines de planeación, sin embargo, no es recomendable su uso para el diseño de obras hidráulicas por lo que es necesario utilizar métodos de calibración en los modelos generados por dicho algoritmo. La clasificación estadística permite asignar categorías a variables ambientales, mostrando un rendimiento en función de los datos de entrenamiento, pero no permiten relacionar directamente la interacción de las variables, respecto una categoría. La evaluación de los balances hídricos bajo múltiples escenarios climáticos futuros sugiere una tendencia a la alteración de los procesos hidrológicos, principalmente en áreas no forestales, lo cual puede afectar a la distribución y disponibilidad de los recursos hídricos.

Literatura citada

- Arnell, N. W., & Gosling, S. N. (2016). The impacts of climate change on river flood risk at the global scale. *Climatic Change*, 134(3), 387–401.
<https://doi.org/10.1007/s10584-014-1084-5>
- Bellard, C., Bertelsmeier, C., Leadley, P., Thuiller, W., & Courchamp, F. (2012). Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecology Letters*, 15(4), 365–377.
<https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2011.01736.x>
- Blanco-Sepúlveda, R. (2009). La relación entre la densidad aparente y la resistencia mecánica como indicadores de la compactación del suelo. *Agrociencia*, 43(3), 231–239. Retrieved from <https://www.redalyc.org/articulo.oa?>
- Deng, C., Liu, P., Wang, W., Shao, Q., & Wang, D. (2019). Modelling time-variant parameters of a two-parameter monthly water balance model. *Journal of Hydrology*, 573, 918–936. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.04.027>
- Du, D., Zhao, X., & Huang, R. (2017). The impact of climate change on developed economies. *Economics Letters*, 153, 43–46.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.econlet.2017.01.017>
- Dufresne, J. L., Foujols, M. A., Denvil, S., Caubel, A., Marti, O., Aumont, O., ...

- Vuichard, N. (2013). Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model: From CMIP3 to CMIP5. In *Climate Dynamics* (Vol. 40).
<https://doi.org/10.1007/s00382-012-1636-1>
- Fernandez-Eguiarte, A., Zavala-Hidalgo, R., & Romero-Centeno, R. (2019). *Atlas Climático Digital de México*. Retrieved from <http://uniatmos.atmosfera.unam.mx/>
- Fowler, H. J., Blenkinsop, S., & Tebaldi, C. (2007). Linking climate change modelling to impacts studies: Recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. *International Journal of Climatology*, 27(12), 1547–1578.
<https://doi.org/10.1002/joc.1556>
- Gómez, J., Etchevers, J., Monterroso Rivas, A. I., Gay Garcia, C., Campo, J., & M, M. (2008). Spatial estimation of mean temperature and precipitation in areas of scarce meteorological information. *Atmósfera*, 21. Retrieved from
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=56521103>
- Held, I. M., & Soden, B. J. (2006). Robust responses of the hydrological cycle to global warming. *Journal of Climate*, 19(21), 5686–5699.
<https://doi.org/10.1175/JCLI3990.1>
- INEGI, I. N. de E. y G. (2014). *Red hidrográfica, subcuencas hidrográficas de México*. Retrieved from
http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/redsub84gw.xml?_httpcache=yes&_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no
- INEGI, I. N. de E. y G. (2017). *Uso del suelo y vegetación, escala 1:250000, serie VI (continuo nacional)*. Retrieved from
http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/usv250s6gw.xml?_httpcache=yes&_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no
- IPCC. (2013). *Cambio Climático 2013: Bases Físicas*. Retrieved from
https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=16439#.Xd7o2m5FxPY
- James, G., Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2013). *An Introduction to Statistical Learning*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7138-7>

- Koutroulis, A. G., Papadimitriou, L. V., Grillakis, M. G., Tsanis, I. K., Warren, R., & Betts, R. A. (2019). Global water availability under high-end climate change: A vulnerability based assessment. *Global and Planetary Change*, *175*, 52–63. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.01.013>
- Lafontaine, J. H., Hay, L. E., Viger, R. J., Regan, R. S., & Markstrom, S. L. (2015). Effects of Climate and Land Cover on Hydrology in the Southeastern U.S.: Potential Impacts on Watershed Planning. *Journal of the American Water Resources Association*, *51*(5), 1235–1261. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12304>
- Lu, S., Bai, X., Li, W., & Wang, N. (2019). Impacts of climate change on water resources and grain production. *Technological Forecasting and Social Change*, *143*, 76–84. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.01.015>
- Monterroso Rivas, A. I., & Gómez, J. (2003). *Escenarios climatológicos de la República Mexicana ante el cambio climático*.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Liew, M. W. Van, Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, *50*(3), 885–900.
- Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., Van Vuuren, D. P., ... Wilbanks, T. J. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, *463*(7282), 747–756. <https://doi.org/10.1038/nature08823>
- Ospina-Noreña, J. E., Domínguez-Ramírez, C. A., Vega-Rodríguez, E. E., Darghan-Contreras, A. E., & Rodríguez-Molano, L. E. (2017). Analysis of the water balance under regional scenarios of climate change for arid zones of Colombia. *Atmosfera*, *30*(1), 63–76. <https://doi.org/10.20937/ATM.2017.30.01.06>
- Pagliero, L., Bouraoui, F., Diels, J., Willems, P., & McIntyre, N. (2019). Investigating regionalization techniques for large-scale hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, *570*, 220–235. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.12.071>

- Pervez, M. S., & Henebry, G. M. (2015). Assessing the impacts of climate and land use and land cover change on the freshwater availability in the Brahmaputra River basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 3, 285–311.
<https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2014.09.003>
- Xiong, L., Xu, X., Ren, D., Huang, Q., & Huang, G. (2019). Enhancing the capability of hydrological models to simulate the regional agro-hydrological processes in watersheds with shallow groundwater: Based on the SWAT framework. *Journal of Hydrology*, 572, 1–16. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.02.043>
- Zhang, D., Zhang, Q., Qiu, J., Bai, P., Liang, K., & Li, X. (2018). Intensification of hydrological drought due to human activity in the middle reaches of the Yangtze River, China. *Science of The Total Environment*, 637–638, 1432–1442.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.121>

Anexos

Cuadro 5: Estaciones meteorológicas descriptivas del área de estudio.

| Clave | Estación | Municipio | Lat. | Lon. | MSN | T. Máx. (°C) | T. Min. (°C) | Pp. Anual (mm) |
|-------|---------------------------|--------------|-------|--------|------|--------------|--------------|----------------|
| 15008 | Atenco | Atenco | 19.54 | -98.91 | 2245 | 25.06 | 7.09 | 524.00 |
| 15017 | Coatepec de los olivos | Ixtapaluca | 19.38 | -98.85 | 2405 | 23.45 | 8.75 | 553.10 |
| 15018 | Manuel A. Camacho | Ixtapaluca | 19.33 | -98.77 | 2900 | 17.92 | 5.23 | 554.50 |
| 15022 | Chiconautla | Tecámac | 19.66 | -99.02 | 2340 | 24.98 | 6.25 | 558.50 |
| 15044 | La grande | Atenco | 19.58 | -98.91 | 2250 | 24.42 | 6.64 | 560.60 |
| 15055 | Maquixco | Temascalapa | 19.78 | -98.83 | 2530 | 22.43 | 7.25 | 561.90 |
| 15062 | Nevado de Toluca | Zinacantepec | 19.12 | -99.78 | 4283 | 8.47 | -0.60 | 564.60 |
| 15065 | Otumba | Otumba | 19.70 | -98.76 | 2349 | 23.34 | 5.03 | 568.20 |
| 15082 | Río frío | Ixtapaluca | 19.35 | -98.67 | 2977 | 18.31 | 1.34 | 577.70 |
| 15083 | San Andrés | Texcoco | 19.53 | -98.91 | 2244 | 23.81 | 6.87 | 581.00 |
| 15090 | San Jerónimo Xonocahuacan | Tecámac | 19.75 | -98.95 | 2265 | 25.95 | 6.87 | 586.70 |
| 15101 | San Miguel Tlaixpan | Texcoco | 19.52 | -98.81 | 2405 | 22.98 | 7.41 | 589.50 |
| 15124 | Tepexpan | Acolman | 19.61 | -98.92 | 2248 | 24.46 | 5.99 | 593.30 |
| 15135 | Xochihuacan | Otumba | 19.62 | -98.68 | 2769 | 20.00 | 5.84 | 599.20 |
| 15170 | Chapingo (DGE) | Texcoco | 19.48 | -98.89 | 2250 | 25.12 | 7.64 | 601.50 |
| 15210 | San Juan Totolapan | Tepetlaoxtoc | 19.53 | -98.73 | 2750 | 20.38 | 6.98 | 618.50 |
| 15276 | San José del Contadero | Zinacantepec | 19.23 | -99.81 | 3045 | 15.03 | 3.46 | 632.70 |
| 29006 | Cuauila | Calpulalpan | 19.60 | -98.65 | 2550 | 20.75 | 6.27 | 648.70 |
| 29015 | Mazapa | Calpulalpan | 19.55 | -98.57 | 2663 | 20.22 | 7.08 | 773.00 |
| 29025 | San Marcos Huaquilpan | Calpulalpan | 19.60 | -98.63 | 2601 | 22.43 | 4.92 | 972.20 |

Fuente: Elaboración propia con datos del SMN (2019).

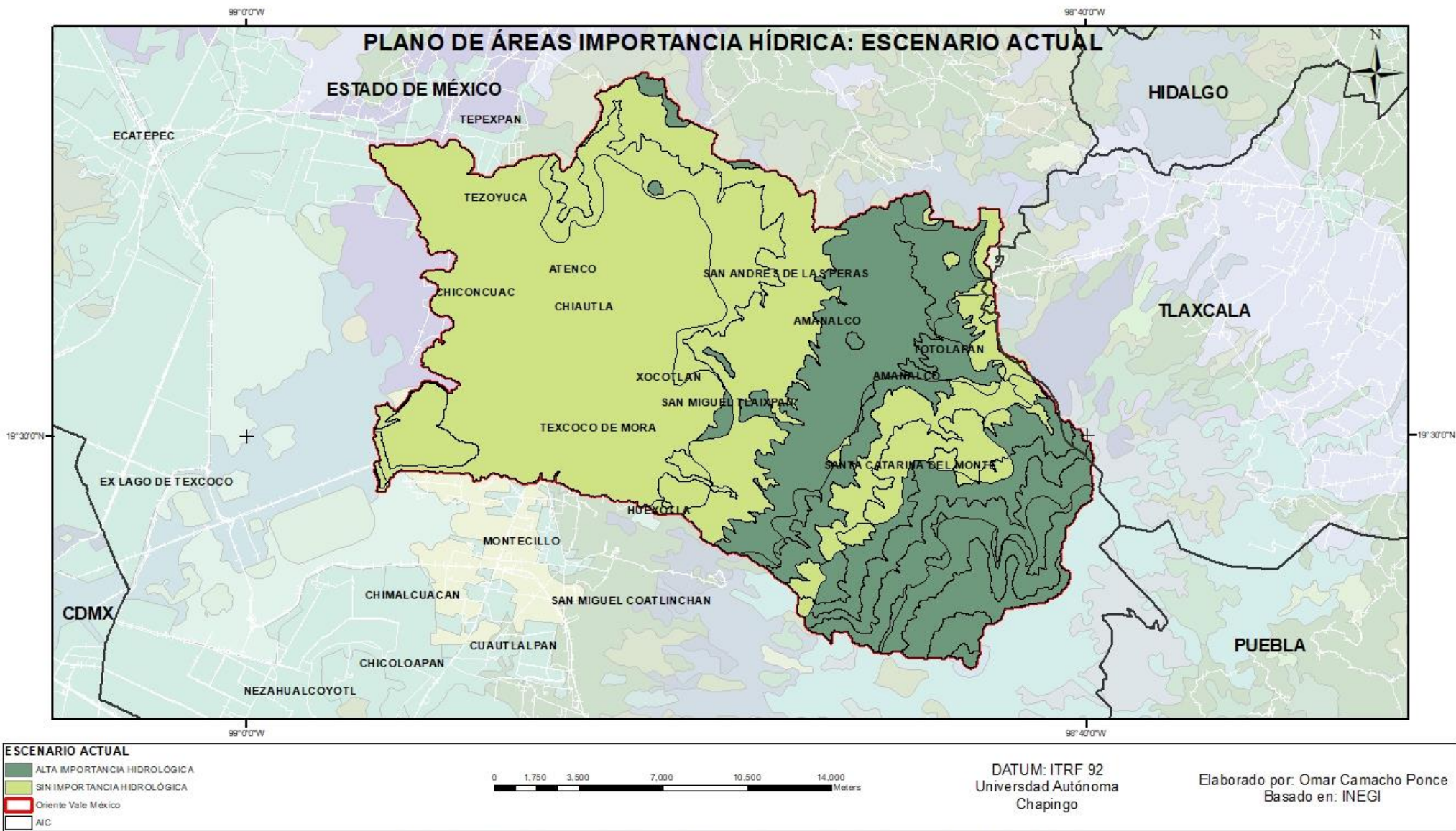
Cuadro 6: Modelos de regresión lineal de las isotermas en el oriente del Valle de México.

| Periodo | Regresión lineal | R ² |
|------------|-------------------------|----------------|
| Enero | $y = -0.0052x + 24.297$ | 0.83 |
| Febrero | $y = -0.0058x + 27.114$ | 0.87 |
| Marzo | $y = -0.0061x + 29.74$ | 0.88 |
| Abril | $y = -0.0066x + 32.572$ | 0.92 |
| Mayo | $y = -0.0069x + 34.061$ | 0.95 |
| Junio | $y = -0.0068x + 33.312$ | 0.95 |
| Julio | $y = -0.0068x + 33.312$ | 0.95 |
| Agosto | $y = -0.0066x + 31.853$ | 0.96 |
| Septiembre | $y = -0.0065x + 31.337$ | 0.96 |
| Octubre | $y = -0.0062x + 29.455$ | 0.94 |
| Noviembre | $y = -0.0058x + 27.245$ | 0.89 |
| Diciembre | $y = -0.0055x + 25.325$ | 0.84 |
| Anual | $y = -0.0062x + 29.85$ | 0.93 |

Fuente: Elaboración propia.

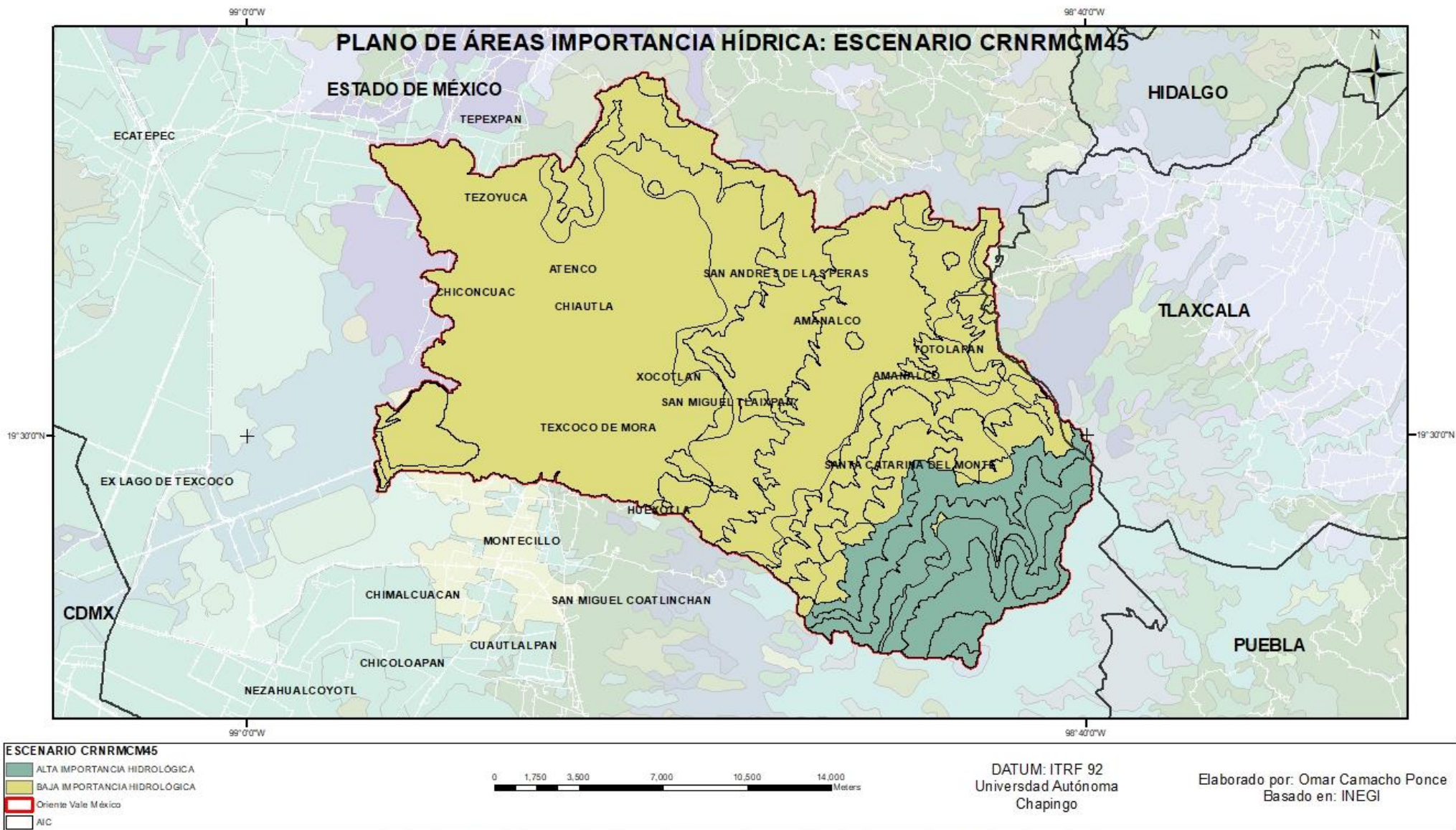
Anexo 3: Mapas de importancia hidrológica para condiciones actuales y de cambio climático en el oriente del Valle de México.

Figura 4: Áreas de importancia hídrica en el oriente del valle de México: Escenario Actual.



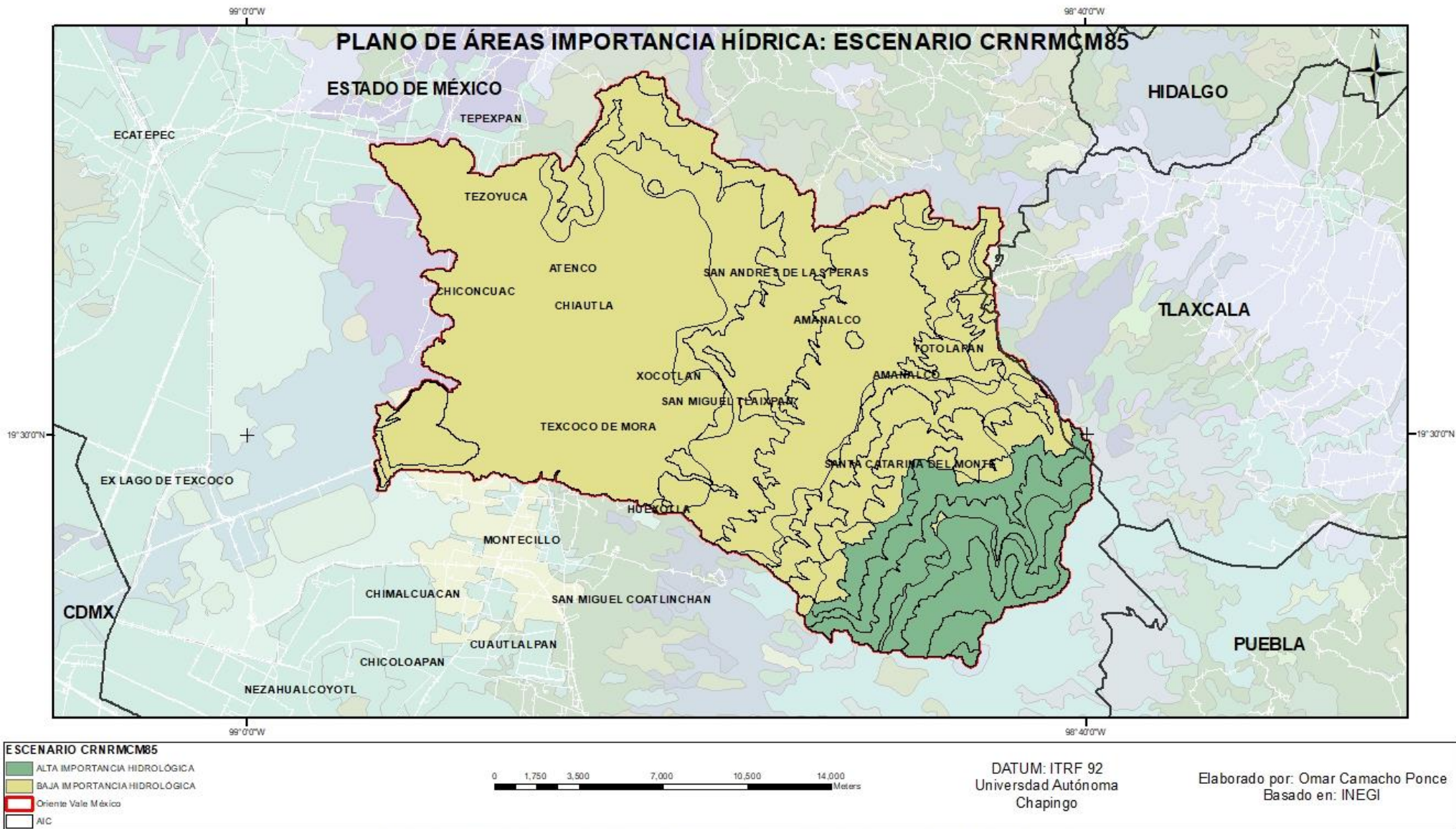
ÁREAS DE IMPORTANCIA HÍDRICA EN EL ORIENTE DEL VALLE DE MÉXICO: E SCENARIO ACTUAL

Figura 5: Áreas de importancia hídrica en el oriente del valle de México: Escenario CRNRMCM45.



ÁREAS DE IMPORTANCIA HÍDRICA EN EL ORIENTE DEL VALLE DE MÉXICO: ESCENARIO CRNRMCM45

Figura 6: Áreas de importancia hídrica en el oriente del valle de México: Escenario CRNRMCM85.



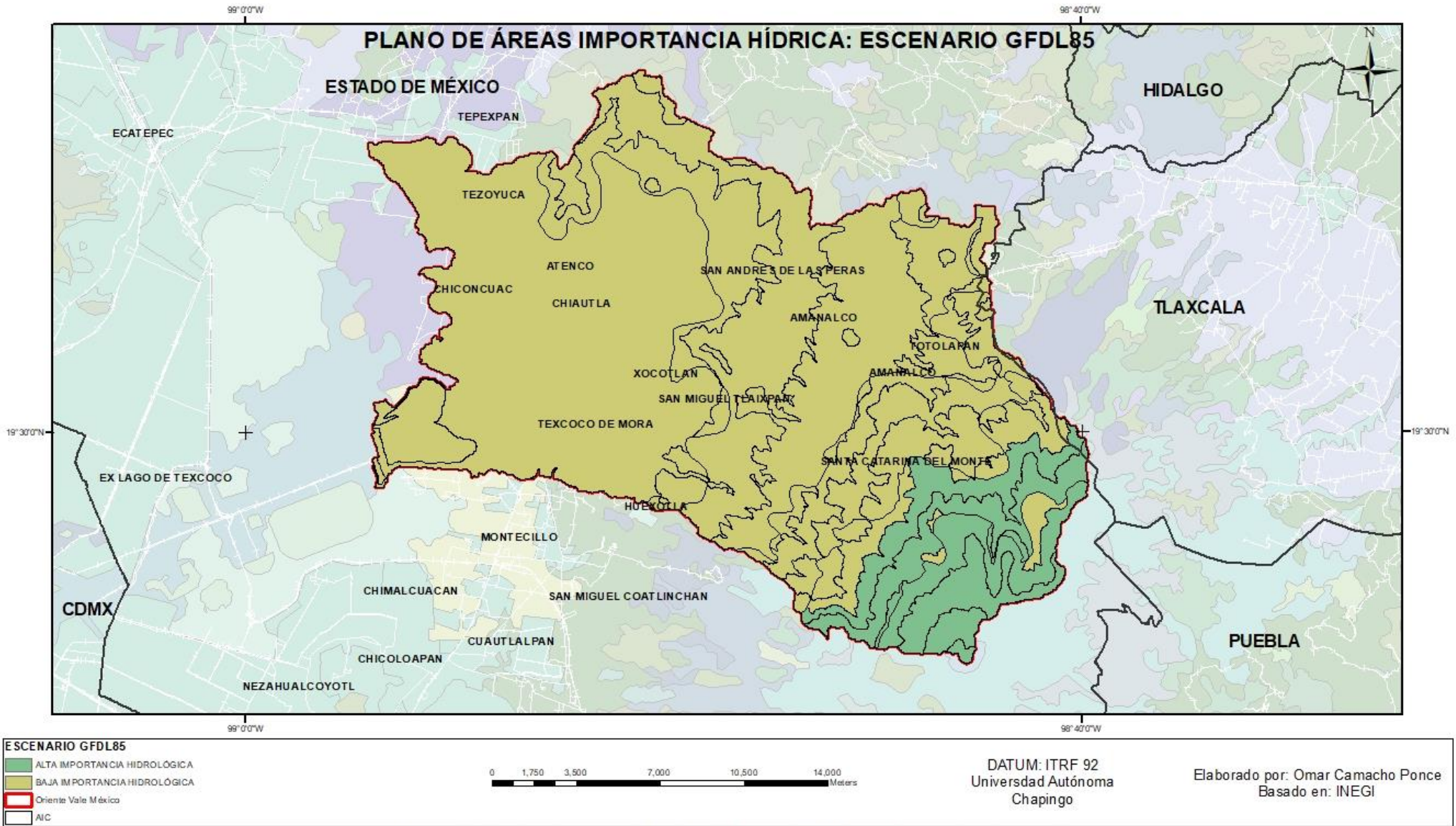
ÁREAS DE IMPORTANCIA HÍDRICA EN EL ORIENTE DEL VALLE DE MÉXICO: ESCENARIO CRNRMCM85

Figura 7: Áreas de importancia hídrica en el oriente del valle de México: Escenario GFDL45.



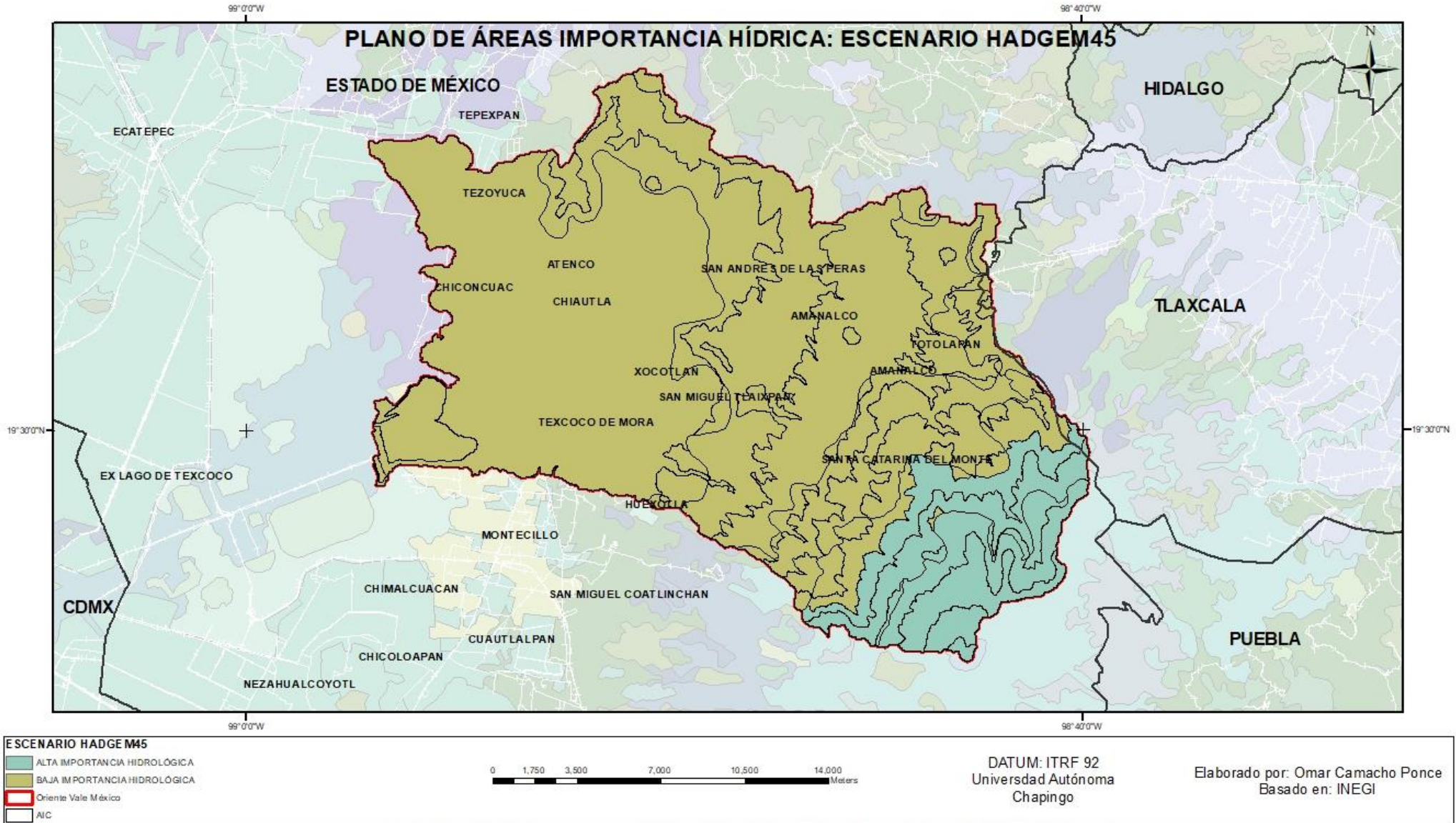
ÁREAS DE IMPORTANCIA HÍDRICA EN EL ORIENTE DEL VALLE DE MÉXICO: ESCENARIO GFDL45

Figura 8: Áreas de importancia hídrica en el oriente del valle de México: Escenario GFDL85.



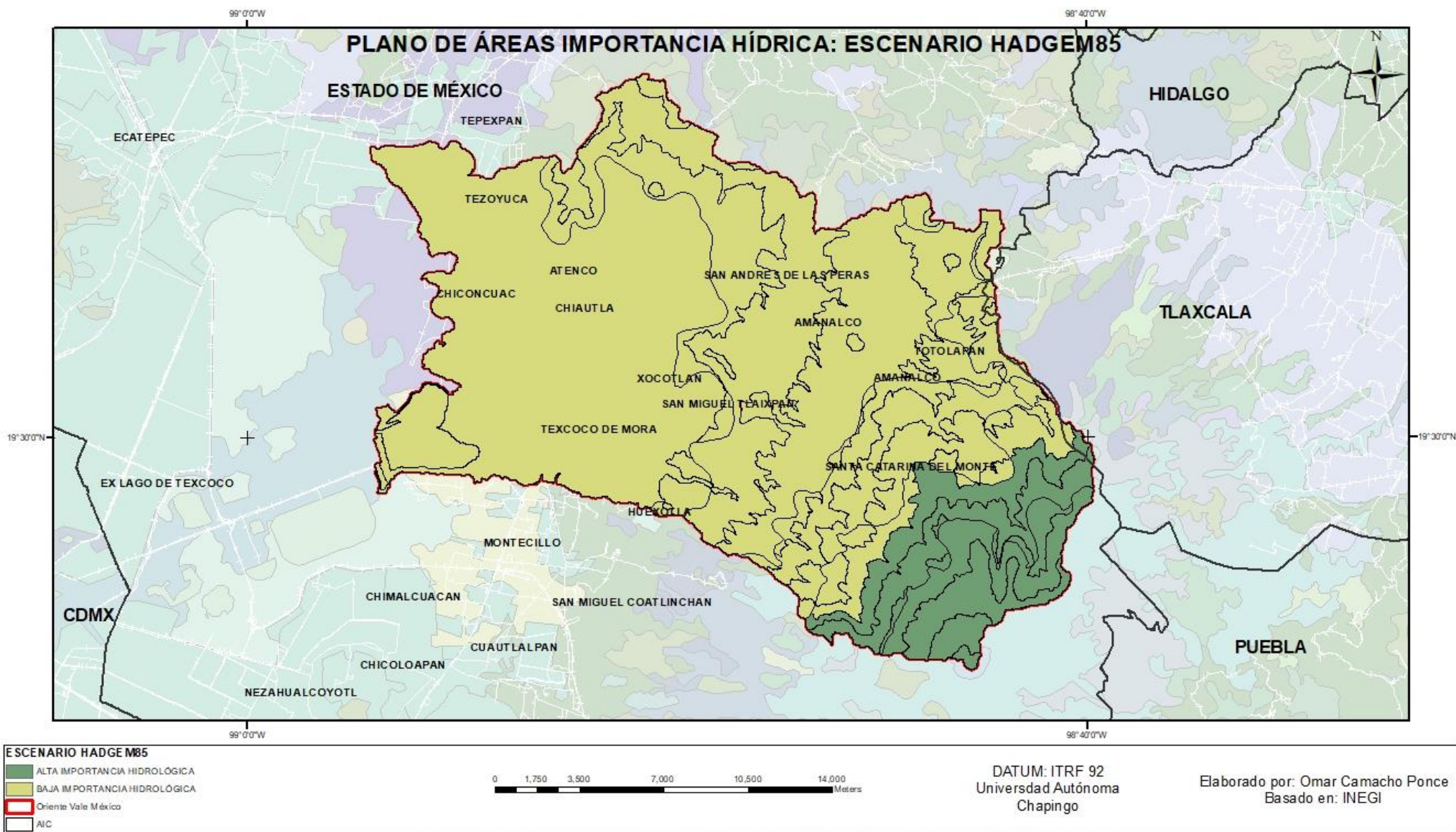
ÁREAS DE IMPORTANCIA HÍDRICA EN EL ORIENTE DEL VALLE DE MÉXICO: ESCENARIO GFDL85

Figura 9: Áreas de importancia hídrica en el oriente del valle de México: Escenario HADGEM45.



ÁREAS DE IMPORTANCIA HÍDRICA EN EL ORIENTE DEL VALLE DE MÉXICO: ESCENARIO HADGEM45

Figura 10: Áreas de importancia hídrica en el oriente del valle de México: Escenario HADGEM85.



ÁREAS DE IMPORTANCIA HÍDRICA EN EL ORIENTE DEL VALLE DE MÉXICO: ESCENARIO HADGEM85

Figura 11: Áreas de importancia hídrica en el oriente del valle de México: Escenario MPI45.



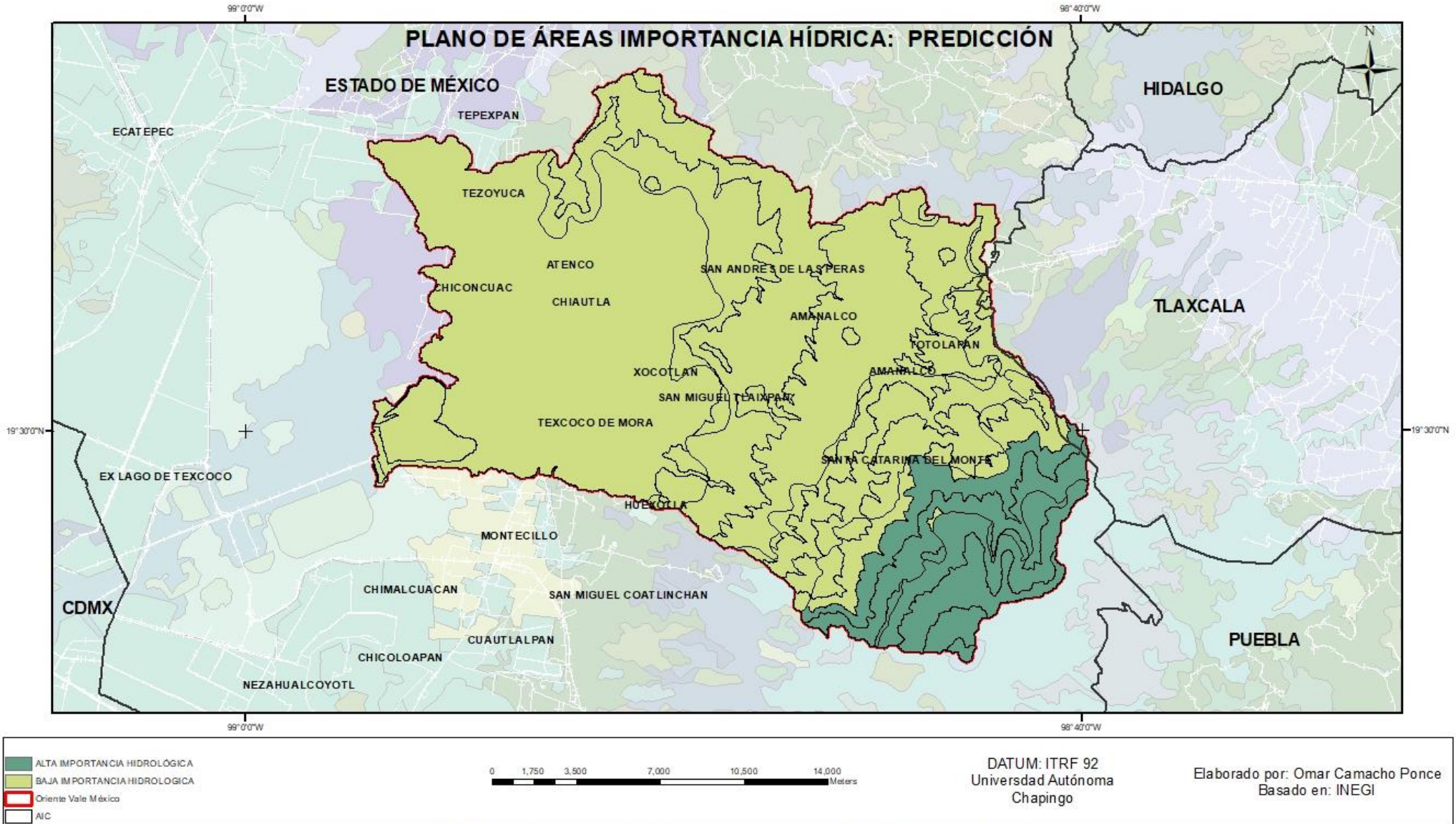
ÁREAS DE IMPORTANCIA HÍDRICA EN EL ORIENTE DEL VALLE DE MÉXICO: ESCENARIO MPI45

Figura 12: Áreas de importancia hídrica en el oriente del valle de México: Escenario MPI85.



ÁREAS DE IMPORTANCIA HÍDRICA EN EL ORIENTE DEL VALLE DE MÉXICO: ESCENARIO MPI85

Figura 13: Áreas de importancia hídrica en el oriente del valle de México: Predicción.



ÁREAS DE IMPORTANCIA HÍDRICA EN EL ORIENTE DEL VALLE DE MÉXICO: PREDICIÓN

PROPUESTA DE ALGORITMO PARA LA ESTIMACIÓN AUTOMATIZADA DEL BALANCE HÍDRICO MEDIANTE EL ALGORITMO THORNTHWAITE EN R

Omar Camacho Ponce¹

¹Universidad Autónoma Chapingo. Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales, Chapingo.

Introducción

La representación de la dinámica hidrológica puede lograrse a través de la modelación hidrológica, la cual, se considera como una herramienta eficiente para la simulación de los procesos relacionados al ciclo hidrológico (Xiong, Xu, Ren, Huang, & Huang, 2019). En lo general, se consideran a los modelos hidrológicos como aquellas herramientas que permiten la abstracción y representación del ciclo hidrológico a partir de la cuantificación de sus parámetros, permitiendo el manejo (Deng, Liu, Wang, Shao, & Wang, 2019) y análisis de los recursos hídricos, generalmente basado en un balance de dichos parámetros, tales el escurrimiento superficial, el agua subsuperficial, la evapotranspiración, entre otros (Xiong et al., 2019).

Los modelos hidrológicos se clasifican de acuerdo con su naturaleza de su representación, entre los principales tipos se encuentran los de representación física o de forma abstracta. Aquellos que simulan el ciclo hidrológico a través de la representación física, se establecen a partir de prototipos; mientras que aquellos que representan dicho proceso de manera abstracta, ya sea de manera empírica o teórica (Mendoza, 2002) se generan a partir de modelos conceptuales, dados como la representación matemática de los procesos hidrológicos y ligados por una secuencia espaciotemporal.

Asimismo, los modelos hidrológicos se clasifican de acuerdo a escala de análisis de los procesos hidrológicos; por un lado, se encuentran los modelos agregados, los cuales se constituyen por una sola unidad de respuesta espacial; y por otro, se encuentran los modelos espacialmente distributivos, que hacen uso de la

regionalización territorial, a partir de múltiples unidades de respuesta que en conjunto permiten el análisis global de los procesos hidrológicos.

Entre los modelos que permiten la cuantificación los parámetros del balance hidrológico, con un requerimiento de datos meteorológicos mensuales, basado en las características físicas del suelo y uso del suelo y vegetación se encuentra el método Thornthwaite (Ospina-Noreña et al., 2017), el cual permite la cuantificación de la disponibilidad hídrica bajo múltiples unidades de respuesta a partir del enfoque distribuido.

Materiales y método

Método Thornthwaite automatizado. En primer lugar, se determinan los meses húmedos y secos del año, a partir de la de la diferencia entre precipitación (*pp*) y la evapotranspiración potencial (*etp*), establecido como *deltappetp*; cuando *deltappetp* < 0 son lo meses secos, de lo contrario, son meses húmedos. Posteriormente se cuantifica la reserva de agua almacenada (*RSTO*), la cual, se expresa a como:

$$RSTO_{i=1,\dots,12} = RSTO_{i-1} + (pp_{i=1,\dots,12} - etp_{i=1,\dots,12}). \quad (1).$$

Antes de comenzar dicho calculo iterativo de *RSTO*, hay que determinar la capacidad de almacenamiento de agua (CAP) del suelo; dado que dicha *CAP* no es uniforme en las unidades territoriales, es necesario establecer un factor de CAP ponderado de acuerdo a las características físicas del suelo, así como al tipo de uso de suelo de la zona. Dicho factor es determinado por el usuario de acuerdo con las condiciones locales del área de estudio y al número de zonas a evaluar.

Para comenzar la cuantificación de **RSTO**, es necesario determinar el primer mes con almacenamiento de agua, lo cual, comienza con el primer mes del año en el que existe humedad y que en el mes previo al considerado, se considere a **RSTO** como nula, posteriormente, se hace el cálculo iterativo 11 veces de tal forma que se calcule el **RSTO** para cada uno de los meses.

Considerando el caso de que **RSTO** > (**CAP**), existirá un excedente de agua (**EXD**) que está compuesto por la infiltración de agua en el suelo o recarga del manto acuífero y el escurrimiento superficial, por lo que en dicha condición, **EXD** = **RSTO** – **CAP**, y **RSTO** se actualiza al valor de **CAP**, de lo contrario, si **RSTO** está por debajo de 0, se asignará el valor de 0 a **RSTO**, y la diferencia, se determinará como Déficit de agua (DEF), dado como la cantidad de agua requerida para satisfacer los requerimientos de agua del suelo; finalmente, si el valor de **RSTO** se encuentra entre 0 y **CAP**, **RSTO** es equivalente al resultado obtenido por (1) hasta que el ciclo anual se completa.

Finalmente, se cuantifica la variación entre la reserva y el almacenamiento de agua (**deltaRSTO**), lo cual, es resultado de la diferencia entre los valores de **RSTO_i** y **RSTO_{i-1}**.

Resultados

Algoritmo detallado. Se crea una matriz (**deltappetp**) vacía de orden **n** áreas por 12 meses, en los cuales, se comenzará la cuantificación de la diferencia entre los datos de precipitación y evapotranspiración media mensual.

Dicha diferencia está dada por la generalización de **pp** – **etp**, para cada una de las **i**-ésimas áreas evaluadas en los 12 meses de observación.

deltappetp < –matrix(0, n, 12)

for (i in 1:58) {

```

deltappetp[1] < -pp[1] - etp[1]
deltappetp[2] < -pp[2] - etp[2]
deltappetp[3] < -pp[3] - etp[3]
deltappetp[4] < -pp[4] - etp[4]
deltappetp[5] < -pp[5] - etp[5]
deltappetp[6] < -pp[6] - etp[6]
deltappetp[7] < -pp[7] - etp[7]
deltappetp[8] < -pp[8] - etp[8]
deltappetp[9] < -pp[9] - etp[9]
deltappetp[10] < -pp[10] - etp[10]
deltappetp[11] < -pp[11] - etp[11]
deltappetp[12] < -pp[12] - etp[12]
}

```

Posteriormente, se determina la capacidad de retención de agua en el suelo (*RSTO*), lo cual, inicia con el primer *deltappetp* positivo, por lo que en primer lugar, es necesario generar una matriz llamada *itera1* de *n* por 12, en la cual se establece la condición de que *RSTO* será igual al *deltappetp*, si y solo si, el mes tiene un valor positivo y su anterior es menor o igual a 0.

```

itera1 < -matrix(0, n, 12)
for (i in 1:n) {
+ if(deltappetp[i, 1] > 0 & deltapetp[i, 12] < 0) {itera1[i, 1]
  < -deltappetp[i, 1]} else(itera1[i, 1] < -0)
if(deltappetp[i, 2] > 0 & deltapetp[i, 1] < 0) {itera1[i, 2]
  < -deltappetp[i, 2]} else(itera1[i, 2] < -0)
if(deltappetp[i, 3] > 0 & deltapetp[i, 2] < 0) {itera1[i, 3]
  < -deltappetp[i, 3]} else(itera1[i, 3] < -0)
if(deltappetp[i, 4] > 0 & deltapetp[i, 3] < 0) {itera1[i, 4]
  < -deltappetp[i, 4]} else(itera1[i, 4] < -0)
}

```

```

if(deltappetp[i, 5] > 0 & deltappetp[i, 4] < 0) {itera1[i, 5]
  < -deltappetp[i, 5]} else(itera1[i, 5] < -0)
if(deltappetp[i, 6] > 0 & deltappetp[i, 5] < 0) {itera1[i, 6]
  < -deltappetp[i, 6]} else(itera1[i, 6] < -0)
if(deltappetp[i, 7] > 0 & deltappetp[i, 6] < 0) {itera1[i, 7]
  < -deltappetp[i, 7]} else(itera1[i, 7] < -0)
if(deltappetp[i, 8] > 0 & deltappetp[i, 7] < 0) {itera1[i, 8]
  < -deltappetp[i, 8]} else(itera1[i, 8] < -0)
if(deltappetp[i, 9] > 0 & deltappetp[i, 8] < 0) {itera1[i, 9]
  < -deltappetp[i, 9]} else(itera1[i, 9] < -0)
if(deltappetp[i, 10] > 0 & deltappetp[i, 9] < 0) {itera1[i, 10]
  < -deltappetp[i, 10]} else(itera1[i, 10] < -0)
if(deltappetp[i, 11] > 0 & deltappetp[i, 10] < 0) {itera1[i, 11]
  < -deltappetp[i, 11]} else(itera1[i, 11] < -0)
if(deltappetp[i, 12] > 0 & deltappetp[i, 11] < 0) {itera1[i, 12]
  < -deltappetp[i, 12]} else(itera1[i, 12] < -0)
}

```

Con lo anterior, solo se ha determinado el primer RSTO que inicia el cálculo, sin embargo, es necesario determinar los valores de RSTO para los meses sucesivos; dado que dicho valor se tiene que calcular para cada uno de los 12 meses, se crea un ciclo de 11 iteraciones adicionales, en los cuales, se establecerá la restricción en la que si la iteración anterior es menor que 0 ($itera_{n-1} < 0$), y la iteración del mes pasado más el *deltappetp* del mes actual es menor que 100 ($itera_{n-1} + \text{deltappetp}_n < 100$), la nueva iteración será igual al valor de la iteración pasada, más el *deltappetp* del mes actual ($itera_n = itera_{n-1} + \text{deltappetp}_n$); de otra manera, si la iteración del mes pasado es mayor que 0 ($itera_{n-1} > 0$), y la iteración del mes pasado más *deltappetp* es mayor que 100 ($itera_{n-1} + \text{deltappetp}_n > 100$), entonces la iteración se actualiza al valor de CAP. Si ninguna de las condiciones se cumple, el valor de $itera_n$ será igual a CAP.

Se crea una matriz vacía (*itera2*) de orden n áreas por 12 meses, en los cuales se usará las condiciones para calcular RSTO, un mes después del primer mes con humedad.

```

itera2 < -matrix(0,n,12)
for (i in 1:58) {
  if(itera1[i,12] > 0 & itera1[i,12] + deltappetp[i,1] < 100) {itera2[i,1]
    < -itera1[i,12] + deltappetp[i,1]} else if(itera1[i,12]
    > 0 & itera1[i,12] + deltappetp[i,1] > 100) {itera2[i,1] < -100}
  if(itera1[i,1] > 0 & itera1[i,1] + deltappetp[i,2] < 100) {itera2[i,2]
    < -itera1[i,1] + deltappetp[i,2]} else if(itera1[i,1]
    > 0 & itera1[i,1] + deltappetp[i,2] > 100) {itera2[i,2] < -100}
  if(itera1[i,2] > 0 & itera1[i,2] + deltappetp[i,3] < 100) {itera2[i,3]
    < -itera1[i,2] + deltappetp[i,3]} else if(itera1[i,2]
    > 0 & itera1[i,2] + deltappetp[i,3] > 100) {itera2[i,3] < -100}
  if(itera1[i,3] > 0 & itera1[i,3] + deltappetp[i,4] < 100) {itera2[i,4]
    < -itera1[i,3] + deltappetp[i,4]} else if(itera1[i,3]
    > 0 & itera1[i,3] + deltappetp[i,4] > 100) {itera2[i,4] < -100}
  if(itera1[i,4] > 0 & itera1[i,4] + deltappetp[i,5] < 100) {itera2[i,5]
    < -itera1[i,4] + deltappetp[i,5]} else if(itera1[i,4]
    > 0 & itera1[i,4] + deltappetp[i,5] > 100) {itera2[i,5] < -100}
  if(itera1[i,5] > 0 & itera1[i,5] + deltappetp[i,6] < 100) {itera2[i,6]
    < -itera1[i,5] + deltappetp[i,6]} else if(itera1[i,5]
    > 0 & itera1[i,5] + deltappetp[i,6] > 100) {itera2[i,6] < -100}
  if(itera1[i,6] > 0 & itera1[i,6] + deltappetp[i,7] < 100) {itera2[i,7]
    < -itera1[i,6] + deltappetp[i,7]} else if(itera1[i,6]
    > 0 & itera1[i,6] + deltappetp[i,7] > 100) {itera2[i,7] < -100}
  if(itera1[i,7] > 0 & itera1[i,7] + deltappetp[i,8] < 100) {itera2[i,8]
    < -itera1[i,7] + deltappetp[i,8]} else if(itera1[i,7]
    > 0 & itera1[i,7] + deltappetp[i,8] > 100) {itera2[i,8] < -100}
}

```

```

if(itera1[i,8] > 0 & itera1[i,8] + deltappetp[i,9] < 100) {itera2[i,9]
  < -itera1[i,8] + deltappetp[i,9]} else if(itera1[i,8]
  > 0 & itera1[i,8] + deltappetp[i,9] > 100) {itera2[i,9] < -100}
if(itera1[i,9] > 0 & itera1[i,9] + deltappetp[i,10] < 100) {itera2[i,10]
  < -itera1[i,9] + deltappetp[i,10]} else if(itera1[i,9]
  > 0 & itera1[i,9] + deltappetp[i,10] > 100) {itera2[i,10]
  < -100}
if(itera1[i,10] > 0 & itera1[i,10] + deltappetp[i,11] < 100) {itera2[i,11]
  < -itera1[i,10] + deltappetp[i,11]} else if(itera1[i,10]
  > 0 & itera1[i,10] + deltappetp[i,11] > 100) {itera2[i,11]
  < -100}
if(itera1[i,11] > 0 & itera1[i,11] + deltappetp[i,12] < 100) {itera2[i,12]
  < -itera1[i,11] + deltappetp[i,12]} else if(itera1[i,11]
  > 0 & itera1[i,11] + deltappetp[i,12] > 100) {itera2[i,12]
  < -100}
}

```

Se crea una matriz vacía (itera3) de orden n áreas por 12 meses, en los cuales se usará las condiciones para calcular RSTO, dos meses después del primer mes con humedad.

```

itera3 < -matrix(0, N, 12)
for (i in 1:n) {
  if(itera2[i,12] > 0 & itera2[i,12] + deltappetp[i,1] < 100) {itera3[i,1]
    < -itera2[i,12] + deltappetp[i,1]} else if(itera2[i,12]
    > 0 & itera2[i,12] + deltappetp[i,1] > 100) {itera3[i,1] < -100}
  if(itera2[i,1] > 0 & itera2[i,1] + deltappetp[i,2] < 100) {itera3[i,2]
    < -itera2[i,1] + deltappetp[i,2]} else if(itera2[i,1]
    > 0 & itera2[i,1] + deltappetp[i,2] > 100) {itera3[i,2] < -100}
  if(itera2[i,2] > 0 & itera2[i,2] + deltappetp[i,3] < 100) {itera3[i,3]
    < -itera2[i,2] + deltappetp[i,3]} else if(itera2[i,2]
    > 0 & itera2[i,2] + deltappetp[i,3] > 100) {itera3[i,3] < -100}
}

```



```

if(itera2[i,3] > 0 & itera2[i,3] + deltappetp[i,4] < 100) {itera3[i,4]
    < -itera2[i,3] + deltappetp[i,4]} else if(itera2[i,3]
    > 0 & itera2[i,3] + deltappetp[i,4] > 100) {itera3[i,4] < -100}
if(itera2[i,4] > 0 & itera2[i,4] + deltappetp[i,5] < 100) {itera3[i,5]
    < -itera2[i,4] + deltappetp[i,5]} else if(itera2[i,4]
    > 0 & itera2[i,4] + deltappetp[i,5] > 100) {itera3[i,5] < -100}
if(itera2[i,5] > 0 & itera2[i,5] + deltappetp[i,6] < 100) {itera3[i,6]
    < -itera2[i,5] + deltappetp[i,6]} else if(itera2[i,5]
    > 0 & itera2[i,5] + deltappetp[i,6] > 100) {itera3[i,6] < -100}
if(itera2[i,6] > 0 & itera2[i,6] + deltappetp[i,7] < 100) {itera3[i,7]
    < -itera2[i,6] + deltappetp[i,7]} else if(itera2[i,6]
    > 0 & itera2[i,6] + deltappetp[i,7] > 100) {itera3[i,7] < -100}
if(itera2[i,7] > 0 & itera2[i,7] + deltappetp[i,8] < 100) {itera3[i,8]
    < -itera2[i,7] + deltappetp[i,8]} else if(itera2[i,7]
    > 0 & itera2[i,7] + deltappetp[i,8] > 100) {itera3[i,8] < -100}
if(itera2[i,8] > 0 & itera2[i,8] + deltappetp[i,9] < 100) {itera3[i,9]
    < -itera2[i,8] + deltappetp[i,9]} else if(itera2[i,8]
    > 0 & itera2[i,8] + deltappetp[i,9] > 100) {itera3[i,9] < -100}
if(itera2[i,9] > 0 & itera2[i,9] + deltappetp[i,10] < 100) {itera3[i,10]
    < -itera2[i,9] + deltappetp[i,10]} else if(itera2[i,9]
    > 0 & itera2[i,9] + deltappetp[i,10] > 100) {itera3[i,10]
    < -100}
if(itera2[i,10] > 0 & itera2[i,10] + deltappetp[i,11] < 100) {itera3[i,11]
    < -itera2[i,10] + deltappetp[i,11]} else if(itera2[i,10]
    > 0 & itera2[i,10] + deltappetp[i,11] > 100) {itera3[i,11]
    < -100}
if(itera2[i,11] > 0 & itera2[i,11] + deltappetp[i,12] < 100) {itera3[i,12]
    < -itera2[i,11] + deltappetp[i,12]} else if(itera2[i,11]
    > 0 & itera2[i,11] + deltappetp[i,12] > 100) {itera3[i,12]
    < -100}
}

```

Se crea una matriz vacía (itera4) de orden n áreas por 12 meses, en los cuales se usará las condiciones para calcular RSTO, tres meses después del primer mes con humedad.

```
itera4 <- matrix(0, n, 12)
for (i in 1:n) {
  if(itera3[i, 12] > 0 & itera3[i, 12] + deltappetp[i, 1] < 100) {itera4[i, 1]
    < -itera3[i, 12] + deltappetp[i, 1]} else if(itera3[i, 12]
    > 0 & itera3[i, 12] + deltappetp[i, 1] > 100) {itera4[i, 1] < -100}
  if(itera3[i, 1] > 0 & itera3[i, 1] + deltappetp[i, 2] < 100) {itera4[i, 2]
    < -itera3[i, 1] + deltappetp[i, 2]} else if(itera3[i, 1]
    > 0 & itera3[i, 1] + deltappetp[i, 2] > 100) {itera4[i, 2] < -100}
  if(itera3[i, 2] > 0 & itera3[i, 2] + deltappetp[i, 3] < 100) {itera4[i, 3]
    < -itera3[i, 2] + deltappetp[i, 3]} else if(itera3[i, 2]
    > 0 & itera3[i, 2] + deltappetp[i, 3] > 100) {itera4[i, 3] < -100}
  if(itera3[i, 3] > 0 & itera3[i, 3] + deltappetp[i, 4] < 100) {itera4[i, 4]
    < -itera3[i, 3] + deltappetp[i, 4]} else if(itera3[i, 3]
    > 0 & itera3[i, 3] + deltappetp[i, 4] > 100) {itera4[i, 4] < -100}
  if(itera3[i, 4] > 0 & itera3[i, 4] + deltappetp[i, 5] < 100) {itera4[i, 5]
    < -itera3[i, 4] + deltappetp[i, 5]} else if(itera3[i, 4]
    > 0 & itera3[i, 4] + deltappetp[i, 5] > 100) {itera4[i, 5] < -100}
  if(itera3[i, 5] > 0 & itera3[i, 5] + deltappetp[i, 6] < 100) {itera4[i, 6]
    < -itera3[i, 5] + deltappetp[i, 6]} else if(itera3[i, 5]
    > 0 & itera3[i, 5] + deltappetp[i, 6] > 100) {itera4[i, 6] < -100}
  if(itera3[i, 6] > 0 & itera3[i, 6] + deltappetp[i, 7] < 100) {itera4[i, 7]
    < -itera3[i, 6] + deltappetp[i, 7]} else if(itera3[i, 6]
    > 0 & itera3[i, 6] + deltappetp[i, 7] > 100) {itera4[i, 7] < -100}
  if(itera3[i, 7] > 0 & itera3[i, 7] + deltappetp[i, 8] < 100) {itera4[i, 8]
    < -itera3[i, 7] + deltappetp[i, 8]} else if(itera3[i, 7]
    > 0 & itera3[i, 7] + deltappetp[i, 8] > 100) {itera4[i, 8] < -100}
```

```

if(itera3[i, 8] > 0 & itera3[i, 8] + deltappetp[i, 9] < 100) {itera4[i, 9]
  < -itera3[i, 8] + deltappetp[i, 9]} else if(itera3[i, 8]
  > 0 & itera3[i, 8] + deltappetp[i, 9] > 100) {itera4[i, 9] < -100}
if(itera3[i, 9] > 0 & itera3[i, 9] + deltappetp[i, 10] < 100) {itera4[i, 10]
  < -itera3[i, 9] + deltappetp[i, 10]} else if(itera3[i, 9]
  > 0 & itera3[i, 9] + deltappetp[i, 10] > 100) {itera4[i, 10]
  < -100}
if(itera3[i, 10] > 0 & itera3[i, 10] + deltappetp[i, 11] < 100) {itera4[i, 11]
  < -itera3[i, 10] + deltappetp[i, 11]} else if(itera3[i, 10]
  > 0 & itera3[i, 10] + deltappetp[i, 11] > 100) {itera4[i, 11]
  < -100}
if(itera3[i, 11] > 0 & itera3[i, 11] + deltappetp[i, 12] < 100) {itera4[i, 12]
  < -itera3[i, 11] + deltappetp[i, 12]} else if(itera3[i, 11]
  > 0 & itera3[i, 11] + deltappetp[i, 12] > 100) {itera4[i, 12]
  < -100}
}

```

Se crea una matriz vacía (itera5) de orden n áreas por 12 meses, en los cuales se usará las condiciones para calcular RSTO, cuatro meses después del primer mes con humedad.

```

itera5 < -matrix(0, n, 12)

```

```

for (i in 1:n) {

```

```

  if(itera4[i, 12] > 0 & itera4[i, 12] + deltappetp[i, 1] < 100) {itera5[i, 1]
    < -itera4[i, 12] + deltappetp[i, 1]} else if(itera4[i, 12]
    > 0 & itera4[i, 12] + deltappetp[i, 1] > 100) {itera5[i, 1] < -100}
  if(itera4[i, 1] > 0 & itera4[i, 1] + deltappetp[i, 2] < 100) {itera5[i, 2]
    < -itera4[i, 1] + deltappetp[i, 2]} else if(itera4[i, 1]
    > 0 & itera4[i, 1] + deltappetp[i, 2] > 100) {itera5[i, 2] < -100}
  if(itera4[i, 2] > 0 & itera4[i, 2] + deltappetp[i, 3] < 100) {itera5[i, 3]
    < -itera4[i, 2] + deltappetp[i, 3]} else if(itera4[i, 2]
    > 0 & itera4[i, 2] + deltappetp[i, 3] > 100) {itera5[i, 3] < -100}

```

```

if(itera4[i,3] > 0 & itera4[i,3] + deltappetp[i,4] < 100) {itera5[i,4]
    < -itera4[i,3] + deltappetp[i,4]} else if(itera4[i,3]
    > 0 & itera4[i,3] + deltappetp[i,4] > 100) {itera5[i,4] < -100}
if(itera4[i,4] > 0 & itera4[i,4] + deltappetp[i,5] < 100) {itera5[i,5]
    < -itera4[i,4] + deltappetp[i,5]} else if(itera4[i,4]
    > 0 & itera4[i,4] + deltappetp[i,5] > 100) {itera5[i,5] < -100}
if(itera4[i,5] > 0 & itera4[i,5] + deltappetp[i,6] < 100) {itera5[i,6]
    < -itera4[i,5] + deltappetp[i,6]} else if(itera4[i,5]
    > 0 & itera4[i,5] + deltappetp[i,6] > 100) {itera5[i,6] < -100}
if(itera4[i,6] > 0 & itera4[i,6] + deltappetp[i,7] < 100) {itera5[i,7]
    < -itera4[i,6] + deltappetp[i,7]} else if(itera4[i,6]
    > 0 & itera4[i,6] + deltappetp[i,7] > 100) {itera5[i,7] < -100}
if(itera4[i,7] > 0 & itera4[i,7] + deltappetp[i,8] < 100) {itera5[i,8]
    < -itera4[i,7] + deltappetp[i,8]} else if(itera4[i,7]
    > 0 & itera4[i,7] + deltappetp[i,8] > 100) {itera5[i,8] < -100}
if(itera4[i,8] > 0 & itera4[i,8] + deltappetp[i,9] < 100) {itera5[i,9]
    < -itera4[i,8] + deltappetp[i,9]} else if(itera4[i,8]
    > 0 & itera4[i,8] + deltappetp[i,9] > 100) {itera5[i,9] < -100}
if(itera4[i,9] > 0 & itera4[i,9] + deltappetp[i,10] < 100) {itera5[i,10]
    < -itera4[i,9] + deltappetp[i,10]} else if(itera4[i,9]
    > 0 & itera4[i,9] + deltappetp[i,10] > 100) {itera5[i,10]
    < -100}
if(itera4[i,10] > 0 & itera4[i,10] + deltappetp[i,11] < 100) {itera5[i,11]
    < -itera4[i,10] + deltappetp[i,11]} else if(itera4[i,10]
    > 0 & itera4[i,10] + deltappetp[i,11] > 100) {itera5[i,11]
    < -100}
if(itera4[i,11] > 0 & itera4[i,11] + deltappetp[i,12] < 100) {itera5[i,12]
    < -itera4[i,11] + deltappetp[i,12]} else if(itera4[i,11]
    > 0 & itera4[i,11] + deltappetp[i,12] > 100) {itera5[i,12]
    < -100}
}

```

Se crea una matriz vacía (itera6) de orden n áreas por 12 meses, en los cuales se usará las condiciones para calcular RSTO, cinco meses después del primer mes con humedad.

```
itera6 <- matrix(0, n, 12)
```

```
for (i in 1:n) {
```

```
  if(itera5[i, 12] > 0 & itera5[i, 12] + deltappetp[i, 1] < 100) {itera6[i, 1]
    < -itera5[i, 12] + deltappetp[i, 1]} else if(itera5[i, 12]
    > 0 & itera5[i, 12] + deltappetp[i, 1] > 100) {itera6[i, 1] < -100}
```

```
  if(itera5[i, 1] > 0 & itera5[i, 1] + deltappetp[i, 2] < 100) {itera6[i, 2]
    < -itera5[i, 1] + deltappetp[i, 2]} else if(itera5[i, 1]
    > 0 & itera5[i, 1] + deltappetp[i, 2] > 100) {itera6[i, 2] < -100}
```

```
  if(itera5[i, 2] > 0 & itera5[i, 2] + deltappetp[i, 3] < 100) {itera6[i, 3]
    < -itera5[i, 2] + deltappetp[i, 3]} else if(itera5[i, 2]
    > 0 & itera5[i, 2] + deltappetp[i, 3] > 100) {itera6[i, 3] < -100}
```

```
  if(itera5[i, 3] > 0 & itera5[i, 3] + deltappetp[i, 4] < 100) {itera6[i, 4]
    < -itera5[i, 3] + deltappetp[i, 4]} else if(itera5[i, 3]
    > 0 & itera5[i, 3] + deltappetp[i, 4] > 100) {itera6[i, 4] < -100}
```

```
  if(itera5[i, 4] > 0 & itera5[i, 4] + deltappetp[i, 5] < 100) {itera6[i, 5]
    < -itera5[i, 4] + deltappetp[i, 5]} else if(itera5[i, 4]
    > 0 & itera5[i, 4] + deltappetp[i, 5] > 100) {itera6[i, 5] < -100}
```

```
  if(itera5[i, 5] > 0 & itera5[i, 5] + deltappetp[i, 6] < 100) {itera6[i, 6]
    < -itera5[i, 5] + deltappetp[i, 6]} else if(itera5[i, 5]
    > 0 & itera5[i, 5] + deltappetp[i, 6] > 100) {itera6[i, 6] < -100}
```

```
  if(itera5[i, 6] > 0 & itera5[i, 6] + deltappetp[i, 7] < 100) {itera6[i, 7]
    < -itera5[i, 6] + deltappetp[i, 7]} else if(itera5[i, 6]
    > 0 & itera5[i, 6] + deltappetp[i, 7] > 100) {itera6[i, 7] < -100}
```

```
  if(itera5[i, 7] > 0 & itera5[i, 7] + deltappetp[i, 8] < 100) {itera6[i, 8]
    < -itera5[i, 7] + deltappetp[i, 8]} else if(itera5[i, 7]
    > 0 & itera5[i, 7] + deltappetp[i, 8] > 100) {itera6[i, 8] < -100}
```

```

if(itera5[i, 8] > 0 & itera5[i, 8] + deltappetp[i, 9] < 100) {itera6[i, 9]
< -itera5[i, 8] + deltappetp[i, 9]} else if(itera5[i, 8]
> 0 & itera5[i, 8] + deltappetp[i, 9] > 100) {itera6[i, 9] < -100}
if(itera5[i, 9] > 0 & itera5[i, 9] + deltappetp[i, 10] < 100) {itera6[i, 10]
< -itera5[i, 9] + deltappetp[i, 10]} else if(itera5[i, 9]
> 0 & itera5[i, 9] + deltappetp[i, 10] > 100) {itera6[i, 10]
< -100}
if(itera5[i, 10] > 0 & itera5[i, 10] + deltappetp[i, 11] < 100) {itera6[i, 11]
< -itera5[i, 10] + deltappetp[i, 11]} else if(itera5[i, 10]
> 0 & itera5[i, 10] + deltappetp[i, 11] > 100) {itera6[i, 11]
< -100}
if(itera5[i, 11] > 0 & itera5[i, 11] + deltappetp[i, 12] < 100) {itera6[i, 12]
< -itera5[i, 11] + deltappetp[i, 12]} else if(itera5[i, 11]
> 0 & itera5[i, 11] + deltappetp[i, 12] > 100) {itera6[i, 12]
< -100}
}

```

Se crea una matriz vacía (itera7) de orden n áreas por 12 meses, en los cuales se usará las condiciones para calcular RSTO, seis meses después del primer mes con humedad.

```

itera7 < -matrix(0, n, 12)
for (i in 1:n) {
if(itera6[i, 12] > 0 & itera6[i, 12] + deltappetp[i, 1] < 100) {itera7[i, 1]
< -itera6[i, 12] + deltappetp[i, 1]} else if(itera6[i, 12]
> 0 & itera6[i, 12] + deltappetp[i, 1] > 100) {itera7[i, 1] < -100}
if(itera6[i, 1] > 0 & itera6[i, 1] + deltappetp[i, 2] < 100) {itera7[i, 2]
< -itera6[i, 1] + deltappetp[i, 2]} else if(itera6[i, 1]
> 0 & itera6[i, 1] + deltappetp[i, 2] > 100) {itera7[i, 2] < -100}

```

```

if(itera6[i,2] > 0 & itera6[i,2] + deltappetp[i,3] < 100) {itera7[i,3]
  < -itera6[i,2] + deltappetp[i,3]} else if(itera6[i,2]
  > 0 & itera6[i,2] + deltappetp[i,3] > 100) {itera7[i,3] < -100}
if(itera6[i,3] > 0 & itera6[i,3] + deltappetp[i,4] < 100) {itera7[i,4]
  < -itera6[i,3] + deltappetp[i,4]} else if(itera6[i,3]
  > 0 & itera6[i,3] + deltappetp[i,4] > 100) {itera7[i,4] < -100}
if(itera6[i,4] > 0 & itera6[i,4] + deltappetp[i,5] < 100) {itera7[i,5]
  < -itera6[i,4] + deltappetp[i,5]} else if(itera6[i,4]
  > 0 & itera6[i,4] + deltappetp[i,5] > 100) {itera7[i,5] < -100}
if(itera6[i,5] > 0 & itera6[i,5] + deltappetp[i,6] < 100) {itera7[i,6]
  < -itera6[i,5] + deltappetp[i,6]} else if(itera6[i,5]
  > 0 & itera6[i,5] + deltappetp[i,6] > 100) {itera7[i,6] < -100}
if(itera6[i,6] > 0 & itera6[i,6] + deltappetp[i,7] < 100) {itera7[i,7]
  < -itera6[i,6] + deltappetp[i,7]} else if(itera6[i,6]
  > 0 & itera6[i,6] + deltappetp[i,7] > 100) {itera7[i,7] < -100}
if(itera6[i,7] > 0 & itera6[i,7] + deltappetp[i,8] < 100) {itera7[i,8]
  < -itera6[i,7] + deltappetp[i,8]} else if(itera6[i,7]
  > 0 & itera6[i,7] + deltappetp[i,8] > 100) {itera7[i,8] < -100}
if(itera6[i,8] > 0 & itera6[i,8] + deltappetp[i,9] < 100) {itera7[i,9]
  < -itera6[i,8] + deltappetp[i,9]} else if(itera6[i,8]
  > 0 & itera6[i,8] + deltappetp[i,9] > 100) {itera7[i,9] < -100}
if(itera6[i,9] > 0 & itera6[i,9] + deltappetp[i,10] < 100) {itera7[i,10]
  < -itera6[i,9] + deltappetp[i,10]} else if(itera6[i,9]
  > 0 & itera6[i,9] + deltappetp[i,10] > 100) {itera7[i,10]
  < -100}
if(itera6[i,10] > 0 & itera6[i,10] + deltappetp[i,11] < 100) {itera7[i,11]
  < -itera6[i,10] + deltappetp[i,11]} else if(itera6[i,10]
  > 0 & itera6[i,10] + deltappetp[i,11] > 100) {itera7[i,11]
  < -100}

```

```

if(itera6[i, 11] > 0 & itera6[i, 11] + deltappetp[i, 12] < 100) {itera7[i, 12]
  < -itera6[i, 11] + deltappetp[i, 12]} else if(itera6[i, 11]
  > 0 & itera6[i, 11] + deltappetp[i, 12] > 100) {itera7[i, 12]
  < -100}
}

```

Se crea una matriz vacía (*itera8*) de orden n áreas por 12 meses, en los cuales se usará las condiciones para calcular RSTO, siete meses después del primer mes con humedad.

```

itera8 < -matrix(0, n, 12)
for (i in 1:n) {
  if(itera7[i, 12] > 0 & itera7[i, 12] + deltappetp[i, 1] < 100) {itera8[i, 1]
    < -itera7[i, 12] + deltappetp[i, 1]} else if(itera7[i, 12]
    > 0 & itera7[i, 12] + deltappetp[i, 1] > 100) {itera8[i, 1] < -100}
  if(itera7[i, 1] > 0 & itera7[i, 1] + deltappetp[i, 2] < 100) {itera8[i, 2]
    < -itera7[i, 1] + deltappetp[i, 2]} else if(itera7[i, 1]
    > 0 & itera7[i, 1] + deltappetp[i, 2] > 100) {itera8[i, 2] < -100}
  if(itera7[i, 2] > 0 & itera7[i, 2] + deltappetp[i, 3] < 100) {itera8[i, 3]
    < -itera7[i, 2] + deltappetp[i, 3]} else if(itera7[i, 2]
    > 0 & itera7[i, 2] + deltappetp[i, 3] > 100) {itera8[i, 3] < -100}
  if(itera7[i, 3] > 0 & itera7[i, 3] + deltappetp[i, 4] < 100) {itera8[i, 4]
    < -itera7[i, 3] + deltappetp[i, 4]} else if(itera7[i, 3]
    > 0 & itera7[i, 3] + deltappetp[i, 4] > 100) {itera8[i, 4] < -100}
  if(itera7[i, 4] > 0 & itera7[i, 4] + deltappetp[i, 5] < 100) {itera8[i, 5]
    < -itera7[i, 4] + deltappetp[i, 5]} else if(itera7[i, 4]
    > 0 & itera7[i, 4] + deltappetp[i, 5] > 100) {itera8[i, 5] < -100}
  if(itera7[i, 5] > 0 & itera7[i, 5] + deltappetp[i, 6] < 100) {itera8[i, 6]
    < -itera7[i, 5] + deltappetp[i, 6]} else if(itera7[i, 5]
    > 0 & itera7[i, 5] + deltappetp[i, 6] > 100) {itera8[i, 6] < -100}
}

```



```

if(itera7[i,6] > 0 & itera7[i,6] + deltappetp[i,7] < 100) {itera8[i,7]
  < -itera7[i,6] + deltappetp[i,7]} else if(itera7[i,6]
  > 0 & itera7[i,6] + deltappetp[i,7] > 100) {itera8[i,7] < -100}
if(itera7[i,7] > 0 & itera7[i,7] + deltappetp[i,8] < 100) {itera8[i,8]
  < -itera7[i,7] + deltappetp[i,8]} else if(itera7[i,7]
  > 0 & itera7[i,7] + deltappetp[i,8] > 100) {itera8[i,8] < -100}
if(itera7[i,8] > 0 & itera7[i,8] + deltappetp[i,9] < 100) {itera8[i,9]
  < -itera7[i,8] + deltappetp[i,9]} else if(itera7[i,8]
  > 0 & itera7[i,8] + deltappetp[i,9] > 100) {itera8[i,9] < -100}
if(itera7[i,9] > 0 & itera7[i,9] + deltappetp[i,10] < 100) {itera8[i,10]
  < -itera7[i,9] + deltappetp[i,10]} else if(itera7[i,9]
  > 0 & itera7[i,9] + deltappetp[i,10] > 100) {itera8[i,10]
  < -100}
if(itera7[i,10] > 0 & itera7[i,10] + deltappetp[i,11] < 100) {itera8[i,11]
  < -itera7[i,10] + deltappetp[i,11]} else if(itera7[i,10]
  > 0 & itera7[i,10] + deltappetp[i,11] > 100) {itera8[i,11]
  < -100}
if(itera7[i,11] > 0 & itera7[i,11] + deltappetp[i,12] < 100) {itera8[i,12]
  < -itera7[i,11] + deltappetp[i,12]} else if(itera7[i,11]
  > 0 & itera7[i,11] + deltappetp[i,12] > 100) {itera8[i,12]
  < -100}
}

```

Se crea una matriz vacía (itera9) de orden n áreas por 12 meses, en los cuales se usará las condiciones para calcular RSTO, ocho meses después del primer mes con humedad.

```

itera9 < -matrix(0, n, 12)
for (i in 1:n) {

```

```

if(itera8[i, 12] > 0 & itera8[i, 12] + deltappetp[i, 1] < 100) {itera9[i, 1]
    < -itera8[i, 12] + deltappetp[i, 1]} else if(itera8[i, 12]
    > 0 & itera8[i, 12] + deltappetp[i, 1] > 100) {itera9[i, 1] < -100}
if(itera8[i, 1] > 0 & itera8[i, 1] + deltappetp[i, 2] < 100) {itera9[i, 2]
    < -itera8[i, 1] + deltappetp[i, 2]} else if(itera8[i, 1]
    > 0 & itera8[i, 1] + deltappetp[i, 2] > 100) {itera9[i, 2] < -100}
if(itera8[i, 2] > 0 & itera8[i, 2] + deltappetp[i, 3] < 100) {itera9[i, 3]
    < -itera8[i, 2] + deltappetp[i, 3]} else if(itera8[i, 2]
    > 0 & itera8[i, 2] + deltappetp[i, 3] > 100) {itera9[i, 3] < -100}
if(itera8[i, 3] > 0 & itera8[i, 3] + deltappetp[i, 4] < 100) {itera9[i, 4]
    < -itera8[i, 3] + deltappetp[i, 4]} else if(itera8[i, 3]
    > 0 & itera8[i, 3] + deltappetp[i, 4] > 100) {itera9[i, 4] < -100}
if(itera8[i, 4] > 0 & itera8[i, 4] + deltappetp[i, 5] < 100) {itera9[i, 5]
    < -itera8[i, 4] + deltappetp[i, 5]} else if(itera8[i, 4]
    > 0 & itera8[i, 4] + deltappetp[i, 5] > 100) {itera9[i, 5] < -100}
if(itera8[i, 5] > 0 & itera8[i, 5] + deltappetp[i, 6] < 100) {itera9[i, 6]
    < -itera8[i, 5] + deltappetp[i, 6]} else if(itera8[i, 5]
    > 0 & itera8[i, 5] + deltappetp[i, 6] > 100) {itera9[i, 6] < -100}
if(itera8[i, 6] > 0 & itera8[i, 6] + deltappetp[i, 7] < 100) {itera9[i, 7]
    < -itera8[i, 6] + deltappetp[i, 7]} else if(itera8[i, 6]
    > 0 & itera8[i, 6] + deltappetp[i, 7] > 100) {itera9[i, 7] < -100}
if(itera8[i, 7] > 0 & itera8[i, 7] + deltappetp[i, 8] < 100) {itera9[i, 8]
    < -itera8[i, 7] + deltappetp[i, 8]} else if(itera8[i, 7]
    > 0 & itera8[i, 7] + deltappetp[i, 8] > 100) {itera9[i, 8] < -100}
if(itera8[i, 8] > 0 & itera8[i, 8] + deltappetp[i, 9] < 100) {itera9[i, 9]
    < -itera8[i, 8] + deltappetp[i, 9]} else if(itera8[i, 8]
    > 0 & itera8[i, 8] + deltappetp[i, 9] > 100) {itera9[i, 9] < -100}
if(itera8[i, 9] > 0 & itera8[i, 9] + deltappetp[i, 10] < 100) {itera9[i, 10]
    < -itera8[i, 9] + deltappetp[i, 10]} else if(itera8[i, 9]
    > 0 & itera8[i, 9] + deltappetp[i, 10] > 100) {itera9[i, 10]
    < -100}

```

```

if(itera8[i, 10] > 0 & itera8[i, 10] + deltappetp[i, 11] < 100) {itera9[i, 11]
  < -itera8[i, 10] + deltappetp[i, 11]} else if(itera8[i, 10]
  > 0 & itera8[i, 10] + deltappetp[i, 11] > 100) {itera9[i, 11]
  < -100}

```

```

if(itera8[i, 11] > 0 & itera8[i, 11] + deltappetp[i, 12] < 100) {itera9[i, 12]
  < -itera8[i, 11] + deltappetp[i, 12]} else if(itera8[i, 11]
  > 0 & itera8[i, 11] + deltappetp[i, 12] > 100) {itera9[i, 12]
  < -100}

```

```

}

```

Se crea una matriz vacía (itera10) de orden n áreas por 12 meses, en los cuales se usará las condiciones para calcular RSTO, nueve meses después del primer mes con humedad.

```

itera10 < -matrix(0, n, 12)

```

```

for (i in 1:n) {

```

```

if(itera9[i, 12] > 0 & itera9[i, 12] + deltappetp[i, 1] < 100) {itera10[i, 1]
  < -itera9[i, 12] + deltappetp[i, 1]} else if(itera9[i, 12]
  > 0 & itera9[i, 12] + deltappetp[i, 1] > 100) {itera10[i, 1]
  < -100}

```

```

if(itera9[i, 1] > 0 & itera9[i, 1] + deltappetp[i, 2] < 100) {itera10[i, 2]
  < -itera9[i, 1] + deltappetp[i, 2]} else if(itera9[i, 1]
  > 0 & itera9[i, 1] + deltappetp[i, 2] > 100) {itera10[i, 2] < -100}

```

```

if(itera9[i, 2] > 0 & itera9[i, 2] + deltappetp[i, 3] < 100) {itera10[i, 3]
  < -itera9[i, 2] + deltappetp[i, 3]} else if(itera9[i, 2]
  > 0 & itera9[i, 2] + deltappetp[i, 3] > 100) {itera10[i, 3] < -100}

```

```

if(itera9[i, 3] > 0 & itera9[i, 3] + deltappetp[i, 4] < 100) {itera10[i, 4]
  < -itera9[i, 3] + deltappetp[i, 4]} else if(itera9[i, 3]
  > 0 & itera9[i, 3] + deltappetp[i, 4] > 100) {itera10[i, 4] < -100}

```

```

if(itera9[i, 4] > 0 & itera9[i, 4] + deltappetp[i, 5] < 100) {itera10[i, 5]
  < -itera9[i, 4] + deltappetp[i, 5]} else if(itera9[i, 4]
  > 0 & itera9[i, 4] + deltappetp[i, 5] > 100) {itera10[i, 5] < -100}

```

```

if(itera9[i,5] > 0 & itera9[i,5] + deltappetp[i,6] < 100) {itera10[i,6]
  < -itera9[i,5] + deltappetp[i,6]} else if(itera9[i,5]
  > 0 & itera9[i,5] + deltappetp[i,6] > 100) {itera10[i,6] < -100}
if(itera9[i,6] > 0 & itera9[i,6] + deltappetp[i,7] < 100) {itera10[i,7]
  < -itera9[i,6] + deltappetp[i,7]} else if(itera9[i,6]
  > 0 & itera9[i,6] + deltappetp[i,7] > 100) {itera10[i,7] < -100}
if(itera9[i,7] > 0 & itera9[i,7] + deltappetp[i,8] < 100) {itera10[i,8]
  < -itera9[i,7] + deltappetp[i,8]} else if(itera9[i,7]
  > 0 & itera9[i,7] + deltappetp[i,8] > 100) {itera10[i,8] < -100}
if(itera9[i,8] > 0 & itera9[i,8] + deltappetp[i,9] < 100) {itera10[i,9]
  < -itera9[i,8] + deltappetp[i,9]} else if(itera9[i,8]
  > 0 & itera9[i,8] + deltappetp[i,9] > 100) {itera10[i,9] < -100}
if(itera9[i,9] > 0 & itera9[i,9] + deltappetp[i,10] < 100) {itera10[i,10]
  < -itera9[i,9] + deltappetp[i,10]} else if(itera9[i,9]
  > 0 & itera9[i,9] + deltappetp[i,10] > 100) {itera10[i,10]
  < -100}
if(itera9[i,10] > 0 & itera9[i,10] + deltappetp[i,11] < 100) {itera10[i,11]
  < -itera9[i,10] + deltappetp[i,11]} else if(itera9[i,10]
  > 0 & itera9[i,10] + deltappetp[i,11] > 100) {itera10[i,11]
  < -100}
if(itera9[i,11] > 0 & itera9[i,11] + deltappetp[i,12] < 100) {itera10[i,12]
  < -itera9[i,11] + deltappetp[i,12]} else if(itera9[i,11]
  > 0 & itera9[i,11] + deltappetp[i,12] > 100) {itera10[i,12]
  < -100}
}

```

Se crea una matriz vacía (itera11) de orden n áreas por 12 meses, en los cuales se usará las condiciones para calcular RSTO, 10 meses después del primer mes con humedad.

```

itera11 < -matrix(0,n,12)

```

```

for (i in 1:n) {
  if(itera10[i,12] > 0 & itera10[i,12] + deltappetp[i,1] < 100) {itera11[i,1]
    < -itera10[i,12] + deltappetp[i,1]} else if(itera10[i,12]
    > 0 & itera10[i,12] + deltappetp[i,1] > 100) {itera11[i,1]
    < -100}
  if(itera10[i,1] > 0 & itera10[i,1] + deltappetp[i,2] < 100) {itera11[i,2]
    < -itera10[i,1] + deltappetp[i,2]} else if(itera10[i,1]
    > 0 & itera10[i,1] + deltappetp[i,2] > 100) {itera11[i,2]
    < -100}
  if(itera10[i,2] > 0 & itera10[i,2] + deltappetp[i,3] < 100) {itera11[i,3]
    < -itera10[i,2] + deltappetp[i,3]} else if(itera10[i,2]
    > 0 & itera10[i,2] + deltappetp[i,3] > 100) {itera11[i,3]
    < -100}
  if(itera10[i,3] > 0 & itera10[i,3] + deltappetp[i,4] < 100) {itera11[i,4]
    < -itera10[i,3] + deltappetp[i,4]} else if(itera10[i,3]
    > 0 & itera10[i,3] + deltappetp[i,4] > 100) {itera11[i,4]
    < -100}
  if(itera10[i,4] > 0 & itera10[i,4] + deltappetp[i,5] < 100) {itera11[i,5]
    < -itera10[i,4] + deltappetp[i,5]} else if(itera10[i,4]
    > 0 & itera10[i,4] + deltappetp[i,5] > 100) {itera11[i,5]
    < -100}
  if(itera10[i,5] > 0 & itera10[i,5] + deltappetp[i,6] < 100) {itera11[i,6]
    < -itera10[i,5] + deltappetp[i,6]} else if(itera10[i,5]
    > 0 & itera10[i,5] + deltappetp[i,6] > 100) {itera11[i,6]
    < -100}
  if(itera10[i,6] > 0 & itera10[i,6] + deltappetp[i,7] < 100) {itera11[i,7]
    < -itera10[i,6] + deltappetp[i,7]} else if(itera10[i,6]
    > 0 & itera10[i,6] + deltappetp[i,7] > 100) {itera11[i,7]
    < -100}
}

```

```

if(itera10[i,7] > 0 & itera10[i,7] + deltappetp[i,8] < 100) {itera11[i,8]
  < -itera10[i,7] + deltappetp[i,8]} else if(itera10[i,7]
  > 0 & itera10[i,7] + deltappetp[i,8] > 100) {itera11[i,8]
  < -100}
if(itera10[i,8] > 0 & itera10[i,8] + deltappetp[i,9] < 100) {itera11[i,9]
  < -itera10[i,8] + deltappetp[i,9]} else if(itera10[i,8]
  > 0 & itera10[i,8] + deltappetp[i,9] > 100) {itera11[i,9]
  < -100}
if(itera10[i,9] > 0 & itera10[i,9] + deltappetp[i,10] < 100) {itera11[i,10]
  < -itera10[i,9] + deltappetp[i,10]} else if(itera10[i,9]
  > 0 & itera10[i,9] + deltappetp[i,10] > 100) {itera11[i,10]
  < -100}
if(itera10[i,10] > 0 & itera10[i,10] + deltappetp[i,11]
  < 100) {itera11[i,11]
  < -itera10[i,10] + deltappetp[i,11]} else if(itera10[i,10]
  > 0 & itera10[i,10] + deltappetp[i,11] > 100) {itera11[i,11]
  < -100}
if(itera10[i,11] > 0 & itera10[i,11] + deltappetp[i,12]
  < 100) {itera11[i,12]
  < -itera10[i,11] + deltappetp[i,12]} else if(itera10[i,11]
  > 0 & itera10[i,11] + deltappetp[i,12] > 100) {itera11[i,12]
  < -100}
}

```

Se crea una matriz vacía (itera12) de orden n áreas por 12 meses, en los cuales se usará las condiciones para calcular RSTO, 11 meses después del primer mes con humedad.

```

itera12 < -matrix(0,n,12)
for (i in 1:n) {

```

```

if(itera11[i,12] > 0 & itera11[i,12] + deltappetp[i,1] < 100) {itera12[i,1]
< -itera11[i,12] + deltappetp[i,1]} else if(itera11[i,12]
> 0 & itera11[i,12] + deltappetp[i,1] > 100) {itera12[i,1]
< -100}

if(itera11[i,1] > 0 & itera11[i,1] + deltappetp[i,2] < 100) {itera12[i,2]
< -itera11[i,1] + deltappetp[i,2]} else if(itera11[i,1]
> 0 & itera11[i,1] + deltappetp[i,2] > 100) {itera12[i,2]
< -100}

if(itera11[i,2] > 0 & itera11[i,2] + deltappetp[i,3] < 100) {itera12[i,3]
< -itera11[i,2] + deltappetp[i,3]} else if(itera11[i,2]
> 0 & itera11[i,2] + deltappetp[i,3] > 100) {itera12[i,3]
< -100}

if(itera11[i,3] > 0 & itera11[i,3] + deltappetp[i,4] < 100) {itera12[i,4]
< -itera11[i,3] + deltappetp[i,4]} else if(itera11[i,3]
> 0 & itera11[i,3] + deltappetp[i,4] > 100) {itera12[i,4]
< -100}

if(itera11[i,4] > 0 & itera11[i,4] + deltappetp[i,5] < 100) {itera12[i,5]
< -itera11[i,4] + deltappetp[i,5]} else if(itera11[i,4]
> 0 & itera11[i,4] + deltappetp[i,5] > 100) {itera12[i,5]
< -100}

if(itera11[i,5] > 0 & itera11[i,5] + deltappetp[i,6] < 100) {itera12[i,6]
< -itera11[i,5] + deltappetp[i,6]} else if(itera11[i,5]
> 0 & itera11[i,5] + deltappetp[i,6] > 100) {itera12[i,6]
< -100}

if(itera11[i,6] > 0 & itera11[i,6] + deltappetp[i,7] < 100) {itera12[i,7]
< -itera11[i,6] + deltappetp[i,7]} else if(itera11[i,6]
> 0 & itera11[i,6] + deltappetp[i,7] > 100) {itera12[i,7]
< -100}

```

```

if(itera11[i,7] > 0 & itera11[i,7] + deltappetp[i,8] < 100) {itera12[i,8]
  < -itera11[i,7] + deltappetp[i,8]} else if(itera11[i,7]
  > 0 & itera11[i,7] + deltappetp[i,8] > 100) {itera12[i,8]
  < -100}
if(itera11[i,8] > 0 & itera11[i,8] + deltappetp[i,9] < 100) {itera12[i,9]
  < -itera11[i,8] + deltappetp[i,9]} else if(itera11[i,8]
  > 0 & itera11[i,8] + deltappetp[i,9] > 100) {itera12[i,9]
  < -100}
if(itera11[i,9] > 0 & itera11[i,9] + deltappetp[i,10] < 100) {itera12[i,10]
  < -itera11[i,9] + deltappetp[i,10]} else if(itera11[i,9]
  > 0 & itera11[i,9] + deltappetp[i,10] > 100) {itera12[i,10]
  < -100}
if(itera11[i,10] > 0 & itera11[i,10] + deltappetp[i,11]
  < 100) {itera12[i,11]
  < -itera11[i,10] + deltappetp[i,11]} else if(itera11[i,10]
  > 0 & itera11[i,10] + deltappetp[i,11] > 100) {itera12[i,11]
  < -100}
if(itera11[i,11] > 0 & itera11[i,11] + deltappetp[i,12]
  < 100) {itera12[i,12]
  < -itera11[i,11] + deltappetp[i,12]} else if(itera11[i,11]
  > 0 & itera11[i,11] + deltappetp[i,12] > 100) {itera12[i,12]
  < -100}
}

```

Se integrarán cada una de las interacciones generadas, en una matriz vacía de orden n áreas por 12 meses (RSTO), en el cual, se establece que si la iteración n es mayor que 0, entonces RSTO será igual a dichas iteraciones, de tal manera que se consideran todos los meses calculados.

```
RSTO < -matrix(0,58,12)
```

```
for (i in 1:58) {
```



```

if(itera1[i, 1] > 0){RSTO[i, 1] < -itera1[i, 1]}else if (itera2[i, 1]
> 0){RSTO[i, 1] < -itera2[i, 1]}else if (itera3[i, 1] > 0){RSTO[i, 1]
< -itera3[i, 1]}else if (itera4[i, 1] > 0){RSTO[i, 1]
< -itera4[i, 1]}else if (itera5[i, 1] > 0){RSTO[i, 1]
< -itera5[i, 1]}else if (itera6[i, 1] > 0){RSTO[i, 1]
< -itera6[i, 1]}else if (itera7[i, 1] > 0){RSTO[i, 1]
< -itera7[i, 1]}else if (itera8[i, 1] > 0){RSTO[i, 1]
< -itera8[i, 1]}else if (itera9[i, 1] > 0){RSTO[i, 1]
< -itera9[i, 1]}else if (itera10[i, 1] > 0){RSTO[i, 1]
< -itera10[i, 1]}else if (itera11[i, 1] > 0){RSTO[i, 1]
< -itera11[i, 1]}else if (itera12[i, 1] > 0){RSTO[i, 1]
< -itera12[i, 1]}

```

```

if(itera1[i, 2] > 0){RSTO[i, 2] < -itera1[i, 2]}else if (itera2[i, 2]
> 0){RSTO[i, 2] < -itera2[i, 2]}else if (itera3[i, 2] > 0){RSTO[i, 2]
< -itera3[i, 2]}else if (itera4[i, 2] > 0){RSTO[i, 2]
< -itera4[i, 2]}else if (itera5[i, 2] > 0){RSTO[i, 2]
< -itera5[i, 2]}else if (itera6[i, 2] > 0){RSTO[i, 2]
< -itera6[i, 2]}else if (itera7[i, 2] > 0){RSTO[i, 2]
< -itera7[i, 2]}else if (itera8[i, 2] > 0){RSTO[i, 2]
< -itera8[i, 2]}else if (itera9[i, 2] > 0){RSTO[i, 2]
< -itera9[i, 2]}else if (itera10[i, 2] > 0){RSTO[i, 2]
< -itera10[i, 2]}else if (itera11[i, 2] > 0){RSTO[i, 2]
< -itera11[i, 2]}else if (itera12[i, 2] > 0){RSTO[i, 2]
< -itera12[i, 2]}

```

```

if(itera1[i,3] > 0){RSTO[i,3] < -itera1[i,3]}else if (itera2[i,3]
> 0){RSTO[i,3] < -itera2[i,3]}else if (itera3[i,3] > 0){RSTO[i,3]
< -itera3[i,3]}else if (itera4[i,3] > 0){RSTO[i,3]
< -itera4[i,3]}else if (itera5[i,3] > 0){RSTO[i,3]
< -itera5[i,3]}else if (itera6[i,3] > 0){RSTO[i,3]
< -itera6[i,3]}else if (itera7[i,3] > 0){RSTO[i,3]
< -itera7[i,3]}else if (itera8[i,3] > 0){RSTO[i,3]
< -itera8[i,3]}else if (itera9[i,3] > 0){RSTO[i,3]
< -itera9[i,3]}else if (itera10[i,3] > 0){RSTO[i,3]
< -itera10[i,3]}else if (itera11[i,3] > 0){RSTO[i,3]
< -itera11[i,3]}else if (itera12[i,3] > 0){RSTO[i,3]
< -itera12[i,3]}

```

```

if(itera1[i,4] > 0){RSTO[i,4] < -itera1[i,4]}else if (itera2[i,4]
> 0){RSTO[i,4] < -itera2[i,4]}else if (itera3[i,4] > 0){RSTO[i,4]
< -itera3[i,4]}else if (itera4[i,4] > 0){RSTO[i,4]
< -itera4[i,4]}else if (itera5[i,4] > 0){RSTO[i,4]
< -itera5[i,4]}else if (itera6[i,4] > 0){RSTO[i,4]
< -itera6[i,4]}else if (itera7[i,4] > 0){RSTO[i,4]
< -itera7[i,4]}else if (itera8[i,4] > 0){RSTO[i,4]
< -itera8[i,4]}else if (itera9[i,4] > 0){RSTO[i,4]
< -itera9[i,4]}else if (itera10[i,4] > 0){RSTO[i,4]
< -itera10[i,4]}else if (itera11[i,4] > 0){RSTO[i,4]
< -itera11[i,4]}else if (itera12[i,4] > 0){RSTO[i,4]
< -itera12[i,4]}

```

```

if(itera1[i,5] > 0){RSTO[i,5] < -itera1[i,5]}else if (itera2[i,5]
> 0){RSTO[i,5] < -itera2[i,5]}else if (itera3[i,5] > 0){RSTO[i,5]
< -itera3[i,5]}else if (itera4[i,5] > 0){RSTO[i,5]
< -itera4[i,5]}else if (itera5[i,5] > 0){RSTO[i,5]
< -itera5[i,5]}else if (itera6[i,5] > 0){RSTO[i,5]
< -itera6[i,5]}else if (itera7[i,5] > 0){RSTO[i,5]
< -itera7[i,5]}else if (itera8[i,5] > 0){RSTO[i,5]
< -itera8[i,5]}else if (itera9[i,5] > 0){RSTO[i,5]
< -itera9[i,5]}else if (itera10[i,5] > 0){RSTO[i,5]
< -itera10[i,5]}else if (itera11[i,5] > 0){RSTO[i,5]
< -itera11[i,5]}else if (itera12[i,5] > 0){RSTO[i,5]
< -itera12[i,5]}

```

```

if(itera1[i,6] > 0){RSTO[i,6] < -itera1[i,6]}else if (itera2[i,6]
> 0){RSTO[i,6] < -itera2[i,6]}else if (itera3[i,6] > 0){RSTO[i,6]
< -itera3[i,6]}else if (itera4[i,6] > 0){RSTO[i,6]
< -itera4[i,6]}else if (itera5[i,6] > 0){RSTO[i,6]
< -itera5[i,6]}else if (itera6[i,6] > 0){RSTO[i,6]
< -itera6[i,6]}else if (itera7[i,6] > 0){RSTO[i,6]
< -itera7[i,6]}else if (itera8[i,6] > 0){RSTO[i,6]
< -itera8[i,6]}else if (itera9[i,6] > 0){RSTO[i,6]
< -itera9[i,6]}else if (itera10[i,6] > 0){RSTO[i,6]
< -itera10[i,6]}else if (itera11[i,6] > 0){RSTO[i,6]
< -itera11[i,6]}else if (itera12[i,6] > 0){RSTO[i,6]
< -itera12[i,6]}

```

```

if(itera1[i, 7] > 0){RSTO[i, 7] < -itera1[i, 7]}else if (itera2[i, 7]
> 0){RSTO[i, 7] < -itera2[i, 7]}else if (itera3[i, 7] > 0){RSTO[i, 7]
< -itera3[i, 7]}else if (itera4[i, 7] > 0){RSTO[i, 7]
< -itera4[i, 7]}else if (itera5[i, 7] > 0){RSTO[i, 7]
< -itera5[i, 7]}else if (itera6[i, 7] > 0){RSTO[i, 7]
< -itera6[i, 7]}else if (itera7[i, 7] > 0){RSTO[i, 7]
< -itera7[i, 7]}else if (itera8[i, 7] > 0){RSTO[i, 7]
< -itera8[i, 7]}else if (itera9[i, 7] > 0){RSTO[i, 7]
< -itera9[i, 7]}else if (itera10[i, 7] > 0){RSTO[i, 7]
< -itera10[i, 7]}else if (itera11[i, 7] > 0){RSTO[i, 7]
< -itera11[i, 7]}else if (itera12[i, 7] > 0){RSTO[i, 7]
< -itera12[i, 7]}

```

```

if(itera1[i, 8] > 0){RSTO[i, 8] < -itera1[i, 8]}else if (itera2[i, 8]
> 0){RSTO[i, 8] < -itera2[i, 8]}else if (itera3[i, 8] > 0){RSTO[i, 8]
< -itera3[i, 8]}else if (itera4[i, 8] > 0){RSTO[i, 8]
< -itera4[i, 8]}else if (itera5[i, 8] > 0){RSTO[i, 8]
< -itera5[i, 8]}else if (itera6[i, 8] > 0){RSTO[i, 8]
< -itera6[i, 8]}else if (itera7[i, 8] > 0){RSTO[i, 8]
< -itera7[i, 8]}else if (itera8[i, 8] > 0){RSTO[i, 8]
< -itera8[i, 8]}else if (itera9[i, 8] > 0){RSTO[i, 8]
< -itera9[i, 8]}else if (itera10[i, 8] > 0){RSTO[i, 8]
< -itera10[i, 8]}else if (itera11[i, 8] > 0){RSTO[i, 8]
< -itera11[i, 8]}else if (itera12[i, 8] > 0){RSTO[i, 8]
< -itera12[i, 8]}

```

```

if(itera1[i, 9] > 0){RSTO[i, 9] < -itera1[i, 9]}else if (itera2[i, 9]
> 0){RSTO[i, 9] < -itera2[i, 9]}else if (itera3[i, 9] > 0){RSTO[i, 9]
< -itera3[i, 9]}else if (itera4[i, 9] > 0){RSTO[i, 9]
< -itera4[i, 9]}else if (itera5[i, 9] > 0){RSTO[i, 9]
< -itera5[i, 9]}else if (itera6[i, 9] > 0){RSTO[i, 9]
< -itera6[i, 9]}else if (itera7[i, 9] > 0){RSTO[i, 9]
< -itera7[i, 9]}else if (itera8[i, 9] > 0){RSTO[i, 9]
< -itera8[i, 9]}else if (itera9[i, 9] > 0){RSTO[i, 9]
< -itera9[i, 9]}else if (itera10[i, 9] > 0){RSTO[i, 9]
< -itera10[i, 9]}else if (itera11[i, 9] > 0){RSTO[i, 9]
< -itera11[i, 9]}else if (itera12[i, 9] > 0){RSTO[i, 9]
< -itera12[i, 9]}

```

```

if(itera1[i, 10] > 0){RSTO[i, 10] < -itera1[i, 10]}else if (itera2[i, 10]
> 0){RSTO[i, 10] < -itera2[i, 10]}else if (itera3[i, 10]
> 0){RSTO[i, 10] < -itera3[i, 10]}else if (itera4[i, 10]
> 0){RSTO[i, 10] < -itera4[i, 10]}else if (itera5[i, 10]
> 0){RSTO[i, 10] < -itera5[i, 10]}else if (itera6[i, 10]
> 0){RSTO[i, 10] < -itera6[i, 10]}else if (itera7[i, 10]
> 0){RSTO[i, 10] < -itera7[i, 10]}else if (itera8[i, 10]
> 0){RSTO[i, 10] < -itera8[i, 10]}else if (itera9[i, 10]
> 0){RSTO[i, 10] < -itera9[i, 10]}else if (itera10[i, 10]
> 0){RSTO[i, 10] < -itera10[i, 10]}else if (itera11[i, 10]
> 0){RSTO[i, 10] < -itera11[i, 10]}else if (itera12[i, 10]
> 0){RSTO[i, 10] < -itera12[i, 10]}

```

```

if(itera1[i, 11] > 0){RSTO[i, 11] < -itera1[i, 11]}else if (itera2[i, 11]
> 0){RSTO[i, 11] < -itera2[i, 11]}else if (itera3[i, 11]
> 0){RSTO[i, 11] < -itera3[i, 11]}else if (itera4[i, 11]
> 0){RSTO[i, 11] < -itera4[i, 11]}else if (itera5[i, 11]
> 0){RSTO[i, 11] < -itera5[i, 11]}else if (itera6[i, 11]
> 0){RSTO[i, 11] < -itera6[i, 11]}else if (itera7[i, 11]
> 0){RSTO[i, 11] < -itera7[i, 11]}else if (itera8[i, 11]
> 0){RSTO[i, 11] < -itera8[i, 11]}else if (itera9[i, 11]
> 0){RSTO[i, 11] < -itera9[i, 11]}else if (itera10[i, 11]
> 0){RSTO[i, 11] < -itera10[i, 11]}else if (itera11[i, 11]
> 0){RSTO[i, 11] < -itera11[i, 11]}else if (itera12[i, 11]
> 0){RSTO[i, 11] < -itera12[i, 11]}

```

```

if(itera1[i, 12] > 0){RSTO[i, 12] < -itera1[i, 12]}else if (itera2[i, 11]
> 0){RSTO[i, 12] < -itera2[i, 12]}else if (itera3[i, 12]
> 0){RSTO[i, 12] < -itera3[i, 12]}else if (itera4[i, 12]
> 0){RSTO[i, 12] < -itera4[i, 12]}else if (itera5[i, 12]
> 0){RSTO[i, 12] < -itera5[i, 12]}else if (itera6[i, 12]
> 0){RSTO[i, 12] < -itera6[i, 12]}else if (itera7[i, 12]
> 0){RSTO[i, 12] < -itera7[i, 12]}else if (itera8[i, 12]
> 0){RSTO[i, 12] < -itera8[i, 12]}else if (itera9[i, 12]
> 0){RSTO[i, 12] < -itera9[i, 12]}else if (itera10[i, 12]
> 0){RSTO[i, 12] < -itera10[i, 12]}else if (itera11[i, 12]
> 0){RSTO[i, 12] < -itera11[i, 12]}else if (itera12[i, 12]
> 0){RSTO[i, 12] < -itera12[i, 12]}

```

```

}

```

Para cuantificar los excedentes, se genera una matriz vacía de excedentes de áreas por 12 meses, en el que se establece la condición de que si $RSTO$ en el mes actual es mayor o igual a 100 ($RSTO_i \geq 100$) y el $RSTO$ del mes pasado es menor de 100 ($RSTO_{i-1} < 100$), entonces el excedente estará conformado como el valor absoluto de la diferencia entre $deltappetp$ del mes pasado, más el $deltappetp$ del mes actual, menos el $RSTO$ del mes ($EXD_i = |deltappetp_{i-1} + deltappetp_i + RSTO_i|$), de otra manera, si $RSTO$ del mes actual es mayor o igual a 100 ($RSTO_i \geq 100$) y el $RSTO$ del mes pasado igualmente es mayor o igual a 100 ($RSTO_{i-1} \geq 100$), entonces el excedente del mes actual es igual al $deltappetp$ ($EXD_i = deptappetp_i$).

```
EXD < -matrix(0, 58, 12)
```

```
for (i in 1:58) {
```

```
  if (RSTO[i, 1] ≥ 100 & RSTO[i, 12] < 100){EXD[i, 1]
    < -abs(deltappetp[i, 1] + deltappetp[i, 12]
    - RSTO[i, 1])}else if (RSTO[i, 1] ≥ 100 & RSTO[i, 12]
    ≥ 100){EXD[i, 1] < -deltappetp[i, 1]}
```

```
  if (RSTO[i, 2] ≥ 100 & RSTO[i, 1] < 100){EXD[i, 2]
    < -abs(deltappetp[i, 2] + deltappetp[i, 1]
    - RSTO[i, 2])}else if (RSTO[i, 2] ≥ 100 & RSTO[i, 1]
    ≥ 100){EXD[i, 2] < -deltappetp[i, 2]}
```

```
  if (RSTO[i, 3] ≥ 100 & RSTO[i, 2] < 100){EXD[i, 3]
    < -abs(deltappetp[i, 3] + deltappetp[i, 2]
    - RSTO[i, 3])}else if (RSTO[i, 3] ≥ 100 & RSTO[i, 2]
    ≥ 100){EXD[i, 3] < -deltappetp[i, 3]}
```

```
  if (RSTO[i, 4] ≥ 100 & RSTO[i, 3] < 100){EXD[i, 4]
    < -abs(deltappetp[i, 4] + deltappetp[i, 3]
    - RSTO[i, 4])}else if (RSTO[i, 4] ≥ 100 & RSTO[i, 3]
    ≥ 100){EXD[i, 4] < -deltappetp[i, 4]}
```

```

if(RSTO[i,5] ≥ 100 & RSTO[i,4] < 100){EXD[i,5]
  < -abs(deltappetp[i,5] + deltappetp[i,4]
  - RSTO[i,5])}else if (RSTO[i,5] ≥ 100 & RSTO[i,4]
  ≥ 100){EXD[i,5] < -deltappetp[i,5]}
if(RSTO[i,6] ≥ 100 & RSTO[i,5] < 100){EXD[i,6]
  < -abs(deltappetp[i,6] + deltappetp[i,5]
  - RSTO[i,6])}else if (RSTO[i,6] ≥ 100 & RSTO[i,5]
  ≥ 100){EXD[i,6] < -deltappetp[i,6]}
if(RSTO[i,7] ≥ 100 & RSTO[i,6] < 100){EXD[i,7]
  < -abs(deltappetp[i,7] + deltappetp[i,6]
  - RSTO[i,7])}else if (RSTO[i,7] ≥ 100 & RSTO[i,6]
  ≥ 100){EXD[i,7] < -deltappetp[i,7]}
if(RSTO[i,8] ≥ 100 & RSTO[i,7] < 100){EXD[i,8]
  < -abs(deltappetp[i,8] + deltappetp[i,7]
  - RSTO[i,8])}else if (RSTO[i,8] ≥ 100 & RSTO[i,7]
  ≥ 100){EXD[i,8] < -deltappetp[i,8]}
if(RSTO[i,9] ≥ 100 & RSTO[i,8] < 100){EXD[i,9]
  < -abs(deltappetp[i,9] + deltappetp[i,8]
  - RSTO[i,9])}else if (RSTO[i,9] ≥ 100 & RSTO[i,8]
  ≥ 100){EXD[i,9] < -deltappetp[i,9]}
if(RSTO[i,10] ≥ 100 & RSTO[i,9] < 100){EXD[i,10]
  < -abs(deltappetp[i,10] + deltappetp[i,9]
  - RSTO[i,10])}else if (RSTO[i,10] ≥ 100 & RSTO[i,9]
  ≥ 100){EXD[i,10] < -deltappetp[i,10]}
if(RSTO[i,11] ≥ 100 & RSTO[i,10] < 100){EXD[i,11]
  < -abs(deltappetp[i,11] + deltappetp[i,10]
  - RSTO[i,11])}else if (RSTO[i,11] ≥ 100 & RSTO[i,10]
  ≥ 100){EXD[i,11] < -deltappetp[i,11]}

```



```

if( $RSTO[i, 12] \geq 100$  &  $RSTO[i, 11] < 100$ ){ $EXD[i, 12]$ 
    <  $-abs(deltappetp[i, 12] + deltappetp[i, 11]$ 
     $- RSTO[i, 12])$ }else if ( $RSTO[i, 12] \geq 100$  &  $RSTO[i, 11]$ 
     $\geq 100$ ){ $EXD[i, 12] < -deltappetp[i, 12]$ }
}

```

Por otro lado, el déficit es determinado de la siguiente manera: si $RSTO$ del mes actual es menor o igual a cero ($RSTO_i \leq 0$) y el $RSTO$ del mes pasado es mayor que cero ($RSTO_{i-1} \geq 0$), entonces el déficit está constituido como el $RSTO$ del mes pasado, más el $deltappetp$ del mes actual ($DEF = RSTO_{i-1} + deltappetp_i$), de otra manera, si $RSTO$ del mes actual es menor o igual a cero ($RSTO_i \leq 0$), y $RSTO$ del mes pasado es menor o igual que 0 ($RSTO_{i-1} \leq 0$), entonces el déficit quedará constituido como el $deltappetp$ del mes actual ($DEF_i = deltappetp_i$).

```

DEF <  $-matrix(0, 58, 12)$ 

```

```

for (i in 1:58) {

```

```

    if( $RSTO[i, 1] \leq 0$  &  $RSTO[i, 12] > 0$ ){ $DEF[i, 1]$ 
        <  $-RSTO[i, 12] + deltappetp[i, 1]$ } else if( $RSTO[i, 1] <$ 
         $= 0$  &  $RSTO[i, 12] \leq 0$ ){ $DEF[i, 1] < -deltappetp[i, 1]$ }

```

```

    if( $RSTO[i, 2] \leq 0$  &  $RSTO[i, 1] > 0$ ){ $DEF[i, 2]$ 
        <  $-RSTO[i, 1] + deltappetp[i, 2]$ } else if( $RSTO[i, 2] <$ 
         $= 0$  &  $RSTO[i, 1] \leq 0$ ){ $DEF[i, 2] < -deltappetp[i, 2]$ }

```

```

    if( $RSTO[i, 3] \leq 0$  &  $RSTO[i, 2] > 0$ ){ $DEF[i, 3]$ 
        <  $-RSTO[i, 2] + deltappetp[i, 3]$ } else if( $RSTO[i, 3] <$ 
         $= 0$  &  $RSTO[i, 2] \leq 0$ ){ $DEF[i, 3] < -deltappetp[i, 3]$ }

```

```

    if( $RSTO[i, 4] \leq 0$  &  $RSTO[i, 3] > 0$ ){ $DEF[i, 4]$ 
        <  $-RSTO[i, 3] + deltappetp[i, 4]$ } else if( $RSTO[i, 4] <$ 
         $= 0$  &  $RSTO[i, 3] \leq 0$ ){ $DEF[i, 4] < -deltappetp[i, 4]$ }

```

```

    if( $RSTO[i, 5] \leq 0$  &  $RSTO[i, 4] > 0$ ){ $DEF[i, 5]$ 
        <  $-RSTO[i, 4] + deltappetp[i, 5]$ } else if( $RSTO[i, 5] <$ 
         $= 0$  &  $RSTO[i, 4] \leq 0$ ){ $DEF[i, 5] < -deltappetp[i, 5]$ }

```

```

if(RSTO[i, 6] <= 0 & RSTO[i, 5] > 0){DEF[i, 6]
    < -RSTO[i, 5] + deltappetp[i, 6]} else if(RSTO[i, 6] <
    = 0 & RSTO[i, 5] <= 0){DEF[i, 6] < -deltappetp[i, 6]}
if(RSTO[i, 7] <= 0 & RSTO[i, 6] > 0){DEF[i, 7]
    < -RSTO[i, 6] + deltappetp[i, 7]} else if(RSTO[i, 7] <
    = 0 & RSTO[i, 6] <= 0){DEF[i, 7] < -deltappetp[i, 7]}
if(RSTO[i, 8] <= 0 & RSTO[i, 7] > 0){DEF[i, 8]
    < -RSTO[i, 7] + deltappetp[i, 8]} else if(RSTO[i, 8] <
    = 0 & RSTO[i, 7] <= 0){DEF[i, 8] < -deltappetp[i, 8]}
if(RSTO[i, 9] <= 0 & RSTO[i, 8] > 0){DEF[i, 9]
    < -RSTO[i, 8] + deltappetp[i, 9]} else if(RSTO[i, 9] <
    = 0 & RSTO[i, 8] <= 0){DEF[i, 9] < -deltappetp[i, 9]}
if(RSTO[i, 10] <= 0 & RSTO[i, 9] > 0){DEF[i, 10]
    < -RSTO[i, 9] + deltappetp[i, 10]} else if(RSTO[i, 10] <
    = 0 & RSTO[i, 9] <= 0){DEF[i, 10] < -deltappetp[i, 10]}
if(RSTO[i, 11] <= 0 & RSTO[i, 10] > 0){DEF[i, 11]
    < -RSTO[i, 10] + deltappetp[i, 11]} else if(RSTO[i, 11] <
    = 0 & RSTO[i, 10] <= 0){DEF[i, 11] < -deltappetp[i, 11]}
if(RSTO[i, 12] <= 0 & RSTO[i, 11] > 0){DEF[i, 12]
    < -RSTO[i, 11] + deltappetp[i, 12]} else if(RSTO[i, 12] <
    = 0 & RSTO[i, 11] <= 0){DEF[i, 12] < -deltappetp[i, 12]}
}

```

Para fines de prácticos y de comprensión, se ha cambiado de signo el déficit:

$$\mathbf{Deficit} < -DEF * -1$$

Finalmente, se han genera la matriz de cambio en el almacenamiento (*deltaSto*), esto, simplemente estableciendo el $RSTO_{i-1} + RSTO_i$, es decir, la suma de las matrices de almacenamiento del mes actual, más el almacenamiento del mes anterior, permitiendo mostrar si el almacenamiento aumento o disminuyó, respecto al mes anterior.

```

deltaSto < -matrix(0, 58, 12)
for (i in 1:58) {
  deltaSto[i, 1] < -RSTO[i, 1] + RSTO[i, 12]
  deltaSto[i, 2] < -RSTO[i, 2] + RSTO[i, 1]
  deltaSto[i, 3] < -RSTO[i, 3] + RSTO[i, 2]
  deltaSto[i, 4] < -RSTO[i, 4] + RSTO[i, 3]
  deltaSto[i, 5] < -RSTO[i, 5] + RSTO[i, 4]
  deltaSto[i, 6] < -RSTO[i, 6] + RSTO[i, 5]
  deltaSto[i, 7] < -RSTO[i, 7] + RSTO[i, 6]
  deltaSto[i, 8] < -RSTO[i, 8] + RSTO[i, 7]
  deltaSto[i, 9] < -RSTO[i, 9] + RSTO[i, 8]
  deltaSto[i, 10] < -RSTO[i, 10] + RSTO[i, 9]
  deltaSto[i, 11] < -RSTO[i, 11] + RSTO[i, 10]
  deltaSto[i, 12] < -RSTO[i, 12] + RSTO[i, 11]
}

```

Ejemplo de aplicación. El algoritmo generado se aplicó sobre 58 áreas de influencia climática (AIC) del oriente del Valle de México, dentro de las microcuencas de Chapingo, Coxcacaco, Papalotla, Texcoco y Xalapango para las condiciones climáticas actuales, las cuales están conformadas por los parámetros de precipitación media anual (Cuadro 7) y evapotranspiración potencial (Cuadro 8) anual.

Cuadro 7: Estadísticos de precipitación media anual en las AIC del oriente del Valle de México.

| Pp | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
| Media | 9.60 | 9.62 | 16.88 | 37.69 | 72.19 | 135.91 | 135.67 | 133.31 | 117.09 | 60.71 | 14.74 | 7.62 |
| Máx | 12.00 | 13.00 | 19.00 | 48.00 | 91.00 | 174.00 | 188.00 | 177.00 | 168.00 | 77.00 | 26.00 | 13.00 |
| Min | 8.00 | 5.00 | 11.00 | 26.00 | 50.00 | 101.00 | 108.00 | 103.00 | 82.00 | 43.00 | 9.00 | 4.00 |
| Percentil 25 | 9.00 | 8.00 | 17.00 | 33.25 | 64.00 | 115.25 | 114.00 | 109.25 | 93.00 | 53.00 | 11.00 | 6.00 |
| Percentil 75 | 10.00 | 11.00 | 18.00 | 42.75 | 83.75 | 162.50 | 158.75 | 162.50 | 143.00 | 70.75 | 17.75 | 9.00 |
| Desv. Est. | 1.12 | 2.04 | 1.61 | 5.68 | 11.74 | 25.24 | 25.83 | 27.18 | 27.97 | 10.97 | 4.92 | 2.34 |

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 8: Estadísticos de evapotranspiración media mensual en las AIC del oriente del Valle de México.

| ETo | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
|--------------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Media | 69.28 | 69.00 | 85.12 | 84.74 | 83.42 | 65.08 | 60.89 | 61.47 | 57.09 | 64.33 | 67.41 | 69.28 |
| Máx | 96.04 | 96.49 | 120.77 | 119.50 | 117.46 | 91.94 | 84.37 | 85.63 | 79.97 | 89.03 | 93.96 | 96.45 |
| Min | 39.67 | 39.56 | 48.93 | 49.57 | 47.86 | 37.48 | 35.35 | 35.15 | 32.50 | 37.29 | 39.57 | 40.62 |
| Percentil 25 | 59.30 | 59.30 | 72.34 | 71.65 | 70.62 | 55.88 | 52.59 | 52.87 | 48.91 | 55.95 | 58.28 | 60.22 |
| Percentil 75 | 79.34 | 78.45 | 97.56 | 97.37 | 97.50 | 75.65 | 69.98 | 71.62 | 65.88 | 73.29 | 76.54 | 78.93 |
| Desv. Est. | 15.06 | 14.86 | 19.11 | 19.19 | 19.18 | 14.56 | 13.14 | 13.54 | 12.52 | 13.63 | 14.11 | 14.41 |

Fuente: Elaboración propia.

Dichas variables, alimentaron el algoritmo generado, a partir de lo cual, se generaron cada unos de los vectores de los parámetros que conforman el balance hídrico. En primer lugar, se muestran las diferencias entre la precipitación y evapotranspiración potencial (Cuadro 9) de cada una de las AIC evaluadas; se muestran que dichas diferencias son positivas en el periodo de verano-otoño, mientras que en el periodo de invierno-primavera, muestra la mayor diferencia a favor de la evapotranspiración potencial, mostrando congruencia con los regímenes de lluvia de la zona.

Cuadro 9: Estadísticos de diferencia entre precipitación y evapotranspiración potencial mensual en las AIC del oriente del Valle de México.

| DeltaPp | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
|--------------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Media | -59.68 | -59.38 | -68.24 | -47.05 | -11.23 | 70.83 | 74.79 | 71.84 | 59.99 | -3.62 | -52.67 | -61.66 |
| Máx | -30.67 | -29.56 | -30.93 | -1.57 | 43.14 | 136.52 | 152.65 | 140.85 | 135.50 | 39.71 | -13.57 | -27.62 |
| Min | -87.28 | -91.49 | -109.77 | -92.53 | -67.46 | 9.06 | 29.96 | 18.62 | 3.72 | -46.03 | -83.96 | -92.45 |
| Percentil 25 | -70.34 | -70.45 | -81.06 | -64.04 | -33.25 | 40.58 | 47.23 | 38.35 | 30.12 | -19.51 | -66.54 | -72.93 |
| Percentil 75 | -49.05 | -47.30 | -54.34 | -28.90 | 12.63 | 106.01 | 106.34 | 109.04 | 94.09 | 14.22 | -40.53 | -51.22 |
| Desv. Est. | 15.05 | 16.50 | 19.93 | 24.75 | 30.62 | 39.20 | 38.04 | 39.83 | 39.89 | 24.35 | 18.82 | 16.69 |

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, se muestra que el almacenamiento de agua (Cuadro 10) está ligado de igual forma a los regímenes de lluvia, acumulando la mayor capacidad de almacenamiento en el mes de septiembre (206 milímetros en promedio) de acuerdo con las condiciones de vegetación, cobertura vegetal y textura edáfica del territorio; mientras que el mes de mayo, se muestra como el mes con menor cantidad de agua almacenada (8 milímetros en promedio) debido a la ausencia de lluvia hasta el mes

de junio y a la utilización del remanente de agua en los procesos de infiltración, escurrimiento y evapotranspiración.

Cuadro 10: Estadísticos de almacenamiento de agua mensual en las AIC del oriente del Valle de México.

| RSTO | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
|--------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Media | 69.36 | 47.26 | 25.91 | 21.19 | 8.17 | 79.00 | 149.38 | 187.86 | 205.78 | 193.45 | 145.42 | 101.00 |
| Máx | 223.17 | 187.49 | 147.80 | 137.15 | 43.14 | 179.66 | 295.52 | 334.93 | 347.08 | 347.08 | 305.42 | 263.16 |
| Min | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 9.06 | 39.70 | 53.53 | 53.53 | 19.16 | 0.00 | 0.00 |
| Percentil 25 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 40.58 | 89.73 | 128.13 | 154.26 | 135.09 | 68.93 | 0.39 |
| Percentil 75 | 124.21 | 76.63 | 23.89 | 0.00 | 12.63 | 118.25 | 224.57 | 261.50 | 272.24 | 272.24 | 233.92 | 176.54 |
| Desv. Est. | 78.37 | 61.18 | 45.49 | 40.90 | 13.10 | 50.74 | 81.78 | 80.58 | 76.29 | 89.85 | 98.83 | 92.12 |

Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, el vector de excedente de agua (Cuadro 11) muestra que el mes con mayor cantidad de excedente de agua, está relacionado de manera directa con el almacenamiento, pues se muestra que el mes de septiembre, existe mayor disponibilidad del recurso hídrico con 53 milímetros en promedio, que son utilizados en los procesos de escurrimiento y recarga del manto acuífero.

Cuadro 11: Estadísticos de excedente de agua mensual en las AIC del oriente del Valle de México.

| EXD | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
|--------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Media | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 2.18 | 27.57 | 53.53 | 8.71 | 0.00 | 0.00 |
| Máx | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 39.17 | 140.85 | 144.54 | 39.71 | 0.00 | 0.00 |
| Min | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Percentil 25 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Percentil 75 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 35.91 | 114.93 | 14.22 | 0.00 | 0.00 |
| Desv. Est. | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 6.79 | 47.39 | 57.84 | 13.03 | 0.00 | 0.00 |

Fuente: Elaboración propia.

El parámetro de déficit de agua (cuadro 12), muestra tasas relacionadas con la ausencia de la precipitación, pues se observa que el mayor déficit de agua se manifiesta durante el periodo invierno-primavera, siendo el mes de marzo, el que mayor déficit presenta con 46 milímetros en promedio y siendo nulo durante el periodo de verano.

Cuadro 12: Estadísticos de déficit de agua mensual en las AIC del oriente del Valle de México.

| DEF | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Media | 28.04 | 37.28 | 46.89 | 42.32 | 19.40 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 4.64 | 17.24 |
| Máx | 87.28 | 91.49 | 109.77 | 92.53 | 67.46 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 60.90 | 92.45 |
| Min | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

| | | | | | | | | | | | | |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| Percentil 25 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 2.88 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Percentil 75 | 67.76 | 70.45 | 81.06 | 64.04 | 33.25 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 3.79 |
| Desv. Est. | 34.32 | 37.08 | 40.68 | 30.37 | 21.06 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 15.12 | 32.42 |

Fuente: Elaboración propia.

El cambio en el almacenamiento de agua (Cuadro 13) muestra los valores más altos en la transición de época lluvias y de secas, mostrando mayores incrementos en el mes de junio con 71 milímetros en promedio, mes, en el que existe una mayor lámina de precipitación en la zona; mientras que, la disminución más abrupta en el cambio en el almacenamiento se muestra en el mes de octubre, noviembre, meses en los que la lámina de precipitación disminuye de manera más drástica.

Cuadro 13: Estadísticos de cambio en el almacenamiento de agua mensual en las AIC del oriente del Valle de México.

| DeltaRSTO | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
|--------------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|
| Media | -31.64 | -22.10 | -21.35 | -4.73 | -13.02 | 70.83 | 70.38 | 38.48 | 17.93 | -12.33 | -48.03 | -44.42 |
| Máx | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 16.01 | 136.52 | 136.03 | 109.24 | 62.60 | 0.00 | -13.57 | 0.00 |
| Min | -60.00 | -60.18 | -63.21 | -32.40 | -104.86 | 9.06 | 26.91 | 0.00 | 0.00 | -46.03 | -75.53 | -73.92 |
| Percentil 25 | -50.32 | -46.37 | -44.89 | -6.24 | 0.00 | 40.58 | 47.23 | 21.60 | 0.00 | -19.51 | -61.91 | -63.82 |
| Percentil 75 | -0.39 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 106.01 | 100.53 | 47.42 | 33.24 | 0.00 | -33.33 | -32.39 |
| Desv. Est. | 22.06 | 23.48 | 23.69 | 8.47 | 29.11 | 39.20 | 32.36 | 27.03 | 17.31 | 14.30 | 17.78 | 23.46 |

Fuente: Elaboración propia.

La evapotranspiración actual (Cuadro 14), de manera similar a la evapotranspiración potencial, muestra una estrecha relación con la temperatura y la precipitación del mes; mostrándose como uno de los factores determinantes en el déficit de agua, mostrando las tasas más altas durante el mes de marzo con 132 milímetros, y las más bajas durante el mes de septiembre con 57 milímetros mensuales en promedio.

Cuadro 14: Estadísticos de evapotranspiración actual mensual en las AIC del oriente del Valle de México.

| ETa | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| Media | 97.33 | 106.28 | 132.01 | 127.06 | 102.82 | 65.08 | 60.89 | 61.47 | 57.09 | 64.33 | 72.05 | 86.52 |
| Máx | 183.07 | 187.97 | 230.54 | 211.99 | 184.93 | 91.94 | 84.37 | 85.63 | 79.97 | 89.03 | 154.86 | 188.90 |
| Min | 39.67 | 39.56 | 48.93 | 49.57 | 47.86 | 37.48 | 35.35 | 35.15 | 32.50 | 37.29 | 39.57 | 40.62 |
| Percentil 25 | 59.30 | 59.30 | 73.88 | 74.85 | 70.62 | 55.88 | 52.59 | 52.87 | 48.91 | 55.95 | 58.28 | 60.22 |
| Percentil 75 | 145.90 | 148.90 | 178.62 | 161.49 | 130.75 | 75.65 | 69.98 | 71.62 | 65.88 | 73.29 | 76.54 | 82.68 |
| Desv. Est. | 47.92 | 50.58 | 58.81 | 49.19 | 39.58 | 14.56 | 13.14 | 13.54 | 12.52 | 13.63 | 25.50 | 44.10 |

Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

El algoritmo desarrollado, se muestra como un método eficaz en la cuantificación del balance hídrico, para múltiples unidades de respuesta, lo cual, establece a dicho algoritmo como una herramienta útil en la planeación y análisis territorial, sin embargo, dado que los parámetros tanto de entrada, como de salida, están dados por una escala temporal mensual, dicho algoritmo no resulta ser una herramienta robusta para su aplicación en el cálculo de parámetros enfocado a la construcción de obras hidráulicas.

Asimismo, el algoritmo se encuentra altamente detallado, lo cual, puede representar un problema para la cuantificación de las iteraciones puesto que dicho algoritmo, utiliza memoria RAM en función del número de unidades de respuesta en las cuales se cuantificará el balance, por lo que se recomienda la optimización de dicho algoritmo propuesto, a partir de la simplificación de las expresiones generadas.

Finalmente, se propone el establecimiento de un método de calibración, para determinar el rendimiento y el comportamiento del algoritmo generado, para determinar su potencial para aplicaciones adicionales a la planificación del uso del agua y del territorio.

Literatura citada

- Brooks, K. N., Ffolliott, P. F., & Magner, J. A. (2013). *Hydrology and the management of watersheds*. (4th ed.; K N Brooks, P. F. Ffolliott, H. M. Gregersen, & L. F. DeBano, Eds.). Ames, USA: Iowa State University Press.
- Deng, C., Liu, P., Wang, W., Shao, Q., & Wang, D. (2019). Modelling time-variant parameters of a two-parameter monthly water balance model. *Journal of Hydrology*, 573, 918–936.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.04.027>
- Mendoza, M., Bocco, G., Bravo, M., Siebe, C., & Ortiz, M. A. (2002). Modelamiento hidrológico espacialmente distribuido: una revisión de sus componentes, niveles de integración e implicaciones en la estimación de procesos

hidrológicos en cuencas no instrumentadas. *Investigaciones Geográficas*, 47, 36–58. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112002000100004&nrm=iso

Ospina-Noreña, J. E., Domínguez-Ramírez, C. A., Vega-Rodríguez, E. E., Darghan-Contreras, A. E., & Rodríguez-Molano, L. E. (2017). Analysis of the water balance under regional scenarios of climate change for arid zones of Colombia. *Atmosfera*, 30(1), 63–76. <https://doi.org/10.20937/ATM.2017.30.01.06>

Xiong, L., Xu, X., Ren, D., Huang, Q., & Huang, G. (2019). Enhancing the capability of hydrological models to simulate the regional agro-hydrological processes in watersheds with shallow groundwater: Based on the SWAT framework. *Journal of Hydrology*, 572, 1–16. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.02.043>