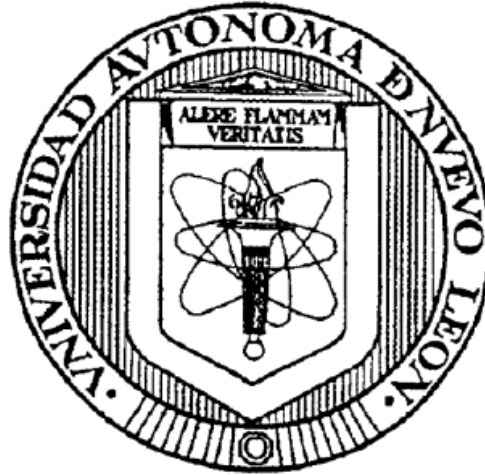


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES



**"MODELO ESPACIAL DE RECARGA DEL ACUÍFERO
CITRÍCOLA SUR, MEDIANTE UN BALANCE HÍDRICO"**

Por:

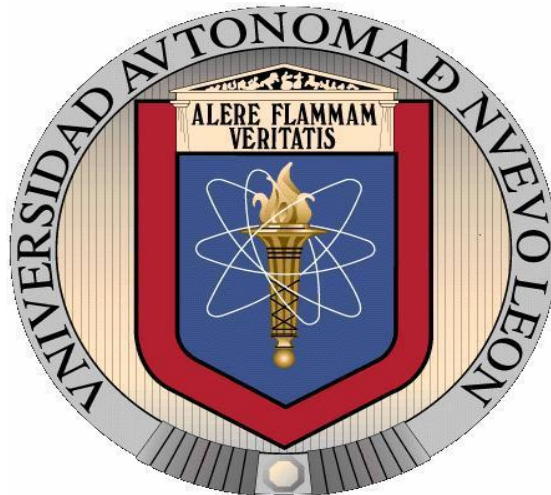
Reynaldo de León Valladares

“Como requisito parcial para obtener el Grado de
MAESTRÍA EN CIENCIAS FORESTALES”

Diciembre, 2022

Linares, Nuevo León, México

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES



**"MODELO ESPACIAL DE RECARGA DEL ACUÍFERO
CITRÍCOLA SUR, MEDIANTE UN BALANCE HÍDRICO"**

Por:

Reynaldo de León Valladares

“Como requisito parcial para obtener el Grado de
MAESTRÍA EN CIENCIAS FORESTALES”

Diciembre, 2022

Linares, Nuevo León, México

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES



**"MODELO ESPACIAL DE RECARGA DEL ACUÍFERO
CITRÍCOLA SUR MEDIANTE UN BALANCE HÍDRICO"**

TESIS

Como requisito parcial para obtener el grado de:
MAESTRÍA EN CIENCIAS FORESTALES

Presenta:

ING. REYNALDO DE LEÓN VALLADARES

COMITÉ DE TESIS

Dr. Eduardo Javier Treviño Garza
Director de Tesis

Dr. Oscar A. Aguirre Calderón
Vocal

Dr. Luis Gerardo Cuellar Rodríguez
Secretario

Diciembre, 2022
Linares, Nuevo León, México

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
SUBDIRECCIÓN DE POSGRADO



**“Modelo Espacial de Recarga del Acuífero Citrícola Sur mediante
un Balance Hídrico”**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO
DE MAESTRO EN CIENCIAS FORESTALES**

PRESENTA:

Reynaldo de León Valladares

Linares, Nuevo León, México

Diciembre 2022

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES

SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



**“Modelo Espacial de Recarga del Acuífero Citrícola Sur mediante
un Balance Hídrico”**

TESIS DE MAESTRÍA

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO

DE MAESTRO EN CIENCIAS FORESTALES

PRESENTA:

REYNALDO DE LEON VALLADARES

COMITÉ DE TESIS:

Linares, Nuevo León, México

Diciembre 2022

AGRADECIMIENTOS.

Primeramente quiero agradecer a mi familia, por el apoyo incondicional durante la realización del posgrado. Gracias por haber sido la base de este proyecto.

A mi madre, por estar siempre acompañándome en mis decisiones.

Al Dr. Eduardo Treviño Garza por su apoyo incondicional durante la maestría y por fungir también como un profesor, amigo y consejero en la realización de este trabajo de investigación.

Un amplio reconocimiento al Dr. Gerardo Cuéllar Rodríguez, por su valiosa colaboración y recomendación para incursionar en el campo de las Ciencias Forestales; Gracias por su ayuda y contribución en este nivel académico.

Finalmente mi gratitud al Dr. Oscar Aguirre Calderón por sus consejos, conocimientos brindados y su disposición para cualquier consulta durante el posgrado y/o investigación.

ÍNDICE

Índice de Cuadros	Pág. VI
índice de Figuras	VII
Resumen	VIII
Abstract	IX
CAPITULO I	Pág.
1.- Introducción	1
1.1-Objetivos	3
1.1.1- Objetivo General.	3
1.1.2.- Objetivos Específicos.	3
1.1.3.- Hipótesis.	3
1.1.4.- Justificación	3
1.2.- Antecedentes	4
1.2.1.-Estadísticas	4
1.2.2.-Agua Subterránea	5
1.2.3.-Importancia del Agua Subterránea	5
1.2.4.-Concepto de Acuífero y de Recarga de Agua Subterránea	7
1.2.5.- La Recarga del Acuífero	8
1.2.6.- Parámetros Hidrogeológicos Característicos de la Recarga	8
1.2.6.1.-Transmisividad	8
1.2.6.2.- Coeficiente de Almacenamiento	9
1.2.6.3.- Precipitación Efectiva	9
1.2.6.4.- La Evapotranspiración	9
1.2.6.5.- La Evapotranspiración Potencial	9
1.2.6.6.- Contenido de Humedad del Suelo	10
1.2.6.7.- La Capacidad de Campo	10
1.2.6.8.- El punto de Marchitez	10

1.2.6.9.-Porosidad	10
1.2.6.10.- Permeabilidad	11
1.2.7.- Balance Hídrico	11
1.2.8.- Dinámica Hídrica Subterránea	12
1.2.9- Estudios Relacionados con la Recarga del Agua Subterránea	12
1.2.10- Factores Asociados a la Recarga de los Acuíferos	18
1.2.11.- Los sensores remotos y su aplicación en la recarga de agua subterránea	21
1.2.12.- Sistemas de Información Geográfica (SIG) y su aplicación en la determinación de zonas de recarga.	22
1.2.13.- Caracterización de las zonas de recarga acuífera.	23
 CAPITULO II	
 MATERIALES Y MÉTODOS	
2.1. Descripción del área de estudio.	24
2.1.1. Ubicación y descripción del área de estudio	24
2.2.-Localización Geográfica	24
2.3.-Fisiografía y Topografía	25
2.4.-Hidrología	25
2.5.-Clima	26
2.6.- Tipos de vegetación.	27
2.6.1.- Bosque de Pinus	27
2.6.2.- Matorral Xerófilo	27
2.7.-Características y Uso del suelo	28
2.7.1.-Suelos	28
2.8.- Tipos de Suelo.	28
2.8.1.- Castañozem	29
2.8.2- Chernozem	29
2.8.3.- Regosol	30
2.8.4.- Solonchak.	30

2.8.5.- Vertisol.	30
2.8.6.- Xerosol	31
2.9.- Uso de Suelo	31

CAPITULO III

METODOLOGÍA

3.- Metodología	33
3.1.- Modelos Geográficos	33
3.1.1.-Variables Geográficas	33
3.1.2.-Variables Geológicas	34
3.1.3.-Variables Climáticas	34
3.2.-Fracción de lluvia que se intercepta por medio del follaje (Ret)	35
3.3.-Coeficiente de Infiltración (Kfc), por textura de suelo (fc)	36
3.4.-Coeficiente de Infiltración del suelo (Ci)	37
3.5.-Calculo de Infiltración Pluvial mensual (Pi)	37
3.6.-Calculo de la Escorrentía Superficial (ESC)	38
3.7.-Balance de Suelos	38
3.8.-Calculo de la Evapotranspiración Potencial Real (ETPR)	40
3.9.-Calculo de Coeficiente de Humedad Máximo (C1)	41
3.10.-Calculo de Coeficiente de Humedad Mínimo (C2)	41
3.11.- Cálculo de la evapotranspiración potencial real (ETPR) en un mes determinado	42
3.12.-Calculo de la humedad disponible	42
3.13.-Calculo de la humedad del suelo al final del mes (Hsf)	42
3.14.-Calculo de la humedad del suelo al inicio del mes (Hsi)	43
3.15.-Calculo de Recarga Potencial al Acuífero (Rp)	43

CAPITULO IV

RESULTADOS

4.1.- Balance Hídrico	44
4.2.-Pendientes del área de estudio	45
4.3.- Tipos de suelo del área estudiada	46
4.4.- Clases Texturales	47
4.5.-Precipitación	48
4.6.-Polígonos de Thiessen	49
4.7.- Isoyetas	50
4.8.- Evapotranspiración	51
4.9.- Tipos de vegetación	52
4.10.- Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)	53
4.11.-Ponderación de las variables en el cálculo de la RP	54
4.12.- Calculo de la recarga potencial	55
4.13.- Recarga Potencial Anual	56
4.14.-Modelo Espacial de Recarga Potencial del Acuífero	57

CAPITULO V

5.-1.-CONCLUSIONES	58
5.2.- RECOMENDACIONES	58
BIBLIOGRAFÍA	60

ÍNDICE DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1.- Valores de Coeficientes de Retención del Follaje (Canadell <i>et al</i> , 1996).....	35
Cuadro 2.- Componentes del Coeficiente de Infiltración del Suelo.....	37
Cuadro 3. Punto de Marchitez Permanente y Capacidad de Campo (Grassi, 1976)	38
Cuadro 4. Profundidad de las Raíces de las plantas (Ibáñez, 2006).....	39
Cuadro 5. Porcentaje de horas luz solar mensual con respecto al año.....	40
Cuadro 6. Ponderación de las Variables para el Modelo Espacial.....	54
Cuadro 7. Cálculos Realizados para Cuantificar la Recarga.....	55
Cuadro 8. Recarga Potencial Anual por polígono de Thiessen.....	56

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.- Ubicación del área de Estudio (Elaboración Propia).....	24
Figura 2.- Pendientes del Acuífero Citrícola Sur.....	45
Figura 3.- Tipos de Suelo.....	46
Figura 4.- Clase Textural.....	47
Figura 5.- Grafica de Precipitación del año 2010.....	48
Figura 6.- Polígonos de Thiessen.....	49
Figura 7. Isoyetas del área de estudio.....	50
Figura 8.- Evapotranspiración del área de estudio.....	51
Figura 9.- Vegetación característica del área de estudio.....	52
Figura 10.- Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).....	53
Figura 11.- Modelo Espacial de Recarga.....	57

Resumen

El proceso de recarga del acuífero Citrícola Sur, se da principalmente por infiltración de la lluvia y percolación vertical de los acuíferos superiores a los inferiores. En el caso del Acuífero Citrícola Sur, la mayor parte de la recarga sucede por zonas preferenciales (ríos influentes). Este análisis utilizó una metodología con base en balance de humedad del suelo, el cual calculó la precipitación que infiltra y luego por medio del balance de humedad de suelo se obtuvo la recarga potencial del acuífero.

El análisis de recarga potencial considera que existen cambios importantes, debido a la cobertura vegetal y a la distribución de la precipitación en el área de estudio. Las zonas de mayor recarga se ubican en partes medias y altas de la Sierra Madre Oriental.

En el presente trabajo se analizan los principales factores que participan en el proceso de recarga hacia los acuíferos, con el fin de determinar la cantidad de agua que es captada, en diferentes comunidades vegetales y con diferentes tipos de suelo. Utilizando un método de muestreo aleatorio se recopilaron datos en aprovechamientos hidráulicos, en diferentes tipos de suelo y vegetación.

Los factores analizados fueron: tipo de suelo, textura del suelo, granulometría, permeabilidad y porosidad del suelo, tipo de roca, así como la infiltración, el escurrimiento superficial, la evaporación y la intercepción de lluvia de las diferentes comunidades vegetales.

Los datos fueron analizados con el programa Arc Info 10 y Erdas 9.2, con el fin de realizar un modelo espacial de recarga de acuíferos; así mismo se obtuvieron índices de vegetación NDVI con los cuales se llevó a cabo un análisis de la cobertura vegetal en el área de estudio.

Utilizando el análisis multicriterio, se logró un modelo espacial de recarga del acuífero Citrícola Sur, el cual se divide en diversos polígonos que son caracterizados por atributos de similar es características.

Abstract

The recharge process of the Citricola Sur aquifer occurs mainly by infiltration of rain and vertical percolation from the upper aquifers to the lower ones. In the case of the South Citrus Aquifer, most of the recharge occurs through preferential zones (influent rivers). This analysis used a methodology based on the soil moisture balance, which calculated the infiltrating precipitation and then, through the soil moisture balance, the potential recharge of the aquifer was obtained.

The potential recharge analysis considers that there are important changes due to the vegetation cover and the distribution of precipitation in the study area. The areas of greatest recharge are located in the middle and upper parts of the Sierra Madre Oriental.

In the present work, the main factors that participate in the recharge process towards the aquifers are analyzed, in order to determine the amount of water that is captured, in different plant communities and with different types of soil. Using a random sampling method, data was collected on hydraulic exploitations, in different types of soil and vegetation.

The factors analyzed were: soil type, soil texture, grain size, soil permeability and porosity, rock type, as well as infiltration, surface runoff, evaporation and rain interception of the different plant communities.

The data was analyzed with the Arc Info 10 and Erdas 9.2 programs, in order to make a spatial model of aquifer recharge; Likewise, NDVI vegetation indices were obtained with which an analysis of the vegetation cover in the study area was carried out.

Using the multicriteria analysis, a spatial model of recharge of the Citricola Sur aquifer was achieved, which is divided into various polygons that are characterized by attributes of similar characteristics.

1.- INTRODUCCIÓN

Los sistemas de información geográfica (SIG) y teledetección, han favorecido al estudio de las zonas con potencial recarga de agua subterránea; identificando las unidades geológicas que albergan este recurso. Éstas unidades que contienen agua en su corteza terrestre funcionan como depósitos para almacenar el recurso, las cuales dependen del porcentaje de porosidad de cada unidad litológica (Villanueva 2021).

El mapeo de los recursos de agua subterránea, se ha ido implementando poco a poco en los últimos años debido a la mayor demanda de agua. Los datos más comúnmente disponibles para el estudio del agua subterránea son la información geológica, geomorfológica e hidrológica.

El área de estudio es el acuífero citrícola sur, el cual se localiza en la parte centro del Estado de Nuevo León, aproximadamente a 100km al sureste de la Ciudad de Monterrey. Comprende los Municipios de Linares, Hualahuises y Galeana, además de una pequeña parte de los Municipios de Montemorelos e Iturbide; se encuentra dentro de la Región Hidrológica del Río San Fernando-Soto La Marina (RH-25), Cuenca del Río San Fernando (CNA 2020).

Los factores que favorecen a la infiltración son las fracturas interconectadas, grietas, cavidades de solución, juntas, zonas de cabalgadura y cizalla; como factores secundarios también se consideran la pendiente, profundidad, la erosión, etc.

Con base en el funcionamiento hidrodinámico del acuífero, se establece que los mecanismos de recarga al acuífero son los siguientes: a) infiltración de la lluvia a través de los Depósitos Aluviales y Conglomerado Reynosa que afloran en los

valles y mesetas de la región, b) Infiltración a lo largo de los ríos y arroyos de la zona, cuyas cuencas de captación se extienden en la Sierra Madre Oriental y c) infiltración por excedentes de riego.

La recarga de los acuíferos bajo escenarios de cambio climático empeoran de modo crítico, situación que pudiera ser causa de abatimiento de los pozos que actualmente se encuentran abasteciendo la región (López. T. & Manzano M., 2017).

Es importante analizar las causas que están perturbando el ciclo hidrológico, principalmente aquellas que alteran la disponibilidad de agua y sus impactos en los diferentes sectores sociales y productivos.

En el caso particular del recurso agua en Nuevo León, no se cuenta con un abastecimiento sostenible, ya que los acuíferos se encuentran cada vez más sobreexplotados y la ausencia de la precipitación contribuye a la escasa o nula recarga de los acuíferos de la región.

Ante esta problemática, es importante el desarrollo de proyectos enfocados a la cuantificación y al uso eficiente del recurso hídrico. Para lograrlo es importante, conocer la cantidad de agua que es captada (recarga) en una región determinada. En este sentido, el balance hidrológico representa una herramienta importante para determinar la cantidad de agua en el área a estudiar, estas estimaciones permiten establecer una planeación adecuada y diseños enfocados a un óptimo aprovechamiento del recurso hídrico. En la presente investigación se realiza un sistema de información geográfica (SIG) donde se incorporan variables climatológicas, geográficas, etc para determinar la disponibilidad de agua el Acuífero Citrícola Sur en el estado de Nuevo León.

1.1.-OBJETIVOS

1.1.1.- Objetivo general

Desarrollar un Modelo Espacial que relacione factores climáticos (precipitación, temperatura, evapotranspiración), factores del suelo (humedad, tipo y uso), factores geográficos (topografía, pendiente, altitud) y vegetación con la recarga del Acuífero Citrícola Sur, en el período comprendido entre 2001-2010.

1.1.2.- Objetivos específicos

Modelizar la cantidad de agua que capta el acuífero usando análisis geográfico, mediante un balance hídrico para el período comprendido entre 2001 -2010.

1.1.3.- Hipótesis

La capacidad de recarga de un acuífero se expresa geográficamente utilizando modelos espaciales.

1.1.4.- Justificación

El estado de Nuevo León ha presentado una disminución considerable de la precipitación pluvial desde hace 40 años, y cada vez ésta se presenta con más severidad, lo que ocasiona que el agua disponible sea insuficiente para mantener las necesidades humanas y de los ecosistemas en general.

La ausencia de agua afecta a la población de diferentes maneras y se considera como el fenómeno natural que causa más afectación que cualquier otro desastre natural. Éste fenómeno es el más complejo y quizá el menos comprendido de todos los peligros naturales. Para tratar de entender este difícil proceso se plantea este estudio el cuál comprende la ubicación de las áreas con mayor infiltración de agua, considerando todos los elementos geográficos, físicos y climáticos utilizando sistemas de información geográfica (CONAGUA, 2008).

1.2.- ANTECEDENTES

1.2.1.-Estadísticas

Se ha estimado que existen alrededor de mil 400 millones de kilómetros cúbicos de agua en el planeta, de los cuales sólo 2.5% es agua dulce. Este pequeño porcentaje se localiza principalmente en los ríos, lagos, glaciares, mantos de hielo y acuíferos del planeta. El agua subterránea representa 96% del agua dulce no congelada del planeta. Esta fuente resulta importante como abastecimiento para arroyos, manantiales y humedales, así como un recurso fundamental para satisfacer las demandas de agua de muchas sociedades en el mundo (SEMARNAT, 2012).

Anualmente México recibe del orden de 1,489 miles de millones de metros cúbicos de agua en forma de precipitación. De esta agua, se estima que el 73.1% se evapotranspira y regresa a la atmósfera, el 22.1% escurre por los ríos o arroyos, y el 4.8% restante se infiltra al subsuelo de forma natural y recarga los acuíferos. (Diario Oficial de la Federación, 2001).

A partir de la década de los setenta, ha aumentado sustancialmente el número de acuíferos sobreexplotados. En el año 1975 eran 32 acuíferos, 80 en 1985, y 100 acuíferos sobreexplotados al 31 de diciembre del 2009. De los acuíferos sobreexplotados se extrae el 53.6% del agua subterránea para todos los usos. De acuerdo con los resultados de los estudios recientes se define si los acuíferos se convierten en sobreexplotados o dejan de serlo, en función de la relación extracción/recarga. (Estadísticas del Agua en México, 2011).

En México, la disponibilidad natural de agua por habitante en el año 2007 fue de 4 mil 312 metros cúbicos anuales, la cual se considera como una disponibilidad baja. (Situación del Medio Ambiente, 2009).

1.2.2.- Agua Subterránea

Por agua subterránea se entiende el agua que ocupa todos los vacíos dentro del estrato geológico, comprende toda el agua que se encuentra por debajo del nivel freático. (CATIE, 2006).

Cada gota de agua que cae de la lluvia al suelo se mueve o transfiere. Muchas gotas corren en una pendiente hacia abajo y la escorrentía forma parte de los ríos. Las aguas que llenan una depresión con suelo impermeable forman cuerpos de agua como lagos y lagunas. Algunas gotas no quedan mucho tiempo en la fase líquida. Y se evaporan en forma de gas (evaporación y transpiración), para formar nubes. Otra parte de aguas pluviales alcanza a penetrar en el subsuelo y se infiltran. Primero pasando la zona no saturada del subsuelo; la capa donde están las raíces de las plantas y los poros del suelo llenos de aire. Cuando el agua infiltrada llega a la zona saturada, forma parte del agua subterránea. Este proceso se le llama la recarga acuífera. (FORGAES, 2005).

2.3.- Importancia del agua subterránea.

Según Gil (2000) en la actualidad, las cuatro quintas partes del agua consumida por la población proviene de los ríos y lagos; aún así la importancia económica que supone el aprovechamiento del agua subterránea en el Mundo es enorme, pues el agua subterránea es preferida generalmente al agua superficial por las siguientes razones:

1).- El agua subterránea no posee organismos patógenos y por ello no necesita ser tratada previamente, con el consiguiente menor costo. Su temperatura es constante, lo cual es una gran ventaja si se ha de utilizar para intercambios térmicos o como termorregulador.

2).- No posee ni turbidez ni color.

3).- Su composición química es generalmente constante.

4).- Los volúmenes de agua subterránea almacenada son por lo general mayores que los volúmenes almacenados en superficie, por lo que el abastecimiento a partir de aguas subterráneas no suele verse afectado por las sequías prolongadas.

5).- La contaminación de la mayor parte de las aguas subterráneas es difícil, por actuar de filtro las mismas rocas del subsuelo.

6).- El agua subterránea, acumulada durante largas series de años de recarga, constituye el único recurso en muchas regiones donde no es posible asegurar su abastecimiento a partir de la explotación de las aguas superficiales.

Este recurso bajo el subsuelo posee algunos inconvenientes, que suelen impedir su utilización más intensiva.

1).- El hecho de que muchas regiones están emplazadas sobre un subsuelo rocoso cuya porosidad o permeabilidad son insuficientes para proporcionar grandes caudales de agua en las captaciones.

2).- El costo de explotación mediante pozos de bombeo es generalmente mayor que el costo de explotación de las aguas superficiales de los ríos próximos a las zonas de consumo; sobre todo en regiones de pluviometría elevada o moderada. (Gil, 2000).

En este marco se ve como una necesidad establecer medidas que rigen la protección de las aguas subterráneas con el fin de asegurar el suministro público de agua y mantener la calidad del abastecimiento. (FORGAES, 2005).

1.2.4.- Concepto de Acuífero y de Recarga de Agua Subterránea

Los acuíferos deben ser entendidos como formaciones geológicas subterráneas permeables, susceptibles de almacenar y transmitir agua. (Vallejo *et al.*, 2004) De esta forma cabe indicar que en la naturaleza existe una amplia gama de formaciones geológicas con capacidades muy diversas para almacenar y transmitir el agua. Los acuíferos se definen como los cuerpos rocosos capaces de almacenar y transmitir agua en diferentes materiales del subsuelo (arenas, gravas, materiales calizos), son formaciones con capacidad de drenaje alta en las que se pueden perforar pozos con el fin de satisfacer las necesidades humanas, de agricultura o ganadería.

La recarga de agua subterránea es el proceso mediante el cuál el agua de precipitación por medio de la infiltración alcanza la zona saturada del suelo, este proceso depende del clima, de la velocidad de la infiltración (considerando que la infiltración está fuera del escurrimiento superficial, si se infiltra rápidamente), así como de la evaporación y de la evapotranspiración. (Casanova, M. 1998).

El agua que se infiltra en el suelo puede ser almacenada como agua de suelo (agua capilar). El agua que pasa el suelo y se infiltra hacia abajo por la zona no saturada del acuífero se denomina agua vadosa, mientras que el agua que alcanza el nivel freático, donde empieza la zona saturada se le conoce como agua subterránea. (González, 2006)

El agua subterránea, es toda el agua debajo de la superficie de la Tierra que actualmente participa en el ciclo hidrológico o que está almacenado de tal modo que puede entrar nuevamente en este ciclo, también se define como el agua que rellena coherentemente las oquedades subterráneas y que obedece a la gravedad. (Segeer, 2006)

Según Schosinsky, (2000), la fórmula para calcular la recarga acuífera de una zona es: $R=BC*C$; donde: R="recarga acuífera", BC="balance climático", C="coeficiente de infiltración". Donde $C=KP+KV+KFC$; donde KP= fracción que infiltra por efecto de la pendiente del terreno, KV= fracción que infiltra por efecto de la cobertura vegetal, KFC= fracción que infiltra por efecto de la textura del suelo.

1.2.5.- Recarga del Acuífero.

La teoría de la sostenibilidad del manejo de un acuífero indica, que no se debe extraer más agua subterránea que la que se recupera a través de la recarga acuífera en un año. Con la información de la recarga acuífera se puede determinar: áreas de protección del acuífero, zonas de recuperación ("cosecha de agua subterránea"), apoyar al ordenamiento territorial, dar recomendaciones en gestión de riesgos, identificar zonas de descontaminación, delimitar zonas de protección alrededor de pozos, etc. (Hernández, 2007).

1.2.6.- Parámetros Hidrogeológicos, Característicos de la recarga

La capacidad de almacenar y transmitir el agua en un acuífero debe ser cuantificada para evaluar las formaciones desde el punto de vista hidrológico. Por ello se asocian a las formaciones los parámetros básicos en cuanto a su comportamiento considerando el agua que pueden contener y transmitir (Wilson, 1998). Entre los cuales están la transmisividad, el coeficiente de almacenamiento, la precipitación efectiva, la permeabilidad, la porosidad, etc.

1.2.6.1. Transmisividad

La transmisividad, es el parámetro definido para evaluar la capacidad de transmitir agua de los acuíferos, teniendo en cuenta no sólo la textura del acuífero y las características del fluido, sino también las características estructurales o geométricas (Porta, 2003).

1.2.6.2.- Coeficiente de Almacenamiento

El coeficiente de almacenamiento, representa la capacidad para liberar agua de un acuífero, se define como el volumen de agua que es capaz de liberar cuando desciende el nivel piezométrico. La forma en que las formaciones geológicas permeables liberan agua, es distinta según su situación en la naturaleza y el estado de sus niveles piezométricos (Porta, 2003).

1.2.6.3.- Precipitación Efectiva

La precipitación efectiva, se considera como la porción de la precipitación pluvial que logra infiltrarse en el suelo y que se encuentra disponible para ser utilizada por las raíces de las plantas o para recargar al acuífero. Existen varios factores que intervienen en la determinación de la precipitación efectiva, como la intensidad de la precipitación, la velocidad de intensidad de infiltración en el suelo, la cobertura vegetal y la topografía. (Duarte, 1998).

1.2.6.4.- Evapotranspiración

La evapotranspiración, es un proceso que resulta del efecto combinado de la evaporación del agua de un suelo húmedo y la transpiración correspondiente de las plantas. La transpiración es la pérdida de agua por la planta, fundamentalmente a través del sistema foliar. El agua es captada del suelo a través del sistema radicular y circula por la estructura de la planta hasta salir al exterior. No se debe confundir con el agua que cae al follaje por intercepción y vuelve a la atmósfera por evaporación (Vásquez y Chang, 1992).

1.2.6.5.- Evapotranspiración Potencial

La evapotranspiración potencial, es la cantidad máxima de agua capaz de ser perdida por una capa continua de vegetación que cubra todo el terreno cuando es ilimitada la cantidad de agua suministrada al suelo. Es un importante elemento para el balance hídrico ya que nos permite estimar el máximo de

perdidas causado por el complejo planta-suelo, que a la vez nos sirve para conocer la cantidad que logra percolar hasta el acuífero. (Duarte, 1998).

1.2.6.6.- Contenido de humedad del suelo

El contenido de humedad del suelo, se refiere a la cantidad de agua que se encuentra retenida en el suelo. Generalmente se expresa en proporción al peso de agua, respecto al peso total de una muestra de suelo, o en proporción al volumen ocupado por el agua en dicha muestra. Los valores de contenido de humedad de suelo característicos son: la capacidad de campo y el punto permanente de marchitez. (Duarte, 1998).

1.2.6.7.- Capacidad de campo

La capacidad de campo se define como la máxima humedad que puede retener un suelo contra la fuerza de la gravedad sostenida por capilaridad, expresada en porcentaje por peso seco (%) o en lámina de agua (cm o mm). (Duarte, 1998).

1.2.6.8.- Punto permanente de marchitez

El punto permanente de marchitez es el límite inferior del contenido de humedad, a partir del cual el agua no puede ser extraída por las raíces. También se expresa en porcentaje por peso seco o en lámina de agua (Duarte, 1998).

1.2.6.9.- Porosidad

La porosidad es la relación entre el volumen de poros y el volumen total de una roca. Es un parámetro que depende únicamente de la constitución de la roca o suelo, es decir, de su textura característica, sin que intervenga la forma geométrica ni la potencia de la formación o su mecanismo de funcionamiento

hidráulico en la naturaleza. Según el tipo de suelo, los poros pueden ser intergranulares en grietas o fisuras; La porosidad de una formación puede estar ligada a la textura o depender además de las características del fluido que se mueve en su interior. Depende en cierta medida de la forma, distribución granulométrica y modo de empaquetado de sus granos. (Honorato, 2000)

1.2.6.10.- Permeabilidad

La permeabilidad es el parámetro que permite evaluar la capacidad de transmitir agua de una formación en función de la textura de la misma, sin relacionarla con su estructura o forma geométrica. Dentro de este concepto se pueden definir, la permeabilidad efectiva, que está ligada a las características texturales del medio físico como del fluido que transmite y la permeabilidad intrínseca que es sólo dependiente de las características internas del medio permeable. (Honorato, 2003)

1.2.7.- Balance Hídrico

El balance hídrico es una representación teórica de los intercambios de agua entre las plantas, el suelo y la atmosfera, este nos permite cuantificar los recursos hídricos a diferente escala como parcela, finca, cuenca, región y las modificaciones del mismo por influencia de las técnicas de manejo de la agricultura y de las actividades del hombre en general (Jiménez, 2006).

La finalidad de determinar el balance hídrico es la de establecer y analizar las entradas, salidas y cambios de humedad del suelo dentro de un área determinada. La recarga del acuífero es una de las salidas de humedad del suelo que se analiza por medio del balance hídrico, el cual involucra para su determinación los componentes básicos del ciclo hidrológico (precipitación, evapotranspiración e infiltración), además de los principales grados de humedad del suelo (capacidad de campo y punto de marchitez permanente) y

de la profundidad de raíces de las plantas, considerada como la profundidad donde suceden los cambios de humedad.

En el balance hídrico se considera a la velocidad de infiltración del suelo (capacidad de infiltración) como el factor principal que condiciona la cantidad de precipitación pluvial que puede infiltrarse; ya que depende básicamente de las características físicas del suelo, como lo son la textura, estructura, compactación y contenido de humedad. (Duarte, 1998)

1.2.8.- Dinámica hídrica subterránea.

El agua de precipitación que llega al suelo circula, en un porcentaje muy elevado, por escorrentía superficial y tan solo una pequeña parte llega a infiltrar. Según Duarte (1998), el rango de infiltración del agua en el subsuelo es de entre 0 y 10 %. Por tanto, considerando las zonas de recarga y el tipo de acuíferos existentes, la poca agua de infiltración circula inicialmente a través de los suelos, pasa a los acuíferos rocosos a través de las fracturas existentes y fluye hacia niveles inferiores siguiendo caminos preferenciales de acuerdo con la conexión de las fracturas.

1.2.9.- Estudios Relacionados con la Recarga del Agua Subterránea

En Brasil, Schosinsky, (2008) realizó un estudio en la cuenca del río Sardinal, el objetivo de este estudio fue determinar la recarga potencial de aguas subterráneas mediante un balance hídrico de suelos. El área del acuífero comprendió 21.6 km², mientras que la superficie total de la cuenca fue de 89 km². Con este propósito se hizo necesario efectuar el balance hídrico, que incluyó la comparación con aforos, al inicio de la cuenca; además se obtuvieron datos climáticos de precipitación y evapotranspiración, capacidades de infiltración de las unidades de suelo y se realizó un reconocimiento hidrogeológico, que incluyó la investigación de los niveles freáticos y análisis del acuífero principal. El uso de la tierra en las partes bajas de la cuenca es

agrícola y ganadera, con una cobertura vegetal, principalmente de pastos y algunos cultivos con pendiente media aproximada de 0.47%. Las partes altas están cubiertas de bosque con una pendiente media estimada de 15%.

En España, Palancar, (1997) desarrolló un método para calcular la recarga natural de un acuífero que parte del hidrograma del manantial y adopta para su estructura un modelo englobado. Para la realización del modelo se han empleado los aforos medios mensuales, datos de precipitación media mensual. Realizando una comparación de los resultados con las diversas estimaciones hechas se observa una gran similitud de las relaciones empíricas entre precipitación y recarga, obteniéndose un coeficiente de infiltración del 37% para una precipitación media de 714 mm/año.

En Argentina Quiroz, *et al.* (2011) llevó a cabo un estudio con el objetivo de estimar los valores de recarga al acuífero pampeano en un sector de la llanura bonaerense mediante la aplicación de 4 metodologías diferentes usando datos hidroclimatológicos, químicos e hidrogeológicos. (Balance Hídrico Edáfico, Balance de Cloruros, Método de Variación de los Niveles y El Método de Variación de Superficie Freática). Los valores de recarga encontrados varían desde 9 y 21% del total de la precipitación con un valor medio total de 14%. Debido a las consideraciones en los resultados se puede establecer que las metodologías con menos incertidumbres son las de balance de cloruros y el método de variación de la superficie freática.

En México Galindo, *et al.* (2011), analizaron el efecto del crecimiento de las manchas urbanas en la disminución de la infiltración de agua en el acuífero Cuautitlán - Pachuca. Para calcular el balance hídrico consideró patrones de precipitación pluvial, temperatura, evapotranspiración, escorrentía superficial e infiltración a partir de datos de estaciones meteorológicas y su interpolación con el método *Kriging*, generando imágenes raster. Se calculó el balance hídrico con un déficit de 194,097 hm³/año basado en un coeficiente de infiltración

promedio. Con valores asignados según uso del suelo y crecimiento de la mancha urbana previstos para 2021, el déficit aumentará a 239,029 hm³/año. El crecimiento urbano y su influencia en la infiltración de agua aportan elementos para una política de explotación más eficiente del acuífero.

En Guatemala, Bardales (2003) realizó una investigación para identificar las zonas de mayor recarga hídrica natural dentro de una cuenca. Utilizando los sistemas de Información Geográfica como una herramienta, se pueden facilitar la obtención e identificación de las zonas de recarga hídrica por medio de fotografías aéreas y ortofotos. La metodología toma en cuenta todos aquellos factores que intervienen en la retención de agua, iniciando con la identificación de las zonas con las mayores infiltraciones, además también considera la geología, que desempeña un papel importante y la cobertura vegetal que interviene en la parte de intercepción del agua de lluvia, que posteriormente servirá para ayudar a recargar los acuíferos.

En Buenos Aires Carrica *et al.*, (2004) Evaluaron la recarga natural de un acuífero de la cuenca superior del arroyo Napostá Grande, la finalidad del estudio es determinar cuantitativamente el valor de la recarga y cuáles mecanismos son los más importantes, mediante el empleo de distintos métodos: balances hidrológicos diarios a escala de cuenca y de suelo, balance de cloruros entre el agua de lluvia y el agua de la capa freática y análisis de la curva de recesión de hidrogramas fluviales; concluye que la recarga fluvial, localizada en el piedemonte serrano, es la principal fuente de alimentación del acuífero y que según el método de estimación empleado, la recarga total al acuífero se cifra entre 7 y un 9% de la precipitación media anual.

En Madrid, Murillo J., (2004) llevó a cabo una investigación de Tesis Doctoral en la cual cuantificó la recarga, la evaluación y análisis de condicionantes técnicos del acuífero aluvial del bajo Guadalquivir. Diseñó y realizó un modelo hidrogeológico de tipo conceptual que simula la generación de recursos hídricos

a escala diaria mediante la aplicación de ecuaciones de balance que utilizan información agregada para la caracterización de las variables implicadas en la producción de escorrentía superficial y subterránea. El modelo contempla únicamente 5 parámetros, capacidad máxima de almacenamiento hídrico de la agrupación suelo –vegetación, infiltración máxima, número de curva, porosidad drenable del acuífero y coeficiente de agotamiento.

Martínez A, (2006) realizó una investigación sobre el cálculo de infiltración, en base a las propiedades del suelo. En este trabajo se propone una función de infiltración, con coeficientes adimensionales. Se analizaron tres tipos de perfiles edáficos diferentes para la infiltración. a) suelo maduro sin perturbar con horizonte orgánico (b), suelo agrícola arado periódicamente con horizonte y (c) suelo degradado con una tustana.

García M, *et al.*, midieron la velocidad de infiltración media de agua en el suelo de seis ecosistemas de la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda. La mayor velocidad de infiltración media (VIM) se registró en el bosque de pino con mantillo y la menor VIM se registró en el matorral xerófilo con *Acacia*. Los resultados muestran que la presencia de una capa de mantillo favorece la infiltración del agua, incrementando el volumen que es captado por el suelo; los resultados también apoyan la hipótesis en la que se sostiene que la materia orgánica del suelo juega un papel central para facilitar el ingreso del agua ya que funciona como una esponja capaz de absorber el agua de lluvia reduciendo la escorrentía superficial. Otros factores que son determinantes en la VIM son: el tipo de roca que originó al suelo de cada ecosistema, la textura edáfica, la cercanía a los cuerpos de agua y la edad del ecosistema.

Márquez A. *et al* (2011) realizó una investigación en la cual se estiman parámetros de infiltración a partir de propiedades físicas de suelo como: textura, permeabilidad, límites de consistencia, cohesión, ángulo de fricción, contenidos de humedad inicial y final y gravedad específica de partículas sólidas. Se realizó

muestreo no perturbado para ensayos de permeabilidad y resistencia al esfuerzo cortante y perturbado para el resto. El muestreo se realizó en la cuenca del río Chirgua, se encontró que los modelos de Green–Ampt, Philip, Kostiakov y Horton, arrojan resultados satisfactorios en la modelación de la infiltración acumulada. Las propiedades físicas de suelo explican entre un 70 y 90 % de la variabilidad de los estimados de la permeabilidad y la capacidad de almacenamiento del agua en el suelo. Los parámetros en la modelación de infiltración correspondientes a modelos dependientes del tiempo resultaron significativos por tanto el ajuste es satisfactorio para los modelos de Philip, Green–Ampt, Kostiakov y Horton.

Hernández F. *et al* (2009) identificaron los principales problemas de degradación de suelos asociados con actividades agropecuarias y su efecto en la infiltración de agua. Los suelos son representativos de las mismas áreas sometidas a diferentes usos y se evaluaron propiedades como la densidad aparente, porosidad total, infiltración y contenido de materia orgánica. Se compararon los diferentes usos para una unidad de suelos y se analizó su relación con el cambio de las propiedades físicas. Se encontró que la densidad aparente del suelo bajo vegetación natural fue 0,86 g.cm-3 y mayor de 1,00 g.cm-3 para los demás usos; la porosidad total fue mayor al 65 % para el “uso nativo” y para el resto de los usos disminuyó hasta en un 23%. La capacidad de infiltración de los suelos se vio disminuida para todos los usos debido al exceso de labranza, las quemas y al pisoteo del ganado. El cambio del uso del suelo disminuyó la capacidad infiltración, afectando su función dentro del ciclo hidrológico.

Jiménez *et al.* (2006) determinaron el rango de infiltración en 5 andisoles y evaluaron la influencia de la deforestación y el cambio de la vegetación en el rango de infiltración. Concluyeron que la erosión del suelo y la infiltración están influenciadas por propiedades químicas, mineralógicas y físicas: así mismo

consideraron que los rangos de infiltración en suelos naturales son muy alta (130 mm/hr) comparada con la que se presenta en suelos sin vegetación.

Santiago L. (2007) realizó una medición y análisis de la intercepción de lluvia en un bosque de encino, la finalidad de esta investigación fue estimar la cantidad y distribución de agua de lluvia a través del proceso de intercepción por dosel. Los resultados indicaron que la intercepción promedio en una serie de combinaciones de estratos fue de 16.9% con una desviación estándar de 2.4 mm, la retención de humedad volumétrica en el suelo resulto ser en promedio de 4.61% y 7.24% para los ecosistemas con uno y dos estratos. Los modelos teóricos de intercepción subestiman los valores medidos en los diferentes ecosistemas analizados.

Yañez I. (2010) realizó un estudio sobre la Intercepción de la lluvia en tres especies del matorral submontano y una plantación de eucalipto, en Linares, Nuevo León. Las especies a estudiar fueron ébano (*Ebanopsis ébano*), corvagallina (*Hellietta parvifolia*), Mezquite (*Prosopis Glandulosa*) y eucalipto (*Eucalyptus sp*). La mayor intercepción la mostró el ébano con un 23% de intercepción y corvagallina con un 18%; probablemente porque el dosel de estas especies es más denso y su capacidad de almacenaje es mayor que la de Eucalipto y Mezquite. Sin embargo, las características de arquitectura del dosel y tipo de follaje son distintas entre estas especies, pudiendo influir esto en el porcentaje de intercepción. Los resultados muestran que especies como el ébano llegan a interceptar hasta el doble de lluvia que otras especies, significando esto funciones hidrológicas muy diferentes en las cuencas en donde se encuentren las especies.

Cantú I, *et al.*, (2005) llevó a cabo un estudio dentro del Matorral Espinoso Tamaulipeco en el cual cuantificó las pérdidas por intercepción de la lluvia en tres especies del Matorral Submontano. Las especies a estudiar fueron *Acacia berlandieri* (Huajillo), *Acacia rigidula* (Chaparro Prieto) y *Diospyros texana*

(Chapote). Una parcela de 10 x10 metros fue seleccionada dentro del matorral para cada especie, en cada parcela se establecieron 4 canaletas fijas a la altura de 1 metro y finalmente se unen a los colectores; después de cada evento de lluvia las cantidades de precipitación son registradas. De todas las especies *A. Rigídula* represento el 85% de la precipitación directa, *A. berlandieri* represento el 82% y *D. texana* el 78%. Los Resultados indican que el dosel de *A. rigidula* presentó las pérdidas menores por intercepción, siguiendo *A. berlandieri* y *D. texana*.

1.2.10.- Factores Asociados a la Recarga de los Acuíferos

Para este estudio se tomaron los siguientes parámetros como indicadores de la recarga hacia los acuíferos: la cobertura vegetal, el suelo, la textura, la evapotranspiración, la pendiente, el uso de suelo, el escurrimiento.

Thompson *et al.*, (2010) realizaron un estudio sobre la relación vegetación-infiltración en el cual definieron que la capacidad de infiltración se incrementa como una ley de energía en función de la biomasa superficial en ecosistemas limitados por agua. Destacaron también que la capacidad de infiltración es mayor con la presencia de vegetación en ecosistemas áridos, lo que contribuye de manera significativa al balance de agua y la organización espacial de la vegetación. Considerando el aspecto climático dedujeron que existe una relación canónica vegetación-infiltración y consideraron que esta relación evoluciona hacia gradientes climáticos. Para las superficies con escasa o nula vegetación, el suelo se encuentra expuesto al choque directo de las gotas de lluvia lo que se considera podría originar una compactación del mismo, ocasionando una disminución de la infiltración.

En superficies donde se presenta una variedad de vegetación, las raíces de la vegetación abren conductos en el subsuelo lo que permite un mayor acceso para la penetración de agua; En suelos compactos el impacto de la lluvia es

menor, dejando al agua más tiempo expuesta a su posible infiltración (Kutilek y Nielsen, 1994).

Lluvias menores de 5 mm mensuales, no van a generar infiltración ya que se considera que en un mes con lluvia, al menos 5mm son retenidos por el follaje sin llegar al suelo. Además, se considera que la retención de la lluvia en follajes, es del 12% (Butler, 1957) de la precipitación mensual. Sin embargo, en bosques muy densos, la retención de la lluvia se considera en un 20%.(Schosinsky y Losilla, 2000)

El suelo proporciona una gran cantidad de servicios entre ellos están la producción de biomasa, la reserva de muchos organismos vegetales y animales, además de ser fuente de materias primas como el agua, arcillas y gravas. Constituye la primera capa que debe atravesar el agua en su movimiento hacia el acuífero es por esto que la infiltración presenta diferentes comportamientos hidráulicos. (Prieto, 2006).

El proceso de precipitación-infiltración dentro del suelo es complejo debido al número de parámetros de suelo involucrados y el curso natural de condiciones limitantes de humedad. Los parámetros responsables son la profundidad de humedad, la profundidad de succión reducida y el tipo de infiltración (Rahardjo *etal.*, 2009)

Las partículas que son arrastradas por el agua de infiltración suelen ser muy finas repercutiendo negativamente en ésta, ya que los materiales pueden obstruir los poros y grietas impidiendo el paso del agua y retardando la infiltración. De este modo un suelo con una capacidad de drenaje muy bueno puede tener una infiltración baja debido a este sellado del suelo (Segerer y Villodas, 2006).

Mohrlok *et al.*, (2008) cuantificaron los procesos de infiltración en áreas urbanas para explicar parámetros de variabilidad espacial y encontraron que la

infiltración está fuertemente relacionada con la calidad del agua infiltrada y con el impacto adicional en calidad de agua subterránea.

La importancia de la infiltración en el ciclo hidrológico radica en la influencia que ésta ejerce sobre el volumen de agua de precipitación que se desplaza hacia el interior del suelo y/o al incremento de volumen o bien a incrementar la escorrentía superficial. (Kutilek y Nielsen, 1994)

Lutz, (2008) realizó un estudio en climas semiáridos para conocer el comportamiento de la evapotranspiración, que es un componente principal en los balances hídricos. Las fluctuaciones diurnas del nivel de agua subterránea son frecuentemente un producto de la evapotranspiración, estos cambios fueron mayores en un humedal ribereño que en una pradera cubierta de pasto, sugiriendo que las freáticas toman más agua de la zona saturada en la medida que la humedad del suelo decrece.

La textura de los suelos está íntimamente relacionada con la composición mineral, el área superficial específica y el espacio de poros del suelo. Esto afecta prácticamente a todos los factores que participan en el crecimiento de la cobertura vegetal; así mismo tienen influencia sobre el movimiento y la disponibilidad del agua del suelo, la aireación, la disponibilidad de nutrientes, en las propiedades físicas relacionadas con la susceptibilidad del suelo a la degradación y a la penetración de las raíces. Las partículas de suelo individualizadas se distribuyen en una variedad de tamaños, si bien se agrupan en diversas fracciones atendiendo a su tamaño. La distinta proporción de arena, limo y arcilla define la textura de cada horizonte. (FAO 2000)

La superficie utilizada por las actividades productivas (agrícolas, pecuarias plantaciones forestales, urbanas, cuerpos de agua y forestales) ocupaba en 2002 cerca del 22% de la superficie nacional. La transformación de la cubierta vegetal en México y el mundo ha sido impulsada, en gran parte, por el crecimiento de la población y algunas de sus consecuencias, tales como la

demanda de alimentos y la ampliación de la infraestructura. Entre las consecuencias más importantes del cambio de uso del suelo están las alteraciones en los ciclos biogeoquímicos (e. g., agua y carbono), la pérdida de la biodiversidad y sus servicios ambientales asociados y el cambio climático global. Comparativamente con la ganadería, la agricultura fue en todos los casos la mayor responsable del cambio de uso del suelo en el país. (INEGI 2011)

El escurrimiento es parte de la precipitación que aparece en las corrientes fluviales superficiales, perennes, intermitentes o efímeras, y que regresa al mar o a los cuerpos de agua interiores. Dicho de otra manera, es el deslizamiento virgen del agua, que no ha sido afectado por obras artificiales hechas por el hombre. Los factores que afectan al escurrimiento se refieren a las características del terreno (cuencas hidrográficas), y se dividen en dos grandes grupos: los climáticos y los relacionados con la fisiografía. En lo que respecta a los factores climáticos son aquéllos que determinan, de la cantidad de agua precipitada, la destinada al escurrimiento y los factores fisiográficos que se relacionan por una parte con la forma y características físicas del terreno y por la otra con los canales que forman el sistema fluvial. (Chow, 1964).

1.2.11.- Sensores remotos y su aplicación en la recarga acuífera subterránea.

Según Brinker, (2000), el término “sensor remoto” se refiere a una herramienta que se emplea para estudiar las características de objetos usando datos recopilados desde un punto remoto de observación. Dicho término abarca el estudio de datos de satélite y fotografías aéreas, siendo una técnica extremadamente poderosa para la exploración, el mapeo y la administración de los recursos hídricos.

Los sensores remotos nos facilitan la identificación de fallas geológicas y las coberturas del suelo y de vegetación como partes fundamentales del cálculo de la recarga acuífera. Para ello, existen diversos tipos de imágenes satelitales que se adquieren de distintos sensores, entre las más comunes las imágenes SPOT, que provee imágenes con una resolución espectral de cuatro bandas de las cuales las bandas b4-b3 / b4, nos permiten identificar las áreas con mayor vegetación, mediante el uso de programas informáticos especializados. (Hernández, 2007).

Empleando el mismo procedimiento y con el objetivo de estimar la biomasa del área de estudio se emplearon imágenes SPOT que nos permiten obtener esta información.

1.2.12.- Sistemas de información geográfica (SIG) y su aplicación en la determinación de zonas de recarga.

Los SIG pueden definirse como programas que almacenan, gestionan, manipulan y representan gráficamente datos espaciales hidrológicos; son una herramienta computarizada esencial en el análisis de variables que intervienen en la recarga acuífera; respalda y fortalece con fundamento científico la toma de decisiones, mediante la descripción previa de un lugar o la simulación de un fenómeno con tendencias esperadas. Es además, un instrumento de desarrollo sostenible porque facilita la gestión de los recursos hídricos mediante el ingreso, manipulación, análisis y presentación de información de carácter multidisciplinario e integral capaz de formular estrategias de desarrollo tomando en cuenta los tres elementos de sostenibilidad como son la rentabilidad económica, compatibilidad con el medio ambiente y con la sociedad. (Hernández. 2007).

1.2.13.- Caracterización de las zonas de recarga acuífera.

La caracterización se inicia con la descripción de la estructura física del ámbito territorial. Luego procede la caracterización biofísica, que está referida a la descripción de los elementos físicos y biológicos, como son el relieve o topografía, suelo, geología, clima, vegetación, uso de la tierra, hidrología, etc. Con esta información es posible identificar la vulnerabilidad natural.

CAPITULO II

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1- Descripción del Área de Estudio

2.1.1.- Ubicación y descripción del área de estudio

El Acuífero Citrícola Sur (19-14) se localiza en la parte centro del estado de Nuevo León, aproximadamente a 100 km al sureste de la Ciudad de Monterrey y cuenta con una extensión de más de 40,000 km². Se ubica entre los paralelos 24° 51'46"y 24°56' 43"de latitud Sur, y los meridianos 100° 13' 22"y 100° 10'44"de longitud oeste. Comprende los municipios de Linares, Hualahuises, Galeana, y una pequeña parte de los municipios de General Terán, Iturbide y Montemorelos. Los límites geográficos acuífero son: al Sur La Mesa Alta del Ébano; al sur y al oriente el límite estatal con el Estado de Tamaulipas; al poniente las estribaciones de la Sierra Madre Oriental. (CNA, 2020).

2.2.- Localización Geográfica.

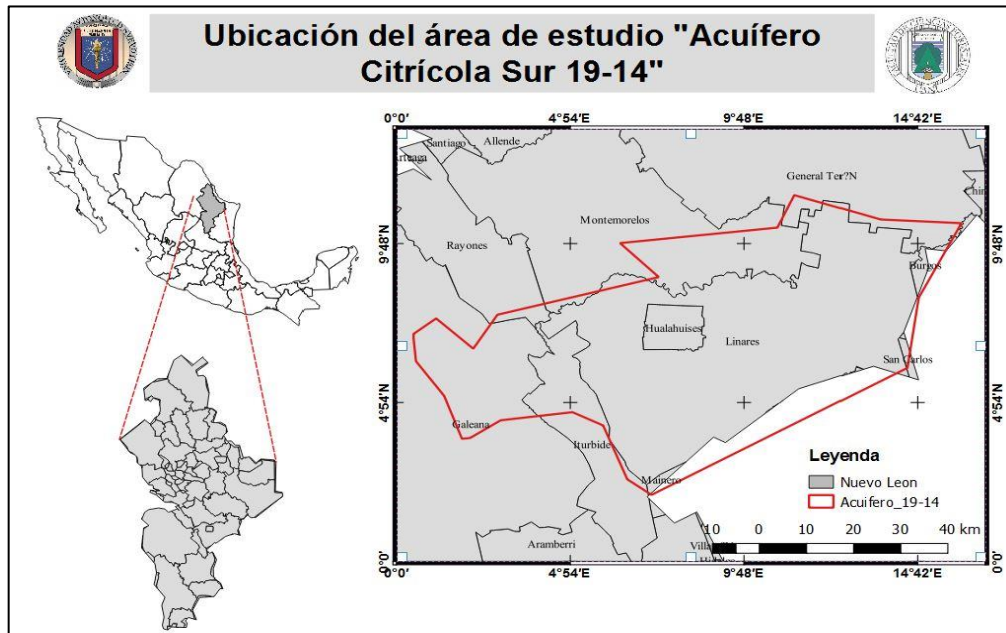


Figura 1.- Ubicación del área de estudio Acuífero Citrícola Sur (Elaboración Propia).

2.3.- Fisiografía y Topografía

El Acuífero Citrícola Sur se localiza en la parte occidental de la Provincia Fisiográfica Planicie Costera del Golfo de México, próxima a la Subprovincia de Sierra Altas, perteneciente a la Provincia Sierra Madre Oriental (SMO).

Las Sierras Altas se caracterizan por la presencia de una compleja cadena montañosa, conformada por rocas sedimentarias marinas del Jurásico Superior y Cretácico, que dan forma a estructuras anticlinales y sinclinales recostados, con orientación NNW-SSE y presentan elevaciones máximas de 2200 msnm. Hacia el oriente existe un acantilado, frente al cual se extiende la Llanura de Linares-Montemorelos.

La Llanura de Linares-Montemorelos se encuentra dentro de la Planicie Costera del Golfo de México, en ella se extiende el acuífero. Guarda una orientación regional SW-NE con elevaciones del terreno que varían entre 500 y 200 msnm disminuyendo desde la parte suroeste hacia el noreste. (Servicios Geológicos, 1981)

Se divide la zona de estudio en tres rangos de pendientes, el primero de 0 a 30 %, el segundo de 30 a 60% y el tercero de 60 a 90 %, como se puede apreciar la mayor parte del área de estudio presenta pendientes entre 30 a 60%.

2.4.- Hidrología

El Acuífero Citrícola Sur, se encuentra dentro de la Región Hidrológica del Río San Fernando - Soto La Marina (RH-25), Cuenca del Río San Fernando.

Las corrientes principales de la zona son el Río Pablillo que recoge los escurrimientos de la porción central, a través de su principal afluente el Río Anegado, el Cabezones y Hualahuises que drenan la porción Sur y que se unen al Pablillo en la porción nororiental del área, para después unirse al Conchos en

el Estado de Tamaulipas, el cual es afluente del Río San Fernando, que desemboca en la Laguna Madre. (CNA, 2021)

2.5.- Clima

El clima del estado es considerado seco y semiseco debido a que gran parte de su superficie se clasifica técnicamente de esta manera. Sin embargo, la planicie costera que se encuentra en colindancia con la Sierra Madre Oriental, recibe una mayor cantidad de precipitación y es considerada como del tipo semicálido subhúmedo, aunque con lluvias escasas todo el año. Esta misma condición se encuentra en las parte altas de la sierra, por ejemplo la Sierra de picachos, y en la región citrícola de Montemorelos, Linares y Hualahuises, donde el desarrollo de las labores agrícolas de temporal se encuentra más favorecido. En la sierra plegada se encuentra una infinidad de microclimas por sus características orográficas, y en algunos casos áreas con gran cantidad de humedad. En las partes más altas se encuentran climas de tipo templado subhúmedo, favoreciendo el desarrollo de masas arboladas. La parte sur es considerada la zona árida del estado en parte de los municipios de Galeana, Doctor Arroyo, Mier y Noriega y Aramberri. Aquí el desarrollo de actividades agrícolas y ganaderas es restringido debido a la escasez de agua.

A pesar de que la parte sur de Nuevo León se encuentra en la línea del Trópico de Cáncer, la región es considerada como subtropical debido a que, si bien las temperaturas en promedio son altas, la oscilación mensual y diaria es muy extremosa para considerarla como región tropical. A éste se agrega el hecho de que posee una estación invernal bien definida, influenciada por masas de aire polar continental que provocan descensos de temperatura abruptos acompañados por niebla, nublados fuertes y lluvia ligera.

El promedio de precipitación anual en el estado se encuentra alrededor de los 700 mm, concentrándose la mayoría de las lluvias en el verano, con una

precipitación menor en los meses de invierno. En el verano se consideran dos períodos lluviosos: uno con lluvias de mediana intensidad en los meses de Mayo y Junio, y uno de alta intensidad de finales de Agosto a mediados de Octubre.

2.6.- Tipos de Vegetación

De acuerdo a Rzedowski (1998) en Nuevo León existen los siguientes tipos de vegetación: matorral xerófilo, bosque de coníferas bosque espinoso, bosque de encinos, pastizal, vegetación inducida y otros tipos de vegetación. Perteneciendo a la zona de estudio los dos primeros.

2.6.1.- *Bosque de Pinus*

La mayoría de las especies mexicanas de *Pinus* se concentran en comunidades de climas templados a fríos y semihúmedos. Sin embargo, estas masas forestales de pinos se desarrollan en altitudes entre 1,500 y 3000 metros. La altura de los árboles es variable, oscila entre 8 y 25 metros, pero puede alcanzar hasta 40 metros. Las especies de pinos más sobresalientes son pino ocote (*P. teocote*), pino blanco (*P. pseudostrobus*), pino real (*P. arizonica*), pino ayacahuite (*P. ayacahuite*), y pino negro (*P. hartwegii*). El *Pinus Cembroides* es la especie más ampliamente repartida en los climas semiáridos del grupo de los piñoneros, su área de distribución geográfica se extiende por casi todo el Sur y centro del país. En la Sierra Madre Oriental de Nuevo León y de Tamaulipas existen pinares diversos, en las parte más altas y en sus declives occidentales; pocas veces forman masas forestales, su extensión es discontinua y a menudo se presentan en forma de bosque mixtos de *Quercus*. (Rzedowski 1998)

2.6.2.- *Matorral Xerófilo*

El Matorral Xerófilo ocupa alrededor del 40% de la superficie del país, por consiguiente es el más abundante de los tipos de vegetación; se observan en

todo tipo de condiciones topográficas y no hacen mayor discriminación del sustrato geológico. La microfilia y la presencia de espinas son características comunes de este tipo de vegetación, al igual que la pérdida de las hojas durante la época desfavorable. En el Sur y este de Nuevo León se presenta un matorral análogo con *Prosopis glandulosa* como dominante y una carpeta de gramíneas como *Boutelouatrifida*; Los arbustos crecen bastante espaciados y además del mezquite pueden ser comunes plantas de los géneros *Opuntia*, *Porlieria*, *Cercidium*, *Acacia*, *Koeberlinia* *Castela* y *Karwinskia*. (Rzedowski, 1998)

2.7.- Características y uso del suelo

2.7.1- Suelos

El suelo es la parte exterior de la corteza terrestre donde las rocas se desintegran por efecto de los agentes climáticos y biológicos y se forma una cubierta en la que la flora y la fauna microbianas transforman el material mineral en alimento para las plantas. (SEMARNAT, 2006)

Desde el punto de vista agrícola, el suelo es la capa de material fértil que recubre la superficie de la tierra y que es explotada por las raíces de las plantas y a partir de la cuál obtienen sostén, nutrimentos y agua. (Sumner, 2000)

La Sociedad Americana de la Ciencia del suelo (SSSA), lo define como la capa superficial de material mineral y orgánico no consolidado que sirve de medio natural para el crecimiento de las plantas y que ha sido sujeto y presenta los efectos de los factores que le dieron origen (Clima Topografía Biota, Material parental y Tiempo)

2.8.- Tipos de Suelo.

El estado de Nuevo León presenta un mosaico de suelos como respuesta a los diferentes mecanismos de formación y a los materiales que les dieron origen,

predominando los tipos de Xerosol, Litosol, Vertisol, Rendzina, Yermosol, Regosol, Feozem y Castañozem.

Los suelos que predominan en el Estado son los castaños o chestnut, los del desierto y semidesierto llamado grises o sierozem, y los suelos negros o chernozem y los suelos de montaña o forestales. Del mismo modo describe brevemente los suelos antes mencionados, donde menciona que los suelos negros o chernozem (Regosoles) son aquellos que contienen gran cantidad de materia orgánica humificada; los castaños o chestnut (Xerosoles) son suelos muy comunes en la Planicie Costera del Golfo, con textura franco – arenosa, y también están comprendidos los suelos franco – arcillosos profundos. Los suelos grises o sierozem (Xerosoles) se desarrollan en zonas de clima muy árido, con muy poco contenido de materia orgánica y los suelos de montaña o forestales (Litosoles) se distribuyen en las partes altas de las serranías del Altiplano, en la Sierra Madre Oriental y en las sierras de La Silla, Mitras, Fraile, Minas Viejas, Gomas, Iguana y Picachos. De acuerdo a la carta de INEGI (2002),

2.8.1.- Castañozem

Son suelos de color pardo, ricos en materia orgánica; característica de regiones frías semiáridas con vegetación herbácea. Tienen un horizonte mólico A de color entre café y café oscuro, que mide alrededor de 15 cm de profundidad. Estos suelos tienen una fertilidad inherente muy alta, especialmente para el cultivo de granos, aunque las condiciones secas imponen severas restricciones de uso. (Honorato, 2001)

2.8.2.- Chernozem

Los suelos Chernozem sobrepasan comúnmente los 80 cm de profundidad. Son suelos con coloraciones oscuras de las estepas y algunos pastizales. Tienen un horizonte mólico A muy grueso. Un horizonte mólico A es una masa mezclada

de materiales fecales de lombrices, nematodos o ambos. Presentan concentración de carbonatos a partir de los 125 cm el cual puede estar en forma de caliche suelto o ligeramente cementado. Estos suelos tienen un alto contenido de nutrientes, excelente estructura y una gran capacidad de retención de agua, que proporcionan una gran fertilidad al suelo. (Honorato, 2001)

2.8.3.- Regosol

Estos suelos se consideran relativamente recientes que se desarrollan a partir de materiales no consolidados (No provienen del aluvión) y están constituidos por material suelto, semejante a la roca del cual se forma. Se encuentran sobre cualquier tipo de clima y generalmente sobre topografía accidentada. La mayoría de estos suelos son potencialmente aptos para la agricultura, aunque su uso varía con las condiciones locales. Su fertilidad natural normalmente es baja, excepto cuando su profundidad es considerable, entonces las especies forestales pueden desarrollarse adecuadamente si tienen un buen suministro de humedad. (Honorato, 2001)

2.8.4.- Solonchak.

Son los suelos salinos de las regiones áridas y semiáridas, que contienen cantidades considerables de sales solubles. Generalmente presenta eflorescencias de sal sobre la superficie de la tierra o de los pedos. Sobre ellos crecen las plantas que toleran la sal, pero no forman una cubierta completa. Estos suelos pueden tener un horizonte hístico, un horizonte cámbico o un horizonte cálcico. Muchos Solonchaks muestran propiedades hidromórficas cuando se presentan en asociación con un nivel freático alto. (Honorato, 2001)

2.8.5.- Vertisol.

Son suelos muy arcillosos de coloración oscura que se presentan en muchas planicies áridas y semiáridas de regiones tropicales y subtropicales. Tienen

30% o más de arcilla, normalmente dominada por montmorilonita que causa la compactación y fractura del suelo durante la época de sequía y su hinchamiento durante la temporada de lluvias. El proceso de compactación – hinchamiento crea presiones que rompen el suelo y forman espejos de falla al deslizarse una superficie sobre otra. La estructura de estos suelos pueden presentar una costra o una estructura granular muy bien desarrollada. (Honorato, 2001)

2.8.6.- Xerosol

Son suelos de las regiones áridas y semiáridas que tienen un horizonte ócrico A débil y un horizonte cámbrico, argílico o cálcicas. Estos suelos tienen un régimen árido de humedad edáfica, ya que la precipitación es menor de 200 mm anuales y cae en forma de chubascos cortos e intensos. La vegetación natural se compone principalmente de xerófitas; estos suelos presentan a menudo una fertilidad natural muy alta y producen muy buenas cosechas. (Honorato, 2001)

2.9.- Uso de Suelo

El uso de suelo se refiere a la ocupación de una superficie determinada en función de su capacidad agrológica y por tanto de su potencial de desarrollo, se clasifica de acuerdo a su ubicación como urbano o rural, representa un elemento fundamental para el desarrollo de la ciudad y sus habitantes ya que es a partir de éstos que se conforma su estructura urbana y por tanto se define su funcionalidad. (Informe Anual, 2003).

En acelerado crecimiento y desarrollo del estado de Nuevo León ha contribuido para que las actividades agrícolas, ganaderas e industriales sean el punto de partida para su desarrollo. En este contexto la producción agrícola se realiza 37 anualmente en aproximadamente 292 mil hectáreas; de las cuales el 50% corresponde a superficies con cultivos permanentes y el otro 50% a cultivos anuales. Entre los cultivos permanentes se encuentran los cítricos, los

pastizales, las plantaciones de nogal, manzanos, aguacate, entre otros y los cultivos anuales son el sorgo, maíz y papa principalmente además de trigo, frijol, brócoli, entre otros (Treviño, 2006). La producción ganadera más importante son los productos cárnicos, además de la leche, el huevo y la miel (SAGARPA, 2003 tomado de Treviño, 2006).

CAPITULO III

3.- METODOLOGIA

Se generó un modelo en el software ARC INFO, al cual se trasladaron las capas (mapas) de climatología, topografía, geología (litología y tectónica), pendiente del terreno, disponibilidad estimada de agua subterránea y de uso de suelo. Todo ello con la intención de realizar diversas superposiciones, por ejemplo entre los mapas de litología y climatología, entre disponibilidad de agua y topografía, etcétera. Esta dinámica permitió identificar unidades de disponibilidad potencial de agua subterránea, las cuales en función de los distintos cruces se les fue asignando un código alfanumérico (Por ejemplo, R1-, para signar zona de elevada tasa de precipitación con óptima litología para la infiltración, etcétera), es decir, tal código alfabético, finalmente representa un dato proxy del potencial del agua subterránea del acuífero 19-14.

3.1.- Modelos Geográficos

Se utilizó la metodología propuesta por Schosinsky & Losilla, (2000). “Metodología para cuantificar la recarga potencial en un acuífero en una región subtropical mediante un Balance Hídrico de suelos”.

Esta metodología considera variables geográficas, geológicas y climáticas. Respecto a las variables geográficas se encuentra la topografía del terreno y la pendiente; las variables geológicas que se consideran son, el tipo y uso del suelo, la infiltración, la textura y así como también la permeabilidad del suelo y por último las variables climáticas que desempeñan un papel importante son la precipitación, la temperatura y la evapotranspiración.

3.1.1.- Variables Geográficas

- La topografía del terreno se obtuvo de una cobertura digital del INEGI.

- La pendiente promedio, mínima y máxima se generaron utilizando un modelo de elevación digital a 90 metros.

3.1.2.- Variables Geológicas

- Los tipos de suelo de las áreas de estudio fueron obtenidos de un Mapa Digital de Edafología (MDE).
- La textura del suelo también se derivó del Modelo Digital de Edafología.
- Para cuantificar la permeabilidad se utilizaron las tablas de rangos establecidos según el tipo de suelo (Powers, 1992).
- Los datos de infiltración, son producto de una investigación del grupo de trabajo.

3.1.3.- Las variables climáticas

La precipitación, la temperatura y la evapotranspiración se obtuvieron de las estaciones hidrometeorológicas de la Comisión Nacional del Agua, además la intercepción de lluvia por la cobertura vegetal se estimó de acuerdo a los rangos que se proponen en la literatura para las diferentes cubiertas vegetales del área de estudio.

El tipo y uso de suelo y vegetación se obtuvieron del mapa digital de INEGI 2010.

Para integrar y derivar el índice transformado y normalizado de la vegetación (NDVI), se emplearon imágenes de satélite obtenidas por SPOT con una resolución de 10 metros utilizando el software Erdas Imagine 11. La fórmula para obtener este índice es $NDVI = \frac{2\sqrt{(B4-B3)}}{(B4+B3)}$ que relaciona las dos bandas que mejor definen a la vegetación, y su valor se relaciona con la cobertura vegetal. Las variables restantes se procesaron con el programa ARC INFO 10.1.

El método utilizado consideró fórmulas matemáticas que incluyen los factores geográficos, geológicos y climáticos que participan en la cuantificación de la recarga de agua Subterránea.

Para cuantificar la recarga potencial anual, se utilizan las siguientes ecuaciones las cuáles utilizan coeficientes (coeficiente de vegetación, de textura, etc.) los cuales se tomaron de la literatura citada de acuerdo a la zona de estudio.

3.2.- Fracción de Lluvia que se Intercepta por medio del Follaje (Ret)

Para calcular éste indicador se utilizan las relaciones que se enlistan a continuación:

- Si $P \leq 5 \text{ mm/mes}$, $Ret=P$

Es decir si la precipitación es menor a 5 mm no van a generar infiltración ya que se considera que en un mes con lluvia, al menos 5 mm son retenidos por el follaje sin llegar al suelo.

- Si $(P) (Cfo) \geq 5 \text{ mm/mes}$, $Ret= (P) (Cfo)$

Definiremos como Coeficiente de follaje (Cfo), el porcentaje de lluvia mensual que es retenida por el follaje.

Para calcular la retención de lluvia mensual interceptada por el follaje (Ret), se aplica la siguiente ecuación; para obtener el Coeficiente de Retención se usó el cuadro 1.

- Si $P > 5 \text{ mm/mes}$ y el $(P) (Cfo) < 5$, $Ret=5$

P= Precipitación, Mensual del Mes (mm/mes), Ret=Retención de Lluvia en el Follaje (mm/mes),
Cfo=Coeficiente de Retención del Follaje

Cuadro 1.- Valores de Coeficientes de Retención del Follaje (Canadell *et al*, 1996).

Tipo de Vegetación	Cfo (%)
Agricultura de Riego	0.1
Agricultura de Temporal	0.09
Bosque de Encino	0.2
Bosque de Pino	0.2
Chaparral	0.08
Matorral Desértico Rosetófilo	0.07
Matorral Espinoso Tamaulipeco	0.12
Matorral Submontano	0.18
Mezquital	0.13
Pastizal Cultivado	0.21
Pastizal Inducido	0.09
Vegetación de Galería	0.06

3.3.- Coeficiente de Infiltración (Kfc), por Textura de Suelo (fc).

Para calcular este indicador se utilizará, el rango de infiltración (fc), que debe encontrarse entre 16 y 1568 mm/día. Para valores de fc menores a 16 mm/día, $K_{fc}=0.0148 (fc)/16$

Coeficiente de Infiltración:

- Si fc está entre 16 y 1568 mm/día, $K_{fc} = 0.267 \ln(fc) - 0.000154(fc) - 0.723$
- Si fc es mayor de 1568 mm/día, $K_{fc}=1$
- Si fc es menor de 16 mm/día, $K_{fc}=0.0148(fc)/16$

El valor de fc corresponde a la permeabilidad del suelo en los primeros 30 cm de profundidad, por considerar que este es el espesor que está en contacto directo con la lluvia. El valor de Kfc, fue derivado para los valores de lluvia mensual, por lo tanto la fracción que infiltra debido a la textura del suelo nos permite obtener la infiltración mensual.

3.4.- Coeficiente de Infiltración del Suelo (Ci).

Para calcular el Ci se considera, por una parte el coeficiente de Infiltración por textura de suelo; se incluye la fracción que se infiltra por efecto de la vegetación (Kv) y la fracción que se infiltra por efecto de la pendiente (Kp), éstos últimos se representan en el cuadro 2. Estos Coeficientes vienen a conformar el Coeficiente de Infiltración del Suelo (ONU, 1972)

El Coeficiente de Infiltración se calcula con la siguiente relación:

$$Ci = \begin{cases} \text{Si } Kp + Kv + Kfc \text{ es mayor de } 1, Ci=1 \\ \text{Si } Kp + Kv + Kfc \text{ es menor o igual a } 1, Ci= Kp + Kv + Kfc \end{cases}$$

Ci= Coeficiente de Infiltración del Suelo, Kp= Fracción que se infiltra por efecto de la pendiente, Kv= Fracción que se infiltra por efecto de la vegetación, Kfc= Fracción que se infiltra por textura de Suelo

Cuadro 2.- Componentes del Coeficiente de Infiltración del Suelo

Componentes del Coeficiente de Infiltración del Suelo			
Por Pendiente	kp	Por Cobertura Vegetal	kv
Baja	0.3	Cobertura con zacate	0.09
Media	0.15	Terrenos Agrícolas	0.1
Fuerte	0.06	Pastizales	0.18
		Matorrales	0.2
		Bosques	0.22

3.5.- Calculo de Infiltración Pluvial Mensual (Pi)

Para el cálculo de la precipitación que se infiltra mensualmente se consideran los siguientes factores: La Precipitación mensual, la retención pluvial mensual en el follaje (Ret) y el Coeficiente de Infiltración (Ci).

El cálculo de la precipitación que se infiltra mensualmente (Pi) al suelo, está dado por la siguiente relación.

$$P_i = (C_i) (P - Ret)$$

P_i =Precipitación que infiltra mensualmente al suelo (mm/mes), C_i =Coeficiente de Infiltración, P =Precipitación mensual en mm/mes, Ret =Retención de lluvia mensual por follaje en mm/mes

3.6.- Calculo de la Escorrentía Superficial (ESC)

La escorrentía superficial generada por la lluvia mensual, corresponde a la precipitación mensual menos la retención de lluvia en el follaje menos la infiltración.

La escorrentía mensual se calcula con la siguiente ecuación.

$$ESC = P - Ret - p_i$$

ESC = Escorrentía Superficial en mm/mes, P = Precipitación en mm/mes, Ret = Retención mensual por el follaje en mm/mes, P_i = Precipitación que infiltra mensualmente

3.7.- Balance de Suelos

Para el balance del suelo, se requiere la infiltración mensual al suelo, generada por la lluvia; posteriormente es necesario conocer la Capacidad de Campo y Punto de Marchitez del Suelo. Estos valores se estimaran mediante la Tabla 3. También es necesario conocer la profundidad aproximada de las raíces extractoras de agua en el área donde se realizará el balance (Cuadro 4).

La máxima humedad que puede tener un suelo, es igual a la capacidad de campo (CC), es entonces cuando la planta tiene la máxima capacidad de transpiración. La mínima humedad que puede tener un suelo es igual al punto de marchitez, pues con humedades menores la planta muere (Cuadro 3).

Cuadro 3. Punto de Marchitez Permanente y Capacidad de Campo (Grassi, 1976).

Punto de Marchitez Permanente y Capacidad de Campo en % por peso de suelo seco en Diferentes Texturas de Suelo			
TEXTURA DEL SUELO	Porcentaje por peso de Suelo Seco		
	PMP (%)	CC (%)	Densidad Aparente(g/cm³)
Arenoso	2-6	6-12	1.55-1.80
Franco - Arenoso	4-8	10-18	1.40-1.60
Franco	8-12	18-26	1.35-1.50
Franco Arcilloso	11-15	23-31	1.30-1.40
Arcillo - Arenoso	13-17	27-31	1.25-1.35
Arcilloso	15-19	31-39	1.20-1.30

Cuadro 4. Profundidad de las Raíces de las plantas (Ibáñez, 2006).

Tipo de Vegetación	Profundidad de Raíces (mts)
Agricultura de Riego	1.3
Agricultura de Temporal	1.7
Bosque de Encino	3.9
Bosque de Pino	7.3
Chaparral	2.6
Matorral Desértico Rosetófilo	5.1
Matorral Espinoso Tamaulipeco	5.2
Matorral Submontano	4.2
Mezquital	7.6
Pastizal Cultivado	2.1
Pastizal Inducido	1.7
Vegetación de Galería	1.1

3.8.- Calculo de la Evapotranspiración Potencial Real (ETPR)

La evapotranspiración se define como la transpiración de la planta, cuando el suelo se encuentra a capacidad de campo, más la evaporación del suelo. La mayor capacidad de evapotranspiración es cuando el suelo se encuentra a capacidad de campo.

En este estudio se asumirá que la Evapotranspiración Potencial Real será proporcional a la humedad del suelo, comparada con la diferencia de humedad entre la capacidad de campo y el punto de marchitez.

$$ETPR = (HS - PM) (ET) / (CC - PM)$$

ETPR (mm/día)=Evapotranspiración Potencial Real, HS (%)= Humedad del Suelo, ET (mm/día)= Evapotranspiración de la planta a Capacidad de Campo, CC (%)= Capacidad de Campo, PM (%)= Punto de Marchitez Permanente

Cada planta tiene una tasa de evapotranspiración diferente y va a depender de factores como: la temperatura del ambiente, humedad relativa, radiación solar, velocidad de viento y grado de desarrollo de la planta; debido a esto es difícil en una cuenca determinar la evapotranspiración de la vegetación, por tal motivo es conveniente determinar tasas de evapotranspiración como promedio para la cuenca, esta tasa la asumiremos que es igual a la Evapotranspiración Potencial (ETP). (Heras, 1972).

$$\text{➤ } ETP \text{ (mm/mes)} = (8.10 + 0.46 T) Ps \text{ (Cuadro 5)}$$

ETP = Evapotranspiración potencial en (mm/mes), T= Temperatura media mensual en grados centígrados, Ps = Porcentaje de horas luz solar mensual con respecto al año.

Cuadro 5. Porcentaje de horas luz solar mensual con respecto al año

Porcentaje de horas de sol mensual, respecto al año en la latitud (Calvo, 1999)												
Mes	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
%	8.6	10.1	12	13.8	16	16	16	15	13	11	9.1	8.1

3.9.- Calculo del Coeficiente de Humedad Máximo (C1)

Al iniciar un mes cualquiera, el suelo tendrá una humedad inicial (Hsi), si no existiese evapotranspiración, la precipitación que infiltra (Pi) vendría a aumentar la humedad en el suelo, permitiendo una mayor evapotranspiración. Si no consideramos la evapotranspiración el coeficiente de humedad al final del mes, será (C1).

$$\text{C1} = \text{C1} = (\text{Hsi} - \text{PM} + \text{Pi}) / (\text{CC} - \text{PM})$$

C1 = Coeficiente de humedad al final del mes antes de que ocurra la evapotranspiración; Hsi = Humedad al inicio del mes, humedad de suelo inicial en mm; Pm = Punto de Marchitez en mm; Pi = Precipitación que se infiltra en mm/mes; CC = Capacidad de Campo

3.10.- Calculo del Coeficiente de Humedad Mínimo (C2)

Si se considera que la evapotranspiración ocurre después de la infiltración el coeficiente de humedad al final del mes será (C2).

$$\text{C2} = (\text{Hsi} - \text{PM} + \text{Pi} - \text{ETR1}) / (\text{CC} - \text{PM})$$

C2 = Coeficiente de humedad al final del mes, después de que ocurra la evapotranspiración; ETR 1 = Evapotranspiración potencial real (mm/mes), considera la humedad correspondiente al coeficiente C1; ETP = Evapotranspiración potencial (mm/mes)

3.11.- Calculo de la Evapotranspiración Potencial Real (ETPR) en un mes determinado

$$\text{ETPR (mm/mes)} = ((C1 + C2) / 2) \text{ ETP}$$

ETPR =Evapotranspiración real tentativa promedio en una zona ocurrida durante el mes (mm/ mes); C1 =Coeficiente de humedad máximo sin considerar la evapotranspiración; C2 =Coeficiente de humedad mínimo considerando evapotranspiración calculada con C1; ETP = Evapotranspiración potencial (mm/mes).

3.12.- Calculo de la Humedad Disponible (HD)

La Humedad disponible (HD) es aquella que puede ser tomada por las raíces de las plantas, para realizar sus funciones y la humedad disponible está dada por la siguiente ecuación.

$$\text{HD (mm/mes)} = H_{si} + P_i - P_m$$

HD =Humedad Disponible (mm/mes); H_{si} =Humedad del suelo inicial (mm); P_i =Precipitación Infiltrada (mm/mes); P_m =Punto de Marchitez (mm)

3.13.- Calculo de la Humedad del suelo al final del mes (H_{sf})

Para realizar el Cálculo de la recarga al acuífero, se requiere conocer la humedad del suelo al final del mes, la cual no puede ser mayor a la capacidad de campo y se obtiene con la siguiente ecuación.

- Si $(HD + PM - ETR)$ es < que la CC, $HS_f = HD + PM - ETR$
- Si $(HD + PM - ETR)$ es \geq que la CC, $HS_f = CC$

HS_f =Humedad del suelo final (mm); HD =Humedad Disponible (mm/mes); PM =Punto de Marchitez (mm); ETR =Evapotranspiración Real (mm/mes); CC =Capacidad de Campo (mm).

3.14.- Calculo de la Humedad del suelo al inicio del mes (HSi)

Además del cálculo de la ecuación para la humedad del suelo al final del mes, es necesario conocer la humedad del suelo al inicio del mes, o sea Humedad Inicial (HSi). La Humedad Inicial de un mes dado es la siguiente.

HSi = Es igual a la humedad del suelo al final del mes anterior.

3.15.- Calculo de Recarga Potencial al Acuífero (Rp)

La recarga al acuífero se lleva a cabo, si la cantidad de agua que infiltra es suficiente para llevar al suelo a capacidad de campo y además satisfacer la evapotranspiración de las plantas. El agua sobrante, una vez satisfecha la capacidad de campo y la evapotranspiración, es la que recarga al acuífero, la que se calcula con la siguiente ecuación.

$$\text{➤ } R_p = P_i + H_{si} - H_{sf} - ETR$$

Rp =Recarga potencial mm/mes; Pi =Precipitación que infiltra mm/mes; HSf =Humedad del suelo al final del mes mm/mes; ETR = Evapotranspiración real en mm/mes

Para definir la recarga potencial anual se elabora un mapa de polígonos de Thiessen, los cuales dividen la zona de estudio en áreas de similar precipitación, posteriormente se agregan los valores de infiltración a cada polígono tomando en cuenta la textura del suelo.

El procesamiento de las variables se llevó a cabo realizando cada una de las ecuaciones propuestas en el método anterior, conjuntamente éstos resultados se asociaron con las cubiertas digitales en el programa ARC INFO; Para unir todas las cubiertas generadas se realizó una ponderación y se le dio un valor de peso de acuerdo al nivel de importancia, reclasificándolas de acuerdo a nuestro objetivo.

Se empleó el proceso de álgebra de mapas que permite unir todas las cubiertas y generar un modelo espacial, ejemplificando las áreas con mayor recarga.

CAPITULO IV

RESULTADOS

4.1.-Balance Hídrico

A partir de un análisis conjunto de los registros hidrológicos y las características físicas es posible definir de manera potencial las interacciones entre las aguas superficiales y subterráneas y estimar los excedentes de precipitación que potencialmente pueden alimentar los depósitos subterráneos. Las técnicas, como el balance hídrico, permiten abordar el problema de la recarga potencial de manera indirecta a partir de registros hidrometeorológicos. Este método permite para diferentes escalas temporales y espaciales, estimar valores de recarga por exceso de precipitación, sin consideración de los fenómenos locales de intercambio hídrico con las corrientes, ni la dinámica horizontal de los flujos superficiales y subsuperficiales.

En el caso del presente estudio, este método se usa para la determinación de recarga potencial sobre las formaciones acuíferas del acuífero Citrícola Sur a partir de información de estaciones localizadas cerca o directamente sobre los acuíferos.

Los cálculos se ejecutaron para el periodo de referencia asociado a las características de la red hidrometeorológica de la cuenca, e incluye escenarios hidrológicos típicos en la escala de balance anual: comportamiento húmedo, seco y cercano al medio mensual. Adicionalmente, el método se puede utilizar también como una aproximación distribuida en el espacio que permite determinar, de manera general, las características potenciales de la recarga en la zona definida.

Para que el análisis se considere representativo, se utilizó un rango de 10 años de los promedios mensuales de precipitación, donde la variabilidad reflejó una reducción de los procesos de recarga hídrica, debido a diferentes factores considerando el más importante la pérdida de la cubierta vegetal.

4.2.- Mapa de Pendientes

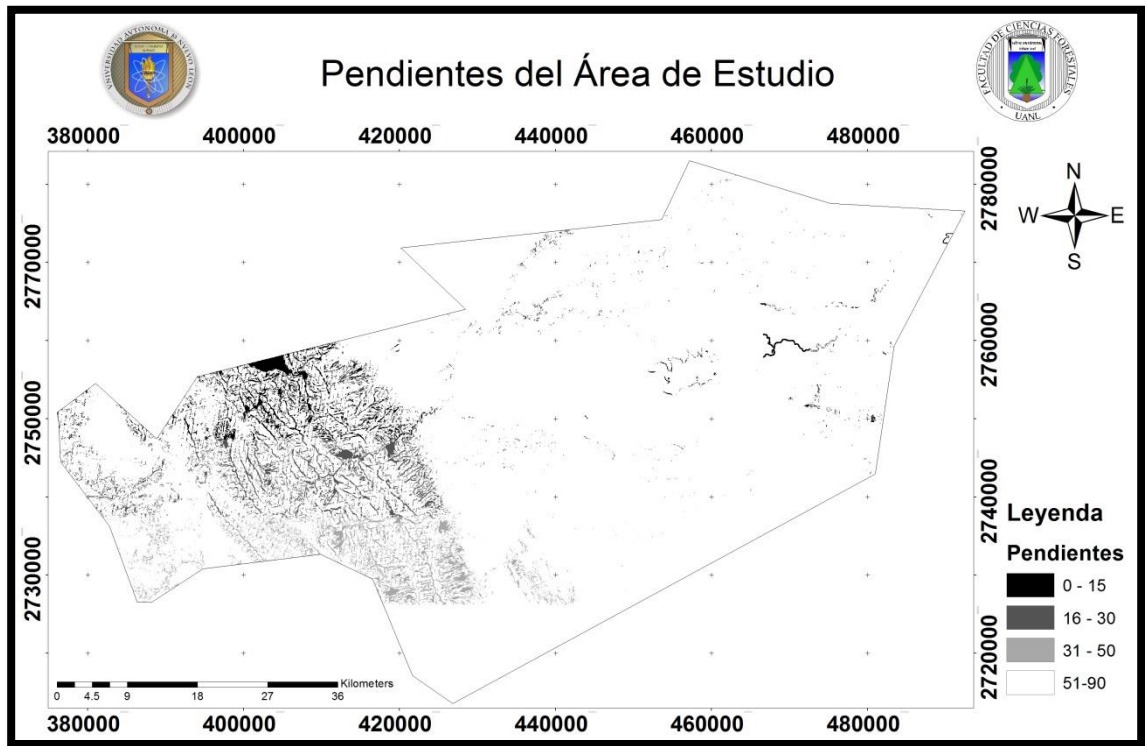


Figura 2.- Pendientes del Acuífero Citrícola Sur.

Las pendientes en la Sierra Madre Oriental tienden a ser de entre un 30 y un 60%, lo que ocurre al contrario sobre las planicies o zonas urbanas que oscilan en un rango de 15 a 30%, pendientes que ocupan la mayor parte del área de estudio.

En la parte este del área de estudio, que corresponden a la Sierra Madre Oriental se presentan las pendientes más pronunciadas, en el rango que oscila entre 30% y 60%. En la parte central y este del acuífero el rango de pendiente oscila entre un 15 y 30%.

4.3.- Mapa de Tipos de Suelo.

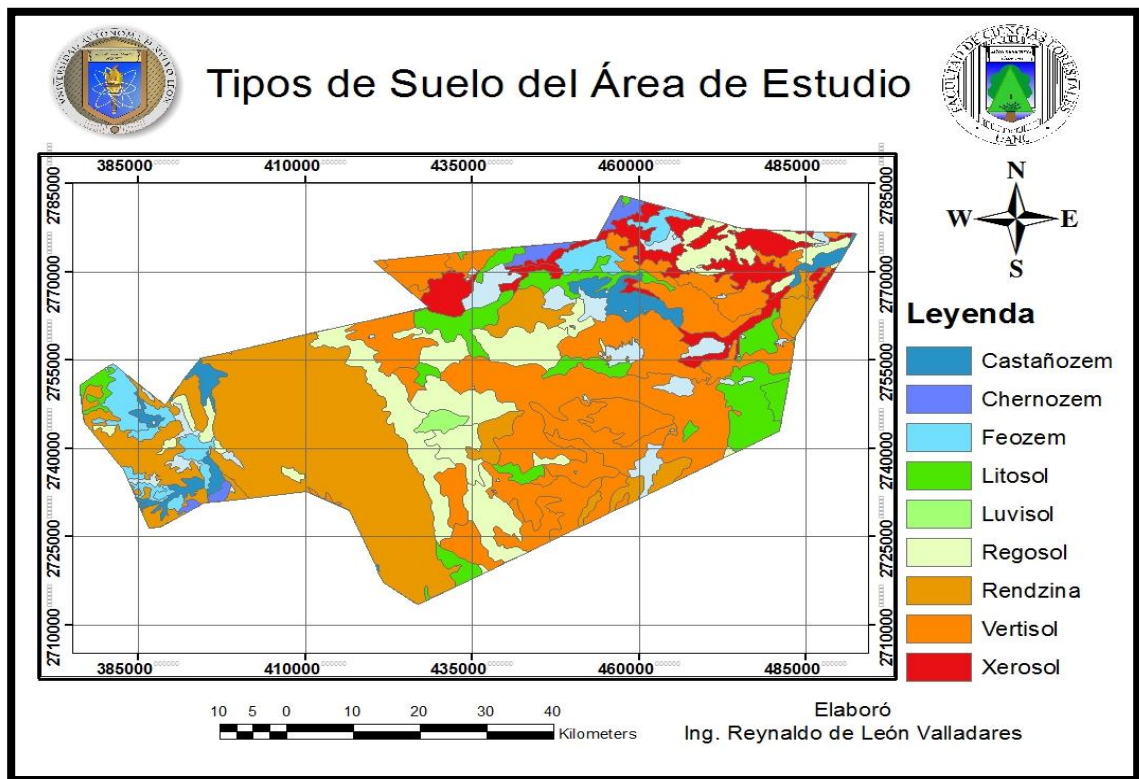


Figura 3.- Tipos de Suelo.

Los principales tipos de suelo que ocupan mayor superficie son La Rendzina y El Vertisol, seguidos de Litosol y Regosol. El Castañozem, Chernozem, Feozem, Luvisol y Xerosol, ocupan pequeñas áreas sobre el área de estudio.

Los suelos más predominantes en el área de estudio son los Vertisoles presentándose en poco más del 30% del área; posteriormente los suelos del tipo Rendzina continúan con un 27% y los suelos del tipo Regosol prevalecen en un 13%. En una proporción intermedia destacan los suelos del tipo Litosol con un 8% y los Xerosoles con un 6%. Con una distribución menor se encuentra los suelos del tipo Chernozem con un 1%, siguiendo los Castañozem y los Feozem con un 3% cada uno.

4.4.- Clase Textural

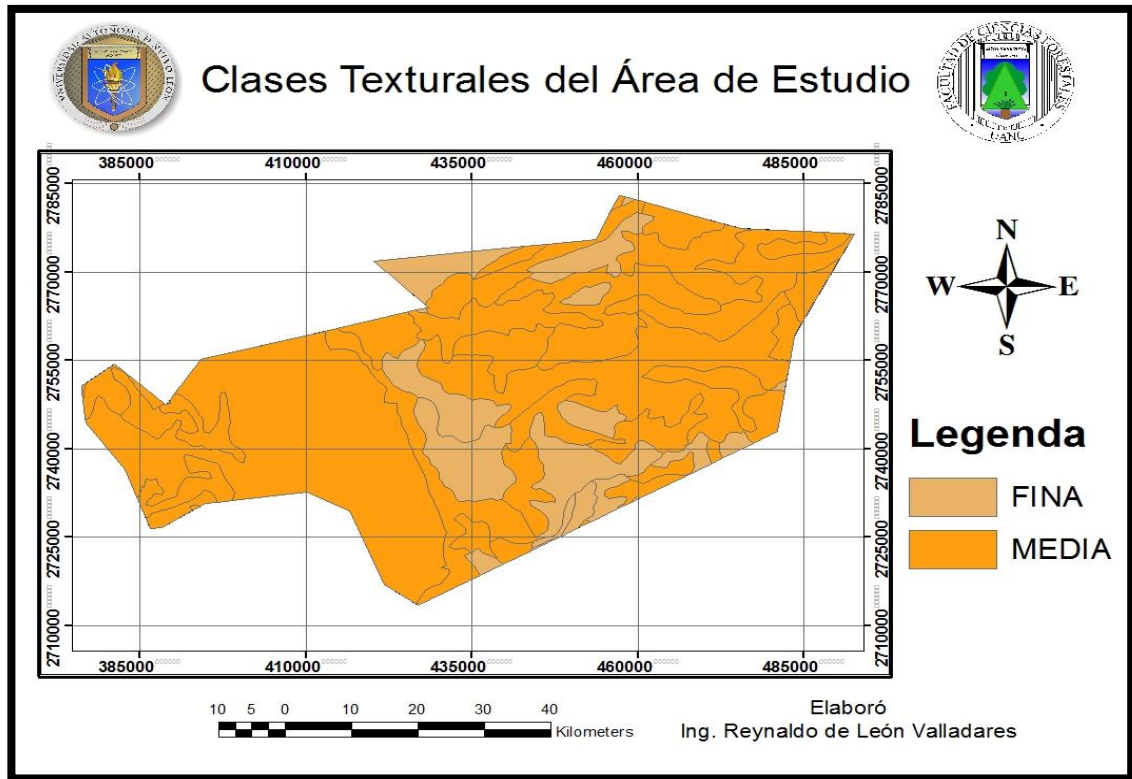


Figura 4.- Clase Textural

Debido a su origen sedimentario, y a la erosión que se ha presentado en gran medida, cerca de un 90% del área de estudio presenta una clase textural media y solo un 10% se caracteriza por presentar una textura fina.

De acuerdo a la composición textural, en gravas la infiltración es mayor debido a la porosidad que existe entre este material; en limos y arcillas la infiltración es baja debido a que con el mismo material obstruye la comunicación del agua entre los poros.

El tamaño de las partículas de suelo frecuentemente puede afectar la permeabilidad de las capas de suelo que albergan el agua subterránea; en macizos rocosos fracturados el fluido viaja con menos dificultad para infiltrarse.

4.5.- Mapa de Precipitación

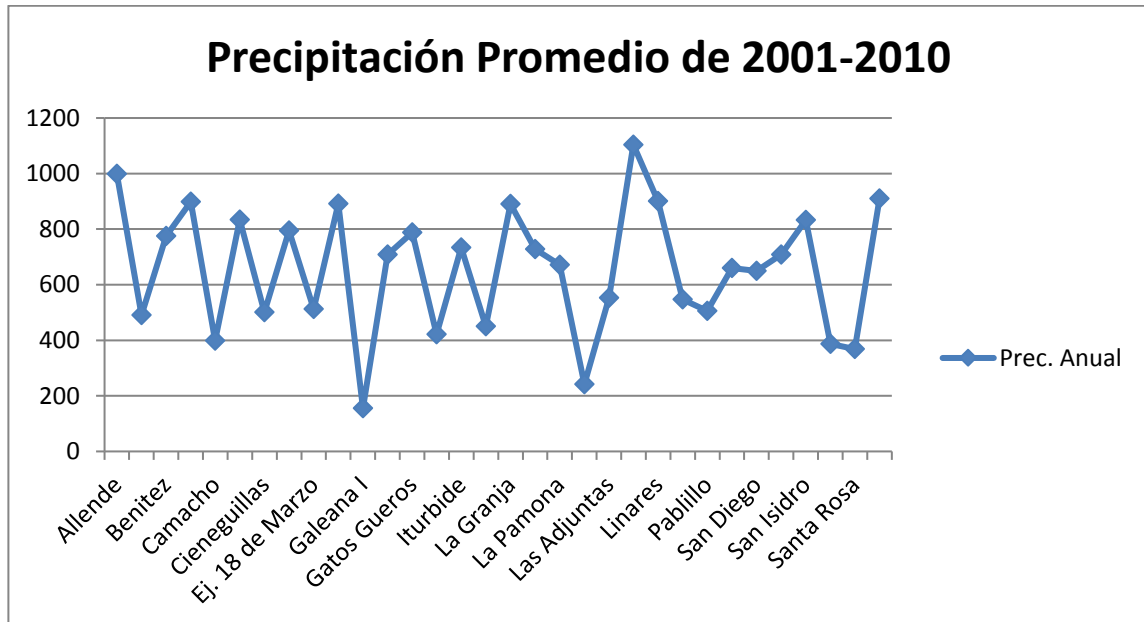


Figura 5.- Grafica de Precipitación del año 2010.

El período comprendido en el año 2001-2010, se caracterizó por una serie de eventos de escasa precipitación, los primeros meses del año y posteriormente se presentó un evento de precipitación a mayor escala (Huracán Alex, 2010) en la zona citrícola, lo que provocó un aumento sobre la recarga de los acuíferos.

Se considera que los efectos del Cambio Climático, han alterado el ciclo hidrológico presentándose largas sequías o eventos esporádicos de lluvia de gran magnitud. Esta situación repercute en la disponibilidad de agua subterránea ya que la capacidad de uso es inferior a la capacidad de recarga del acuífero.

4.6.- Mapa de Polígonos de Thiessen

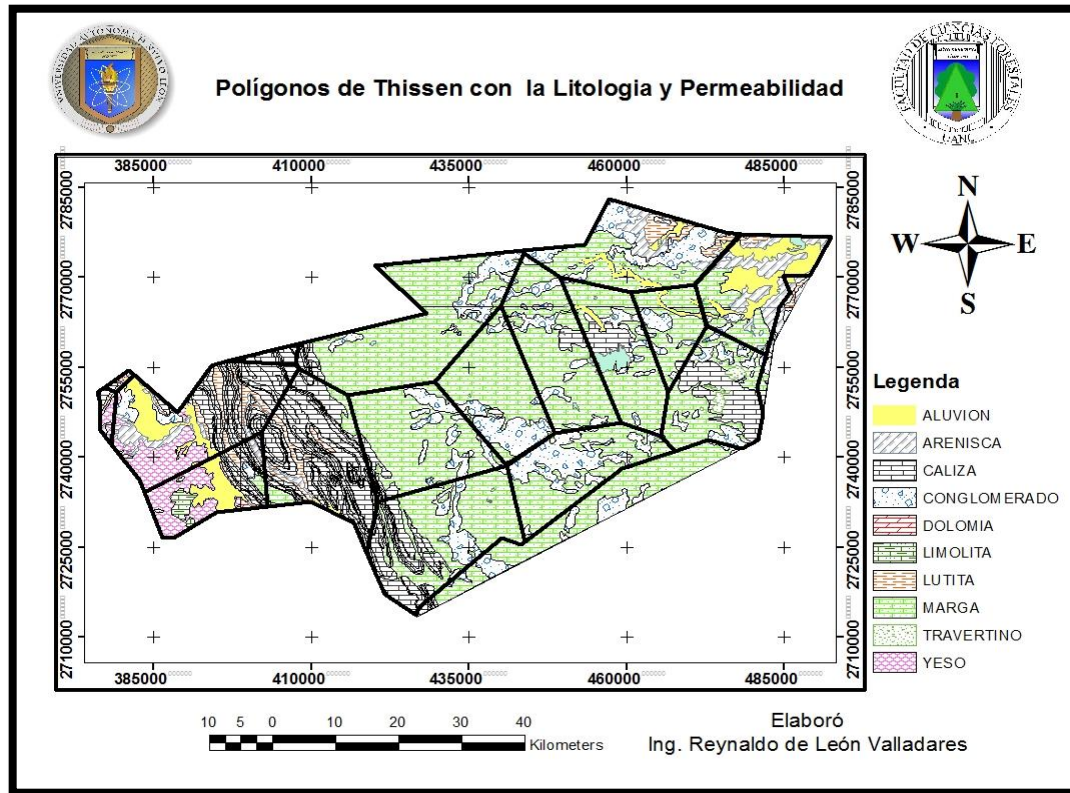


Figura 6.- Polígonos de Thiessen

Los polígonos de Thiessen dividen el área en zonas de similar precipitación, lo que es de importancia para calcular la recarga de acuerdo a la superficie del área que se desee obtener la recarga.

El área de estudio se divide en 16 zonas, las cuales se clasificaron de acuerdo a su litología y se agregó un valor de permeabilidad.

Los polígonos conformados por calizas y lutitas intemperizadas, que se encuentran sobre las partes altas de la Sierra Madre Oriental son en su mayoría las receptoras y almacenadoras del agua que se aloja en el acuífero Citrícola Sur.

4.7.- Mapa de Isoyetas

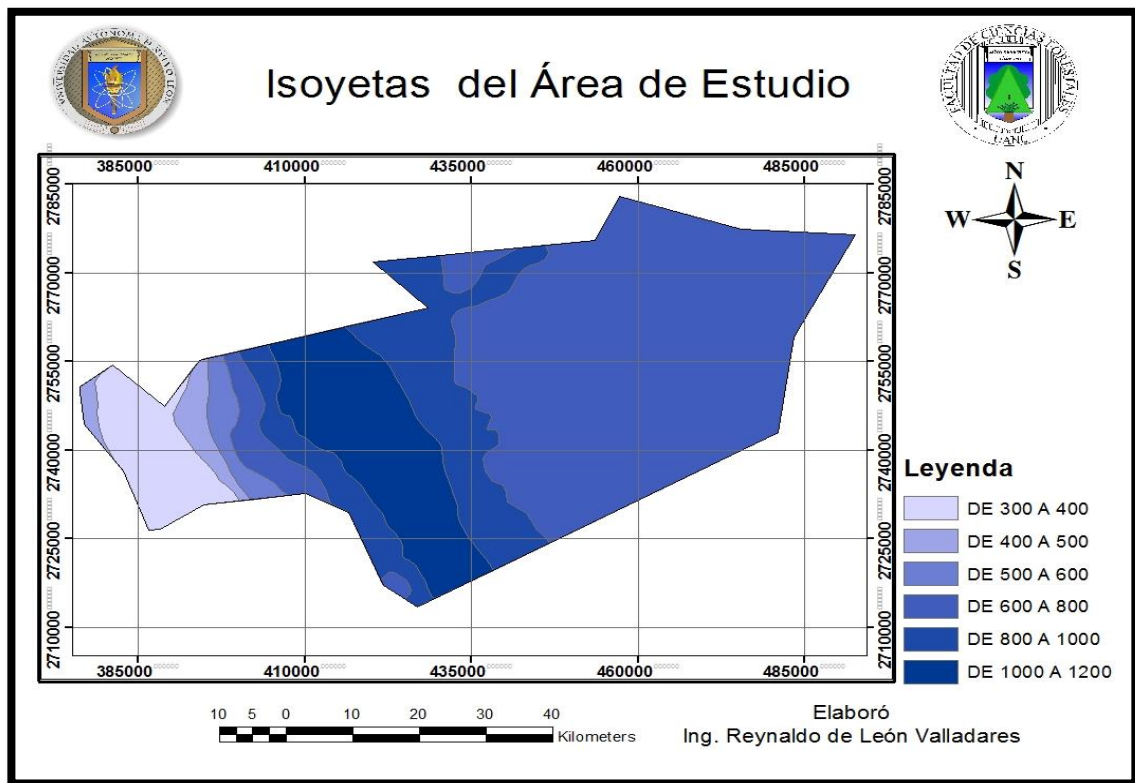


Figura 7. Isoyetas del área de estudio.

De acuerdo al modelo de precipitación, las áreas sobre la Sierra Madre Oriental presentan las mayores cantidades de precipitación, seguidas por las zonas más cercanas hacia las planicies.

El modelo de precipitación divide en 6 regiones el área de estudio citrícola Sur.

La figura nos permite visualizar la precipitación acumulada de un período de 10 años, donde se puede identificar que las zonas de mayor precipitación se ubican sobre las partes altas de la SMO geomorfológicamente ubicadas sobre los cerros y lomeríos del centro- sur del estado de Nuevo León.

4.8.- Evapotranspiración

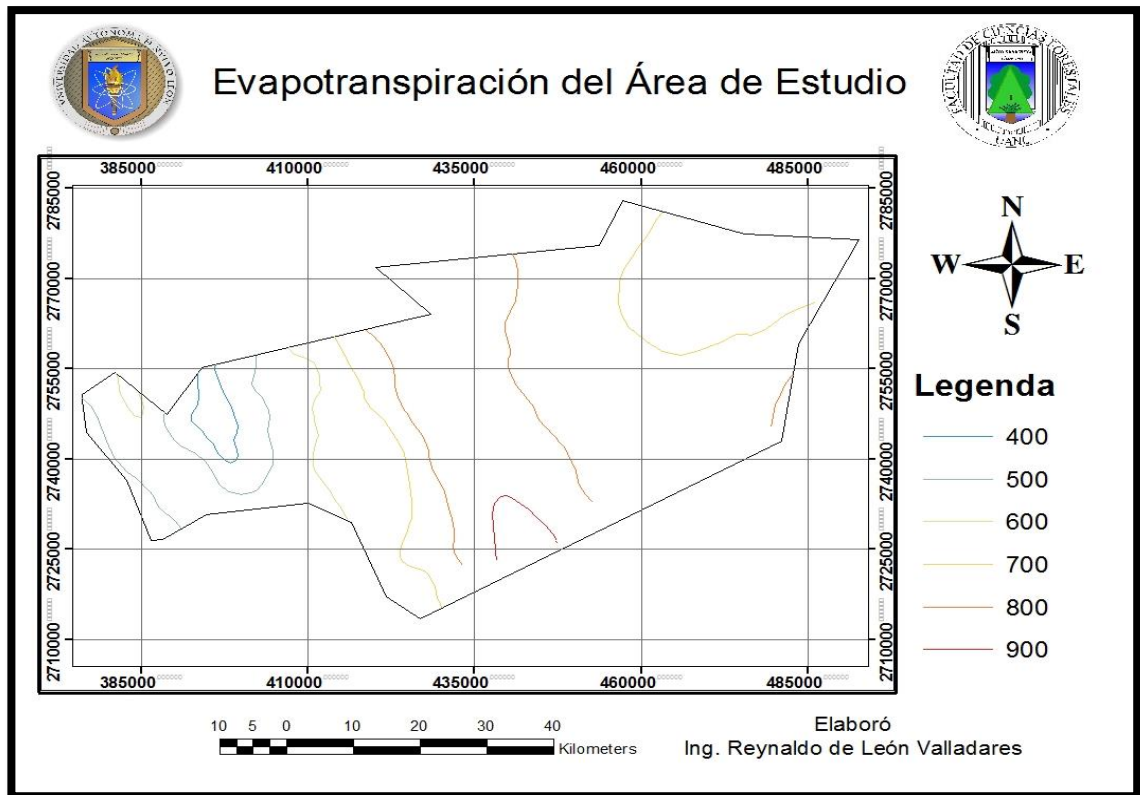


Figura 8.- Evapotranspiración del área de estudio.

Las zonas con menos índices de evapotranspiración se presentan hacia el sureste del área de estudio, lo que corresponde a zonas de bosques de pino-encino y las áreas que presentan índices mayores se presentan hacia las zonas con vegetaciones de matorrales y pastizales.

4.9.- Vegetación del área de Estudio.

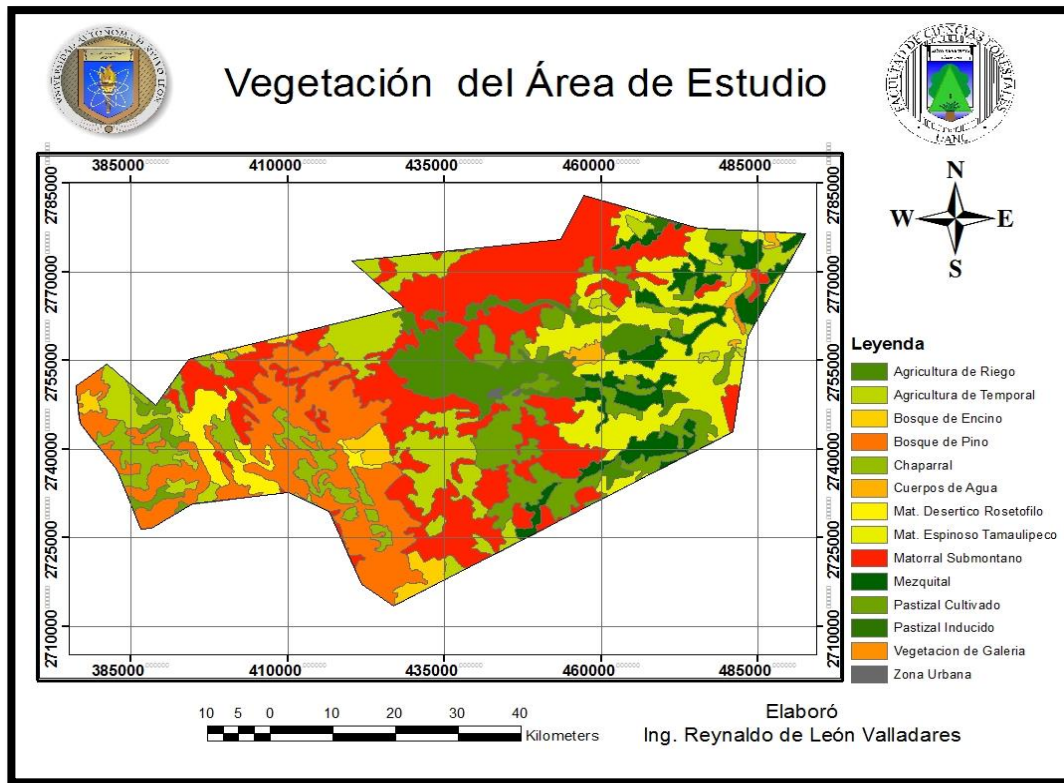


Figura 9.- Vegetación característica del área de estudio.

En lo que respecta a la vegetación, El Matorral Submontano y El Bosque de Pino ocupan cerca del 50%. Los Mezquiales ocupan un 10% de superficie al igual que El Matorral Espinoso Tamaulipeco y los Pastizales. Los Chaparrales y El bosque de Encino ocupan un 5 % de área cada uno.

Los bosques presentan una gran variabilidad hidráulica, en suelos de tipo Regosoles, y Rendzina, donde se tienden a acumular agua en las proximidades de sus sistemas radiculares.

Las raíces generan macroporos por los que el agua circula a mayor velocidad y, más importante, por donde puede salir el aire atrapado en el suelo favoreciendo la circulación del agua y el drenaje hacia horizontes inferiores.

4.10.- Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

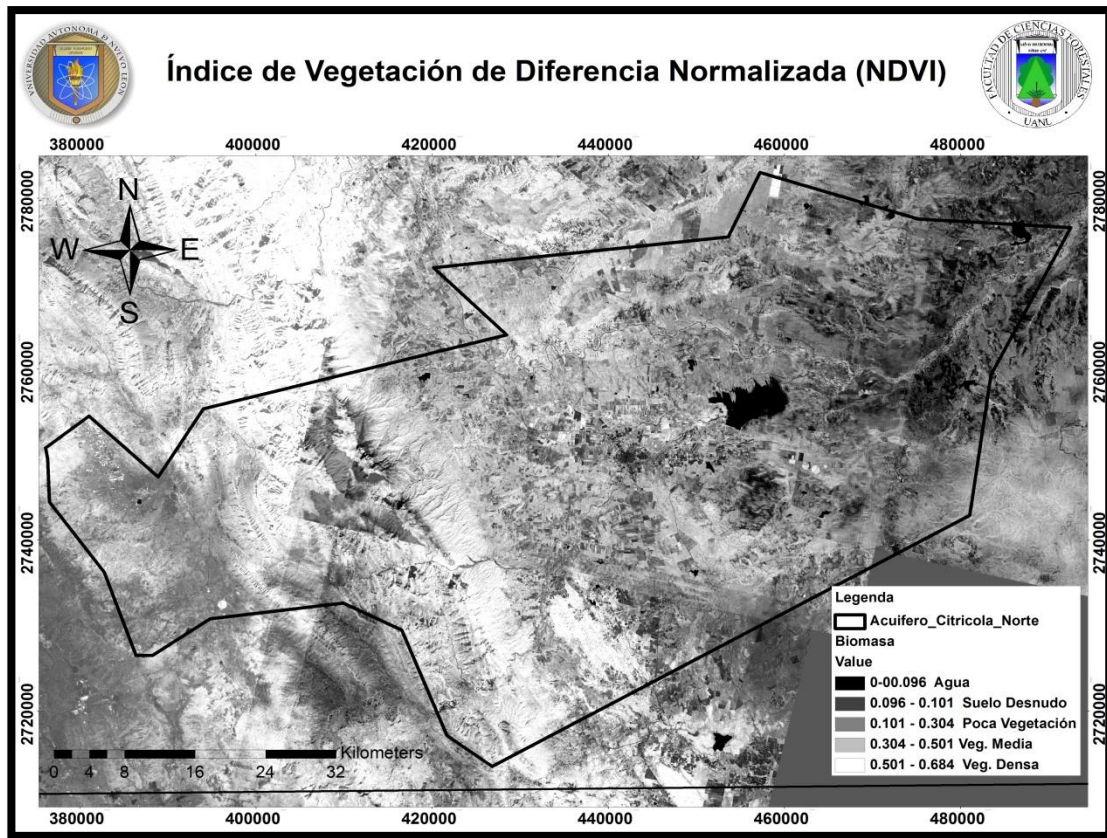


Figura 10.- Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).

Elaboración Propia basada en Semarnat – INEGI (2000).

En algunas regiones de la Sierra Madre Oriental se observan macizos de vegetación densa, que corresponden a bosques de pino y a matorral submontano. En las zonas bajas la vegetación densa se encuentra en matorrales y algunos cultivos.

Los valores 0.00 – 0.096 corresponden a áreas con superficies de agua, estructuras artificiales, rocas, nubes, nieve; el suelo desnudo generalmente cae dentro del rango de 0.097 a 0.101; y las plantas siempre tendrán valores positivos entre 0.102 y 1.05.

4.11.- Cuadro 6. Ponderación de las Variables para el Modelo Espacial.

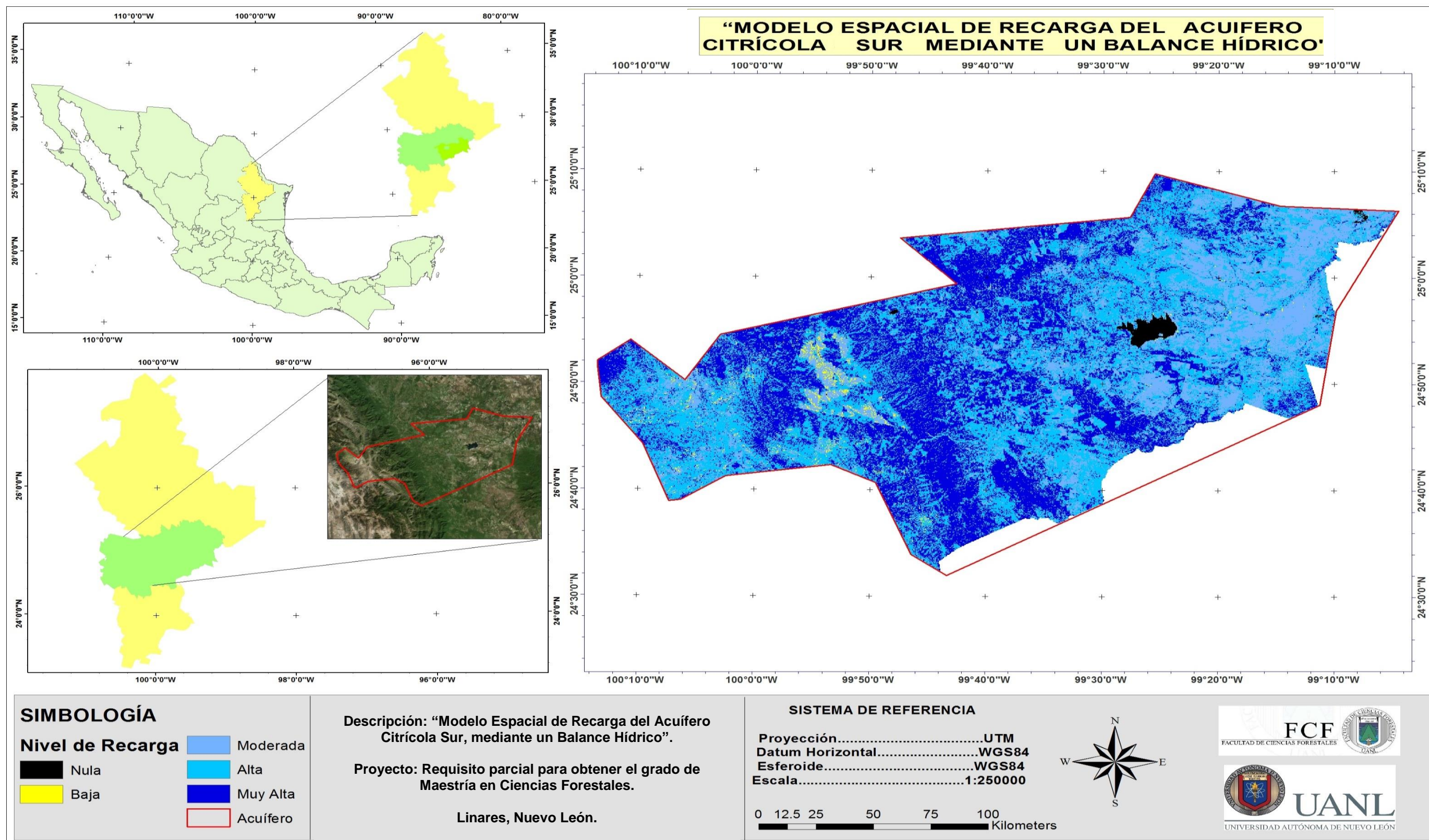
Factor Condicionante	COD	Categoría	Probabilidad de Recarga	Peso
NDVI	0	Agua	0. No relacionado	0.15
	1	0.684	5.- Extrema	
	2	Veg. Media 0.304 - 0.501	4. Alta	
	3	Poca Vegetación 0.101 - 0.304	3. Media	
	4	Suelo des. 0.096 - 0.101	2. Baja	
Pendiente	1	0°-15°	5. Extrema	0.1
	2	16°-30°	4.- Alta	
	3	31°-50°	3. Media	
	4	>50°	2. Baja	
Uso de Suelo	1	Bosque	5. Extrema	0.1
	2	Matorrales Subtropicales	4. Alta	
	3	Matorrales Deserticos	3. Media	
	4	Agricultura	2. Baja	
Textura de Suelo	1	Fina	2. Media	0.1
	2	Media	3. Baja	
Precipitación	1	300-500	2. Baja	0.15
	2	500-700	3. Media	
	3	700-900	4. Alta	
	4	900-1100	5. Extrema	
Litología	1	Aluvión	5. Extrema	0.3
	2	Conglomerado	4. Alta	
	3	Lutitas	3. Media	
	4	Calizas	2. Baja	
Evapotranspiración	1	450-600	4. Alta	0.05
	2	600-750	3. Media	
	3	750-900	2. Baja	
Evaporación	1	450-600	4. Alta	0.05
	2	600-750	3. Media	
	3	750-900	2. Baja	

4.12.- Cuadro 7. Cálculos Realizados para Cuantificar la Recarga.

Tabla de Ecuaciones y Coeficientes de Infiltración para el Mes de Septiembre de 2010															
fc (mm/d)	50.9		Campo												
Kp (0.01%)	0.15		Cua 2												
Kv (0.01%)	0.2		Cua 2												
Kfc (0.01%)	0.42		Ec 2												
CI (0.01%)	0.77		Ec 3												
Ds (g/cm ³)	1.25		Cua 3												
PR (MM)	450		Cua 4												
Hsi (mm)	126														
Mes de Inicio: Septiembre															
Cfo: *Bosques= 0.20 , *Otros= 0.12															
	Concepto	Fuente	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept.	Oct.	Nov.	Dici.	Total
Precipitacion Mens.	Prec (mm)	CNA	27.9	34	7.4	206	54.8	218	199	15.1	344	0	0	0	469
Retencion Lluvia	Ret (mm)	Ec 1	5	5	5	24.7	6.57	26	23.8	5	41.3	0	0	0	76
Precip. Infiltrada	Pi (mm)	Ec 4	17.6	22.33	1.848	140	37.14	148	135	7.777	233	0	0	0	
Escorrentía Superfi.	ESC (mm)	E 5	5.27	6.67	0.552	41.7	11.09	44.1	40.4	2.323	69.7	0	0	0	
Temperatura	T(°C)	CNA	33	34.5	37.5	43.5	44.5	41.5	42	43	41	37	37	32	
% horas sol	Ps (%)	Cua 4	8.6	10.1	11.9	13.8	15.5	16.3	15.9	14.5	12.6	10.8	9.1	8.1	
Evapotrans. Potenc.	ETP (mm)	Ec 7	84.8	97.68	113.6	132	146	151	148	137.2	121	105	90.7	80.3	
Humedad del suelo	Hsi (mm)	Ec 16	86	86	86	97	101	109	117	126	126	115	102	94	
Factor de ETP antes	C1	Ec 10	0.3	0.4166	0	1	1	1	1	1	1	0.64	0.21	0	
Factor de ETP despue	C2	Ec 11	1	0	0	0.31	0	0.33	0.28	0	1	0	0	0	
Humedad Disponible	HD (mm)	Ec 13	7.92	12.62	86	141	42.43	161	157	38.07	264	19.3	6.29	-1.7	
Evapotrans. Real	ETR (mm)	Ec 14	7.92	12.62	0	86	42.43	100	94.6	38.07	121	19.3	6.29	0	
Humedad Suelo Final	Hsf (mm)	Ec 15	86	86	97	101	109	117	126	126	115	102	94	86	
Recarga Potencial	Rp (mm)	Ec 17	9.71	9.71	-9.152	49.7	-13.3	39.5	31.6	-30.3	123	-6.3	1.71	8	214

4.13.- Cuadro 8. Recarga Potencial Anual por polígono de Thiessen.

ID	Superficie(ha)	Recarga	Recarga Potencial
1	2570.976	214.382792	551173013.2
2	35794.83998	113.526	4063645004
3	18229.95176	79.361	1446747202
4	32640.84124	109.157	3562976307
5	36040.45698	83.265	3000908651
6	24426.93906	105.635	2580339707
7	24383.78489	111.256	2712842372
8	24165.58299	95.135	2298992738
9	28903.45303	112.596	3254413197
10	42798.31802	85.231	3647743443
11	1835.77006	111.562	204802179.4
12	30686.14152	104.953	3220602610
13	25214.52646	127.157	3206203541
14	28756.20795	92.123	2649108145
15	22768.91512	76.751	1747537004
16	12024.67888	98.236	1181256355
		Total	393,292.91469Mm ³ /año



CAPITULO V

Conclusiones

Los rangos de infiltración, en el área de estudio presentan un rango mínimo de 0.10 pertenecientes a las áreas de pastizal y los rangos máximos de infiltración los presentan los bosques, debido a que las raíces penetran las profundidades de los suelos y éstas funcionan como canales para que el agua logre llegar a las profundidades del acuífero.

Los tipos de suelo y rocas desempeñan un papel determinante en la recarga hacia el acuífero; para el presente modelo, las zonas de mayor recarga se encuentran en las partes altas que se caracterizan por macizos rocosos de tipo caliza, donde la porosidad es variable y la permeabilidad es elevada. Por el contrario en las zonas bajas compuestas por suelos arcillosos la porosidad es elevada y la permeabilidad muy baja.

Para cuantificar la potencialidad del acuífero, se compararon los volúmenes totales de la recarga y de la extracción de las aguas subterráneas de forma temporal (anual), con el fin de determinar las reservas potenciales reguladoras, sin tomar en cuenta las reservas permanentes. Con este balance hídrico se definió el estado de desarrollo de las aguas subterráneas en el acuífero, con lo cual se pudo estimar la cantidad del recurso hídrico.

Se determinaron que las principales áreas de captación de manantiales se localizan al sureste de la subcuenca en los alrededores de las comunidades de Iturbide, Galeana y Linares.

Se determinó que la cantidad que recarga anualmente el acuífero es de 393,292.91469Mm³/año. Comparando los datos de la comisión nacional del agua, se determina que la metodología empleada en este trabajo, presenta un 9% de margen de error, lo cual valida la información y datos empleados.

Se estimó que la recarga hídrica total anual en el acuífero es de 393,292.91469 Mm³/año y comparándola con la explotación actual, se tiene un balance positivo de $7.52 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$. Esto indica que existe un potencial hídrico subterráneo alto en la subcuenca, donde la explotación actual representa aproximadamente el 9.17% del recurso temporal, es decir, existe un 90.83% de excedente de agua subterránea.

Para el año en mención, se estima una recarga favorable donde el potencial hídrico se encuentra por encima de la demanda de consumo de los diferentes sectores de consumo. El acuífero podría verse afectado si en los próximos años se tuviera un déficit en el porcentaje de precipitación que abastece al a cuenca y por ende el acuífero Citrícola Sur.

Para efectuar la extracción del recurso subterráneo temporal de una forma planificada y geográficamente bien distribuida, es necesario llevar acabo un registro a detalle de los caudales extraídos para que no se de la sobreexplotación del recurso permanente del acuífero. Es recomendable observar y verificar que las entradas naturales (precipitaciones) no sean menores a las extracciones para no sobreexplotar el acuífero.

De este análisis, se puede concluir que actualmente no existe un riesgo potencial del recurso hídrico subterráneo y que el sistema presenta un comportamiento positivo, ya que la recarga es mayor que la extracción de agua subterránea del área de estudio.

Para continuar con el funcionamiento positivo del acuífero se debe analizar, planificar y efectuar la protección y conservación principalmente de la parte alta del acuífero, con el fin de mantener la recarga natural de esta zona.

BIBLIOGRAFÍA

Bardales W, (2003) Metodología para la identificación de zonas de recarga hídrica natural en las Cuencas de Guatemala. Red Centroamericana de Recursos Hídricos. Pp. 35

Canadell J. *et al* (1996) Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale.

Cantú I, *et al* (2005) Perdidas por Intercepción de la lluvia en tres especies del Matorral Somontano. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma de Nuevo León. Pp. 6

Carrica J *et al.*, (2004) Evaluación de la recarga natural al acuífero de la cuenca superior del arroyo Napostá Grande, provincia de Buenos Aires. Departamento de Geología. Pp. 281

Casanova, M. 1998. Influence of slope gradient and aspect on soil hydraulic conductivity measured with tension infiltrometer. MSc, Thesis, Swedish University of Agricultura. Sciences. Uppsala Sweden. 50 p.

Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, SV (CATIE). 2006. "Identificación, Evaluación y Manejo de Zonas de Recarga Hídrica". San Salvador. El Salvador.

Chow, 1964. Principios de Hidrogeografía. Universidad de Texas Comisión Nacional del Agua, 2009. Actualización de la disponibilidad Media anual de agua subterránea.

Comisión nacional del agua, 2020. Actualización de la disponibilidad. Media anual de agua subterránea Acuífero (1914) citrícola sur. Estado de nuevo león

Díaz I. *et al* (2010) realizó un estudio sobre la Intercepción de la lluvia en tres especies del matorral submontano y una plantación de eucalipto, en Linares, Nuevo León. Facultad de Ciencias Forestales.

Duarte, J. R. 1998. Estudio Hidrogeológico del Acuífero de Guluchapa, Tesis para optar al grado de Master en Ciencias. San José, Costa Rica. Universidad de Costa Rica.

FAO, 2000. Departamento Forestal. Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación. www.fao.org

FitzPatrick, E. 1996 Introducción a la Ciencia de los Suelos Editorial Trillas, 288 p

Galindo E, *et al.*, Balance Hídrico en el Acuífero Cuahutitlán-Pachuca, México: Proyecciones para 2021. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica. Pp. 26

Fortalecimiento de la Gestión Ambiental en El Salvador (FORGAES). 2005. Método para zonificaciones de protección de fuentes de agua. El Salvador. P 7-25. s. e

García M. (2008) Variación de la velocidad de infiltración media en seis ecosistemas inalterados. Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal. Universidad Autónoma Chapingo. Pp. 21-27

Gil Montes, J. 2000. Recursos Hidrogeológicos. CATIE (Centro Agronómico tropical de Investigación y Enseñanza, CR). Turrialba, Costa Rica.

González del Tango Martha. 2006. Infiltración. Universidad Politécnica de Madrid, Departamento de Ingeniería Forestal.

Grassi, C. (1976) Resumen de Propiedades Físicas del Suelo. 265 págs. CIDIAT. Mérida, Venezuela.

Heras, R., (1972) Manual de Hidrología, Hidrología Agrícola. 330 págs. Esc. Hidrología, Madrid, España.

Hernández F. et al (2009) Efecto de actividades agropecuarias en la capacidad de infiltración de los suelos del páramo del Sumapaz. Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente. Universidad de Cali, Colombia Pp. 38

Hernández, M. A. 2007. Sistemas de Información Geográfica (Datos Geográficos e Información Geográfica). San Salvador, SV, Universidad de El Salvador.

Honorato R., Manual de Edafología, 2001. Edición de la Universidad Católica de Chile. Pp. 266.

Ibáñez, J. (2006) Las Raíces de las plantas y los suelos, Profundidad de Enraizamiento.

INEGI, 2011. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.

INEGI. Carta de uso actual del suelo y vegetación Serie III. México.

Informe anual 2003, Procuraduría Ambiental y Ordenamiento Territorial del D.F.

Jiménez, F. 2006. "Evaluación de las Zonas de Recarga Hídrica", Modulo III. El Salvador, P 75-85. e. s.

Kutilek, m. & d. Nielsen.1994. Soil hydrology. Geoecology.

López. T. & Manzano M. Disponibilidad hídrica bajo escenarios de cambio climático en el Valle de Galeana, Nuevo León, México. Tecnología y Ciencias del Agua. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. vol. VIII, núm. 1, pp. 105-114, 2017.

Márquez A. et al (2011) Estimación de parámetros de infiltración en base a propiedades físicas del suelo en una zona agrícola de Venezuela. Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal. Universidad de Carabobo Valencia, Venezuela. Pp. 79

Martínez A (2006) Aproximación al conocimiento de la infiltración a través del análisis adimensional. Revista ecología pp. 491

Mohrlok, u., I. Wolf & j. Klinger. 2008. Quantification of Infiltration Processes in Urban Areas by Accounting for Spatial Parameter Variability. Soils Sediments 8 (1) 34 – 42

Murillo J., (2004) Recarga de Acuíferos, Evaluación y Análisis de Condicionantes Técnicos y Económicos. Acuífero aluvial del Bajo Guadalquivir. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Geológica. Pp. 804 p

ONU, (1972) Manual de instrucciones, estudios Hidrológicos. 540 págs. ONU Publ. No.70, San José, Costa Rica.

Palancar J, *et al.*, Cálculo de la Recarga Natural de un Acuífero a partir del Hidrograma del Manantial. Aplicación al Manantial Vozmediano. Departamento de Ingeniería y Morfología del Terreno, pp. 18

Porta, J. López-Acevedo M. y Poch RM, 2008. Introducción a la Edafología. Uso y Protección del Suelo. Mundi Prensa. Madrid. Pp. 446.

Prieto B., R. Tamara & J. Peroza. 2006. Comparación de dos métodos de campo para la determinación de la conductividad hidráulica saturada en suelos del Sinu (Córdoba, Colombia.).*Temas Agrarios- Vol. 11(2), (36-44)*

Quiroz O, *et al.* Evaluación Comparativa de Métodos de Cálculo de Recarga en Ambientes de llanura. La Llanura Interserrana Bonaerense (Argentina) como caso de estudio. Universidad Nacional de Mar del Plata. Pp.29

Rahardjo, h. T. Ong, r. Rezaur, e. Leong, d. Fredlund. 2009. Response parameters for characterization. *Environ Earth Sci.*

Santiago L. (2007) Medición y Análisis de la Intercepción de lluvia en un Bosque de Encino. Tesis de Maestría Pp. 143

Schosinsky G, 2008. Estudio Hidrogeológico, por medio del Balance Hídrico de Suelos y Modelo Conceptual. *Revista Geológica de América Central*, pp1-16.

Secretaria del medio ambiente y recursos naturales, 2006. Atlas geográfico del medio ambiente y recursos naturales.

Segeber C. & R. Villodas. 2006 .Hidrogeología 1. Universidad Nacional del Cayo, Facultad de Ingeniería Civil. Puerto rico.

Segeber Carlos D. & Villodas Rubén. 2006. HIDROLOGÍA 1. Universidad Nacional de Cayo, Facultad de Ingeniería Civil.

Servicios Geológicos, S. A., 1981. Estudio geohidrológico preliminar de la Zona Citrícola.

Sumner, M.E. Handbook of soil Science. CRC Press. EU. 2000.

Thompson, s., c. Harman, p. Heine, & g. Katul. 2010. Vegetation-infiltration relationships across climatic and soil type gradients. Journal of Geophysical Research, Vol. 115.

Thorntwaite, C. W., 1948. An Approach toward a Rational Classification of Climate. Geographical Review, Vol. 38, No. 1. pp. 55-94.

Treviño, E. 2006. Desarrollo Sustentable. Diagnóstico y perspectiva para Nuevo León. Capítulo: Cambio de uso de suelo. Instituto de Investigaciones Sociales. UANL. Ed. Plaza y Valdés. Pp. 161-178

Vásquez, V; Chang, N. 1992. El riego: principios básicos, Tomo I. P 160.

Villanueva, H; Tovar R. 2021. Tipificación de los acuíferos del campo Mina, Nuevo León, utilizando sistemas de información geográfica. Scielo. Universidad Autónoma de Nuevo León.

Werner, J.1996. Introducción a la Hidrogeología, Linares Nuevo León, México pg, 1-15. Editado por la Dirección de Publicaciones de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

Wilson G. V.; Luxmoore R. J. 1998. Infiltration, macroporosity and mesoporosity distributions on two forested watersheds. Soil Sci. Soc. Am. J.; 52