



Universidad Michoacana de
San Nicolás de Hidalgo

Facultad de Ingeniería Civil



Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil

E F E C T O D E L C A M B I O D E U S O
D E S U E L O E N E L C I C L O
H I D R O L Ó G I C O D E L A
S U B C U E N C A L A S C R U C E S E N
L O S M U N I C I P I O S D E L A
H U A C A N A Y A R T E A G A

Presenta:

Alberto García Orozco
x

Asesor:

Dr. Jorge Alejandro Ávila Olivera

Tesis financiada por:



Morelia, Michoacan Agosto 2016

ÍNDICE

1. Introducción	10
1.1 Objetivo general.....	11
1.2 Objetivos específicos	11
2. Antecedentes.....	12
2.1 ¿Qué es el cambio en la cobertura/uso de suelo y cuáles son sus implicaciones en el ciclo hidrológico?	12
2.2 Cambio de uso de suelo en Michoacán	13
3. Área de Estudio.....	15
3.1 Localización.....	15
3.2 Acuíferos en la subcuenca Las Cruces	17
3.2.1 Acuífero Lázaro Cárdenas.....	18
3.2.2 Acuífero Playa Azul	18
3.2.3 Acuífero Ostula	18
3.2.4 Acuífero Apatzingán	19
3.3 Clima	19
3.3.1 Acuífero Lázaro Cárdenas.....	19
3.3.2 Acuífero Playa Azul	19
3.3.3 Acuífero Ostula	19
3.3.4 Acuífero Apatzingán	20
3.4 Hidrografía	20
3.4.1 Acuífero Lázaro Cárdenas.....	20
3.4.2 Acuífero Playa Azul	20
3.4.3 Acuífero Ostula	21
3.4.4 Acuífero Apatzingán	21
3.5 Recarga media anual.....	21
4. Metodología	23
4.1 Método empleando la NOM-011-CNA-2015	24
4.1.1 Materiales.....	25
4.1.1.1 Modelo Digital de Elevaciones	25
4.1.1.2 Información temática.....	26
4.1.1.3 Cobertura vegetal y uso de suelo.....	29
4.1.1.4 Información meteorológica.....	32
4.1.1.4.1 Análisis de datos meteorológicos	33
4.1.1.4.2 Llenado de datos faltantes	36

4.1.2 Precipitación.....	39
4.1.3 Evapotranspiración.....	41
4.1.4 Escurrimiento (NOM-011-CNA-2015)	45
4.1.4.1 Coeficiente de escurrimiento.....	45
4.1.5 Recarga (NOM-011-CNA-2015)	51
4.2 Método del USDA-SCS.....	53
4.2.1 Escurrimiento (USDA-SCS).....	53
4.2.2 Recarga (USDA-SCS)	57
4.3 Método empleando el Modelo de Témez	59
4.3.1 Escurrimiento (Modelo de Témez).....	60
4.3.2 Recarga (Modelo de Témez)	63
5. Resultados.....	67
5.1 Cambio de cobertura vegetal y uso de suelo	67
5.2 Efectos en la evapotranspiración	67
5.3 Efectos en el escurrimiento.....	68
5.4 Efectos en la recarga.....	71
5.5 Efectos en el ciclo hidrológico.....	74
6. Conclusiones.....	75
7. Rerefencias	76
8. Anexos	78

INDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 3. ÁREA DE ESTUDIO.

Figura 3.1. Macro-localización de la subcuenca Las Cruces, en el Estado de Michoacán.....	15
Figura 3.2. Micro localización de la subcuenca Las Cruces en el Estado de Michoacán.....	16
Figura 3.3. Acuíferos presentes en la subcuenca Las Cruces.	17

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA.

Figura 4.1. Metodología para calcular la recarga empleando la NOM-011-CNA-2015.	25
Figura 4.2. Modelo Digital del Elevaciones de la subcuenca Las Cruces.....	26
Figura 4.3. Edafología de la subcuenca Las Cruces.	27
Figura 4.4. Textura del suelo de la subcuenca Las Cruces.....	28
Figura 4.5. Litología de la subcuenca Las Cruces.....	29
Figura 4.6. Cobertura vegetal y uso de suelo en la subcuenca Las Cruces (época de 1996).	30
Figura 4.7. Cobertura vegetal y uso de suelo en la subcuenca Las Cruces (época reciente).	31
Figura 4.8. Estaciones meteorológicas ubicadas cerca de la subcuenca Las Cruces.	33
Figura 4.9. Polígonos de Thiessen para las estaciones meteorológicas consideradas.....	35
Figura 4.10. Curva masa doble para revisar la consistencia de la estación 16074.	36
Figura 4.11. Promedios mensuales de precipitación antes y después del llenado.....	39
Figura 4.12. Precipitación media mensual “septiembre” en la subcuenca Las Cruces.	40
Figura 4.13. Precipitación media anual en la subcuenca Las Cruces.	41
Figura 4.14. Evapotranspiración media del mes de septiembre en la subcuenca Las Cruces (época de 1996).....	44
Figura 4.15. Evapotranspiración media del mes de septiembre en la subcuenca Las Cruces (época reciente).....	45
Figura 4.16. Parámetro “K” de la subcuenca Las Cruces (época de 1996).	47
Figura 4.17. Parámetro “K” de la subcuenca Las Cruces (época reciente).	48
Figura 4.18. Coeficiente de escurrimiento anual de la subcuenca Las Cruces (época de 1996).	49
Figura 4.19. Coeficiente de escurrimiento de la subcuenca Las Cruces (época reciente).	49
Figura 4.20. Escurrimiento medio mensual del mes de septiembre en la subcuenca las Cruces (época reciente).....	50
Figura 4.21. Infiltración media mensual del mes de septiembre en la subcuenca las Cruces (época reciente).....	52
Figura 4.22. Recarga media mensual del mes de septiembre en la subcuenca las Cruces (época reciente).....	52
Figura 4.23. Metodología para el cálculo de la recarga natural.....	53
Figura 4.24. Número de curva (CN) para la subcuenca Las Cruces (época de 1996).	56
Figura 4.25. Número de curva (CN) para la subcuenca Las Cruces (época reciente).	56
Figura 4.26. Escurrimiento medio mensual del mes de septiembre en la subcuenca las Cruces (época reciente).....	57
Figura 4.27. Infiltración media mensual del mes de septiembre en la subcuenca las Cruces (época reciente).....	58
Figura 4.28. Recarga media mensual del mes de septiembre en la subcuenca las Cruces (época reciente).....	58
Figura 4.29. Esquema de flujos y almacenamiento del modelo de Témez.....	59
Figura 4.30. Uso de suelo para estimar Hmax en la subcuenca Las Cruces.	61
Figura 4.31. Litología para estimar Imax en la subcuenca Las Cruces.	64
Figura 4.32. Relación de la infiltración al acuífero con el excedente existente.....	65
Figura 4.33. Producción de escorrentía subterránea.	65

CAPÍTULO 5. RESULTADOS

Figura 5.1. Cambio de cobertura vegetal y uso de suelo en la subcuenca Las Cruces.	67
Figura 5.2. Variación mensual de la evapotranspiración en la subcuenca Las Cruces, entre las épocas de 1996 y reciente.	68
Figura 5.3. Variación mensual del escurrimiento en la subcuenca Las Cruces, entre las épocas de 1996 y reciente, empleando la NOM-011-CNA-2015.	69
Figura 5.4. Variación mensual del escurrimiento en la subcuenca Las Cruces, entre las épocas de 1996 y reciente, empleando el método del USDA-SCS.	70

Figura 5.5. Variación mensual del escurrimiento en la subcuenca Las Cruces en la época reciente, empleando el modelo de Témez.....	71
Figura 5.6. Variación mensual de la recarga en la subcuenca Las Cruces, entre las épocas de 1996 y reciente, empleando la NOM-011-CNA-2015.....	72
Figura 5.7. Variación mensual de la recarga en la subcuenca Las Cruces, entre las épocas de 1996 y reciente, empleando el método del USDA-SCS	73
Figura 5.8. Variación mensual de la recarga en la subcuenca Las Cruces en la época reciente, empleando el modelo de Témez.....	73

INDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 3. ÁREA DE ESTUDIO.

Tabla 3.1. Área de la subcuenca Las Cruces por municipio.....	17
Tabla 3.2. Área de los acuíferos en la subcuenca Las Cruces.....	18
Tabla 3.3. Disponibilidad media anual del agua subterránea en los acuíferos presentes en la subcuenca Las Cruces.....	22

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA.

Tabla 4.1. Superficies de cobertura vegetal y uso de suelo en la subcuenca Las Cruces (época de 1996).	30
Tabla 4.2. Superficies de cobertura vegetal y uso de suelo en la subcuenca Las Cruces (época reciente).	32
Tabla 4.3. Codificación de parámetros para la selección de estaciones meteorológicas.	34
Tabla 4.4. Codificación de parámetros para la selección de estaciones meteorológicas de la zona de estudio.	34
Tabla 4.5. Matriz de distancias euclidianas.	37
Tabla 4.6. Matriz del inverso de la distancia al cuadrado.	37
Tabla 4.7. Llenado de la estación 16074 "Los Panches".	38
Tabla 4.8. Coeficientes de desarrollo parcial.	43
Tabla 4.9. Temperatura media mensual de las estaciones seleccionadas.	43
Tabla 4.10. Evapotranspiración potencial de la estación 16074.	44
Tabla 4.11. Tipo y uso de suelo para determinar el parámetro k.	46
Tabla 4.12. Clases del suelo de acuerdo al USDA-SCS.	54
Tabla 4.13. Condiciones de cobertura.	55
Tabla 4.14. Números de curva empleados en la subcuenca Las Cruces.	55
Tabla 4.15. Valores aproximados de Hmax en función del uso de suelo (Estrela et al., 1999).	61
Tabla 4.16. Valores de Hmax en la subcuenca Las Cruces (época reciente).	62
Tabla 4.17. Valores aproximados de I _{max} en función de la litología del terreno (Estrela et al., 1999).	63
Tabla 4.18. Valores de I _{max} en la subcuenca Las Cruces (época reciente).	64
CAPÍTULO 5. RESULTADOS.	
Tabla 5.1. Efectos en el ciclo hidrológico en la subcuenca Las Cruces	74

Agradecimiento

Agradezco a toda mi familia por permitir llegar hasta este punto en mi vida profesional, por el amor y confianza que me brindaron en cada uno de los momentos que enfrente como estudiante, por su apoyo y absoluta constancia, a la cual debo tanto de lo que soy y tengo hoy en día; a todos ellos Papá, Mamá, a mis hermanos Eduardo y María Guadalupe por formar parte de mi vida, por estar siempre a mi lado y ser parte de lo que he sido, lo que soy y lo que seré.

De igual manera agradezco a mis amigos Lisandro, Leonel, Félix, Miguel y Jesús, con quienes he compartido tanto y quienes me han mostrado siempre su ayuda incondicional así como ánimos para seguir superándome tanto personal como profesionalmente. A todos mis compañeros de la licenciatura Rigoberto, Gabino, Jorge, Leonardo, y demás compañeros, con quien compartí alegrías y dolores de cabeza durante toda la carrera.

Agradezco con toda sinceridad a mi asesor de tesis Dr. Jorge Alejandro Ávila Olivera por ser un ejemplo a seguir, por ser guía en el campo del conocimiento, por su paciencia, objetividad y por aceptar ser un tutor y formar parte de mi vida académica.

Agradecer a cada uno de mis profesores por brindar su tiempo y conocimientos, así como su calidad como personas durante mi estancia en la Facultad de Ingeniería Civil. De igual manera agradecer al Consejo Estatal de Ciencia, Tecnología e Innovación del Estado de Michoacán CECTI-CONACYT por el apoyo otorgado.

Por último pero no menos importante agradezco el haber podido realizar mis estudios en la Facultad de Ingeniería Civil, perteneciente a la máxima casa de estudios en Michoacán, la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Resumen

A nivel estatal, Michoacán es uno de los estados de la República Mexicana con una de las tasas de deforestación más altas. La transformación en la cobertura vegetal y el uso del suelo que presentan los ecosistemas es preocupante. Las pérdidas de cobertura por deforestación son más altas en bosque y selvas, con una pérdida aproximada de 50 mil hectáreas por año. Estos cambios de cobertura identificados como patrones de deforestación tienen una importante influencia en el balance de agua y energía. A una escala regional afectan el funcionamiento de cuencas y su balance de aguas, es decir, una afectación en las entradas y salidas de agua al sistema.

Los principales problemas con las transiciones en las coberturas vegetales y usos de suelo, es el desmedido descontrol en el flujo de aguas, conocido como ciclo hidrológico. El crecimiento de áreas urbanas provoca un incremento en los volúmenes de escurrimiento natural, debido a que al incrementar las zonas impermeables el fluido en vez de infiltrarse como recarga natural, escurre de manera superficial. Cuya principal repercusión es una reducida o cada vez más escasa recarga de los mantos freáticos. Otro cambio importante en la circulación del agua en el ciclo hidrológico es el que corresponde a la evapotranspiración.

Más aún, cuando existe una reducción en la cobertura vegetal o uso de suelo asociado a un sobrepastoreo, existe mayor cantidad de agua expuesta a la radiación solar, provocando una creciente salida de agua del sistema mediante el proceso de evaporación. Lo anterior, ocasiona una reducción del volumen de recarga hacia los acuíferos.

En el estudio que a continuación se presenta se determina el escurrimiento, evapotranspiración y recarga para dos épocas distintas en la subcuenca Las Cruces – 1996 y reciente –. El Objetivo es estimar el efecto en el ciclo hidrológico a causa del cambio de cobertura vegetal y uso de suelo. Para identificar la cobertura vegetal y uso de suelo para la época de 1996 se interpretaron ortofotos de la zona de estudio, mientras que para la época reciente se descargaron imágenes de alta resolución del Google Earth.

Para estimar los volúmenes de escurrimiento y recarga en la subcuenca Las Cruces, se emplearon tres metodologías: la NOM-011-CNA-2015, la del USDA-SCS y el modelo agregado de simulación de balance continuo de pocos parámetros conocido como “Modelo de Témez”. Los resultados de las metodologías señaladas difieren entre sí y con el publicado en el Diario Oficial de la Federación. El método del USDA-SCS proporcionó el valor más elevado del escurrimiento en la época reciente (218.50 hm^3); mientras que para el caso de la recarga, con la NOM-011-CNA-2015 se obtuvo el mayor valor en la época reciente (284.48 hm^3). Independientemente de las diferencias entre las metodologías empleadas, los volúmenes de escurrimiento se incrementan en la época reciente, y por ende la recarga disminuye.

Palabras clave: cobertura vegetal, balance hídrico, escurrimiento, evapotranspiración, recarga natural.

Abstract

At the state level, Michoacan is one of the states of Mexico with rates highest deforestation. The transformation in the vegetation cover and land use presented ecosystems is worrisome. Cover losses from deforestation are highest in forests and jungles, with a loss of approximately 50 thousand hectares per year. These cover changes identified as deforestation patterns have an important influence on the balance of water and energy. At a regional level affect the functioning of watersheds and water balance, ie, an affection in the inputs and outputs of water to the system.

The main problems with transitions in vegetation cover and land use, is the excessive lack of control in the flow of water, known as the hydrologic cycle. The growth of urban areas causes an increase in the volumes of natural runoff, because by increasing the fluid impervious areas rather than infiltrate as natural recharge, drain superficially. Whose main impact is reduced or increasingly scarce groundwater recharge. Another important change in the circulation of water in the hydrological cycle is corresponding to evapotranspiration.

Moreover, when there is a reduction in vegetation cover or land use associated with overgrazing, there is more water exposed to solar radiation, causing an increased output of system water by evaporation process. This, results in a volume reduction recharge into aquifers.

In the study presented below runoff, evapotranspiration and recharge for two different periods it is determined in the sub-basin Las Cruces - 1996 and recent -. The objective is to estimate the effect on the hydrological cycle because of the change of vegetation and land use. To identify vegetation cover and land use for the period 1996 orthophotos of the study area were interpreted, while for the recent era of high-resolution images were downloaded Google Earth.

To estimate the volume of runoff and recharge in the subbasin Las Cruces, three methodologies were used: NOM-011-CNA-2015, the USDA-SCS and model simulation of continuous aggregate balance of few parameters known as "Model Témez". The results of the aforementioned methods differ and with that published in the Official Journal of the Federation. The USDA-SCS method provided the highest value of runoff in recent times (218.50 hm^3); while in the case of recharge with NOM- 011- CNA- 2015 the highest value in recent times (284.48 hm^3) was obtained. Regardless of the differences between the methodologies used, the runoff volumes are increased in the recent period, and thus recharge decreases.

Keywords: vegetation cover, water balance, runoff, evapotranspiration, natural recharge.

1. Introducción

La mayor parte de los cambios ocurridos en ecosistemas terrestres se deben a la conversión en la cobertura de terreno e intensificación en el uso del terreno (Lambin, 1997). Estos procesos pueden englobarse en lo que se conoce como deforestación o degradación forestal, se asocian a impactos ecológicos en prácticamente todas las escalas; regionalmente afectan el funcionamiento de cuencas hidrográficas.

México es uno de los países con más recursos forestales a nivel mundial. Sus bosques, selvas y otras áreas, comprenden áreas con vegetación natural, ocupando aproximadamente 74% del territorio nacional, es decir, 1 millón 461 mil km². Esta superficie alberga la mayor parte de la biodiversidad del país (Falcón, 2014).

Muchos han sido los estudios para cuantificar las cantidades en los cambios de vegetación en el país, todos convergen en la deforestación abrumadora en dicha cobertura. El inventario Nacional Forestal de 1994 determinó que entre finales de la década de los setenta y principios de los noventa, se deforestaron alrededor de 22.2 millones de hectáreas. De este modo se estimó que el 29% de las selvas y el 11% de los bosques templados sufrían períodos de deterioro (Merino, 2003; Sorani et al., 1993). Nuestro país está entre los países con mayor deforestación a nivel mundial; para inicios de los años noventa se perdían anualmente 720,000 ha de bosques, selvas y vegetación semiárida (Masera et al., 1997). Para el mismo periodo, la restauración de áreas forestales alcanzó menos de 60,000 ha/año. Estos patrones de deforestación varían notablemente por regiones; cerca del 80% se concentra en las regiones del centro y sur del país (Masera, 1996).

Aunado a las cifras anteriores, se sabe que el cambio de uso de suelo en México, comúnmente se presenta tanto en bosques templados como en tropicales, generado por la expansión en la frontera agrícola. En general, los cambios de uso de suelo han sido provocados por diversos factores dentro de los que se puede resaltar la implementación de políticas gubernamentales que incluyen incentivos fiscales, discontinuidad de impuestos, subsidios y concesiones de tierra y madera, la construcción de infraestructura de comunicaciones y transportes, así como programas oficiales de apoyo para el desmonte en favor de la ganadería y la agricultura (Falcón, 2014).

En Michoacán es donde se presentan las tasas de deforestación más altas por pérdidas de bosques y selvas con más de 50 mil hectáreas por año para la estimación baja (Bocco et al., 2001). También se debe considerar que la conservación y buen uso de los ecosistemas forestales se traduce en beneficios que representan servicios ambientales, como son, la preservación de los recursos agua y suelo a través de la captación de agua y recarga de acuíferos, la regulación del clima, la captura de carbono y generación de oxígeno, la conservación del hábitat natural, la fertilidad y diversidad biológica, la recreación y belleza escénica, entre otros (Flores-Sánchez, 2010).

El aumento de las superficies impermeables (pavimentos) disminuye sensiblemente la evapotranspiración a la par que propicia la generación de escorrentía y una disminución en la recarga. El regadío conlleva un aumento notable de la evapotranspiración y, por ende, una reducción de los recursos de la cuenca (Gallard, 2007). En sí, los procesos de urbanización modifican la dinámica natural del agua de manera drástica: una porción considerable del suelo es removida y/o compactada y cubierta por superficies impermeables, lo que provoca que la infiltración y la evaporación prácticamente

desaparezcan y la mayoría del agua se pierda como escorrentía; finalmente, el agua de lluvia que llega al pavimento y a los suelos es recolectada y sacada fuera de las ciudades mediante redes de conducción establecidas para evitar inundaciones. A su vez, las ciudades “importan” agua para satisfacer las necesidades de sus habitantes. Esta agua traída desde cauces, lagos o pozos se trata y almacena para después conducirla a las zonas de consumo para finalmente ser eliminada como aguas servidas. En la gran mayoría de los casos el agua es devuelta con o sin tratamiento al sistema hidrológico “natural” en un estado muy diferente a aquel en que originalmente fue extraída (INECC, 2002).

Finalmente, si bien es cierto que se han logrado grandes avances en materia forestal en los últimos años, aún existe una gran diferencia entre la superficie deforestada y reforestada, por lo que el balance en estos términos continua siendo negativo (Flores-Sánchez, 2010).

1.1 Objetivo general

- Estimar el efecto en el ciclo hidrológico de la subcuenca Las Cruces en los municipios de La Huacana y Arteaga, a causa del cambio de uso del suelo.

1.2 Objetivos específicos

- Determinar el cambio de uso de suelo en la época de 1996 y reciente en la subcuenca Las Cruces, en los municipios de La Huacana y Arteaga.
- Determinar la precipitación media en la subcuenca Las Cruces, en los municipios de La Huacana y Arteaga.
- Estimar la evapotranspiración potencial que se presenta en la subcuenca Las Cruces en los municipios de La Huacana y Arteaga, antes y después del cambio de uso de suelo.
- Determinar el escurrimiento superficial para las épocas de 1996 y reciente, en la subcuenca Las Cruces en los municipios de La Huacana y Arteaga, antes y después del cambio de uso de suelo.
- Estimar la recarga que se presenta en la subcuenca Las Cruces en los municipios de La Huacana y Arteaga, antes y después del cambio de uso de suelo.

2. Antecedentes

2.1 ¿Qué es el cambio en la cobertura/uso de suelo y cuáles son sus implicaciones en el ciclo hidrológico?

En las últimas décadas el cambio de uso de suelo se ha constituido como uno de los factores plenamente implicados en el cambio global, los ecosistemas terrestres han sufrido grandes transformaciones, la mayoría debido a la conversión de la cobertura del terreno y a la degradación e intensificación del uso de suelo. Estos procesos usualmente englobados en lo que se conoce como deforestación o degradación forestal, se asocian a impactos ecológicos importantes en casi todas las escalas (Bocco et al., 2001).

Para comprender este tipo de procesos se debe tener clara diferencia entre términos, así bien la cobertura son aquellas superficies naturales que cubren el suelo, y que pueden ser tanto de origen natural (bosques, selvas, sabanas, lagunas, etc.), como a partir de ambientes artificiales creados y mantenidos por el hombre (Falcón, 2014).

El uso de suelo resulta de los asentamientos y las actividades productivas que se desarrollan sobre la cobertura del suelo para satisfacer las necesidades antrópicas (cultivos, ciudades, represas, etc). Las características del uso del suelo son el resultado de la interrelación entre los factores físicos o naturales y los factores culturales o humanos (Falcón, 2014).

Como muchos países tropicales, México presenta importantes procesos de cambio de cobertura/uso del suelo, los cuales se han presentado desde tiempos precolombinos, sin embargo, durante las últimas cinco décadas se ha incrementado dramáticamente con un panorama poco alentador, ya que dentro de casi dos millones de kilómetros cuadrados de superficie se observan una gran cantidad de cambios que en general están por arriba de la media mundial en cuanto a tasas de deforestación, incremento de las áreas de cultivo y pastoreo, expansión urbana y muchos otros (Mas et al., 2004).

Por otro lado, el incremento poblacional que se ha presentado en las últimas décadas, así como la demanda de recursos naturales para satisfacer las necesidades de supervivencia de la población y, las formas y mecanismos de apropiación de los recursos, constituyen una guía útil para la toma razonable de decisiones sobre el uso del territorio (Falcón, 2014).

El cambio de uso de suelo no es exclusivo de México sino que se presenta a una escala global, lo que ha provocado una disminución anual de 8.9 millones de hectáreas de bosques y selvas durante la última década del siglo XX (Nájera et al., 2010). La FAO, estima la existencia de bosques en el mundo en aproximadamente cuatro mil millones de hectáreas, con una tasa de deforestación de 13 millones de ha/año. En contra parte, las plantaciones forestales, la restauración del paisaje y la expansión natural de la vegetación se estima en 5.2 millones de ha/año, con una tendencia a la disminución desde la década de los 90's. (Nájera et al., 2010).

Los cambios de usos y coberturas del suelo tienen implicaciones medioambientales significativas, como los impactos directos de la degradación del suelo, alteración de la escorrentía superficial o la disminución de agua en el subsuelo. Además, estos cambios tienen una importante influencia en el balance de agua y energía. Las coberturas del suelo determinan la aspereza superficial, el albedo y, el flujo de calor latente y sensible. Por lo tanto, los cambios en la distribución de las coberturas del suelo altera el balance

regional y posiblemente global de estos flujos. Estos cambios son parámetros importantes para los modelos de circulación general. El flujo de calor latente, por ejemplo, está mediado por la evapotranspiración. La Evapotranspiración Real (ETR) está en función del tipo de cobertura del suelo, de la humedad del suelo y, del clima (Peña, 2007).

La ETR es una función de toda la planta y los potenciales hídricos del xilema, área foliar y cierre de los estomas, profundidad de las raíces y, la estructura del dosel a lo largo del continuo suelo-planta-atmósfera. El uso del agua y la ETR varían espacialmente a lo largo de diferentes ecosistemas y, temporalmente cuando una cobertura del suelo se convierte en otra (Peña, 2007).

Los cambios de coberturas del suelo, por lo tanto, pueden activar cambios en el ciclo hidrológico (Peña, 2007). El ciclo hidrológico describe la circulación sin fin del agua en la Tierra. Este proceso es generado por dos causas: la primera, el sol que proporciona la energía para elevar el agua como vapor en el proceso de evaporación; la segunda, la gravedad terrestre, que hace que el agua condensada descienda como procesos de precipitación y escorrentamiento.

A pesar de que el volumen total de agua en el ciclo hidrológico permanece constante, su distribución y calidad está cambiando continuamente sobre los continentes, en regiones y, dentro de las propias cuencas. Esto quiere decir que la hidrología de una región está determinada por sus patrones de tiempo atmosférico cuyo comportamiento promedio define el clima y, por sus factores físicos como son la topografía, geología, vegetación. Por otra parte, las actividades humanas originan cambios y alteraciones al ciclo hidrológico (Heredia, 2011).

Por lo anterior, es prioritario conocer con precisión el funcionamiento hídrico y sus balances de agua en una determinada zona de interés. La regulación del uso del agua es una necesidad en la época actual, y conviene adaptar el ambiente (usos de suelo) para favorecer los procesos que faciliten su infiltración, encauzamiento y regulación de escorrentía, así como la recarga de acuíferos (Peña, 2007).

2.2 Cambio de uso de suelo en Michoacán

El Estado de Michoacán cuenta con casi 60,000 km²; ha sufrido intensos cambios de uso de suelo durante las últimas décadas. Sus tasas de deforestación están entre las más altas de México y Latinoamérica (Bocco et al., 2001).

En zonas templadas, la vegetación natural incluye al bosque mixto, representado por los siguientes tipos de vegetación: bosque de abetos, bosque de pinos, bosque de pino-encino, bosque de encino. En zonas cálido-secas el tipo de vegetación dominante es la selva baja caducifolia. La vegetación trasformada incluye los pastizales inducidos, los pastizales cultivados, el matorral secundario y el bosque cultivado (Bocco et al., 2001).

Para estimar el cambio de uso de suelo en Michoacán se realizó una interpretación de imágenes satelitales; se obtuvieron dos mapas de cobertura, una para los años setenta y la otra para los años noventa. En los años setenta se identificaron nueve clases de cobertura y para los años noventa 11. Las dos nuevas clases para los años noventa corresponden a bosques abiertos y selvas abiertas. La delimitación de las clases abiertas correspondió a aquellas zonas donde se presentaba menos del 50% de cobertura. De acuerdo con esto en los años setenta el 60% de la cobertura del estado correspondía a bosques templados y a selvas bajas caducifolias, mientras que en 1993

estas clases se redujeron en alrededor de 13%. Adicionalmente, 20% de bosques y selvas sufrieron un proceso de degradación, es decir, pasaron de bosques y selvas cerrados a bosques y selvas abiertos. Si se considera a los bosques abiertos simplemente como cobertura no forestal, la deforestación en el periodo alcanzaría el 33%. La disminución de bosques y selvas en el estado es de 513,644 y 308,292 ha respectivamente, en el periodo señalado (Bocco et al., 2001).

La tasa de deforestación estatal calculada considerando un periodo de 18 años (1975-1993) señala que los bosques pierden 1.8% de su superficie anualmente, mientras que las selvas presentan tasas de deforestación de 1% anual. De los 113 municipios que conforman la entidad, 106 sufrieron cambio de bosque y, 41 sufrieron cambio de selva durante este periodo. En valores absolutos, los municipios con mayor cambio de bosque corresponden a Coalcomán, Madero, Tiquicheo, Arteaga, Aquila y, Contepec (con pérdidas entre 20,000 y 45,000 ha). Por su parte, los municipios con mayor pérdida de selva son Turicato, Carácuaro, L. Cárdenas, Huetamo, La Huacana y Nocupéitaro (entre 22,000 y 66,000 ha) (Bocco et al., 2001).

3. Área de Estudio

3.1 Localización

La zona de estudio es la subcuenca Las Cruces; se localiza dentro de la Región Hidrográfica número 18 denominada Balsas. Con coordenadas del punto de salida 18° 48' 59'' latitud norte y 102° 06' 39'' longitud oeste, a una altura de 157 msnm. Comprende parte de los municipios de Tumbiscatío, Apatzingán, La Huacana y Arteaga.

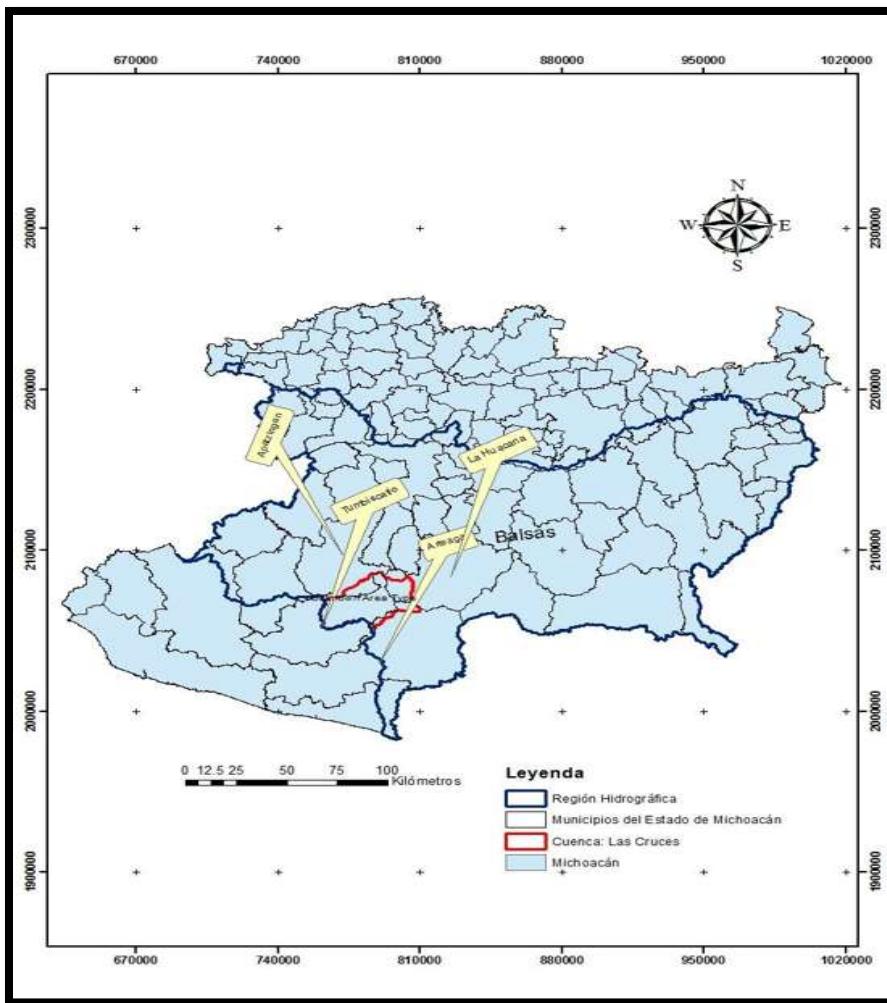


Figura 3.1. Macro-localización de la subcuenca Las Cruces, en el Estado de Michoacán.

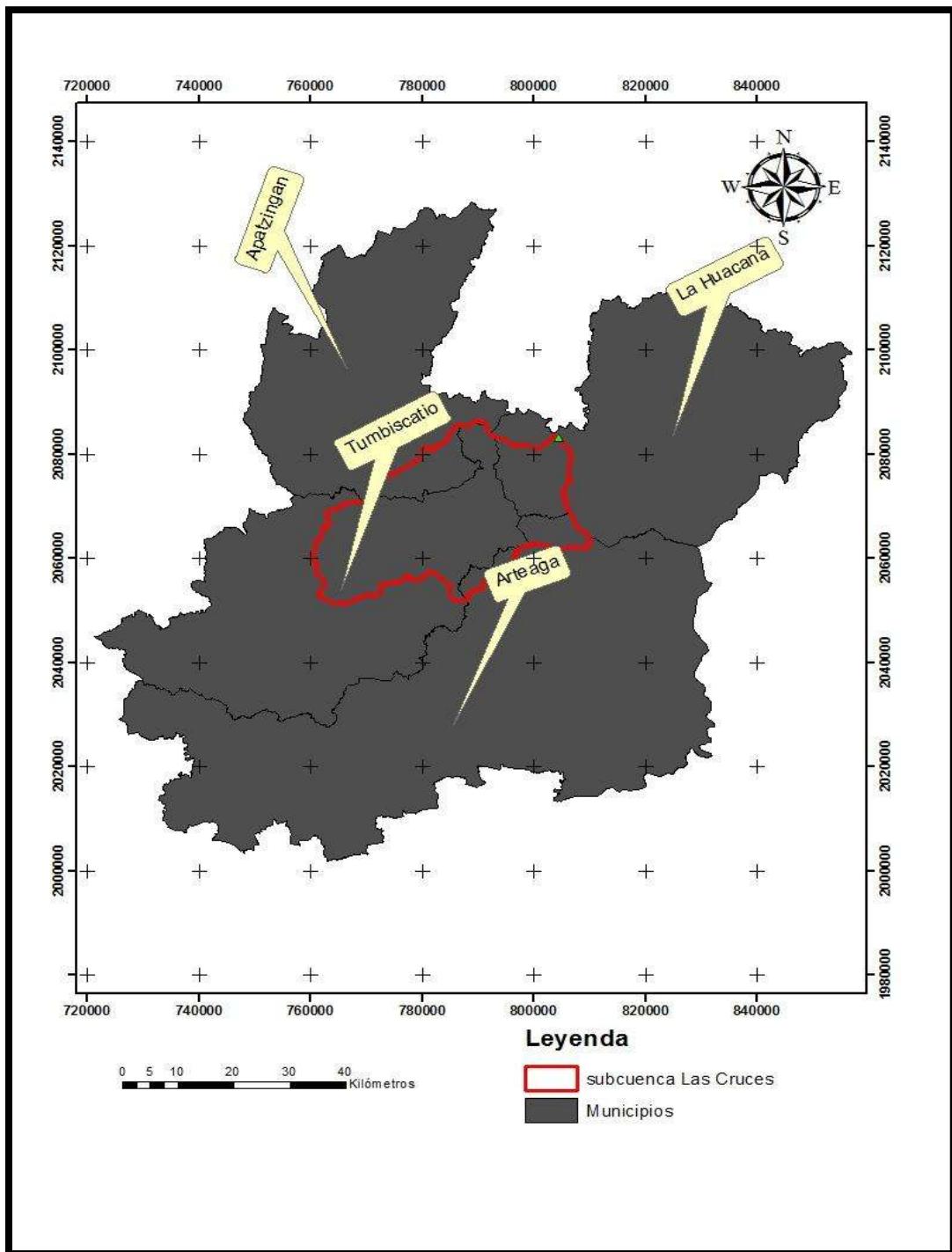


Figura 3.2. Micro localización de la subcuenca Las Cruces en el Estado de Michoacán.

Tabla 3.1. Área de la subcuenca Las Cruces por municipio.

Municipio	Área (km ²)	Área (%)
Apatzingán	122.98	11.96
La Huacana	163.83	15.93
Tumbiscatío	644.77	62.69
Arteaga	96.87	9.42
Total	1,028.45	100.00

En la tabla 3.1 se observa que el municipio de Tumbiscatío posee mayor porcentaje de área de la subcuenca con el 62.69%; seguido por La Huacana, Apatzingán y Arteaga.

3.2 Acuíferos en la subcuenca Las Cruces

En lo que respecta a los acuíferos, la subcuenca Las Cruces está cubierta por cuatro de ellos: Playa Azul, Lázaro Cárdenas, Apatzingán y Ostula (Figura 3.4).

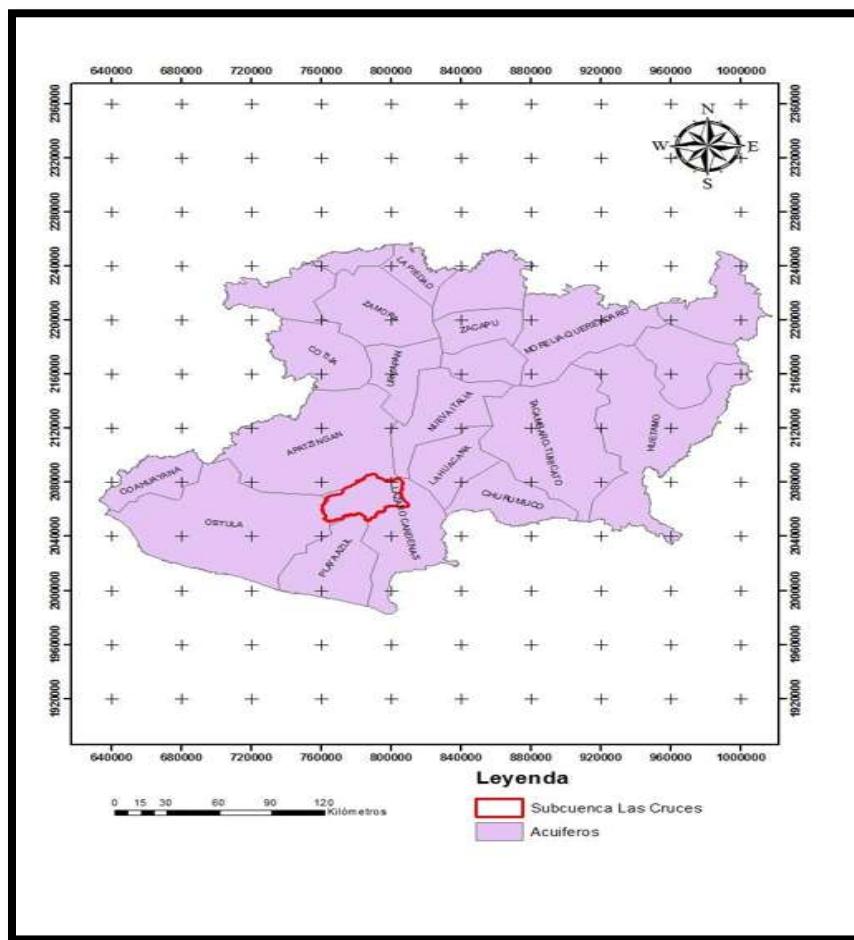


Figura 3.3. Acuíferos presentes en la subcuenca Las Cruces.

Tabla 3.2. Área de los acuíferos en la subcuenca Las Cruces.

Región	Clave Acuífero	Nombre del acuífero	Área completa (km ²)	Área (%) (km ²) en la subcuenca Las Cruces
Balsas	1618	Playa Azul	2,369.10	0.25
Balsas	1617	Lázaro Cárdenas	3,706.69	98.74
Balsas	1620	Apatzingán	5,688.72	0.43
Lerma-Santiago-Pacífico	1619	Ostula	6,598.00	0.58

En la tabla 3.2 se observa que el acuífero Lázaro Cárdenas posee mayor porcentaje de área de la subcuenca con el 98.74%; seguido por Ostula, Apatzingán y Playa Azul.

3.2.1 Acuífero Lázaro Cárdenas

El acuífero Lázaro Cárdenas, definido con la clave 1617 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo del Agua Subterránea (SIGMAS) de la CONAGUA, se localiza en la porción sur del estado de Michoacán, cubriendo una superficie de 3,689 km², entre las coordenadas 17° 54' y 18° 52' de latitud norte y los meridianos 101° 51' y 102° 33' de longitud oeste. Colinda al Norte con los acuíferos Apatzingán, Nueva Italia y La Huacana, al Oeste con Ostula y Playa Azul, estos acuíferos dentro del estado de Michoacán; al Este con los acuíferos Churumuco de Michoacán y Coahuayutla, La Unión y El Naranjito del estado de Guerrero; al Sur con el Océano Pacífico (CONAGUA, 2010).

3.2.2 Acuífero Playa Azul

El acuífero Playa Azul, definido con la clave 1618 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo del Agua Subterránea (SIGMAS) de la CONAGUA, se localiza en la porción sur del estado de Michoacán, cubriendo una superficie de 2,361 km², entre las coordenadas 17° 58' y 18° 35' de latitud norte y los meridianos 102° 14' y 102° 46' de longitud oeste. Colinda al Norte y Este con el acuífero Lázaro Cárdenas, al Oeste con Ostula y al Sur está delimitado por la línea de costa del Océano Pacífico (CONAGUA, 2010).

3.2.3 Acuífero Ostula

El acuífero Ostula, definido con la clave 1619 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo del Agua Subterránea (SIGMAS) de la CONAGUA, se localiza en la región Sur del estado de Michoacán, entre las coordenadas 18° 00' y 19° 00' de latitud Norte y los meridianos 102° 25' y 103° 45' de longitud Oeste, abarcando una superficie de 6,574 km² (CONAGUA, 2010).

3.2.4 Acuífero Apatzingán

El acuífero Apatzingán, definido con la clave 1620 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo del Agua Subterránea (SIGMAS) de la CONAGUA, se localiza en la región Este del estado de Michoacán, entre las coordenadas 18° 42' y 19° 27' de latitud Norte y los meridianos 102° 06' y 103° 08' de longitud Oeste, abarcando una superficie de 5,656.09 km² (CONAGUA, 2010). Limita al Norte con los acuíferos Cotija y Uruapan, al Este con el acuífero Nueva Italia, al Sur con los acuíferos Lázaro Cárdenas, Playa Azul y Ostula.

3.3 Clima

3.3.1 Acuífero Lázaro Cárdenas

Para el análisis climatológico se utilizó la información de la estación climatológica "Lázaro Cárdenas", que cuenta con registros para el periodo 1970-2005. De acuerdo con los datos de dicha estación, la temperatura media anual en la zona costera del acuífero es de 27.6°C, los meses más calurosos se presentan de mayo a octubre. La precipitación media anual en la parte costera es de 1,374 mm/año. El periodo de lluvias se presenta en los meses de junio a septiembre con un promedio de 285.1 mm/mes; sin embargo, se presentan 7 largos meses de bajas precipitaciones y en algunos no se presentan lluvias. La evaporación media anual es de 1,775.7 mm/año (CONAGUA, 2010).

3.3.2 Acuífero Playa Azul

Para el análisis climatológico se utilizó la información de las estaciones climatológicas 16013 "Caleta de Campos" y 16151 "Arteaga" (CFE), que cuentan con registros para el periodo 1961-1984 y 1957-2000, respectivamente. De acuerdo con estos datos, la temperatura media anual en la zona costera del acuífero es de 27.3 °C; los meses más calurosos se presentan de mayo a octubre. Hacia la parte alta del acuífero la temperatura media es de 22.4 °C. La precipitación media anual para la región costera es de 1,146.4 mm/año. El periodo de lluvias se presenta en los meses de junio a septiembre con un promedio de 215.4 mm/mes, sin embargo, se presentan 7 largos meses de bajas precipitaciones y en algunos no se presentan lluvias. El periodo de estiaje se presenta de los meses de octubre a mayo con una lámina promedio de 17.5 mm/mes. En cuanto al valor de la evaporación potencial, su promedio anual es de 1,557.5 mm/año (CONAGUA, 2010).

3.3.3 Acuífero Ostula

Para el análisis climatológico se utilizó la información de las estaciones climatológicas 16112 "San Juan de Lima", ubicada en la porción norte; 16154 "Coalcomán", localizada en la zona serrana y; 16208 "El Chacán", localizada en la porción costera; que cuentan con registro para el periodo 1969-1985, 1960-1989 y 1980-2000, respectivamente.

De acuerdo con los datos de dichas estaciones, la temperatura media anual en la zona costera del acuífero es de 26 °C (estación San Juan de Lima), los meses más calurosos se presentan de mayo a octubre. Hacia la parte alta del acuífero la temperatura media es de 23 °C (estación Coalcomán). La precipitación media anual del acuífero en la

región costera es de 1,032 mm/año, considerando los valores de la estación climatológica San Juan de Lima; en esta región del acuífero el periodo de lluvias se presenta en los meses de junio a septiembre con un promedio de 164 mm/mes. Al noreste del acuífero en la zona serrana, la lámina media anual de precipitación es de 1,397 mm/año, el periodo lluvioso se presenta en los meses de junio a octubre con un promedio de 256 mm/mes, el periodo de estiaje ocurre de noviembre a mayo con una lámina promedio de 31.75 mm/mes. En cuanto al valor de la evaporación potencial, su promedio anual es de 1,526 mm/año (CONAGUA, 2010).

3.3.4 Acuífero Apatzingán

Para el análisis climatológico se utilizó la información de las estaciones climatológicas 16090 “Piedras Blancas”, ubicada en la porción Noroeste de Michoacán y; 16074 “Los Panches”, localizada en la parte Norte de Michoacán; que cuentan con registro para el periodo 1963-2000, 1964-1999, respectivamente.

De acuerdo los datos de dichas estaciones, la temperatura media anual es del orden de 27 °C y su extrema es mayor a 40 °C, presentándose durante los meses de mayo y junio. La precipitación media anual registrada en la región es del orden de 800 mm, ocurriendo su mayor incidencia en los meses de junio, julio y agosto (CONAGUA, 2002).

3.4 Hidrografía

3.4.1 Acuífero Lázaro Cárdenas

El acuífero pertenece a la Región Hidrológica No. 18 denominada Balsas; cuenca del Río Balsas, también conocida como Depresión del Balsas. Su litología y estructura es muy variada y compleja. Dentro de esta Región Hidrológica se encuentran las cuencas del Río Balsas-Zirándaro, Río Balsas-Infiernillo, Río Cutzamala, Río Tacámbaro, Río Tepalcatepec-Infiernillo y la del Río Tepalcatepec. El acuífero se encuentra ubicado dentro de las Cuencas Río Balsas-Infiernillo y Río Tepalcatepec-Infiernillo.

En la zona del acuífero se encuentran varias corrientes, tanto intermitentes como perennes. El principal afluente es el río Balsas, el cual sirve de límite estatal entre los Estados de Michoacán y Guerrero. Otros ríos que se encuentran en la región son el río Chuta y el río Habillal, además de los arroyos Colomo y Verde y, la presa José María Morelos (CONAGUA, 2010).

3.4.2 Acuífero Playa Azul

El acuífero pertenece a la Región Hidrológica 17 denominada “Costa de Michoacán”, la cual se encuentra ubicada totalmente dentro de la entidad y comprende las corrientes que están situadas entre los ríos Coahuayana y Mezcalá que desembocan al Océano Pacífico. Pertenece a la Cuenca Hidrológica Río Nexpe y otros. Dentro de los límites del acuífero se presentan varias corrientes de agua tanto intermitentes como perennes. Uno de los ríos más importantes es el Toscano, que inicia su recorrido en la zona serrana a la altura del poblado Tumbiscatío, a partir de donde confluyen a él varias corrientes por su margen derecha siguiendo una dirección hacia la costa, hasta su desembocadura en el poblado Chuta.

3.4.3 Acuífero Ostula

El acuífero pertenece a la Región Hidrológica 17 denominada “Costa de Michoacán”, la cual se encuentra ubicada totalmente dentro de la entidad. A nivel de cuenca, se encuentra dentro de las Cuencas Hidrológicas Río Nexpa y otros y, Río Cachán o Coalcomán y otros.

El acuífero Ostula cuenta con un gran número de corrientes tanto intermitentes como perennes, dos de las principales corrientes de agua son el arroyo Coalcomán y el río Nexpa; el primero nace al norte del acuífero con el nombre de arroyo Yerbabuena, aguas abajo al pasar por la localidad Maruatilla adquiere el nombre de arroyo Coalcomán y desemboca al Océano Pacífico en la localidad Cachán de Echeverría. El Río Nexpa nace en la localidad del Varaloso donde se le conoce con el mismo nombre; en su trayectoria pasa por las poblaciones Chapula, El Naranjo, El Parotal, Totopan, finalmente culmina su trayectoria en la localidad de Nexpa, al desembocar al Océano Pacífico (CONAGUA, 2010).

3.4.4 Acuífero Apatzingán

El acuífero pertenece a la Región Hidrológica 18 denominada “Balsas”, la cual se encuentra ubicada totalmente dentro de la entidad. A nivel de cuenca, el acuífero se encuentra ubicado dentro de las Cuencas Río Apatzingán, Río Tepalcatepec y Arroyo Tepalcatepec. Existen dos ríos principales: el río Tepalcatepec o Grande y el río Márquez; el primero corre de Oeste a Este y el segundo de Norte a Sur, descargando ambos sus aguas en la presa Infiernillo.

En la zona de estudio se localizan las presas derivadoras Piedras Blancas, El Llano, Las Burras, y las presas de almacenamiento Chilatan y Los Olivos (CONAGUA, 2015).

3.5 Recarga media anual

La disponibilidad media anual del agua subterránea para los acuíferos está descrita en la tabla 3.3 (CONAGUA, 2010). Cabe mencionar que los valores presentados son para el acuífero completo.

Tabla 3.3. Disponibilidad media anual del agua subterránea en los acuíferos presentes en la subcuenca Las Cruces.

CLAVE	ACUÍFERO	R	DNCOM	VCAS	VEXTET	DAS	DÉFICIT
		CIFRAS EN MILLONES DE METROS CÚBICOS ANUALES					
1617	LÁZARO CÁRDENAS	38.2	19.5	14.83	12.8	3.86	0
CLAVE	ACUÍFERO	R	DNCOM	VCAS	VEXTET	DAS	DÉFICIT
		CIFRAS EN MILLONES DE METROS CÚBICOS ANUALES					
1618	PLAYA AZUL	34.1	19.6	2.37	8.4	12.13	0
CLAVE	ACUÍFERO	R	DNCOM	VCAS	VEXTET	DAS	DÉFICIT
		CIFRAS EN MILLONES DE METROS CÚBICOS ANUALES					
1619	OSTULA	7.4	2.9	4.55	2.2	0	-0.05
CLAVE	ACUÍFERO	R	DNCOM	VCAS	VEXTET	DAS	DÉFICIT
		CIFRAS EN MILLONES DE METROS CÚBICOS ANUALES					
1620	APATZINGÁN	494.4	94.6	273.56	229.8	126.23	0

R: recarga media anual.

DNCOM: descarga natural comprometida.

VCAS: volumen concesionado de agua subterránea.

VEXTET: volumen de extracción de agua subterránea consignado en estudios técnicos.

DAS: disponibilidad media anual de agua subterránea.

Las definiciones de estos términos son las contenidas en la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2015 en los capítulos número “3 definiciones” y “4 especificaciones”.

Para el acuífero Lázaro Cárdenas se tiene una recarga estimada de 38.2 Mm³/año, equivale a poco más del 90% de agua de infiltración vertical y el resto por flujo horizontal (CONAGUA, 2010).

En el caso del Acuífero Playa Azul presenta una recarga estimada de 34.1 Mm³/año, equivale a poco más del 95% de agua de infiltración vertical y el resto por flujo horizontal (CONAGUA, 2010).

En el acuífero Ostula se estima un recarga de 7.4 Mm³/año, equivale a poco más del 85% de agua de infiltración vertical y el resto por flujo horizontal (CONAGUA, 2010). Este acuífero presenta un déficit.

Para el acuífero Apatzingán se estima una recarga de 494.4 Mm³/año, cerca del 45% de agua por infiltración vertical y el resto por flujo horizontal (CONAGUA, 2002).

4. Metodología

Para determinar el efecto del cambio de uso de suelo en el ciclo hidrológico de la subcuenca Las Cruces, se realizó una comparación de la recarga de los mantos freáticos en dos épocas distintas (1996 y reciente), para determinar la recarga se siguió el principio en el cual se basa el balance hidrológico.

El balance hídrico se basa en la aplicación del principio de la conservación de la masa; establece que para un volumen arbitrario y un determinado periodo de tiempo, la diferencia entre las entradas y salidas está condicionada por la variación del volumen de agua almacenada (Rosales, 2012). En el caso del agua subterránea las entradas y salidas corresponden a la recarga y descarga totales, la diferencia entre ambas es el cambio de almacenamiento de una unidad hidrogeológica.

El balance hidrológico es la relación de los procesos de precipitación, evapotranspiración, escurrimiento, infiltración, recarga, que permite determinar la disponibilidad de agua tanto superficial en una cuenca hidrográfica, como subterránea en una unidad hidrogeológica. Además, dicho balance es fundamental para la gestión del agua en el espacio y en el tiempo, a partir de él es posible realizar una evaluación cuantitativa de los recursos de agua y sus modificaciones por influencia de las actividades del hombre (Rosales, 2012).

La ecuación general del balance hidrológico de acuerdo a la ley de la conservación de la masa es la siguiente:

$$\text{Entradas (E)} - \text{Salidas (S)} = \text{Cambio de almacenamiento}$$
$$\Delta VS = \pm A_B * h_N * S$$

Donde:

ΔVS : Cambio de almacenamiento.

A_B : Área del balance hidrológico.

h_N : Evolución regional promedio del nivel estático relativa al intervalo de análisis y superficie considerada.

S : Coeficiente de almacenamiento.

a) Entradas

a.1 Recarga Natural o Vertical (Rn). La principal fuente de recarga es la precipitación a través del proceso de la infiltración. Sin embargo es uno de los términos que mayor incertidumbre se tiene en su determinación. Estas entradas son muy difíciles de determinar dado que dependen de una cantidad considerable de factores que intervienen en el proceso de infiltración del agua hacia el acuífero.

a.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh). Estas aportaciones al acuífero son producto del flujo subterráneo, provenientes de acuíferos vecinos. El flujo que se abre paso a través de los poros, grietas o fracturas de las rocas. Este gasto queda definido por la ecuación de continuidad de Darcy, el cual depende de la transmisibilidad (T), el gradiente hidráulico (i) y el espesor de los canales del flujo (b).

$$Q = T i b$$

b) Salidas

b.1 Salidas por Evapotranspiración (ETR). La Evapotranspiración representa el agua liberada del suelo a la atmósfera debido a la combinación de la evaporación y transpiración de las plantas, por lo tanto es considerada una pérdida de humedad del sistema.

b.2 Bombeo (Sb). El bombeo representa el agua liberada de una unidad hidrogeológica mediante la extracción del recurso hídrico. Se determina a partir de las lecturas registradas en los medidores instalados en las descargas de los pozos o, a falta de ellos, con base en los métodos indirectos: caudal y tiempo de bombeo, consumo de energía eléctrica, población servida y dotación, índices de consumo, superficies y láminas de riego que sean aplicables según el uso del agua.

b.3 Flujo Subterráneo horizontal (Sfs). La descarga subterránea del acuífero se determina aplicando la Ley de Darcy a las secciones de salida definidas en la configuración de los niveles del agua subterránea, considerando las variaciones de ésta a lo largo del intervalo de tiempo usado en el balance.

El balance hidrológico depende en parte de la cobertura y uso de suelo, ya que tienen influencia en los procesos de evapotranspiración, escurrimiento, infiltración y recarga. Por ejemplo, las zonas boscosas cubiertas en su mayoría, retienen más lámina de lluvia que las zonas de pastizales, dando como resultado que dichas zonas boscosas tengan mayor capacidad de infiltración que los pastizales. Por otro lado, las coberturas de carácter perenne presentan menores índices de evapotranspiración, en comparación con cultivos temporales. De esta forma el balance puede verse afectado por los cambios de cobertura y uso de suelo. Por tal motivo en este trabajo se analizaron las coberturas y usos de suelo para dos épocas distintas (1996 y reciente).

4.1 Método empleando la NOM-011-CNA-2015

En la figura 4.1 se muestra la metodología que se siguió para encontrar la recarga del agua subterránea empleando la NOM-011-CNA-2015.

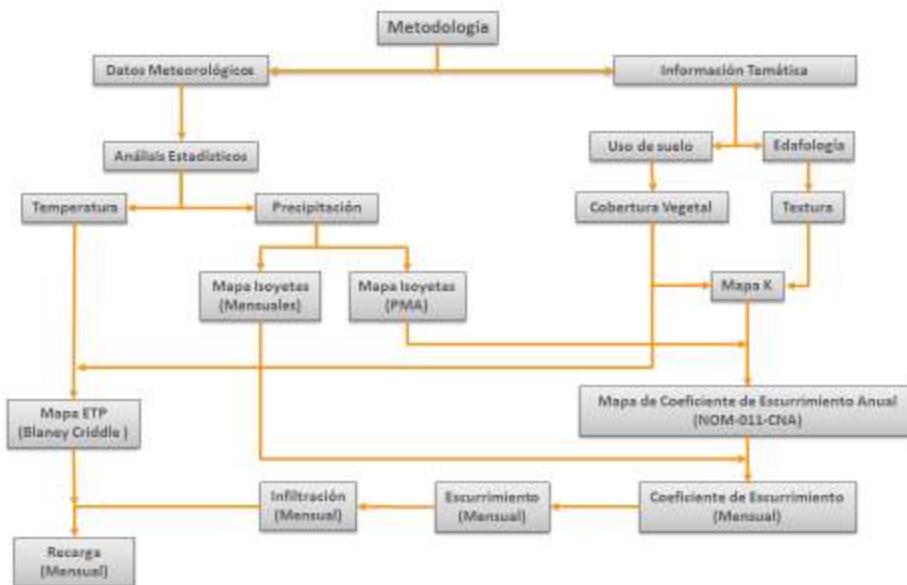


Figura 4.1. Metodología para calcular la recarga empleando la NOM-011-CNA-2015.

Una vez que se aplica la metodología presentada en la figura 4.1 para las dos épocas analizadas (1996 y reciente), donde las variables que cambiaron son la cobertura vegetal y el uso de suelo, se estima el efecto causado por el cambio en la evapotranspiración, escurrimiento, infiltración y recarga natural.

4.1.1 Materiales

Para el desarrollo del presente trabajo fue necesario la obtención y manipulación de múltiples materiales y herramientas, entre ellas información vectorial y meteorológica de la zona de estudio. La información meteorológica se analizó con la ayuda de un código que permite organizar los datos de las estaciones meteorológicas, y de esta manera poder establecer si es posible emplearla o no para los correspondientes análisis hidrológicos. También se descargaron ortofotos del INEGI (fotografías aéreas escala 1:75,000 de enero de 1996. Procesamiento: rectificación de fotografías aéreas con auxilio de puntos de control geodésico y Modelo Digital de Elevación) e imágenes de satélite de alta resolución del Google Earth®, las cuales se emplearon para determinar la cobertura vegetal y uso del suelo en la subcuenca Las Cruces para las épocas 1996 y reciente, respectivamente. Para el manejo de la información vectorial y meteorológica se empleó como herramienta el software ArcView 3.2 para la obtención de los parámetros morfométricos de la subcuenca Las Cruces, y para los demás procedimientos se utilizó el software ArcGIS 10.1; ambos son Sistemas de Información Geográfica (SIG) desarrollados por la empresa ESRI.

4.1.1.1 Modelo Digital de Elevaciones

El Modelo Digital de Elevaciones (MDE) se utilizó para delimitar las cuencas existentes en la subcuenca Las Cruces, y para determinar las características morfométricas de dicha subcuenca. Se descargó el MDE de mayor resolución que proporciona el INEGI con un tamaño de pixel de 15x15 m.

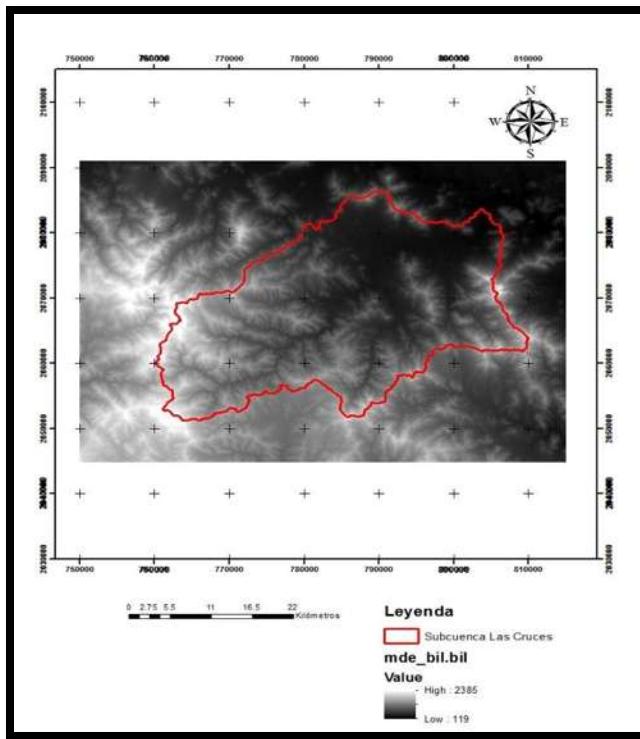


Figura 4.2. Modelo Digital del Elevaciones de la subcuenca Las Cruces.

4.1.1.2 Información temática

La información temática se obtuvo del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

a) Edafología de la subcuenca Las Cruces

El conjunto de datos vectoriales de edafología está disponible a una escala de 1:250,000. La información corresponde a la serie II elaborada entre el 2002-2007. La carta utilizada fue la E1306 ubicada dentro del estado de Michoacán.

La información edafológica proporciona una descripción del suelo, indicando sus características morfológicas y propiedades físicas y químicas.

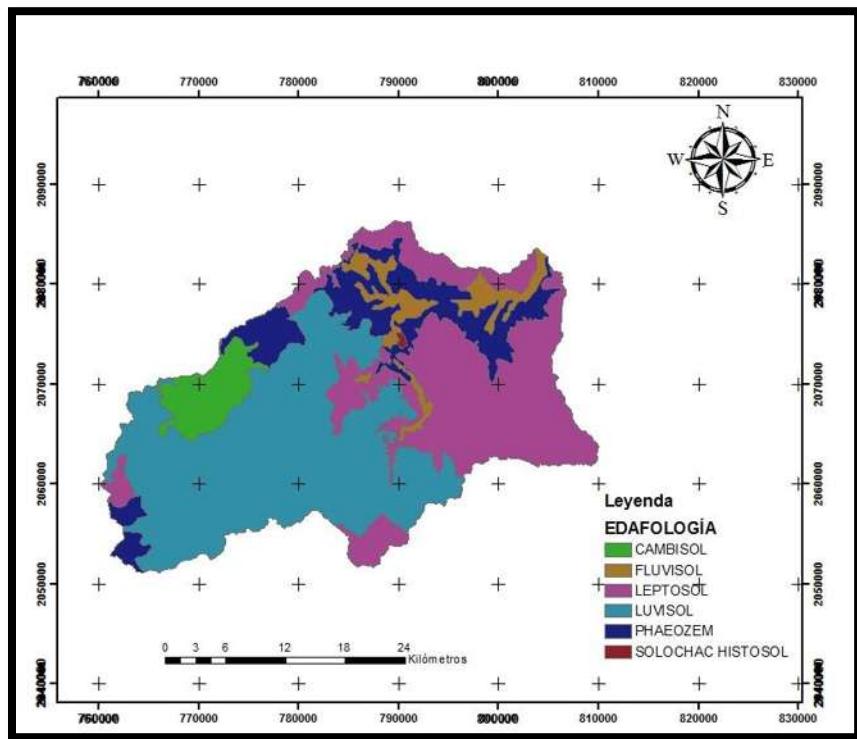


Figura 4.3. Edafología de la subcuenca Las Cruces.

En la figura 4.4 se muestra un mapa donde se puede apreciar que la subcuenca Las Cruces presenta dos clases de textura. Una de ellas es de tipo B, característico de suelos medianamente permeables, tales como arenas de mediana profundidad, terrenos migajosos. El otro es de tipo C, característico de suelos casi impermeables, tales como arenas o loess muy delgados sobre una capa impermeable, o bien arcillas.

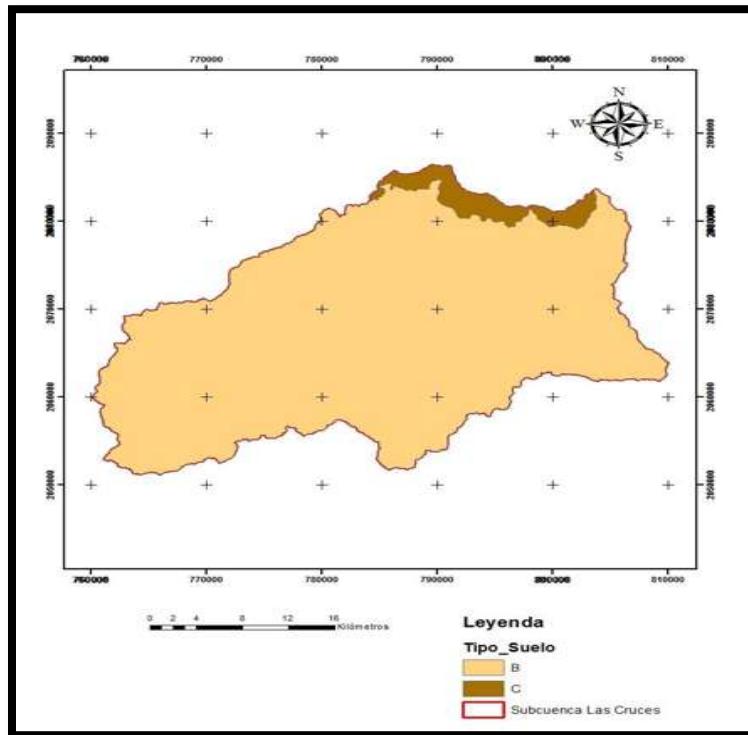


Figura 4.4. Textura del suelo de la subcuenca Las Cruces.

b) Geología de la subcuenca Las Cruces

Los conjuntos de datos geológicos escala 1:250,000, contienen información generada en el período 1977-1989; pertenecen a la serie I. La carta utilizada fue la E1306 ubicada dentro del estado de Michoacán. En términos generales la información contenida es el tipo de roca por génesis y edad (unidades cronoestratigráficas).

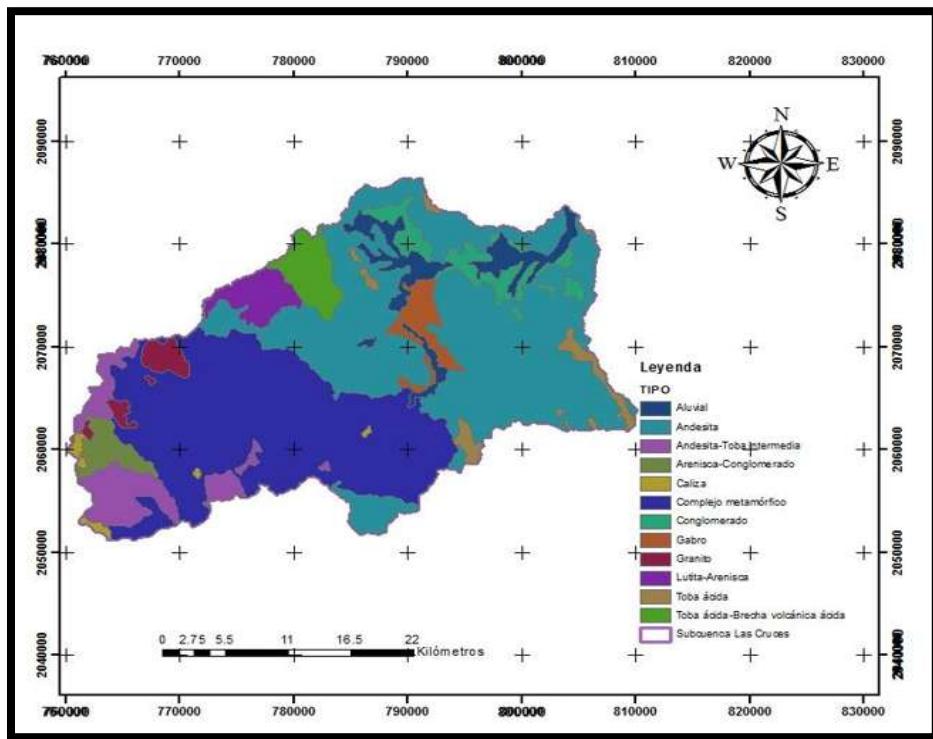


Figura 4.5. Litología de la subcuenca Las Cruces.

4.1.1.3 Cobertura vegetal y uso de suelo

El conjunto de información vectorial correspondiente a la cobertura vegetal y uso de suelo se obtuvo mediante la interpretación de ortofotos para la época de 1996 y de igual manera se interpretaron imágenes extraídas del Google Earth® para la época reciente.

a) Época de 1996

Para determinar la cobertura vegetal y uso del suelo de la época de 1996 se descargaron las ortofotos que cubren la zona de estudio. Las claves correspondientes son: E13B58F, E13B59D, E13B59E, E13B59F, E13B68B, E13B68C, E12B68E, E13B68E, E13B68F, E13B69A, E13B69B, E13B69C, E13B69D. Para elaborar un mapa de la cobertura vegetal y uso del suelo se interpretaron las ortofotos con base en la NOM-011-CNA-2015.

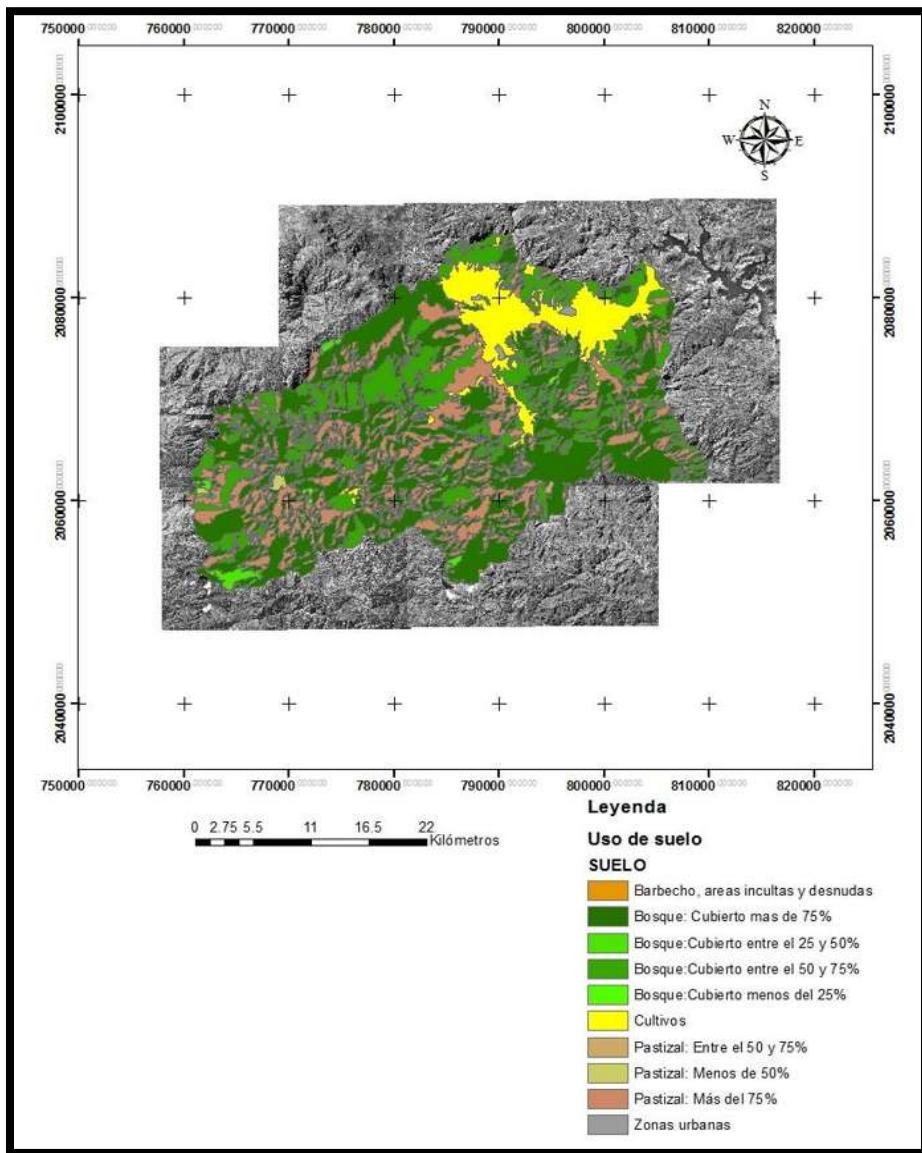


Figura 4.6. Cobertura vegetal y uso de suelo en la subcuenca Las Cruces (época de 1996).

Tabla 4.1. Superficies de cobertura vegetal y uso de suelo en la subcuenca Las Cruces (época de 1996).

Cobertura vegetal y uso de suelo (época de 1996)	Área		
	(m ²)	(km ²)	(%)
Barbecho, áreas incultas y desnudas	3,377,078.43	3.38	0.33
Cultivos	102,682,742.99	102.68	9.98
Pastizal: Más del 75%	220,231,244.91	220.23	21.41
Pastizal: Entre el 50 y 75%	3,605,537.29	3.61	0.35
Pastizal: Menos de 50%	2,969,841.11	2.97	0.29
Bosque: Cubierto más de 75%	482,596,566.08	482.60	46.92
Bosque: Cubierto entre el 50 y 75%	195,531,568.11	195.53	19.01
Bosque: Cubierto entre el 25 y 50%	12,607,262.04	12.61	1.23
Bosque: Cubierto menos del 25%	1,761,729.10	1.76	0.17
Zonas urbanas	3,110,552.23	3.11	0.30
TOTAL	1,028,474,122.28	1,028.47	100.00

b) Época reciente

Para generar el mapa de cobertura vegetal y uso de suelo para la época reciente se descargaron imágenes satelitales de alta resolución del Google Earth®. El primer paso fue obtener las imágenes del Google Earth®. Posteriormente se georreferenciaron dichas imágenes. Finalmente se interpretaron las imágenes de la misma forma que las ortofotos.

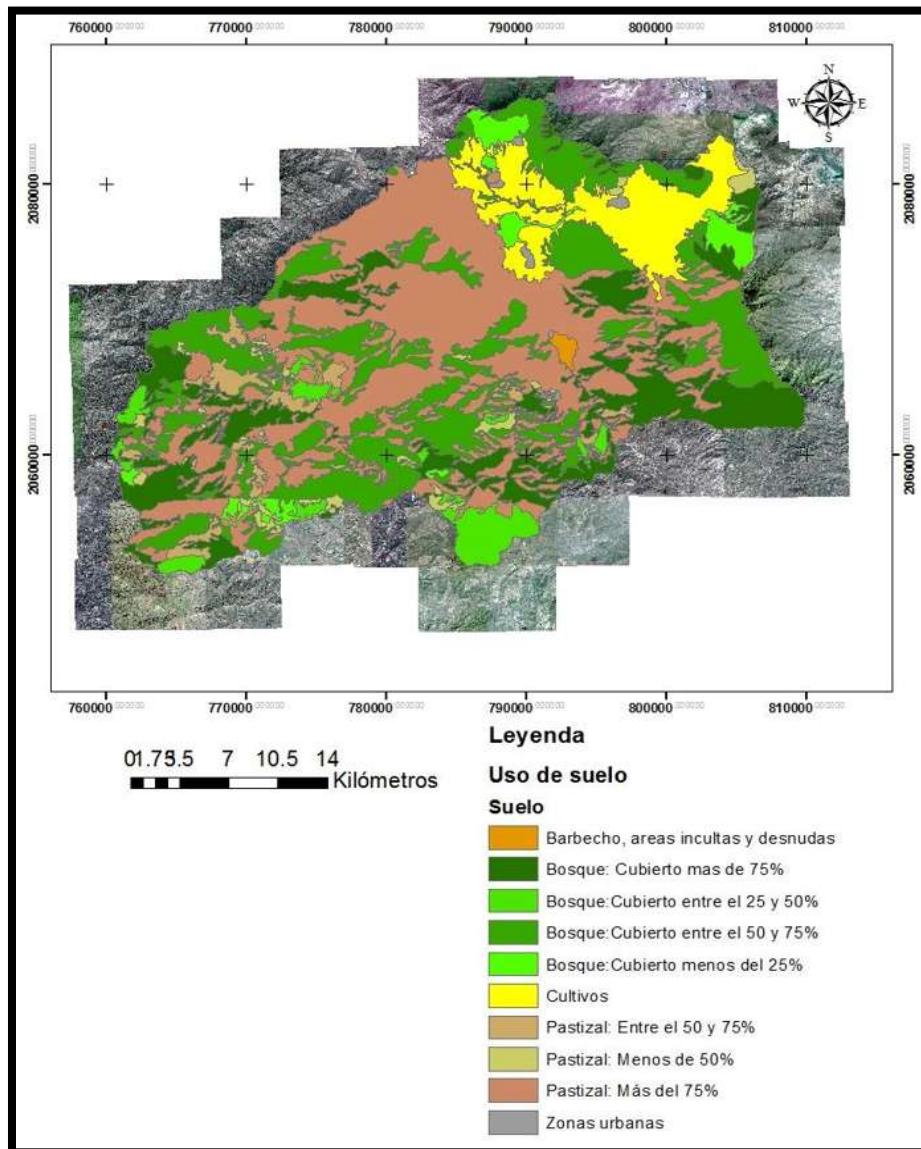


Figura 4.7. Cobertura vegetal y uso de suelo en la subcuenca Las Cruces (época reciente).

Tabla 4.2. Superficies de cobertura vegetal y uso de suelo en la subcuenca Las Cruces (época reciente).

Cobertura vegetal y uso de suelo (época reciente)	Área		
	(m ²)	(km ²)	(%)
Barbecho, areas incultas y desnudas	3,066,710.77	3.07	0.30
Cultivos	94,307,669.92	94.31	9.17
Pastizal: Más del 75%	362,289,267.93	362.29	35.23
Pastizal: Entre el 50 y 75%	28,216,995.84	28.22	2.74
Pastizal: Menos de 50%	20,792,340.15	20.79	2.02
Bosque: Cubierto mas de 75%	176,863,277.48	176.86	17.20
Bosque:Cubierto entre el 50 y 75%	269,053,218.59	269.05	26.16
Bosque:Cubierto entre el 25 y 50%	39,750,716.25	39.75	3.87
Bosque:Cubierto menos del 25%	30,943,906.87	30.94	3.01
Zonas urbanas	3,190,018.45	3.19	0.31
TOTAL	1,028,474,122.25	1,028.47	100.00

4.1.1.4 Información meteorológica

La información meteorológica se obtuvo de la base de datos CLICOM (Climate Computing Project), que es un sistema de software de manejo de datos climatológicos desarrollado por las Naciones Unidas y administrada por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) en México. Se identificaron las estaciones meteorológicas ubicadas en la zona de estudio, para posteriormente proceder con la descarga de sus registros de datos históricos de precipitación y temperatura.

Para un adecuado análisis climatológico de la subcuenca Las Cruces se utilizaron 39 estaciones climatológicas, extrayendo la información de temperatura a una escala mensual y para el caso de la precipitación se descargó la información diaria. En la figura 4.8 se muestran las estaciones cercanas a la zona de estudio.

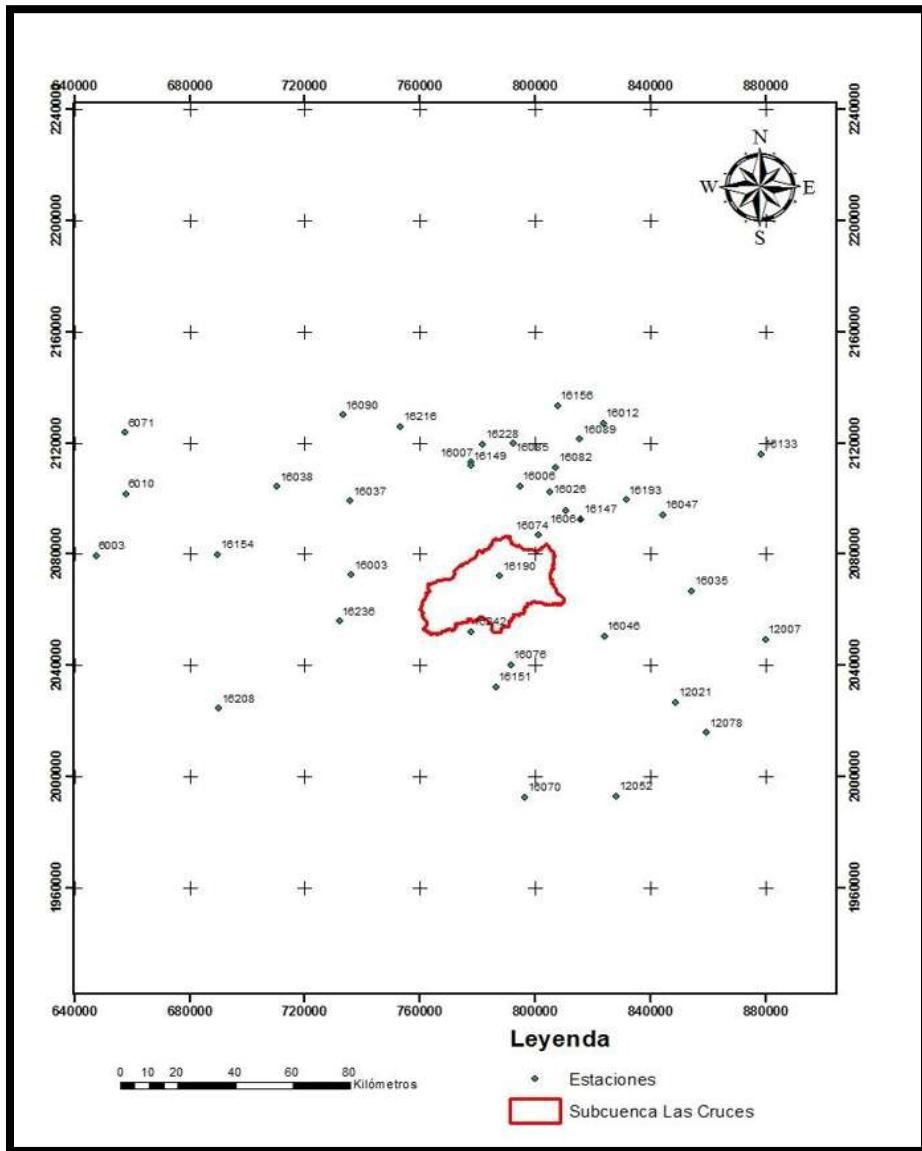


Figura 4.8. Estaciones meteorológicas ubicadas cerca de la subcuenca Las Cruces.

4.1.1.4.1 Análisis de datos meteorológicos

Se entiende como gestión de datos climatológicos al proceso de selección de las estaciones climatológicas a emplearse en el análisis, considerando la evaluación de la consistencia de las series de datos y el procedimiento de llenado de los datos faltantes si fuese necesario. Cabe mencionar que un buen análisis de datos climatológicos resultará en información confiable y determinará la calidad de todo el estudio (Martínez-Cortes, 2014).

a) Selección de Estaciones

En el procedimiento de selección de estaciones se analizó el contenido de la información de cada estación, considerando parámetros como periodo de registro, porcentaje de vacíos, último registro y ubicación espacial. Con la finalidad de poder

realizar una preselección del conjunto de estaciones se llevó a cabo una codificación para cada parámetro antes mencionado (Martínez-Cortes, 2014). En la tabla 4.4 se presenta la codificación utilizada.

Tabla 4.3. Codificación de parámetros para la selección de estaciones meteorológicas.

Condición	Clave	Código de parámetros					
		1	2	3	4	5	
Distancia al centromde gravedad del acuífero (km)	A	Dentro del acuífero	10<A<20	20<A<30	30<A<40	A>40	
Año del último registro	B	B>2010	2010>B>2000	2000>B>1990	1990>B>1980	B<1980	
Porcentaje de datos de la muestra	C	C>90	90%>C>80%	80%>C>70%	70%>C>60%	C<60%	
Número de años registrados	D	D>30	30>D>20	D<20			

Para seleccionar las estaciones se realizó una suma de los valores asignados a cada parámetro analizado, empleándose aquellas estaciones cuyo resultado fue menor o igual a ocho (Martínez-Cortes, 2014).

Tabla 4.4. Codificación de parámetros para la selección de estaciones meteorológicas de la zona de estudio.

Clave	Nombre	Altitud	Fec_Ini	Fec_Fin	%Vacios	X	Y	Distancia Km	A	B	C	D	Suma
16090	Piedras Blancas	400.00	02/01/1963	12-31-2002	84.41	733349.6102	2129980.74	80.76	5	2	2	1	10
16216	Buenavista II	450.00	01/01/1981	05-31-1999	55.26	753391.2871	2125817.93	65.99	5	3	5	3	16
16038	El Carrizo	520.00	07/01/1969	01-31-2004	43.29	710508.522	2104238.13	82.85	5	2	5	1	13
16037	El Cajón	321.00	08/01/1962	12-31-2010	28.57	735849.6845	2099007.25	58.14	5	1	5	1	12
16003	Aguillilla	933.00	03/01/1943	08-31-1982	87.29	736185.4896	2072436.04	48.97	5	4	2	1	12
16236	El Jovero	760.00	06/01/1981	08-31-1985	80.00	732170.2821	2055777.16	54.14	5	4	2	3	14
16242	Tumbiscatio	900.00	01/01/1981	09-30-1985	85.00	777637.2727	2051957.84	17.50	2	4	2	3	11
16151	Arteaga	826.00	11/01/1957	02-29-2000	90.72	786386.105	2032149.76	35.73	4	2	1	1	8
16076	Los Pozos	920.00	01/01/1972	09-30-1985	83.93	791555.3177	2039981.41	28.65	3	4	2	3	12
16190	Arceo	320.00	07/01/1974	09-30-1985	84.03	787896.4718	2072049.0	5.13	1	4	2	3	10
16046	El Vaso Infiernillo	194.00	04/01/1965	09-30-1994	86.11	824157.0175	2050478.23	42.89	5	3	2	2	12
16074	Los Panches	207.00	11/01/1964	12-31-1999	96.99	801383.0951	2086662.14	24.98	3	3	1	1	8
16064	La Pastoría	221.00	09/01/1965	07-31-1991	87.65	810725.917	2095678.8	37.94	4	3	2	2	11
16026	Cuatro Caminos	672.00	09/01/1962	09-30-2012	56.70	805346.3865	2102237.04	39.98	4	1	5	1	11
16147	Ziritzicuaro	213.00	08/01/1952	09-30-1985	95.59	816052.7085	2092444.64	39.66	4	4	1	1	10
16082	Nueva Italia	391.00	04/01/1941	05-31-1989	69.05	807306.2906	2111132.87	48.72	5	4	4	1	14
16006	Antúnez	360.00	01/01/1962	10-31-2012	97.22	794775.1567	2104281.41	37.73	4	1	1	1	7
16089	Planta el Cóbano	643.00	02/01/1953	10-31-1983	93.82	815560.5634	2121244.44	61.55	5	4	1	1	11
16085	Parácuaro	597.00	06/01/1969	04-30-2012	71.97	792422.1841	2119753.24	52.44	5	1	3	1	10
16228	Acahuato	227.00	01/01/1981	09-30-2012	97.40	781897.2238	2119588.6	51.83	5	1	1	1	8
16007	Apatzingán	320.00	09/01/1922	10-31-2012	97.62	777787.7847	2112879.91	45.59	5	1	1	1	8
16149	Apatzingán	332.00	01/01/1969	12-31-1985	93.63	777804.4808	2111772.49	44.50	5	4	1	3	13
16035	Churumuco	205.00	02/01/1933	09-30-1994	78.49	854514.3965	2066536.46	69.59	5	3	3	1	12
16047	El Zapote	520.00	03/01/1951	08-31-2012	75.83	844500.5108	2094057.61	65.07	5	1	3	1	10
16193	E.T.A. 036 La Huacana	480.00	03/01/1974	10-31-1985	59.03	831749.0442	2099366.64	56.43	5	4	5	3	17
16012	Cajones	480.00	08/01/1970	07-31-2006	87.84	823883.8936	2126930.04	70.76	5	2	2	1	10
16156	Charapendo	1013	08/01/1952	09-30-1985	55.64	807987.1073	2133303.28	69.39	5	4	5	1	15
16154	Cualcomán	1086	04/01/1936	12-31-2006	75.12	689699.89	2079659	95.97	5	2	3	1	11
16208	Cachan	79	05/01/1977	10-31-2011	83.81	690253.20	2024315.48	104.22	5	1	2	1	9
16070	Vaso la Villita	92	03/01/1951	12-31-1991	83.13	796511.48	1992425.68	76.31	5	3	2	1	11
12052	La Unión	60	06/01/1925	04-30-2012	78.41	828304.60	1992931.98	86.57	5	1	3	1	10
12078	Santa Rosa	500	12/01/1963	05-31-2011	85.37	859696.00	2015649.14	91.18	5	1	2	1	9
12021	Coahuayutla	310	06/01/1960	11-30-2011	91.19	848907.08	2026534.31	76.15	5	1	1	1	8
12007	Aratichanguio	226	01/01/1955	11-30-2011	97.37	880218.11	2049298.75	97.07	5	1	1	1	8
16133	Turicato	740	01/01/1969	05-31-2011	97.67	878869.95	2115790.64	105.46	5	1	1	1	8
6003	Callejones	30	12/01/1948	12-31-2012	96.67	647536.7092	2079279.1	137.88	5	1	1	1	8
6005	Cerro de Ortega	19	01/01/1961	12-31-2012	94.23	636996.8747	2079199.05	148.38	5	1	1	1	8
6010	Estapilla	350	12/01/1961	12-31-2012	87.82	657889.148	2101500.43	131.43	5	1	2	1	9
6071	Trapichillos	552	03/01/1984	12-31-2012	97.99	657699.4767	2123636.23	138.93	5	1	1	2	9

De las estaciones meteorológicas ubicadas cerca de la subcuenca las Cruces, diez cumplen con el criterio de selección descrito. La estación 16228 no se empleó, debido a

que su periodo de registro no coincide con el resto de las estaciones, por lo que se consideraron un total de nueve estaciones para este trabajo.

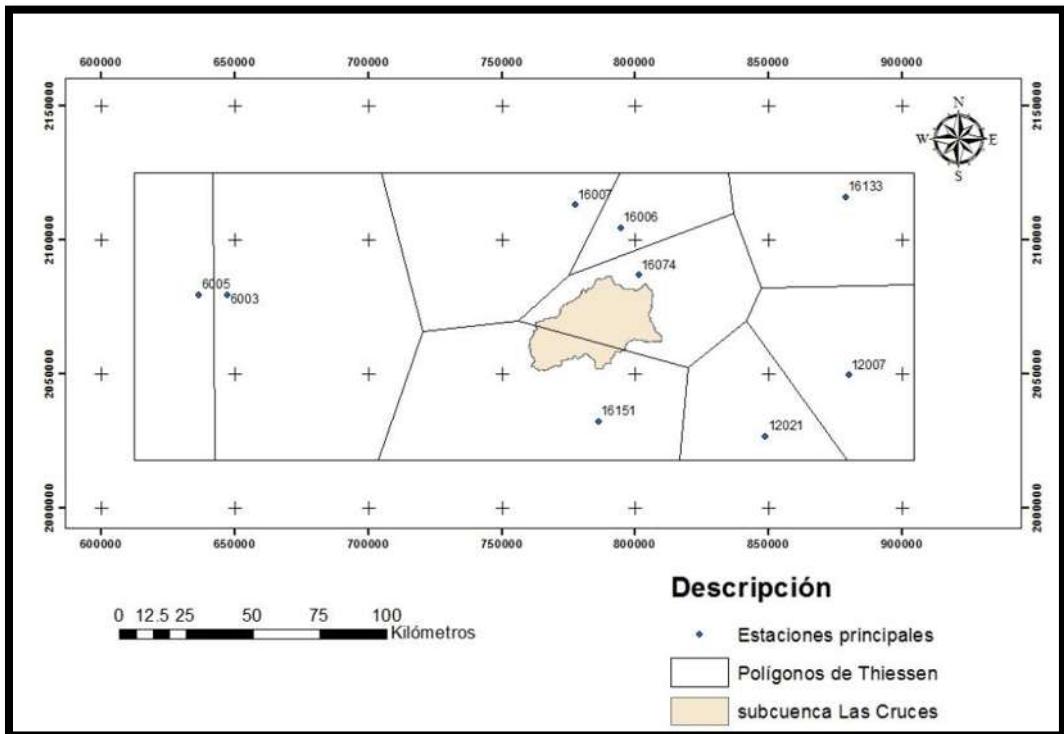


Figura 4.9. Polígonos de Thiessen para las estaciones meteorológicas consideradas.

En la figura 4.9 se observa que las estaciones 16074, 16151 son las que tienen influencia en la subcuenca Las Cruces. El resto de las estaciones: 6005, 6003, 16007, 16006, 16133, 12007, 12021, se utilizaron en el llenado de los datos faltantes, así como también en el método de las isoyetas.

b) Análisis de consistencia

Una vez seleccionadas las estaciones se procede a revisar la consistencia de las series de datos. En este trabajo se empleó una técnica llamada curva masa doble, que se basa en observaciones hechas en el sentido de que la precipitación acumulada media para varias estaciones no es muy sensible a cambios en una de ellas, debido a que muchos de los errores se compensan, mientras que la lluvia acumulada de una estación particular se afecta de inmediato ante la presencia de cambios importantes. Así, si en una gráfica se pone en un eje la precipitación anual acumulada media de varias estaciones circundantes a la estación en estudio, y en el otro eje se pone la lluvia anual acumulada de la estación en cuestión, se obtendrá una línea recta siempre que en la estación no hayan existido cambios o éstos no sean importantes; en caso contrario, la línea cambia de pendiente en el año a partir del cual la estación comenzó a operar en condiciones diferentes (Aparicio-Mijares, 1992).

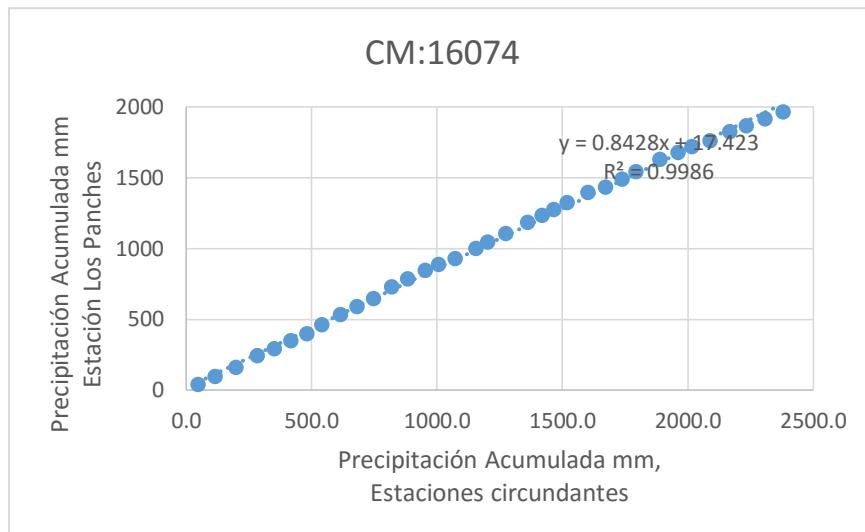


Figura 4.10. Curva masa doble para revisar la consistencia de la estación 16074.

En el anexo I se muestra la curva masa doble para las estaciones restantes.

4.1.1.4.2 Llenado de datos faltantes

Es frecuente que en un registro de precipitación falten los datos de un cierto periodo, debido a la ausencia del operador o a fallas del aparato registrador. En estos casos se pueden estimar los datos faltantes si se tienen registros simultáneos de algunas estaciones situadas cerca de la estación en cuestión (Aparicio-Mijares, 1992).

a) Método del Inverso de la Distancia al Cuadrado

El método del inverso de la distancia al cuadrado se basa en asignar mayor peso a las muestras cercanas y menor peso a las muestras alejadas, empleando la siguiente ecuación:

$$P_X = \sum_{i=1}^n (W_i * P_i)$$

$$W_i = \frac{\left(\frac{1}{d_i}\right)^2}{\sum_i^n \left(\frac{1}{d_i}\right)^2}$$

$$d_i = \sqrt{\left[(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2\right]}$$

Donde:

P_X : Precipitación que se quiere deducir (dato faltante) (mm).

P_i : Precipitación de la estación auxiliar i.

W_i : Promedio ponderado o peso de la estación auxiliar i.

$i = 1 \dots n$: Número de estaciones auxiliares para la deducción.

x_i, y_i, z_i : Coordenadas (x, y, z) de la estación auxiliar i.

x_j, y_j, z_j : Coordenadas (x, y, z) de la estación "j" (con el dato faltante).

Tabla 4.5. Matriz de distancias euclidianas.

	16151	16074	16006	16228	16007	12021	12007	16133	6003	6005
16151	1.00	56541.06	72619.34	87556.04	81188.33	62774.77	95388.12	124695.89	146632.07	156625.12
16074		1.00	18818.27	38260.32	35272.13	76641.34	87240.94	82782.65	154023.54	164555.65
16006			1.00	20004.22	19039.61	94735.85	101605.16	84879.57	149346.53	159759.91
16228				1.00	7867.82	114670.96	120862.15	97048.43	140277.02	150424.30
16007					1.00	111863.84	120559.30	101124.94	134515.58	144763.85
12021						1.00	38711.85	94152.28	208163.68	218356.58
12007							1.00	66507.54	234604.97	245052.32
16133								1.00	234197.92	244626.34
6003									1.00	10540.14
6005										1.00

Tabla 4.6. Matriz del inverso de la distancia al cuadrado.

	16151	16074	16006	16228	16007	12021	12007	16133	6003	6005
16151	1.00	3.13E-10	1.90E-10	1.30E-10	1.52E-10	2.54E-10	1.10E-10	6.43E-11	4.65E-11	4.08E-11
16074		1.00	2.82E-09	6.83E-10	8.04E-10	1.70E-10	1.31E-10	1.46E-10	4.22E-11	3.69E-11
16006			1.00	2.50E-09	2.76E-09	1.11E-10	9.69E-11	1.39E-10	4.48E-11	3.92E-11
16228				1.00	1.62E-08	7.60E-11	6.85E-11	1.06E-10	5.08E-11	4.42E-11
16007					1.00	7.99E-11	6.88E-11	9.78E-11	5.53E-11	4.77E-11
12021						1.00	6.67E-10	1.13E-10	2.31E-11	2.10E-11
12007							1.00	2.26E-10	1.82E-11	1.67E-11
16133								1.00	1.82E-11	1.67E-11
6003									1.00	9.00E-09
6005										1.00

Tabla 4.7. Llenado de la estación 16074 “Los Panches”.

16074	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	ANUAL	Promedio	Varianza	Sesgo
1965	5	25	0	0	10	31.8	152.7	147.2	62.3	30.5	3.5	0	468	39.00	3028.92	1.61
1966	0	3.8	0	18	78.5	129.4	184.8	118.4	106.7	57	0	0	696.6	58.05	4146.45	0.71
1967	148.1	0	4	0	15.2	165.2	53.2	178.7	168.2	52.8	0	2.2	787.6	65.63	5784.25	0.65
1968	43.5	32.5	48.8	0	16	109.3	105.5	227	170.3	215	1.7	11.7	981.3	81.78	6846.61	0.82
1969	0	0	0	0	2	41	109.1	108.4	271.9	32.2	0	3.5	568.1	47.34	6674.75	2.22
1970	0	1.2	0	0	0	146	214.5	113	210.8	12.5	0	0	698	58.17	7644.48	1.10
1971	0.2	0	5.3	0	17.6	75.9	83	202.2	170.1	45.9	0	0	600.2	50.02	4990.31	1.41
1972	0	0	0	0	4.9	137.2	283.7	108	148.2	49.1	9.7	0	740.8	61.73	8157.60	1.57
1973	0	0	0	42	20.6	166.1	89	178.1	191.9	157.8	0	0	845.5	70.46	6506.56	0.56
1974	0	0	5.5	4.7	44.2	165.6	131	131	116.8	40.5	15.1	26.5	680.9	56.74	3757.15	0.75
1975	8.1	0	0	0	23.8	91.5	163.5	222	147	25.9	0	0	681.8	56.82	6232.98	1.20
1976	0	0	0	0.2	0	164.9	197.1	181.5	69.8	271.5	117.8	0	1002.8	83.57	9785.74	0.69
1977	0.5	13.8	0	0.4	23.5	136.7	130.1	151.1	189.1	26.2	0.3	6	677.7	56.48	5217.77	0.90
1978	0.3	2	1	0	1	59.1	169.8	262.4	107.1	122.3	1.9	0	726.9	60.58	7598.55	1.38
1979	0	2.2	0	0	0	50.8	203	69.9	124.3	38.4	0.2	2.9	491.7	40.98	4133.33	1.81
1980	80.9	0	0	0	0	0	166.7	140.2	62.4	48	12.7	0	510.9	42.58	3508.84	1.27
1981	148	0	0	5.5	10.6	91.1	153.9	129	170	128.9	0	1.2	838.2	69.85	5240.04	0.19
1982	0	0	0	0	52.5	22.5	242	59.4	102.3	9	46	6.7	540.4	45.03	4884.18	2.35
1983	6.8	4.1	3.5	0	138.5	90.9	152.9	167.2	81.5	70.7	31	13.8	760.9	63.41	3945.40	0.56
1984	11.7	0	0	0	30	144.3	226.6	216.4	228.4	75	17.4	0	949.8	79.15	9359.41	0.81
1985	0	0	3.1	0	0.6	203.3	143.9	65.9	123.5	23	1.5	0	564.8	47.07	5053.74	1.36
1986	8.5	0	0	0	0.4	133.2	150.7	45.9	97.4	65.1	2.3	14.4	517.9	43.16	3110.70	1.06
1987	0	0	3.6	0.2	0	104.1	157.2	181.6	81.1	23	0	0	550.8	45.90	4578.61	1.22
1988	0	0	14.7	6.5	0	96.8	102.9	370.8	63.9	66.90	17.81	18.26	758.567	63.21	10815.21	2.71
1989	0	0	0	0	4.9	36.6	70.8	76.6	164.1	66	2.2	21.5	442.7	36.89	2514.88	1.65
1990	45.5	0	0	5.2	26.9	115.2	91.5	118.7	253.5	44.8	0.8	0.6	702.7	58.56	5788.66	1.70
1991	0	0	0	0	0.8	94.6	111.9	189.7	152.8	37.1	44.9	0	631.8	52.65	4630.32	1.03
1992	298.6	17.3	0	2.4	67.6	15.9	118.3	163.5	104.8	244.1	0	10.4	1042.9	86.91	10459.64	1.10
1993	11.7	0	0.5	0	1.2	106.6	143.5	148.4	138.8	32.8	4.7	0	588.2	49.02	4149.88	0.82
1994	0	0	0	0.2	0	32.4	156.4	141.6	101.6	20.5	0.6	12	465.3	38.78	3491.50	1.37
1995	0	0.5	0	4.8	8.2	74.1	73.4	127.2	173.1	24.9	1.2	21.6	509	42.42	3328.21	1.42
1996	0	0	1.2	0	27.6	163.4	72.3	140	147	223.5	9.8	2.4	787.2	65.60	6573.89	0.87
1997	0	0	6.2	5.6	17.6	74.5	98.5	147.4	30.6	96	13.9	1	491.3	40.94	2508.25	1.11
1998	0	0	0	0	0	102.4	129.1	121	160	74.8	0	0	587.3	48.94	4022.29	0.69
1999	0	0	0	0	1.8	171.8	99.8	133.6	152	40.5	3	0	602.5	50.21	4711.84	0.91
MEDIA	23.35	2.93	2.78	2.73	18.47	101.26	140.92	150.94	138.38	74.06	10.29	5.05	671.17	55.93		
MÁXIMA	298.6	32.5	48.8	42	138.5	203.3	283.7	370.8	271.9	271.5	117.8	26.5	1042.9			
MÍNIMA	0	0	0	0	0	0	53.2	45.9	30.6	9	0	0	442.7			
SUMA	817.40	102.40	97.40	95.70	646.50	3544.20	4932.30	5283.00	4843.30	2592.20	360.01	176.66	23491.07	1957.59		

b) Validación del llenado

La validación se realizó en función de los estadísticos media, varianza y sesgo. Los valores estadísticos permitieron observar las variaciones de las series al finalizar el llenado.

En la tabla 4.9 se presentan los estadísticos después del proceso de llenado de la estación 16074 “Los Panches”. Donde se puede apreciar que no existen grandes variaciones de estos a lo largo del tiempo, lo que significa que el proceso de llenado es aceptable.

En la figura 4.11 se muestra la comparación del promedio mensual entre la serie antes y después del llenado, observándose que la variación es mínima.

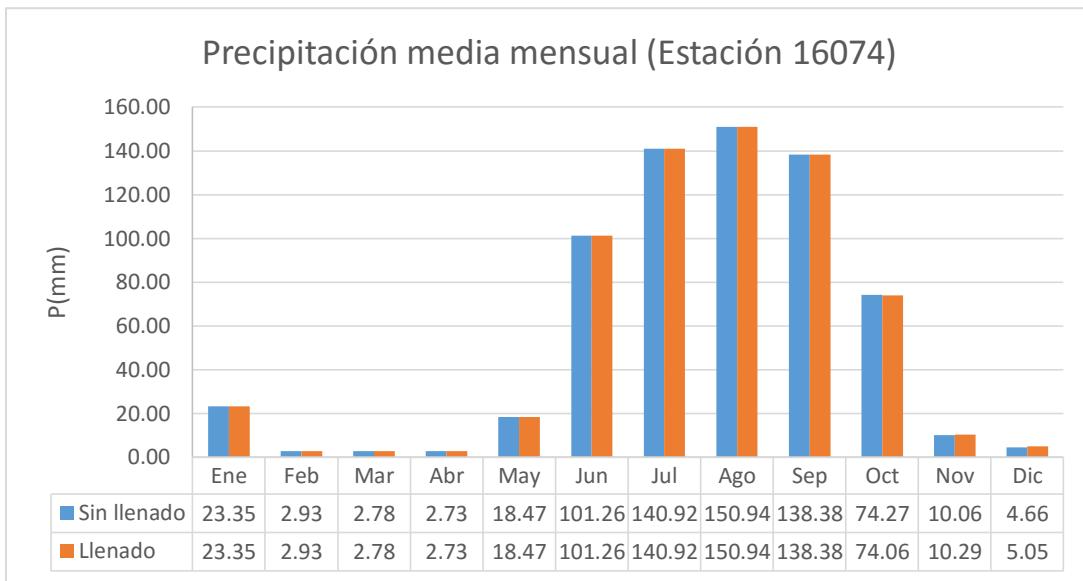


Figura 4.11. Promedios mensuales de precipitación antes y después del llenado.

En el anexo II se muestra la información de las estaciones restantes.

4.1.2 Precipitación

La precipitación incluye todos los procesos mediante los cuales el agua cae a la superficie terrestre incluyendo la lluvia, el granizo y la nieve. La formación de la precipitación requiere la elevación de una masa de agua en la atmósfera, de tal manera que se enfrié y parte de su humedad se condense. Desde el punto de vista de la ingeniería hidrológica se puede decir que la precipitación es la principal fuente de agua en la superficie terrestre. Las lluvias presentan una gran variabilidad en el espacio y en el tiempo. Para los análisis hidrológicos es necesario conocer la lluvia media en una zona dada. Existen varios métodos de uso común para determinar dicho valor, los más conocidos son el método aritmético, los polígonos de Thiessen y el método de las isoyetas, este último se utilizó en el cálculo del coeficiente de escurrimiento.

a) Precipitación en la subcuenca Las Cruces

Para el cálculo de la precipitación media anual y mensual se utilizaron las 9 estaciones principales y secundarias previamente seleccionadas. Los meses de junio a octubre es la temporada de lluvias, mientras que de noviembre a mayo es la época de secas.

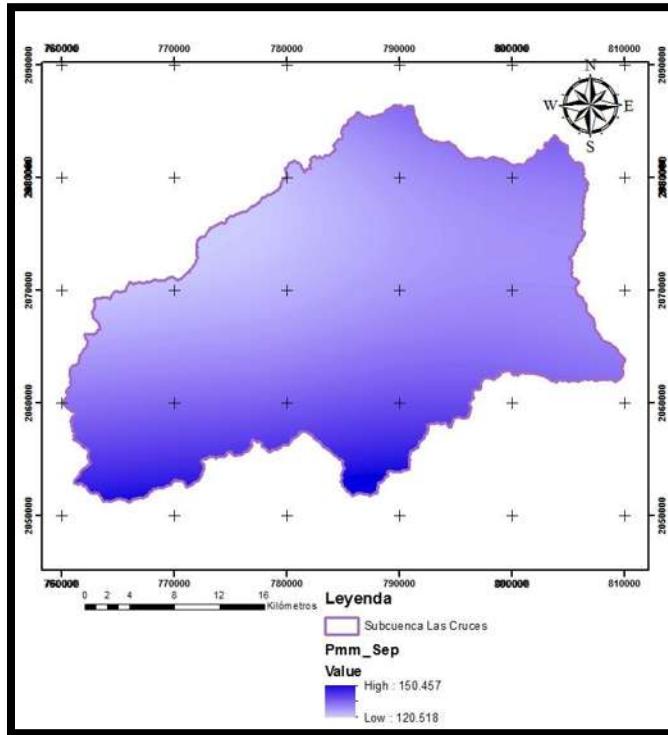


Figura 4.12. Precipitación media mensual “septiembre” en la subcuenca Las Cruces.

En la figura 4.12 se puede apreciar la variación de la precipitación para el mes de septiembre, alcanzando los 150.5 mm en la parte sur de la subcuenca Las Cruces.

La precipitación anual de la cuenca

Se obtendrá con la información de las estaciones meteorológicas por medio del método de las “isoyetas”. El método de las isoyetas consiste en trazar con la información de las estaciones meteorológicas, líneas que unen puntos de igual altura de precipitación llamadas isoyetas (Martínez-Cortes, 2014).

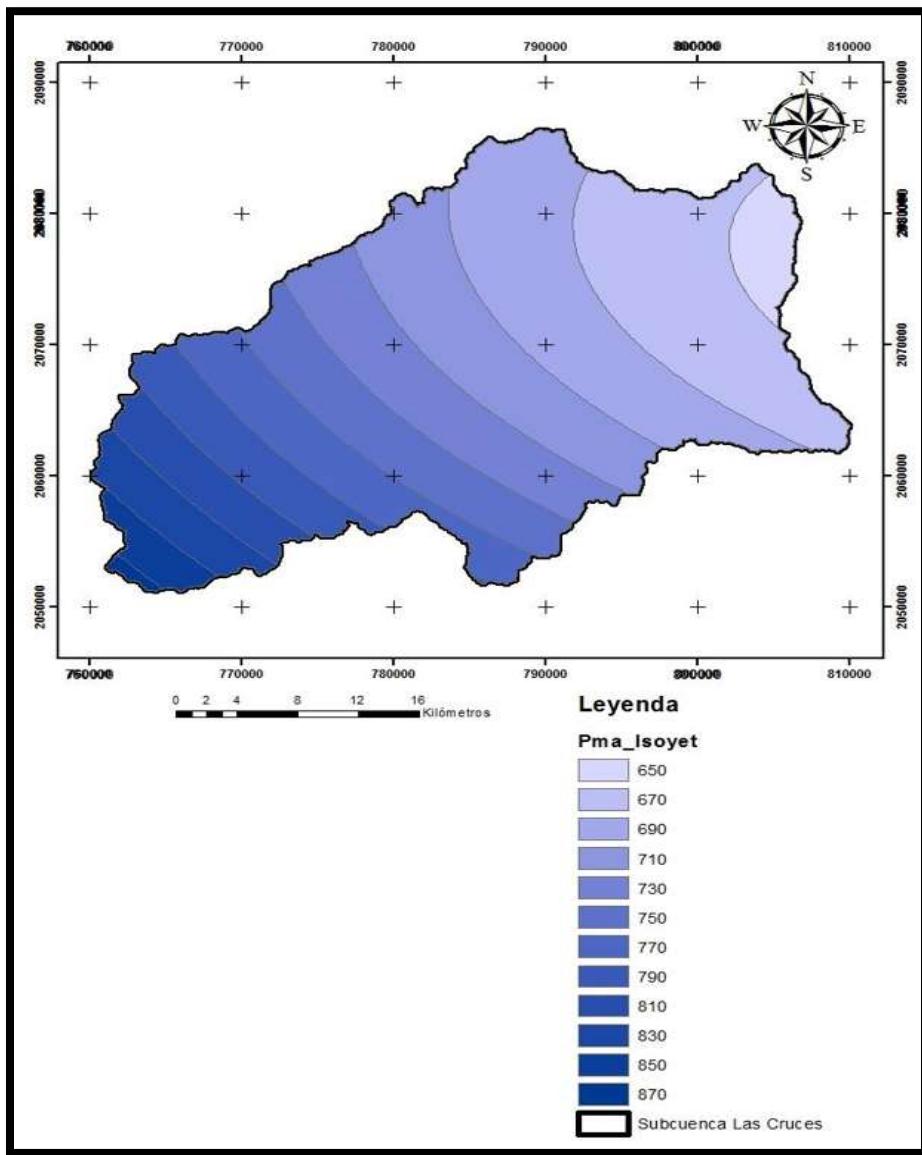


Figura 4.13. Precipitación media anual en la subcuenca Las Cruces.

4.1.3 Evapotranspiración

Se conoce como evapotranspiración a la combinación de dos procesos del ciclo hidrológico, la evaporación y la transpiración de las plantas. La evaporación es el proceso por el cual el agua en estado líquido se convierte en vapor de agua (vaporización) y se retira de la superficie evaporante (remoción de vapor). Cuando la superficie evaporante es la superficie del suelo, el grado de cobertura del suelo por parte del cultivo y la cantidad de agua disponible en la superficie evaporante son factores que afectan el proceso de la evaporación. La transpiración por su parte consiste en la vaporización del agua líquida contenida en los tejidos de la planta y su posterior remoción hacia la atmósfera. El contenido de agua del suelo y la capacidad del suelo de conducir el agua a las raíces también determinan la tasa de transpiración, así como la salinidad del suelo y del agua de riego. La tasa de transpiración también es influenciada por las características del cultivo, el medio donde se produce y las

prácticas de cultivo. La transpiración, igual que la evaporación directa, depende del aporte de energía, del gradiente de presión del vapor y de la velocidad del viento. Por lo tanto, la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y el viento también deben ser considerados en su determinación (Allen et al., 2006).

La evapotranspiración es un fenómeno muy complejo de calcular por el número de variables que intervienen en el proceso, como lo son el clima y las características del cultivo o de la cobertura vegetal. Los principales parámetros climáticos que afectan la evapotranspiración son la radiación solar, la temperatura, la humedad atmosférica y la velocidad del viento. En lo referente a las características del cultivo se encuentran el tipo de cultivo, la etapa de desarrollo en la que se encuentra, la profundidad radicular, la altura del cultivo, entre otras (Martínez-Cortes, 2014).

Los métodos más utilizados en el país para estimar la evapotranspiración son el de Thornthwaite, que solo está en función de la temperatura; y el de Blaney Criddle, el cual considera además de la temperatura, las horas diarias de sol, el tipo de cultivo, la duración del ciclo vegetativo, la temporada de siembra y la localización del sitio de interés. En ocasiones también se emplea el método de Penman Monteith que toma en cuenta datos climáticos como la radiación solar, temperatura, humedad del aire, velocidad del viento; datos del cultivo como la profundidad radicular, altura del cultivo, etapas de crecimiento, época de siembra, coeficiente de desarrollo; lo que lo convierte en un método muy completo pero a su vez complejo (Martínez-Cortes, 2014).

En este trabajo se empleó el método de Blaney Criddle, ya que no solo considera variables climáticas, también toma en cuenta las características del cultivo. Se determina aplicando las siguientes fórmulas:

$$E_t = K_{ci} * F \quad F = \sum_{i=1}^n f_i \quad f_i = P_i \left(\frac{T_i + 17.8}{21.8} \right)$$

Donde:

E_t = evapotranspiración potencial durante el ciclo vegetativo (cm).

F = factor de temperatura y luminosidad.

K_{ci} = coeficiente de cultivo.

n = número de meses que dura el ciclo vegetativo.

P_i = porcentaje de horas de sol del mes i .

T_i = temperatura media del mes i en °C.

Para determinar la evapotranspiración potencial de los distintos usos de suelo fue necesario proponer plantas representativas de cada uso. En el caso de pastizales se utilizó pastos como planta representativa; para la zona agrícola se utilizó el coeficiente del sorgo ya que éste cultivo es el que predomina en el área de estudio. Para las condiciones de bosque no fue necesario hacer uso de algún espécimen representativo ya que para estos casos existen coeficientes de cultivo que sirven para calcular la evapotranspiración. Las coberturas de uso de suelo presentan intervalos de acuerdo a su porcentaje de cobertura. Debido a lo anterior, se redujeron los coeficientes de cultivo K_c en un 5% a medida que se reduce el intervalo para cada una de las coberturas en la subcuenca Las Cruces como se muestra en la tabla 4.8.

Tabla 4.8. Coeficientes de desarrollo parcial.

MES	Cultivo (Sorgo)	Kc							
		Pastizal			Bosque				
		Mayor 75%	Entre el 50 y 75%	Menos de 50%	Mayor 75%	Entre el 50 y 75%	Entre el 25 y 50%	Menos de 25%	
ENERO	0.32	0.36	0.34	0.32	0.19	0.18	0.17	0.16	
FEBRERO	0.30	0.33	0.32	0.30	0.29	0.27	0.26	0.24	
MARZO	0.43	0.48	0.45	0.43	0.38	0.36	0.34	0.32	
ABRIL	0.64	0.71	0.68	0.64	0.48	0.45	0.43	0.40	
MAYO	0.74	0.83	0.78	0.74	0.65	0.61	0.58	0.54	
JUNIO	0.4	0.86	0.81	0.77	0.81	0.77	0.72	0.68	
JULIO	0.8	0.84	0.80	0.75	0.69	0.66	0.62	0.58	
AGOSTO	1.1	0.83	0.78	0.74	0.58	0.55	0.52	0.49	
SEPTIEMBRE	0.9	0.67	0.64	0.60	0.48	0.45	0.43	0.40	
OCTUBRE	0.65	0.52	0.50	0.47	0.40	0.38	0.36	0.34	
NOVIENBRE	0.41	0.46	0.43	0.41	0.33	0.32	0.30	0.28	
DICIEMBRE	0.34	0.38	0.36	0.34	0.19	0.18	0.17	0.16	

Fuente: (Mojarro et al., 2004), (Aparicio-Mijares, 1992).

En la tabla 4.8 se presentan los valores correspondientes al coeficiente de desarrollo parcial para cada mes. Es de notar, que en lo referente al cultivo se propuso el sorgo, comprendiendo su desarrollo durante cinco meses, iniciando su proceso en el mes de junio y terminando su ciclo vegetativo en el mes de octubre; a los meses restantes del año se le consideró como un pastizal con cobertura menor del 50%.

a) Evapotranspiración en la subcuenca Las Cruces

El cálculo se inició con la obtención de los datos de temperatura de cada una de las estaciones seleccionadas y se determinó el promedio mensual para cada una de ellas (tabla 4.11).

Tabla 4.9. Temperatura media mensual de las estaciones seleccionadas.

Estación	Temperatura media mensual de las estaciones											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
16074	19.68	20.66	21.91	20.86	17.88	13.56	12.37	12.20	12.11	13.78	16.54	18.19
12021	20.63	20.97	21.80	23.17	24.37	24.72	24.20	24.03	23.75	23.51	22.90	21.71
16006	24.02	25.66	27.59	29.34	29.69	28.45	27.13	26.88	26.32	26.16	25.46	24.38
16007	24.58	26.57	28.93	31.17	31.88	30.72	28.82	28.28	28.04	27.80	27.00	25.47
16133	20.82	22.29	24.01	25.95	26.97	26.56	25.21	24.91	24.54	23.58	22.45	21.24
6003	24.63	24.36	24.33	25.32	26.78	28.02	28.24	28.20	27.93	27.70	26.84	25.72
6005	24.10	24.17	24.24	25.31	26.85	28.48	28.48	28.44	27.90	27.61	26.54	25.00
16151	20.63	20.97	21.80	23.17	24.37	24.72	24.20	24.03	23.75	23.51	22.90	21.71
12007	26.98	29.00	30.83	32.52	32.56	30.63	28.98	28.90	29.00	29.01	28.58	27.62

Para tener resultados más aproximados a las condiciones reales se calculó la evapotranspiración mensual en cada estación; para los diferentes usos de suelo, con el método mencionado. En el cuadro siguiente se observa el cálculo de la ETP de la estación 16074 para la época reciente.

Tabla 4.10. Evapotranspiración potencial de la estación 16074.

Estación 16074				ETP'S (mm)									ETP
				Cultivo	Pastizal			Bosque					
MES	TEMP	Pi	Fi	(Sorgo)	Mayor 75% de el 50 y mas de 5%	Menor 25% de el 50 y mas de 2%	Mayor 75% de el 50 y mas de 5%	Menor 25% de el 50 y mas de 2%	Mayor 75% de el 50 y mas de 5%	Menor 25% de el 50 y mas de 2%	Ponderado		
Ene	19.68	7.80	13.40	42.73	47.75	45.24	42.73	25.47	24.13	22.79	21.45	35.29	
Feb	20.66	7.28	12.85	38.22	42.72	40.47	38.22	36.62	34.69	32.76	30.83	38.24	
Mar	21.91	8.41	15.32	65.12	72.78	68.95	65.12	58.22	55.16	52.09	49.03	63.14	
Abr	20.86	8.51	15.09	96.19	107.51	101.85	96.19	71.67	67.90	64.13	60.35	86.36	
May	17.88	9.11	14.90	110.22	123.19	116.70	110.22	96.28	91.22	86.15	81.08	105.79	
Jun	13.56	8.96	12.89	51.57	110.23	104.42	98.62	104.10	98.62	93.14	87.66	98.98	
Jul	12.37	9.19	12.72	101.78	106.96	101.33	95.70	88.23	83.59	78.94	74.30	94.65	
Ago	12.20	8.92	12.27	134.96	101.41	96.07	90.73	71.10	67.36	63.62	59.87	87.22	
Sep	12.11	8.28	11.36	102.22	76.61	72.58	68.55	53.95	51.11	48.27	45.43	66.04	
Oct	13.78	8.19	11.87	77.15	62.02	58.75	55.49	47.92	45.40	42.88	40.36	54.99	
Nov	16.54	7.63	12.02	49.06	54.83	51.95	49.06	39.98	37.88	35.77	33.67	45.70	
Dic	18.19	7.71	12.74	43.30	48.40	45.85	43.30	24.20	22.93	21.65	20.38	34.98	
			F.A.	0.09	0.35	0.03	0.02	0.17	0.26	0.04	0.03		

Por último se determinó el valor medio ponderado. Esta ponderación está en función del porcentaje de área de acuerdo al tipo cobertura; al que se identificó como el factor de área (F.A.). De esta manera se calcula la evapotranspiración para cada mes, empleando el valor de la última columna de la tabla 4.10. Es necesario realizar los cálculos para las nueve estaciones utilizadas, y para las dos épocas analizadas.

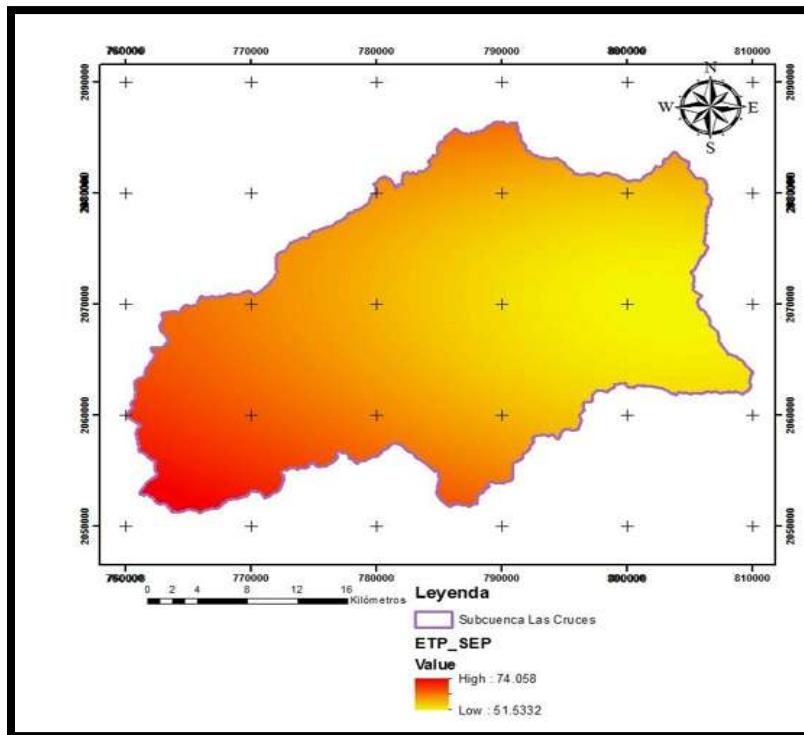


Figura 4.14. Evapotranspiración media del mes de septiembre en la subcuenca Las Cruces (época de 1996).

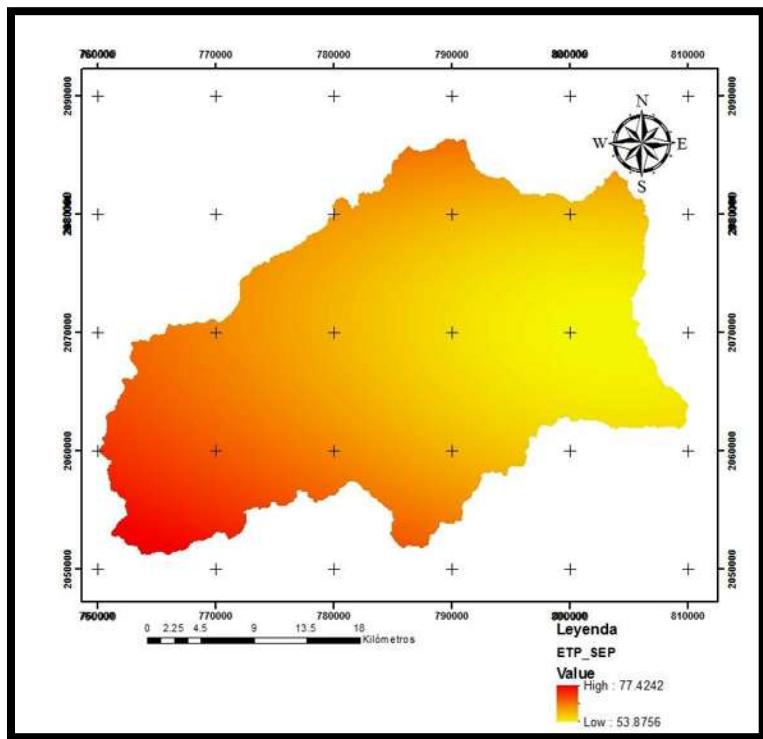


Figura 4.15. Evapotranspiración media del mes de septiembre en la subcuenca Las Cruces (época reciente).

4.1.4 Escurrimiento (NOM-011-CNA-2015)

Una vez que la precipitación alcanza la superficie terrestre, se infiltra hasta que el suelo se satura, a partir de este punto las depresiones en el terreno tienden a llenarse para después escurrir sobre la superficie (Martínez-Cortes, 2014).

El cálculo del escurrimiento superficial es un tanto difícil de estimar debido a que no se cuenta con datos suficientes, ya que depende de la cantidad e intensidad de la lluvia, cobertura vegetal, textura del suelo, uso del suelo, pendiente (Martínez-Cortes, 2014).

4.1.4.1 Coeficiente de escurrimiento

El coeficiente de escurrimiento sirve para determinar el volumen de agua que escurre superficialmente por una cuenca. Debido a la falta de información de registros hidrométricos se empleó un método indirecto llamado “precipitación escurrimiento” descrito en la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2015.

$$\text{Volumen anual de escurrimiento natural} = \frac{\text{Precipitación anual de la cuenca}}{\text{Área de la cuenca}} * \text{Coeficiente de escurrimiento}$$

Con apoyo de la información temática obtenida del INEGI, se clasifican los suelos de la cuenca en estudio en tres diferentes tipos: A (suelos permeables); B (suelos medianamente permeables) y, C (suelos casi impermeables). Con el tipo y uso de suelo se obtiene el valor del parámetro K (Tabla 4.11).

Tabla 4.11. Tipo y uso de suelo para determinar el parámetro k.

Tipo de suelo	Características		
A	Suelos permeables, tales como areanas profundas y loess poco compactos.		
B	Suelos medianamente permeables, tales como arenas de mediana profundidad: loess algo más compactos que los correspondientes a los suelos A, terrenos migajosos.		
C	Suelos casi impermeables, tales como arenas loess muy delgados sobre una capa impermeable o bien arcillas.		
USO DEL SUELO		TIPO DE SUELO	
		A	B
Barbecho, áreas incultas y desnudas		0.26	0.28
Cultivos:			0.3
En Hilera		0.24	0.27
Legumbres o rotación de pradera		0.24	0.27
Granos pequeños		0.24	0.27
Pastizal:			0.3
% del suelo cubierto o pastoreo			
Más del 75% - Poco -		0.14	0.20
Del 50 al 75% - Regular -		0.20	0.24
Menos del 50% - Excesivo -		0.24	0.28
Bosque:			
Cubierto más del 75%		0.07	0.16
Cubierto del 50 al 75%		0.12	0.22
Cubierto del 25 al 50%		0.17	0.26
Cubierto menos del 25%		0.22	0.28
Zonas urbanas		0.26	0.29
Caminos		0.27	0.30
Pradera permanente		0.18	0.24
			0.30

Si en la cuenca en estudio existen diferentes tipos y usos de suelo, el valor de K se calcula como la resultante de subdividir la cuenca en zonas homogéneas y obtener el promedio ponderado de todas ellas.

Una vez obtenido el valor de K, el coeficiente de escurrimiento anual (Ce), se calcula mediante las fórmulas siguientes:

$$Ce = \frac{K(PMA-250)}{2000}, \text{ si } K \leq 0.15$$

$$Ce = \frac{K(PMA-250)}{2000} + \frac{(K-0.15)}{1.5}, \text{ si } K > 0.15$$

El parámetro K está en función del uso y tipo del suelo, por lo que fue necesario elaborar dichos mapas con la información vectorial. Cabe mencionar que se crearon dos mapas de uso de suelo, uno para la época de 1996 (figura 4.6) y el otro para la época reciente (figura 4.7). El mapa de tipo de suelo es el que se presenta en la figura 4.4.

Con los mapas mencionados anteriormente se realizó álgebra de mapas en el Sistema de Información Geográfica (SIG) para determinar áreas homogéneas y asignar un valor de K para cada combinación posible según la tabla 4.13.

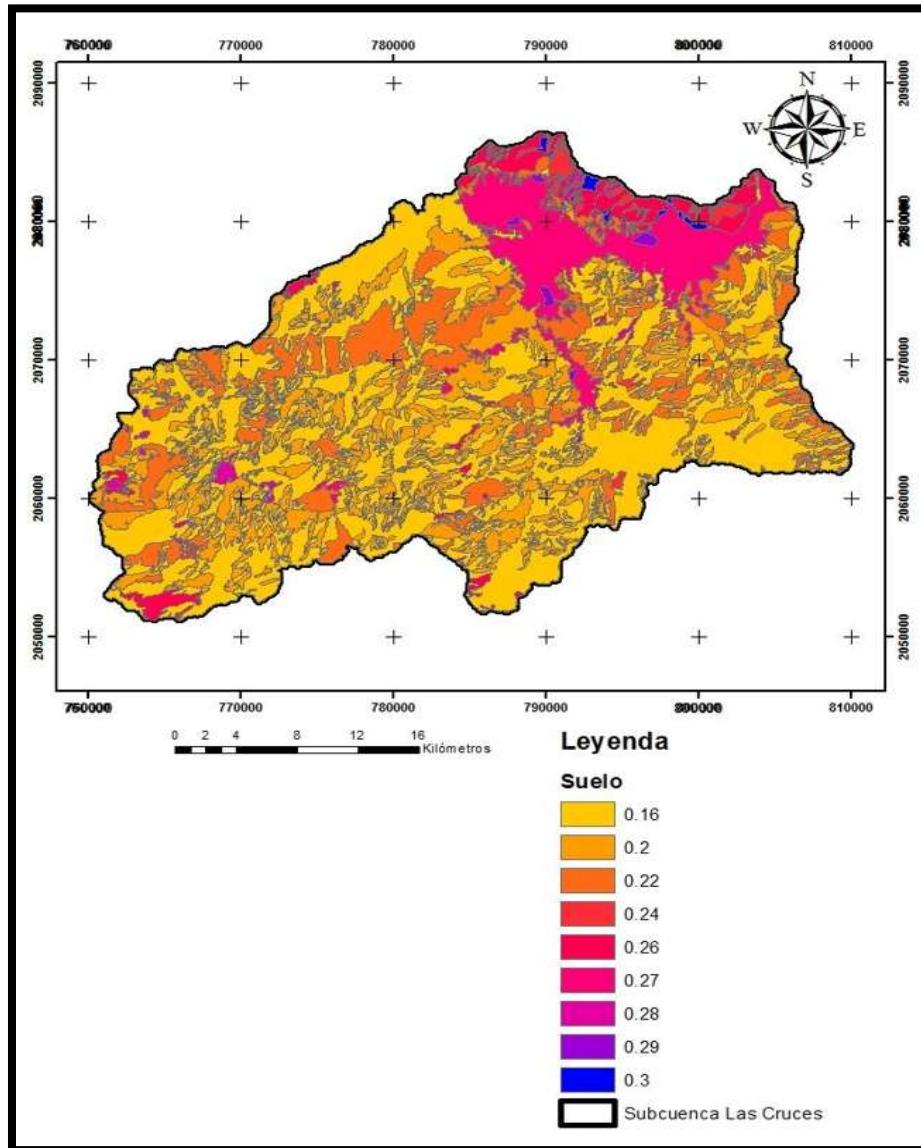


Figura 4.16. Parámetro “K” de la subcuenca Las Cruces (época de 1996).

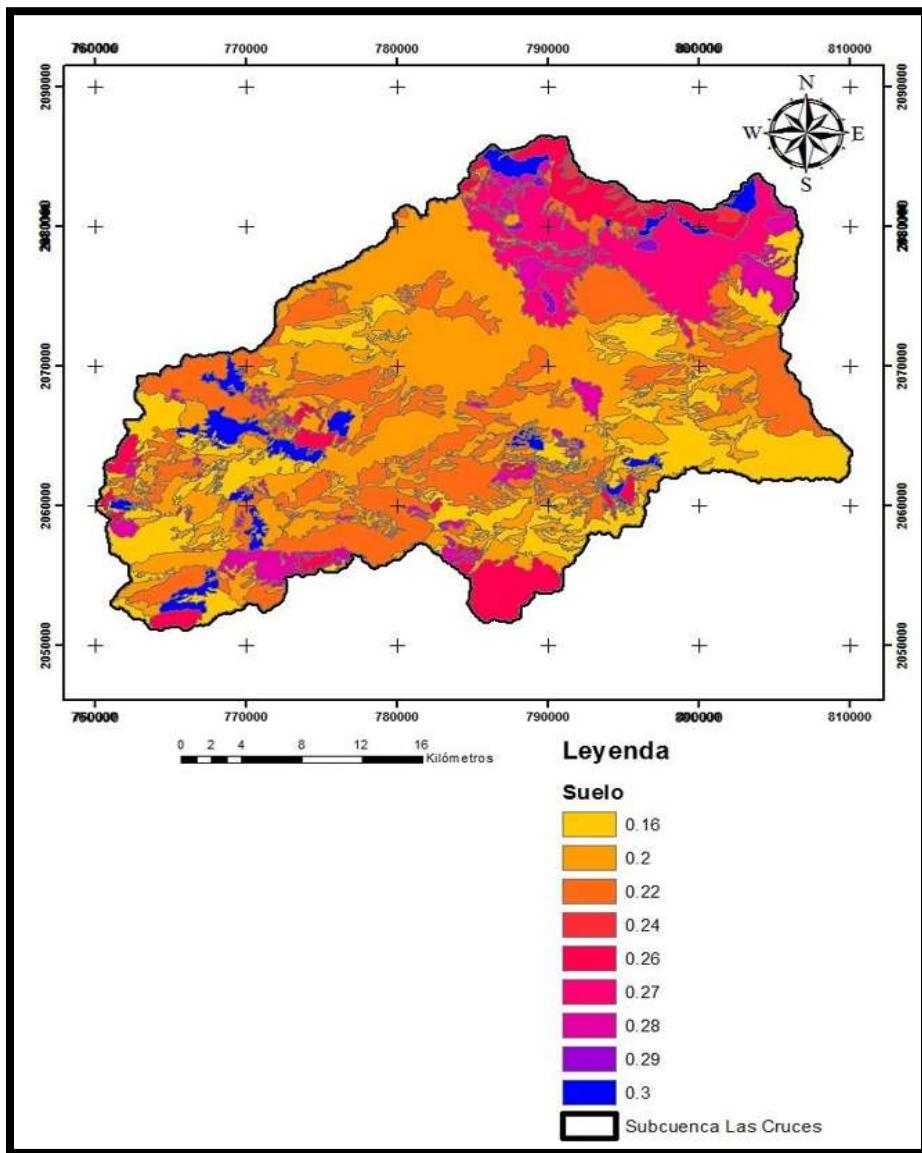


Figura 4.17. Parámetro “K” de la subcuenca Las Cruces (época reciente).

El mapa de K sirve como un coeficiente para saber cuál es el volumen escurrido en función de las características del suelo y la precipitación anual. Para calcular el coeficiente de escurrimiento, una vez más se realizó álgebra de mapas en el SIG. El mapa de la figura 4.18 representa el coeficiente de escurrimiento anual de la época de 1996 y, el mapa de la figura 4.19 muestra el coeficiente de escurrimiento anual para la época reciente.

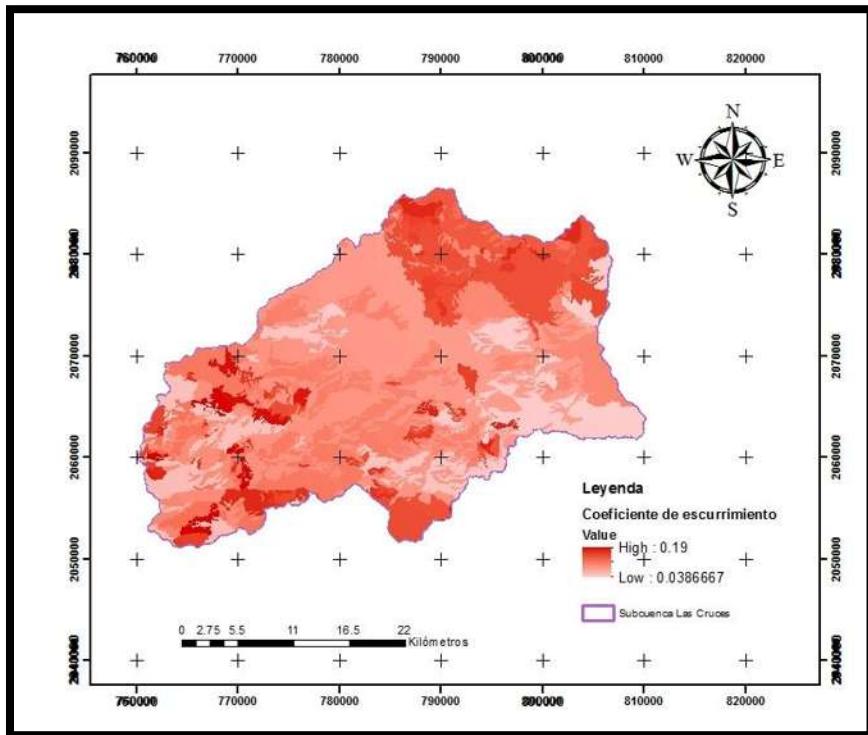


Figura 4.18. Coeficiente de escurrimiento anual de la subcuenca Las Cruces (época de 1996).

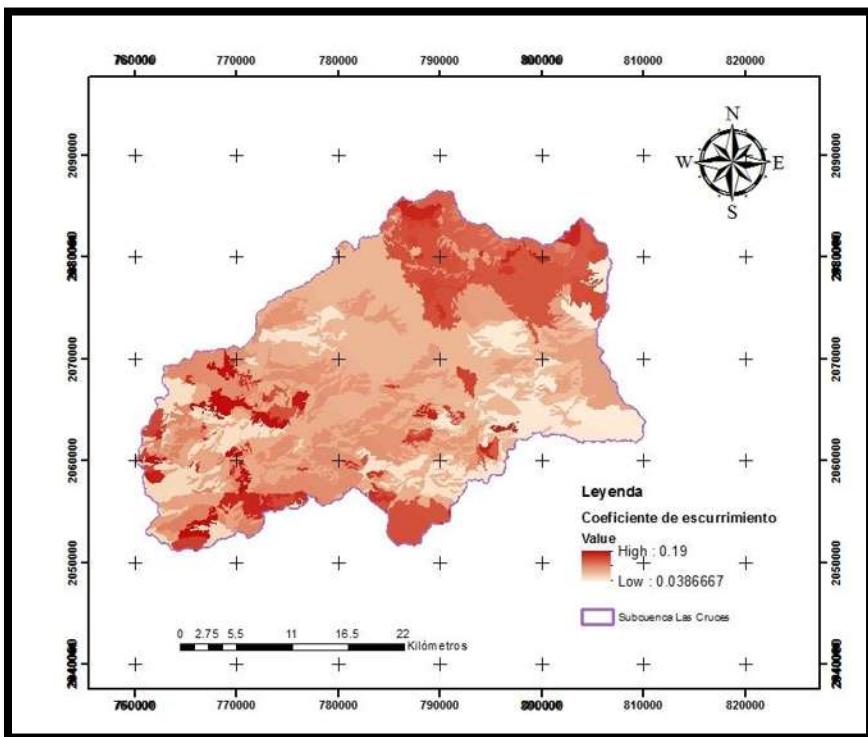


Figura 4.19. Coeficiente de escurrimiento de la subcuenca Las Cruces (época reciente).

Para calcular los mapas de escurrimiento mensual se utilizó la siguiente fórmula basada en la hipótesis de que la variación del coeficiente de escurrimiento mensual es

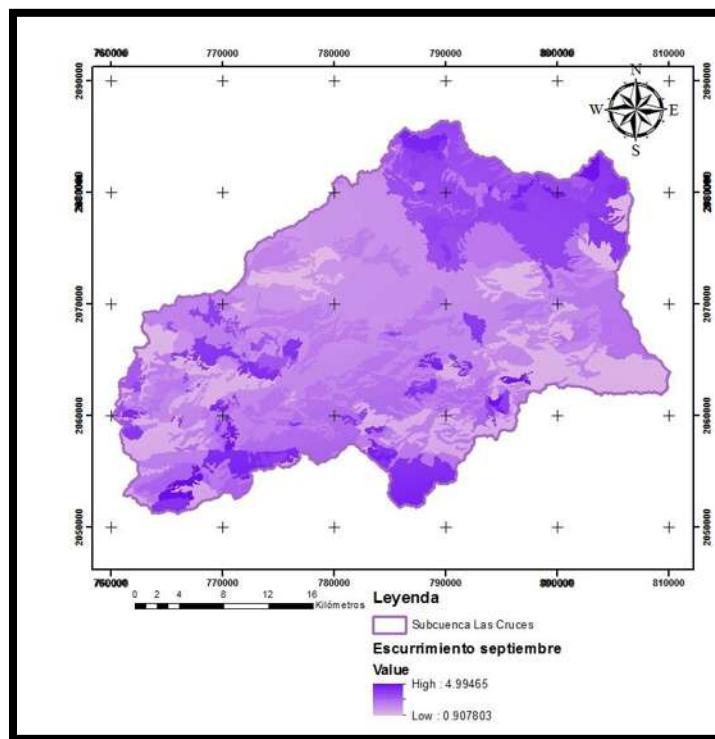
directamente proporcional al valor del coeficiente de escurrimiento anual por el coeficiente de precipitación mensual.

$$Ce(men) = \frac{Pm(men)}{Pm(anual)} Ce(anual)$$

El escurrimiento de cada uno de los meses queda definido por la siguiente ecuación.

$$Esc(men) = Pm(men) * Ce(men)$$

Con ayuda de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se obtuvieron mapas con la información de la precipitación mensual en la subcuenca Las Cruces, los cuales se multiplicaron por el coeficiente de escurrimiento mensual para estimar el escurrimiento para cada mes del año. En la figura 4.20 se presenta el comportamiento del escurrimiento para el mes de septiembre de la época reciente en la subcuenca Las Cruces.



Volumen de escurrimiento

Como se detalla en la NOM-011-CNA-2015, para calcular el volumen de escurrimiento se necesita el área de la cuenca, la altura de precipitación y el coeficiente de escurrimiento. Con la multiplicación de las variables anteriores se calculó el volumen escurrido para las dos épocas analizadas en la subcuenca Las Cruces.

Ese método tiene validez si la precipitación anual se encuentra entre 350 y 2,150mm. La precipitación media anual de la subcuenca las Cruces es de 741.37mm, por lo que es posible estimar el volumen de escurrimiento con este método.

El volumen anual de escurrimiento natural estimado para la época de 1996 es 59.591 hm³, mientras que para la época reciente es de 74.144 hm³. El volumen de escurrimiento anual de 1996 representa el 80.4% del escurrimiento actual, lo anterior se debe al cambio en la cobertura de uso de suelo en la subcuenca Las Cruces.

4.1.5 Recarga (NOM-011-CNA-2015)

La recarga en la subcuenca se determinó por medio de un balance hídrico, en el cual se estimaron los volúmenes de agua que entraron y salieron del sistema. Las entradas son prácticamente la precipitación, de ésta, cierta cantidad se infiltra dependiendo del coeficiente de escurrimiento mensual, y de esta porción de lluvia infiltrada una parte se evapotranspira; esta última representa la salida principal de agua del sistema. El agua que no se evapotranspira de la porción infiltrada es a lo que se le conoce como recarga. Estos procesos sirven para reproducir el ciclo hidrológico y, obtener para la subcuenca los volúmenes de entradas y salidas (Martínez-Cortes, 2014).

En función de un balance hídrico la recarga se obtiene empleando las siguientes expresiones:

$$It_i = P_i(1 - Ce_i) \quad R_i = It_i - ETP_i$$

Donde:

- R_i = es la recarga media del mes “i”.
- It_i = es la infiltración media del mes “i”.
- ETP_i = es la evapotranspiración potencial del mes “i”.
- P_i = es la precipitación media del mes “i”.
- Ce_i = coeficiente de escurrimiento del mes “i”.

La aplicación de las ecuaciones anteriores se realizó en el SIG por medio de la herramienta denominada álgebra de mapas, lo que permitió determinar el escurrimiento, la infiltración, la evapotranspiración y la recarga para la subcuenca Las Cruces en dos épocas distintas.

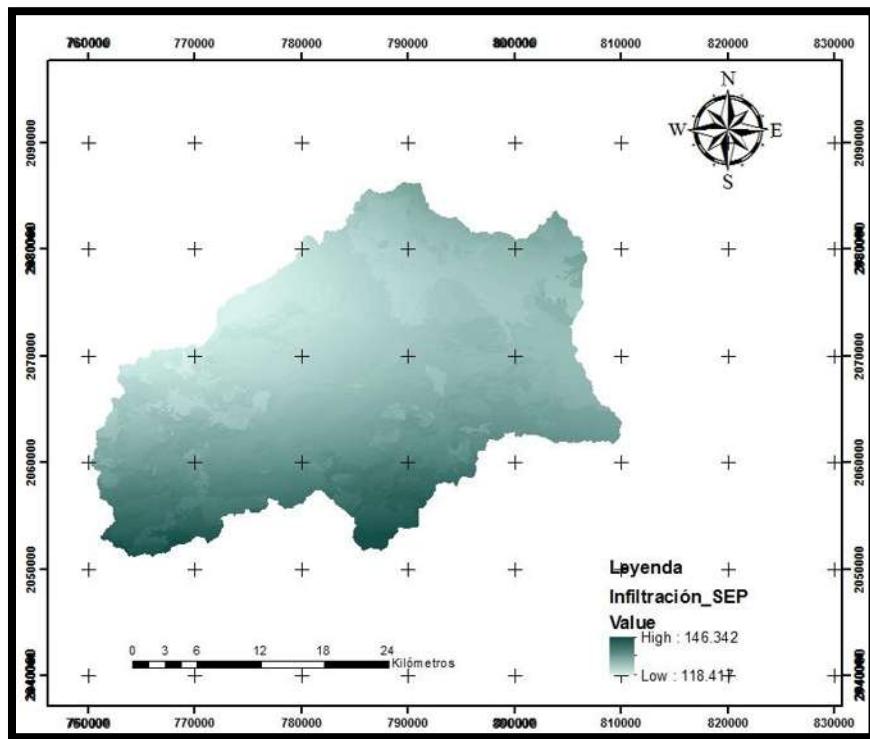


Figura 4.21. Infiltración media mensual del mes de septiembre en la subcuenca las Cruces (época reciente).

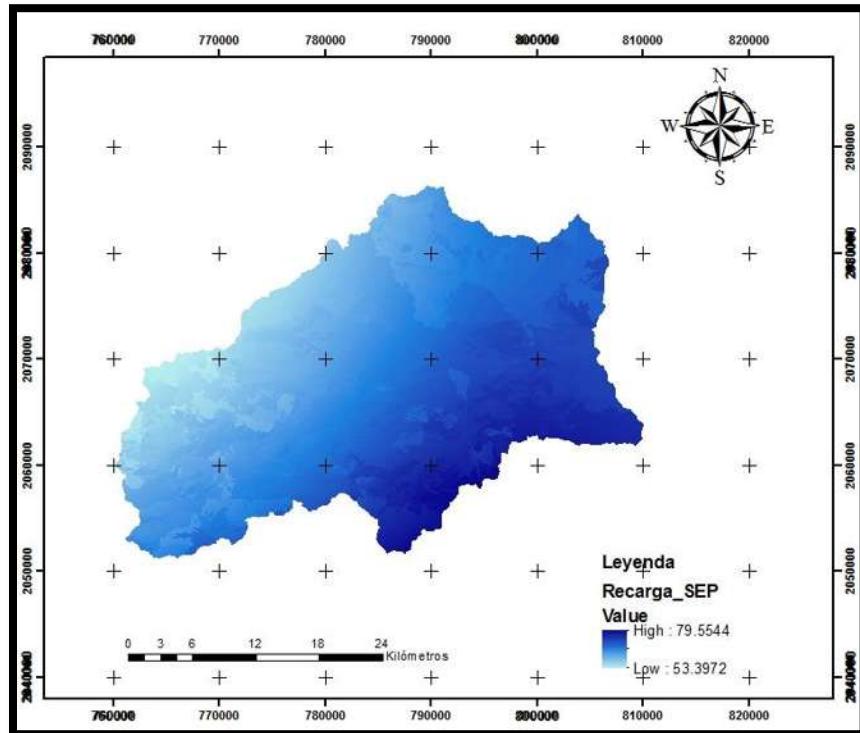


Figura 4.22. Recarga media mensual del mes de septiembre en la subcuenca las Cruces (época reciente).

4.2 Método del USDA-SCS

En la figura 4.23 se muestra la metodología que se siguió para encontrar el volumen de recarga. En esta segunda opción se calculó el coeficiente de escurrimiento por medio del método implementado por el Servicio de Conservación de Suelos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América (USDA-SCS).

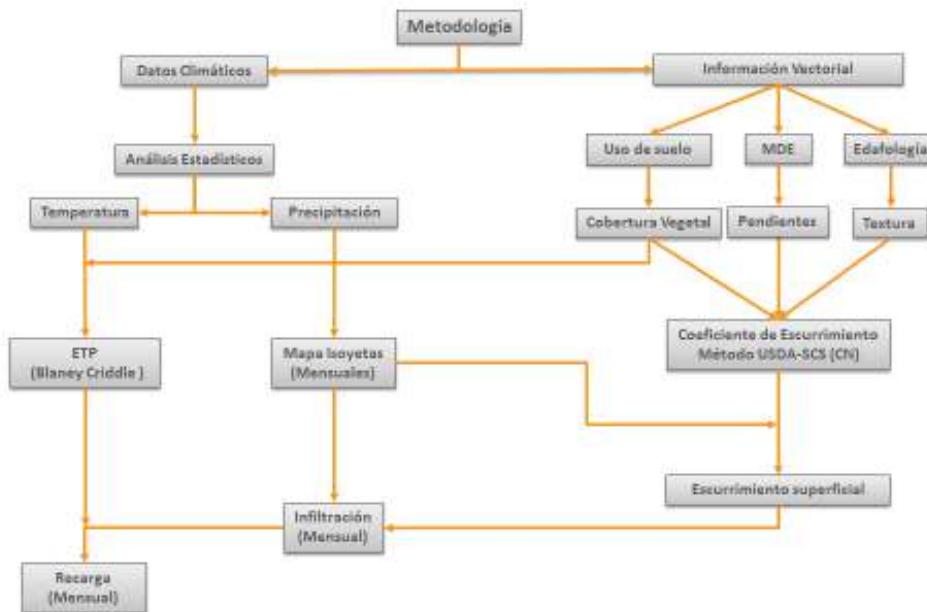


Figura 4.23. Metodología para el cálculo de la recarga natural.

4.2.1 Escurrimiento (USDA-SCS)

El método del Servicio de Conservación de Suelos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América (USDA-SCS), por sus siglas en inglés, toma en cuenta la mayoría de los parámetros que inciden en el escurrimiento.

El escurrimiento está en función de unas curvas numéricas que son similares al coeficiente de escurrimiento y fueron obtenidas por el USDA-SCS con base en la observación de hidrogramas procedentes de varias tormentas en diferentes cuencas de Estados Unidos. Estas curvas dependen del tipo de suelo, condición hidrológica de la cuenca, uso y manejo del suelo, así como de su antecedente condición de humedad. El cálculo del escurrimiento medio a partir de las curvas numéricas es obtenido mediante las siguientes relaciones:

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S}$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

Donde:

Q= escurrimiento medio (mm).

P= precipitación.

S= potencial máximo de retención de humedad (mm).

CN= curva numérica o número de curva.

Este método solo es válido si $0.2 \cdot S < P$, es decir, si la precipitación es mayor que la retención máxima de humedad, ya que si no se cumple esto la lluvia es retenida por el suelo y por lo tanto no escurre.

El valor del número de curva está determinado por los siguientes factores:

a) Suelo

El suelo es uno de los elementos que mayor incidencia tienen en el proceso de escurrimiento, su contenido de materia orgánica y textura son factores importantes que controlan el proceso de infiltración. El USDA-SCS tomó en cuenta la textura del suelo y la infiltración que presentan para agruparlos en 4 clases.

Tabla 4.12. Clases del suelo de acuerdo al USDA-SCS.

Clase	Descripción de las características del suelo
A	Suelo con bajo potencial de escurrimiento. Incluye arenas profundas con muy poco limo y arcilla. "Suelo muy Permeable"
B	Son suelos arenosos menos profundos y con más agregados que el grupo A. Este grupo tiene una infiltración mayor que el promedio cuando se encuentra totalmente saturado. Aquí se incluyen arenas finas y limos.
C	Comprende suelos someros y con considerable contenido de arcilla, pero menos que los del grupo D. Esta clase tiene una infiltración menor que la del promedio después de la saturación.
D	Suelos con alto potencial de escurrimiento. Son suelos pesados con alto contenido de arcillas expansibles, suelos profundos con sub-horizontes de roca sana. "Suelos Muy Impermeables"

b) Condición hidrológica o cobertura vegetal del terreno

La cobertura vegetal del terreno incide directamente sobre la interceptación de la precipitación y la rugosidad que se opone al escurrimiento. Para este factor se determinaron tres clases de cobertura, así como una serie de parámetros para agruparlas de acuerdo con el uso del terreno.

Clases de cobertura vegetal:

Buena > de 75%

Regular entre 50 y 75%

Mala < de 50%

Tabla 4.13. Condiciones de cobertura.

VEGETACIÓN	CONDICIÓN HIDROLÓGICA	DESCRIPCIÓN
Áreas Boscosas	Buena	Densamente pobladas y sin pastorear.
	Regular	Moderadamente Pastoreado y con crecimiento.
	Mala	Tienen árboles dispersos y fuertemente pastoreados.
Cultivos	Buena	Cultivos que forman parte de una buena rotación de cultivos y con pendientes suaves.
	Mala	Áreas agrícolas manejadas como monocultivos.
Pastos Naturales	Buena	Ligeramente pastoreados y con más de tres cuartas partes del área total con cubierta vegetal.
	Regular	Moderadamente pastoreados, con la mitad o las tres cuartas partes del área total con cubierta vegetal.
	Mala	Dispersos, fuertemente pastoreados, con menos que la mitad del área total con cobertura vegetal.
Praderas y pastizal	Buena	Con del 75% de cubierta vegetal y están sujetas a un pastoreo ligero.
	Regular	Tienen una cubierta vegetal entre el 50% y el 75% del área.
	Mala	Con exceso de pastoreo o tienen una cubierta vegetal en menos del 50% del área.

c) Uso de suelo

El uso de suelo es un factor determinante en la estimación del escurrimiento superficial. Por tal motivo se consideran las diferentes prácticas de manejo a que es sometido. Con este último parámetro se compone el cuadro para obtener la curva numérica que se utilizó.

Tabla 4.14. Números de curva empleados en la subcuenca Las Cruces.

COBERTURA VEGETAL	CONDICIÓN HIDROLÓGICA	A	B	C	D
Zonas Desnudas	N/A	77	86	91	94
Cultivo	S > 1 %	70	79	84	88
	S < 1 %	65	75	82	86
Pastizal	MALA	68	79	86	99
	REGULAR	49	69	79	84
	BUENO	39	61	74	80
Bosque	MALA	45	66	77	83
	REGULAR	36	60	73	79
	BUENO	25	55	70	77
Zona Urbana	N/A	74	84	90	92

d) Cálculo del número de curva para la subcuenca Las Cruces

Como se ha descrito en los párrafos anteriores, el escurrimiento está condicionado por diversos parámetros entre ellos la cobertura del suelo. Con la finalidad de estimar los efectos de los cambios que ha dejado la transformación de los ecosistemas, se determinaron los números de curvas (CN) para las dos épocas en estudio.

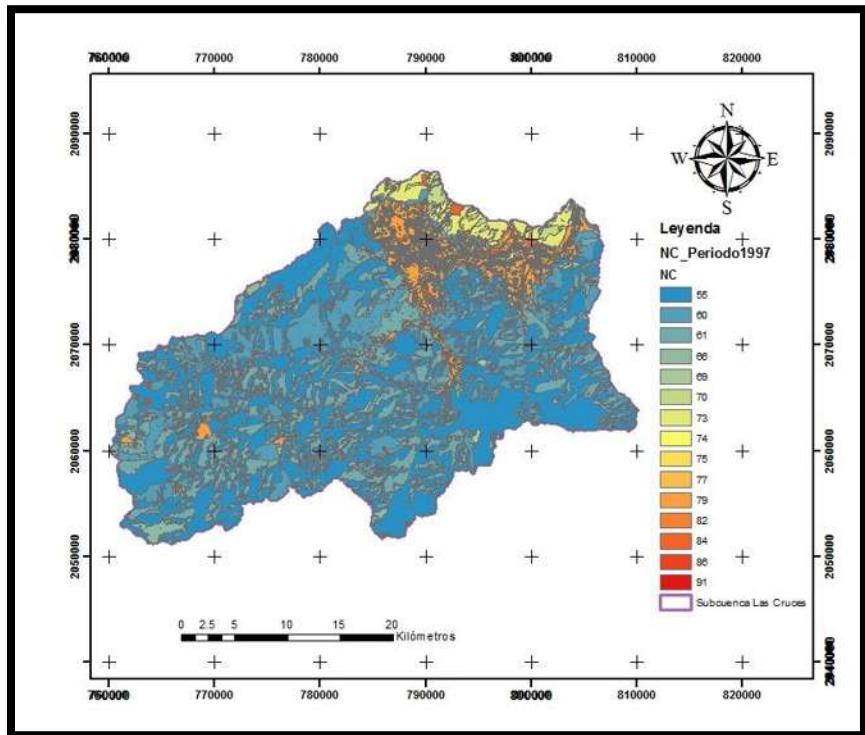


Figura 4.24. Número de curva (CN) para la subcuenca Las Cruces (época de 1996).

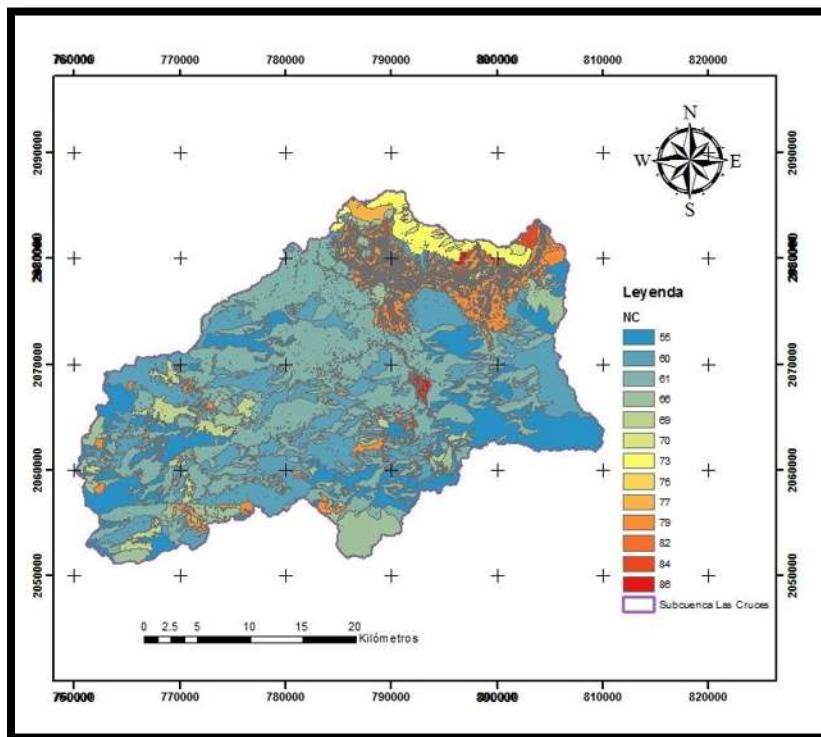


Figura 4.25. Número de curva (CN) para la subcuenca Las Cruces (época reciente).

e) Cálculo del escurreimiento mensual

El método del USDA-SCS para determinar el escurrimiento fue diseñado para estimar el agua que escurre por eventos de tormenta, haciendo referencia a ésta condición se acepta que la lluvia mensual tiene un comportamiento semejante a las tormentas, y se calculó el escurrimiento para cada uno de los meses del año, así como el dato anual. Con la ayuda de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se elaboraron mapas de la precipitación mensual y del número de curva (CN) en la subcuenca Las Cruces (apartados 4.1.2 y 4.2.1 respectivamente). Con la herramienta Geoprocessing Intersect del software ArcGIS se procesaron los mapas señalados para determinar el escurrimiento para cada mes del año y para las dos épocas en estudio. En la figura 4.26 se presenta el comportamiento del escurrimiento en la subcuenca Las Cruces para el mes de septiembre de la época reciente.

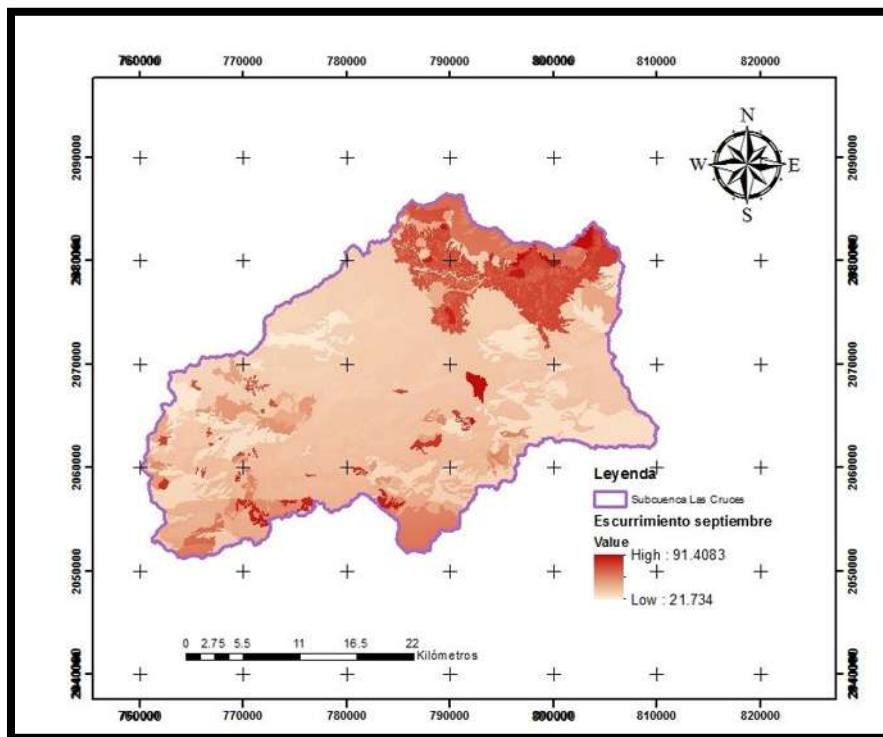


Figura 4. 26. Escurrimiento medio mensual del mes de septiembre en la subcuenca las Cruces (época reciente).

4.2.2 Recarga (USDA-SCS)

En función al modelo del “balance hídrico” la recarga queda definida con las siguientes expresiones:

$$R_i = It_i - ETP_i \quad It_i = P_i - Q_i$$

Donde:

- R_i = es la recarga media del mes “i”.
- It_i = es la infiltración media del mes “i”.
- ETP_i = es la Evapotranspiración potencial del mes “i”.
- P_i = es la precipitación media del mes “i”.

- Q_i = escurrimiento medio del mes “i”.

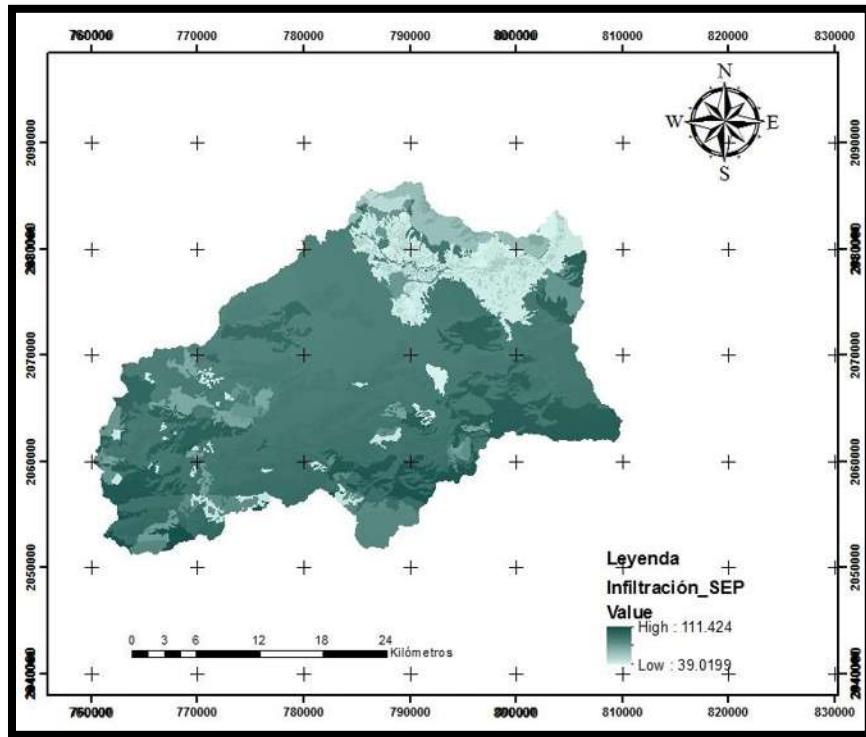


Figura 4.27. Infiltración media mensual del mes de septiembre en la subcuenca las Cruces (época reciente).

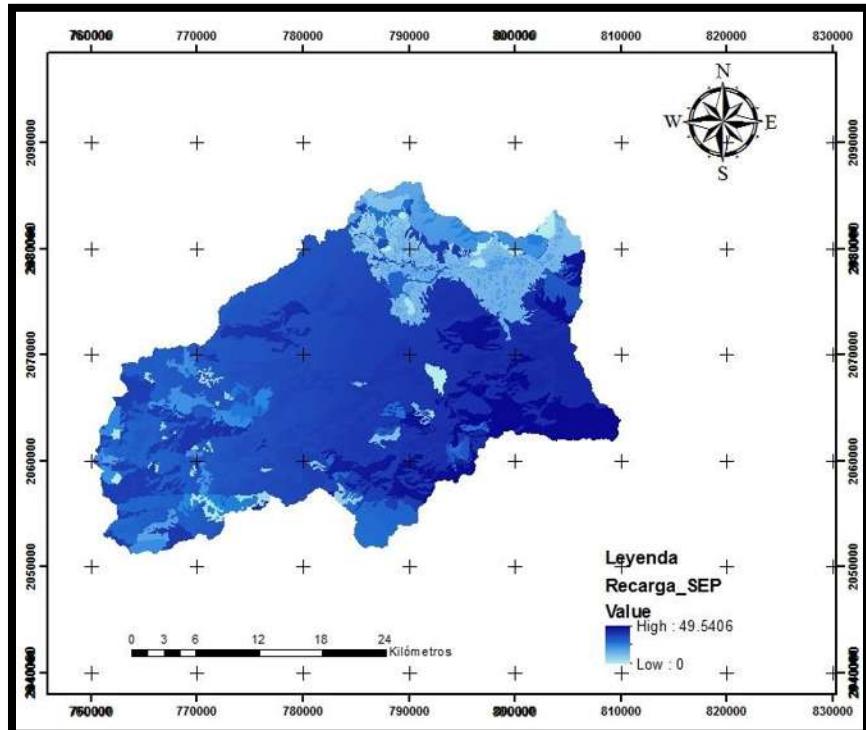


Figura 4.28. Recarga media mensual del mes de septiembre en la subcuenca las Cruces (época reciente).

4.3 Método empleando el Modelo de Témez

El Modelo opera realizando balances de humedad entre los distintos procesos de transporte de agua que tienen lugar en un sistema hidrológico, durante las diferentes fases del ciclo hidrológico. Todo el proceso está gobernado por el principio de continuidad y de balance de masas y, regulado por leyes específicas de reparto y transferencia entre los distintos términos del balance.

El modelo considera el terreno dividido en dos zonas:

- Una zona superior, no saturada, en cuyos poros coexisten agua y aire, y su contenido de agua es asimilable a la humedad del suelo.
- Una zona inferior o acuífero, la cual se encuentra saturada y funciona como un almacenamiento subterráneo que desagua a la red de drenaje superficial.

El balance de humedad que realiza el modelo está constituido por el flujo entrante de precipitación (P_i), el cual se reparte entre una serie de flujos salientes, de flujos intermedios y de almacenamientos intermedios (figura 4.29).

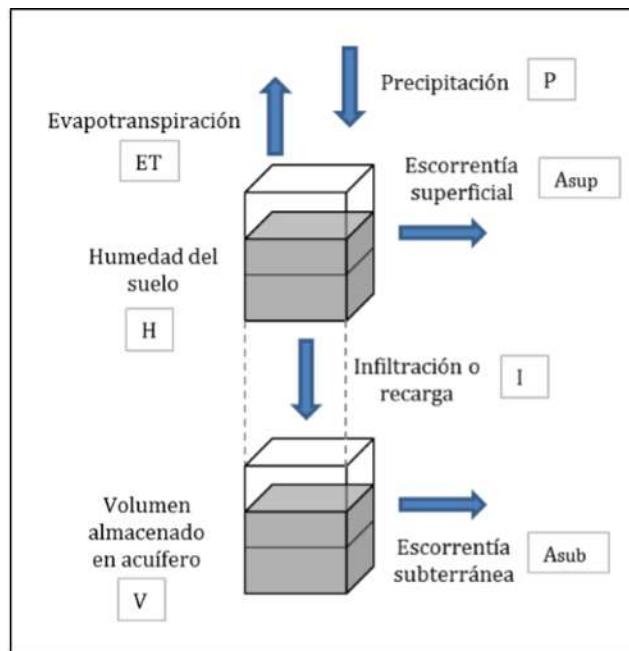


Figura 4.29. Esquema de flujos y almacenamiento del modelo de Témez.

- Flujos de entrada: precipitación (P).
- Flujos de salida: evapotranspiración real (ET), la aportación superficial (A_{sup}) y la aportación de origen subterráneo (A_{sub}).
- Flujos intermedios: únicamente la infiltración (I), agua que pasa de la parte superior del suelo a la zona inferior o acuífero, donde se considera que el tiempo de paso de este flujo por el suelo es inferior al tiempo de simulación (el mes), por lo que la infiltración se identifica con la recarga al acuífero durante el mes “ t ” (Rt).
- Almacenamientos intermedios: la humedad del suelo (H_t) y el volumen almacenado en el acuífero (V_t).

En el modelo de Témez, el agua que procede de la precipitación (P) se distribuye de tres formas diferentes:

- El excedente (T), que a su vez se descompone en un flujo de infiltración al acuífero desde la zona superior del suelo (It), y en un flujo que fluye superficialmente (A_{sup}). Este flujo superficial se evaca a través del cauce dentro del período presente de simulación. Parte del agua almacenada en la zona inferior o acuífero desagua en el intervalo de tiempo presente (A_{sub}), y la otra parte permanece en dicho almacenamiento subterráneo para salir en meses posteriores.

- La evapotranspiración real (Et) de una parte o de toda la humedad almacenada en la zona superior del suelo (Ht).

- La humedad del suelo (Ht) que se almacena en la zona superior del suelo, cuyo límite es la capacidad máxima de almacenamiento hídrico del (H_{max}).

A continuación se desarrollan las ecuaciones de estado del modelo, ecuaciones que regulan los procesos de transferencia hídrica y, del resto del ciclo hidrológico (Témez, 1977).

4.3.1 Escurrimiento (Modelo de Témez)

a) Cálculo del excedente

Se considera que una fracción del agua que precipita sobre el terreno (P_t) es almacenada en la zona superior del suelo (Ht), y que el resto, el excedente (Tt), se distribuye entre la aportación de origen superficial (A_{supt}) y la infiltración hacia el acuífero (It) o recarga (Rt).

El excedente total (Tt) se calcula según la siguiente ley:

$$T_t = \begin{cases} 0 & \text{si } P_t \leq P_0 \\ \frac{(P_t - P_0)^2}{P_t - \delta_t - 2P_0} & \text{si } P_t > P_0 \end{cases}$$

Donde:

$$\begin{aligned} \delta &= H_{max} - H_{t-1} + EPT_t \\ P_0 &= C(H_{max} - H_{t-1}) \end{aligned}$$

Siendo:

- H_{max} : la capacidad máxima de almacenamiento del suelo (mm), que depende de las características del suelo y la vegetación donde tiene lugar la evapotranspiración. El valor de H_{max} aumenta conforme lo hacen aquellos factores que facilitan la retención de agua en el suelo y el espesor del mismo que puede ser drenado por evapotranspiración.

- H_{t-1} : el almacenamiento de agua en el suelo (mm) en el instante t-1.

- EPT_t : la evapotranspiración potencial (mm) en el intervalo de tiempo t. Es la máxima evapotranspiración que se produciría en condiciones óptimas de humedad.

- C: el coeficiente de inicio de excedente. Un factor adimensional que toma valores en torno a 0.30 (Témez, 1977), y define el inicio de la escorrentía antes de que se alcance el máximo de humedad en el suelo H_{max} .

Tabla 4.15. Valores aproximados de H_{\max} en función del uso de suelo (Estrela et al., 1999).

Uso de suelo	H_{\max} (mm)
Superficies artificiales	0
Espacios con poca vegetación	100
Tierras de labor en secano	155
Tierras de labor en regadío	215
Praderas y pastizales naturales	150
Sistemas agrícolas heterogéneos	195
Cultivos permanentes	210
Vegetación arbustiva	135
Bosque mixto	220
Bosques de frondosas y coníferas	230
Zonas húmedas, superficies de agua y artificiales	300

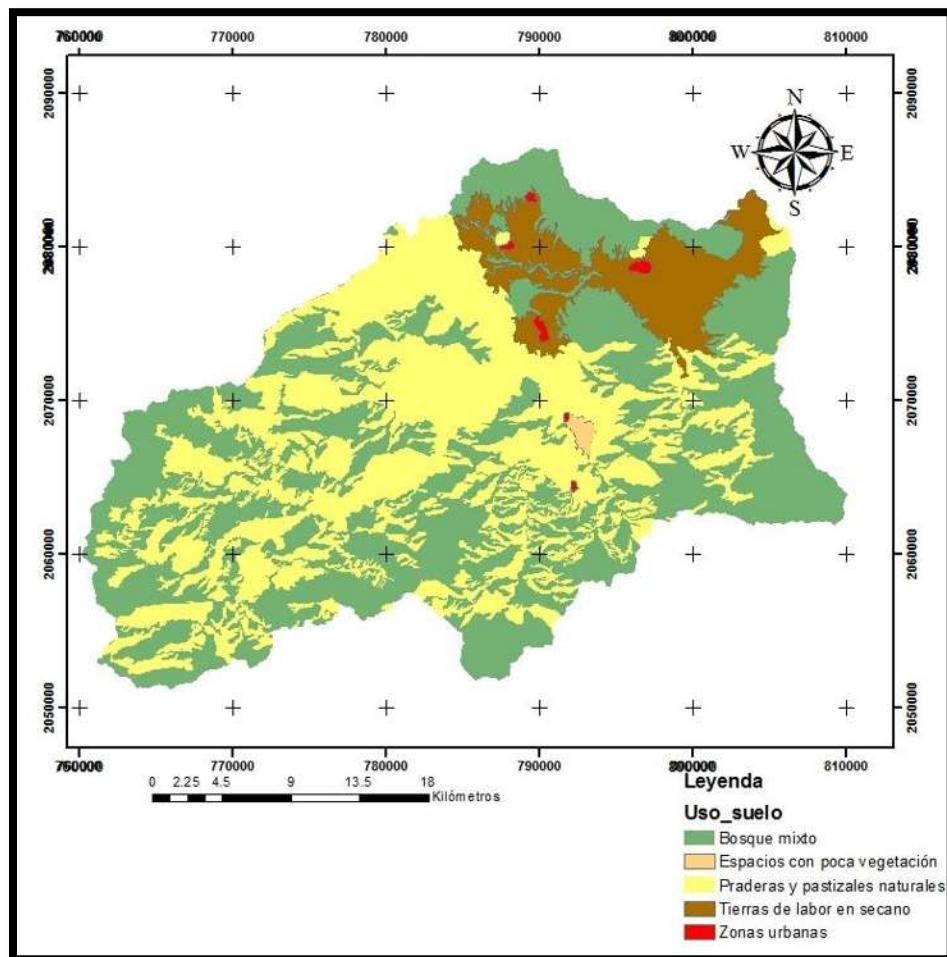


Figura 4.30. Uso de suelo para estimar H_{\max} en la subcuenca Las Cruces.

Tabla 4.16. Valores de H_{\max} en la subcuenca Las Cruces (época reciente).

Uso de suelo	H_{\max}	Area	% Área
Bosque mixto	220	516.61	50.23
Espacios con poca vegetación	100	3.07	0.30
Praderas y pastizales naturales	150	411.30	39.99
Tierras de labor en secano	155	94.31	9.17
Zonas urbanas	0	3.19	0.31

De este modo, cuando la cantidad de lluvia es inferior a P_{0t} toda el agua de lluvia se almacena como humedad del suelo, siendo susceptible de convertirse en evapotranspiración y, el excedente total es nulo. A partir del valor de P_{0t} , la precipitación incrementa simultáneamente el excedente y la componente de humedad del suelo.

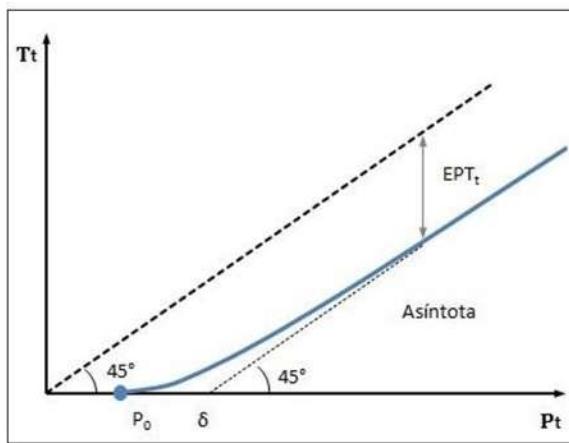


Figura 4.1. Ley de excedentes.

b) Cálculo del almacenamiento superficial e infiltración

Una vez estimado el excedente (T_t), la humedad en el suelo al final de cada mes se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$H_t = \max \begin{cases} 0 \\ H_{t-1} + P_t - T_t - ETP_t \end{cases}$$

Que representa el cierre del balance entre el agua que queda en el suelo y la ETP. Si el resultado es negativo, la humedad del suelo al final del periodo es nula y la evapotranspiración potencial no se habrá desarrollado en su totalidad.

La evapotranspiración real que se genera (ET_t) se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$ET_t = \min \begin{cases} H_{t-1} + P_t - T_t \\ ETP_t \end{cases}$$

Siempre que exista suficiente agua en el suelo, la evapotranspiración se desarrolla hasta alcanzar la evapotranspiración potencial. En caso de no haberla, la humedad en el suelo al final de mes será nula.

c) Cálculo de la aportación superficial

La parte del excedente que no infiltra al acuífero se convierte en escorrentía superficial al final del mes “t”, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$A_{supt} = T_t - I_t$$

4.3.2 Recarga (Modelo de Témez)

La infiltración o recarga al acuífero es función del excedente y del parámetro denominado infiltración máxima (I_{max}), que expresa la máxima cantidad de agua que puede infiltrarse en el terreno en un mes, a través de la siguiente expresión empírica:

$$I_t = I_{max} * \frac{T_t}{T_t + I_{max}}$$

Tabla 4.17. Valores aproximados de I_{max} en función de la litología del terreno (Estrela et al., 1999).

Litología	I_{max} (mm)
Mat. aluvial de origen indiferenciado	400
Calizas y dolomías	1000
Margas	85
Margas yesíferas	75
Yesos	64
Materiales arenosos	450
Materiales gravo-arenosos	500
Calcarenitas (Macigno)	250
Arcosas	150
Rañas	95
Granitos	65
Rocas metamórficas	20
Gneiss	55
Pizarras	40
Rocas volcánicas	275

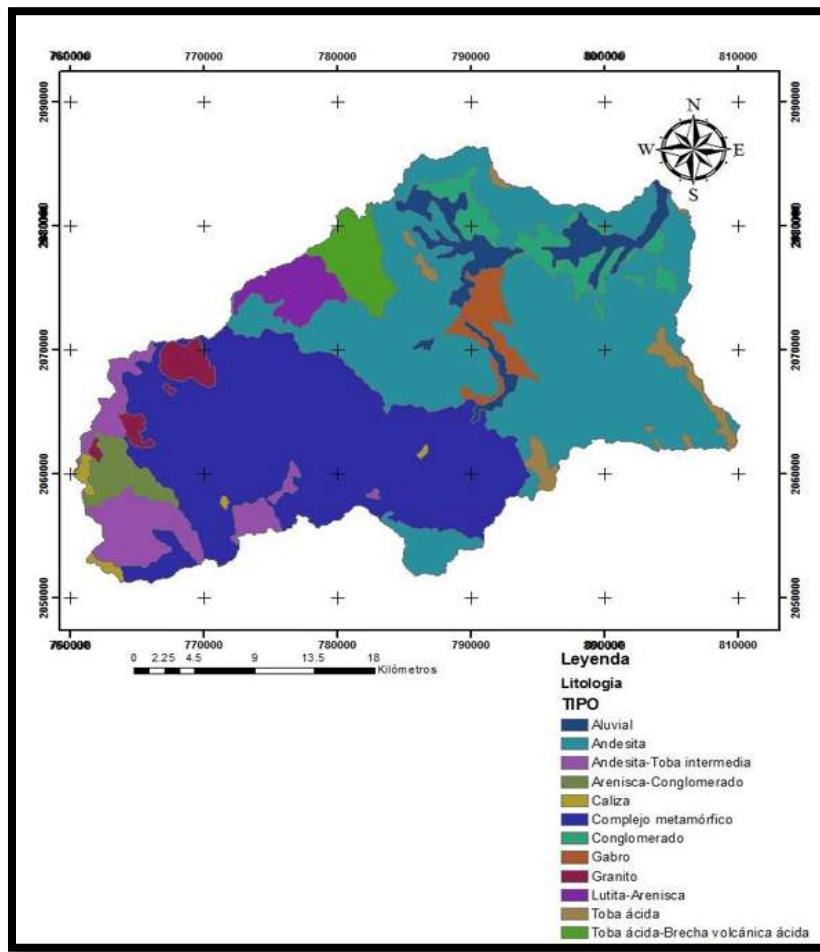


Figura 4.31. Litología para estimar I_{max} en la subcuenca Las Cruces.

Tabla 4.18. Valores de I_{max} en la subcuenca Las Cruces (época reciente).

Litología	I_{max}	Area	% Area
Aluvial	400	49.98	4.86
Andesita	275	401.97	39.08
Andesita-Toba intermedia	600	57.58	5.60
Arenisca-Conglomerado	450	19.91	1.94
Caliza	275	5.70	0.55
Complejo metamórfico	20	339.16	32.98
Conglomerado	30	38.77	3.77
Gabro	65	23.61	2.30
Granito	65	16.57	1.61
Lutita-Arenisca	1000	26.18	2.55
Toba ácida	1000	19.75	1.92
Toba ácida-Brecha volcánica ácida	275	29.29	2.85

De la anterior expresión se deduce que a medida que el excedente aumenta también lo hace la infiltración, y que ésta tiende asintóticamente a su máximo, I_{max} . Además, si el excedente es nulo, la infiltración también lo es. La infiltración máxima (I_{max}) no depende exclusivamente de las propiedades del terreno, sino también de la intensidad y concentración de las precipitaciones.

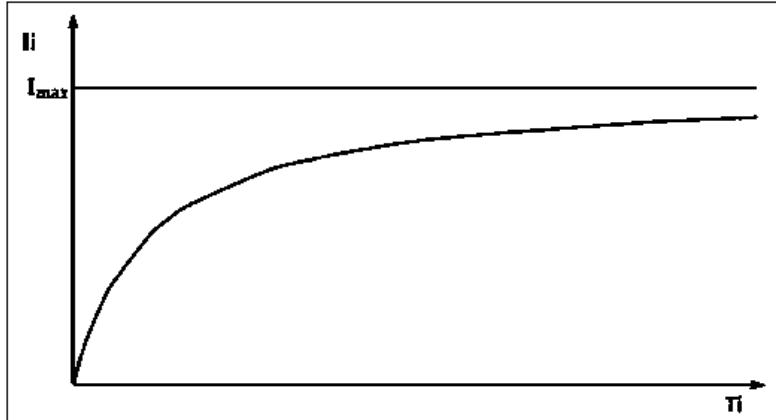


Figura 4.32. Relación de la infiltración al acuífero con el excedente existente.

d) Cálculo de la aportación subterránea

La aportación subterránea producida durante el mes “t” (A_{subt}), está formada por el drenaje del agua almacenada en el acuífero (V_t) por encima del umbral de salida a la red fluvial.

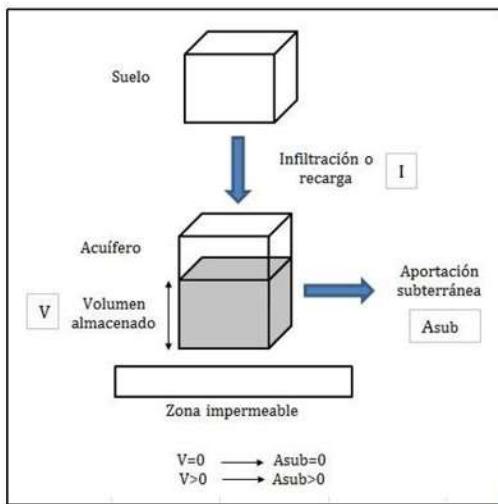


Figura 4.33. Producción de escorrentía subterránea.

Para simular el comportamiento del acuífero se plantea el modelo unicelular, el cual está basado en la función exponencial que representa la curva de agotamiento de un manantial. La variable de estado es el volumen almacenado en el acuífero (V_t). El caudal cedido a la red superficial (Q_t) se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$Q_t = \alpha * V_t$$

Donde:

α es una constante con dimensiones de $[T^{-1}]$.

Al acuífero se aplica una ecuación de balance de masa del tipo representado por la ecuación diferencial ordinaria siguiente:

$$I_t - Q_t = \frac{dV_t}{dt}$$

Donde:

- $I(t)$ son las entradas al acuífero en el tiempo t (recargas).
- $Q(t)$ son las salidas del acuífero en el tiempo t (extracciones).
- $V(t)$ es el volumen almacenado en el acuífero en el tiempo t .

Sustituyendo la primera ecuación en la segunda y considerando $R(t)$ como el caudal de recarga neta al acuífero en el tiempo t , se tiene:

$$R_t - \alpha * V_t = \frac{dV_t}{dt}$$

La resolución de esta ecuación diferencial conduce, para la condición inicial de volumen inicial de acuífero (V_0) y para un caudal de recarga constante (R), a:

$$V_t = V_0 e^{-\alpha t} + \frac{R}{\alpha} (1 - e^{-\alpha t})$$

Expresando el volumen como una función del caudal y haciendo $R=0$ se obtiene una expresión que representa la curva de agotamiento del acuífero:

$$Q_t = Q_0 * e^{-\alpha t}$$

La recarga (R) se puede expresar como $R = S \cdot I_t$ (siendo S la superficie de la cuenca), ya que está constituida por la cantidad de agua infiltrada al acuífero. De esta forma la ecuación que determina el volumen en el acuífero en el mes t sería la siguiente:

$$V_t = V_{t-1} e^{-\alpha * \Delta t} + \frac{S * I_t}{\alpha} (1 - e^{-\alpha \Delta t})$$

Este modelo subterráneo presenta la ventaja de la simplicidad de cálculo, pero la desventaja de que supone una simplificación excesiva del sistema.

En resumen, el modelo de Témez contempla el ajuste de cuatro parámetros: H_{max} , C , I_{max} y α . Los parámetros H_{max} y C regulan el almacenamiento de agua en el suelo, I_{max} separa la escorrentía superficial de la subterránea y, el parámetro α regula el drenaje subterráneo. El efecto de los valores iniciales se reduce a medida que transcurre el tiempo, por lo que estos resultan, en la mayoría de los casos, poco significativos. En el anexo III se muestra la tabla del modelo de Témez.

5. Resultados

5.1 Cambio de cobertura vegetal y uso de suelo

En la subcuenca las Cruces el cambio que se presentó entre las épocas de 1996 y reciente muestra una disminución del 29.70% en los bosques (cubiertos más del 75% de su superficie), y un incremento del 13.80% en pastizales (cubiertos más del 75% de su superficie). En los bosques cubiertos entre el 50% y 75%, se estima un incremento del 7.20%, lo anterior se debe a la deforestación o tala de lo que se consideraba como bosques cubiertos más del 75%, incrementando las áreas desnudas en esas zonas.

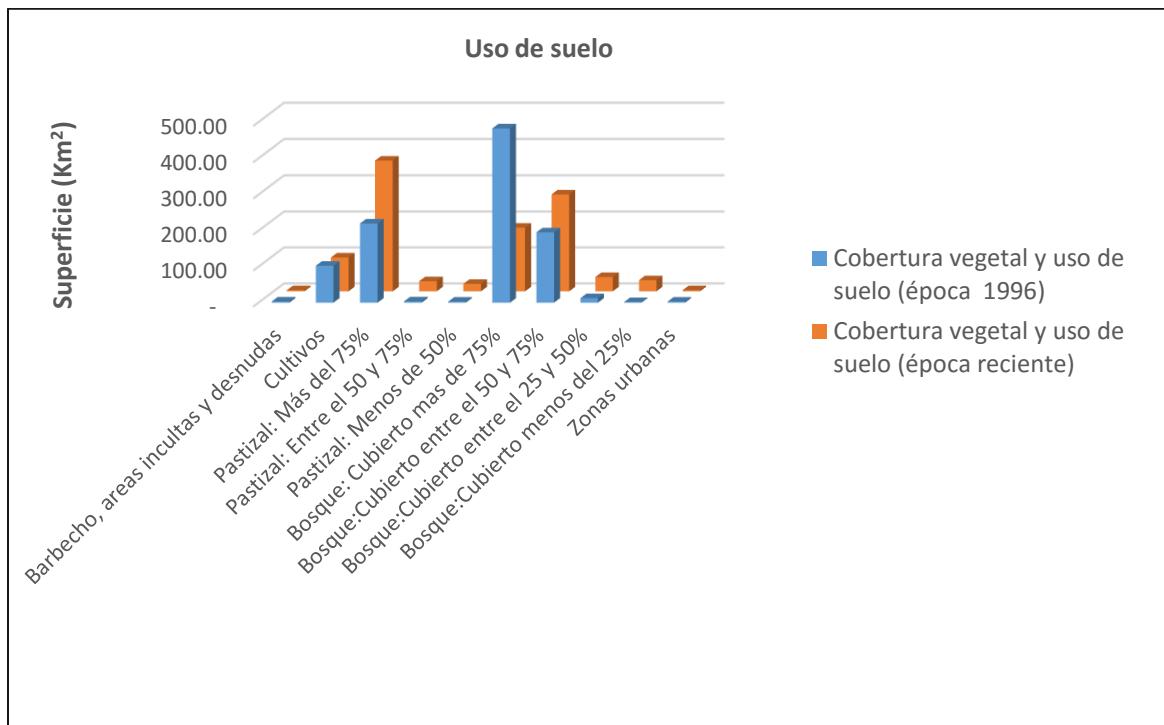


Figura 5.1. Cambio de cobertura vegetal y uso de suelo en la subcuenca Las Cruces.

5.2 Efectos en la evapotranspiración

Este proceso se alteró por el cambio de uso de suelo; con un incremento de la evapotranspiración para la época resiente del 3.8%, alcanzando un volumen anual de 782.078 hm³, como se muestra en la figura 5.2.

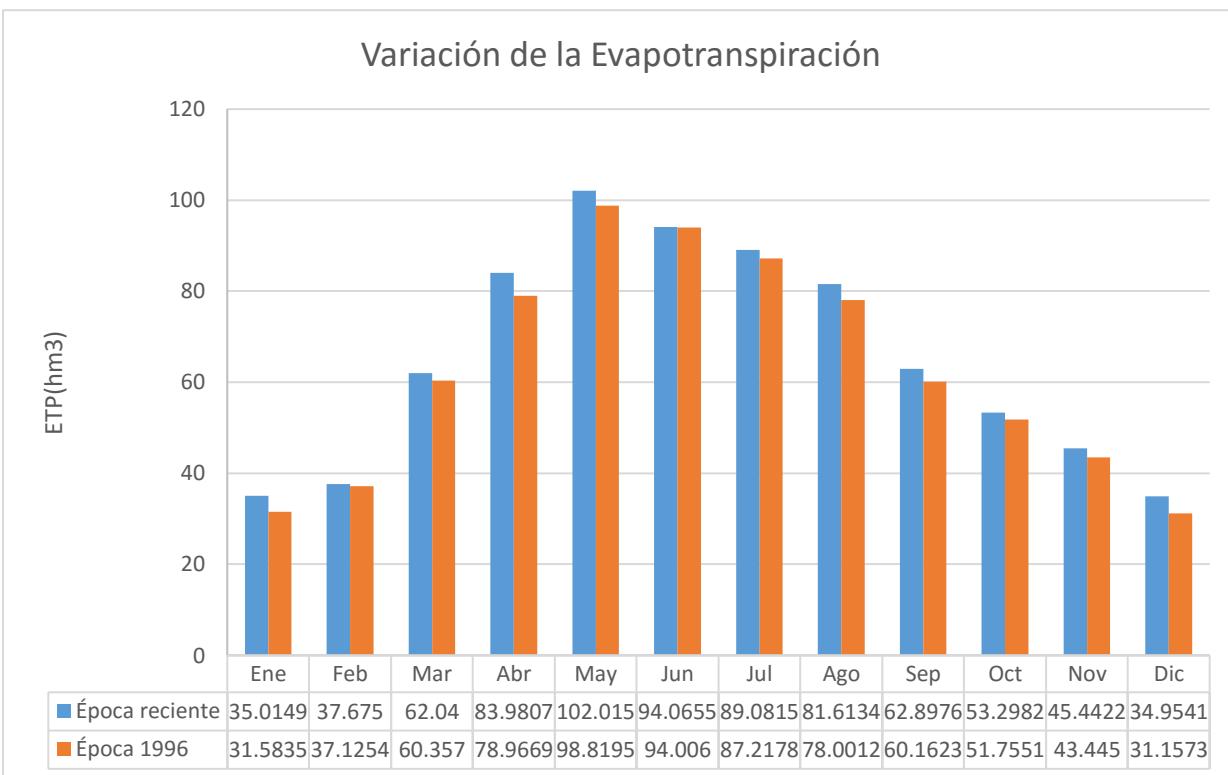


Figura 5.2. Variación mensual de la evapotranspiración en la subcuenca Las Cruces, entre las épocas de 1996 y reciente.

Una de las consecuencias del incremento de la evapotranspiración es el correspondiente incremento del volumen de agua necesario para el desarrollo de los cultivos, lo que ocasiona una mayor extracción de agua de los mantes freáticos.

5.3 Efectos en el escurrimiento

a) Empleando la NOM-011-CNA-2015

Con esta metodología el escurrimiento mostró cambios considerables a causa del cambio de uso de suelo. En la época reciente el volumen de escurrimiento anual es de 12.236 hm³, mientras que el escurrimiento para la época del año 1996 se calculó en 9.831 hm³, lo que representa el 80.34% respecto a las condiciones recientes.

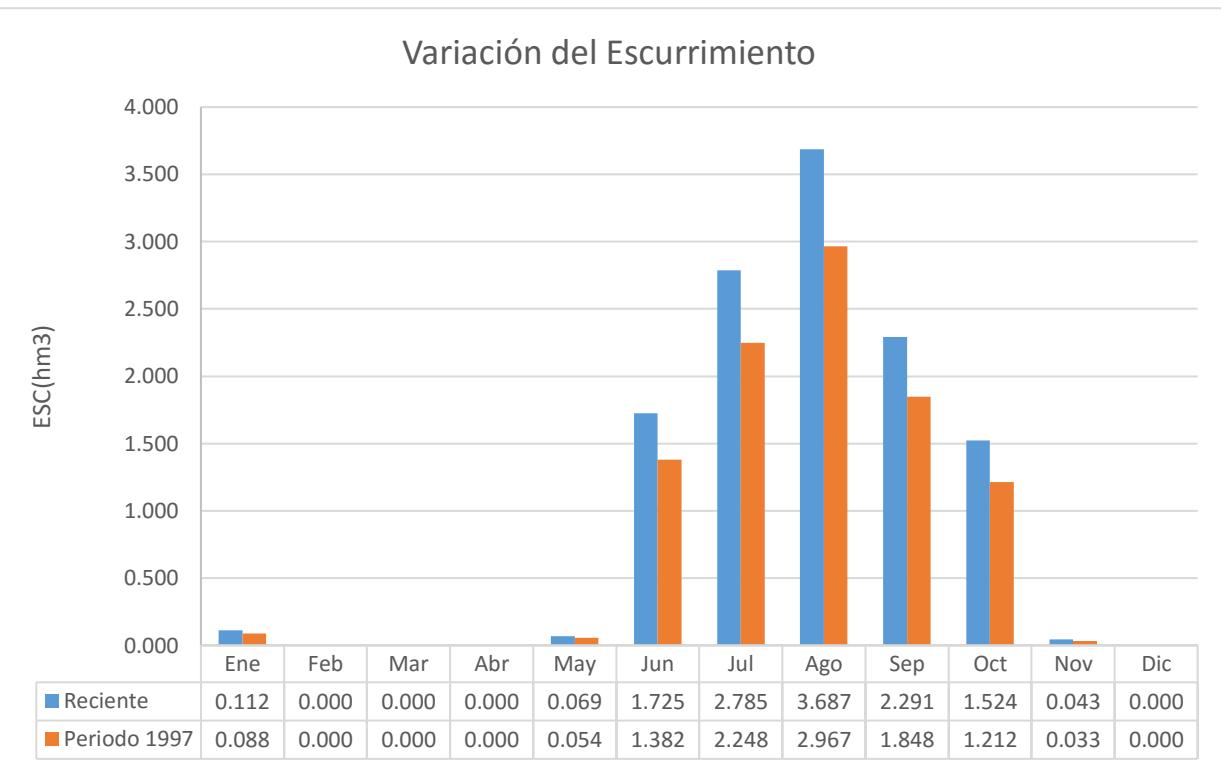


Figura 5.3. Variación mensual del escurrimiento en la subcuenca Las Cruces, entre las épocas de 1996 y reciente, empleando la NOM-011-CNA-2015.

La alteración de este proceso modifica las condiciones de la superficie terrestre provocando que ésta se erosione por la falta de cobertura vegetal.

b) Empleando el método del USDA-SCS

Con esta metodología el escurrimiento también mostró cambios considerables a causa del cambio de uso de suelo. En la época reciente el volumen de escurrimiento anual es de 218.502 hm³, mientras que el escurrimiento para la época del año 1996 se calculó en 196.870 hm³, lo que representa el 90.1% respecto a las condiciones recientes.

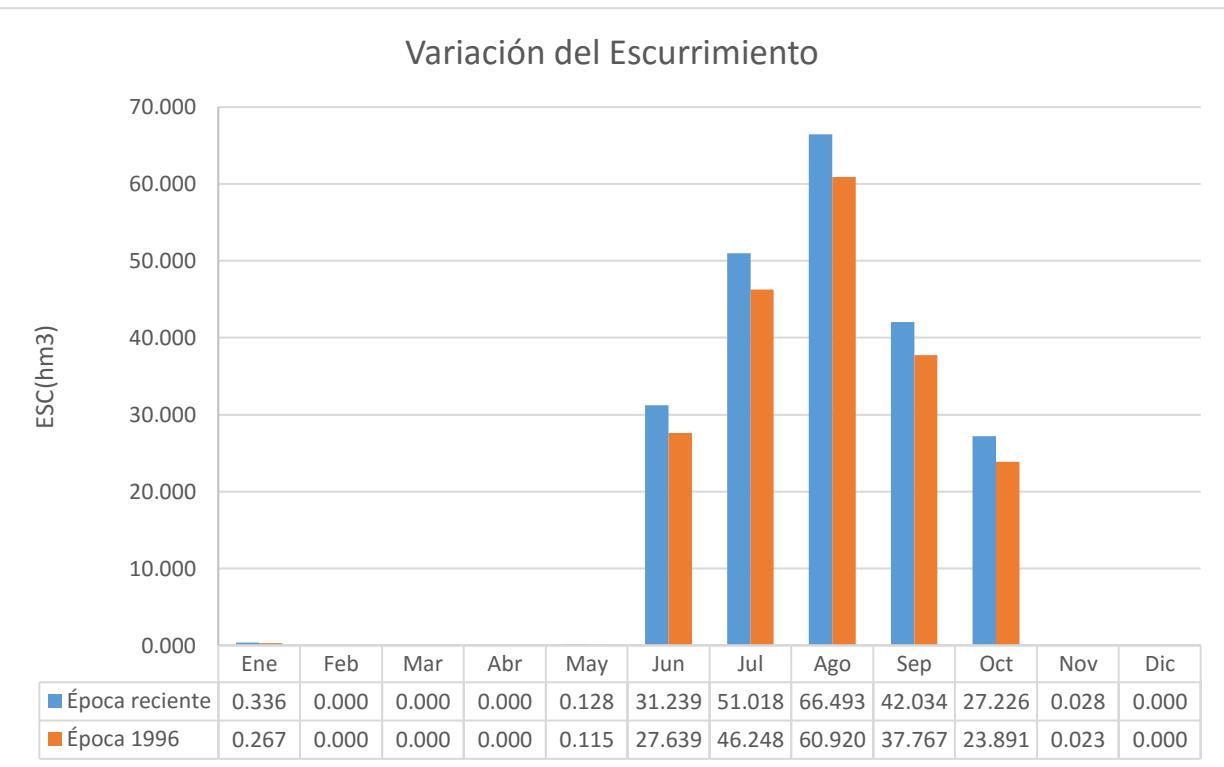


Figura 5.4. Variación mensual del escurrimiento en la subcuenca Las Cruces, entre las épocas de 1996 y reciente, empleando el método del USDA-SCS.

c) Empleando el método del modelo Témez

Para la época reciente se calculó con este modelo un volumen de escurrimiento de 17.89 hm³.



Figura 5.5. Variación mensual del escurrimiento en la subcuenca Las Cruces en la época reciente, empleando el modelo de Témez.

5.4 Efectos en la recarga

Este proceso es el que tiene mayor relevancia en el ciclo hidrológico con relación a los acuíferos, ya que determina la cantidad de agua subterránea disponible para su aprovechamiento en los diversos usos consuntivos (Martínez-Cortes, 2014).

El efecto del cambio de uso de suelo en la recarga de los acuíferos, por lo general es de carácter irreversible.

a) Empleando la NOM-011-CNA-2015

Con esta metodología los resultados indican que en la época del año 1996 se recargaban de forma natural aproximadamente 297.21 hm^3 en la subcuenca Las Cruces. En la época reciente el volumen de recarga se redujo en un 4.3% con un valor de 284.48 hm^3 .

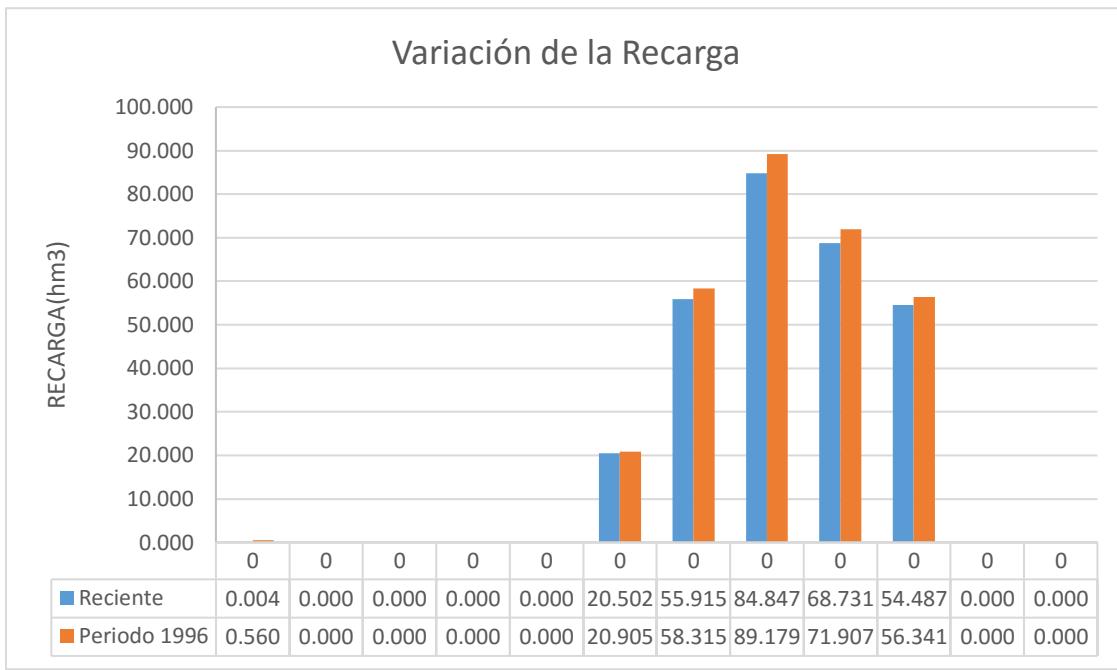


Figura 5.6. Variación mensual de la recarga en la subcuenca Las Cruces, entre las épocas de 1996 y reciente, empleando la NOM-011-CNA-2015.

b) Empleando el método del USDA-SCS

Con esta metodología los resultados indican que en la época del año 1996 se recargaban de forma natural aproximadamente 122.80 hm³ en la subcuenca Las Cruces. En la época reciente el volumen de recarga se redujo en un 22.1% con respecto a la época de 1996, con un valor de 95.65 hm³.

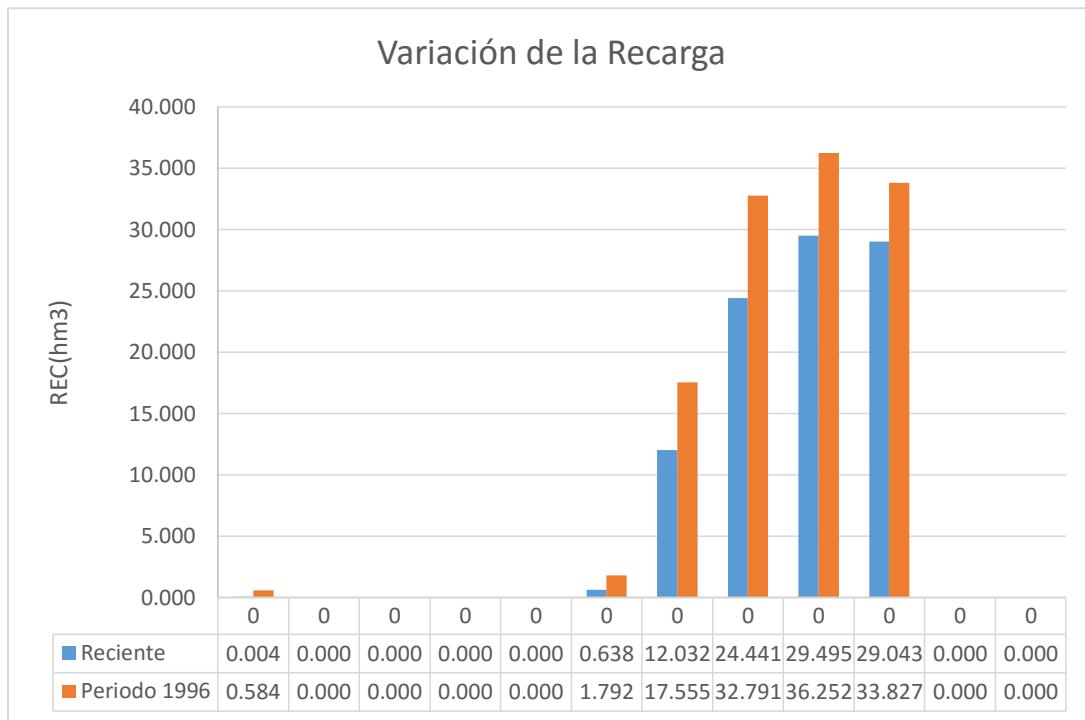


Figura 5.7. Variación mensual de la recarga en la subcuenca Las Cruces, entre las épocas de 1996 y reciente, empleando el método del USDA-SCS.

c) Empleando el método del modelo de Témez

La recarga estimada para la época reciente con esta metodología es de 123.04 hm^3 .

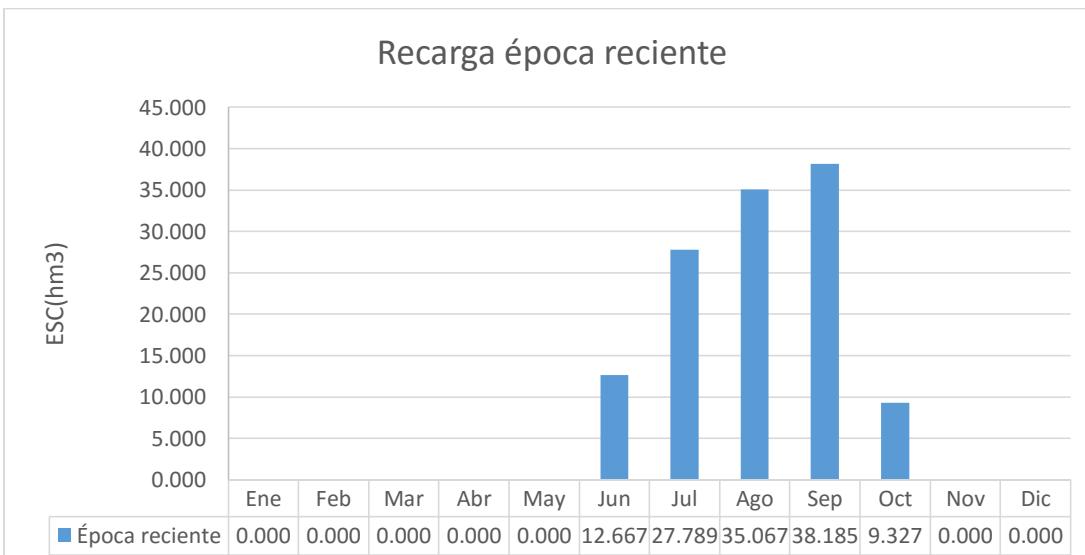


Figura 5.8. Variación mensual de la recarga en la subcuenca Las Cruces en la época reciente, empleando el modelo de Témez.

5.5 Efectos en el ciclo hidrológico

En la tabla 5.1 se observan los efectos en el ciclo hidrológico en la subcuenca Las Cruces, con las metodologías empleadas.

Tabla 5.1. Efectos en el ciclo hidrológico en la subcuenca Las Cruces.

Metodología	Escurrimiento (hm³)		Recarga (hm³)	
	época de 1996	época reciente	época de 1996	época reciente
Empleando NOM-011-CNA-2015	9.83	12.24	297.21	284.48
Método del USDA-SCS	196.87	218.50	122.80	95.65
Método empleando el modelo de Témez		17.89		123.04
Disponibilidad media anual (DOF)				10.91

6. Conclusiones

Los estudios realizados sobre el cambio de cobertura vegetal y uso de suelo en México estiman la pérdida de selvas y bosques, presentando las tasas de deforestación más altas de Latinoamérica.

El objetivo de este trabajo es estimar el efecto en el ciclo hidrológico de la subcuenca Las Cruces, a causa del cambio de cobertura y uso de suelo. Con base en los resultados obtenidos se concluye que el área de estudio ha sufrido una serie de cambios de cobertura y uso de suelo, donde el deterioro del paisaje se ha hecho presente, asociado a actividades antropogénicas que modifican el ambiente natural para adaptarlo a la creciente necesidad de mejorar sus condiciones de producción. Asimismo, estos cambios en la cobertura y uso de suelo traen consigo el desequilibrio en el ciclo hidrológico y por tanto la degradación ambiental.

Las metodologías que se emplearon para estimar los volúmenes de agua en cada una de las fases del ciclo hidrológico muestran diferencias en el escurrimiento, evapotranspiración potencial, y recarga, de una época a otra. La principal causa de las diferencias es la deforestación de zonas boscosas en las partes altas de la subcuenca Las Cruces, donde se presenta una disminución del 29.70% de dicha cobertura y el incremento de 13.80% de pastizales. Los métodos empleados toman en cuenta este factor en el cálculo del escurrimiento y por lo tanto afecta a la recarga.

Para determinar los volúmenes de agua en las fases de escurrimiento y recarga se emplearon los métodos de la NOM-011-CNA-2015, del USDA-SCS y del modelo de Témez.

El valor del escurrimiento para la época reciente calculado con el método del USDA-SCS, difiere con los resultados de las otras dos metodologías, presentando un volumen anual de escurrimiento muy grande en comparación.

Respecto a la recarga, los volúmenes calculados para la época reciente permiten comparar además de las tres metodologías desarrolladas en este trabajo, la publicada en el Diario Oficial de la Federación (DOF) de acuerdo a la disponibilidad media anual de agua para los acuíferos. La recarga calculada con las tres metodologías empleadas, es mayor en comparación con la publicada en el DOF; en volumen, ésta representa el 11.41% respecto al valor menor de los estimados, es decir, respecto a la recarga calculada con la metodología que emplea el USDA-SCS.

Dados los resultados obtenidos, se recomienda emplear diversas metodologías al realizar estudios hidrológicos, poniendo especial atención en que sean las adecuadas dependiendo de las características particulares de la zona de estudio.

Independientemente de las diferencias entre las metodologías empleadas, los volúmenes de escurrimiento se incrementan en la época reciente, y por ende la recarga disminuye. Dado lo anterior, es necesario que las autoridades competentes implementen medidas contra la deforestación de bosques y cambios de uso de suelo en general, ya que alteran el ciclo hidrológico afectando en gran medida al equilibrio en los ecosistemas.

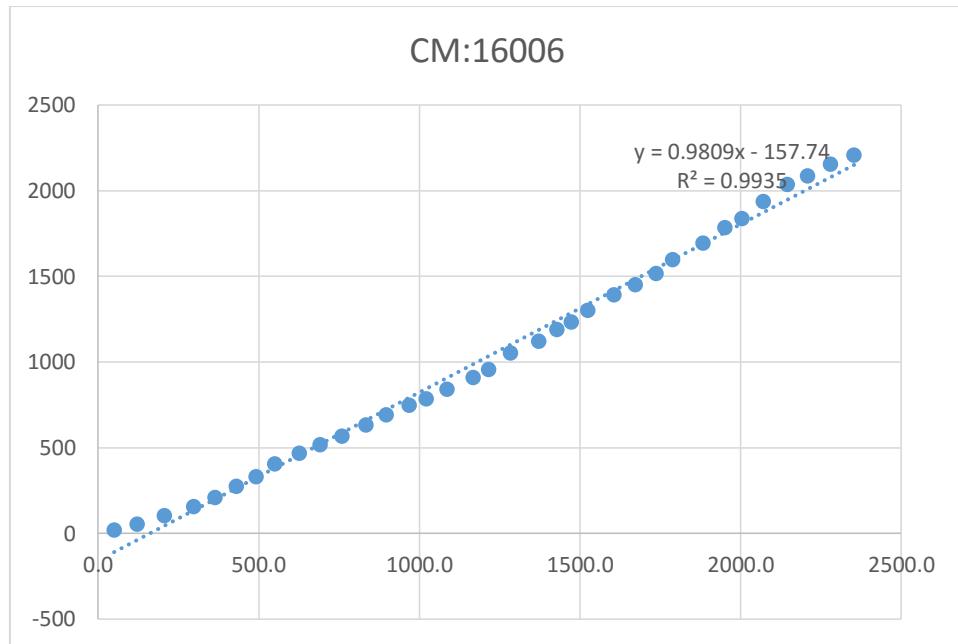
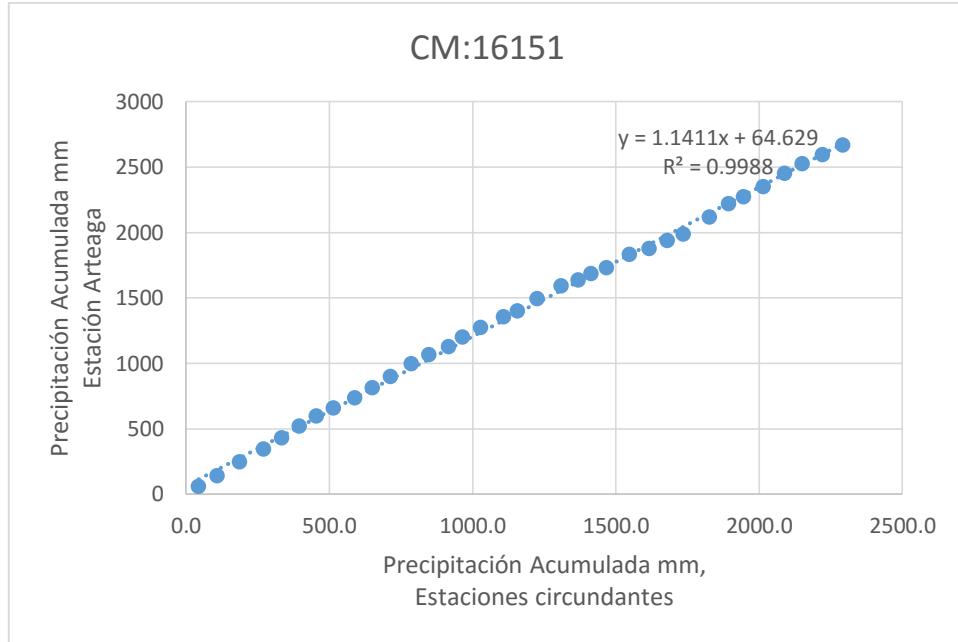
7. Rerefencias

- Almanza Campos, Jorge Alfonso (2013). “Modelación de los acuíferos Zacapu y Pastor Ortiz-la Piedad para la gestión de recursos hídricos en la cuenca del río Ángulo, municipio de Nahuatzen”. (Tesis Licenciatura). UMSNH. Morelia, Michoacán.
- Bocco, G., M. Mendoza y O. Masera. 2001, La Dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación. México, Instituto de Geografía-UNAM, Investigaciones Geográficas, 44:18-38.
- Céspedes- Flores, Moreno Sánchez, 2010. Estimación del valor de la pérdida de recurso forestal y su relación con la reforestación de las entidades federativas de México. Investigación ambiental, 2(2):5-13.
- Comisión Nacional del Agua, 2010. DETERMINACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA EN EL ACUÍFERO LÁZARO CÁRDENAS (1617), ESTADO DE MICHOACÁN.
- Comisión Nacional del Agua, 2010. DETERMINACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA EN EL ACUÍFERO 1618 PLAYA AZUL, ESTADO DE MICHOACÁN.
- Comisión Nacional del Agua, 2010. DETERMINACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA EN EL ACUÍFERO 1619 OSTULA, ESTADO DE MICHOACÁN.
- Comisión Nacional del Agua, 2002. DETERMINACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA EN EL ACUÍFERO APATZINGÁN, ESTADO DE MICHOACÁN.
- Estrela, T., Cabezas, F, y Estrada, F. 1999. La evaluación de los recursos hídricos en el libro blanco del agua en España. Ingeniería del Agua. Vol.6 Num.2 (junio 1999), páginas 125-138.
- Frnces Galard, 2007. Los bosques y la evapotranspiración. Centro Superior de Investigaciones Científicas, Instituto Jaume Almera. Pág. 105-112.
- Francisco Javier Aparicio Mijares. (1992). FUNDAMENTOS DE HIDROLOGÍA DE SUPERFICIE. México, D.F.: LIMUSA.
- Falcón García, Oswaldo (2014). “DINÁMICA DE CAMBIO EN LA COBERTURA/USO DEL SUELO EN UNA REGIÓN DEL ESTADO DE QUINTANA ROO, MÉXICO”. (Tesis Maestría). UNAM. México, D.F.
- Gerardo Bocco, Manuel Mendoza, Omar R. Masera (2001), “La dinámica del cambio de uso del suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación” Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, núm. 44, pp. 18-38.
- G. Allen, S. Pereira, Raes Dirk, SmithMartin. 2006, Evapotranspiración del cultivo Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos, ESTUDIO FAO RIEGO Y DRENAJE,Roma, 298 pp.
- Heredia Rodríguez, Cristhian Amador (2011), “ESTUDIO HIDROLÓGICO ACORDE A LOS REQUISITOS PARA SOLICITAR PERMISO PARA REALIZAR OBRAS EN CAUCE Y ZONA FEDERAL.”.(Tesis Licenciatura). UMSNH. Morelia, Michoacán.
- Instituto Nacional de Ecología, 2002. Potencial de Recarga de Acuíferos y Estabilización de Ciclos Hídricos en Áreas Forestadas. Planeación, Desarrollo y Recuperación Ambiental, S.C.
- Lambin, E.F. (1997). “Modelling and monitoring land-cover change processes in tropical regions”, Progress Physical Geography, 21, 3:375 – 393.

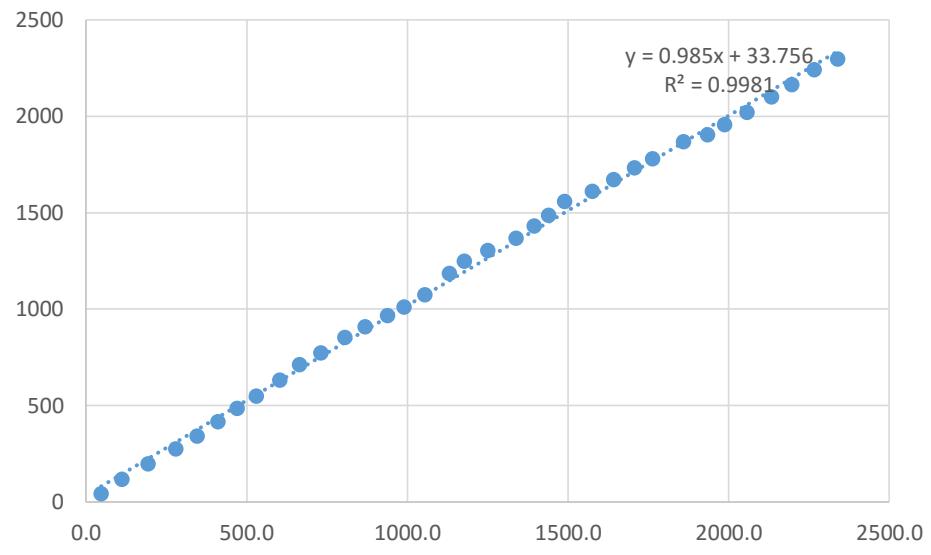
- Martínez Cortes, Miguel Ángel (2014). "Impacto Ambiental de la Zona Aguacatera en el Acuífero Nueva Italia, Municipios Ario de Rosales y Salvador Escalante". (Tesis Licenciatura). UMSNH. Morelia, Michoacán.
- Mas, J.F., A. Velazquez, J. Reyes, R. Mayorga, C. Alcántara, G. Bocco, R. Castro, T. Fernández, y A. Pérez, Assessing. 2004, Land use/cover changes: A Nationwide Multidate Spatial Database for México, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 5(4): 249-261
- Merino, L. 2003. Procesos de uso y gestión de los recursos naturales comunes. En: Sánchez, Ó., Vega, E, Peters E. y Monroy O. (editores). Conservación de los ecosistemas templados de montaña en México. Situación actual y contexto socioeconómico. Instituto Nacional de Ecología, México.
- Nájera, G., J. Bojórquez, J. Cifuentes, y S. Marceleño, 2010, cambio de cobertura y uso de suelo en la cuenca del río Mololoa, Nayarit. Revista Biociencias, 1: 19-29
- Peña Llopis, D. Juan (2007). "Efectos ecológicos de los cambios de coberturas y usos del suelo en la Marina Baixa (Alicante)". (Tesis Doctoral). Departamento de Ecología de la Universidad de Alicante.
- Rosales Arriaga, Edgar Ricardo (2012). "Metodología y estimación del balance hídrico de la cuenca del Usumacinta". (Tesis Licenciatura). FORDECYT-CONACYT-CENTROGEO.
- Sabaté Santi, 2007. Universidad de Barcelona y Centro de Investigación Ecológica y Aplicaciones Forestales (CREAF). Pág. 115-125.
- Soto Andrade, Estanislao (2011), "ESTUDIO HIDROLÓGICO DE LA CUENCA LA ASTORÍA, MICHOACÁN, REGIÓN TIERRA CALIENTE". (Tesis Licenciatura). UMSNH. Morelia, Michoacán.

8. Anexos

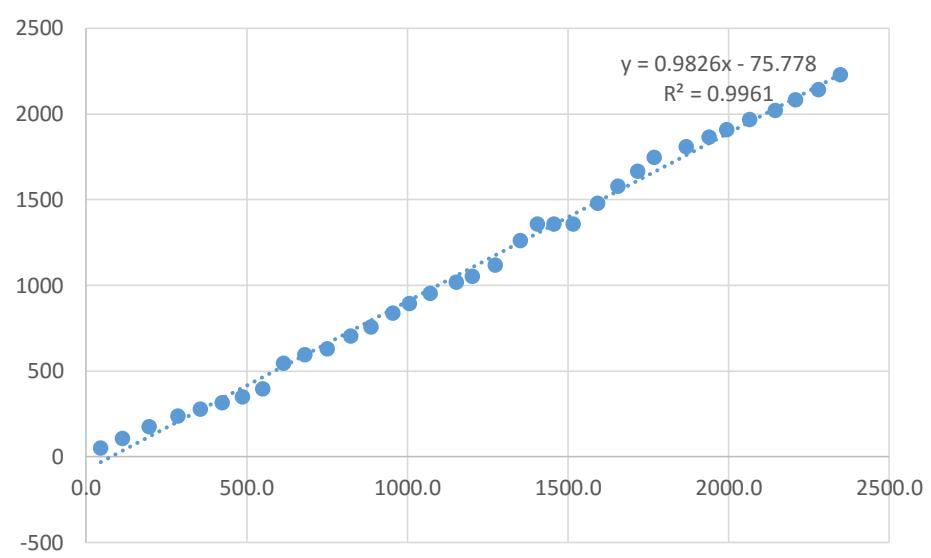
Anexo I (Curva masa doble de estaciones)



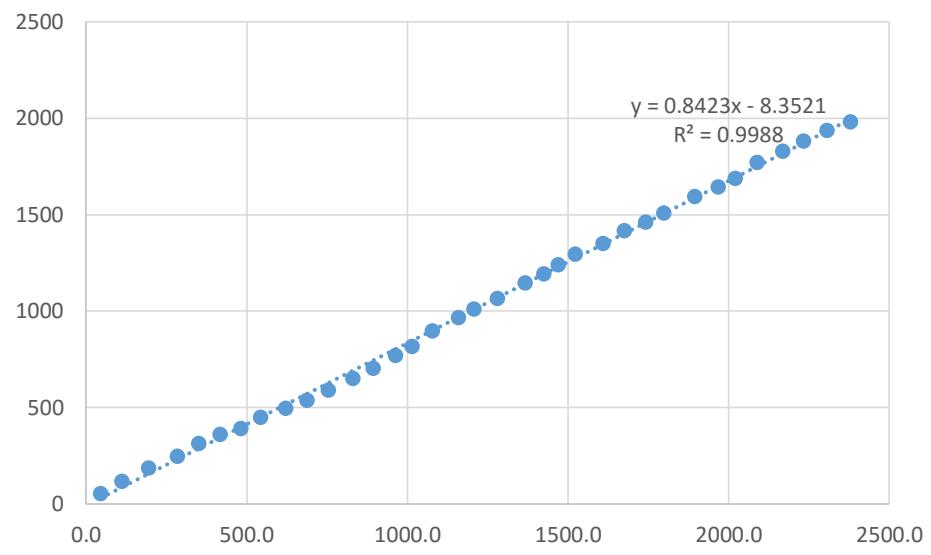
CM:16007



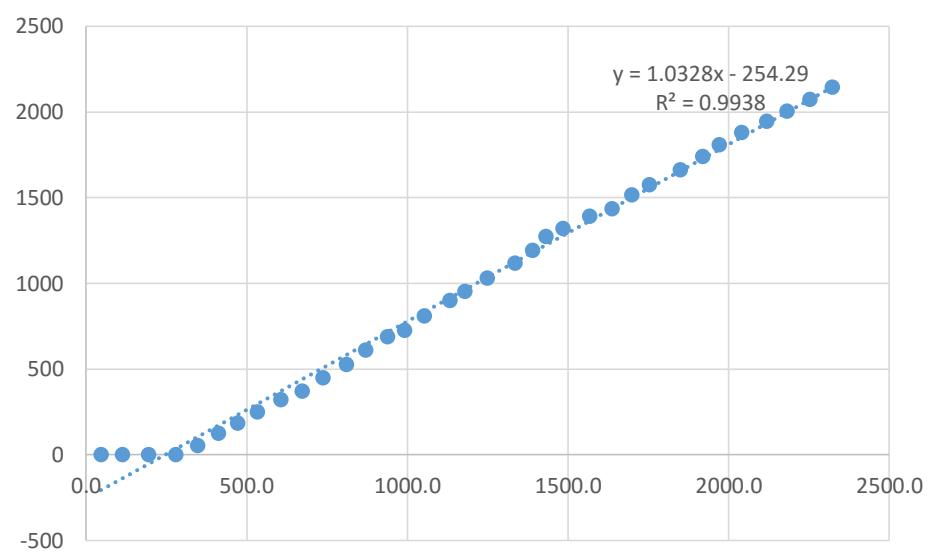
CM:16021



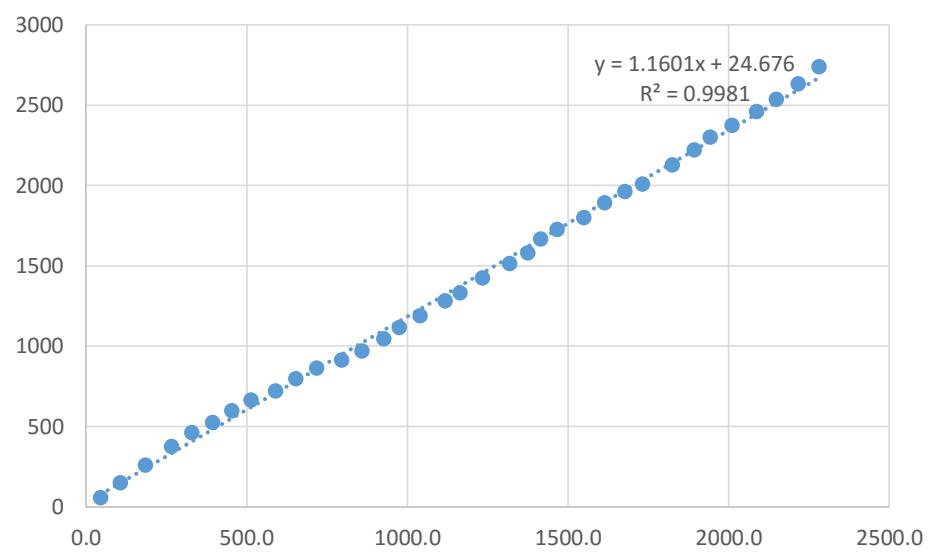
CM:12007



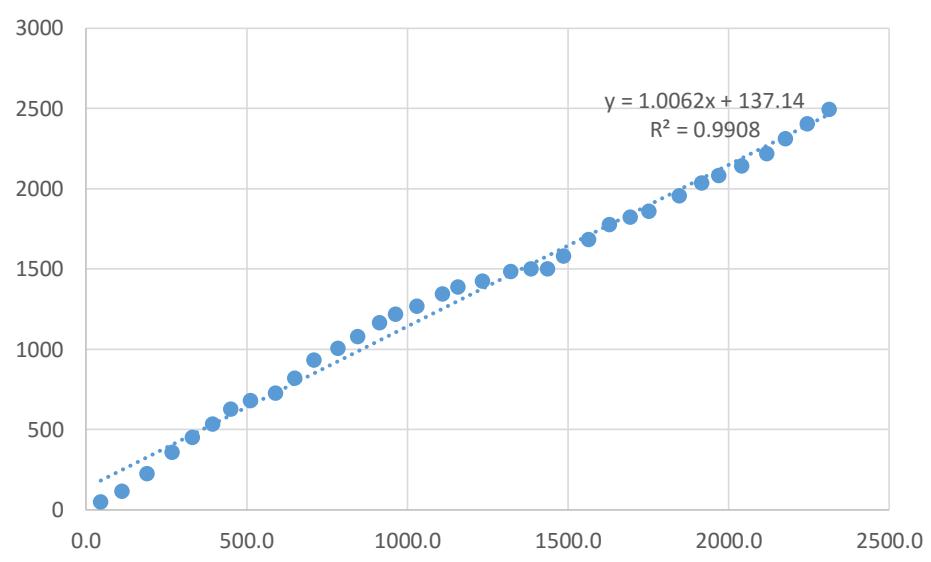
CM:16133



CM:6003



CM:6005



Anexo II (Llenado de estaciones Climatológicas)

Tabla A.2 Llenado de la estación 16151

16151	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	ANUAL	Promedio	Varianza	Sesgo
1965	1.5	22.5	0	0	76.5	76.5	130	234	63.5	103	1.5	13.5	722.5	60.21	5017.66	1.44
1966	0	17	5.5	3	6.5	371	92	128.5	220.5	131.5	0	1	976.5	81.38	13585.32	1.65
1967	455	0	0	0	3	179.5	130.5	190.7	159.5	139	0	8.5	1265.7	105.48	18544.07	1.61
1968	4	33.5	139.5	0	17	239	61	159.5	257	206.5	6	44.5	1167.5	97.29	9480.84	0.60
1969	18.5	0	3	0	0.00	25	180.5	360	203.5	75.5	80.38	3	949.379188	79.11	12875.34	1.67
1970	0	6.5	0	0	0	333	151	278	305.5	6	12.5	0	1092.5	91.04	18643.25	1.08
1971	0	0	0	0	50	100	121.5	285.5	238	139.5	0	0	934.5	77.88	10191.14	1.12
1972	0	0	20.5	0	1	170.5	102	202.5	121	62.5	31	1.5	712.5	59.38	5282.51	1.00
1973	1	0	0	122	4	134	165.5	223	149	137.5	7	0	943	78.58	7002.58	0.33
1974	0	0	0	0	82	150.5	108.5	202	245	22	40.5	52	902.5	75.21	7175.29	0.99
1975	16.5	0	0	0	4.5	198.5	257.5	76	215	30.62	1.28	4.45	804.34746	67.03	9549.67	1.24
1976	0	0	0	0	0	62	80.5	88	231	395	318.5	15	1190	99.17	19192.11	1.36
1977	22.5	0	0	1	15	123.5	133.5	268.5	159.5	79.5	0	16	819	68.25	7456.25	1.29
1978	4.5	4	1.5	0	9	57.5	259.5	102.5	252	77.5	0	0	768	64.00	9239.14	1.54
1979	0	0	0	0	0	75	196	265	201.5	101.5	0	7	846	70.50	9597.86	1.07
1980	193.5	0	0	0	0.00	99	188	110	141	33.5	61	0	826	68.83	5686.83	0.62
1981	92.5	0	0	1.5	0	87.5	222	315.5	164.5	82.5	0	1.5	967.5	80.63	10991.19	1.26
1982	0	0	0	0	27	32.5	112	153.5	48.5	59.5	96	0	529	44.08	2698.17	1.04
1983	8	7.5	6	0	307.5	32	167	35.5	300	117.5	10.34	45	1036.3394	86.36	12847.63	1.36
1984	3.5	14.52	0	0	0	158	300	158.5	446.8	11.5	33	0	1125.8215	93.82	21412.55	1.67
1985	0	0	0	0	0	96	131.60	193.5	92	53.5	27	0	593.601259	49.47	4242.62	1.18
1986	0	0	0	0	15	148.02	69.5	95	199.5	104	57.5	0	688.516015	57.38	4582.45	0.97
1987	12	2	0	4.5	0	81.5	246.5	91	76.5	29	1	0	544	45.33	5262.42	2.22
1988	0.00	0.00	16.51	0	0	157.5	126.5	317	189.5	19.5	1.5	0.00	828.007474	69.00	10975.43	1.49
1989	0	0	0	0	2.5	168	188.25	148.5	211.63	47.14	0.00	61.32	827.336074	68.94	7222.51	0.73
1990	0.00	8.51	5.98	1.82	16.56	218.44	165.93	180.03	96.1	138.4	2.5	7.5	841.77295	70.15	7040.68	0.73
1991	5.7	0	0	0	4.5	105.7	130.6	95.1	203.2	45.1	6.4	3.2	599.5	49.96	4613.73	1.27
1992	529.8	25.6	0	1.8	6.2	58.2	138.3	154.3	246.4	387	9.7	21.3	1578.6	131.55	30097.51	1.47
1993	8.8	2	0	0	0	271.6	400.8	215.3	218.2	53	11.6	0	1181.3	98.44	19555.31	1.20
1994	0	0	0	0	0	66.5	72.8	220.4	157.5	152.3	0.6	0	670.1	55.84	6261.88	1.14
1995	3.4	2.97	1	0	8.2	110.4	110.3	253.6	252.8	18.3	16.8	47.8	825.569848	68.80	8978.96	1.41
1996	0	0	0	0	8.5	258.3	118.3	251.3	43.4	544	16.1	6	1245.9	103.83	28426.99	1.93
1997	0	0	22.5	1.3	22.4	88.5	156.5	129.4	78.7	285.1	70.2	11.7	866.3	72.19	7279.96	1.56
1998	1.2	0	0	0	1.6	139.3	179.5	157.6	289.6	79.1	5.2	0	853.1	71.09	9633.66	1.19
1999	0	0	0	0	0	196.7	225.9	157.6	231.1	78.9	5	0	895.2	74.60	9766.81	0.78
MEDIA	39.4828571	4.188738695	6.34255992	3.91212387	19.6701726	139.11871	160.565148	185.609319	191.669319	115.59874	26.5742447	10.6221017	903.354034	75.2795028		
MÁXIMA	529.8	33.5	139.5	122	307.5	371	400.8	360	446.8	544	318.5	61.3246785	1578.6			
MÍNIMA	0	0	0	0	0	25	61	35.5	43.4	6	0	0	529			
SUMA	1381.90	146.61	221.99	136.92	688.46	4869.15	5619.78	6496.33	6708.43	4045.96	930.10	371.77	31617.39	2634.78		

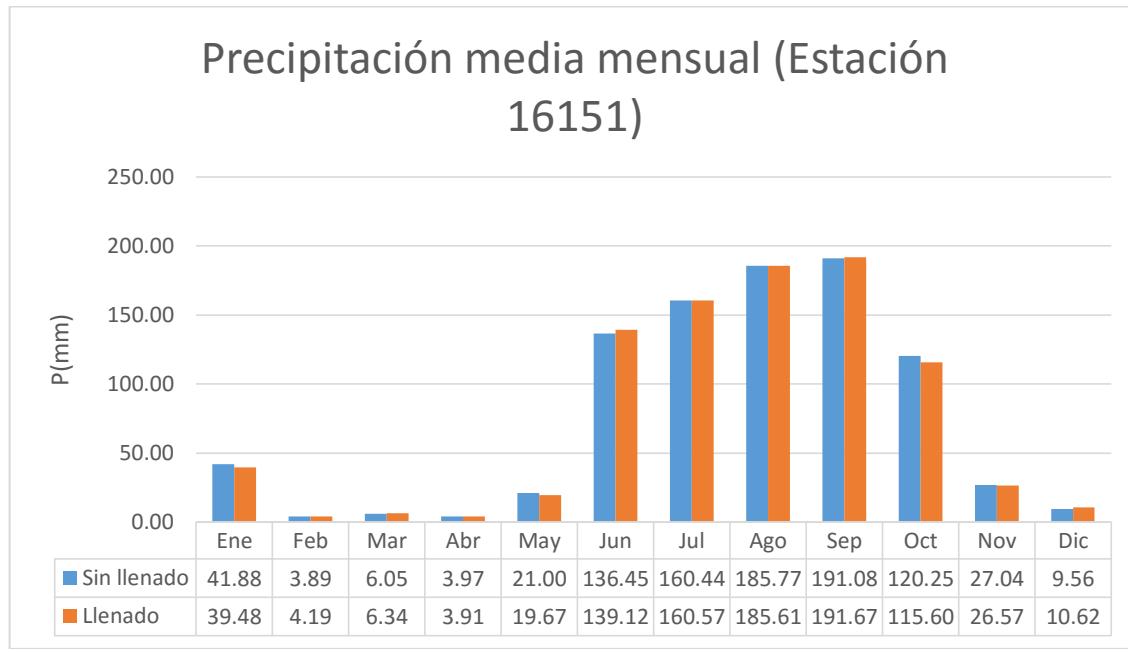


Tabla A.3 Llenado de la estación 16006

16006	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	ANUAL	promedio	Varianza	Sesgo
1965	0.5	16.4	0	0	5.5	11.8	46.9	109.1	29.3	15.5	0	0	235	19.58	1003.43	2.40
1966	3.6	4.5	0	4.2	62.2	94.1	73.4	61.6	45	50.3	0	0	398.9	33.24	1204.69	0.42
1967	93.2	0	0	0	19.5	105.3	91.8	76.5	165.3	43.7	0	2.5	597.8	49.82	3081.25	0.80
1968	0	28.2	36.4	0	1.3	111.4	137.4	130.9	90	73.1	4.2	18.7	631.6	52.63	2828.47	0.55
1969	0	1.7	3.5	0	0	40.8	147.2	169.3	247.2	31.3	0	7.8	648.8	54.07	7189.09	1.53
1970	0	4.9	0	0	0	234.7	164.8	141.5	208.4	13.3	0	0	767.6	63.97	8799.64	1.00
1971	9.5	0	17.7	0	25.7	100.6	92.4	139.2	193.6	76	0	0	654.7	54.56	4239.67	1.04
1972	0	0	0	0	4.8	159.9	356.5	159.5	172.6	55.8	13.1	0	922.2	76.85	12757.14	1.59
1973	0	0	0	55.5	28.9	114	104.2	95.5	232.2	99.9	0	0.6	730.8	60.90	5116.44	1.25
1974	0	0	0	1.4	30	207.9	158.5	49.1	100.6	30.2	4.8	33.8	616.3	51.36	4745.74	1.51
1975	9.8	0	0	0	3.7	60.6	142.3	281.5	57.5	13.9	0	0	569.3	47.44	7251.32	2.29
1976	0	0	0	0	0	120.4	120.9	145.1	82.7	231.6	107.4	0	808.1	67.34	6160.07	0.78
1977	0	5.3	0	1.1	13.3	243.6	113.2	90.2	225.9	7.4	2.7	4.4	707.1	58.93	8176.71	1.45
1978	5.6	0	0	41.7	0	117.7	113.8	165.8	155.7	70	6.5	0	676.8	56.40	4279.71	0.68
1979	0	1.8	0	0	12.5	19	101.5	163	127.5	23.5	0	4.5	453.3	37.78	3372.46	1.46
1980	82	0	0	0	0	89	52.5	178	178.5	64	18.5	0	662.5	55.21	4437.29	1.07
1981	99	0	0	1	6	113.1	206	126	174	88.5	0	0	813.6	67.80	5807.98	0.59
1982	0	0	0	0	28	58	278.5	42.5	107.5	15	30	0	559.5	46.63	6373.73	2.60
1983	7.5	8.5	4	0	97	35	282	417.5	217.7	68.5	18	19	1174.7	97.89	18398.72	1.58
1984	10	0	0	0	4	140	272.2	120	247	2.1	18	0	813.3	67.78	10402.26	1.31
1985	0	0	0	0	0	369.7	197	96.5	76.5	89.5	0	0	829.2	69.10	12851.28	2.02
1986	6	1	0.00	5	2.15	0	169.5	112.8	59.5	47.5	19.5	18.5	441.451687	36.79	2890.89	1.78
1987	3	0	0	0	1	245.5	290.5	175	76.5	0	0	0	791.5	65.96	11721.98	1.39
1988	0	0	16	0	0	91.5	191	391.5	392	19	0	0	1101	91.75	22853.61	1.56
1989	0	0	0	0	8	97.5	91.5	169	238	59.5	0	43.5	707	58.92	6084.17	1.38
1990	38	2	0	42	30	167.5	160	76	136.5	74	0	38	764	63.67	3677.74	0.77
1991	0	0	0	0	18	72.5	142	425	214	85	38	0	994.5	82.88	16219.55	2.08
1992	321	15	0	0	17.5	44	274	101.5	202.5	151.5	0	12	1139	94.92	13352.63	1.02
1993	11.02	0.00	0.07	0	0	146.5	229.5	171.5	210.5	52	0	0	821.094079	68.42	8590.68	0.89
1994	0	0	0	0	0	66	97.5	173.5	271	41.5	0	0	649.5	54.13	7633.96	1.78
1995	0	0	0	0	16.5	218	262	392	214.5	46.5	18	26.5	1194	99.50	18227.27	1.19
1996	0	0	0	0.00	41	275	200.5	159	222.5	190.5	19	0	1107.5	92.29	11521.07	0.56
1997	12.5	0	7	0	20	27	144	209.5	54.5	109	13	2	598.5	49.88	4648.60	1.56
1998	0	0	0	0	0	126	119	143	292	111	0	0	791	65.92	8720.99	1.40
1999	0	0	0	0	0	110	143	138	187.5	55	0	0	633.5	52.79	5120.98	0.88
MEDIA	20.3491498	2.55142857	2.41925242	4.34	14.1871911	120.96	164.771429	165.588571	168.748571	63.0028571	9.44857143	6.62285714	742.989879	61.9158233		
MÁXIMA	321	28.2	36.4	55.5	97	369.7	356.5	425	392	231.6	107.4	43.5	1194			
MÍNIMA	0	0	0	0	0	46.9	42.5	29.3	0	0	0	0	235			
SUMA	712.22	89.30	84.67	151.90	496.55	4233.60	5767.00	5795.60	5906.20	2205.10	330.70	231.80	26004.65	2167.05		

Precipitación media mensual (Estación 16006)

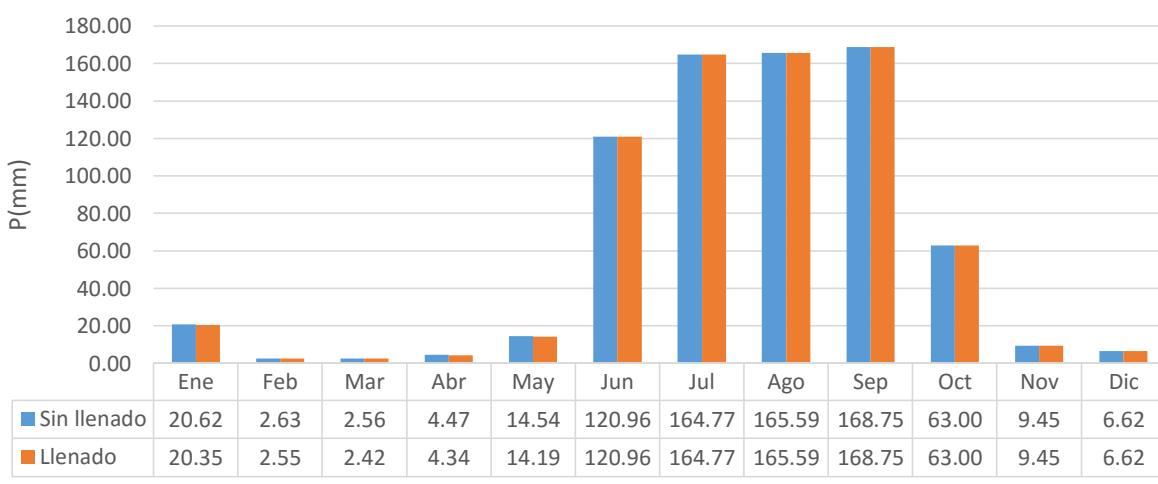


Tabla A.4 Llenado de la estación 16007

16007	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	ANUAL	Promedio	Varianza	Sesgo
1965	7.5	24.5	0	11	0	47.5	109	226.5	36.5	26	0	0	488.5	40.71	4394.48	2.39
1966	0	6	0	5.5	62	209.5	145.5	256	163.5	74	0	0	922	76.83	8715.88	0.87
1967	120	0	0	0	18	237.5	136.5	84.5	208	119.5	0	9	933	77.75	7453.39	0.72
1968	0.5	11	43.5	0	20	127.5	330	159	196.5	55	0	10	953	79.42	10809.45	1.51
1969	0	4	0	0	15	110.5	151	214.5	185.5	102.5	0	11.5	794.5	66.21	6700.79	0.80
1970	0	0.5	0	0	0	297	142.5	249	177.5	14	0	0	880.5	73.38	12510.19	1.18
1971	0.5	0	0	0	9	52.5	220	204	174	166.5	2.5	0	829	69.08	8507.99	0.81
1972	0	0	0	0	44.5	127.5	221.5	145.5	81.5	26.5	131	0	778	64.83	5684.92	0.89
1973	0.3	0	0	4	45.5	242.5	81.5	162	228	158	2	0.09	923.887163	76.99	9054.57	0.82
1974	0	0	0	0	32	328	223	133.5	157	52	3.5	16.5	945.5	78.79	11754.48	1.40
1975	6	0	0	0	0	212.5	213.5	200.2	79	21.5	0	0	732.7	61.06	8438.21	1.14
1976	0	0	0	0.00	0	109.5	219	116	118	213	112	0	887.5	73.96	7236.93	0.63
1977	3	2.5	0	1.5	15.5	123.5	112	196	145.7	29.7	3	16	648.4	54.03	4891.85	1.06
1978	1	0.7	1	1.5	0	98.5	104	199.5	173	123.5	0.2	0	702.9	58.58	5848.38	0.82
1979	0	1.5	0	0	0	42.4	202.2	95.7	173.2	23	0	0	538	44.83	5295.48	1.56
1980	59.1	3	0	0	0	141.5	131.5	261.5	88.2	73.2	13	0.2	771.2	64.27	6631.15	1.42
1981	83.5	0.7	1.2	2	37.7	110.6	248	210.4	471.9	138.7	0	5.3	1310	109.17	20486.46	1.67
1982	0	2.8	0	1.5	57.5	99	268.6	157.3	104	26.5	44.5	4.5	766.2	63.85	6782.13	1.61
1983	17.5	7.5	5	0	85.5	33.5	116.2	155.1	122.3	98	33.3	13.8	687.7	57.31	2984.38	0.59
1984	21.3	0	0	0	19.5	177	255.1	85.5	189.8	20.8	0	0	769	64.08	8338.71	1.27
1985	0	0	0.6	0	0	247.7	158.1	236	109.9	10.4	0	0	762.7	63.56	9614.32	1.20
1986	0.5	7.4	0	2.3	2.3	138.4	173	172.8	92.2	37.1	8.4	0	634.4	52.87	5038.02	1.00
1987	4.5	0	0	0	6.5	146.4	303.1	269.9	127.8	34.4	0	0	892.6	74.38	12484.79	1.34
1988	7.8	0	14	0	0	134	148.6	173	110.5	26	0	0	613.9	51.16	4700.36	0.91
1989	0	0	0	0	3.5	56.3	87.1	283.5	191.3	70.3	12	27	731	60.92	8092.85	1.80
1990	17.6	3	0	5.5	33.8	105	105	104.2	272.4	61.3	22.2	2.9	732.9	61.08	6190.72	1.96
1991	0	0	0	0	0	91.8	79.5	193.3	114	42.1	19.2	11.8	551.7	45.98	3820.39	1.43
1992	309.9	11	0	0	18.8	65	169.5	106	192.1	196.5	0	5	1073.8	89.48	10923.29	0.95
1993	11	0	0	0	0	55.4	105.6	110.2	107.5	59.4	0	0	449.1	37.43	2251.15	0.75
1994	0	0	2.5	0	0	95.9	161.3	223.2	124.6	11.4	0	0	618.9	51.58	6252.21	1.29
1995	14	0.2	0	0	17.5	85.5	123	276.8	206.1	8.5	8	37.7	777.3	64.78	8476.81	1.56
1996	0	0	1	0	11	162.5	183.5	132.8	119	337	0	0	946.8	78.90	11896.71	1.34
1997	4	0	2.5	0.5	29	31.6	361	158.8	37.3	126.8	9.1	0	760.6	63.38	11522.13	2.30
1998	0	0	0	0	5.53	72.7	146.4	187.2	339.7	102.2	12.8	0	866.529701	72.21	11384.06	1.68
1999	0	0	0	0	0	218.7	191.5	98	114.8	51	0	0	674	56.17	6548.15	1.20
MEDIA	19.7	2.46571429	2.03714286	1.00857143	16.8465629	132.425714	175.051429	178.211429	158.065714	78.18	12.4771429	4.89391895	781.363339	65.1136116		
MÁXIMA	309.9	24.5	43.5	11	85.5	328	361	283.5	471.9	337	131	37.7	1310			
MÍNIMA	0	0	0	0	0	31.6	79.5	84.5	36.5	8.5	0	0	449.1			
SUMA	689.50	86.30	71.30	35.30	589.63	4634.90	6126.80	6237.40	5532.30	2736.30	436.70	171.29	27347.72	2278.98		

Precipitación media mensual (Estación 16007)

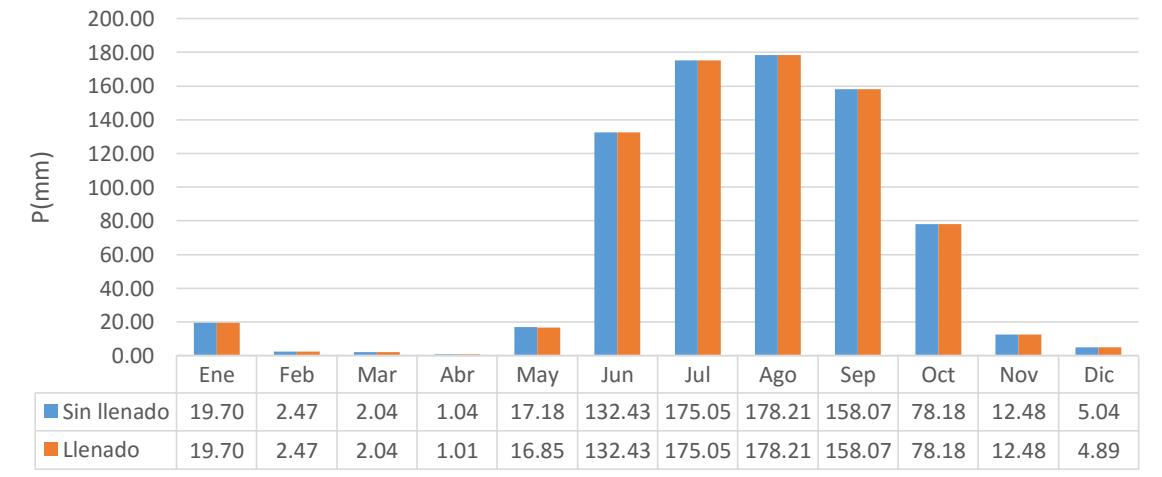


Tabla A.5 Llenado de la estación 12021

12021	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	ANUAL	Promedio	Varianza
1965	0	0	0	0	0	75.2	122	110.4	141.3	140.8	0	0	589.7	49.14	3958.06
1966	0	0	0	19.1	0	111.9	147.4	207	102	101.5	0	0	688.9	57.41	5329.08
1967	117	0	0	0	0	87	220.5	83	235	40	0	10	792.5	66.04	7395.84
1968	0	77.5	4.3	0	28	161	69.5	122.5	138.1	155	0	0	755.9	62.99	4367.95
1969	0	0	0	0	0	0	174	67.4	168	81	0	0	490.4	40.87	4505.70
1970	0	0	0	0	0	126.5	87	131	74.5	22	0	0	441	36.75	2778.16
1971	0	0	0	0	0	45.69	26	141	132	87	4	0	435.691168	36.31	2894.07
1972	0	0	0	0	22	19.5	100	197.5	93.5	73	34	0	539.5	44.96	3712.98
1973	0	0	0	0	0	99	587	381	596	140	8	0	1811	150.92	54645.54
1974	0	0	0	0	20	169	140	146	20.5	61	20.5	0	577	48.08	4244.95
1975	0	0	0	0	0	82.96	120.66	288	71	0	0	0	562.620251	46.89	7549.81
1976	0	0	0	0	0	138	165	169.5	93	233	85	2	885.5	73.79	7256.70
1977	0	0	0	2	3.5	110	155	210	92	56	9	8	645.5	53.79	5205.79
1978	2	3.5	7	0	6.5	89.5	290	225	295	64	0	0	982.5	81.88	13956.51
1979	0	0	0	0	0	59	144	211	153	58.8	0	23	648.8	54.07	5550.45
1980	169	0	0	0	0	0	85	279.5	85	70	10	0	698.5	58.21	7770.25
1981	133	0	0	0	0	125.5	204	143.5	88	65.5	39	0	798.5	66.54	5097.20
1982	0	0	0	0	18.5	47	103	59	105.5	64.3	25	0	422.3	35.19	1606.32
1983	15	5	3	0	76	28.5	274.5	129	168.5	28	26	18.5	772	64.33	7215.24
1984	246.2	0	0	0	48	267.7	494.3	91.3	223.40	14.25	16.31	0.00	1401.45626	116.79	24904.64
1985	190	0	0.56	0.00	0.10	174.51	161.91	128.86	69.30	66.39	1.22	6.03	798.869494	66.57	5948.78
1986	2.10	0	0	0	0	141.04	151.94	93.87	72.98	51.62	4.12	10.87	528.527656	44.04	3330.90
1987	0.67	1.95	0.60	0.03	0.61	157.85	192.11	204.54	92.92	20.4218011	4	0	675.708768	56.31	6789.55
1988	0	0	25	0	0	252.5	159.5	485.5	523.5	13.7	0	0	1459.7	121.64	38382.85
1989	0	0	0	0	0	221	129	120	570	100.5	0	37.5	1178	98.17	27331.65
1990	0	0	0	0	20.5	249.5	130	217	128	323.5	0	0	1068.5	89.04	13868.61
1991	0	0	0	0	0	256.5	238.5	73.5	338.4	34	0	0	940.9	78.41	15452.08
1992	4.2	0	0	0	0	180.6	185	106.4	178	87.9	19	0	761.1	63.43	6334.42
1993	0	0	0	0	0	118.5	171	85	233.5	44	23.5	0	675.5	56.29	6317.61
1994	0	0	0	0	0	120.4	71.5	146.8	103.1	46.3	20	0	508.1	42.34	2983.47
1995	0	0	0	0	25.5	129.2	254.5	149.5	114	13.5	1	20	707.2	58.93	6942.27
1996	0	0	0	0	0	121.7	233.7	114.6	66.3	128.2	2.1	0	666.6	55.55	6033.22
1997	0	0	2	0	0	176.5	181.3	97.5	10.8	227.7	34.8	0	730.6	60.88	7475.07
1998	0	0	0	0	0	185.4	110.6	90.7	90.6	241.7	0	0	719	59.92	7125.38
1999	0	0	0	0	0	283.9	211.6	162.5	251.9	141.6	0	0	1051.5	87.63	13013.32
MEDIA	25.1191286	2.512734082	1.21300687	0.60380268	7.69178404	131.772626	179.743466	161.967931	169.102596	88.4621621	11.0441928	3.88295741	783.116389	65.259699	
MÁXIMA	246.2	77.5	25	19.1	76	283.9	587	485.5	596	323.5	85	37.5	1811		
MÍNIMA	0	0	0	0	0	26	59	10.8	0	0	0	0	422.3		
SUMA	879.17	87.95	42.46	21.13	269.21	4612.04	6291.02	5668.88	5918.59	3096.18	386.55	135.90	27409.07	2284.09	

Precipitación media mensual (Estación 12021)

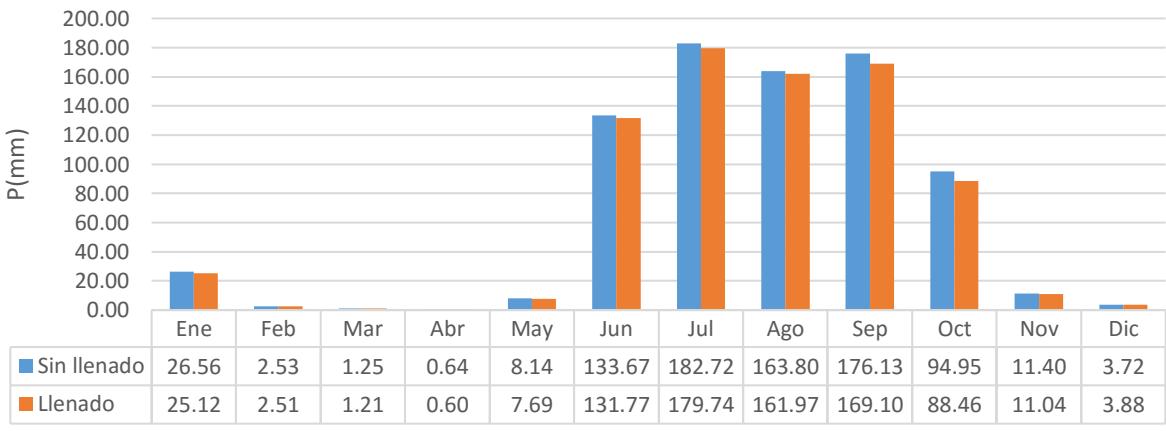


Tabla A.6 Llenado de la estación 12007

12007	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	ANUAL	Promedio	Varianza	Sesgo
1965	3	4	0	0	0	144	252.2	132	47	39.5	0	0	621.7	51.81	6668.17	1.69
1966	0	2	0	19	32	208.8	208	128	110	75	0	0	782.8	65.23	6481.34	0.98
1967	124	0	0	0	0	144	229	115	195	15	0	3	825	68.75	7574.39	0.79
1968	0	9	22	0	36	127	150	158	113	91	0	24	730	60.83	3879.24	0.52
1969	2	0	0	0	0	60	204	259	232	30	0	0	787	65.58	10491.90	1.27
1970	0	0	0	0	10	124	119	86	183.6	52	0	0	574.6	47.88	4175.65	1.07
1971	7	0	0	0	0	28	137	104	66	27	0	0	369	30.75	2196.02	1.54
1972	0	0	0	6	43	139	243	108	142	8	5	0	694	57.83	6548.70	1.32
1973	0	0	0	8	14	114.5	78	97.5	115	127	2	0	556	46.33	2959.74	0.51
1974	0	0	0	0	15	149	97	123	60	32	27	14	517	43.08	2748.99	1.13
1975	38	0	0	0	91	69	95	70	211	57	0	0	631	52.58	3909.17	1.51
1976	0	0	0	10	0	111	161	219	53	144	14	0	712	59.33	6163.52	1.04
1977	0	1	0	2	34	139	217	158	77	13	0	0	641	53.42	5853.90	1.27
1978	11	5.5	3	0	19	150	233	257	115	8	0	0	801.5	66.79	9374.07	1.24
1979	0	0	0	0	7	86	135	201.3	110.7	34	0	0	574	47.83	4740.53	1.29
1980	163	0	0	0	0	227	205	225	122.5	2	16	0	960.5	80.04	9921.29	0.61
1981	79	0	0	0	0	129.8	240	192	108.4	59.4	0	0	808.6	67.38	7122.35	1.01
1982	0	4	0	0	8.5	145.6	181.6	115.1	55.7	30.7	10	0	551.2	45.93	4212.79	1.30
1983	6	5.3	5.5	0	76.5	92.7	125.2	174.6	94	83	3	2	667.8	55.65	3570.46	0.67
1984	6	12	0	0	40.5	242.9	233.1	170.7	222.2	0	17.7	0	945.1	78.76	10867.85	0.86
1985	0	0	0	0	0	125.8	161.1	137.5	49.4	80.3	1.5	9.3	564.9	47.08	3915.42	0.92
1986	0	0	0	0	41.8	166.9	146.8	93.5	66.7	50.6	1.5	10	577.8	48.15	3562.34	1.09
1987	0	3	0	0	0	158.3	171.3	207.5	94.5	21.5	0	0	656.1	54.68	6453.46	1.09
1988	0	0	46	0	0	108	206	159.5	67	57	16.5	14.5	674.5	56.21	4724.02	1.26
1989	0	0	0	0	0	84	261.5	144	183	95	16.5	14.5	798.5	66.54	7821.57	1.22
1990	0	0	0	0	54	152.5	71	46.5	127	65	0	3	519	43.25	2844.70	1.05
1991	0	0	0	0	11.5	94	114.5	111	171	58	7.5	0	567.5	47.29	3656.61	0.95
1992	196	36	0	0	0	67.5	168.5	162	240	117	37	17	1041	86.75	7413.16	0.57
1993	0	0	0	0	0	165	133	132.5	124	27	11	0	592.5	49.38	4494.69	0.84
1994	0	0	0	7	8	54	150	112	121	60	0	0	512	42.67	3133.52	0.98
1995	0	0	0	0	44	147	222	203	185	25	3.23	22.13	851.367989	70.95	8089.64	0.85
1996	0	0	0	0	0	291	149.5	80.5	75.5	95	12	11	714.5	59.54	7814.48	1.88
1997	0	0	10	0	22	119	68	219	44	114	21	0	617	51.42	4634.45	1.59
1998	0	0	0	0	0	82	173	122	162	96	34	0	669	55.75	4623.30	0.74
1999	0	0	0	0	10	139	106	94	106.8	90	1	0	546.8	45.57	3098.58	0.54
MEDIA	18.1428571	2.337142857	2.47142857	1.48571429	17.6514286	131.008571	167.008571	146.22	121.428571	56.5428571	7.35526483	4.1266777	675.779085	56.31		
MÁXIMA	196	36	46	19	91	291	261.5	259	240	144	37	24	1041	137.04		
MÍNIMA	0	0	0	0	0	28	68	46.5	44	0	0	0	369			
SUMA	635.00	81.80	86.50	52.00	617.80	4585.30	5845.30	5117.70	4250.00	1979.00	257.43	144.43	23652.27	1971.02		

Precipitación media mensual (Estación 12007)

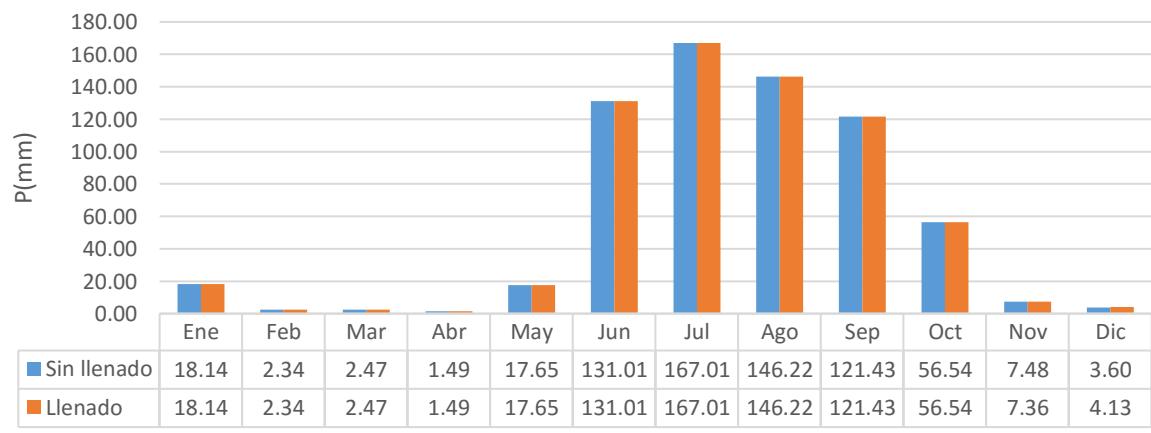


Tabla A.7 Llenado de la estación 16133

16133	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	ANUAL	Promedio	Varianza	Sesgo
1965	2.92	19.40	0.00	0.00	49.57	88.42	124.09	215.88	99.42	78.09	0.97	14.55	693.30697	57.78	4436.22	1.29
1966	0.00	13.28	3.56	2.11	5.54	308.28	133.58	162.48	208.25	131.71	3.67	0.99	973.459067	81.12	11024.08	1.07
1967	350.89	0.02	0.00	0.06	1.94	146.43	122.73	213.82	275.40	134.16	4.30	26.23	1275.98561	106.33	14929.69	0.87
1968	2.59	54.74	144.30	0.02	13.47	218.22	65.80	190.81	379.52	155.65	3.92	53.94	1282.98536	106.92	13307.24	1.26
1969	0	0	0.7	0	0	9.6	185.4	262.5	145.6	38.6	0	0	642.4	53.53	8333.78	1.58
1970	0	0.5	0	0	2.3	126.6	262.7	210	228.3	0.7	4	0	835.1	69.59	11196.89	1.06
1971	6.8	12.8	0.2	0	45.5	84.3	184.5	174.8	158.5	43.1	6.7	0	717.2	59.77	5285.66	0.96
1972	0	0	0	8	64.3	139.8	228.7	166.3	96.6	77.9	0	0	781.6	65.13	6199.42	0.96
1973	0	0	0	35.5	9.5	113.2	199	168.5	164.7	151.6	7	0	849	70.75	6568.08	0.52
1974	0	0	0	4	32	154.5	104	86.8	164	35.3	42.2	5.5	628.3	52.36	3665.18	0.97
1975	32	0.00	0	0	15	207.8	210.5	193.5	151.9	20	2.7	0	833.4	69.45	8343.96	0.85
1976	0	0.4	0	0.5	0	153.5	201	271	140.5	140.7	45	0	952.6	79.38	9395.08	0.80
1977	0	12	0	1.5	52.5	209.3	236.7	205.2	203.9	63.2	0	0	984.3	82.03	9970.47	0.69
1978	13.5	7	9.2	0	18.5	164.7	229.1	133.6	269.3	115.1	0	0	960	80.00	9735.50	0.92
1979	0	0	0	12.5	0	56.5	175.2	61.4	110.2	19	0	5.5	440.3	36.69	3108.50	1.75
1980	110.4	1.5	0	0	0	221.5	205.1	177.7	154.8	67.5	69.5	0	1008	84.00	7597.59	0.43
1981	57.5	3.5	0	22	32.5	205.5	298.7	171.8	165.6	119.6	0	7	1083.7	90.31	9975.94	0.91
1982	0	7	0	0	60	79.3	231.9	161.8	89.2	15	0	0.5	644.7	53.73	5767.25	1.51
1983	13.6	9.7	1	0	109.5	30.1	314.9	213.2	141	77	17.5	0	927.5	77.29	10201.89	1.48
1984	5.8	0	0	0	48	290	342	144.2	201.4	7	1.5	0	1039.9	86.66	15881.14	1.22
1985	0	0	27	0	15	285.2	152.1	245	100	56.3	0	1.2	881.8	73.48	10347.82	1.32
1986	0	0	0.00	0	0	261.3	192.2	111	242	76	14	11	907.5	75.63	10324.26	1.04
1987	0	24.5	0	0	0	138.7	207.7	150.5	22.5	15	8	0	566.9	47.24	5421.95	1.46
1988	0	0	32	0	0	175	171	273.3	148	36.2	0	0	835.5	69.63	9147.79	1.13
1989	0	0	0.6	0	0	130.7	156.4	182.4	27.8	10.1	0	25.6	533.6	44.47	4783.31	1.35
1990	0	6.2	14.1	4.3	29.5	232.8	274.2	171.1	140.9	71	14.2	25	983.3	81.94	9539.08	1.06
1991	3.5	0	0	0	15.6	81.5	207	188.5	136.4	51	22.7	0	706.2	58.85	5949.14	1.14
1992	241	0	0	0	37.2	41.4	175.3	219.2	149.7	92.9	68	9.9	1034.6	86.22	7865.48	0.69
1993	5.9	0	0	0	0	206.4	294.1	216.6	139.6	56.7	22	0	941.3	78.44	11399.64	1.08
1994	0.00	0	0	0	2.7	113.8	299.6	115.5	152.9	46.6	0	0	731.1	60.93	8824.17	1.73
1995	0	7	0	13	39.7	167.4	174.6	297.3	80.9	45	14	25.2	864.1	72.01	8715.25	1.58
1996	0	0	0	0	41	166.6	225.1	207.2	87.2	74.7	2	5.5	809.3	67.44	7425.10	1.00
1997	0	0	6	2.3	63.5	177.3	135	151.4	57.9	50.2	32	5.8	681.4	56.78	4081.25	0.95
1998	0	0	0	0	0	123.5	199.3	177	193.1	126.5	12	0	831.4	69.28	7466.68	0.59
1999	0	0	0	0	31.7	185.3	176.8	165.6	197.5	64.7	36	0	857.6	71.47	7020.10	0.66
MÉDIA	15.8064516	2.970967742	2.92903226	3.34193548	24.6935484	152.680645	214.509677	183.029032	143.932258	60.1354839	14.2258065	4.11935484	822.374194	68.5311828		
MÁXIMA	241	24.5	32	35.5	109.5	290	342	297.3	269.3	151.6	69.5	25.6	1083.7			
MÍNIMA	0	0	0	0	0	9.6	104	61.4	22.5	0.7	0	0	440.3			
SUMA	846.40	179.54	238.67	105.78	836.02	5494.45	7096.00	6456.89	5424.49	2363.81	453.87	223.42	29719.34	2476.61		

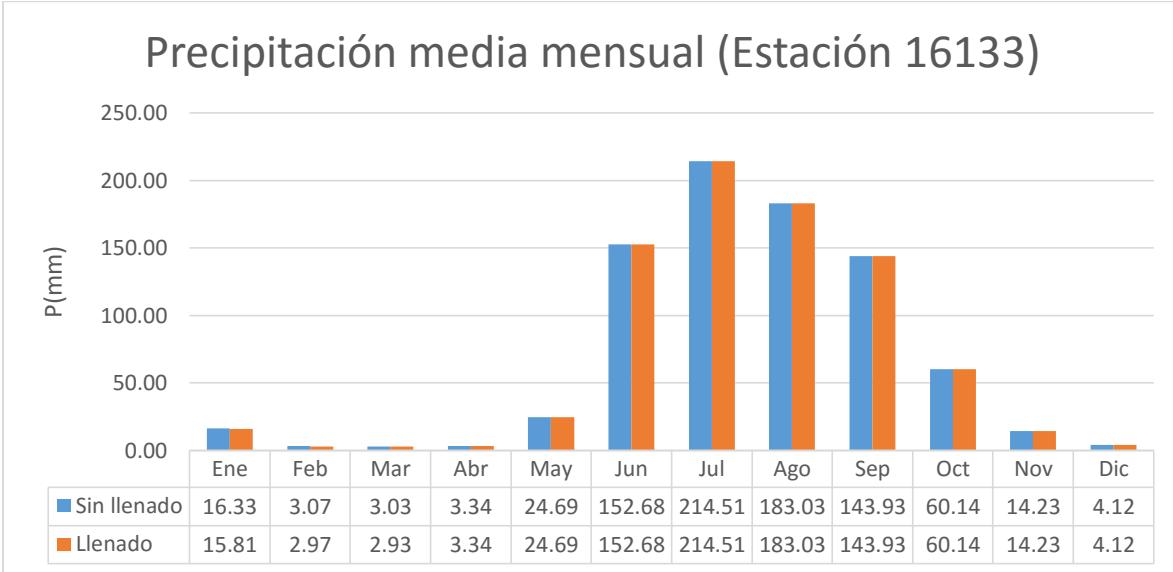


Tabla A.8 Llenado de la estación 6003

6003	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	ANUAL	Promedio	Varianza	Sesgo	
1965	4.2	13.6	0	0	0	106.4	137.5	242.2	151.8	16.4	0	12	684.1	57.01	6686.13	1.34	
1966	0	8.3	0	0.9	4.5	192.6	290.4	287	198.9	124.5	20	1.4	1128.5	94.04	13929.39	0.79	
1967	166.4	0.1	0	0.3	0	94.8	107.9	235.2	487.1	137.1	0.5	50.5	1279.9	106.66	20521.72	1.90	
1968	0	149.6	149.6	0.1	8.3	168.1	75.7	214	501	73.4	0.2	70.7	1410.7	117.56	20014.62	1.97	
1969	0	0	0	0	0	85.1	218.6	244.8	291	207	0	0	1046.5	87.21	13747.41	0.79	
1970	0	0	0	0	0	102.8	213	165.4	226.2	15.8	31	0	754.2	62.85	8024.51	1.10	
1971	0	0	0	0	0	62.5	140.6	242	214.5	224	2	0	885.6	73.80	10279.23	0.88	
1972	25.5	0	0	0	22	167.7	174	175.5	124	28	58.5	0	775.2	64.60	5439.83	0.74	
1973	5	3	0	14	0	117.5	126.5	161.5	120	120.5	0	7	675	56.25	4283.75	0.49	
1974	0	0	0.00	0	83	279.1	62.5	193.5	154	17	4	54.5	847.6	70.63	8477.89	1.35	
1975	28.5	0	0	0	0	65.5	353.5	153	148	27	0	14.5	790	65.83	11300.79	2.12	
1976	0	0	0	0	0	129.5	95.5	132.5	91.5	56.5	121.9	0	627.4	52.28	3369.85	0.33	
1977	3.5	0	0	4.5	0	158.2	106.9	226.3	110.5	56.1	0	0	666	55.50	6008.50	1.23	
1978	0	3	0	0	1.5	94.7	280.5	105.5	383.4	40.7	0	0	909.3	75.78	16230.88	1.83	
1979	12.5	0	0	0	0	41.2	232.9	251.7	251	46	0	1.5	836.8	69.73	11474.13	1.25	
1980	151.6	0	0	0	0	39.9	111.6	250	309.2	25.3	0	0	887.6	73.97	11829.19	1.39	
1981	105.1	0	0	0	0	137.9	121.1	306.9	289.2	143.6	0	0	1103.8	91.98	12876.51	0.98	
1982	0	0	0	0	8.5	165.8	57.7	138.3	40.1	55.8	108.5	7.6	582.3	48.53	3483.06	1.04	
1983	40.9	15.2	8	0	113.2	74.9	199.3	345.5	307.4	22.2	9.5	13.7	1149.8	95.82	14961.67	1.33	
1984	76.3	0	0	0	33.8	189.3	286.2	165.7	254.7	8.4	17.3	18.4	1050.1	87.51	11441.23	0.95	
1985	0	0	0	0	0	204.1	218.6	225.4	105	27.5	12	0	792.6	66.05	9074.72	1.05	
1986	0	2.7	0	0	0.08	121.1	137.2	168.9	278.2	251.1	9	3.5	971.776951	80.98	11260.67	0.92	
1987	3.5	0	0	0	0	82	276.7	218.3	139.3	3.5	0	0	723.3	60.28	9706.71	1.47	
1988	0	0	7.8	0	0	95.6	192.3	342.8	183.1	26.9	0	0	848.5	70.71	12540.41	1.63	
1989	0	0	0	0	0	228.4	222.6	228.8	337	47.9	0	83.4	1148.1	95.68	15185.57	0.90	
1990	0	17.6	0	0	2.3	264.7	86.1	242	129.3	95.6	0	0	837.6	69.80	9431.97	1.26	
1991	0	0	0.3	0	0	98.2	49.3	122.3	178.9	17.2	25.8	38.8	530.8	44.23	3456.74	1.41	
1992	416.2	17.7	0	0	6.5	298.6	235.6	93.3	218.6	148	0	24	1458.5	121.54	19995.42	0.95	
1993	41.2	0	0	0	0	292.7	281.2	357.7	101.8	34	12	0	1120.6	93.38	18310.12	1.23	
1994	0	0	0	0	0	145.1	207.3	210.8	130.7	232	26.5	1	953.4	79.45	9484.19	0.61	
1995	0	0	0	0	3.3	170.1	81.2	229.8	192.3	122	51.5	28.1	878.3	73.19	7215.21	0.81	
1996	0	5	0	0	0	167.3	129.2	277.7	117.7	287.6	4.3	35	1023.8	85.32	12026.14	1.03	
1997	1	0	3.5	1.3	10.3	69.7	88	78.6	332.7	179.4	136.4	0	900.9	75.08	10249.51	1.70	
1998	0	0	0	0	0	207.8	232.1	175.5	402.2	159	0	0	1176.6	98.05	18139.25	1.16	
1999	0	0	0	0	0	2	188.1	155.5	212.2	652.2	42.1	10.2	0	1262.3	105.19	36277.50	2.49
MEDIA	30.8971429	6.737142857	4.83428571	0.60285714	8.55077003	145.914286	170.994286	212.017143	232.928571	89.1171429	18.8885714	13.3028571	934.785056	77.8987546			
MÁXIMA	416.2	149.6	149.6	14	113.2	298.6	353.5	357.7	652.2	287.6	136.4	83.4	1458.5				
MÍNIMA	0	0	0	0	0	39.9	49.3	78.6	40.1	3.5	0	0	530.8				
SUMA	1081.40	235.80	169.20	21.10	299.28	5107.00	5984.80	7420.60	8152.50	3119.10	661.10	465.60	32717.48	2726.46			

Precipitación media mensual (Estación 6003)

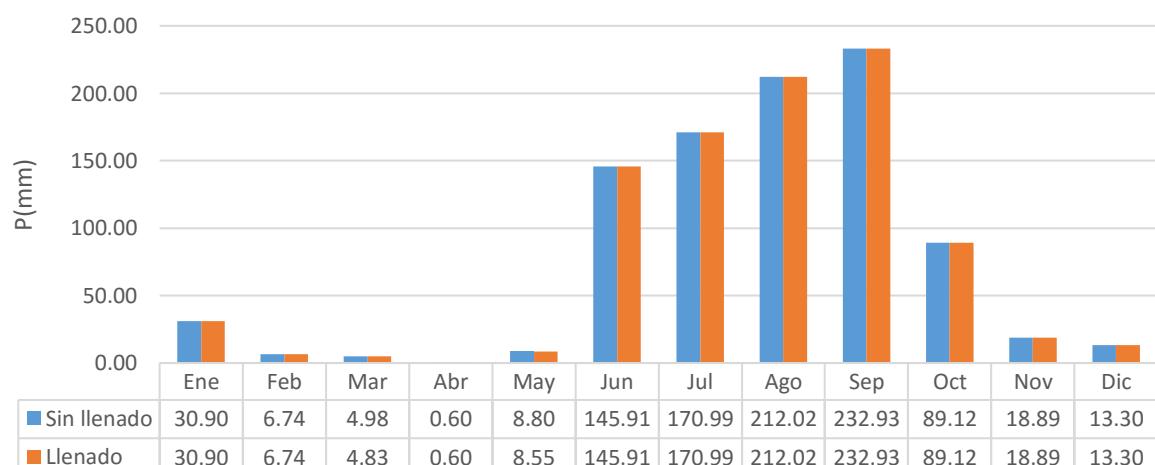
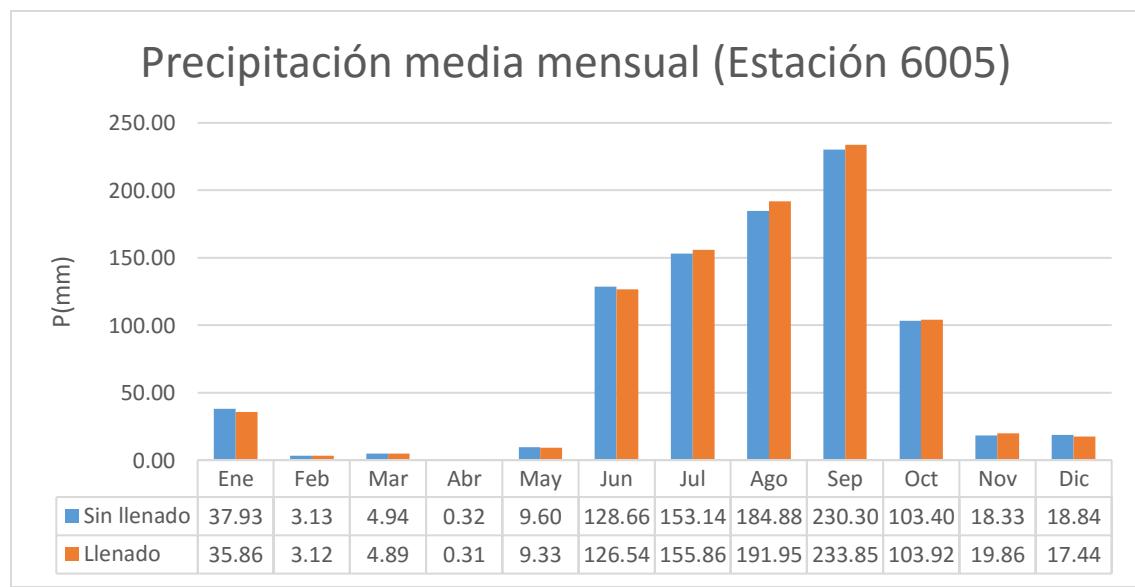


Tabla A.9 Llenado de la estación 6005

6005	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	ANUAL	Promedio	Varianza	Sesgo
1965	7	13.8	0	0	0	114.7	86.7	117.4	180.5	49.5	0	21.4	591	49.25	3734.26	1.10
1966	0	4.4	0	0	3	193.1	122.5	157.4	171.3	140.4	0	0.5	792.6	66.05	6709.26	0.53
1967	151.5	0	0	0	0	75.5	109	279.5	490.5	112.3	25	68	1311.3	109.28	21255.63	1.92
1968	0	33	157	0	5.5	192.9	73.5	286	718.5	49.7	0	72	1588.1	132.34	42172.86	2.45
1969	0	0	0	0	0	69	167.5	351.5	121.2	298.9	0.36	17	1025.4617	85.46	15732.57	1.39
1970	0	0	0	0	0	189.5	172.8	189.5	392.6	6.6	35.7	0	986.7	82.23	16000.16	1.58
1971	1	0	0	0	0	37	168.8	275.3	397.5	240.8	1	0	1121.4	93.45	19713.69	1.26
1972	28	0	0	0	2	255.4	147.8	64.3	28.5	36.7	76	0	638.7	53.23	5994.26	1.96
1973	4	3	0	8	0	112.5	112.4	141	135.6	58.8	0	3.5	578.8	48.23	3563.60	0.68
1974	0	0	0	0	110	144	52.9	281.2	341.5	71.6	1	98	1100.2	91.68	13199.24	1.34
1975	41	0	0	0	2	123.9	946.3	81.5	95	51.5	0.5	0	1341.7	111.81	70984.22	3.30
1976	0	0	0	0	0	156	110	120.9	133.4	186.4	166.2	4	876.9	73.08	6104.75	0.21
1977	5.8	0	0	0	0	269.8	153.5	280.3	104.5	82.4	6	5	907.3	75.61	11284.33	1.24
1978	0	18.5	0	0	2	172.3	203.1	66.6	286.2	90.9	0.00	0.00	839.6	69.97	9740.72	1.29
1979	0	0	0	0	0	50.4	199.9	221.4	172.4	0	0	1.5	645.6	53.80	7864.44	1.29
1980	196.2	0.00	1	0	0	40.50	83.3	249.24	151.6	8.8	0	0	730.640347	60.89	7978.84	1.29
1981	114.5	0	0	0	0	104.4	115.7	291.6	167.4	48.9	0	0.02	842.519663	70.21	8517.03	1.37
1982	0.00	0.01	0	0	2	67.5	61.6	132.9	34	55.74	108.24	7.55	469.550605	39.13	2152.81	0.95
1983	54	15.16	7.98	0	102.5	74.62	199.37	343.86	307.06	22.73	20.5	18.4	1166.17615	97.18	14500.26	1.36
1984	54	0	0	0	16.5	179.9	99.5	101	213	32.5	0	30	726.4	60.53	5364.30	1.21
1985	2.5	0	0	0	0	203.76	218.09	225.29	50.5	72	0	0	772.141609	64.35	8899.51	1.13
1986	0	0	0	0.00	0.14	121.48	137.00	168.46	277.78	250.12	0	0	954.975318	79.58	11420.46	0.91
1987	3.53	0.05	0.00	0	9	91.5	177.3	192	220.5	14.6	21.4	0	729.885988	60.82	7423.81	1.12
1988	0	0.00	2	0	0	131.1	184.9	345.2	447.4	16.1	0	0	1126.7	93.89	24107.32	1.59
1989	0	0	0	0	0	232.3	199.3	143.2	358.6	104.7	0	92.5	1130.6	94.22	14161.91	1.12
1990	0	1.8	0	0	12.4	143	86.2	123.4	117.9	82.3	0	0	567	47.25	3377.00	0.62
1991	0	0	0	2	0	74.3	43.5	66	110.8	39.3	26.3	44	406.2	33.85	1315.61	0.84
1992	559.2	19.4	0	1	10	81	95	63	127	168	0	48	1171.6	97.63	24091.53	2.76
1993	33	0	0	0	0	167	276	301	82	106	13	0	978	81.50	12197.91	1.25
1994	0	0	0	0	0	0	51	84	82	255	24	46	542	45.17	5419.79	2.40
1995	0	0	0	0	0	106	47	235.5	175	110	7	33	713.5	59.46	6394.98	1.28
1996	0	0	0	0	0	137	87.5	260.5	109.5	320	4	0	918.5	76.54	12580.75	1.38
1997	0	0	3	0	48	47.5	131	217.5	185.8	317.5	159	0	1109.3	92.44	11554.53	0.92
1998	0	0	0	0	0	102.2	228	169.2	517.5	92	0	0	1108.9	92.41	24077.83	2.17
1999	0	0	0	0	1.5	167.8	107	91.6	680.1	44.5	0	0	1092.5	91.04	37550.17	2.99
MÉDIA	35.8637655	3.117859407	4.88508821	0.31428571	9.32982748	126.539091	155.85573	191.950025	233.846823	103.922468	19.8630087	17.4392105	902.927182	75.2439318		
MÁXIMA	559.2	33	157	8	110	269.8	946.3	351.5	718.5	320	166.2	98	1588.1			
MÍNIMA	0	0	0	0	0	43.5	63	28.5	0	0	0	0	406.2			
SUMA	1255.23	109.13	170.98	11.00	326.54	4428.87	5454.95	6718.25	8184.64	3637.29	695.21	610.37	31602.45	2633.54		



Anexo III (Tabla de Témez)

Condiciones iniciales			
Hmax=	185	H _o =	0
I _{max} =	234	V ₀ =	0
C=	0.3		
α=	0.9		

Mes	Area km ²	Prec (mm)	ETP (mm)	δ	P°	T _(Exedente)	H _i (Humedad acum)	Evi _(Evap real)	I _(Infiltración)	A _{sup} (esc superficial)	Ri (rec neta) Mm3	Recarga Mm3	Esc Mm3	Escurrimiento Mm3
Ene	1028.47	25.53	77.24	262.24	55.5	0.00	0.00	25.53	0.00	0.00	0.00	123.04	0.000	17.89
Feb	1028.47	3.07	84.39	269.39	55.5	0.00	0.00	3.07	0.00	0.00	0.00		0.000	
Mar	1028.47	3.30	116.73	301.73	55.5	0.00	0.00	3.30	0.00	0.00	0.00		0.000	
Abr	1028.47	2.87	137.00	322.00	55.5	0.00	0.00	2.87	0.00	0.00	0.00		0.000	
May	1028.47	17.19	148.36	333.36	55.5	0.00	0.00	17.19	0.00	0.00	0.00		0.000	
Jun	1028.47	119.85	124.69	309.69	55.5	13.00	0.00	106.85	12.32	0.68	12.67		0.704	
Jul	1028.47	157.50	109.09	294.09	55.5	30.55	17.86	109.09	27.02	3.53	27.79		3.628	
Ago	1028.47	165.79	102.46	269.60	50.141	39.91	41.28	102.46	34.10	5.82	35.07		5.981	
Sep	1028.47	159.65	90.60	234.32	43.117	44.13	66.20	90.60	37.13	7.00	38.19		7.201	
Oct	1028.47	81.07	90.14	208.93	35.64	9.43	47.70	90.14	9.07	0.37	9.33		0.376	
Nov	1028.47	13.83	83.65	220.95	41.191	0.00	0.00	61.52	0.00	0.00	0.00		0.000	
Dic	1028.47	6.54	76.09	261.09	55.5	0.00	0.00	6.54	0.00	0.00	0.00		0.000	