



**ESTIMACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL PROCESO DE INTERCEPCIÓN
EN EL CÁLCULO MENSUAL DE LA RECARGA POTENCIAL
GENERADA EN LA CUENCA AGRÍCOLA DEL RÍO SANTIAGUITO,
ESTADO DE MÉXICO**

**ESTIMATION OF THE INFLUENCE OF THE INTERCEPTION PROCESS
ON THE MONTHLY CALCULATION OF THE POTENTIAL RECHARGE
GENERATED IN THE AGRICULTURAL BASIN OF THE SANTIAGUITO
RIVER, STATE OF MEXICO**

Sebastian Neri Ceily Natali

gpmoralesr@uaemex.mx

Guillermo Pedro Morales Reyes

natali.sebastian@outlook.es

ORCID:0000–0001–6022-6747

María Vicenta Esteller

mvestellera@uaemex.mx

José Luis Expósito Castillo

Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua
(UAEMex),

Toluca Estado de México, México.

RESUMEN

El trabajo tuvo como objetivo estimar la influencia del proceso de intercepción, en el cálculo mensual de la recarga potencial distribuida en una cuenca agrícola. Se asumió que la intercepción puede provocar un impacto en la variación espacio-

temporal de la precipitación neta y consecuentemente en la recarga potencial (Teófilo, 2017). La metodología consistió en: seleccionar una cuenca agrícola, se consideró el método de balance meteorológico agregando el término de intercepción para estimar la recarga potencial (Campos, 1987); (Teófilo, 2017). Se

utilizó el software SIATL 4.0 para trazar la divisoria, área de cuenca, polígonos de Thiessen y mapas de usos de suelo; se representó mediante una malla con celdas de 1.0 Km² la variación espacial y promedio mensual de: precipitación, temperaturas máxima, media, mínima y evaporación para un periodo de 20 años. Se calcularon los valores de intercepción y evapotranspiración del cultivo y se generaron mapas de recarga potencial incluyendo los cultivos maíz y trigo utilizando el software ARCGIS 10.0. Los resultados indicaron que la recarga potencial disminuye cuando se incorpora la intercepción en el balance y se precisan los meses que presentan o no, recarga en cada celda del dominio, acentuándose la disminución en celdas con mayores usos de suelo agrícola. Se concluyó que la intercepción si influye en la estimación de la recarga potencial en cuencas agrícolas y se considera un factor de reducción. El aporte del trabajo es la demostración de que el proceso de intercepción influye en la cuantificación más representativa de la recarga potencial en una cuenca

agrícola.

Palabras clave: Intercepción ; Recarga; Agrícola

ABSTRACT

The work aimed to estimate the influence of the interception process, in the monthly calculation of the potential recharge distributed in an agricultural basin. It was assumed that interception can have an impact on the spatio-temporal variation of net precipitation and consequently on potential recharge (Teófilo, 2017). The methodology consisted of: selecting an agricultural basin, the meteorological balance method was considered by adding the intercept term to estimate the potential recharge (Campos, 1987); (Teófilo, 2017). SIATL 4.0 software was used to plot the divide, basin area, Thiessen polygons and land use maps; was represented by a mesh with cells of 1.0 Km² the spatial variation and monthly average of: precipitation, maximum temperatures, average, minimum and evaporation for a period of 20 years. Crop interception and evapotranspiration values were

calculated and potential recharge maps were generated including maize and wheat crops using ARCGIS 10.0 software. The results indicated that the potential recharge decreases when the interception is incorporated into the balance sheet and the months that present or not are specified, recharge in each cell of the domain, accentuating the decrease in cells with greater uses of agricultural land. It was concluded that interception does influence the estimation of potential recharge in agricultural basins and is considered a reduction factor. The contribution of the work is the demonstration that the interception process influences the most representative quantification of the potential recharge in an agricultural basin.

Keywords: Interception; Recharge; Agricultural

Fecha de envío: 07 de julio de 2022

Fecha de aceptación: 05 de Octubre de 2022

INTRODUCCIÓN

Los diversos métodos existentes para estimar la recarga potencial que se presenta desde una cuenca hacia un acuífero, son muy variados respecto de los elementos y variables que se consideran; algunos de estos son más apropiados cuando se manejan escalas mayores y se pretende manejar datos estimativos en cuencas de grandes dimensiones, otros consideran un dominio más reducido y las estimaciones permiten observar ciertas características de la recarga asociadas al tiempo y el espacio en el dominio de estudio. Particularmente cuando se tiene interés de conocer como influyen las diferentes variables del ciclo hidrológico en una cuenca agrícola, es fundamental tomar en cuenta el campo de acción de todas y cada una de estas, considerando el tiempo y espacio de acción, por lo que, se hace más recomendable considerar los métodos para estimar la recarga potencial, aquellos que involucran directamente la cuantificación de la precipitación, evapotranspiración del cultivo,

escurrimiento y la intercepción, además de procesos adicionales como son los retornos por riego, alimentación desde ríos, lagos y embalses por infiltración, así como la alimentación natural desde otros acuíferos, no hay que dejar fuera de la cuantificación las descargas naturales desde la zona no saturada, ya que de acuerdo con el escenario hidrogeológico, pueden variar, inclusive pueden no existir (Montoya, 2022). En la mayoría de los métodos para estimar la recarga potencial, comúnmente no consideran de manera explícita la cuantificación de la intercepción, algunos métodos más sofisticados, consideran el índice de área foliar (LAI) ya que de acuerdo a la etapa de desarrollo de la vegetación silvestre o de cultivo, se presenta una variación en el comportamiento de la intercepción y de la evapotranspiración del cultivo, sin embargo, una cuantificación más detallada aplicada de manera general para cualquier cuenca agrícola, es escasa y en la figura 1 se muestra un escenario general de los procesos involucrados en la cuantificación de la recarga, sin embargo no se considera

de manera explícita la intercepción del agua de precipitación en el follaje de vegetación primaria (cultivos, bosques, pastizales, etc.) y secundaria, compuesta principalmente por pastos de pequeña altura y vegetación diminuta que cubre espacios ubicados al pie de la vegetación primaria. Por lo anterior, mediante el presente trabajo se busca estimar la influencia del proceso de intercepción en la cuantificación mensual de la recarga potencial en una cuenca agrícola (Cuenca del Río Santiaguito, Estado de México), aplicando el método de balance meteorológico y con esto precisar respecto del tiempo, la evolución de la recarga mensual potencial en un año promedio representativo de un periodo de 20 años de análisis. Es preciso indicar que la intercepción en una primera instancia, reduce la precipitación total a lo que se conoce como precipitación neta o la que llega a la superficie del suelo y esta es la que se aplica en la ecuación de balance meteorológico, situación que en muchos casos no se hace y se aplica el término de precipitación total, por lo que la hipótesis de que si influye

la interceptación en la cuantificación de la recarga potencial mensual, realmente tiene un sustento conceptual importante y se mostrará en los siguientes apartados la demostración de su aplicación, particularmente en una cuenca agrícola.

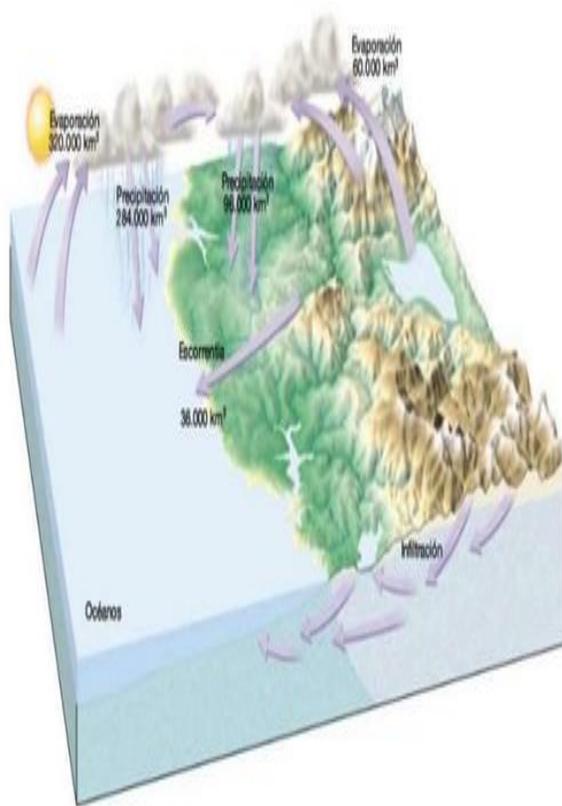


Figura 1. Escenario de presentación de los elementos actuantes en la cuantificación de la recarga potencial. (Modificado de [2])

METODOLOGÍA

Los pasos metodológicos que permitieron cumplir con el objetivo de este trabajo se enuncian a

continuación:

IDENTIFICACIÓN Y SELECCIÓN DE UNA CUENCA AGRÍCOLA REPRESENTATIVA.

En esta etapa se identificó en la zona del Valle de Toluca las posibles cuencas representativas y considerando los diversos usos del suelo y características agrícolas, se decidió manejar la cuenca del Río Santiaguito ubicada al suroeste de la ciudad de Toluca, aproximadamente a 20 Km. La cuenca se identifica por ser pequeña de extensión superficial y típicamente agrícola, normalmente se cultiva el maíz y el trigo en mayores porcentajes, aunque se llegan a detectar zonas puntuales de cultivo de legumbres y hortalizas, se localizan áreas de pastizal silvestre en la parte alta y pequeñas zonas de bosque, se cuenta con pequeñas zonas urbanizadas no influyentes como uso de suelo progresivo.

ANÁLISIS, REVISIÓN Y SELECCIÓN DEL MÉTODO PARA ESTIMAR LA RECARGA POTENCIAL INCLUYENDO LA INTERCEPCIÓN.

Existen diversos métodos para estimar la recarga y en general se tienen los siguientes (Montoya, 2022):

Balance hídrico

Modelación

Basados en datos de aguas superficiales

Físicos de la zona no saturada

Físicos de la zona saturada

Trazadores químicos

Trazadores de calor

Respecto a los métodos de balance hídrico, se tienen los de balance de humedad y es el que permite incorporar el término que representa la intercepción, por lo que es el método seleccionado para propósitos de este trabajo.

CÁLCULO DEL TRAZO DE LA DIVISORIA (PARTEAGUAS) Y EL ÁREA DE LA CUENCA DEL RÍO SANTIAGUITO.

En este paso metodológico se aplicó en software SIATL 4.0, el cual permitió trazar la divisoria y calcular el área de la cuenca del río Santiaguito. La figura 2 muestra el detalle de esta actividad básica.

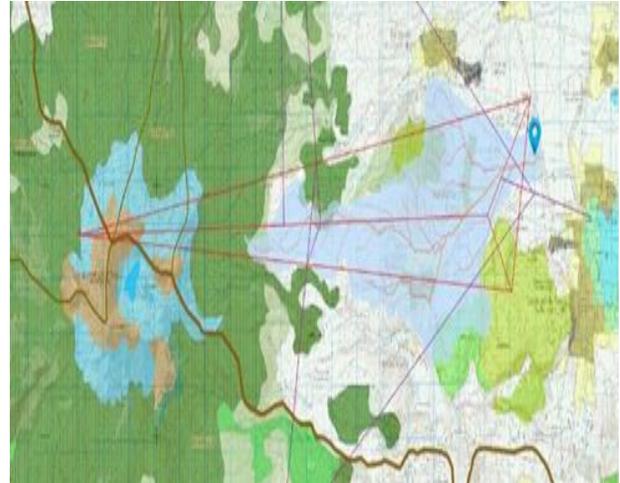


Figura 2. Trazado de la divisoria y cálculo del área de la cuenca y polígonos de Thiessen utilizando SIATL (Elaboración propia).

OBTENCIÓN DE LA INFORMACIÓN CLIMATOLÓGICA DE LAS ESTACIONES INVOLUCRADAS Y TRAZO DE LOS POLÍGONOS DE THIESEN.

En este apartado se consideró la obtención de la información climatológica básica para el periodo de tiempo de 1997 hasta 2017, el cuál es un lapso de tiempo con el menor número de datos faltantes y coincidentes, en este caso, se manejaron datos medios mensuales de precipitación, temperaturas máxima, media, mínima, evaporación y velocidad del viento; también se ubicaron las estaciones involucradas en la cuenca de estudio, las cuales fueron “Villaverde”, “Nevado de Toluca”, “Tenango del Valle” y “San

Francisco Putla”. Para las estaciones enunciadas, una vez ubicadas en la cuenca, se procedió a realizar el trazado de los polígonos de Thiessen, para asociar los polígonos a los diferentes valores de parámetros climatológicos. En la figura 2 se muestra la configuración de los polígonos de Thiessen de acuerdo a la ubicación de las estaciones climatológicas.

DISCRETIZACIÓN ESPACIAL DEL ÁREA DE LA CUENCA.

Para considerar la variación espacial de la recarga en la cuenca, se propuso el manejo de una malla de discretización definida con un conjunto de celdas de dimensión de 1.0 X 1.0 Km, coincidentes con las líneas de las coordenadas geográficas en las cartas de escala 1:50000. En referido arreglo de celdas se le asignó una nomenclatura, definida de poniente a oriente con una numeración del 1 hasta el 14 y de sur a norte con letras desde la A hasta la G.

DETERMINACIÓN DE LA INTERCEPCIÓN Y EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO PARA LOS CULTIVOS MAÍZ, TRIGO, PASTIZALES Y

BOSQUE.

En lo que respecta al cálculo de la intercepción, primeramente, se tomó en cuenta la distribución espacial del uso del suelo en cada celda referida en el apartado anterior y se aplicaron los siguientes pasos metodológicos.

- a) Intercepción del trigo. Se utilizó los resultados de la investigación experimental de (Teófilo, 2017), considerando el porcentaje de intercepción en función de la precipitación total, relacionado con los días de desarrollo del cultivo, lo cual se muestra en la figura 3.



Figura 3. Porcentaje de intercepción del trigo en función de los días de desarrollo (Modificado de [3])

- b) Intercepción del maíz. Para este caso, se consideró los resultados

de Campos Aranda (Campos, 1987) y se aplicaron de acuerdo con el cuadro 1.

Cuadro 1 Intercepción en varios cultivos, en U.S.A [1].

Descripción Maíz	
Durante desarrollo	15.4 %
En bajo desarrollo	3.4 %

c) Intercepción por pastizales y bosque

Para estos usos de suelo se consideró el método de R. E. Horton [1] ya que es un método aplicado con mucho éxito y representativo.

El cálculo de la evapotranspiración del cultivo Etc se realizó aplicando el método de Blanney and Cridle por ser el uno de los más recomendados en sitios donde solo se dispone de información climatológica básica. En este caso de cuantificó para cada celda de la malla de discretización la etc para el trigo, maíz, pastizales y bosque. La ecuación 1 aplicada se enuncia a continuación (Montoya,

2022).

$$Etc = Kc * Kti * Eto$$

1)

Donde:

ETc = Evapotranspiración del cultivo en mm.

Kc = Coeficiente de ajuste que depende del cultivo (mensual).

Kti = Factor climático (mensual).

ET₀ = Evapotranspiración de referencia en mm/mes.

En este caso Eto se calcula con el método del tanque evaporímetro, definido con la ecuación 2.

$$Eto = Ktan * Evap.$$

2)

Para esta ecuación Ktan se obtiene en función de la velocidad del viento (2 m/s), 100 m de distancia de barlovento, la humedad relativa para cada mes y Evap es la evaporación mensual (Montoya, 2022).

CÁLCULO DEL ESCURRIMIENTO EN CADA CELDA DEL ÁREA DE LA CUENCA.

Para este cálculo se consideró los valores del coeficiente de escurrimiento del Manual de

Conservación de Suelos y Aguas del Ministerio de Agricultura y Alimentación (Teófilo, 2017), se determinaron los coeficientes de escurrimiento de cada celda tomando en cuenta la pendiente topográfica, el uso de suelo, es decir si es bosque, pastizal, cultivo etc. y el tipo de suelo ya sea permeable, impermeable o semipermeable. Cabe mencionar que en los casos donde se compartía información para más de una celda se procedía a ponderar los valores del coeficiente de escurrimiento.

APLICACIÓN DE LA ECUACIÓN DE BALANCE DE HUMEDAD CONSIDERANDO INTERCEPCIÓN PARA LA ESTIMACIÓN DE LA RECARGA MENSUAL POTENCIAL.

Una vez obtenidos todos los elementos de la ecuación de balance de humedad, la cual se enuncia a continuación como la ecuación 3, se aplicó a todas las celdas que conformaron la discretización espacial, generando valores de recarga potencial para cada celda.

$$PP = PT - Intc - Etc - Esc.$$

3)

Donde:

PP es la recarga potencial o percolación profunda.

PT representa la precipitación total.

Intc. es la intercepción.

Etc. define la evapotranspiración del cultivo y

Esc. es el escurrimiento.

RESULTADOS

En cuanto a los resultados obtenidos para este trabajo, primeramente se muestra en la figura 4 la malla de discretización espacial con su correspondiente nomenclatura, la que permite referenciar en toda la cuenca en estudio la variación de los valores de los elementos que componen la ecuación de balance de humedad y específicamente como producto final el valor de la recarga potencial, la cual considera en algunas celdas la necesidad de la ponderación de pendientes, intercepción, evapotranspiración del cultivo, escurrimiento y en su caso la precipitación, todo esto regido por la configuración de los polígonos de Thiessen y las celdas contenidas en cada uno.



Figura 4. Malla de discretización espacial de la cuenca agrícola del río Santiaguito (Elaboración propia).

Considerando la configuración de la cuenca agrícola y distribución de las celdas para las cuales se obtuvieron los correspondientes valores de recarga potencial considerando la interceptación para tres escenarios: 1. Incluyendo lo interceptado por trigo, pastizales y bosque; 2. Incluido lo interceptado por maíz, pastizales y bosque y 3. Sin interceptación considerando los mismos usos de suelo. En la figura 5 se muestran los valores de recarga potencial anual para los dos primeros escenarios,

apreciando la variación espacial por cada celda ubicada en la cuenca agrícola, de referida figura se identifica que la recarga potencial es predominantemente mayor en el escenario donde se maneja el cultivo de trigo. Por otro lado, en la figura 6 se presentan los resultados de la recarga potencial, para los mismos usos de suelo, pero sin considerar el proceso de interceptación y se puede identificar que los valores anuales son mayores, lo que indica que al no considerar la influencia de la interceptación del agua de lluvia por la vegetación de cultivos, ya sea de maíz, trigo, pastizales y bosque, propios de la cuenca del río Santiaguito, se comete el error de sobreestimar el valor de la recarga, situación que se puede reflejar más marcadamente al analizar los valores mensuales.

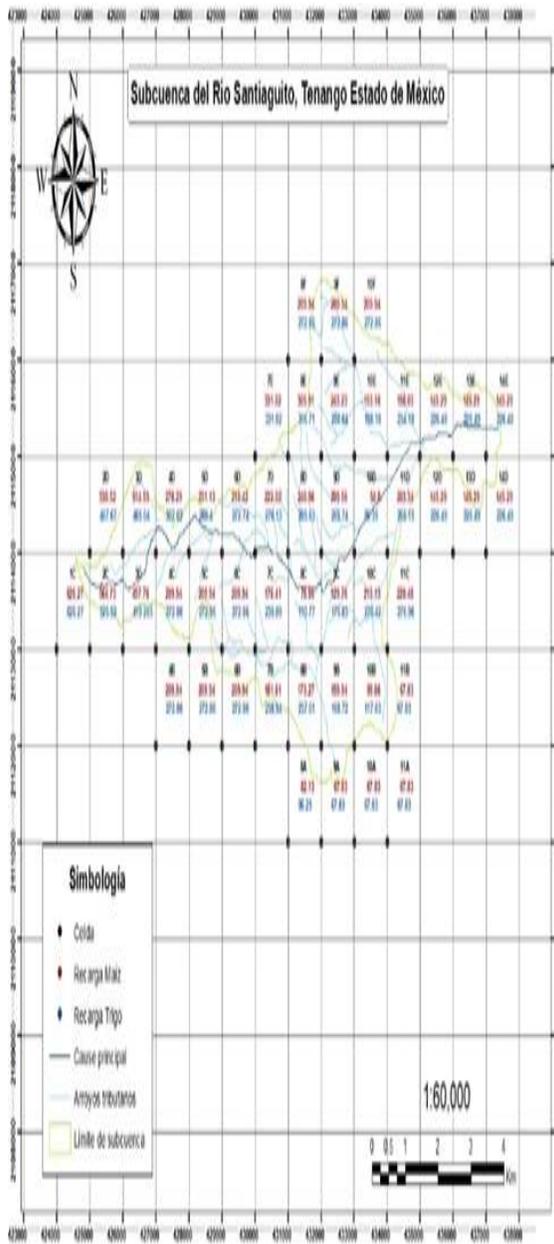


Figura 5. Variación espacial de la recarga potencial anual considerando la interceptión, números en rojo incluyendo maíz, pastizales y bosque y en color azul incluye trigo, pastizales y bosque (elaboración propia).

Ahora, considerando la variación mensual de la recarga potencial sin y con la influencia de la interceptión, en el cuadro 2 se muestra una

comparación de la información para una celda representativa de la cuenca (8C), donde se identifica que los meses secos sin interceptión puede tener una mínima recarga, sin embargo al considerar la interceptión, realmente en este periodo, la recarga no existe, simplemente porque en estos meses, la precipitación neta no es suficiente para cubrir las necesidades de evapotranspiración del cultivo y escurrimiento.



Figura 6. Variación espacial de la recarga potencial anual sin considerar la influencia de la interceptión, números en rojo incluyendo maíz, pastizales y bosque y en color azul incluye trigo, pastizales y bosque (elaboración propia).

También se identifica marcadamente que en los meses de lluvia existe una reducción apreciable de la recarga potencial por efecto de la intercepción, por lo que permite demostrar que es importante tomar en cuenta siempre, la influencia de la intercepción al momento de realizar una cuantificación de balance de humedad. Finalmente, es preciso mencionar que el cultivo de trigo se consideró en dos temporadas semestrales de siembra, la primera con inicio en enero y la segunda en julio, es por esto, que el valor de recarga potencial mensual para el mes de julio es el mismo sin y con intercepción, ya que, en los meses de enero y julio el suelo se encuentra desnudo y el valor de recarga potencial no está influido por la intercepción.

Cuadro 2. Recarga potencial con y sin intercepción en la celda 8C para los dos grupos de uso de suelo definidos diferenciados por los cultivos de maíz y trigo (elaboración propia).

Recarga potencial mensual sin y con intercepción (mm/mes) en la celda 8c

ME	Maíz	Maíz	Trigo	Trigo
----	------	------	-------	-------

S	sin interc epció n	con interc epció n	sin interc epció n	con interc epció n
E	4.10	4.10	0.15	0.15
F	6.21	6.21	0.00	0.00
M	7.40	7.40	0.00	0.00
A	0.00	0.00	0.00	0.00
M	6.63	5.83	0.00	0.00
J	24.32	17.62	15.12	2.93
J	35.59	26.24	55.98	55.98
A	18.37	8.68	51.36	46.64
S	0.00	0.00	14.93	5.07
O	0.00	0.00	0.00	0.00
N	0.00	0.00	0.00	0.00
D	1.97	1.97	0.00	0.00
TO	104.5	78.05	137.5	110.7
TA	9		4	7
L				

A manera de ejemplo, se muestran las imágenes de la estimación espacio-temporal de la recarga considerando la intercepción y los cultivos de maíz, pastizales y bosque para los meses de enero y junio, lo cual, permite contrastar los resultados, lo anterior se presenta en las figuras 7 y 8.

Así también, se presentan en las figuras 9 y 10 lo correspondiente a la

estimación de la recarga potencial para los meses de enero y junio, pero ahora considerando la intercepción del trigo, pastizales y bosque, lo cuál ilustra el enfoque espacio-temporal de la estimación. Las imágenes se realizaron mediante la aplicación del software ArcGis 10.0.

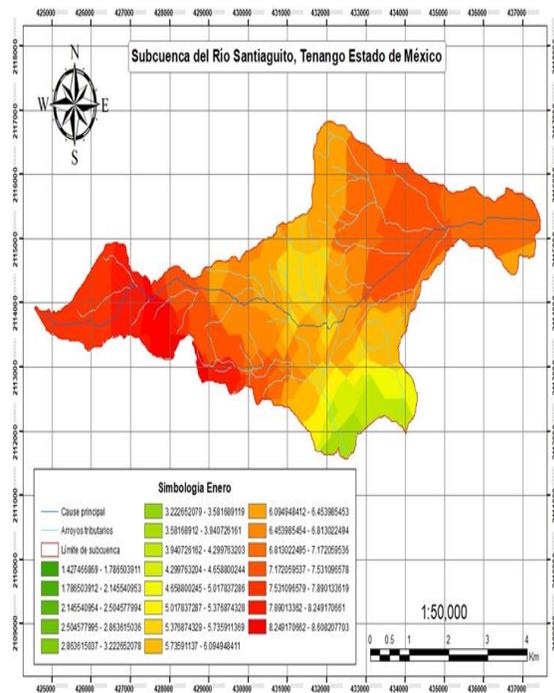


Figura 7. Resultados de la recarga de enero considerando la intercepción del cultivo de maíz, pastizales y bosque (Fuente: Elaboración propia).

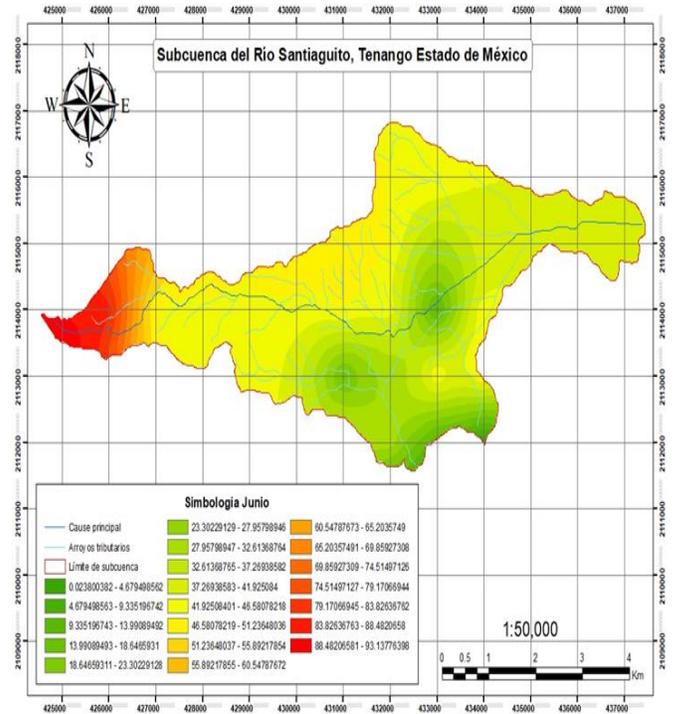


Figura 8. Resultados de la recarga de junio considerando la intercepción del cultivo de maíz, pastizales y bosque (Fuente: Elaboración propia).

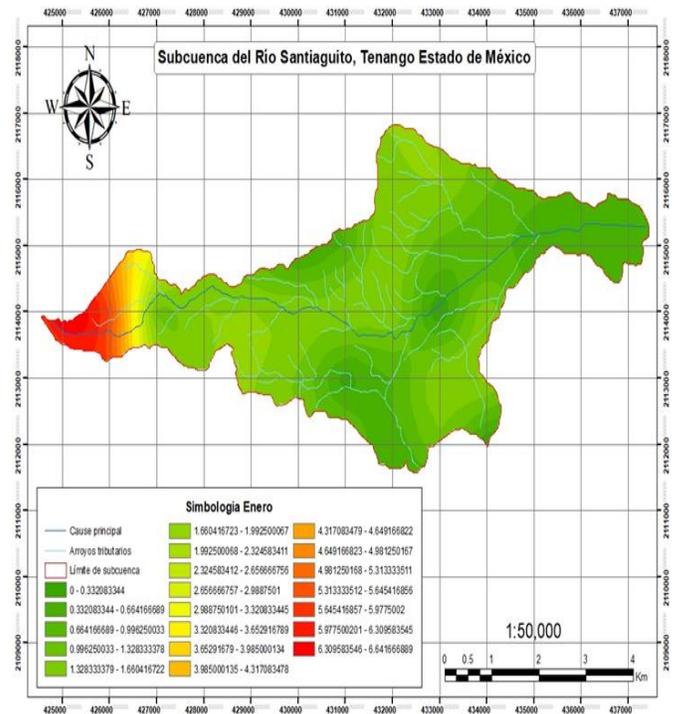


Figura 9. Resultados de la recarga de enero considerando la interceptación del cultivo de trigo, pastizales y bosque (Fuente: Elaboración propia).

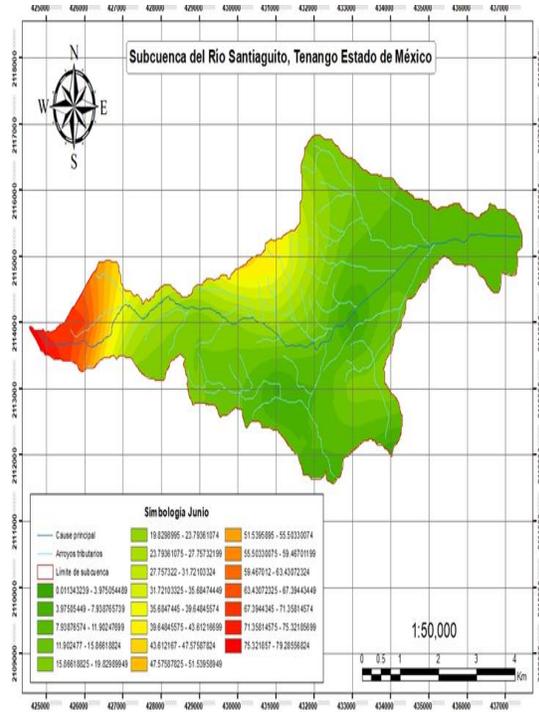


Figura 10. Resultados de la recarga de junio considerando la interceptación del cultivo de trigo, pastizales y bosque (Fuente: Elaboración propia).

DISCUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos, definitivamente el proceso de interceptación de un porcentaje de la precipitación total que se genera por las diversas coberturas vegetales, particularmente, para la cuenca del río Santiaguito, muestran que si tiene influencia significativa la interceptación, al momento de realizar una cuantificación de la recarga potencial

mensual aplicando el método de balance de humedad considerando una discretización espacial que permite tomar en cuenta las variaciones espaciales y temporales de todas las variables involucradas. Si bien se tienen documentados trabajos de cálculo de la interceptación aplicando SIG y el manejo del índice de área foliar de la cobertura vegetal, el enfoque de manejo de figuras y mapas temáticos que involucran métodos de interpolación para reproducirlos a escala, son una excelente herramienta, pero, no expone la influencia del proceso de interceptación, muchas veces porque se busca calcular la recarga real y se limita el análisis de la recarga potencial. Particularmente se puede comentar que los resultados obtenidos de manera mensual para la recarga potencial, muestran las ventajas de conocer que los meses de estiaje, si bien, sin considerar la interceptación se sabe que la recarga es baja y en algunos casos nula, ya con la interceptación incorporada a la ecuación de balance de humedad, muestra los meses de estiaje con valores más representativos, siendo

de recarga aún más bajos y en algunos su tendencia es nula, para los meses lluviosos se identifica de manera explícita cuales son los meses de mayor aporte y sobre todo, se expone que la intercepción representa un factor de reducción de la recarga potencial permanente, ya que es un proceso que se inicia antes de ingresar el agua de precipitación neta a la superficie del suelo y contribuya a los subsecuentes procesos que originan la recarga potencial.

CONCLUSIONES

En función de las ventajas, características y limitaciones de los resultados obtenidos se puede concluir lo siguiente.

Se considera apropiado que en una cuenca agrícola como la del Río Santiaguito, se aplique con un enfoque espacio-temporal, la estimación de la recarga potencial mensual, ya que, al tomar en cuenta el proceso de intercepción, se define que tal proceso representa un factor de reducción de la recarga, notándose de manera marcada en los meses de lluvia y permitiendo ajustar en los meses secos, cuales tienen reducida

recarga y cuales definitivamente no. Adicionalmente, los resultados muestran ventajas para los Agrónomos y personal técnico dedicado a la agricultura, ya que pueden conocer con mayor certeza, las necesidades hídricas de los cultivos (evapotranspiración del cultivo) en los meses secos (para maíz y trigo) y con ello programar los riegos de auxilio necesarios.

Se recomienda la aplicación de esta metodología, en cualquier cuenca agrícola pequeña y para las diversas coberturas de cultivos y vegetaciones permanentes, considerando siempre la disposición de información experimental de los porcentajes de intercepción. También se sugiere para precisar los resultados, considerar los valores de intercepción por parte de la vegetación secundaria, que en este caso en cultivos se asumió que no existía debido a una buena práctica agrícola que no permite el crecimiento de malezas y hierbas dañinas.

Finalmente se agradece al Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua por el apoyo reflejado en la disposición de información y la participación del

asesor del presente trabajo.

REFERENCIAS

- Campos A.D (1987). "Procesos del ciclo hidrológico", Universidad Autónoma de San Luís Potosí, pp. 238, 1987, Vol. 1. Tomo 1/2.
- Montoya, M. (2022). "Estimación de la recarga potencial del acuífero costero de San José del Cabo, Baja California Sur, considerando la variabilidad climática de la región", (Tesis de Maestría), Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca Estado de México.
- Tarback E. (2005). "Ciencias de la tierra", Pearson. Prentice Hall.
- Teófilo, J (2017). "Determinación de la infiltración eficaz y flujo subsuperficial a partir de las curvas envolventes de percolación acumulada", (Tesis de Licenciatura), Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca Estado de México.