



**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA**

**Instituto de Ingeniería**

**Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería**

**Recarga artificial en el acuífero del Valle de Guadalupe, Ensenada, Baja  
California**

Tesis

Para obtener el grado de

Maestro en Ciencias

Presenta

**Iván Miguel Ramírez Del Castillo**

Director de Tesis

Dr. Jaime Alonso Reyes López

Codirector de Tesis

Dr. Osvaldo Leyva Camacho

Mexicali B.C. junio de 2018

# Agradecimientos

A mi comité de Sinodalías integrado por:

Dra. Concepción Carreón Diazconti

Dr. Jorge Ramirez Hernández

Dra. Jesús Eliana Rodríguez Burgueño

por su disponibilidad, enseñanza y apoyo.

Un especial agradecimiento al Dr. Jaime Alonso Reyes López, mi director de tesis, y Dr. Oswaldo Leyva Camacho mi codirector por toda su orientación, apoyo y enseñanza.

Al Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC) Campus Mexicali por creer en mí.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento otorgado.

## Resumen

El agua dulce es un recurso natural elemental para la vida e indispensable para el desarrollo de cualquier región, su correcta gestión es estudiada profundamente, a causa de que en muchas regiones se depende del agua subterránea, la cual no siempre se encuentra disponible. La recarga artificial de acuíferos también llamada gestión de recarga de acuíferos es efectiva para combatir este problema. “La recarga artificial de acuíferos consiste en disponer agua superficial en balsas, surcos, zanjas o cualquier otro tipo de dispositivo, desde donde se infiltra y alcanza el acuífero” (Bouwer, 2002). Para la implementación de un proyecto de recarga artificial uno de los elementos importantes es la selección de los sitios susceptibles para realizar este tipo de obras. Este análisis se lleva a cabo tomando en cuenta múltiples criterios físicos del medio como la pendiente, la densidad de drenaje fluvial, coeficiente de escurrimiento, geología, tipo de suelo, infiltración, entre otros. En esta tesis se estudiará el caso del acuífero Guadalupe (conocido extraoficialmente como acuífero del Valle de Guadalupe) integrando el proceso de análisis jerárquico (AHP por sus siglas en inglés) en un análisis espacial multicriterio (AEMC) para la identificación de sitios con aptitud para aplicar técnicas de recarga artificial.

**Palabras Clave:** Recarga artificial de acuíferos, evaluación espacial multicriterio, proceso analítico jerárquico.

# Índice

<b>Capítulo 1</b>	<b>Introducción</b>	<b>1</b>
1.1	Antecedentes	2
1.1.1	Distribución de agua dulce	3
1.1.2	Aguas subterráneas	3
1.2	Planteamiento de problema	5
1.3	Objetivos	7
1.3.1	Objetivo General	7
1.3.2	Objetivos específicos	7
1.4	Justificación	7
1.5	Hipótesis	7
1.6	Área de estudio	9
<b>Capítulo 2</b>	<b>Marco teórico conceptual</b>	<b>10</b>
2.1	Sistemas de información geográfica y objetos	10
2.2	Evaluación multicriterio	11
2.3	Evaluación espacial multicriterio	11
2.4	Proceso Analítico Jerárquico (AHP)	12
2.5	Pertenencia difusa	13
2.6	Ciclo hidrológico	14
2.7	Balance de agua y recarga	15
2.8	Acuífero	16
2.9	Recarga natural	16
2.9.1	Áreas de recarga en regiones áridas y semiáridas	16
2.10	Recarga artificial de acuíferos	18
2.10.1	Fuentes del agua para la recarga artificial	18

2.10.2	Aplicaciones y tipos de técnicas de recarga .....	18
2.10.3	Hidrogeología .....	20
2.11	Coefficientes de escurrimiento .....	20
2.12	Método del Número de Curva del SCS .....	22
2.12.1	Cobertura de suelo y tratamiento .....	23
2.12.2	Grupos hidrológicos de suelos .....	24
2.12.3	Condiciones de humedad del terreno .....	25
<b>Capítulo 3</b>	<b><i>Materiales y métodos</i></b> .....	<b>26</b>
3.1	Selección del procedimiento para el procesamiento de datos.....	26
3.2	Recopilación de datos .....	28
3.3	Análisis espacial multicriterio. ....	29
3.3.1	Proceso de análisis jerárquico AHP y superposición.....	30
3.3.2	Pertenencia difusa .....	30
<b>Capítulo 4</b>	<b><i>Resultados</i></b> .....	<b>31</b>
4.1	Modelo digital de elevaciones .....	31
4.2	Pendiente .....	32
4.3	Geología .....	33
4.4	Drenaje .....	34
4.5	Uso de suelo y cobertura .....	36
4.6	Tipo de Suelo.....	37
4.7	Precipitación .....	38
4.8	Escurrimiento promedio anual.....	39
4.9	Niveles piezométricos.....	41
4.10	Matriz de comparaciones pareada .....	42
4.11	Reclasificación de criterios.....	42
4.12	Zonas potenciales de recarga y ubicación de sitios puntuales de recarga .....	44
4.12.1	AHP .....	44
4.12.2	Pertenencia difusa .....	46

4.13	Estimación de escurrimientos por cuenca.....	¡Error! Marcador no definido.
4.14	Números de Curva.....	49
4.15	Obras sugeridas y diseño .....	52
<b>Capítulo 5</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>53</b>
<b>Capítulo 6</b>	<b>Referencias.....</b>	<b>54</b>

## Índice de Figuras

Figura 1.1	Escasez física y/o económica de agua a nivel mundial fuente. Fuente: (Molden 2007)	2
Figura 1.2..	Distribución del agua a nivel mundial. Datos obtenidos de Gleick (1993).....	3
Figura 1.3	Uso de agua subterránea por país. Elaborado con datos de Giordano (2009).....	4
Figura 1.4	7 Evolución de la población de la región Guadalupe .....	5
Figura 1.5	Disponibilidad media anual de agua subterránea. Fuente: (DOF 2015) .....	6
Figura 1.6	Localización del acuífero Guadalupe .....	9
Figura 2.1	Tipos de Objetos en un Sistema de información geográfica .....	10
Figura 2.2	Tipos de métodos multicriterio. Tomado de Pizano (2013).....	11
Figura 2.3	Análisis espacial multicriterio .....	12
Figura 2.4	Descripción de conjuntos crisp (arriba) y fuzzy (abajo) de “persona alta.....	14
Figura 2.5	Ciclo del agua .....	15
Figura 2.6	Diagrama conceptual de un bloque de montaña y frente que muestra los principales tipos de recarga Tomado de Maliva and Missimer (2012) .....	17
Figura 3.1	Metodología.....	28
Figura 4.1	Modelo digital de elevaciones .....	32
Figura 4.2	Pendientes acuífero Guadalupe .....	33
Figura 4.3	Geología .....	34
Figura 4.4	Densidad de drenaje .....	35
Figura 4.5	Cobertura de suelo.....	36
Figura 4.6	Grupo hidrológico de suelo .....	37
Figura 4.7	Regresión lineal para pronósticos de datos faltantes en las estaciones .....	39
Figura 4.8	Precipitación media anual del acuífero Guadalupe .....	39
Figura 4.9	Escurremientos.....	40

Figura 4.10 Profundidad de Niveles piezométricos 15 abril del 2011 .....	41
Figura 4.11 Zonas con potencial para obras de recarga artificial .....	45
Figura 4.12 Sitios de recarga artificial.....	46
Figura 4.13 Zonas con aptitud para aplicar técnicas de recarga, usando pertenecía difusa.....	47
Figura 4.14 Subcuencas .....	48
Figura 4.15 Número de Curva .....	49
Figura 4.16 Sitio 15 y Números de curva de su Subcuenca.....	50
Figura 4.17 Intensidad de lluvia 10 minutos (periodo de retorno de 10 años) .....	50

## Índice de Tablas

Tabla 1 Escala de Saaty .....	12
Tabla 2 Índices aleatorios de consistencia para diferentes valores de “n” .....	13
Tabla 3 Tipos de métodos de recarga artificial.....	19
Tabla 4 Principales factores hidrológicos a considerar para recarga artificial de acuíferos. ....	20
Tabla 5 Valores de K, en función del tipo y uso de suelo. ....	21
Tabla 6 Números de Curva, antecedente de humedad II elaboración propia con datos de Mishra and Singh (2013).....	23
Tabla 7 Tasa de infiltración de los grupos hidrológicos de suelos, obtenidos de Musgrave (1955). .....	24
Tabla 8 Condiciones de humedad antecedente en suelo Tomada de Hawkins et al., (1985) .....	25
Tabla 9 Ecuaciones para ajuste de CN por condiciones de humedad antecedentes húmeda.....	25
Tabla 10 Artículos sobre selección para sitios de recarga artificial de acuíferos .....	27
Tabla 11 Estaciones meteorológicas.....	38
Tabla 12 Matriz de comparación acuífero Guadalupe.....	42
Tabla 13 Subcriterios .....	43
Tabla 14 Matriz para Geología .....	43
Tabla 15 Coordenadas de sitios sugeridos para recarga .....	45
Tabla 17 Estimación de escurrimientos con un evento de precipitación de 52mm .....	51

# Capítulo 1 Introducción

El agua dulce es un recurso natural elemental para la vida e indispensable para el desarrollo de cualquier región, su correcta gestión es estudiada profundamente, a causa de que en muchas regiones se depende del agua subterránea, la cual no siempre se encuentra disponible. La recarga artificial de acuíferos también llamada gestión de recarga de acuíferos es efectiva para combatir este problema. La recarga artificial de acuíferos consiste en disponer agua superficial en balsas, surcos, zanjas o cualquier otro tipo de dispositivo, desde donde se infiltra y alcanza el acuífero (Bouwer, 2002).

Para la implementación de un proyecto de recarga artificial uno de los elementos importantes es la selección de los sitios susceptibles para realizar este tipo de obras. Este análisis se lleva a cabo tomando en cuenta múltiples criterios físicos del medio como la pendiente, la densidad de drenaje fluvial, escurrimiento, geología, tipo de suelo, infiltración, entre otros. En esta tesis se estudiará el caso del acuífero Guadalupe (conocido extraoficialmente como acuífero del Valle de Guadalupe) integrando el proceso de análisis jerárquico (AHP por sus siglas en inglés) en un análisis espacial multicriterio (AEMC) para la identificación de sitios con aptitud para aplicar técnicas de recarga artificial.

## 1.1 Antecedentes

La escasez de agua es un fenómeno no solo natural sino también causado por la acción del ser humano. Así, el crecimiento demográfico, la urbanización y la industrialización son algunos de los factores que contribuyen al aumento de la demanda y si no se tiene una correcta gestión de los recursos esto puede generar escasez. Existen 2 tipos principales de escasez de agua: la escasez física y la escasez económica (FAO 2013). Este reporte menciona que la escasez física sucede cuando no hay agua suficiente para cubrir todas las demandas, incluyendo los caudales ecológicos. Mientras que la escasez económica de agua es una situación resultante de la falta de inversión en agua, o la falta de capacidad humana para satisfacer la demanda.

Actualmente, la poblacional mundial es de 7,347 millones de personas con una tasa de crecimiento de 1.182 % (Banco Mundial 2015). Alrededor de una quinta parte de la población mundial vive en áreas de escasez física de agua y, alrededor de un cuarto de la población mundial se enfrentan a situaciones de escasez económica de agua (FAO, 2007). Sobre esta escasez económica se menciona que son las regiones que se encuentran atrasadas en infraestructura para transportar el agua desde ríos y acuíferos. La figura 1.1 muestra la escasez física y económica mundial.

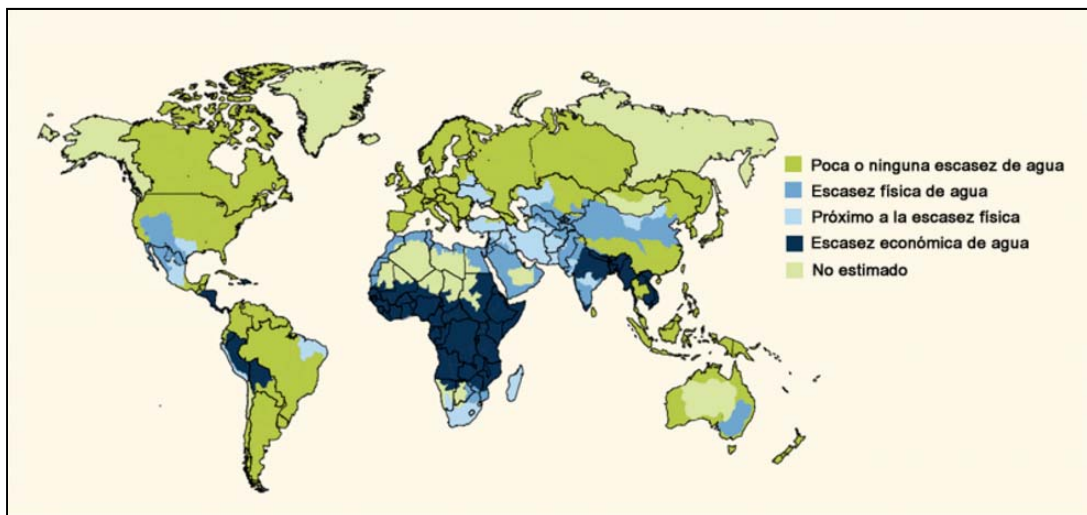


Figura 1.1 Escasez física y/o económica de agua a nivel mundial fuente. Fuente: (Molden 2007)

### 1.1.1 Distribución de agua dulce

El agua dulce disponible está estimada en 2.5%, de esta agua, el 68.7% se encuentra en los glaciares y casquetes polares, el 1.2% está distribuida en aguas superficiales y en la atmósfera y finalmente el 30.1% se encuentra en acuíferos subterráneos (Gleick, 1993). La distribución del agua se muestra en la figura 1.2

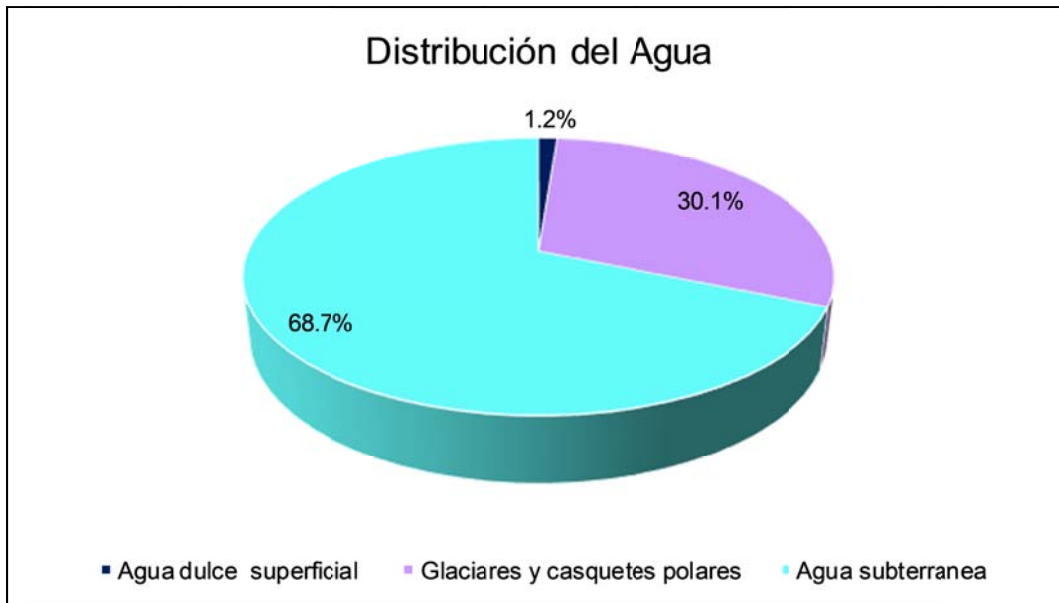


Figura 1.2.. Distribución del agua a nivel mundial. Datos obtenidos de Gleick (1993)

### 1.1.2 Aguas subterráneas.

Las aguas subterráneas resultan imprescindibles, representan el 98% del agua dulce no congelada, abastecen de agua potable a por lo menos el 50% de la población mundial y representan el 43% de toda el agua utilizada para el riego (FAO, 2010). La figura 1.3 muestra el uso de agua subterránea por país.

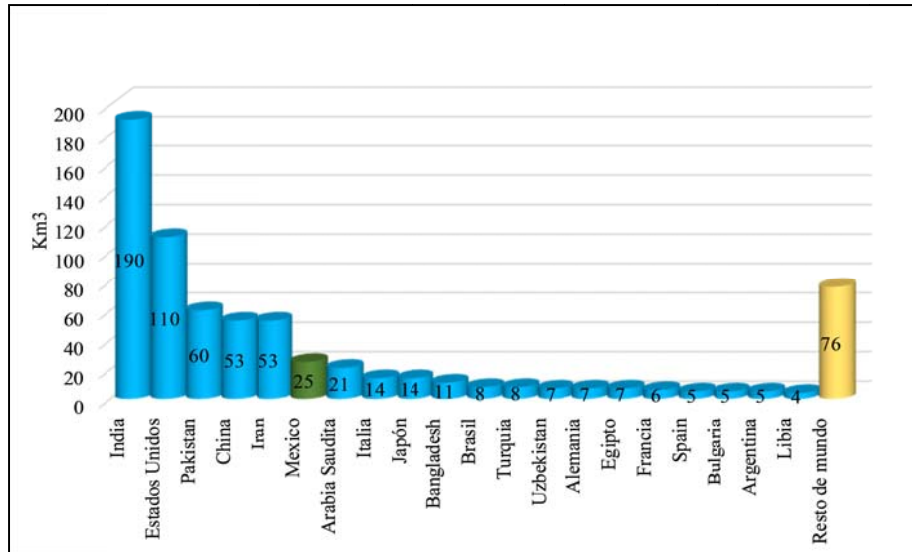


Figura 1.3 Uso de agua subterránea por país. Elaborado con datos de Giordano (2009).

En México el agua subterránea es de gran importancia ya que alrededor del 37% (30.1 miles de millones de m<sup>3</sup>/año al 2009) del volumen total concesionado para usos consuntivos proviene de acuíferos (Giordano 2009). En nuestro país se tienen registrados 653 acuíferos para fines de administración cuyos nombres oficiales fueron publicados en el DOF del 5 de diciembre de 2001; uno de estos acuíferos es el acuífero Guadalupe (nombre oficial, aunque localmente se le conoce como acuífero del Valle de Guadalupe).

El acuífero de Guadalupe es la fuente principal de agua de la región. Este acuífero es parte de la cuenca hidrológica del Valle de Guadalupe ver Figura 3.1 dentro de la cual están las localidades de Francisco Zarco, San Antonio Necua, Artículo 115, El porvenir, Emiliano Zapata e Ignacio Zaragoza, con un total de 5194 habitantes (INEGI 2015). En la figura 1.4 se muestra evolución de la población de 1990 al 2010. La economía de la región está basada en la producción de vino y los servicios turísticos.

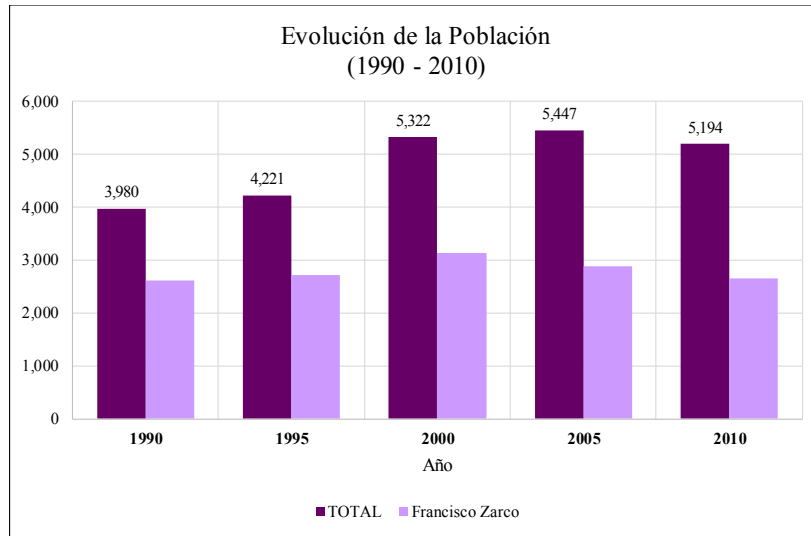


Figura 1.4 7 Evolución de la población de la región Guadalupe

Figura 1.7 Evolución de la población de la región Guadalupe Fuente: de datos INEGI

## 1.2 Planteamiento de problema

La actualización de la disponibilidad media anual del acuífero fue publicada en diario oficial de la federación el 20 de abril del 2015 (CONAGUA, 2015). En la fig. 1.4 se muestra el balance de esta disponibilidad que indica un déficit de agua de 12.21 Mm<sup>3</sup>. Esto ha puesto lo focos de alarma en la población y se han realizado ciertas medidas para el ahorro del agua como la tecnificación de los riegos, cultivos más rentables como la vid que ha representado con un valor agregado alto relacionado al sector turístico, entre otras. Otra alternativa que se ha manejado es el aumento de la oferta con el incremento de la recarga, aunque esta alternativa requiere de un estudio detallado. De esta necesidad en la región se plantea este estudio, ya que aumentar la oferta de agua será de gran importancia para el desarrollo de la comunidad.

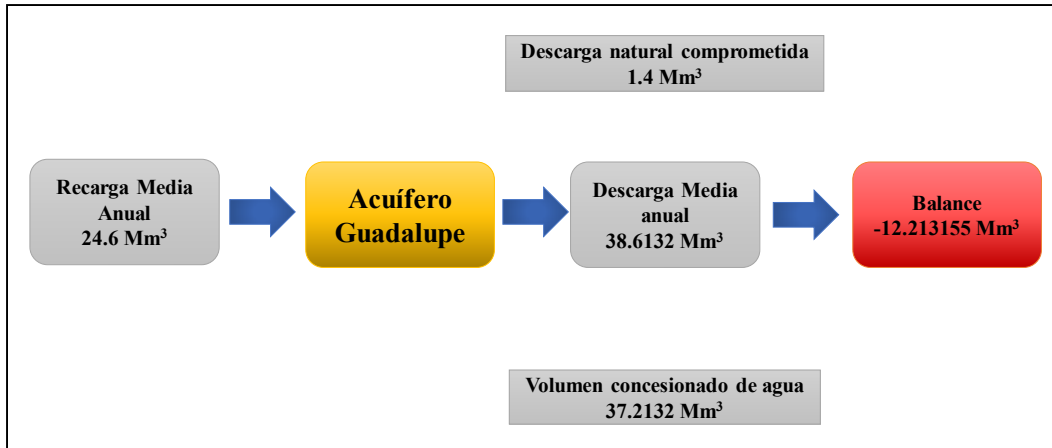


Figura 1.5 Disponibilidad media anual de agua subterránea. Fuente: (DOF 2015)

con una descarga natural comprometida de 1.4 Mm<sup>3</sup> y un volumen concesionado de agua de 37.2 Mm<sup>3</sup>, se tiene una descarga media anual de 38.6 Mm<sup>3</sup> resultando en un balance negativo de 12.2 Mm<sup>3</sup>

Para un mejor desarrollo de la zona se necesita contar con suficiente agua. Al ser el acuífero la fuente principal de agua, se puede establecer que para satisfacer las demandas es preciso aumentar la recarga del acuífero. De ahí que las técnicas de recarga artificial de acuíferos también llamadas gestión de recarga pueden ser un método efectivo globalmente usado para combatir este problema. Así el propósito fundamental de este estudio es identificar sitios potenciales para obras de recarga artificial.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo General**

Determinación de los sitios susceptibles de aplicar técnicas de recarga artificial en el acuífero Guadalupe, así como el tipo de sistema de recarga más idóneo.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Establecer los diferentes datos físicos y geográficos a utilizar.
- Selección de criterios para cada dato temático.
- Establecer la ruta para el procesamiento de datos
- Generación de mapas temáticos.
- Análisis para la selección de sitios de recarga artificial.

## **1.4 Justificación**

La correcta ubicación de obras de recarga garantiza su correcto funcionamiento. De ahí que establecer los criterios y los datos requeridos para un proyecto de recarga artificial son de suma importancia. Además, la selección de la metodología apropiada para su análisis, como el proceso de análisis jerárquico (AHP por sus siglas en inglés) y el análisis espacial multicriterio (AEMC), junto con lo apropiado de estos criterios permitirá su éxito. La aplicación de esta metodología ha tenido éxito en otras regiones del mundo con similares condiciones geográficas, de ahí que es justificable su uso. La integración de toda esta información y el análisis a partir de los Sistemas de Información Geográfico (SIG) servirá como guía para la toma de decisiones de futuros proyectos.

## **1.5 Hipótesis**

La hipótesis de este estudio es si es posible establecer algunas áreas con un potencial de recarga a partir del uso de las herramientas de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en la región del acuífero Guadalupe para aumentar la oferta de agua.

Además el estudio tratará de responder a otras interrogantes como son:

- si el acuífero del Valle de Guadalupe, como al igual que otros acuíferos aluviales similares, responderá rápidamente a la recarga.

- si hay las condiciones para que las precipitaciones de la región produzcan recarga
- si la ocurrencia de una precipitación extraordinaria podría ser un evento potencial de recarga

Estas interrogantes se pueden resumir en ¿hay agua suficiente de las precipitaciones para recargar al acuífero y es este capaz de aceptarla? Se intentará de de responder esto.

## 1.6 Área de estudio

El acuífero Guadalupe, definido con la clave 0207 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo de las Aguas Subterráneas de la Comisión Nacional del Agua (SIGMAS), se localiza en la porción noroccidental del estado de Baja California, entre los paralelos  $31^{\circ}59'$  y  $32^{\circ}15'$  de latitud norte y los meridianos  $116^{\circ}05'$  y  $116^{\circ}44'$  de longitud oeste, cubriendo una superficie de  $976 \text{ km}^2$  (Figura 1.6).

Limita al norte con el acuífero Las Palmas, al este con Real del Castillo, al sur con Ensenada y al oeste con La Misión, todos ellos en el Estado de Baja California, Geopolíticamente el acuífero se localiza en su mayor parte en el municipio Ensenada, sólo una pequeña porción de su extremo norte se ubica en el municipio Tecate.

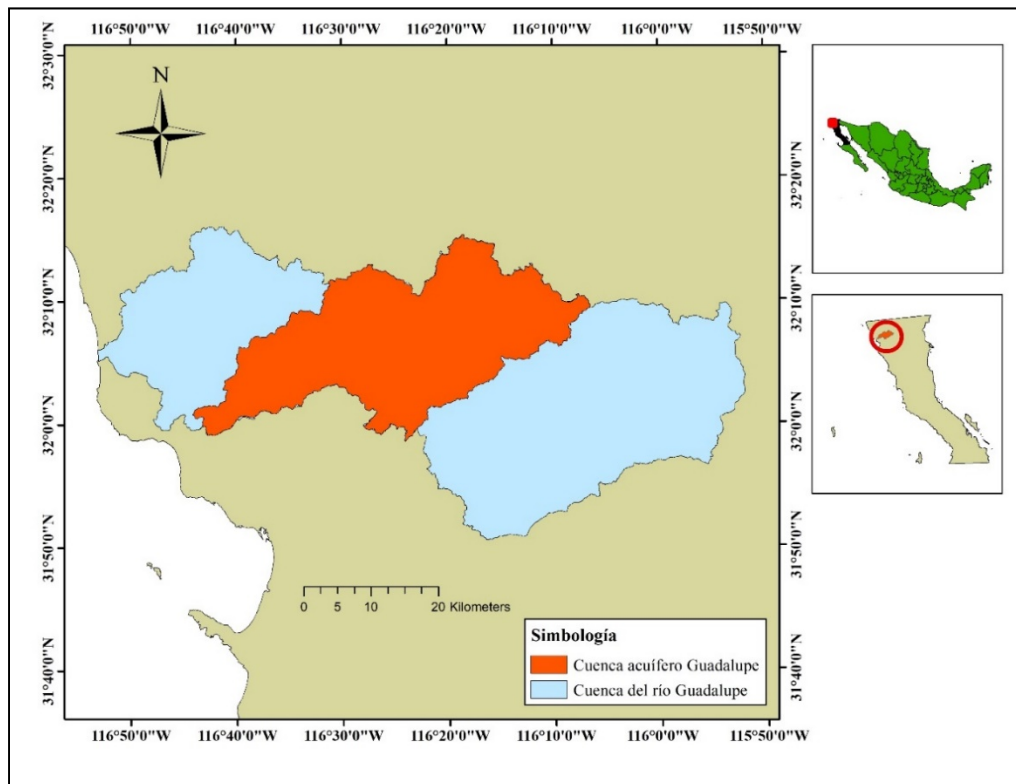


Figura 1.6 Localización del acuífero Guadalupe

## Capítulo 2 Marco teórico conceptual

### 2.1 Sistemas de información geográfica y objetos.

Un sistema de información geográfica (SIG) es definido como un sistema de hardware, software y procedimientos diseñado para realizar la captura, almacenamiento, manipulación, análisis, modelización y presentación de datos referenciados espacialmente para la resolución de problemas complejos de planificación y gestión (NCGIA,1990). El término sistemas de información geográfica fue introducido por Michael Goodchild en 1992. Se compone de los siguientes elementos: usuarios, hardware, software, métodos, datos, usuarios.

Los objetos que son representaciones del mundo real; esto es cualquier rasgo físico que se quiera representar (figura 2.1). En el entorno SIG los objetos espaciales son representados por 2 tipos de modelos: el vector y el raster. Además para estos existen 3 diferentes formas que son: puntos, líneas y polígonos. Ya que este trabajo no intenta explicar los conceptos básicos de SIG se recomiendan ciertas citas como (Longley, Goodchild et al. 2005), entre otras.

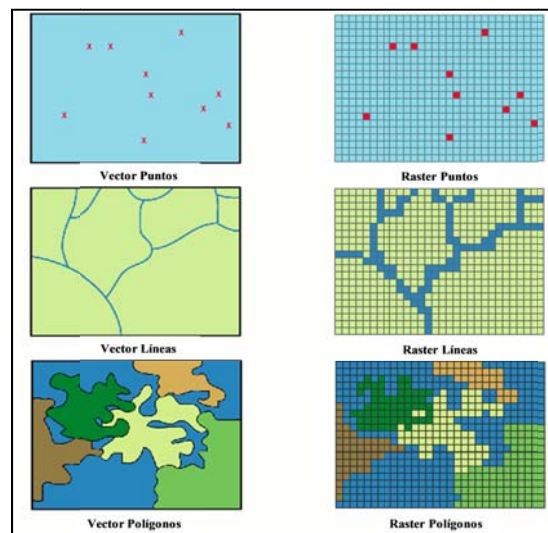


Figura 2.1 Tipos de Objetos en un Sistema de información geográfica

## 2.2 Evaluación multicriterio

La evaluación multicriterio (EMC) se define como un conjunto de técnicas para apoyo en la toma de decisiones. Hay diferentes métodos de evaluación multi-criterio disponibles en la literatura y cada uno tiene sus propias características.

Existen muchas maneras de clasificar los métodos de EMC, una de ellas es de acuerdo con el tipo de datos que usan. Es decir, se pueden tener métodos EMC determinísticos, estocásticos o difusos. Otra forma es de acuerdo con el número de tomadores de decisiones involucrados en el proceso de decisión. Por lo tanto, tenemos métodos de EMC de tomadores de decisiones individuales y de grupo que permite integrar diferentes criterios. En la figura 2.2 se resumen las de mayor uso.

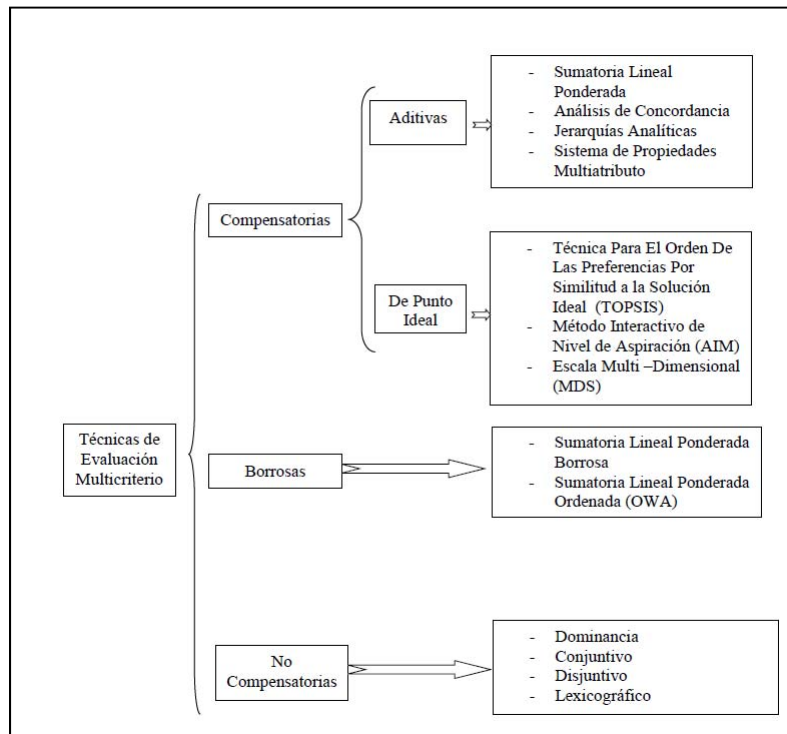


Figura 2.2 Tipos de métodos multicriterio. Tomado de Pizano (2013)

## 2.3 Evaluación espacial multicriterio

La EMC basado en SIG (GIS-EMC) es un procedimiento que transforma y combina datos geográficos y las preferencias de los que toman la decisión (entrada), en un mapa de decisión (salida). La principal ventaja de incorporar MCDA en SIG es que un tomador de decisiones

puede introducir juicios de valor (Malczewski 1999), a esta integración se le conoce como análisis espacial multicriterio (ver figura 2.3).



Figura 2.3 Análisis espacial multicriterio

## 2.4 Proceso Analítico Jerárquico (AHP)

Dentro de los métodos de EMC, se encuentra el método denominado Proceso Analítico Jerárquico (AHP; Analytical Hierarchy Process) desarrollado por Thomas L. Saaty (2008). Este autor esbozó cuatro pasos claves para usar el AHP, que se puede resumir como decidir entre alternativas, como sigue:

1. Definir la cuestión a considerar.
2. Identificar la meta, que es el criterio de que los otros elementos dependerán y que deberían estar en la parte superior del árbol de toma de decisiones.
3. Desarrollar una matriz de comparación en pares.
4. Ponderar cada elemento de acuerdo con las prioridades obtenidas a partir de la matriz de comparación, que puede utilizarse entonces como base para decidir entre las alternativas en la parte inferior de la jerarquía.

El primer paso es jerarquizar los criterios, usando la escala de Saaty.

Tabla 1 Escala de Saaty

Escala	1	3	5	7	9	2,4,6,8
<b>Importancia</b>	Igual importancia	Moderada importancia	Importancia fuerte	Muy fuerte	Extrema	Valores intermedios

Elaborado con datos de Saaty 1990

El AHP mide la inconsistencia, con la proporción de consistencia que es igual a:

CR= Proporción de Consistencia CI=Índice de Consistencia RI=Índice Aleatorio,

*Ecuación 2*

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

*Ecuación 1*

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

$\lambda_{max}$  es el valor propio principal, real mayor de la matriz de comparación Matriz Original x Pesos.

*Tabla 2 Índices aleatorios de consistencia para diferentes valores de "n"*

<b>n</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
<b>R.I.</b>	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

## 2.5 Pertenencia difusa

Como lógica multivaluada, en la definición de grados de pertenencia, la lógica difusa emplea valores continuos entre 0 (que representa hechos totalmente falsos) y 1 (totalmente ciertos).

Así, la lógica binaria clásica puede verse como un caso particular de la lógica difusa. Zadeh propone en 1965 por primera vez la noción de Conjunto Difuso. Este hecho marca el principio de una nueva teoría denominada Teoría de Conjuntos Difusos.

Los conceptos se asocian a conjuntos difusos (asociando los valores de pertenencia) en un proceso llamado fuzzificación. Una vez que tenemos los valores fuzzificados podemos trabajar con reglas lingüísticas y obtener una salida, que podrá seguir siendo difusa o defuzzificada para obtener un valor discreto crisp. De este modo, a diferencia de la teoría clásica de conjuntos que se basa en el principio básico de la lógica de forma que un individuo pertenece o no pertenece a un conjunto, la idea básica de un conjunto difuso es que un elemento forma parte de un conjunto con un determinado grado de pertenencia.

De este modo una proposición no es totalmente (sino parcialmente) cierta o falsa. Este grado se expresa mediante un entero en el intervalo  $[0; 1]$ .

Un ejemplo claro es la representación de la altura de una población de individuos.

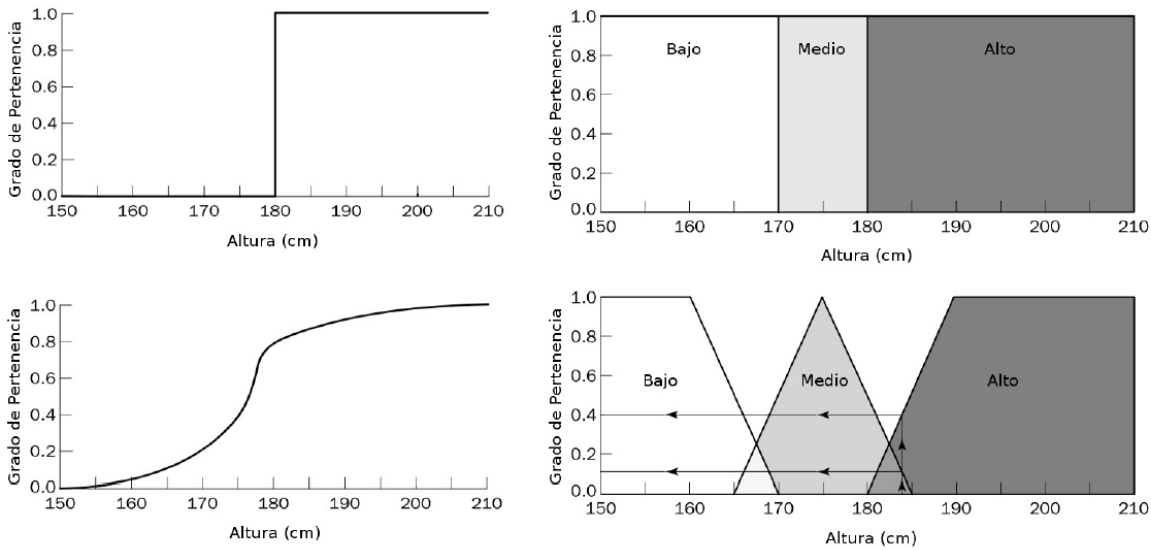


Figura 2.4 Descripción de conjuntos crisp (arriba) y fuzzy (abajo) de “persona alta”.

Tomado de (Morcillo 2005)

En la representación crisp, se dibuja una línea que separa claramente en 1.8m los individuos que son altos de los que no lo son, asociando un valor de pertenencia estricto al conjunto de los altos a aquellos que superan esa altura. Sin embargo, el conjunto difuso permite expresar que Carlos tiene un grado de pertenencia al conjunto de los altos en  $\mu_A(\text{Altura}) = 0.82$ . Así, un conjunto difuso proporciona una transición suave entre los límites de lo que sería un conjunto crisp. El Universo del discurso se define como todos los posibles valores que puede tomar una determinada variable (en el caso de la imagen anterior se correspondería con el eje horizontal de las gráficas, desde 150 a 210cm).

## 2.6 Ciclo hidrológico

El agua es el componente principal del ciclo hidrológico, su estado más natural y conocido es el líquido. Esta forma parte de los océanos, lagos, ríos y humedales, que por efecto de la radiación

solar y aire seco que sopla sobre tales superficies la evapora. Con el agua evaporándose se forman nubes, las cuales son transportadas por el viento hacia los continentes donde el vapor de agua, si las condiciones son propicias, se condensa y precipita en forma de lluvia o nieve. El agua puede caer al mar, sobre tierra, o se puede evaporar antes de alcanzar el suelo. La lluvia que cae en tierra juega un papel muy importante, ya que puede seguir dos caminos o ambos a la vez. Si el suelo es poroso o está fracturado, parte del agua se infiltrará al subsuelo pasando a formar parte del agua subterránea; si no es así, entonces formará escurrimientos superficiales. Ambos sistemas fluyen impulsados por la acción de la gravedad y se detienen hasta llegar al océano, donde comienza el ciclo de nuevo. La figura 2.4 muestra el ciclo hidrológico.



Figura 2.5 Ciclo del agua

## 2.7 Balance de agua y recarga

$$I - E = +/- \Delta V$$

donde;

I: Ingresos

E: Egresos

$\Delta V$ : Variación del almacenamiento

Esta ecuación puede ser aplicada a casi todas las variables del medio físico, incluida el agua, por región o unidad de estudio cualquiera y en un tiempo cualquiera.

Sin embargo, cuando la unidad de tiempo es grande se debe considerar que las variaciones en el volumen almacenado son despreciables y, en ese caso, las entradas son iguales a las salidas. Este balance puede ser analizado con más detalle si se recuerda que tanto el escurrimiento superficial, el flujo subterráneo y la evapotranspiración dependen de una única fuente primaria: las precipitaciones. De esta manera la fórmula del balance global se puede expresar como:

$P =$  Precipitación;  $E_s =$  Escurrimiento fluvial;  $ET =$  Evapotranspiración;  $I_e =$  Infiltración eficaz

## **2.8 Acuífero.**

Todo aquel paquete de rocas, que por sus características petrofísicas puede almacenar y transmitir agua subterránea en cantidades importantes para los diferentes usos. Para ampliar sobre este término se pueden consultar libros clásicos de hidrología subterránea como Davis & Deweist (1966), Freeze & Cherry (1979), Custodio & Llamas (1983); Drever (1997), Domenico & Schwartz (1998), entre otros.

## **2.9 Recarga natural**

Generalmente se refiere al agua que entra al sistema de agua subterránea. El proceso principal en la recarga natural es la infiltración proveniente de la precipitación. La infiltración de los cuerpos de agua como ríos o cualquier flujo corriente de agua a menudo son componentes de recarga. También se recomienda lecturas básicas como las mencionadas en el apartado anterior.

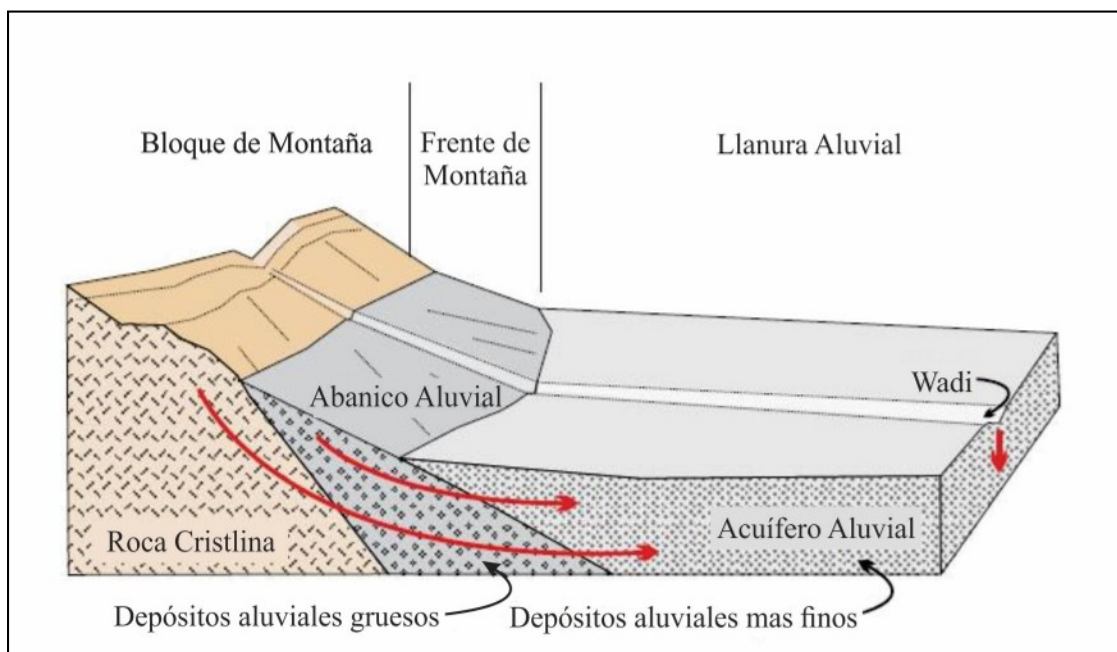
### **2.9.1 Áreas de recarga en regiones áridas y semiáridas**

Las áreas de recarga en las regiones áridas y semiáridas son limitadas a los diferentes sistemas de recarga utilizados.. Pilgrim et al. (1988) hace una distinción inicial en tres amplias clases que se basan en los sistemas hidrológicos en estas regiones áridas; estos sistemas se mencionan a continuación:

- Regiones en pendiente con una red de flujo integrada.
- Planicies con una red de flujo primitiva o sin red.

- Regiones con grandes aportes de aguas superficiales o subterráneas de regiones más húmedas, frecuentemente con una extensa agricultura de regadío.

Maliva and Missimer (2012) Mencionan que en regiones que cuentan con pendiente y redes de flujo integradas, la recarga se produce en tierras altas por infiltración directa o indirecta en la roca y en pequeñas cuencas; a este sistema se le conoce como recarga de bloque de montaña. Cuando ocurre en las corrientes perenes o efímeras es comúnmente usado el termino recarga de Wadi, que proviene de la palabra árabe valle, pero que se ha adoptado para referirse a lechos de ríos secos originados por corrientes efímeras, este tipo de recarga limita la distancia que podrán alcanzar las corrientes localizadas frente a los abanicos aluviales (Referencia o si es la misma de Maliva & Missimer hay que redactar de otra forma).



*Figura 2.6 Diagrama conceptual de un bloque de montaña y frente que muestra los principales tipos de recarga Tomado de Maliva and Missimer (2012)*

En áreas sin una red de flujo integrada bien desarrollada, la recarga a menudo ocurre principalmente en lagos secos y otras depresiones. Además, existe la recarga por procesos resultado de actividades humanas como la irrigación.

Los sistemas de corrientes efímeras son los principales sitios de recarga en regiones semiáridas y áridas y en algunas tierras áridas son las únicas zonas geográficas de recarga significativa (Maliva & Missimer 2012). En este mismo artículo los autores anteriores mencionan que los sistemas fluviales efímeros también pueden representar un riesgo para las comunidades locales por su reducida ocurrencia e inundaciones súbitas y citan a Salih y Ghanem (2002) que dicen “es irónico que en los países que generalmente sufren una grave escasez de agua, las inundaciones son responsables de pérdidas considerables de vidas y propiedades”.

## **2.10 Recarga artificial de acuíferos**

Históricamente existen diversos autores clásicos que definen la recarga artificial de acuíferos. Todd en 1959 escribió “la recarga artificial de acuíferos es la práctica de incrementar por medios artificiales la cantidad de agua que entra a un acuífero subterráneo” (Bouwer 2002).

Freeze y Cherry (1979) definieron la recarga artificial como el conjunto de técnicas cuyo objetivo principal es permitir una mejor explotación de los acuíferos por aumento de sus recursos y creación de reservas, mediante una intervención directa o indirecta en el ciclo natural del agua.

Otra definición más técnica, es la de Bouwer 2002, el cual explica que la recarga artificial de acuíferos consiste en disponer agua superficial en balsas, surcos, zanjas o cualquier otro tipo de dispositivo desde donde se infiltra para alcanzar el acuífero.

Ha sido también definida por la Unesco como el aumento de la alimentación natural de agua subterránea a los acuíferos o embalses de agua subterránea suministrando agua a través de pozos, inundando o cambiando las condiciones naturales.

### **2.10.1 Fuentes del agua para la recarga artificial**

Las fuentes principales de agua para la recarga artificial de acuíferos son agua superficial, agua de tormenta (escurrimientos), agua tratada, agua potable y agua importada (de otra cuenca) (UNESCO-IAH 2005).

### **2.10.2 Aplicaciones y tipos de técnicas de recarga**

La recarga artificial puede tener múltiples aplicaciones las cuales se enlistan a continuación:

Reducir y/o detener la intrusión de agua salada

Mitigación de las inundaciones.

Almacenamiento subterráneo de esorrentías superficiales no reguladas.

Reducción o eliminación del descenso piezométrico.

Apoyo a determinados esquemas de utilización conjunta o coordinada.

Mantenimiento hídrico de enclaves ecológicos o medioambientales.

Reducción de costes de transporte, almacenamiento o bombeo.

Actuaciones sobre problemas de subsidencia.

Aprovechamiento de las propiedades del suelo y de la zona no saturada como elemento de tratamiento tanto para aguas potables como residuales.

Dilución del excesivo contenido de nitratos, cloruros u otros constituyentes.

Por otro lado, existen diferentes sistemas de recarga que se pueden dividir en varios tipos dependiendo de la forma de recargar. La tabla 3 muestra los diferentes tipos y subtipos.

*Tabla 3 Tipos de métodos de recarga artificial*

*Tomada de Gale 2005*

<b>Tipo</b>	<b>Subtipo</b>
<b>Métodos de distribución</b>	Cuencas y estanques de infiltración
	Tratamiento suelo-Acuífero
	Inundación controlada
	Recarga incidental por riego
<b>Modificaciones en el interior del canal</b>	Estanques de percolación asociados a represas de control, gaviones, ect
	Represas de arena para almacenamiento
	Represas subsuperficiales
	Represas con pérdidas
<b>Recarga con pozos túneles y perforaciones</b>	Pozos abiertos y túneles
	Almacenamiento en acuíferos y recuperación (AAR)
<b>Infiltración inducida en las márgenes de los ríos</b>	Filtración en las márgenes de los ríos
	Filtración interdunar
<b>Captación de agua de lluvia</b>	Construcción de terraplenes, ect

### 2.10.3 Hidrogeología

La hidrogeología se define como la ciencia que estudia el origen y la formación de las aguas subterráneas, las formas de yacimiento, su difusión, movimiento, régimen y reservas, su interacción con los suelos y rocas, su estado (líquido, sólido y gaseoso) y propiedades (físicas, químicas, bacteriológicas y radiactivas), así como las condiciones que determinan las medidas de su aprovechamiento, regulación y evacuación (Mijailov, 1985)

Las condiciones hidrogeológicas locales determinan la capacidad del agua de recarga para percolarse a través de la zona no saturada y la capacidad del acuífero para almacenar el agua de recarga (Gale & Dillon, 2005)., En la tabla 4 se muestran los principales factores hidrológicos que influyen en la recarga.

*Tabla 4 Principales factores hidrológicos a considerar para recarga artificial de acuíferos.*

*adaptada de Gale (2005)*

<b>Factores hidrológicos</b>
Límites físicos e hidráulicos del acuífero y el grado de confinamiento
Propiedades hidrogeológicas del acuífero y formaciones superiores
Gradiente hidráulico en el acuífero
Profundidad desde nivel del suelo hasta la superficie del acuífero /piezométrica
Calidad del agua subterránea
Mineralogía del agua del acuífero

“También existen diferentes ambientes hidrogeológicos para el estudio de recarga artificial los cuales pueden agruparse en 4: Acuíferos de aluvión, acuíferos de roca dura fracturada, acuíferos de arenisca consolidada, acuíferos de carbonatos” (Gale 2005)

### 2.11 Coeficientes de escurrimiento

El coeficiente de escurrimiento o coeficiente de escorrentía es un coeficiente adimensional que relaciona la cantidad de escorrentía con la cantidad de precipitación recibida. Es un valor mayor

para áreas con baja infiltración y alto escurrimiento y menor para áreas permeables y con buena vegetación. En México, la CNA ha publicado la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000 (DOF, 2001), donde establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales superficiales para su explotación y aprovechamiento. En dicha norma se muestra el procedimiento autorizado para calcular el coeficiente de escurrimiento (Ce). En primera instancia se debe establecer el tipo y uso de suelo para establecer un valor denominado parámetro K. En la tabla 5 se dan los parámetros K dependiendo del tipo y uso del suelo de acuerdo a la NOM-011-CNA-2000 (DOF, 2001)

*Tabla 5 Valores de K, en función del tipo y uso de suelo.*

*Tomado de NOM-011-CNA-2000 (DOF, 2001)*

TIPO DE SUELO	CARACTERÍSTICAS		
A	Suelos permeables, tales como arenas 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 o loess muy delgados sobre una capa impermeable, o bien arcillas		
USO DEL SUELO	TIPO DE SUELO		
	A	B	C
Barbecho, áreas incultas y desnudas	0,26	0,28	0,30
Cultivos:	0,24	0,27	0,30
En Hilera	0,24	0,27	0,30
Legumbres o rotación de pradera	0,24	0,27	0,30
Granos pequeños	0,14	0,20	0,28
Pastizal:	0,20	0,24	0,30
% del suelo cubierto o pastoreo	0,24	0,28	0,30
Más del 75% - Poco -	0,07	0,16	0,24
Del 50 al 75% - Regular -	0,12	0,22	0,26
Menos del 50% - Excesivo -	0,17	0,26	0,28
Bosque:	0,22	0,28	0,30
Cubierto más del 75%	0,26	0,29	0,32
Cubierto del 50 al 75%	0,27	0,30	0,33
Cubierto del 25 al 50%	0,18	0,24	0,30
Cubierto menos del 25%			
Zonas urbanas			

Caminos			
Pradera permanente			

La normatividad vigente en la Comisión Nacional del Agua especifica que en caso de que en la cuenca o subcuenca en estudio existan diferentes tipos y usos de suelo, el valor del parámetro K se debe calcular como la resultante de subdividir la cuenca o subcuenca en zonas homogéneas y obtener el promedio ponderado de todas ellas.

Se obtiene el coeficiente de escurrimiento ( $C_e$ ) aplicando las siguientes formulas:

*Fórmulas para estimar el coeficiente de escurrimiento ponderado de la cuenca en función del parámetro K (DOF, 2001).*

Si K resulta menor o igual que 0.15

$$C_e = K(P-250)/2000$$

Si K es mayor que 0.15

$$C_e = K(P-250)/2000+(K-0.15)/1.5$$

## 2.12 Método del Número de Curva del SCS

El método del número de curva o de números de escurrimiento es un procedimiento para evaluar la infiltración que fue desarrollado por el Soil Conservation Service (SCS) de la USDA (referencia). Se basa en que existe una relación directa entre el volumen de agua retenida en el suelo respecto al volumen escurrido durante un proceso de precipitación específico. Los factores que condicionan el escurrimiento son:

- Tipo de suelo.
- Uso de suelo y cobertura
- Condiciones de la superficie del terreno.
- Condiciones de humedad del terreno.

Para su estimación se tienen las fórmulas:

Ecuación 3

$$Q = \frac{(P - 0.20S^2)}{P + 0.80S}$$

Ecuación 4

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

$Q > 0$  si  $0.2S \leq P$  si no  $Q = 0$ ; donde:

Q=Escurrimiento medio (mm)

P=Precipitación por evento (mm)

S= Retención máxima potencial (mm)

CN=Número de curva (adimensional)

### 2.12.1 Cobertura de suelo y tratamiento

El método de número de curva es un método empírico desarrollado mediante el análisis de muchas cuencas pequeñas que es ampliamente usado para estimar una aproximación del escurrimiento de un evento en un área. El número de curva se asigna en base a la cobertura del suelo y al grupo hidrológico del suelo. Entre mayor sea el número de curva mayor será el escurrimiento. En la tabla 6 se muestra los números de curva que se usaran en este análisis; y que son los establecidos por la SCS.

Tabla 6 Números de Curva, antecedente de humedad II elaboración propia con datos de Mishra and Singh (2013)

Cobertura	Tratamiento o Práctica	Condición Hidrológica	A	B	C	D
Residencial 1/3 acre	-		57	72	81	86
Caminos Tierra	-		72	82	87	89
Caminos Pavimentados	-		98	98	98	98
Cultivos	Surcos rectos	Pobre	72	81	88	91

Cultivos Tupidos	Surcos rectos	Buena	67	78	85	89
Pastizal (Sin tratamiento Mecanico)		Pobre	68	79	86	89
Matorral del desierto	-	Pobre	63	77	85	88
Suelo desnudo	-	-	77	86	91	94

### 2.12.2 Grupos hidrológicos de suelos

Los grupos hidrológicos de suelos fueron definidos en base a datos medidos de escurrimiento y datos de infiltrómetro por Musgrave (1955). En la tabla 7 se dan la tasa de infiltración por estos grupos hidrológicos.

*Tabla 7 Tasa de infiltración de los grupos hidrológicos de suelos, obtenidos de Musgrave (1955).*

Grupo	Tasa de infiltración Pulgadas/hora	
	A	0.30
B	0.15	0.30
C	0.05	0.15
D	0	0.05

Los grupos de suelos hidrológicos se asignan en base al potencial de escorrentía e infiltración y se dividen en cuatro grupos A, B, C y D. Estos grupos se describen a continuación:

Grupo A: suelos que tienen un alto índice de infiltración (bajo potencial de escorrentía) cuando están completamente húmedos. Están formados principalmente por arenas profundas, bien drenadas o excesivamente drenadas, o arenas de textura gruesa.

Grupo B: suelos que tienen un índice de infiltración moderado cuando están completamente húmedos. Son principalmente suelos moderadamente profundos o profundos, moderadamente bien drenados o bien drenados con una textura de moderadamente fina a moderadamente gruesa.

Grupo C: suelos que tienen un índice de infiltración lento cuando están completamente húmedos. Son principalmente suelos con una capa que impide el movimiento descendente del agua o suelos de textura moderadamente fina o fina.

Grupo D: suelos que tienen un índice de infiltración muy lento (alto potencial de escorrentía) cuando están completamente húmedos. Se trata fundamentalmente de arcillas con alta capacidad para expandirse y contraerse, suelos con un elevado nivel freático, suelos que presentan una capa de arcilla superficial, suelos poco profundos sobre material casi impermeable.

### 2.12.3 Condiciones de humedad del terreno

La metodología de número de curva toma en cuenta la condición de humedad antecedente (CHA), ya que la humedad del terreno afecta el escurrimiento (Hawkins et al., 1985). La tabla 8 muestra los tipos de condición de humedad antecedente.

Tabla 8 Condiciones de humedad antecedente en suelo Tomada de Hawkins et al., (1985)

Condición de Humedad Antecedente	Antecedente de 5 días (cm)	
	Estación latente	Estación de crecimiento
<b>I</b>	menos de 1.3	3.6
<b>II</b>	1.3 a 2.8	3.6 a 5.3
<b>III</b>	más de 2.8	más de 5.3

La condición de humedad antecedente número II se ha establecido como la referencia para este estudio. Para convertir los números de curva de una CHA a otra se usan las siguientes formulas:

Tabla 9 Ecuaciones para ajuste de CN por condiciones de humedad antecedentes húmeda

Autor	Ecuación
Sobhani (1975)	$CN(I) = CN(II) / [2.334 - 0.01334CN(II)]$ $CN(III) = CN(II) / [0.4036 + 0.0059CN(II)]$
Hawkins et al (1985)	$CN(I) = CN(II) / [2.281 - 0.01381CN(II)]$ $CN(III) = CN(II) / [0.427 + 0.00573CN(II)]$
Chow et al (1938)	$CN(I) = 4.2CN(II) / [10 - 0.058CN(II)]$ $CN(III) = 23CN(II) / [10 - 0.13CN(II)]$

Elaboración propia con datos de Hawkins et al., (1985)

## Capítulo 3 Materiales y métodos

En este capítulo se describe el procedimiento y las herramientas del Sistema de Información Geográfica (SIG) utilizadas para alcanzar los objetivos planteados. Ya que estos SIG han sido utilizados por varios autores tanto para problemas similares de recarga artificial de acuíferos como para otras aplicaciones. La base de esta tesis es la aplicación del programa ArcGIS (ESRI, 2004) que es un programa utilizado para el manejo de información geográfica; incluyéndose desde el manejo de los datos, el procesamiento, las representaciones gráficas, el manejo espacial de datos, hasta la interacción entre diversas variables geográficas, entre otras aplicaciones.

### 3.1 Selección del procedimiento para el procesamiento de datos.

Como primer paso se realizó una revisión de la literatura sobre el uso de SIG para ubicar sitios potenciales de recarga de acuíferos. Esto con el objeto de determinar las herramientas más idóneas del programa ArcGIS y establecer el diagrama de flujo para el procesamiento de datos. Además, esto permitió establecer la información geográfica requerida del sitio de estudio.

La recarga artificial de acuíferos ha sido objeto de números estudios, considerando diferentes enfoques que dependen de las fases de la implementación. Existen diferentes autores que marcan la pauta en cuanto a los elementos a tomar en cuenta para un estudio preliminar de recarga artificial. Bouwer y Dillon han descrito los diferentes tipos de recarga y los requerimientos necesarios para su diseño, así como los efectos de la recarga artificial en el agua subterránea.

Los elementos más importantes a tomar en cuenta los describió Pyne en su libro, "recarga subterránea y pozos", en donde lista los elementos principales de una primera fase para la implementación de un proyecto de recarga de acuíferos. Estos elementos son:

- Suministro de agua para recargar de forma artificial y su variabilidad.
- Calidad del agua usada para recarga.
- Demanda de agua.
- Hidrogeología.
- Selección del tipo de técnica de recarga

- Selección del sitio.

En un primer análisis de la literatura se eligió trabajar con el análisis espacial multicriterio en dos alternativas Proceso Analítico Jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés) y la Pertenencia Difusa (en el capítulo anterior se da una breve explicación de ambos). De este modo, esta revisión se enfocó en establecer los criterios tomados en cuenta, por la selección de varios autores, para la ubicación de sitios de recarga, usando la metodología de análisis espacial multicriterio, en las dos maneras mencionadas. Se seleccionaron los artículos de los últimos 5 años (2011-2016) que describen con más detalle los procesos y criterios para este análisis. La tabla 3.1 muestra los diferentes criterios utilizados para el Análisis Espacial Multicriterio. Estos criterios están relacionados a los aspectos físicos del área de estudio. De este modo, se seleccionaron también la información geográfica requerida para el análisis.

Tabla 10 Artículos sobre selección para sitios de recarga artificial de acuíferos

Rahman et al., (2012)	Mahdavi, (2013)	Singh, Amanpreet, et al (2013)	Mahmoud, S. H., & Alazba, A. A. (2014)	Kumar, T. et al (2016)	Selvarani, A. G. et al (2016)	Chowdhury, A. et al (2010)
Uso de suelo	Uso de suelo	Uso de suelo/Cobertura del suelo	Uso de suelo/Cobertura del suelo	Uso de suelo/Cobertura del suelo	Uso de suelo/Cobertura del suelo	Pendiente
Pendiente	Pendiente	Pendiente	Pendiente	Pendiente	Pendiente	Drenaje
Infiltración (suelo superficial)	Infiltración (suelo superficial)	Drenaje	Coefficiente de escurrimiento	Drenaje	Drenaje	Transmisividad del acuífero
Nivel freático	Espesor de zona no saturada	Suelo (textura)	Suelo (textura)	Suelo (Textura)	Suelo (Textura)	Geología
Distancia a fuentes de contaminación	Calidad del agua subterránea	Geología	Precipitación	Nivel freático	Geología	Geomorfología
Espesor del acuífero	-	Geomorfología	-	Geología	Geomorfología	-
Espesor de capa no impermeable	-	Transmisividad del acuífero	-	Geomorfología	Lineamiento	-
Calidad del agua (nitratos, cloruros)	-	Rendimiento específico (Sy)	-	Precipitación	-	-
Tiempo de residencia	-	-	-	Suelo (Profundidad)	-	-
-	-	-	-	Lineamiento	-	-

Una vez seleccionada la información geográfica en base a la revisión de literatura y con una búsqueda inicial de la información disponible y accesible se generó el diagrama de flujo para realizar el procedimiento de trabajo (figura 3.1). En este diagrama se presenta tanto la recopilación de datos como el procesamiento realizado. Se resalta de este diagrama que solo se presenta el procedimiento para AHP. El análisis multicriterio con pertenencia difusa es solo

aplicar esta herramienta en lugar de la AHP, aunque obviamente considerando la lógica difusa; sobre lo cual se ahondará en el apartado 3.3.2.

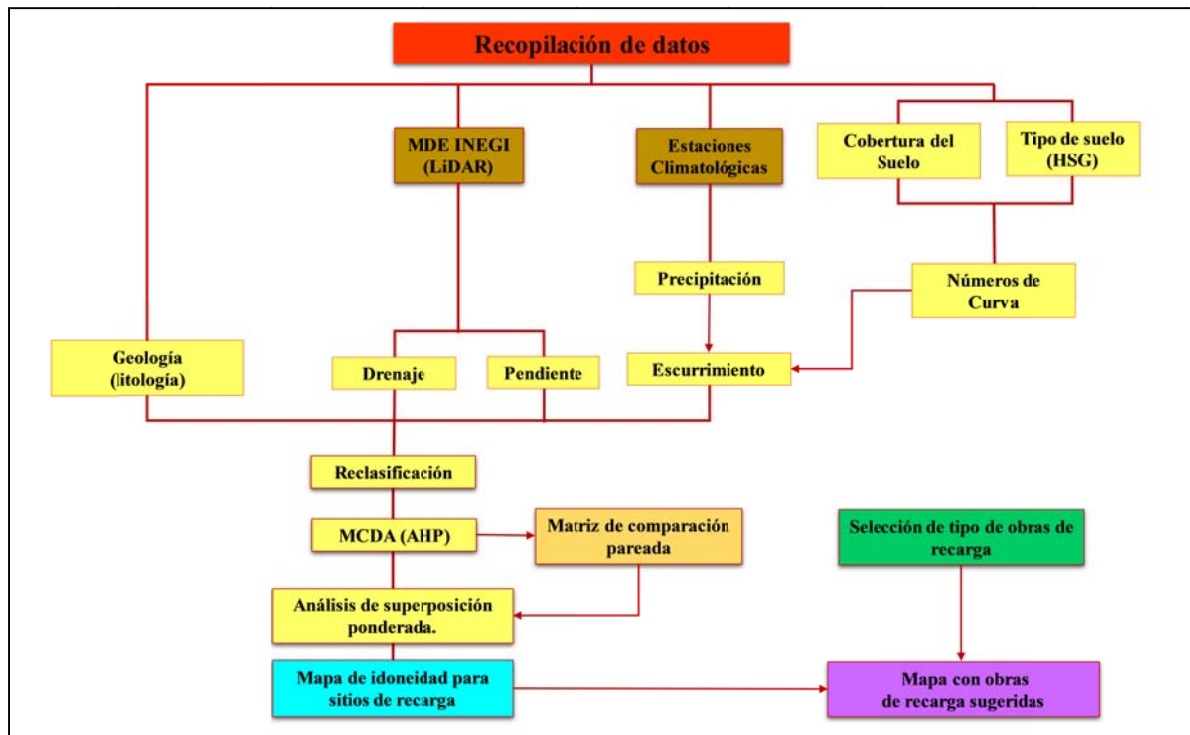


Figura 3.1 Metodología

En los apartados restantes de este capítulo, ahondaremos en los elementos del procedimiento de trabajo que se resume en el diagrama de flujo de la figura 3.1. Principalmente en resaltar las fuentes de donde se recopilaban los datos, el procesado de datos, la elaboración de matrices de comparación y la forma de estimar la selección de los sitios potenciales de recarga en función del volumen de agua escurrida producto de las precipitaciones. Finalmente se mencionan los tipos de sistemas de recarga.

### 3.2 Recopilación de datos

A partir del análisis mencionado en el apartado anterior (3.1) se pudieron establecer los objetos (información geográfica) necesaria para realizar el estudio. La recopilación de los datos fue de diferentes fuentes oficiales como el INEGI, CONAGUA, entre otras. Los datos se encontraron principalmente en formatos vectoriales, raster, hojas de cálculo, entre otros. Estos fueron integrados en un sistema de información geográfica utilizando el software ArcGis 10.3. Aunque los datos disponibles en agencias oficiales se pueden manejar apropiadamente la mayoría de

ellos requiere una adecuación previa para poder integrarlos al SIG. Esto va desde rasterizar los diferentes formatos, hasta generar los mapas digitales rasters. A continuación se explicará brevemente los procesos previos de cada una de las bases de datos utilizadas:

1. Modelo digital de elevación (MDE). Esta información fue obtenida del INEGI de un vuelo LIDAR con una resolución de 5 m. Este mapa es el inicio del proceso ya que representa la topografía del terreno esencial para obtener algunos otros parámetros como el mapa de pendientes.
2. Estaciones climatológicas
3. Geología
4. Cobertura del suelo
5. Tipo del suelo

Una vez que todos los datos geográficos a utilizarse en el análisis fueron recopilados se procedió a un procesamiento inicial para llevarlos a un mismo sistema de coordenadas que fue el UTM WGS84 Zona 11 Norte. Además se definió un tamaño de celda en base a los diferentes “sets” de datos que fue de 5x5 metros que equivale a un área de 25 m<sup>2</sup>.

### **3.3 Análisis espacial multicriterio.**

Como se mencionó en el apartado 3.1, se eligió trabajar con el análisis espacial multicriterio ya que es la herramienta del SIG (ArgGIS) que ha mostrado buenos resultados en problemas de este tipo. De este modo, el sistema hidrológico existente de la recarga en el área de estudio, se ha estudiado con respecto a su hidrogeología, topografía y respuesta al nivel del agua de los pozos. De acuerdo con estas observaciones, un sistema de criterios se ha diseñado para demarcar las zonas más favorables y también para determinar los sitios exactos para la recarga artificial. Las siguientes capas de información temática, se utilizan en el análisis de la recarga potencial, así como también se establece un índice ponderado de superposición:

- a) Geología
- b) Suelos

c) Pendiente

Una vez elegidos las categorías, clases y criterios de cada mapa temático, se realizaron los cruces temáticos considerando las dos alternativas ya mencionadas; el proceso de análisis jerárquico (AHP) y la pertenencia difusa.

### **3.3.1 Proceso de análisis jerárquico AHP y superposición**

Se usó el AHP ya que, como su nombre lo dice, este jerarquiza los criterios usando matrices de comparación por pares. Los resultados de cada matriz permiten dar peso a cada criterio y subcriterio. La superposición de las capas temáticas se realizó usando una suma ponderada. En el índice ponderado de superposición, las capas temáticas individuales y sus clases se le asignan peso específicos para su ponderación en base de su contribución relativa en el proceso de recarga subterránea. En el actual estudio, el peso ponderado resultante se utiliza para delimitar las zonas potenciales y los sitios de recarga artificial. Las clases con valores más altos indican las zonas más favorables para la recarga. Para no hacer repetitivo y quizás confuso el presente escrito, en el capítulo de resultados se explicará brevemente la forma de obtención de estos.

### **3.3.2 Pertenencia difusa**

Todas las capas de información analizadas se combinan en el método de ponderación de la superposición para dar lugar a zonas potenciales para las estructuras artificiales de la recarga.

La primera tarea en este método es identificar los criterios y formular el sistema de condiciones lógicas para extraer las zonas convenientes. En este caso, la salida tendrá solamente dos clases - convenientes o inadecuadas. Las áreas en las cuales las condiciones definidas se hallan juntas, se le asigna un valor de 1, mientras que, la parte restante tendrá un valor cero. Este análisis es conveniente para el criterio específico, pero no es conveniente para demostrar los valores graduales. Los criterios para la selección de sitio son:

1. Los sitios deben estar sobre una pendiente de 2° a 5°.
2. Los sitios deben estar canales de flujos formados por taludes en planicies aluviales.
3. El suelo debe ser de grava o aluvial natural.
4. Geológicamente, el área se debe cubrir con arena, limo o arcilla.

5. Los sitios se deben localizar en corrientes de 2do o 3er orden.

### 3.4 Análisis de escurrimientos y selección de tipos de sistemas de recarga

Con el objeto de determinar el escurrimiento que de forma superficial cruza el punto de infiltración para un evento dado, se usó la técnica de números de escurrimiento. Además se realizó una revisión de literatura de casos análogos y de sistemas de recarga empleados en regiones similares a esta.

## Capítulo 4 Resultados

Las zonas con potencial para aplicar técnicas de recarga artificial se obtuvieron usando una superposición ponderada de siguientes mapas temáticos geología, potencial de escurrimiento, pendiente, densidad de drenaje, a continuación, se describe detalladamente el proceso para cada uno de ellos.

### 4.1 Modelo digital de elevaciones

El primer mapa temático generado fue el del modelo digital de elevaciones, se usaron los Modelos digitales de elevación de alta resolución LiDAR, Tipo terreno con resolución de 5m disponibles en el sitio del INEGI el área de estudio se encuentra cubierta con las siguientes cartas escala 1-10,000. La topografía en el área de estudio varía entre 261 msnm y 1589 msnm.

Cartas									
1	I11D83B4	21	I11D83E1	11	I11D82D1	31	I11D82B3		
2	I11D83E2	22	I11D83D2	12	I11D83A1	32	I11D82A4		
3	H11B12C2	23	I11D82E1	13	I11D82C2	33	I11D82C3		
4	H11B12C1	24	I11D82D2	14	I11D83B1	34	I11D82B4		
5	H11B12B2	25	I11D82F1	15	I11D83A2	35	I11D82E3		
6	I11D83D3	26	I11D82E2	16	I11D82B1	36	I11D82D3		
7	I11D82F4	27	I11D83A3	17	I11D82C1	37	H11B11C2		
8	I11D83D4	28	I11D82C4	18	I11D82B2	38	I11D81F4		
9	I11D82F3	29	I11D83B3	19	I11D83D1	39	I11D82D4		
10	I11D82E4	30	I11D83A4	20	I11D82F2	40	H11B12A1		

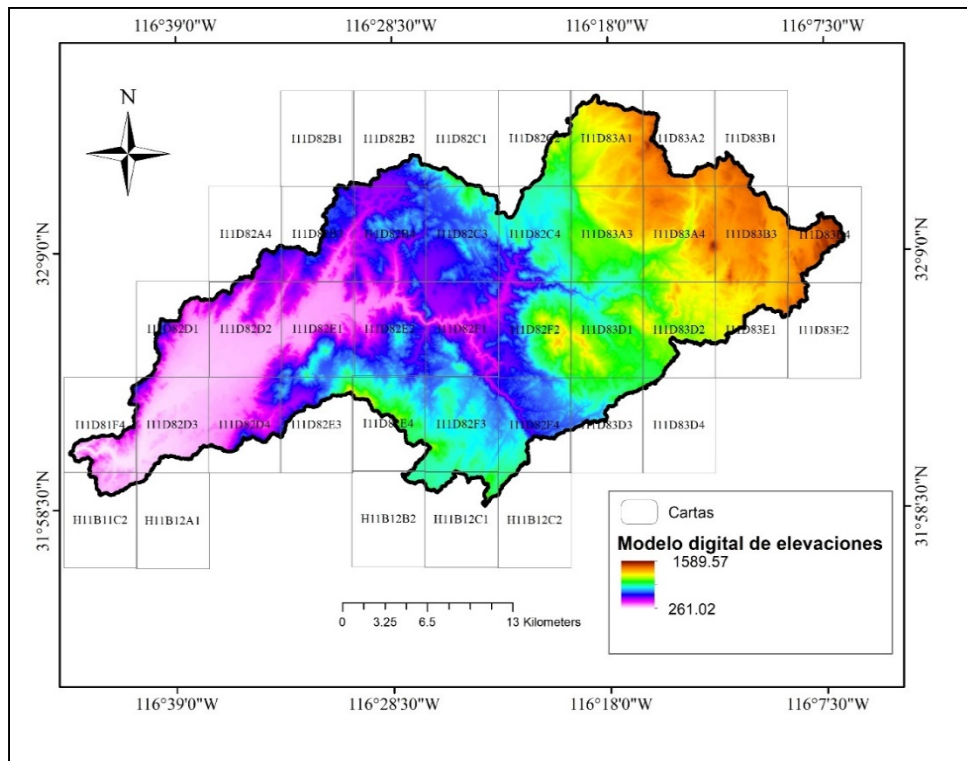
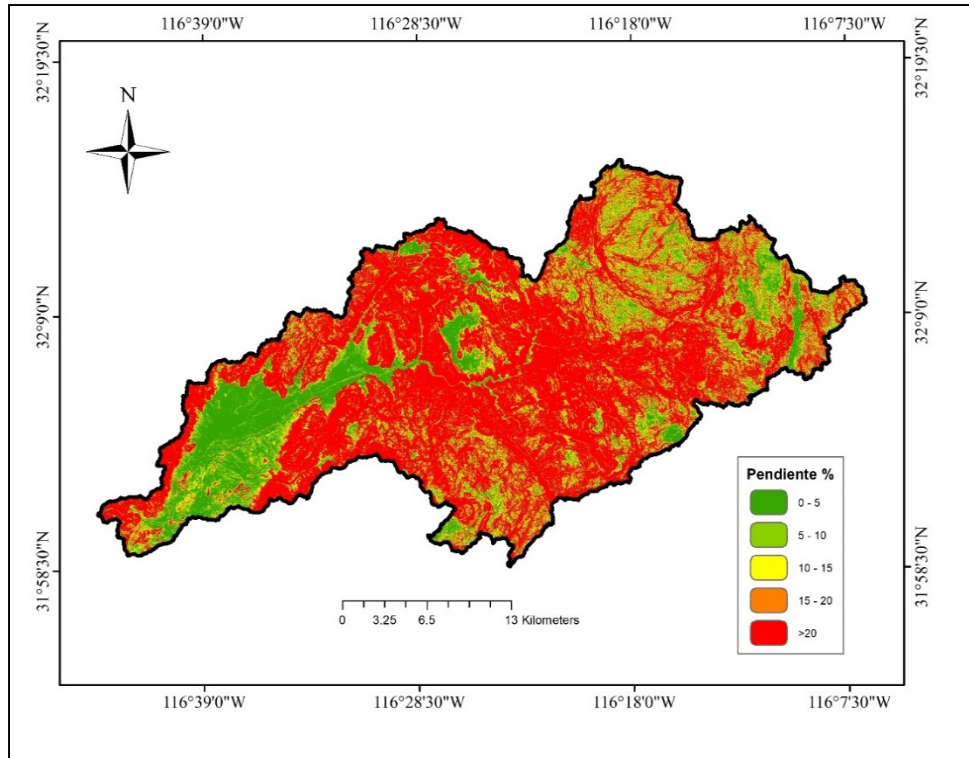


Figura 4.1 Modelo digital de elevaciones

## 4.2 Pendiente

Con el Modelo digital de elevaciones anteriormente mencionado se obtuvieron las pendientes y se clasificaron en 5 clases para el análisis, las zonas con menor pendiente fueron consideradas como más idóneas para los sitios de recarga ya que en estas zonas el escurrimiento superficial disminuye su velocidad y contribuye a una mayor infiltración. En la figura 5.2 se muestra el mapa de pendientes



*Figura 4.2 Pendientes acuífero Guadalupe*

### 4.3 Geología

En relación con el enfoque geológico Asano, T. (1985) nos menciona que la determinación de la mejor ubicación de una instalación de recarga implica un exhaustivo estudio hidrogeológico para asegurar un funcionamiento eficiente y económico y afirma que la recarga mediante obras de retención requiere características geológicas específicas, que permitan la máxima percolación posible.

Los tipos de roca predominantes en la cuenca son ígneas y metamórficas las cuales no son de interés para este análisis por su nula permeabilidad, ya que solo está presente si estas rocas son fracturadas.

La roca con mejor aptitud para la recarga de acuíferos en el área de estudio son los depósitos aluviales, debido a su buena conductividad hidráulica y porosidad efectiva por lo tanto es el tipo de roca que se le asignó el mayor peso.

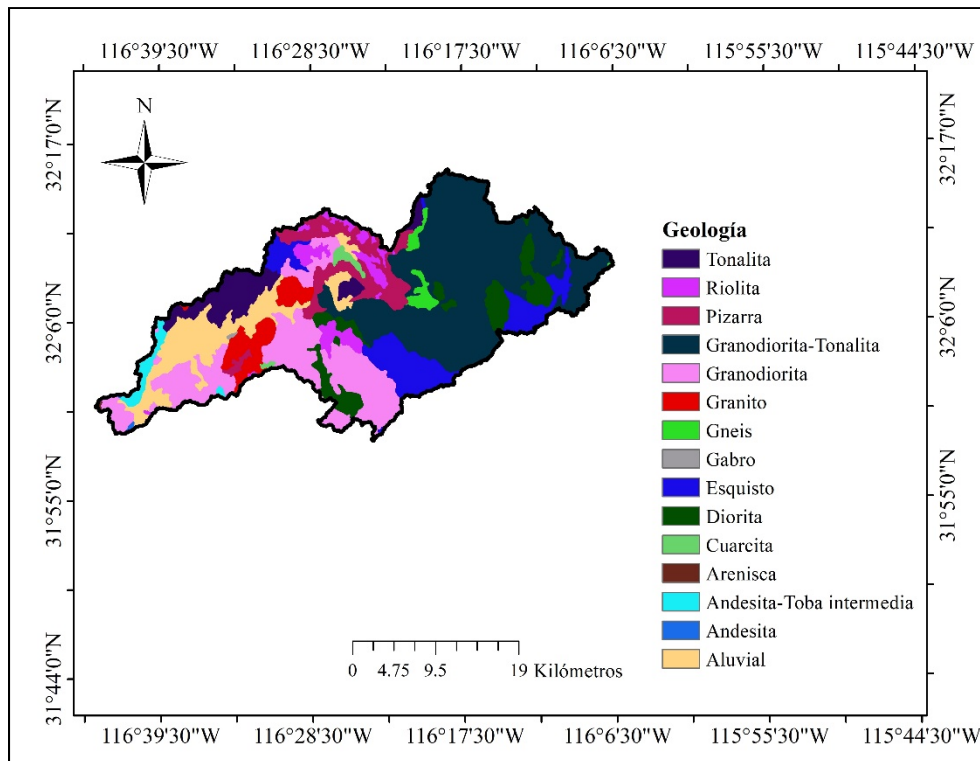


Figura 4.3 Geología

#### 4.4 Drenaje

Usando el patrón de drenaje de la cuenca se obtuvo su densidad de drenaje que va de 0 a 5.35 Km/Km<sup>2</sup> se le dio más peso a las zonas con mayores densidades debido a que se tratan de corrientes intermitentes, la cercanía a estos escurrimientos es deseable para así garantizar una fuente de suministro a las obras de recarga. Autores como Tarun Kumar (2014), Machiwal, D., & Singh, P. K. (2015), usan un criterio diferente relacionando las zonas de baja densidad de drenaje como idóneas para infiltración pero en nuestro caso esto alejaría mucho las obras de los escurrimientos, además en la regiones áridas los lechos de los ríos son buenas zonas de recarga, este criterio puede variar según nuestras necesidades.

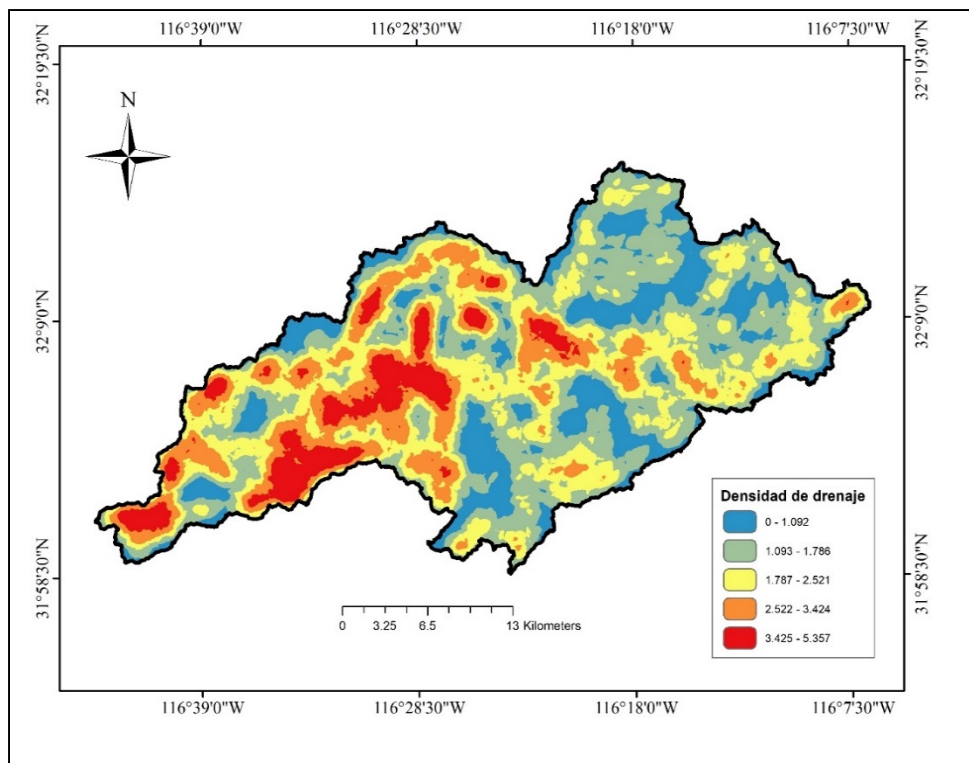
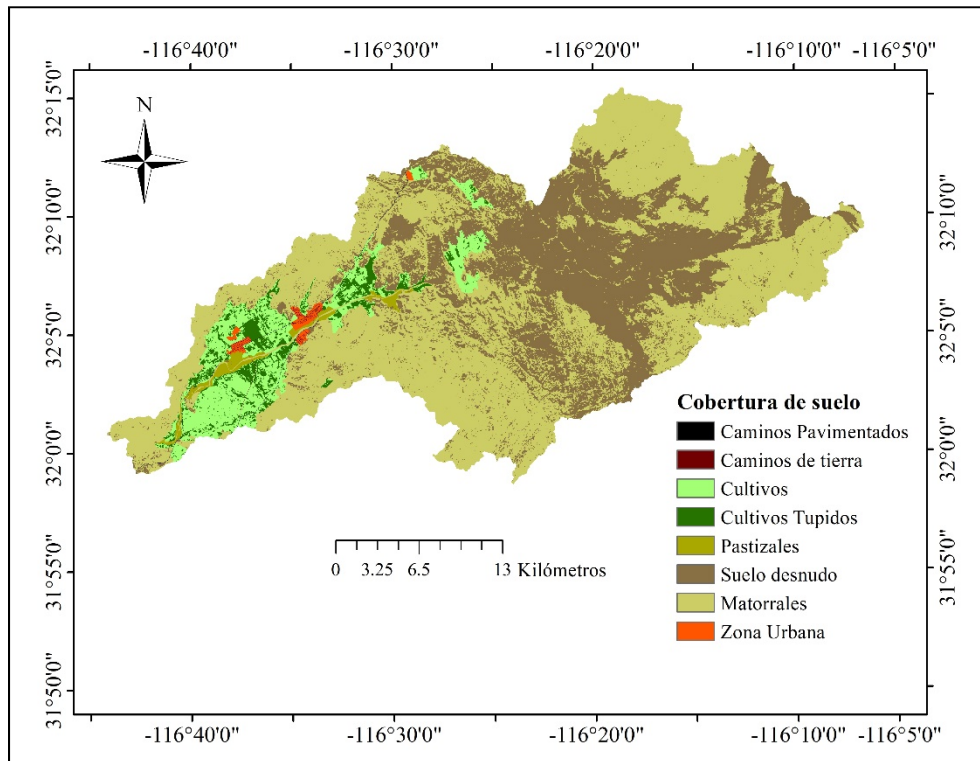


Figura 4.4 Densidad de drenaje

## 4.5 Uso de suelo y cobertura

Fue necesario generar un mapa de cobertura con las clasificaciones que usa el método de curva ya que este cuenta con diferentes clases de coberturas y tratamientos del suelo muy específicos, para esto se utilizaron los datos de cobertura de suelos del INEGI como guía, además una clasificación supervisada y el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) por sus siglas en inglés para esto se usaron imágenes satelitales Landsat 8 del 13 de Julio del 2017, la figura muestra el resultado



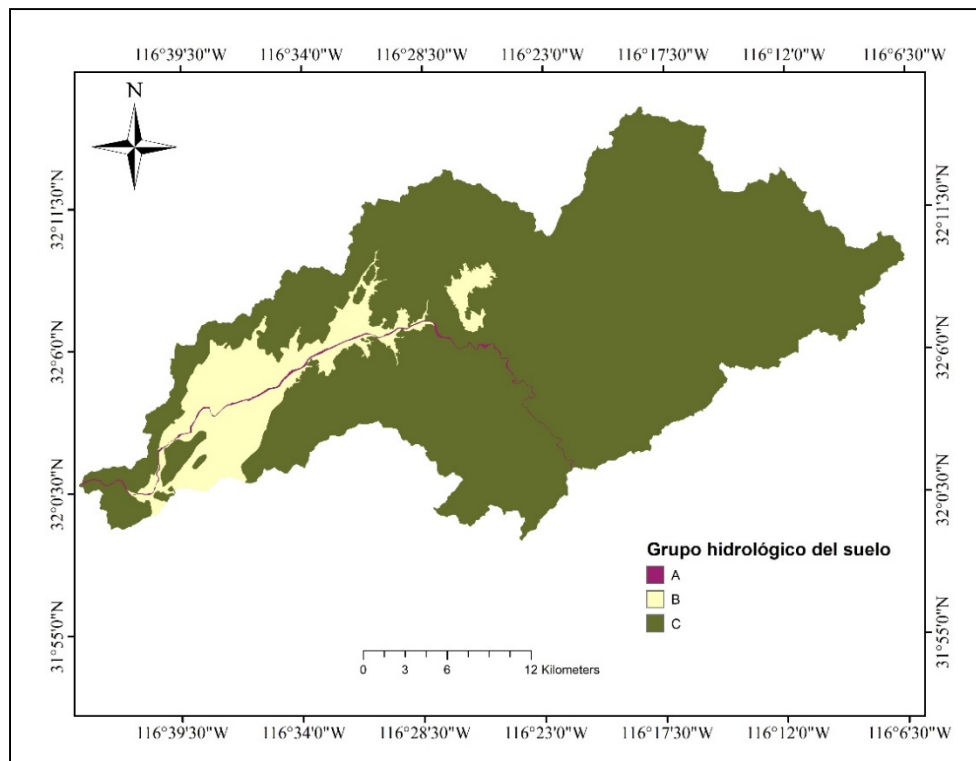
*Figura 4.5 Cobertura de suelo*

El escurrimiento se ve afectado por la vegetación, zonas donde existe mayor vegetación presentan un menor escurrimiento, esta cobertura se utiliza para obtener los números de curva.

## 4.6 Tipo de Suelo

Para generar el mapa de grupos hidrológicos de suelos se utilizaron los datos de textura de suelo del INEGI como base, pero se tuvieron que adaptar ya que estos utilizan la clasificación de los suelos el Sistema Internacional Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (WRB) por sus siglas en ingles. La metodología de números de curva ya descrita en el capítulo 2.10. Usa los grupos hidrológicos de suelo definidos principalmente por datos de escurrimiento, infiltración.

En la revisión de literatura, se encontró que Kurczyn-Robledo, 2007 realizó una evaluación del escurrimiento superficial en el noreste del Valle de Guadalupe asignó al aluvión el grupo hidrológico B y C a las rocas ígneas y metamórficas se usó este mismo criterio en este análisis, adicionalmente se consideró como tipo A el lecho del arroyo Guadalupe por su alta capacidad de infiltración.



*Figura 4.6 Grupo hidrológico de suelo*

## 4.7 Precipitación

Se usó la base de datos del artículo “Estimación de datos faltantes de precipitación por el método de regresión lineal, caso de estudio Cuenca Guadalupe, Baja California, México” Herrera, 2017 los cuales comprenden un periodo de 1948-2012.

Tabla 11 Estaciones meteorológicas

Estaciones	X	Y	Precipitación promedio anual
Agua Caliente	551894.33	3551652.39	250.6
Belén	548484.84	3562199.52	282.46
Boquilla Santa Rosa	523596.68	3547889.51	278.6
Carmen Serdán	539288.1	3566338.72	222.08
El Compadre Tecate	570190	3578090	407.3
El Farito	531459.51	3538599.8	147.82
El Pinal	567875.43	3560614.76	439.71
Ojos Negros	569336.37	3525927.96	227.91
Olivares Mexicanos	531436.63	3546026.32	294.62
Real del Castillo	566155.33	3535107.45	284.43
San Juan de Dios	574728	3553956	307.25
Sierra Juarez	599334	3541320	358.82
Valle de San Rafael	572513.4	3531492.44	226.28
Real del Castillo Viejo	524023.24	3535076.97	217.09
La Misión	518870.55	3551537.53	287.23

Además se agregaron 2 estaciones la estación real del castillo viejo y la misión. Se completaron los datos usando regresión lineal en la figura 3.2 se muestran los diagramas de regresión lineal para estas dos estaciones.

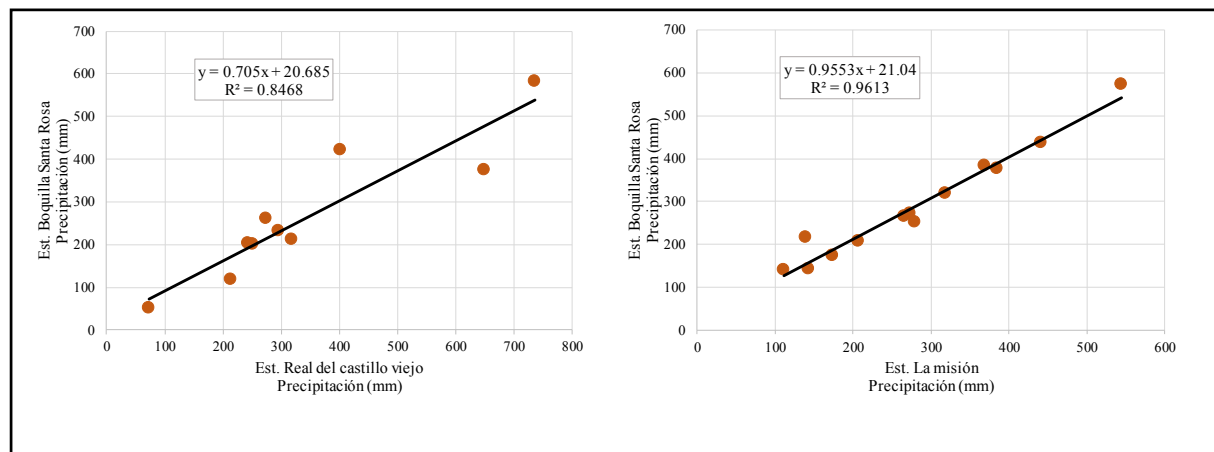


Figura 4.7 Regresión lineal para pronósticos de datos faltantes en las estaciones

Se interpolaron estos datos usando el método vecino más cercano y esta precipitación se usó para generar el mapa de escurrimientos, la precipitación media anual resulto de 300 mm.

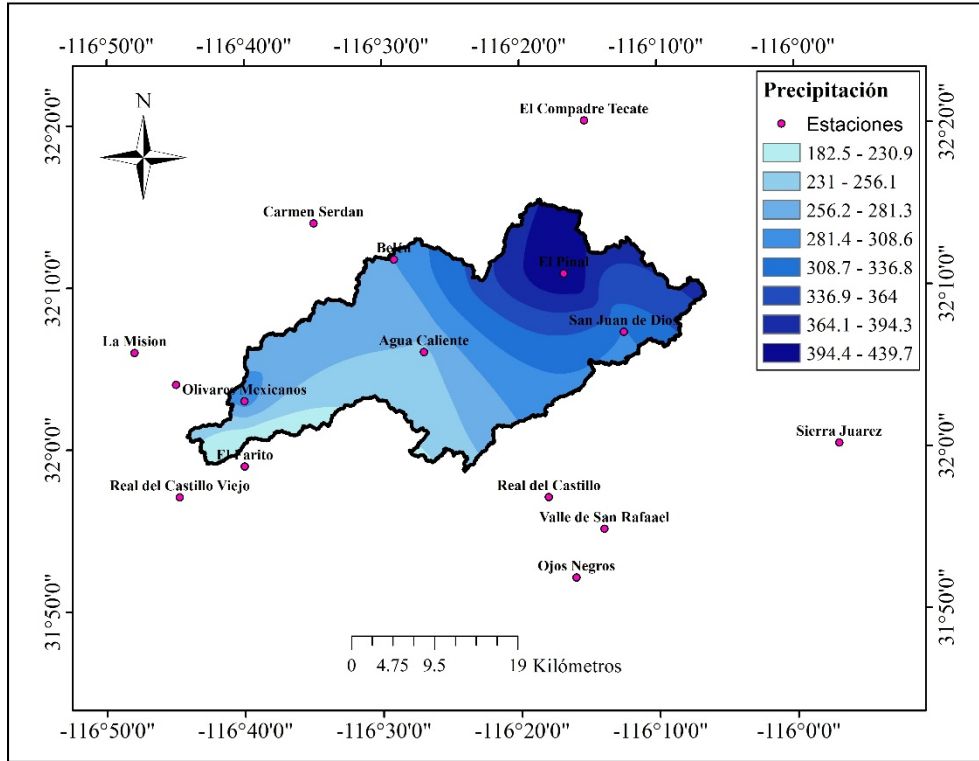
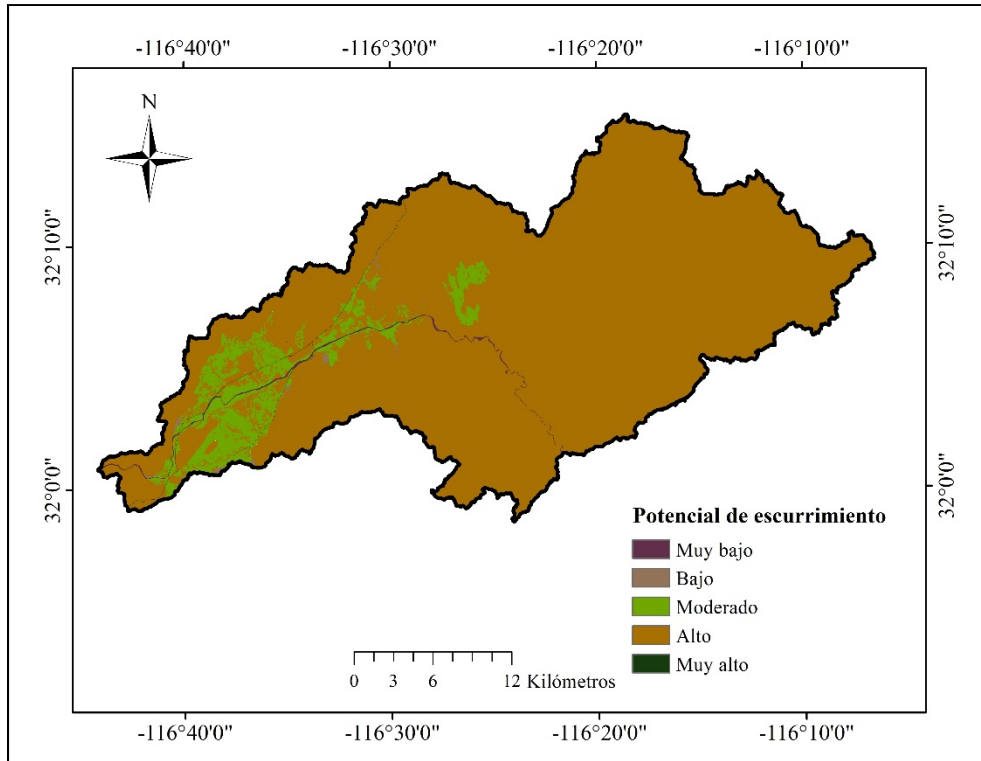


Figura 4.8 Precipitación media anual del acuífero Guadalupe

## 4.8 Escurrimiento promedio anual

El mapa de potencial de escurrimiento se hizo de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000 conservación del recurso agua, el coeficiente de escurrimiento se determinó a partir del mapa de cobertura de suelo y la precipitación media anual de la cuenca que fue de 300 mm. Los coeficientes fueron clasificados en 5 categorías, la figura 4.9 muestra el resultado.



*Figura 4.9 Esgurrimientos*

Las áreas con mayor escurrimiento se consideraron favorables para aplicar técnicas de recarga.

## 4.9 Niveles piezométricos

Generado con datos obtenidos de “Actualización al mes de abril de 2011 de la red de monitoreo piezométrica del acuífero de Guadalupe, municipio de Ensenada, B.C.” las zonas con mayor profundidad al nivel freático se les asignó una mayor importancia por ser más favorables para la recarga, estas se encuentran en la zona de las fosas calafía y provenir, la tendencia general es que el nivel freático es más somero hacia el oeste que corresponde a la dirección a la que se encuentra la costa.

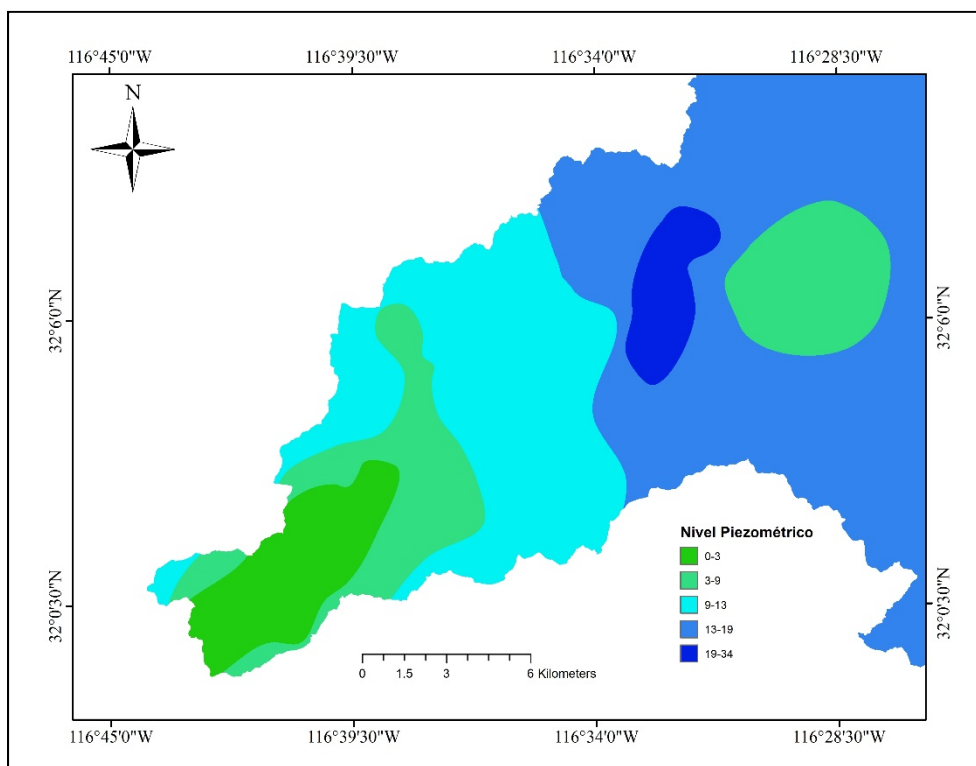


Figura 4.10 Profundidad de Niveles piezométricos 15 abril del 2011

#### 4.10 Matriz de comparaciones pareada

Usando el proceso de análisis jerárquico se hizo una matriz general, incluyendo todos los criterios anteriormente mencionados.

Tabla 12 Matriz de comparación acuífero Guadalupe

	Geología	Drenaje	Pendiente	Coefficiente de escurrimiento	Nivel freático	Normalizada
Geología	1	2	3	4	4	<b>0.39</b>
Drenaje	1/2	1	2	4	4	<b>0.27</b>
Pendiente	1/3	1/2	1	2	5	<b>0.18</b>
Coefficiente de escurrimiento	1/4	1/4	1/5	1	2	<b>0.08</b>
Nivel freático	1/4	1/4	1/2	1/2	1	<b>0.07</b>
<i>Total</i>	2.33	4	6.70	11.50	16.0	1

	Geología	Drenaje	Pendiente	Coefficiente de escurrimiento	Nivel freático
Geología	0.43	0.50	0.45	0.35	0.250
Drenaje	0.21	0.25	0.30	0.35	0.250
Pendiente	0.14	0.13	0.15	0.17	0.313
Coefficiente de escurrimiento	0.11	0.06	0.03	0.09	0.125
Nivel freático	0.11	0.06	0.07	0.04	0.063

<b>n</b>	<b>λ<sub>max</sub></b>	<b>CI</b>	<b>R1</b>	<b>CR</b>
5	5.29	0.07	1.12	<b>0.07</b>

La proporción de consistencia (CR) es aceptable al ser menor al 10 %

#### 4.11 Reclasificación de criterios

Cada subcriterio fue reclasificado en 5 categorías y se les asignó los pesos obtenidos de esta matriz.

Tabla 13 Subcriterios

	Sub-1	Sub-2	Sub-3	Sub-4	Sub-5	Normalizada
Sub-1	1	2	3	4	4	0.39
Sub-2	1/2	1	2	4	4	0.27
Sub-3	1/3	1/2	1	2	5	0.18
Sub-4	1/4	1/4	1/2	1	3	0.10
Sub-5	1/4	1/4	1/5	1/3	1	0.06
	2.33	4.00	6.70	11.33	17.00	1.00

	Sub-1	Sub-2	Sub-3	Sub-4	Sub-5
Sub-1	0.43	0.50	0.45	0.35	0.235
Sub-2	0.21	0.25	0.30	0.35	0.235
Sub-3	0.14	0.13	0.15	0.18	0.294
Sub-4	0.11	0.06	0.07	0.09	0.176
Sub-5	0.11	0.06	0.03	0.03	0.059

n	ñmax	CI	R1	CR
5	5.261	0.065	1.12	0.06

La proporción de consistencia (CR) es aceptable al ser menor al 10 %

La geología fue el único criterio en el cual se usaron solo 3 categorías, por lo tanto se generó una matriz. De 3x3.

Tabla 14 Matriz para Geología

	Sub-1	Sub-2	Sub-3	Normalizada
Sub-1	1	5	7	0.72
Sub-2	1/5	1	3	0.19
Sub-3	1/7	1/3	1	0.08
Total	1.34	6.33	11.00	1.00

	Sub-1	Sub-2	Sub-3
Sub-1	0.74	0.79	0.64
Sub-2	0.15	0.16	0.27
Sub-3	0.11	0.05	0.09

n	ñmax	CI	R1	CR
3	3	0.033	0.525	<b>0.063</b>

La proporción de consistencia (CR) es aceptable al ser menor al 10 %

## 4.12 Zonas potenciales de recarga y ubicación de sitios puntuales de recarga

Como se mencionó en el apartado 3.\_\_\_\_ se utilizaron 2 técnicas para la reclasificación de los subcriterios: el análisis de proceso jerárquico (AHP) y la pertenencia difusa. De este modo, se obtienen las zonas potenciales y la ubicación de sitios puntuales de recarga de 2 maneras distintas y que se discuten a continuación.

### 4.12.1 AHP

La superposición se realizó usando una suma ponderada,  $SP = \sum_{i=1}^n xi wi$  donde:

$xi$ = Los valores de cada raster.

$wi$ = El peso de cada criterio

Los pesos usados para los criterios generales fueron los obtenidos de matriz de la tabla 12 y los subcriterios de las matrices tabla 13 y 14. Los resultados obtenidos se agruparon en 5 clases: muy bajo, bajo, moderado, alto, muy alto. El resultado final fue el mapa de zonas con potencial para aplicar técnicas de recarga artificial (figura 4.11).

Los sitios de recarga se seleccionaron en zonas de alta a muy alta idoneidad y tomando en cuenta los escurrimientos (figura 4.12). Para esto se consideró solo que cayeran en estas zonas de alta

idoneidad. Solo se propusieron 15 sitios y a los cuales se les estimó el escurrimiento potencial en función de la precipitación (apartado 4.15). En la tabla 4.4 se muestra la ubicación de los sitios elegidos en el sistema de coordenadas geográficas del sistema WGS84.

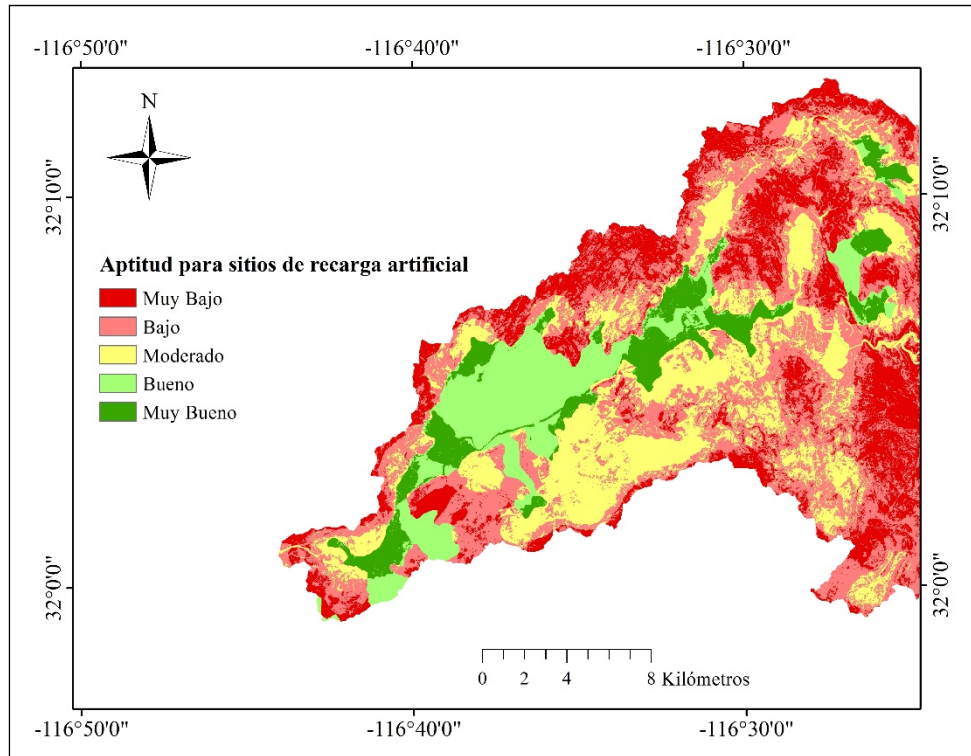


Figura 4.11 Zonas con potencial para obras de recarga artificial

Tabla 15 Coordenadas de sitios sugeridos para recarga

#	Latitud	Longitud	#	Latitud	Longitud	#	Latitud	Longitud
S1	32.108918	-116.496409	S7	32.054263	-116.663194	S13	32.101087	-116.633357
S2	32.108336	-116.575877	S8	32.118547	-116.50513	S14	32.101073	-116.610141
S3	32.060614	-116.595489	S9	32.049027	-116.666945	S15	32.114298	-116.491265
S4	32.090601	-116.547458	S10	32.044495	-116.667946			
S5	32.032403	-116.611561	S11	32.090274	-116.645195			
S6	32.149769	-116.437582	S12	32.092921	-116.637187			

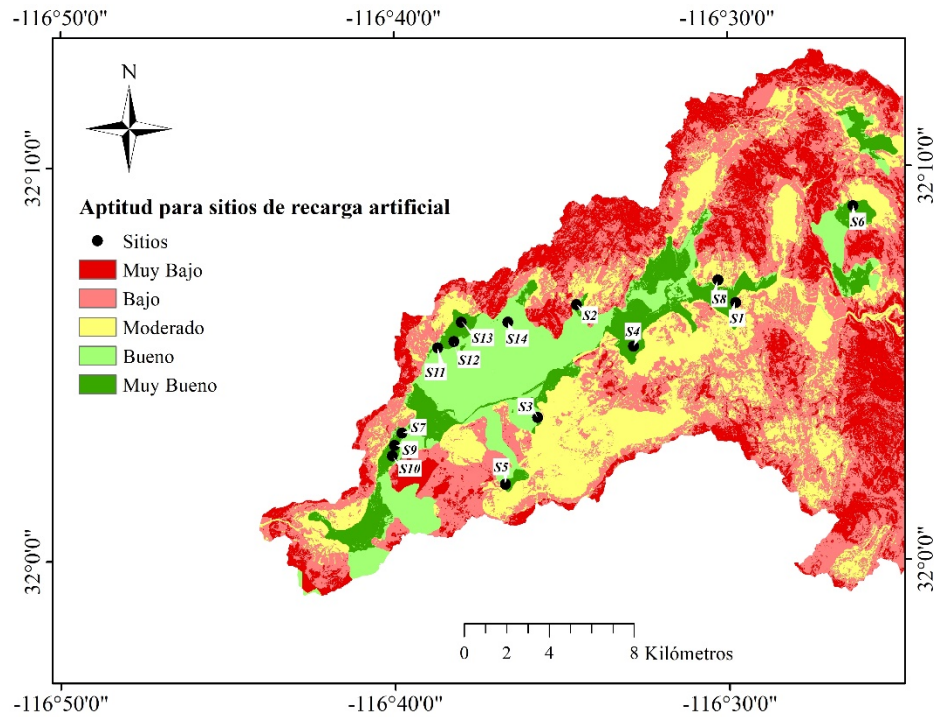


Figura 4.12 Sitios de recarga artificial

#### 4.12.2 Pertenencia difusa

Como se mencionó en el apartado 3.3.2, todas las capas de información analizadas se combinan en el método de ponderación de la superposición para dar lugar a zonas potenciales para las estructuras artificiales de la recarga.

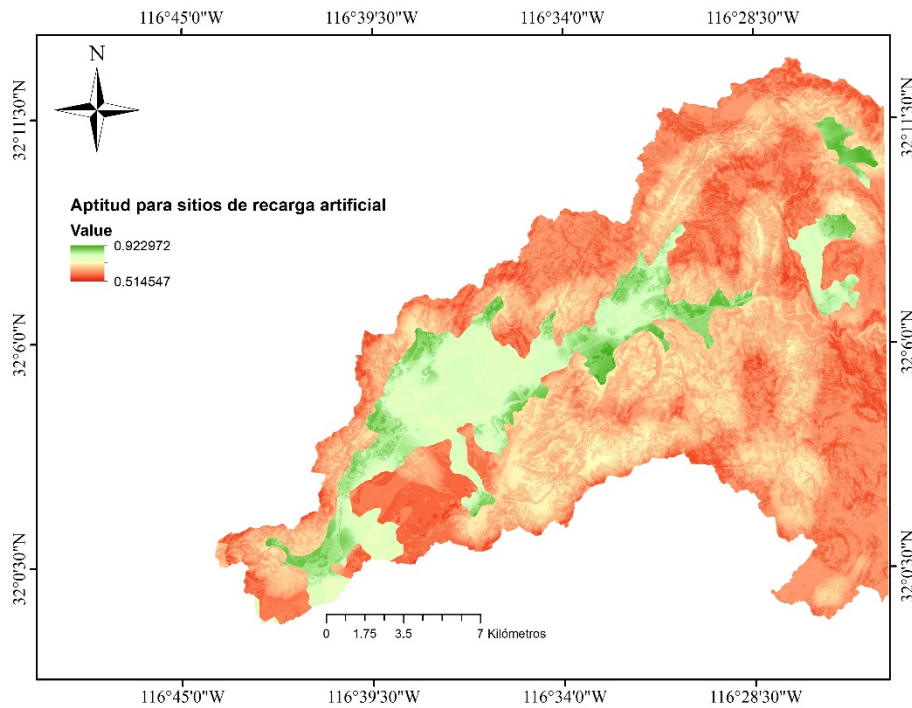


Figura 4.13 Zonas con aptitud para aplicar técnicas de recarga, usando pertenecía difusa

Los criterios para la selección de sitio son:

1. Los sitios deben estar sobre una pendiente de 2° a 5°.
2. Los sitios deben estar canales de flujos formados por taludes en planicies aluviales.
3. El suelo debe ser de grava o aluvial natural.
4. Geológicamente, el área se debe cubrir con arena, limo o arcilla.
5. Los sitios se deben localizar en corrientes de 2do o 3er orden.

### 4.13 Delimitación de subcuencas para cada sitio

Se delimitaron las subcuencas de cada sitio usando el modelo digital de elevaciones de resolución 5x5 metros en conjunto con los sitios anteriormente mencionados. Estos se usaron como punto de escurrimiento. Este proceso se realizó usando el módulo de hidrología del ArcGIS. El área de estas subcuencas fue usada para realizar la estimación de escurrimientos.

Cabe mencionar que para el sitio número 15 que corresponde a un sitio sobre el lecho del arroyo, la subcuenca es de grandes dimensiones y excede los 52 km<sup>2</sup> sugeridos para aplicar la metodología. En la figura 4.15 se muestran esta subcuenca y sus números de curva correspondientes.

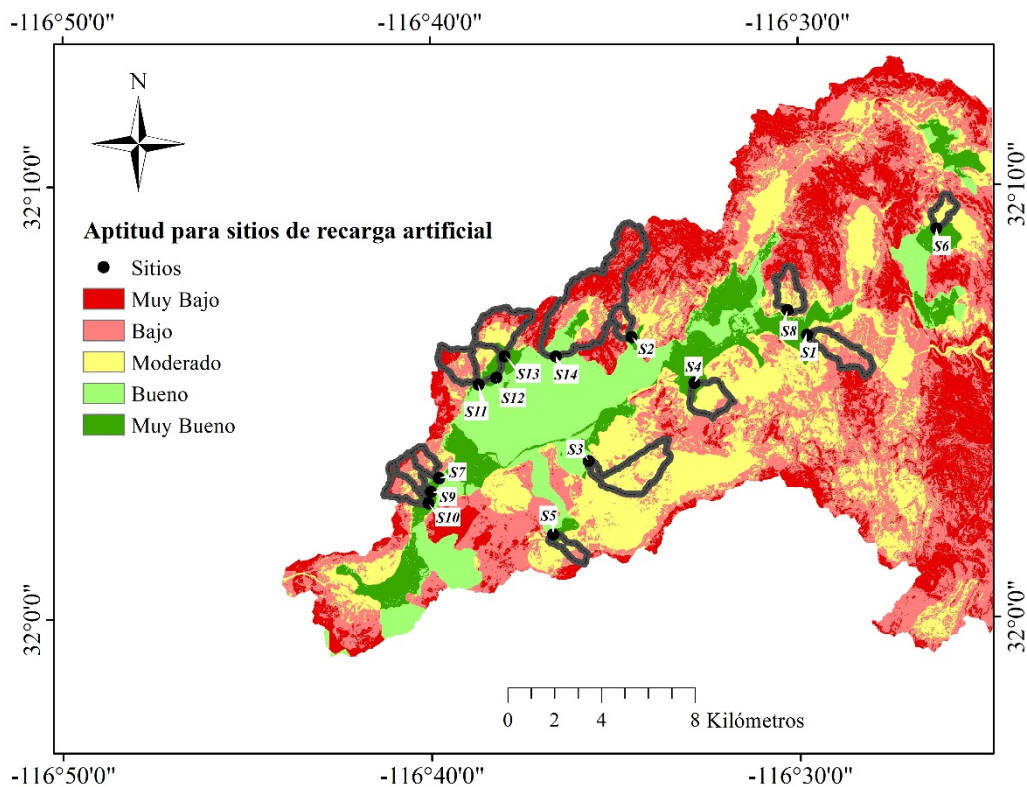


Figura 4.14 Subcuencas

#### 4.14 Números de Curva

El mapa de números de curva se obtuvo a partir de la superposición de los grupos hidrológicos de suelo y la cobertura de suelo a los polígonos resultantes se les asignó su número de curva usando los valores de la tabla 2.5, estos valores están bajo un antecedente de Humedad tipo II. Como se comentó en la sección de geología gran parte del valle de Guadalupe corresponde a depósitos aluviales. Las coberturas y uso de suelo de esta zona son principalmente la agricultura, residencial, matorrales y pastizales, los números de curva varían de 63 a 98, el número de curva ponderado para la cuenca del acuífero Guadalupe es de 86.

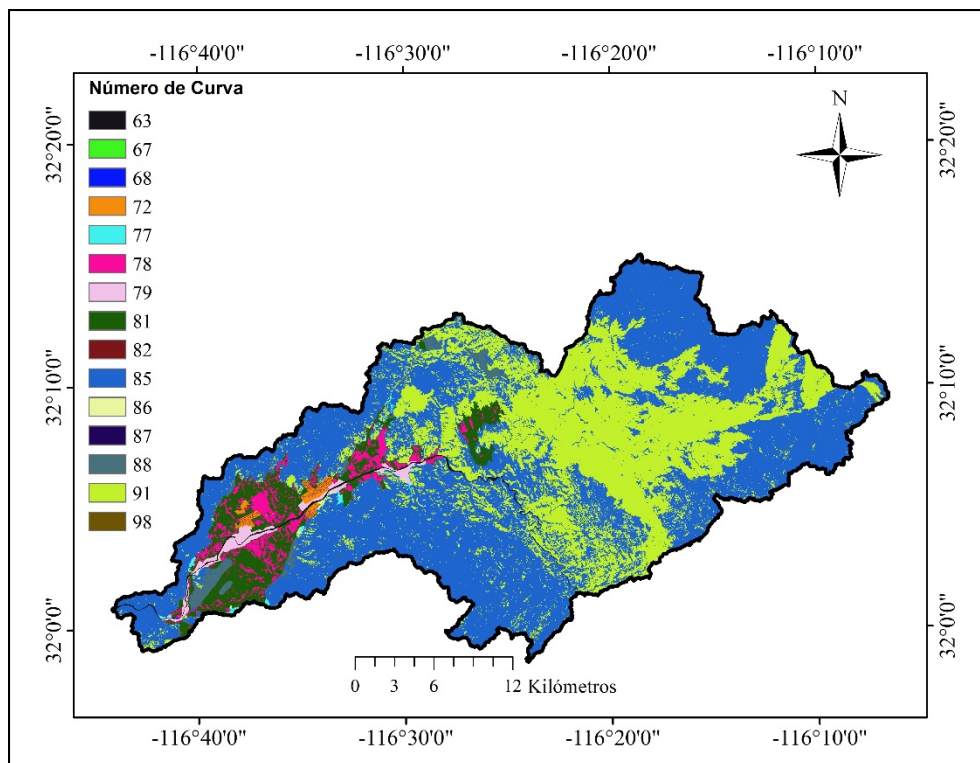


Figura 4.15 Número de Curva

Usando la fórmula Sobhani (1975) se llevaron los números de curva de un antecedente de humedad tipo II a uno tipo I, dando como resultado un número de curva ponderado de 73.

La zona de la serranía tiene los mayores números de curva y la zona de los depósitos aluviales la que presenta los números de curva menores.

El número de curva ponderado para la subcuenca 15 usando un antecedente de humedad tipo II es de 87, con uno tipo I el número se reduce a 75.

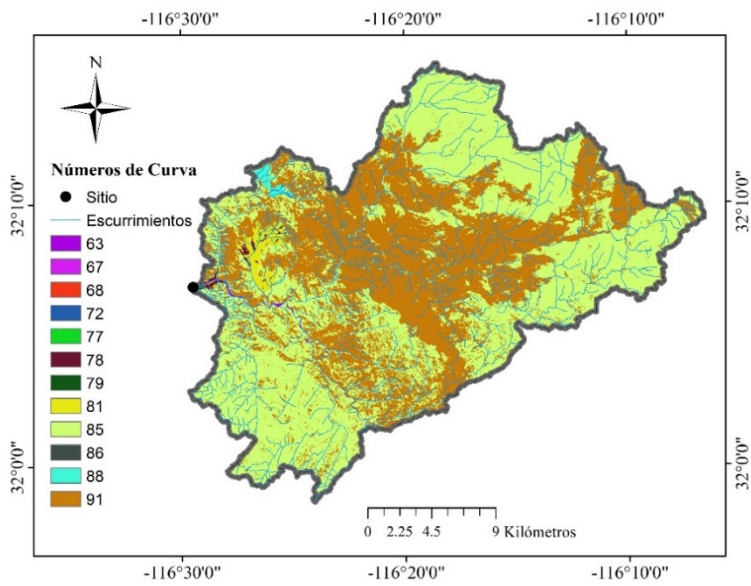


Figura 4.16 Sitio 15 y Números de curva de su Subcuenca

El evento de precipitación que se consideró en el análisis de escurrimientos fue de 52 mm, se obtuvo de las isoyetas de intensidad de lluvia de la secretaria de comunicaciones y transportes para una duración de 10 minutos y un periodo de retorno de 10 años a continuación se muestra el mapa.

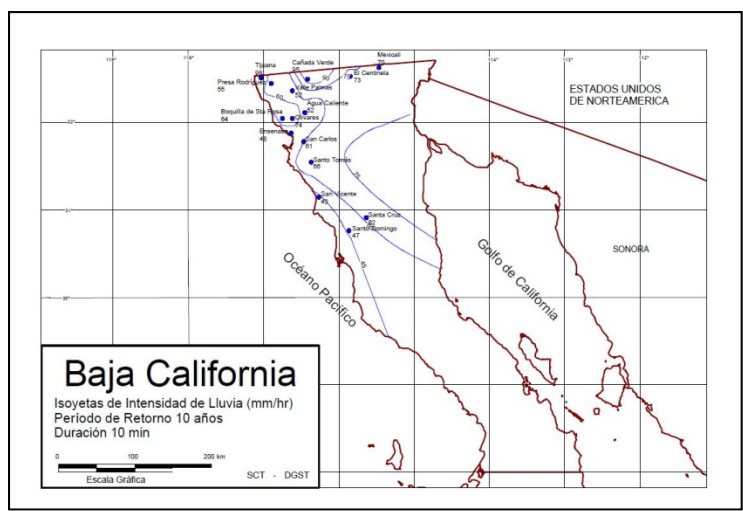


Figura 4.17 Intensidad de lluvia 10 minutos (periodo de retorno de 10 años)

SCYT (2018). Figura tomada <http://www.sct.gob.mx/carreteras/direccion-general-de-servicios-tecnicos/isoyetas/>

#### 4.15 Estimación de escurrimiento por subcuenca

Se estimó el escurrimiento para cada subcuenca usando el número de curva ponderado con condición de humedad antecedente tipo I y tipo II, considerando un evento de lluvia de 52 milímetros.

Tabla 16 Estimación de escurrimientos con un evento de precipitación de 52mm

Subcuenca	Ponderada		Área total Km <sup>2</sup>	CNI		CNII	
	CNI	CNII		Q (mm)	Q m <sup>3</sup>	Q (mm)	Q m <sup>3</sup>
S1	72	86	2.263	7.94	17,957.45	22.48	50,865.18
S2	71	85	0.818	7.23	5,919.81	21.08	17,249.51
S3	71	85	3.788	7.23	27,406.50	21.08	79,858.81
S4	70	85	1.974	6.57	12,971.92	21.08	41,621.32
S5	70	85	0.852	6.57	5,598.63	21.08	17,963.58
S6	79	90	0.860	13.98	12,014.72	28.81	24,765.10
S7	71	85	0.849	7.23	6,138.82	21.08	17,887.70
S8	75	87	1.652	10.27	16,969.00	23.94	39,563.51
S9	70	85	1.098	6.57	7,215.13	21.08	23,150.24
S10	70	84	1.427	6.57	9,373.80	19.75	28,177.50
S11	71	85	1.870	7.23	13,531.53	21.08	39,429.03
S12	70	85	1.576	6.57	10,351.23	21.08	33,212.63
S13	71	85	2.925	7.23	21,156.81	21.08	61,648.07
S14	70	85	10.842	6.57	71,227.40	21.08	228,538.07
S15	75	87	572.110	10.27	5,875,613.08	23.94	13,699,092.34

#### **4.16 Obras sugeridas y diseño**

Existen diferentes tipos de obras como se mencionó en el capítulo 2.9.2, las técnicas para aplicar en estas zonas varían dependiendo de si aplicaran dentro del canal o fuera del canal.

Para zonas áridas y semi áridas donde los eventos de precipitación son escasos una de las técnicas más usadas es la recarga dentro de los canales, usando presas llamadas wadi para así aprovechar las corrientes efímeras, este tipo de presas incrementan el tiempo para que la infiltración pueda ocurrir.

Otros sistemas que pudieran ser aplicados, pero con una especial consideración son los sistemas de infiltración superficial como cuencas de infiltración, la limitante es que estos necesitan tasas de infiltración altas como mínimo 0.50 pulg/hrs, para la aplicación de estos sistemas Bouwer, H. (2002) afirma que “se deben realizar pruebas de infiltración para ver que tasas se pueden esperar, así como el área necesaria para cierta tasa de recarga o la tasa de recarga que se puede lograr en cierta área”

## **Capítulo 5 Conclusiones y recomendaciones**

El análisis espacial multicriterio aplicado a zonas semiáridas como la región del Valle de Guadalupe es una herramienta imprescindible para el apoyo en la toma de decisiones para ubicar zonas y sitios potenciales para la recarga de acuíferos.

Fue posible identificar zonas con potencial para aplicar técnicas de recarga usando los sistemas de información geográfica. Las obras sugeridas para esas zonas se deben tomar con una especial consideración ya que en este análisis se consideraron las tasas de infiltración de diseño obtenidas a partir de los grupos hidrológicos de suelos de la literatura. Esto puede producir una subestimación o sobreestimación de la capacidad de infiltración.

Las obras más idóneas para la región son represas sobre el lecho del río que permitirán recargar las corrientes efímeras de precipitaciones normales o torrenciales.

La aplicación de la técnica de cuencas de infiltración es descartada a menos que se realizaran las pruebas de infiltración correspondientes.

Se recomienda redefinir los grupos hidrológicos de suelos adecuadamente. Cabe mencionar que es un área de oportunidad ya que existe poca información al respecto.

Se recomienda generar una base de datos con registros de precipitación en periodos de minutos.

## Capítulo 6 Referencias

Al-Abadi, A. M., et al. (2017). "A GIS-Based Integrated Fuzzy Logic and Analytic Hierarchy Process Model for Assessing Water-Harvesting Zones in Northeastern Maysan Governorate, Iraq." *Arabian Journal for Science and Engineering* 42(6): 2487-2499.

Campos Gaytán, J. R. (2008). *Simulación del flujo de agua subterránea en el acuífero del Valle de Guadalupe, Baja California, México, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. Doctor: 220.*

Chowdhury, A., et al. (2010). "Delineation of groundwater recharge zones and identification of artificial recharge sites in West Medinipur district, West Bengal, using RS, GIS and MCDM techniques." *Environmental Earth Sciences* 59(6): 1209.

Custodio, E. y Llamas, M.R., 1983. *Hidrología Subterránea. 2ª edición. Ed. Omega. Barcelona*

Davis y DeWeist (1966). *Hydrogeology, John Wiley*

DOF, 2001. *Diario Oficial de la Federación, 2 de agosto del 2001*

Domenico & Schwartz (1998). *Physical and Chemical Hydrogeology. Second Edition. Ed. John Wiley and Sons Inc.*

Drever (1997). *The Geochemistry of Natural Waters. Third Edition. Edit. Prentice Hall.*

Freeze, R.A. y Cherry J.A., 1979. *Groundwater. Ed. Prentice-Hall International. 604 p. London.*

Gale, I. (2005). *Strategies for Managed Aquifer Recharge (MAR) in semi-arid areas, UNESCO.*

Giordano, M. (2009). "Global groundwater? Issues and solutions." *Annual review of Environment and Resources* 34: 153-178.

Herrera, G. S., et al. (2017). "Estimación de datos faltantes de precipitación por el método de regresión lineal: Caso de estudio Cuenca Guadalupe, Baja California, México." *Investigación y Ciencia: de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*(71): 34-44.

Jha, M. K., et al. (2014). "Rainwater harvesting planning using geospatial techniques and multicriteria decision analysis." *Resources, Conservation and Recycling* 83: 96-111.

Kumar, T., et al. (2014). "Appraising the accuracy of GIS-based Multi-criteria decision making technique for delineation of Groundwater potential zones." *Water resources management* 28(13): 4449-4466.

Kumar, T., et al. (2016). "Multi-criteria decision analysis for planning and management of groundwater resources in Balod District, India." *Environmental Earth Sciences* 75(8): 1-16.

Kurczyn-Robledo, J. A., et al. (2007). "Evaluación del escurrimiento superficial en el noreste del Valle de Guadalupe, BC, México, usando el método de curvas numeradas y datos de satélite." *Revista mexicana de ciencias geológicas* 24(1): 1-14.

Longley, P. A., et al. (2005). *Geographic Information Systems and Science*, Wiley.

Machiwal, D. and P. Singh (2015). "Comparing GIS-based multi-criteria decision-making and Boolean logic modelling approaches for delineating groundwater recharge zones." *Arabian Journal of Geosciences* 8(12): 10675-10691.

Mahmoud, S. H. and A. Alazba (2014). "Identification of potential sites for groundwater recharge using a GIS-based decision support system in Jazan region-Saudi Arabia." *Water resources management* 28(10): 3319-3340.

Malczewski, J. and C. Rinner (2015). *Multicriteria decision analysis in geographic information science*, Springer.

Maliva, R. and T. Missimer (2012). *Arid lands water evaluation and management*, Springer Science & Business Media.

Mishra, S. K. and V. Singh (2013). *Soil conservation service curve number (SCS-CN) methodology*, Springer Science & Business Media.

Molden, D. (2007). *Water for food, water for life: a comprehensive assessment of water management in agriculture*, Earthscan.

Morcillo, C. G. (2005). "Lógica difusa. Una introducción práctica."

Musgrave, G. (1955). "How much of the rain enters the soil." *Water: US Department of agricultural yearbook*: 151-159.

Oikonomidis, D., et al. (2015). "A GIS/Remote Sensing-based methodology for groundwater potentiality assessment in Tirnavos area, Greece." *Journal of Hydrology* 525: 197-208.

Pizano, A. R. (2013). "La evaluación multicriterio como instrumento de los sistemas de información geográfica. Tesis de maestría. Universidad nacional autónoma de México.

Ramakrishnan, D., et al. (2009). "SCS-CN and GIS-based approach for identifying potential water harvesting sites in the Kali Watershed, Mahi River Basin, India." *Journal of Earth System Science* 118(4): 355-368.

Saaty, T. L. (1990). "How to make a decision: the analytic hierarchy process." *European journal of operational research* 48(1): 9-26.

Saaty, T. L. (2008). "Decision making with the analytic hierarchy process." *International journal of services sciences* 1(1): 83-98.

Selvarani, A. G., et al. (2016). "Identification of Artificial Recharge Sites for Noyyal River Basin Using GIS and Remote Sensing." *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*: 1-11.

*Singh, A., et al. (2013). "Artificial groundwater recharge zones mapping using remote sensing and GIS: a case study in Indian Punjab." Environmental management 52(1): 61-71.*