



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**Centro Interdisciplinario de Investigación para el
Desarrollo Integral Regional. Unidad OAXACA.**



**Maestría en Ciencias en Conservación y
Aprovechamiento de Recursos Naturales (Ingeniería)**

**PROPUESTA DE ZONAS DE CONSERVACIÓN Y PROTECCIÓN HÍDRICA EN
CAPULÁLPAM DE MÉNDEZ A PARTIR DE INTEGRACIÓN DE MÉTODOS
GEOFÍSICOS Y PERCEPCIÓN REMOTA**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS**

Presenta:

Lic. Ricardo Marcial Juárez.

Directores de Tesis:

Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez.

M.C. María de los Ángeles Ladrón de Guevara Torres.

Santa Cruz Xoxocotlán a 15 de junio de 2017



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México, D.F. el día cuatro del mes de julio del año 2017, el que suscribe Ricardo Marcial Juárez alumno del Programa de Maestría en ciencias en conservación y aprovechamiento de recursos naturales, con número de registro A150003, adscrito(a) al Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca, manifiesto que es el autor intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de los Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez y M.C. María de los Ángeles Ladrón de Guevara Torres y cede los derechos del trabajo titulado Propuesta de zonas de conservación y protección hídrica en Capulálpam de Méndez a partir de integración de métodos geofísicos y percepción remota, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o directores del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a las siguientes direcciones Hornos No. 1003, Col. Noche Buena, Municipio de Santa Cruz Xoxocotlán C.P. 71230. Oaxaca, posgradoax@hotmail.com y texgrr@msn.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Ricardo Marcial Juárez.



CENTRO INTERDISCIPLINARIO
DE INVESTIGACIÓN PARA EL
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL
C.I.I.D.I.R.
UNIDAD OAXACA
I.P.N.



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de Oaxaca siendo las doce horas del día dos del mes de julio del 2017 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CIIDIR OAXACA para examinar la tesis titulada:
Propuesta de zonas de conservación y protección hídrica en Capulálpam de Méndez a partir de integración de métodos geofísicos y percepción remota.

Presentada por el alumno:

Marcial Juárez Ricardo
Apellido paterno Apellido materno Nombre(s)

Con registro:

A	1	5	0	0	0	3
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

Maestría en ciencias en conservación y aprovechamiento de recursos naturales

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Directores de tesis

Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez

M.C. María de los Angeles Ladrón de Guevara Torres

Dr. Victor Guillermo Jiménez Quero

Dr. Francisco Castellanos León

Dr. Magdalena Caballero Caballero

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez



CENTRO INTERDISCIPLINARIO
DE INVESTIGACIÓN PARA EL
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL
C.I.I.D.I.R.
UNIDAD OAXACA
I.P.N.

DEDICATORIA.

A mi esposa.

Por tu paciencia y comprensión durante todo el proceso, por el tiempo que hiciste de padre y madre, todo mi amor y respeto para ti.

A mis Hijos.

Ustedes son la fuerza que me ayuda cada día, su sonrisa y afecto es lo único que necesito para saber que este esfuerzo valió la pena. Ximena, Axel y Ángel si llegan a leer esto que les sirva de motivación para superarse en la vida, siempre van a contar conmigo. Los amo.

A mi Familia.

Mi madre y mi abuelo pilares fundamentales en mi vida, gracias por el entusiasmo que muestran en las actividades que realizo, este logro es mío y de ustedes.

Hermanos, porque, aunque no estamos juntos sabemos que estamos el uno para el otro. Animo.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada durante la realización de esta maestría, al financiamiento otorgado mediante las Becas de Estimulo Institucional de Formación de Investigadores (BEIFI).

Al Instituto Politécnico Nacional mediante el Centro interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Oaxaca, por todas las facilidades y las instalaciones en las cuales se desarrolló el presente trabajo

A mis directores de tesis **Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez y M.C. María de los Ángeles Ladrón de Guevara Torres**, por el conocimiento invaluable que compartieron conmigo durante todo este proceso, pero sobre todo por su gran paciencia.

A los revisores de tesis y miembros del jurado Dr. Víctor Guillermo Jiménez Quero, Dr. Francisco Castellanos León y Dr. Magdaleno Caballero Caballero, por las valiosas contribuciones que realizaron al presente trabajo durante los 2 años y por el tiempo dedicado a la revisión.

Al Comisariado de Bienes Comunales de Capulálpam de Méndez por las facilidades otorgadas para ingresar a los recorridos de campo y por la información otorgada que fue pieza clave para llegar a los objetivos de este trabajo.

A todos los profesores y compañeros que compartieron conocimiento y experiencias conmigo durante mi estancia en el CIIDIR.

A mi Familia por el soporte y ayuda que mi brindan a cada momento no solo a mi sino a mi esposa e hijos, muchas gracias.

1 Contenido

RESUMEN	i
ABSTRACT	ii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.2 Justificación	7
1.3 Antecedentes	9
1.4 Objetivos e Hipótesis	14
1.4.1 Hipótesis.....	14
1.4.2 Objetivo General.....	14
1.4.3 Objetivos específicos.....	15
1.5 Área de estudio	15
1.5.1 Clima	17
1.5.2 Geología.....	21
1.5.3 Edafología	26
1.5.4 Hidrología.	28
2 Marco teórico.	29
2.1 Cuenca Hidrográfica.	30
2.2 Zonas de recarga hídrica	31
2.3 Balance hídrico	33
2.4 Métodos Electromagnéticos.	35
2.5 Imágenes Satelitales.....	41
2.6 Análisis multicriterio	44
3 Metodología	45
3.1 Balance hídrico.	45
3.2 Complementación de la red Hídrica	49
3.3 Interpretación visual de una imagen satelital de alta resolución	49
3.4 Índices de vegetación y humedad	50
3.5 Métodos electromagnéticos	55
3.6 Análisis de elementos que inciden en la recarga hídrica.	58
3.6.1 Pendiente:	58
3.6.2 Tipo de suelo:	60
3.6.3 Tipo de roca:.....	61

3.6.4	Índice de vegetación.....	62
3.6.5	Índice de humedad	64
3.7	Determinación del potencial de recarga de las zonas evaluadas	65
4	Resultados	66
4.1	Balance hídrico	66
4.2	Complementación de la red Hídrica	69
4.3	Interpretación visual de una imagen satelital de alta resolución	70
4.4	Índices de vegetación y humedad	72
4.5	Metodos electromagneticos.	75
4.6	Elementos que inciden en la recarga.	80
4.6.1	Pendiente	80
4.6.2	Tipo de suelo	81
4.6.3	Tipo de roca	82
4.6.4	Índice de vegetación.....	83
4.6.5	Índice de humedad.	84
4.7	Identificación de las zonas con potencial de recarga.....	86
4.8	Análisis de Resultados	89
5	Conclusiones.	90
5.1	Recomendaciones	92
5.2	Bibliografía	93

Índice de imágenes

Imagen 1.	Delimitación del área de estudio.....	17
Imagen 2.	Tipos de clima presentes en la cuenca.....	18
Imagen 3.	Clases de roca y fallas en la cuenca.	21
Imagen 4.	Tipos de roca presentes en la zona de estudio.	24
Imagen 5.	Tipos de suelo presentes en el área de estudio.	27
Imagen 6.	Hidrología de la zona de estudio	29
Imagen 7.	Ubicación y distribución de antenas emisoras de VLF.....	40
Imagen 8.	Identificación de fallas geológicas, manantiales y recorridos VLF.	55
Imagen 9.	Ubicación específica de los recorridos con equipo VLF.	56
Imagen 10.	Red Hídrica completa de la cueca.	70
Imagen 11.	Coberturas presentes en la cuenca y superficie de cada una.....	71
Imagen 12.	Índice de vegetación de diferencia normalizado.	73

Imagen 13. Mapa de temperatura superficial de la cuenca.	74
Imagen 14. Índice de humedad de la cuenca.	75
Imagen 15. Resultados de la ponderación con posibilidad de recarga respecto a la pendiente.	81
Imagen 16. Resultados de la ponderación con posibilidad de recarga respecto al tipo de suelo.....	82
Imagen 17. Resultados de ponderación con posibilidad de recarga respecto al tipo de suelo.	83
Imagen 18. Resultados de la ponderación con posibilidad de recarga respecto al índice de vegetación.	84
Imagen 19. Resultados de la ponderación con posibilidad de recarga respecto al índice de humedad.....	85
Imagen 20. Distribucion de la posibilidad de recarga hídrica en la cuenca.	87
Imagen 21. Distribución del potencial de recarga en el municipio de Capulálpam.	89

Índice de ecuaciones

Ecuación 1. Evapotranspiración	47
Ecuación 2. Coeficiente de escurrimiento	48
Ecuación 3. Volumen escurrido.....	48
Ecuación 4. Infiltración	49
Ecuación 5. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado.....	51
Ecuación 6. Radiancia	52
Ecuación 7. Temperatura de brillo.....	52
Ecuación 8. Proporción de la vegetación	53
Ecuación 9. Emisividad de la superficie de la tierra.....	54
Ecuación 10. Índice de humedad	54
Ecuación 12. Potencia de recarga hídrica	65

Índice de tablas

Tabla 1. Radiancia de las bandas TIRS	52
Tabla 2. Constantes de Temperatura.....	53
Tabla 9. Frecuencias y las estaciones utilizadas por el equipo VLF	55
Tabla 3. Ponderación de la posibilidad de recarga hídrica según tipo de pendiente	59
Tabla 4. Ponderación de acuerdo a tipo de suelo	60
Tabla 5. Ponderación y clasificación de las rocas de acuerdo a su posibilidad de recarga.....	62
Tabla 6. Reclasificación del índice de vegetación	63
Tabla 7. Ponderación para el índice de humedad	64
Tabla 10. Rango de posibilidades de recarga hídrica.....	65

Tabla 11. Superficie ocupada por tipo de coberturas	71
Tabla 2. Porcentajes por categorías de posibilidad de recarga hídrica de la cuenca,	86

Índice de figuras

Figura 1. Esquema de adquisición y funcionamiento del método VLF.....	38
Figura 2. Distribución de campo EM para el método VLF en polarización E con señales teóricas sobre un dique conductivo vertical.....	39
Figura 3. Proceso de obtención de información climatológica.	47
Figura 4. Proceso para la obtención de diferentes índices	51

Índice de graficas

Grafica 1. Temperatura 2000-2010	20
Grafica 2. Precipitación de la zona de estudio.....	20
Grafica 3. Respuesta del componente real e imaginario	57
Grafica 4. Distribución de P, ETP y ETR para la estación meteorológica de Ixtepeji año seco.	67
Grafica 5. Distribución de P, ETP y ETR para la estación meteorológica de Ixtepeji año húmedo.....	68
Grafica 6. Distribución de P, ETP y ETR para la estación meteorológica de Ixtlán seco.	69
Grafica 7. Distribución de P, ETP y ETR para la estación meteorológica de Ixtlán año húmedo.....	69
Grafica 8. Datos en fase sin filtrar contra la distancia recorrido la Y	76
Grafica 9. Gráfico de los datos en fase filtrados en función de la distancia recorrido la Y	76
Grafica 10. Diagrama de la sección transversal de la densidad de corriente en fase contra la distancia.	77
Grafica 11. Datos en fase sin filtrar contra la distancia recorrido Rio parte baja ...	77
Grafica 12. Datos en fase filtrados en función de la distancia recorrido rio parte baja	78
Grafica 13. Diagrama de la sección transversal de la densidad de corriente en fase contra la distancia recorrido rio parte baja.....	78
Grafica 14. Datos en fase sin filtrar contra la distancia recorrido El campo.	79
Grafica 15. Gráfico de los datos en fase filtrados en función de la distancia recorrido El campo.....	79
Grafica 16. Diagrama de la sección transversal de la densidad de corriente en fase contra la distancia recorrido El campo.....	80

RESUMEN

La falta de información a nivel microcuenca sobre las principales zonas de recarga hídrica, conlleva al desconocimiento de acciones eficaces y la acertada toma de decisiones para garantizar la cantidad y calidad del recurso hídrico. A esto se le suma el auge de la zona como destino turístico aumentando con esto el número de personas que consumen dicho recurso en algún momento, esto ha hecho que se plantee la cuestión de cómo conservar o mantener este recurso disponible para la población del municipio y de la población flotante respecto de cuales son y en qué lugar las medidas pertinentes que deberían ser tomadas para preservar el recurso hídrico.

El objetivo de este estudio fue contribuir a la planificación y manejo de los recursos naturales a través de la identificación de las zonas de conservación y protección hídrica en Capulálpam de Méndez para mantener el abastecimiento de agua a largo plazo, esto se obtuvo mediante la generación de índices de humedad del suelo y vegetación, así como métodos geofísicos (EM-VLF) y datos de pendiente, tipo de suelo, tipo de roca y vegetación existente en la cuenca. Se realizaron transectos de 900 metros sobre la ubicación de los manantiales y perpendiculares a las principales fallas identificadas en la región con un equipo VLF ABEM WADI, se aplicó la metodología de álgebra de mapas considerando cada uno de los elementos que intervienen en la recarga hídrica y ponderando su importancia para obtener las zonas de mayor importancia en la recarga hídrica.

Palabras Clave: VLF, índice de vegetación, índice de humedad, álgebra de mapas.

ABSTRACT

The lack of information of micro-watershed level in the main areas of water recharge, generates ignorance about effective actions and correct decisions to making to guarantee the quantity and quality of water resource. Added to this, the peak of this area, as a tourist destination, have increased with the amount of people who also consume this water. So, this has led to questioning how to conserve or keep available this resource to the people from the town and visitors, and this way, to know the places and necessary measures that should be taken to conserve the water resource.

The objective of this study was to contribute to the planning and management of the natural resources through the identification of conservation zones and water protection in Capulálpam de Mendez to preserve long-term water supply. This was obtained by generation of soil moisture and vegetation indexes, a geophysical method (EM-VLF) and slope data, type of soil, rock and vegetation existing in the basin. Transects of 900 meters were made on the location of the springs and perpendicular to the main faults identified in the region with a VLF ABEM WADI equipment. The map algebra methodology was applied considering each one of the elements that take part in the water recharge and weighing its importance to obtain the areas with greatest influence on water recharge.

Key words: VLF, vegetation index, moisture index, map algebra.

1. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso natural indispensable para toda forma de vida existente en la tierra ya que de ella depende la vida misma, la seguridad alimentaria y la salud de los ecosistemas. Si bien ocupa aproximadamente tres cuartas partes de la superficie del planeta, menos del 3% está disponible para el consumo. De ese porcentaje, el 70% se encuentra en los polos y sitios de nieves eternas, el 29% está almacenado en las profundidades de la tierra y el 11% restante en los ríos, lagos, pantanos, suelo, embalses, la atmósfera y en organismos vivos (Matus et al, 2009). El agua dulce y los ecosistemas conexos que suministran y renuevan el agua que necesita la humanidad se han venido deteriorando.

La evaluación de la cantidad de agua en el planeta es complicada debido a que es un recurso dinámico en el tiempo y espacio. Aproximadamente 97.5% del total del agua es salina y 2.5% es dulce. Sin embargo, sólo 0.26% del agua dulce (y 0.01% del total del planeta) se encuentra en lagos, ríos y otros almacenamientos; y está disponible para satisfacer los requerimientos de los ecosistemas y los seres humanos (Shiklomanov, 2002).

De acuerdo con el INAB (2005) las zonas de recarga hídrica son territorios con capacidad de infiltrar de forma natural el agua procedente de la precipitación o escorrentía superficial, y con ello, permiten alimentar a los acuíferos donde los flujos subterráneos se desplazan horizontalmente hacia los diferentes cuerpos de agua como lagos, ríos, manantiales y océanos.

Anualmente México recibe aproximadamente 1, 449,471 millones de metros cúbicos de agua en forma de precipitación. De esta agua, se estima que el 72.5% se

evapotranspira y regresa a la atmósfera, el 21.2% escurre por los ríos o arroyos, y el 6.4% restante se infiltra al subsuelo de forma natural y recarga los acuíferos. Considerando los flujos de salida (exportaciones) y de entrada (importaciones) de agua con los países vecinos, el país anualmente cuenta con 447, 260 millones de metros cúbicos de agua dulce renovable (CONAGUA, 2015).

Las cuencas hidrográficas mexicanas incluyen una rica variedad de ecosistemas acuáticos (ríos, lagos, lagunas, cenotes, etc.), hábitats y especies que están física y biológicamente articulados por el flujo del agua y su régimen hidrológico. Estos valores ambientales son expresamente reconocidos por la Ley de Aguas Nacionales (LAN), en el ámbito de la administración del recurso, reafirmando con ello el gran valor estratégico de la conservación de los recursos hídricos por su dimensión ambiental y sustento del desarrollo (CONAGUA, 2011).

Las iniciativas encaminadas a la conservación de las cuencas no son algo nuevo en México. En 1949 se declararon mediante decreto presidencial las “zonas protectoras forestales y de repoblación en las cuencas de alimentación de las obras de irrigación de los distritos nacionales de riego” con el objetivo de mantener en los sistemas hidrológicos las condiciones locales de precipitación, abundancia de agua y calidad de la misma. Con este decreto se estableció una veda total e indefinida en las zonas forestales ubicadas dentro de dichas cuencas. Se trata del documento de mayor contenido en cuanto al número de áreas naturales protegidas (ANP) emitidas en un solo instrumento, así como por la superficie involucrada, que significó más de 30 millones de hectáreas (De la Maza y De la Maza, 1998).

La comunidad de Capulálpam de Méndez se abastece de agua principalmente de una de las tres microcuencas que se encuentran dentro de su territorio, específicamente de un colector o represa localizada sobre el río denominado La “Y. El abasto de agua en la comunidad hasta hace algunos años era suficiente para satisfacer las necesidades de la población, tanto domiciliaria como agrícola, últimamente durante la época de sequía, el caudal del río de donde se abastecen de agua disminuye considerablemente lo que en ocasiones limita el uso para la agricultura, esto se debe a factores como el turismo que incrementan la población que utiliza este líquido.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

FNUAP (2001) establece que el agua tal vez sea el recurso que define los límites del desarrollo sostenible. No hay sustituto para el agua y el equilibrio entre las demandas de la humanidad y la cantidad disponible ya es precario. Sólo un 2,5 % de toda el agua existente en el planeta es agua dulce, imprescindible para la mayoría de los usos humanos y sólo un 0,5% es agua subterránea o superficial accesible.

El caudal de agua dulce disponible no alcanza ni la mitad de un uno por ciento de toda el agua de la tierra. Lo demás es agua salada, o forma parte de los hielos polares. El agua dulce únicamente se renueva por la lluvia, que cae a un ritmo de 40,000 a 50,000 Km³ al año. Sin embargo, debido a la congestión de las grandes urbes, la deforestación, el desvío de las aguas por necesidades de irrigación agrícola, hasta esta ínfima parte de agua dulce está desapareciendo a la par que se va secando la superficie de la tierra; a este ritmo, el agua de todas las cuencas

de los ríos de todos los continentes irá agotándose de manera ininterrumpida (ONU, 2012).

A nivel mundial, la disponibilidad *per cápita* ha disminuido significativamente en unas cuantas décadas. En 1960, a cada habitante le correspondían 11 300 m³ por año, mismas que se redujeron a 5 000 m³ en 2010 (MEA, 2005; FAO, 2012). En México la disponibilidad *per cápita* anual también ha disminuido de manera considerable: en 1950 era de 17 742 m³, pasando a menos de la mitad en 1970 (8 000 m³) y para el año 2012 se redujo a sólo 4 028 m³, volumen considerado como de baja disponibilidad de acuerdo al *World Resources Institute* (WRI, 2014). Para el año 2030 se proyecta que la disponibilidad de agua por habitante en el país sea de apenas 3 430 m³ por año (Conagua, 2014).

El agua es uno de los recursos que más necesita el hombre para poder desarrollarse en su medio, sin embargo, la disponibilidad de este líquido es menor cada vez, por lo que es importante conocer la dinámica que sigue el territorio y así poder determinar zonas de protección y abastecimiento de acuíferos, así como establecer normas y reglamentos que regulen las actividades que se realizan dentro del territorio, para garantizar el abasto de este líquido para las generaciones. El consumo mundial del agua se duplica cada veinte años, es decir a un ritmo dos veces mayor que el crecimiento de la población humana. Según las Naciones Unidas, el agua potable ya escasea para mil millones de personas. De seguir así, de aquí al año 2025, la demanda de agua dulce llegará a superar la disponible hoy día en un 56 por ciento (*ídem*).

La lluvia en las zonas de recarga de los acuíferos son la principal y más importante fuente de abastecimiento de agua para los diferentes cursos, manantiales y cuerpos de agua subterráneos. Sin embargo, muchas de las prácticas en actividades como la agricultura, la ganadería, la producción forestal, el desarrollo urbanístico o la industria alteran las características de las zonas de recarga hídrica y dificultan la infiltración del agua al erosionar, compactar, impermeabilizar y dejar descubierto el suelo, lo cual genera una mayor escorrentía superficial y disminuye la recarga de los acuíferos. Esto reduce el nivel de las aguas subterráneas (acuíferos) y afecta la calidad de las aguas (Matus et al, 2009).

En México la disponibilidad de agua es muy diferente dependiendo de la región en la que se encuentre, por ejemplo, en la Frontera Sur la disponibilidad de agua es de 158 km³, mientras que en la región norte no llegan a 14 km³ y en la Península de Baja California y Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala la disponibilidad es inferior a 5 km³. El agua disponible no debe interpretarse como mantenimiento de los ecosistemas acuáticos, como ríos y lagos (CONAGUA, 2011).

El cambio de cobertura vegetal y uso de suelo además de afectar las propiedades del suelo afecta también al ciclo hidrológico, debido a que la falta de cobertura en el suelo disminuye su capacidad de infiltración, lo que a su vez incrementa la escorrentía superficial, provocando mayor erosión, la recarga de mantos acuíferos subterráneos tampoco se puede llevar a cabo debido a la falta de las raíces de la vegetación que favorecen la infiltración del agua.

Las consecuencias de la deforestación y de la degradación del suelo forestal son: la erosión y sedimentación en lagos, ríos y lagunas; la disminución en la captación

de agua y recarga de mantos acuíferos; las inundaciones; la reducción del potencial productivo por la pérdida paulatina de fertilidad de suelos, y los impactos negativos en la biodiversidad, cuyos efectos resultantes son la pobreza y migración de la población rural (SEMARNAT, 2011).

Los factores que aumentan el grado de presión sobre los recursos hídricos son diversos, pero se distingue que los principales son el número de personas que dependen del agua en esa zona y los usos a los cuales está destinada el agua, bajo este contexto en la zona de estudio según los datos del Censo de Población y Vivienda 2010 se encuentra un total de 11,898 personas, y el principal uso del agua es para consumo humano y agricultura, en años recientes uno de los factores que más puede influir en el grado de presión hídrico de la zona es la cantidad de visitantes que llegan cada año a los centros ecoturísticos de la región, ya que solo en Capulálpam de Méndez para el 2015 se reportaron más de 20,000 visitantes.

A partir del año 2005 la cantidad de agua disponible para actividades agrícolas dentro del municipio disminuyó drásticamente, por lo que se vieron limitadas las actividades de riego, aunado a esto la cantidad de establecimientos dedicados a la prestación de servicios se incrementó, sobre todo lo que concierne a hoteles, posadas y cabañas, lo que aumenta el grado de presión sobre los recursos hídricos disponibles para los habitantes del municipio.

La demanda creciente no solo a nivel local sino a nivel global de agua hace que el abasto de este líquido sea vital para cualquier sociedad, los problemas ligados a los factores que afecten el suministro y su recarga son temas relevantes que deben ser atendidos desde diversas perspectivas, entender cómo se comporta el agua dentro

de un territorio es parte de estos problemas que además ayuda a la toma de decisiones para conservar los recursos naturales y así garantizar el suministro de agua en la zona.

1.2 Justificación

El crecimiento acelerado de la población, la degradación de los ecosistemas, los cambios de uso del suelo así como las variaciones climáticas, crean fuertes desequilibrios ambientales que pueden llegar a tener efectos negativos sobre cantidad y calidad de agua del agua (Boza 2007, GWP 2011, PNUD 2016). Estos procesos y sus efectos no se encuentran a una escala de documentación que necesaria para satisfacer las necesidades reales de información para la toma de decisiones en los ámbitos más locales.

El desarrollo económico y social de toda población se encuentra estrechamente relacionado a la disponibilidad de agua. Anteriormente, el ser humano tendía a disponer de los recursos hídricos considerándolos como ilimitados; sin embargo, en los últimos años ha tenido que comprender a la fuerza que los recursos hídricos distan mucho de ser ilimitados (García-López, 2011).

La importancia de zonas de recarga recae en que son fuentes principales para obtener agua dulce alrededor del mundo y juegan un papel importante dentro del ciclo del agua. Asimismo, realizar su identificación, protección y conservación asegurará el bienestar de todo ser vivo y del desarrollo económico de cada nación.

La falta de información a nivel microcuenca, sobre las principales zonas de recarga hídrica, conlleva al desconocimiento de acciones eficaces y la acertada toma de decisiones para garantizar la cantidad y calidad del recurso hídrico. A ello se le suma

el auge de esta zona como destino turístico aumentando con esto el número de personas que consumen dicho recurso en algún momento, y creando proyectos recreativos que implican en alguna medida el cambio de uso del suelo, provocando el aumento del índice de escorrentía, que indica la disminución de la cantidad de agua infiltrada a los mantos acuíferos.

Es fundamental disponer de datos e información sobre el estado y tendencias de los recursos hídricos para efectuar una acertada gestión del agua y un eficaz suministro hacia los diferentes sectores demandantes del recurso, así como también, generar este tipo de información es importante para definir acciones/estrategias a seguir en miras del uso sostenible del recurso.

El conocimiento de ciertas condiciones y características de temas relacionado con los ríos, sus respectivas cuencas hidrográficas y sus principales zonas de recarga, podrán en un futuro permitir enfocar esfuerzos para perpetuar el uso de este recurso, el cual (aunque no existen publicaciones que consideren el problema científicamente) se ha visto mermado debido a la falta de manejo de los recursos naturales. Esto ha hecho que se plantee la cuestión de cómo conservar o mantener este recurso disponible para la población del municipio y de la población flotante (turismo) y de cuales son y en qué lugar las medidas pertinentes deberían ser tomadas. Desde el punto de vista de la hidrología aquellas áreas que alimentan los afluentes naturales son las zonas de recarga hídrica, pero su localización requiere de un estudio específico para una determinada área geográfica. Todo esto hace evidente que un estudio más localizado y detallado es necesario.

Tomando en cuenta estos aspectos, es fundamental realizar un estudio enfocado al aprovechamiento del recurso hídrico basado en los principios del uso sostenible de las fuentes de agua y sus principales áreas de recarga potencial, así como el establecimiento de zonas de protección en la microcuenca del río grande en la región de la sierra norte de Oaxaca.

1.3 Antecedentes.

En la zona de estudio se han desarrollado dos trabajos de importancia relacionados con el tema, orientados a ubicar posibles afectaciones de la actividad minera sobre el sitio de abastecimiento de agua para consumo humano del municipio de Capulálpam. A continuación, se menciona cada uno y los resultados a los que se llegaron.

1. Estudio hidrogeológico en la mina Natividad, Oaxaca, realizado por el servicio geológico nacional en abril de 2007 en donde se realizó una caracterización hidrogeológica de las unidades litológicas del área, se estableció cualitativamente la susceptibilidad de cada una de las unidades de roca para transmitir y almacenar agua y se definió un modelo de funcionamiento del acuífero para el área. Las principales conclusiones de este estudio fueron las siguientes:
 - a. La captación conocida como La Y, recibe agua de escurrimientos superficiales originados por la precipitación pluvial y condensación de neblina, en una microcuenca de aproximadamente 7.5 km², que se extiende hacia la vertiente oeste del Cerro Pelado. No se observaron

manantiales en esta zona, sino escurrimientos superficiales que inician con zonas de humedad en el suelo.

- b. En el área de estudio se tiene la presencia de dos unidades o zonas de diferente comportamiento hidrogeológico.
- c. La microcuenca en que el arroyo La Y labró su cauce se encuentra sobre una unidad de esquisto de edad paleozoica de baja permeabilidad.
- d. No se considera probable que, al cortar diferentes fallas con las obras subterráneas, de la explotación minera, se pongan en comunicación el acuífero aquí denominado colgado, el acuitardo y el acuífugo, que es el basamento hidrogeológico.

2. En marzo de 2007 la Unidad Académica de Ciencias de la Tierra dependiente de la Universidad Autónoma de Guerrero realizó un segundo estudio dentro de la cuenca del municipio, que incluyó levantamientos superficiales de geología, levantamientos estructurales en puntos de interés para obtener los patrones preferenciales de discontinuidades, de este estudio se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- a. El tipo de acuífero existente en la zona es de grietas o fracturas. Los patrones de flujo de agua subterránea se presentan paralelos a las corrientes de agua superficial, las cuales están controladas por la existencia de fallas y fracturas de diferentes dimensiones.

- b. El análisis del patrón del flujo de agua subterránea define un flujo regional de noreste a suroeste a partir de elevaciones topográficas mayores, que es donde se encuentra su principal zona de recarga.
 - c. Los flujos locales son muy someros y pueden estar asociados con flujos subterráneos intermedios.
3. En lo que se refiere a la aplicación de análisis multicriterio para la identificación de zonas de recarga Pedrero (2011), utilizo una herramienta espacial multicriterio de apoyo a la toma de decisiones para la selección de sitios para la implementación de la recarga gestionada de acuíferos, dentro de los criterios utilizados para la identificación de dichas zonas fueron los siguientes:
- a. **Uso de suelo:** El uso de suelo existente proporciona información sobre la disponibilidad de tierra para manejo administrado de acuíferos. Por ejemplo, las áreas que están bajo uso comercial e industrial, son áreas no viables para la implementación de Manejo administrado de acuíferos.
 - b. **Pendiente (topografía):** Las laderas más empinadas no permiten la infiltración en la cuenca. Además, el escurrimiento del agua está directamente relacionado con el ángulo de la pendiente. Las áreas planas permiten altas tasas de infiltración y son adecuadas para la recarga del acuífero. Cuanto menor sea el valor, mayor será la prioridad.
 - c. **Tasa de infiltración (suelo).** La tasa de infiltración del suelo controla la penetración del agua superficial en un sistema acuífero. Los suelos

con alta capacidad de infiltración son más adecuados que los de baja capacidad de infiltración.

- d. **Espesor de capa impermeable sub-superficial.** El espesor de la capa impermeable no debe ser alto, de lo contrario los costos de excavación sería alto. Cuanto menor sea el valor, más adecuado será el lugar.
- e. **Profundidad del agua subterránea:** En términos de mejoramiento de la calidad del agua mediante procesos de atenuación natural, se prefiere un espesor considerable de la zona no saturada. Un nivel de agua subterránea más profundo beneficia la capacidad natural de atenuación en el lugar estudiado.

El análisis de selección de sitio involucra una serie de criterios, alternativas y factores de decisión, resultando en un ambiente de decisión complejo. Con esta nueva herramienta, las etapas de decisión se dan explícitamente al usuario según el procedimiento de análisis global para abordar un problema no estructurado. Se ofrecen criterios estándar y reglas de decisión al usuario para reducir los esfuerzos de análisis y el riesgo de ignorar los criterios de decisión relevantes.

- 4. Rahman (2012) en su investigación Aplicación de un análisis multicriterio basado en SIG para la selección de sitios de recarga de acuíferos con agua recuperada utilizó una metodología similar para la identificación de estas zonas, los criterios utilizados en este caso fueron subdivididos en dos grupos, los criterios ambientales y los criterios técnicos:

- a. Criterios ambientales: Zonas urbanas, áreas naturales protegidas, vulnerabilidad de los recursos hídricos.
- b. Criterios técnicos incluyeron las características del suelo y de las aguas subterráneas, la profundidad del acuífero, la pendiente, el uso del suelo, el tipo de suelo, la textura del suelo, los accesos viales y la velocidad de infiltración.

Las aplicaciones del análisis multicriterio permiten obtener un mapa de aptitud final con áreas adecuadas (1,607 ha) para la infiltración de agua recuperada. Teniendo en cuenta el tipo de suelo, el nivel promedio de agua subterránea.

- 5. Por otra parte, los trabajos realizados con equipos electromagnéticos que permiten la identificación de agua subterránea, fallas y fracturas y zonas de almacenamiento de agua son abundantes en este caso se citan los trabajos realizados por Kayode (2016) y Ammar (2015).
 - a. Kayode y colaboradores en su estudio sondeos de resistividad y perfiles VLF para la ubicación de pozos de agua subterránea en un acuífero fracturado en el Arabia Saudita.
 - b. Se utilizaron técnicas de VLF y resistividad electromagnética combinadas con el registro de pozos para caracterizar las estructuras conductoras de la superficie apta para la acumulación de agua subterránea.
 - c. Como resultado de la compleja naturaleza de las estructuras nigerianas del Precámbrico del Suroeste, el uso de estos métodos

geofísicos parece ser el mejor enfoque de trabajo para delinear con éxito estas zonas conductoras en el área de estudio.

- d. Por su parte Ammar y colaboradores en su estudio Sondeos de resistividad y perfiles VLF para ubicar pozos de agua subterránea en un acuífero fracturado en el escudo árabe, Arabia Saudita, encontraron los siguientes datos.
- e. El método VLF es una herramienta de reconocimiento rápido más adecuada para la identificación de zonas conductoras con límites escarpados.
- f. Los datos VLF son útiles para obtener una visión cualitativa de la variabilidad de la conductividad lateral. La interpretación de los picos en los datos como indicadores de interfaces o zonas de fractura conductiva, los datos sugieren que estas zonas de fracturas están irregularmente distribuidas.

1.4 Objetivos e Hipótesis

1.4.1 Hipótesis.

Es posible identificar las zonas potenciales de recarga hídrica por medio de integración de datos obtenidos de imágenes satelitales, el uso de datos electromagnéticos en campo y análisis multicriterio.

1.4.2 Objetivo General

Contribuir a la planificación y manejo de los recursos naturales a través de la identificación de las zonas de conservación y protección hídrica en Capulálpam de Méndez para mantener el abastecimiento de agua en el municipio.

1.4.3 Objetivos específicos

- Mediante el uso de imágenes satelitales definir un índice de vegetación y un índice de humedad para ubicar las zonas más vulnerables.
- identificar los sitios potenciales para la recarga de acuífero obtenidos por dos diferentes métodos.
- Utilizar el análisis multicriterio para conjuntar los componentes que influyen en la recarga hídrica.
- Proponer las regiones primordiales a ser sujetas a planes de manejo y/o protección de los recursos naturales debido a su carácter de ser zonas de recarga hídrica.

1.5 Área de estudio

La sierra norte de Oaxaca tiene una extensión territorial de 12700 km²; está formada por los distritos de Ixtlán, Villa Alta, Mixe, Teotitlán, Cuicatlán, Tuxtepec, Choapan y Etlá. En el aspecto fisiográfico se le considera como un sistema montañoso que va de los 500 a los 3150 msnm aproximadamente. La componen las Cuencas del Papaloapan y del Río Coatzacoalcos principalmente con gran diversidad de condiciones ambientales que van desde el clima tropical hasta climas de alta montaña y subalpinos (Gonzales, 2008)

La sierra norte es reconocida como una importante área debido a que, la variedad de micro-ambientes que se encuentran en la región, sustentan una abundante diversidad de flora y fauna. Los factores que determinan la existencia y ubicación de estos micro-ambientes son las diferentes zonas topográficas, altitudinales, geológicas y climáticas dentro de la región (Gonzales, 2008)

El área de estudio corresponde a una microcuenca ubicada en la región de la sierra norte en el estado de Oaxaca, con una extensión de 9,500 como se muestra en la imagen 1, dentro de esta microcuenca se encuentra el Municipio de Capulálpam de Méndez, que se localiza al sur de la cabecera distrital de Ixtlán de Juárez y al noreste de la Capital del Estado, su ubicación geográfica es: 17° 18' latitud norte 96° 27° de longitud oeste, sus límites al norte con los Municipios de Ixtlán de Juárez y San Juan Tepanzacoalco, al sur con San Juan Juquila Vijanos, Santiago Xiacuí y Pueblos Mancomunados (Lachatao, Amatlán y Yavesía), al Este con San Miguel Yotao y al Oeste con Santa María Yahuiche. Encierra un polígono irregular cuya superficie es de 3,935.40 Ha., su altura promedio es de 2,120 msnm (PMD, 2013).

La zona está englobada en una de las regiones terrestres prioritarias de México, considerada por la CONABIO como sitio importante que requiere de acciones prioritarias de conservación de la biodiversidad (Arriaga et al., 2000). El municipio de Capulálpam, hidrográficamente pertenece a la Cuenca del Alto Papaloapam, vertiente del Golfo de México.

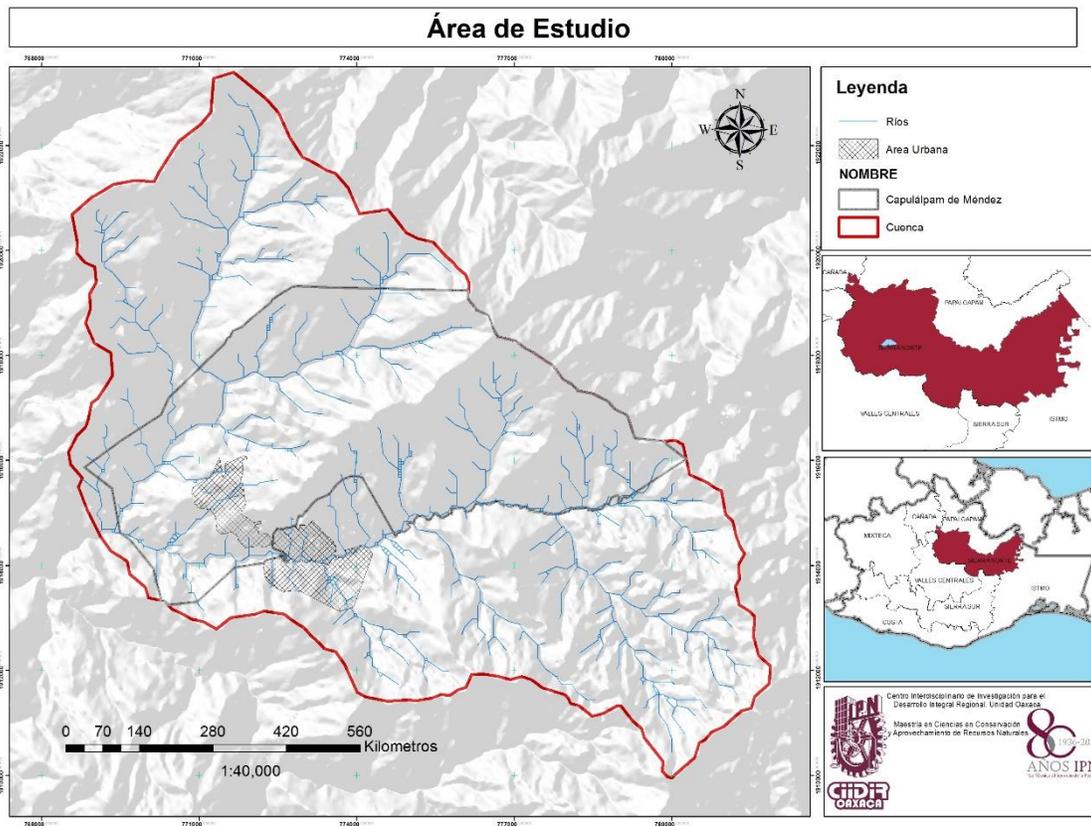


Imagen 1. Delimitación del área de estudio

1.5.1 Clima

Dentro de la cuenca se encontraron 3 tipos de climas de acuerdo a la carta climática de la República Mexicana (INEGI, 2005), estos climas son Cb'(m), C(w2), C(w1) de acuerdo a la clasificación de Koopen Modificado por García (1998). De acuerdo a la superficie que abarcan dentro de la cuenca el clima de mayor importancia es C(w2) con un 72.2 % de la superficie, seguido de C(w1) con un 24.3% y finalmente Cb'(m) que abarca únicamente el 3.5% de la cuenca, como se observa en la imagen 2.

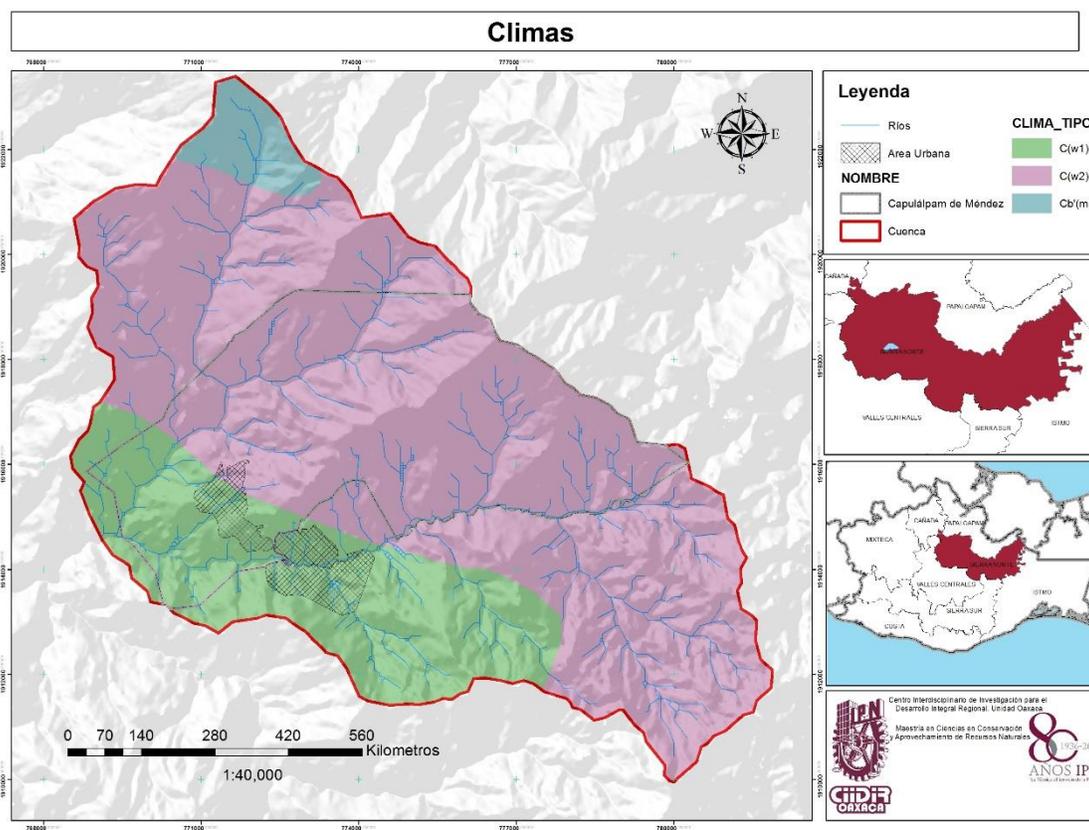


Imagen 2. Tipos de clima presentes en la cuenca

La descripción de cada uno de los tipos de climas identificados en la cuenca se presenta a continuación.

- **Cb'(m):** Semifrío, húmedo con verano fresco largo, temperatura media anual entre 5°C y 12°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C; temperatura del mes más caliente bajo 22°C. Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal entre 5 y 10.2% del total anual.
- **C(w2):** Templado, subhúmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C. Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias

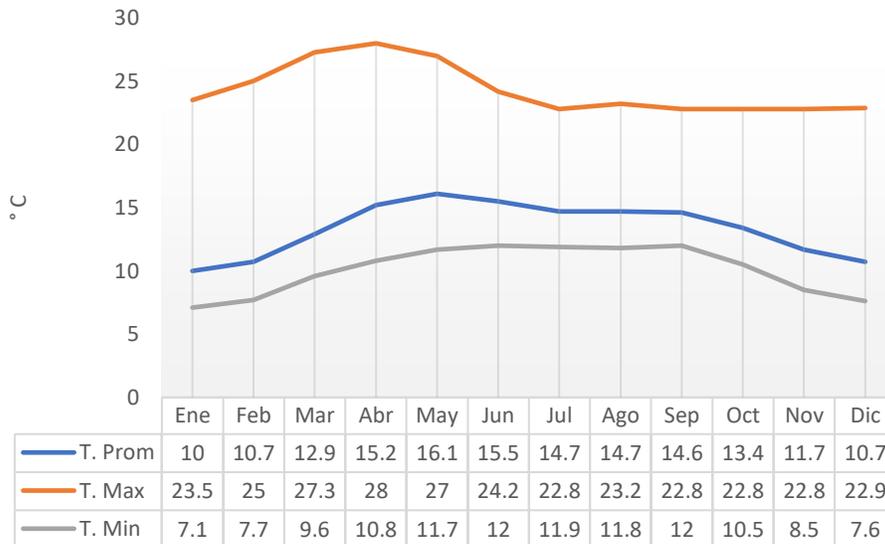
de verano con índice P/T mayor de 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10.2% del total anual.

- **C(W1):** Templado, subhúmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C. Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T entre 43.2 y 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.

1.5.1.1 Temperatura

Para los datos de temperatura se consideraron los de la estación climatológica de Ixtlán de Juárez (20041), que es la más cercana a la cuenca y que presentan los siguientes datos:

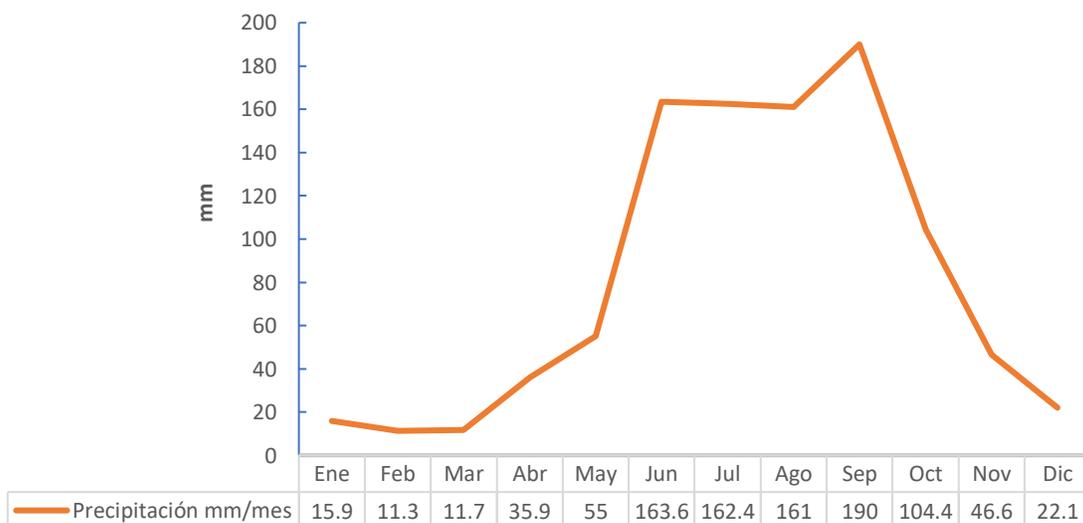
Los datos considerados corresponden a promedio mensuales en un periodo comprendido de 2000-2010, la temperatura mínima que se registra en invierno en el mes de enero y corresponde a 7.1 °C, así mismo la temperatura máxima es en verano en el mes de mayo y corresponde a 28.0 °C, observándose una temperatura promedio anual de 19.07 °C. Los datos de la variación de la temperatura en la zona, se muestran en la gráfica 1



Grafica 1. Temperatura 2000-2010

1.5.1.2 Precipitación

Al igual que la temperatura la precipitación se obtuvo de la estación meteorológica del Ixtlán de Juárez, en la gráfica 2 se muestra la precipitación promedio mensual registrada del 2000 al 2010, como se puede observar el mes de mayor precipitación es septiembre con un promedio de 190 mm, mientras que el mes de febrero presentó la menor precipitación con un promedio de 11.3 mm.



Grafica 2. Precipitación de la zona de estudio

1.5.2 Geología

Las rocas predominantes en la cuenca son principalmente las Metamórficas (pizarra y esquisto), seguido por orden de predominancia la roca sedimentaria (caliza, caliza-lutita, lutita- arenisca) y en menor porcentaje las rocas ígneas intrusivas (tipo monzonita) e ígneas extrusivas (Andesita), su distribución espacial se muestra en la imagen 3.

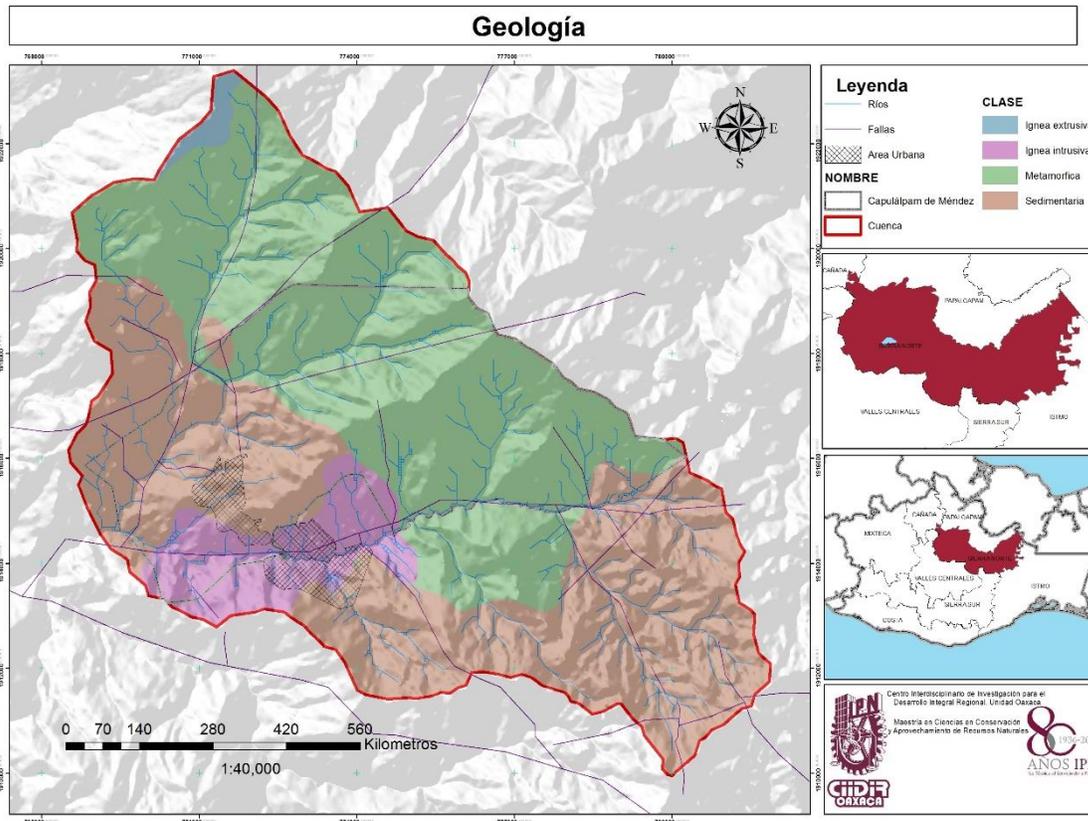


Imagen 3. Clases de roca y fallas en la cuenca.

Las rocas **metamórficas** resultan de la transformación de rocas preexistentes que han sufrido ajustes estructurales y mineralógicos bajo ciertas condiciones físicas o químicas, o una combinación de ambas, como son la *temperatura*, la *presión* y/o la *actividad química de los fluidos*. Estos ajustes, impuestos comúnmente bajo la

superficie, transforman la roca original sin que pierda su estado sólido generando una roca metamórfica. (SGM, 2013)

Otro de las clases de roca existente en la cuenca corresponde a **sedimentaria**, la cual se forman por la precipitación y acumulación de materia mineral de una solución o por la compactación de restos vegetales y/o animales que se consolidan en rocas duras. Los sedimentos son depositados, una capa sobre la otra, en la superficie de la litósfera a temperaturas y presiones relativamente bajas y pueden estar integrados por fragmentos de roca preexistentes de diferentes tamaños, minerales resistentes, restos de organismos y productos de reacciones químicas o de evaporación (SGM, 2013).

Uno de los tipos de roca que existen dentro de la clase de las sedimentarias es la Lutita arenisca; la cual se encuentra constituida por una alternancia de lutitas y areniscas, con algunos horizontes de conglomerados, pertenece al miembro acillos-arenosos. Las areniscas varían de color amarillo a café claro, con rasgos de metamorfismo, en capas medianas y delgadas que alternan con algunos horizontes de areniscas acalcareas de color amarillo en caoas delgadas. En la zona de estudio se expresa por montañas con grandes escarpes. Su formación en el cretácico inferior de la era mesozoica.

Ígnea extrusiva

Las rocas ígneas también nombradas magmáticas, son todas aquellas que se han formado por solidificación de un de material rocoso, caliente y móvil denominado magma; este proceso, llamado cristalización, resulta del enfriamiento de los

minerales y del entrelazamiento de sus partículas. Este tipo de rocas también son formadas por la acumulación y consolidación de lava, palabra que se utiliza para un magma que se enfría en la superficie al ser expulsado por los volcanes.

Cuando la solidificación del magma se produce en el seno de la litósfera, la roca resultante se denomina plutónica o intrusiva; si el enfriamiento se produce, al menos en parte, en la superficie o a escasa profundidad, la roca resultante se denomina volcánica o extrusiva.

Ígnea intrusiva

Son rocas formadas en el interior de la corteza terrestre. Cuando un magma se enfría bajo la superficie lo hace más lentamente, permitiendo un mejor desarrollo de los cristales, que debido a eso alcanzan tamaños que pueden ser observados a simple vista, generalmente abarcan grandes extensiones de terreno y llegan a la superficie terrestre mediante procesos orogénicos (deformaciones tectónicas) o mediante procesos externos de erosión. Dentro de este tipo de rocas, algunos autores reconocen una clase intermedia, la *hipoabisal*, que incluye a las rocas que han cristalizado a una profundidad moderada y se presentan en forma de filones o diques, rellenando grietas; son mucho menos abundantes que las plutónicas y se encuentran casi siempre asociadas a ellas.

Referente al tipo de roca en la zona de estudio se encuentran se encuentra las siguientes, andesita, caliza, caliza – lutita, esquisto, lituta – arenisca, monzonita y pizarra, su distribución se muestra en la imagen 4.

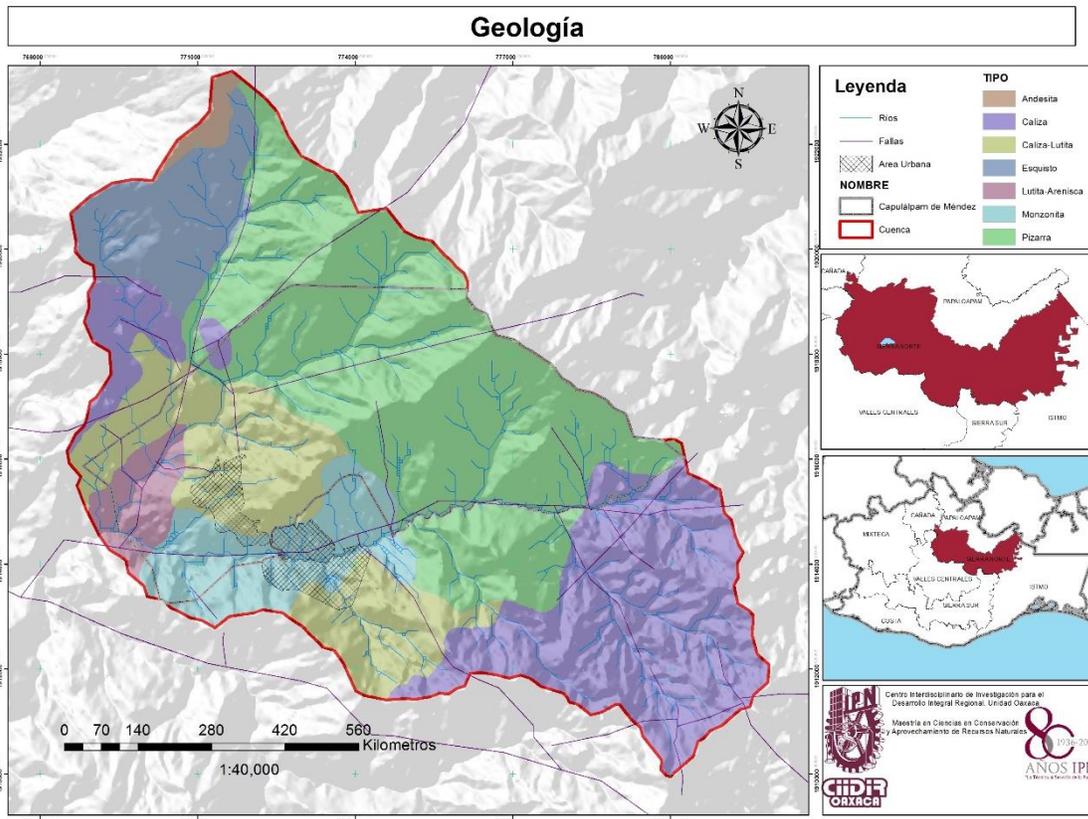


Imagen 4. Tipos de roca presentes en la zona de estudio.

Caliza. La caliza es una roca compuesta por lo menos del 50% de carbonato de calcio (CaCO_3), con porcentajes variables de impurezas, en su interpretación más amplia, el término incluye cualquier material calcáreo que contenga carbonato de calcio como mármol, creta, travertino, coral y marga. Cada uno de los cuales poseen propiedades físicas distintas, sin embargo, generalmente se considera que la caliza es una roca calcárea estratificada compuesta principalmente de mineral calcita, que por calcinación da la cal viva.

Constituyen definitivamente la mayor existencia del elemento [carbono](#) en la superficie terrestre, o cerca de ella.

Andesitas. Andesitas porfídicas de color gris oscuro que intemperizan en colores verde oscuro y café, ocasionalmente con estructura fluida, pseudo estratificación e intemperismo esferoidal. Se encuentra afectando a una gran parte de la secuencia del área en forma de mantos y diques y sobre toda forma de grandes coladas. Está relacionada al Oligoceno Superior-mioceno (INEGI,1983).

Caliza - Lutita. Calizas de textura mudstone, nodulares y arcillosa de colores gris verdoso y oscuros en estratos delgados y mediano con impresiones de gasterópodos intercalados con lutitas calcáreas en capas medianas en colores gris verdosos; se encuentran en algunos pliegues en chevron e intrusiones que han generado zonas de mineralización.

Probablemente esta unidad de depósito en un ambiente nerítico, perteneciendo al miembro calcáreo arcilloso de la formación “Zapotitlán del Barremiano” (INEGI,1983)

Esquisto. Roca metamórfica de bajo a medio grado de metamorfismo, con estructura laminar ondulada e irregular (estructura esquistosa), con granos minerales observables a simple vista. Compuesta por moscovita, biotita, clorita, cuarzo, plagioclasa y minerales típicamente metamórficos, El esquisto está característicamente foliado, lo que quiere decir que los granos de minerales individuales pueden separarse fácilmente en escamas o láminas.

Lutitas-areniscas Ki (lu-ar). Unidad constituida por una alternancia de lutitas y areniscas con algunos horizontes de conglomerados, pertenecientes al miembro arcillo-arenoso de la Formación Zapotitlán del Barremiano. Las areniscas varían de

ortocuarzitas a arkosas son de gran medio, de color amarillo a café claro, con rasgos de metamorfismos incipientes, aflora al noreste de Oaxaca en la Sierra Juárez se expresa por montañas de grandes escarpes.

Monzonita. Rocas ígneas de grano grueso, que varían desde los tipos ácidos que llevan cuarzo hasta los básicos portadores de olivino, Las monzonitas no suelen formar grandes cuerpos homogéneos de roca, sino que normalmente se encuentran como miembros de rocas ígneas complejas o como pequeños doños o pitones individuales asociados a grandes masas graníticas.

Pizarra. La pizarra es una roca metamórfica homogénea formada por la compactación de arcillas a altas temperaturas. Se presenta generalmente en un color opaco azulado oscuro y se divide fácilmente en lajas u hojas planas, Procede de la transformación de ciertas rocas sedimentarias, como las arcillas, que son sometidas a fuertes presiones originadas por movimientos tectónicos (procesos que causan, por ejemplo, la formación de montañas). La pizarra se forma cuando los minerales de la arcilla que integran rocas de grano fino, como la pelita, se transforma en mica o clorita.

La principal característica de la pizarra es su división en finas láminas o capas, característica conocida como foliación o esquistosidad. Los minerales que la forman son principalmente cuarzo y moscovita. Suele ser de color negro azulado o negro grisáceo, pero existen variedades rojas, verdes y otros tonos.

1.5.3 Edafología

Según la clasificación de suelo FAO-UNESCO modificada por la Dirección de Geografía Nacional y representada en la carta México escala 1:250,000 en la zona de estudio se encuentran las siguientes unidades de suelo y su distribución se muestra en la imagen 5

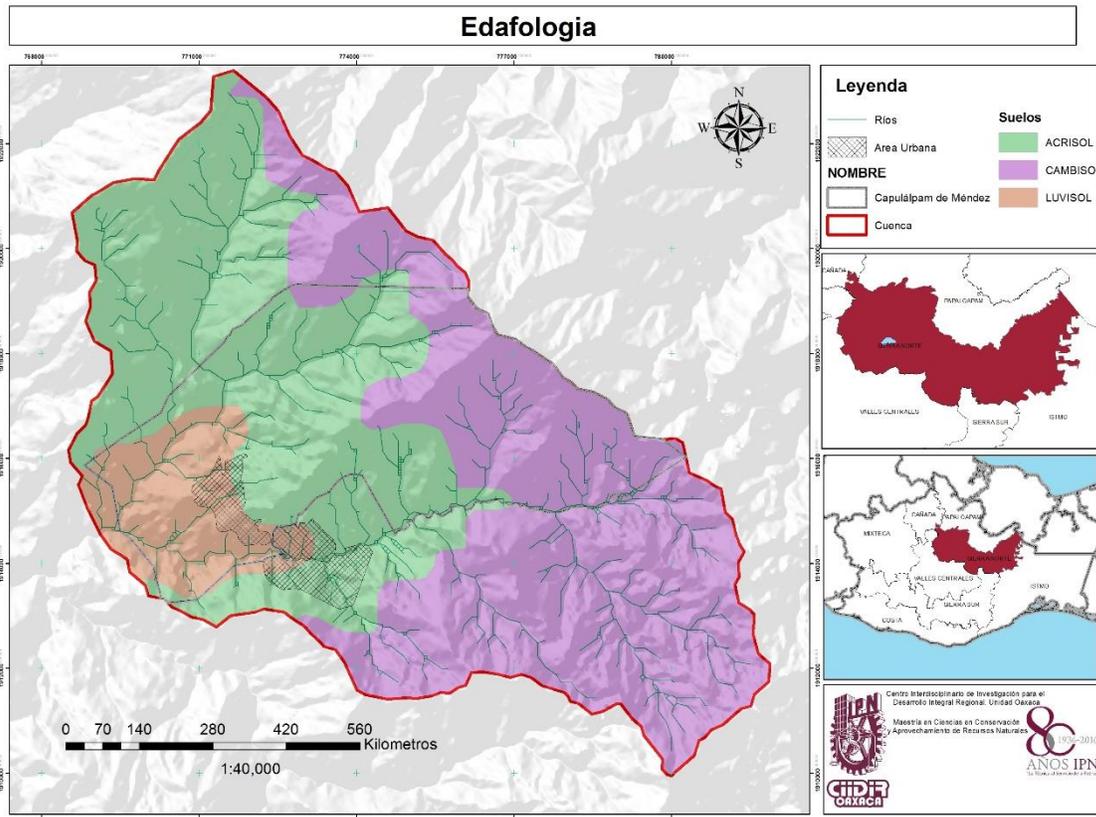


Imagen 5. Tipos de suelo presentes en el área de estudio.

Acrisol

Son suelos que se encuentran en zonas tropicales o templadas muy lluviosas como las sierras orientales de Oaxaca. En condiciones naturales tienen vegetación de selva o bosque. Se caracterizan por tener acumulación de arcillas en el subsuelo, por sus colores rojos, amarillos o amarillos claros con manchas rojas, son muy ácidos y pobres en nutrientes.

Luvisol (Lv)

Suelo de clase textural media, con fase lítica. Este suelo se caracteriza por tener acumulación de arcilla en el subsuelo, son de zonas templadas o lluviosa, su vegetación natural es de selva o bosque, son color rojo o claros, son moderadamente ácidos. Son suelos con susceptibilidad alta a la erosión

El principal tipo de suelo en esta zona es luvisol vertico, caracterizado por tener acumulación de arcilla (smatWood,20004) subsuelo de colores rojizos a claros, moderadamente ácidos de textura fina y fertilidad moderada.

Cambisol (Bh)

Suelo que cambia. Estos suelos son jóvenes, poco desarrollados y se pueden encontrar en cualquier tipo de vegetación o clima excepto en los de zonas áridas. Se caracterizan por presentar en el subsuelo una capa con terrones que presentan vestigios del tipo de roca subyacente y que además puede tener pequeñas acumulaciones de arcilla, carbonato de calcio, fierro o manganeso. También pertenecen a esta unidad algunos suelos muy delgados que están colocados directamente encima de un tepetate. Son muy abundantes, se destinan a muchos usos y sus rendimientos son variables pues dependen del clima donde se encuentre él. Son de moderada a alta susceptibilidad a la erosión.

1.5.4 Hidrología.

Referente a la Hidrología en la zona de estudio, se encuentra en 2 Regiones Hidrográficas que corresponden a Costa Chica-Rio Verde y Papaloapan, como se detalla en la tabla 2 y los principales afluentes se muestran en la imagen 6.

Localización	Descripción
Región Hidrográfica	Rh- 28 Papaloapan
Cuenca	“A” Rio Papaloapan
Área	57537.53
Perímetro	1463.8
Subcuenca	“F” Rio Quitotepec
Área	4944.73
Perímetro	435.71

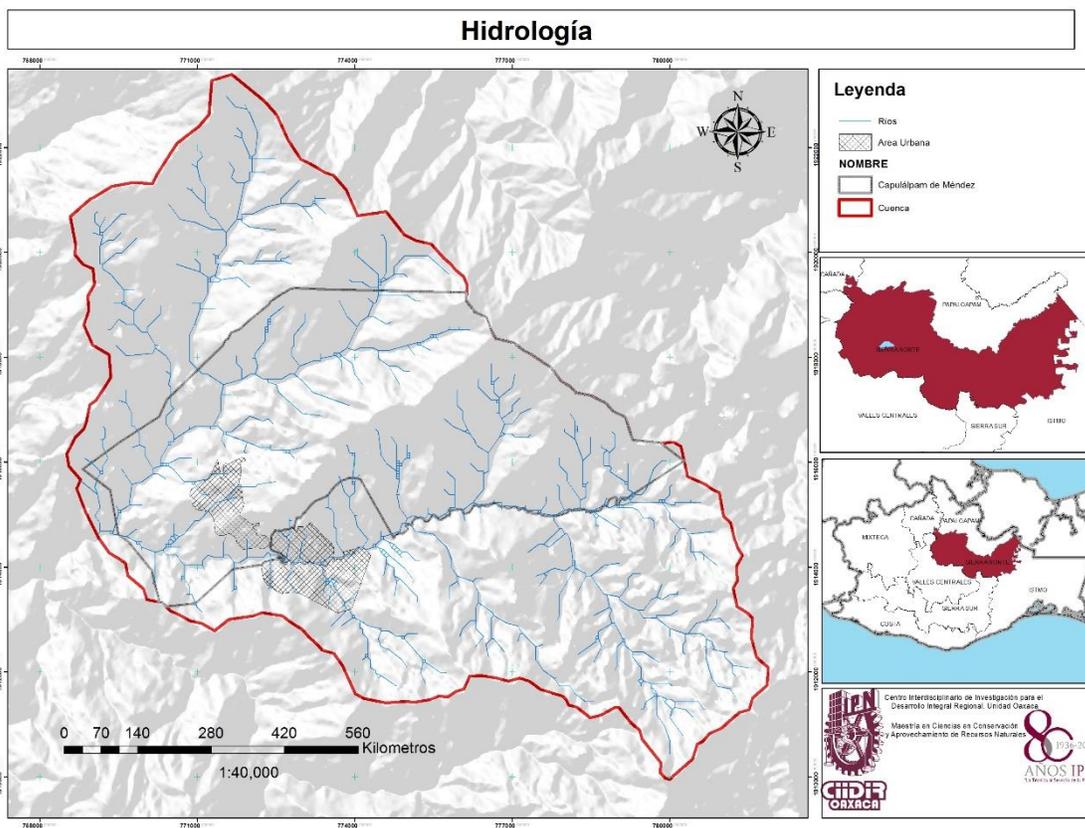


Imagen 6. Hidrología de la zona de estudio

2 Marco teórico.

2.1 Cuenca Hidrográfica.

Una cuenca es el territorio delimitado por la línea divisoria de las aguas, conformado por un sistema hídrico que conduce sus aguas a un río principal, un lago o el mar, este es un ámbito tridimensional que integra las interacciones entre la cobertura del terreno, las profundidades del suelo y el entorno de la línea divisorio de las aguas (Bueso-campos, 2009). De acuerdo a datos de la Comisión Nacional del Agua las cuencas del país se encuentran organizadas en 37 regiones hidrológicas y a su vez se agrupan en las 13 regiones hidrológico-administrativas (RHA), En lo que se refiere a las aguas subterráneas, el país está dividido en 653 acuíferos.

Así, Jiménez (2011) establece que esta unidad geográfica se constituye en el espacio ideal para caracterizar, diagnosticar, planificar y evaluar el uso de los recursos naturales, pues al ser un sistema delimitado naturalmente, en él coexisten e interactúan elementos físico-biológicos y socio-ambientales que determinan el estado actual y tendencias de los recursos. Además, el autor establece que la interacción como tal entre subsistemas va mucho más allá que una simple relación física o biofísica, en donde el abordaje de cualquier tema o aspecto en esta unidad territorial requiere una visión integral/holístico, en donde la base social sea considerada dentro de uno de los puntales importantes, pues las decisiones de manejo en el área son tomadas directamente por los diferentes actores internos y externos.

Según Chow et al. (1994), el concepto de ciclo hidrológico indica de manera general la circulación del agua, que supone los diferentes cambios que sufre el agua en la hidrósfera y que obedece a leyes físicas. Este ciclo es un proceso continuo, no tiene

ni principio ni fin, por lo tanto, su descripción puede empezar en cualquier punto; pero en mucho de los casos se suele asumir su comienzo cuando las moléculas de vapor de agua son transportadas a la atmósfera mediante las corrientes de aire, estas moléculas ascienden hasta cierta altura, en donde por efecto de la temperatura, se condensan y caen hacia la tierra en forma de *precipitación*. El agua precipitada puede ser interceptada por la vegetación, convertirse en *flujo superficial* sobre el suelo, infiltrarse en él, o correr a través del suelo como *flujo subsuperficial* y descargar en los ríos como *escorrentía superficial*.

2.2 Zonas de recarga hídrica

Las zonas de recarga hídrica son aquellas áreas donde el agua proveniente de las precipitaciones y que alcanza la superficie de la cuenca, después de saturar los espacios vacío, poros y/o fisuras de la superficie, y que al llenar de agua las pequeñas depresiones superficiales, da inicio a dos tipos de movimientos: a) uno superficial siguiendo las líneas de máximo gradiente de energía y b) a través de los espacios del suelo y subsuelo de acuerdo con el gradiente piezométrico y con la permeabilidad del medio. Mientras que, se denomina recarga al proceso por el cual se incorpora a un acuífero agua procedente del exterior del mismo, en un intervalo de tiempo dado (Velez s.f).

La recarga hídrica depende del régimen de precipitación, de la escorrentía superficial, y del caudal de los ríos; así mismo, varía de acuerdo a la permeabilidad de los suelos, de su contenido de humedad, de la duración e intensidad de la lluvia y del patrón de drenaje de la cuenca. También la pendiente de la superficie

constituye un factor importante, puesto que las muy inclinadas favorecen la escorrentía superficial y, si son menos fuertes, retienen por más tiempo el agua favoreciendo la infiltración (CONAGUA, 2013).

En el proceso de identificación de las zonas potenciales de recarga hídrica, es imperante tener en consideración el tipo, calidad y cantidad de información. Como regla general, en cuencas pequeñas, las principales limitantes que se presentan cuando se realiza la cuantificación del balance hídrico están relacionadas a la escasez de datos y a la escala de la información, mientras que para las cuencas grandes el factor limitante es el tiempo que se necesita para realizar el trabajo de recolección y análisis de esta información (Faustino, 2012).

Dentro de los factores que afectan la recarga de agua se encuentran el clima de la región, el tipo de suelo, la topografía, la cobertura vegetal, la estratigrafía geológica y la red hídrica.

Según Faustino (2012), de acuerdo con el movimiento del agua en el suelo, subsuelo y manto rocoso, las zonas de recarga hídrica se pueden clasificar en:

Zonas de recarga hídrica superficial: corresponden a prácticamente toda la cuenca hidrográfica, excepto las zonas totalmente impermeables. Después de cada lluvia, la zona de recarga hídrica superficial se humedece y origina escorrentía superficial, dependiendo de las condiciones de drenaje (relieve del suelo y saturación). La medición de ese caudal se realiza en el cauce principal del río y se conoce como descarga superficial o caudal de escorrentía superficial.

Zonas de recarga hídrica subsuperficial: corresponden a las zonas de la cuenca donde los suelos tienen capacidad para retener el agua o almacenarla superficialmente sobre una capa impermeable que hace que el flujo horizontal en el subsuelo se concentre aguas abajo en el sistema de drenaje. Es la ocurrencia de caudales en la red hídrica, aun cuando las lluvias hayan finalizado, que dependen de la cantidad de precipitación y la permeabilidad del suelo. Este caudal se mide igual que en el caso anterior y puede ocurrir después de las lluvias y en épocas secas, cuando el agua proviene de bosques.

Zonas de recarga hídrica subterránea: corresponden a las zonas de la cuenca (sitios planos o cóncavos y rocas permeables) donde el flujo vertical de la infiltración es significativo; esta es la que forma o alimenta los acuíferos. Un aspecto importante en esta zonificación es la conexión entre acuíferos y la recarga externa (que viene de otra cuenca). Para la evaluación se pueden considerar dos métodos: directo (mediante sondeos, bombeos y prospección geofísica) e indirecto (mediante el balance hidrogeológico).

2.3 Balance hídrico

En todo sistema o subsistema del ciclo hidrológico se puede relacionar las cantidades de agua que circulan por el ciclo mediante la ecuación del balance hidrológico (Campos, 1998). Este balance se basa en la aplicación del principio de la conservación de masas o ecuación de la continuidad, la cual establece que para cualquier volumen arbitrario y durante cualquier periodo de tiempo, la diferencia entre las entradas y salidas estarán condicionadas por la variación del volumen de agua almacenada (Jiménez 2003 citado en Salas 2011).

La ecuación de continuidad, o de balance hidrológico, es la ley más importante en Hidrología, y aunque su expresión es muy simple, la cuantificación de sus términos es normalmente complicada, principalmente por la falta de medidas directas y por la variación espacial de la evapotranspiración, de las pérdidas profundas (a acuíferos) y de las variaciones del agua almacenada en una cuenca. de manera general de acuerdo con Bueso-Campos (2009). La ecuación general para la determinación del balance hídrico superficial directo, es la siguiente:

$$\textit{Almacenamiento} = \textit{entradas} - \textit{salidas}$$

En dónde, la principal entrada de agua en una cuenca hidrográfica es la precipitación, y las salidas están dadas por la escorrentía y el drenaje natural de los afluentes de la cuenca, junto con la evapotranspiración potencial y real del área en cuestión.

Los elementos del balance hídrico que deben ser tomados en cuenta han sido descrito por diversos autores (Ledezma, 2011; Duarte, 1998; Muñoz y Ritter, 2005), por lo que se mencionan de manera general los conceptos de cada uno de ellos:

- **Precipitación:** Se denomina precipitación, al agua procedente de la atmósfera y que en forma líquida o sólida se deposita sobre la superficie terrestre. El proceso de formación de la precipitación requiere que las gotas de agua o de cristal de hielo sean lo suficientemente grandes y que cuenten con el peso necesario para sobrevivir las corrientes ascendentes en la nube, es importante indicar que las precipitaciones son diferentes de acuerdo al tipo de nube (Ledezma 2011).

- **Evapotranspiración:** En general la evapotranspiración es la pérdida del agua contenida en el suelo producto de la evaporación más la pérdida del agua contenida en la vegetación por medio de la transpiración, también constituye un factor de gran importancia para conocer la cantidad de agua infiltrada en el subsuelo (Duarte, 1998).
- **Infiltración:** La infiltración es el proceso mediante el cual el agua penetra desde la superficie del terreno hacia el suelo. Muchos factores influyen en la tasa de infiltración, incluyendo la condición de la superficie del suelo y su cubierta vegetal, las propiedades del suelo, tales como la porosidad y la conductividad hidráulica, y el contenido de humedad presente en el suelo (Chow, 1994).
- **Escorrentía:** Es la parte de la precipitación que se escapa de la infiltración y de la evapotranspiración y que, consecuentemente, circula por la superficie y se concentra en la red de drenaje. La escorrentía sucede cuando la intensidad de lluvias excede la tasa de infiltración, es decir cuando el suelo está saturado y depende de la intensidad de las lluvias, tipo de suelo y su estado superficial, de la cobertura del suelo y de la pendiente (Scherrer y Naef 2003 citado en Salas 2011)

2.4 Métodos Electromagnéticos.

Los métodos electromagnéticos constituyen el grupo de mayor diversidad tanto en metodologías como en instrumental, resultando ser herramientas eficaces a la hora de abordar una gran variedad de problemas: estudio de aguas subterráneas,

cartografía de la intrusión marina, detección de vertidos de contaminantes, localización de cavidades, etc. (Chelotti *et al*, 2010)

Los métodos geofísicos eléctricos y electromagnéticos han sido ampliamente utilizados como herramientas de reconocimiento en las investigaciones de aguas subterráneas debido a las buenas correlaciones entre la resistividad eléctrica del terreno y su geología y contenido de fluidos, En áreas de roca dura, como en el sótano en el sitio de Al-Taif, el agua subterránea se encuentra en las fracturas de la matriz de roca. El rendimiento de las aguas subterráneas depende del tamaño de las fracturas y de su interconectividad. Típicamente, cuanto mayor es la densidad y conectividad de la fractura, mayor es la conductividad eléctrica. De este modo, la combinación de métodos de resistividad de VLF y de corriente continua (DC), ambos sensibles a la conductividad eléctrica, puede ser particularmente productivo (Benson *et al.*, 1997; Bernard and Valla, 1991).

Los métodos EM pueden ser de campo natural o artificial, pueden estudiar con detalle los primeros metros o alcanzar varios kilómetros de profundidad con menor resolución, pueden proporcionar información 1D, 2D o 3D del medio, son, por lo tanto, muy diversos y capaces de definir objetivos muy diferentes. (*Idem*)

Cuando el sondeo eléctrico vertical no es factible de usarse debido a factores de espacio y terreno quebrado, se recomienda el uso de tres métodos de geofísica pasiva en donde la señal proviene de área del blanco (el acuífero) y no es necesario de inyectar energía desde la superficie. Los tres métodos son: Magnética, Potencial espontáneo y VLF (muy baja frecuencia E.M., con un transmisor lejano); los tres son rápidos, portátiles, requieren de poco personal, y su afectación por topografía,

aunque variable, es menor que la de métodos eléctricos tradicionales (Randall, 2000).

El método VLF es una herramienta rápida de reconocimiento que se adapta mejor a la identificación de zonas conductoras con límites escarpados (Telford et al., 1977, Tabbagh et al., 1991; Sharma and Kaikkonen, 1998; Oskooi and Pedersen, 2005). El método es, por lo tanto, adecuado para ubicar zonas de fractura de inmersión y otras estructuras en la roca base (ABEM, 1990, Adepelumi et al., 2006; Santos et al., 2006). Incluyendo el contraste de resistividad en los límites de zonas fracturadas con un alto grado de conectividad (Parasnis, 1973). Las anomalías VLF interpretables surgen también sobre conductores más débiles, tales como contactos cortados, zonas de fractura y fallas (Sundararajan, 2006). Las zonas de origen de las anomalías del VLF también se han interpretado como vetas minerales, zonas de cizalladura y límites estratigráficos (Khalil et al., 2009)

La prospección electromagnética mide la conductividad eléctrica aparente del subsuelo y se fundamenta en el hecho de que un campo electromagnético, producido por una antena o bobina por la que pasa una corriente alterna, se propaga a través del subsuelo, induciendo otras corrientes alternas en cualquier conductor que se halle en su recorrido. Cuando esto ocurre, una fuerza electromotriz o un voltaje se genera dentro del conductor, según la Ley Faraday:

$$EMF_c = M_{TC} \frac{\partial I_t}{\partial t}$$

De donde:

EMF_c = Fuerza electromotriz o voltaje en el conductor.

M_{TC} = Inductancia mutua entre el transmisor y el cuerpo conductor.

di/dt = Derivada de la corriente(I_T) en el transmisor con respecto al tiempo.

El método VLF Es un método electromagnético, que responde a las variaciones de la resistividad en el subsuelo hasta una profundidad de algunas decenas de metros basando su principio en el hecho de que las propiedades eléctricas del subsuelo afectan el comportamiento de las ondas de radio de baja frecuencia. Este tipo de ondas, son generadas por poderosas antenas transmisoras VLF, de 200 a 300 metros de altura, ubicadas en algunos puntos alrededor del planeta como se muestra en la figura 1.

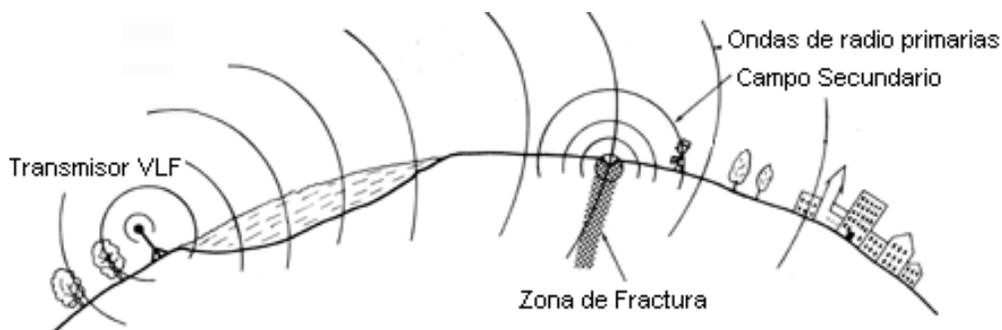


Figura 1. Esquema de adquisición y funcionamiento del método VLF.

Fuente: TRX Consulting

El principio esencial es utilizar los campos electromagnéticos (EM) de dichas estaciones de radio mundiales diseñadas para las comunicaciones militares y la navegación que operan en frecuencias entre 15 y 30 KHz. Lejos de la fuente, la onda electromagnética transmitida posee una componente de campo eléctrico vertical y un componente de campo magnético horizontal (HPy). McNeill and Labson (1991). Este último es paralelo al suelo y perpendicular a la dirección de propagación como se muestra en la figura 2.

Estos campos asociados con la onda transmitida se denominan campos primarios. El campo magnético horizontal primario penetra en el suelo e induce corrientes en zonas conductoras enterradas, que a su vez forman campos eléctricos y magnéticos secundarios. El campo magnético secundario en terreno heterogéneo está desfasado con el campo magnético primario y tendrá una componente vertical distinta de cero.

El campo magnético neto está polarizado elípticamente. Se pueden medir los componentes reales e imaginarios del campo magnético secundario. Los valores típicamente reportados representan el ángulo de inmersión, o relación de la componente real del campo magnético vertical al campo primario horizontal. La penetración de la señal y la profundidad del flujo de la corriente se expresan en términos de la profundidad eléctrica de la penetración.

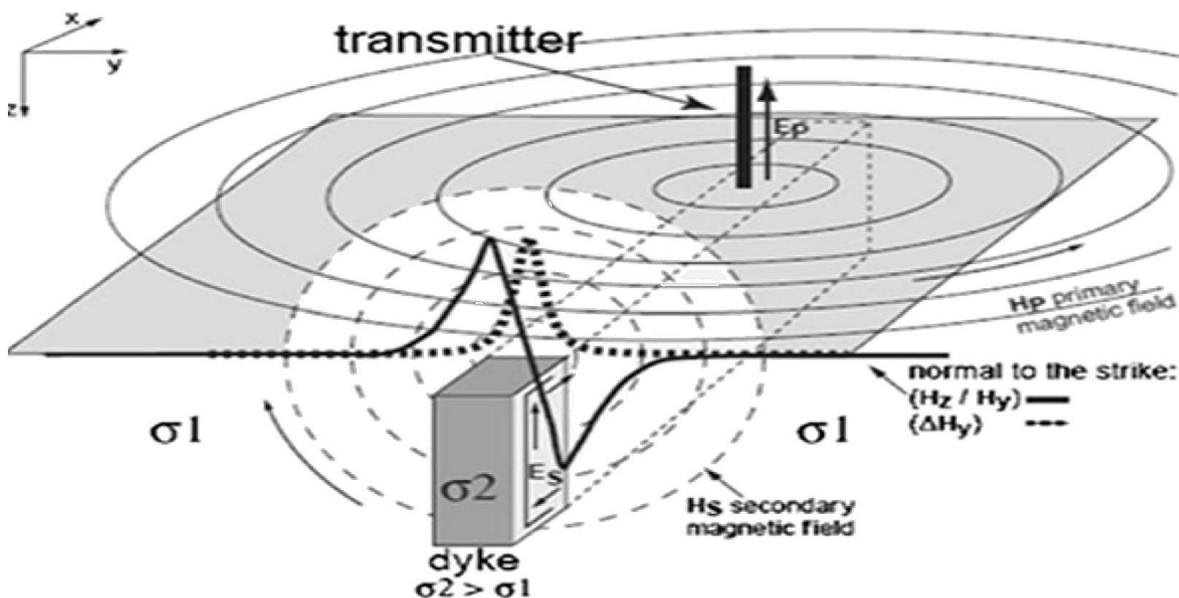


Figura 2. Distribución de campo EM para el método VLF en polarización E con señales teóricas sobre un dique conductor vertical.

El método es muy rápido, siendo por inducción, es posible de tomar lecturas al ritmo de 15-20/ hora; así es un excelente sistema de reconocimiento geofísico en dónde se cubren varios kilómetros de perfil por día con considerable sensibilidad; la penetración varía según la resistividad del corte litológico; con resistividades menores de 30-40 ohm metros, solamente se explora unos 10-15 metros, mientras con una resistividad de más de mil ohm/m. se está explorando profundidades mayores de 50 m; Se ha comprobado penetraciones hasta 200 mts. En mármoles con una resistividad de 10,000 ohm/m. Por lo tanto, el método funciona mejor en roca dura sin mucha cobertura de sedimento.

Las antenas emisoras de VLF se encuentra distribuidas en diferentes partes del mundo, principalmente en Norteamérica y Estados Unidos, como se muestra en la imagen 8.

There are VLF transmitters located around the world, on all 7 continents. The most pertinent ones are included on this map.

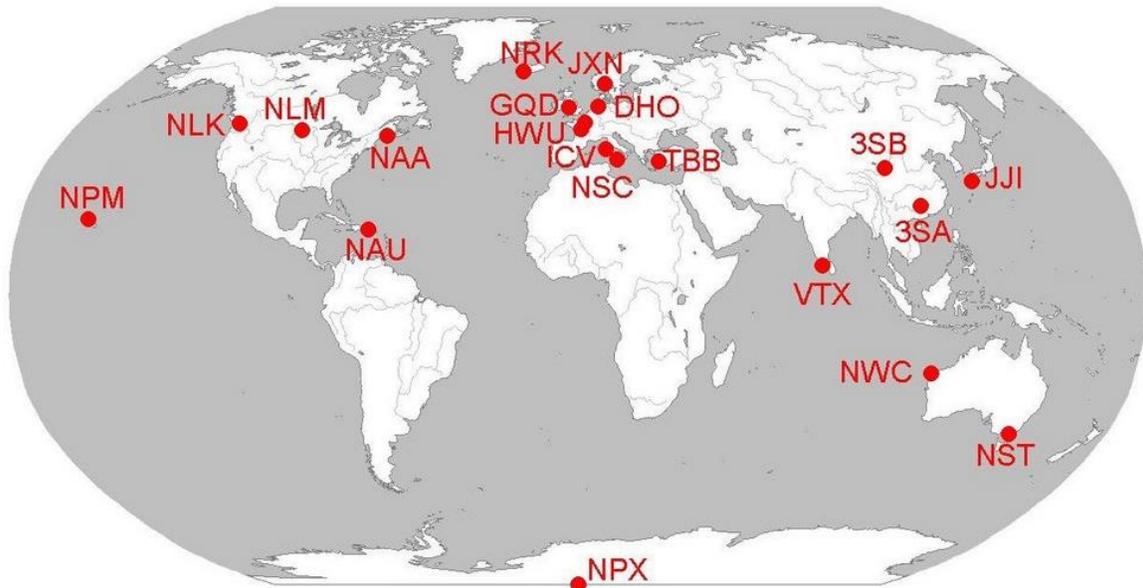


Imagen 7. Ubicación y distribución de antenas emisoras de VLF

Los datos del ángulo de inmersión VLF se presentan comúnmente en forma cruda y filtrada. El filtro de Fraser (Fraser, 1969) está diseñado para superar el problema de que una lámina conductora delgada produce un par de anomalías alto-bajo. Cuando la geología subsuperficial es complicada y los cuerpos conductores producen anomalías superpuestas, resulta difícil localizar la posición de los cuerpos individuales mediante simple inspección visual de las anomalías de cruce. Los filtros Fraser son simples filtros numéricos diseñados para convertir un par alto-bajo en un único pico centrado en la fuente.

El otro filtro común, el filtro de Karous-Hjelt (Karous y Hjelt, 1977, 1983) se deriva de la relación entre la componente vertical del campo magnético que surge y una distribución de corriente sub-superficial 2-D. Karous y Hjelt utilizaron la teoría del filtro lineal para resolver la ecuación integral para la distribución de la corriente, que se supone que está situada en una delgada hoja horizontal de densidad de corriente variable, situada en todas partes a una profundidad igual a la distancia entre las estaciones de medición. Al seleccionar los puntos de datos a distancia progresivamente mayor, se puede inferir el comportamiento de la distribución de corriente hipotética a profundidades correspondientemente mayores.

2.5 Imágenes Satelitales

Las imágenes satelitales son uno de los productos que resultan del empleo de sensores remotos ubicados en algunos satélites que orbitan alrededor de nuestro planeta y toman imágenes de la superficie terrestre. Estas imágenes proveen información adecuada para analizar aspectos relativos a la superficie terrestre, por

ejemplo, son muy útiles para estudiar la contaminación de los mares, las inundaciones y la expansión de la trama urbana, entre otros (Chuvienco, 2012)

La teleobservación (o sistema de adquisición de datos a distancia) permite individualizar elementos de la superficie terrestre. Para ello se utilizan sensores remotos que captan la energía electromagnética emitida y reflejada por los distintos componentes de la superficie de la Tierra (cursos de agua, infraestructura, etc.) y la retransmiten en forma digital a las estaciones receptoras.

El satélite LandSat 8 es un instrumento puesto en órbita por la NASA (National Space and Space Administration) y la producción y comercialización de imágenes depende de la USGS (United States Geological Survey). Este satélite está en capacidad de tomar imágenes de un punto de la superficie terrestre cada 16 días (resolución temporal) compuestas por 8 bandas con resolución espacial a 30 metros y una banda Pancromática con resolución de 15 metros, las cuales pueden ser combinadas de distintas formas para obtener variadas composiciones de color u opciones de procesamiento. (USGS. 2013)

El análisis de la vegetación y la detección de los cambios de sus patrones, son claves para la evaluación de recursos naturales y su monitoreo. Es por ello que la detección y la evaluación cuantitativa de la vegetación verde constituyen una de las mejores aplicaciones de la percepción remota para el manejo de los recursos ambientales y la toma de decisiones (Eastman 2003).

En la obtención del NDVI se han desarrollado diversas técnicas para estudiar las maneras cualitativas y cuantitativas del estado de la vegetación a partir de medidas espectrales obtenidas por satélites (Rouse et al., 1974).

Basándose en la diferencia de reflectancias que la vegetación verde muestra en la banda visible (20%) y en el infrarrojo cercano (60%) se ha llegado al Índice de Vegetación por Diferencia Normalizada (NVDI). El intervalo de valores obtenidos del NVDI, varía entre (-1) y (1). De ellos sólo los valores positivos corresponden a zonas de vegetación (Eastman 2003).

Los índices de vegetación son medidas cuantitativas, basadas en los valores digitales, que tienden a medir la biomasa o vigor vegetal. Usualmente el índice de vegetación es producto de varios valores espectrales que son sumados, divididos, o multiplicados en una forma diseñada para producir un simple valor que indique la cantidad o vigor de vegetación dentro de un píxel. Altos valores de índices de vegetación identifican píxeles cubiertos por proporciones substanciales de vegetación saludable (Campbell, 2006).

Existe una variedad de índices de vegetación que han sido desarrollados para ayudar en el monitoreo de la vegetación. La mayoría de estos índices están basados en las interacciones diferentes entre la vegetación y la energía electromagnética de las bandas del espectro rojo e infrarrojo.

La información sobre el contenido de humedad en el suelo varía desde la superficie hasta altas profundidades, pero la mayor parte de esta se encuentra en la primera capa del suelo, la cual representa la interacción entre el suelo y la atmosfera y es la

reguladora de los procesos de intercambio de la energía y la asignación del agua precipitada, la infiltrada, de escorrentía, de evaporación y de transpiración. Mediante el análisis de imágenes satelitales del satélite LandSat 8 es posible determinar el contenido de humedad en el suelo y hacer una clasificación respecto de esta característica.

Para evaluar la humedad del suelo a partir de información satelital, distintos autores (Moran, 1994; Wang, 2001; Fensholt, 2003) han considerado indicadores que relacionan la temperatura superficial (LST, Land Surface Temperature) y el índice de vegetación de diferencia normalizado (NDVI) (García, 2012).

La combinación de LST y NDVI provee información sobre la condición de la vegetación y el contenido de humedad edáfica superficial. La información conjunta de la banda termal y las bandas visible e infrarroja cercana permite monitorear satisfactoriamente las condiciones de estrés hídrico de la vegetación. El NDVI por sí solo es un indicador conservativo de estrés hídrico debido a que la vegetación permanece verde aún después de comenzado un período de sequía (García, 2012) y por otra parte la LST es un factor que da cuenta de la parte física, química y los procesos biológicos del suelo (Becker, 1990) e incrementa rápidamente su valor con la presencia de estrés hídrico (Sandholt, 2002). La LST integra tanto la temperatura de la superficie del suelo y de la vegetación, y estos componentes pueden no estar linealmente relacionados.

2.6 Análisis multicriterio

El análisis multicriterio (AMC) se define como un conjunto de técnicas orientadas a asistir en procesos de decisión (Sumathi, Natesan, & Sarkar, 2008). Se basa en la

ponderación y combinación de variables en un sistema de información geográfica, bajo un esquema de integración cartográfica que permite generar un índice de aptitud del suelo (Eastman, 2012) para un uso o actividad determinada. Permite orientar el emplazamiento geográfico de distintas actividades humanas (Romano et al., 2015), y se ha utilizado con éxito en la identificación de sitios de recarga hídrica, o que son importantes por sus funciones ambientales (Pedrero et al., 2011; Rahman 2012; Rahman et al., 2013).

El concepto genérico de análisis multicriterio como conjunto de operaciones espaciales para lograr un objetivo teniendo en consideración simultáneamente todas las variables que intervienen (Barredo, 1996), bien sean factores o restricciones (Bosque y Mass, 1995) sirve de soporte para diversidad de objetivos, frecuentemente relacionados con la toma de decisiones espaciales y en ocasiones derivados hacia la evaluación multiobjetivo cuando entran en juego fuerzas de competencia entre diferentes usos.

3 Metodología

3.1 Balance hídrico.

La identificación de las estaciones meteorológicas se realizó con tomando como base la ubicación geográfica proporcionada por la Red de Estaciones Meteorológicas de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y la ubicación de la cuenca con la que se trabaja, derivado de esta ubicación se identificaron las siguientes estaciones meteorológicas:

- San Pedro Nolasco (clave 20124)

- Rancho Tejas (clave 20181)
- Ixtlán de Juárez (clave 20041)
- Ixtepeji (clave 20040)
- Guelatao (clave 20280)

Una vez identificadas las estaciones meteorológicas que se encuentran tanto dentro de la cuenca como en sus cercanías se procedió a obtener los registros históricos de cada estación con ayuda del programa de cómputo Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC III versión 2). Se extrajeron datos diarios y mensuales de precipitación, temperatura y evapotranspiración.

Los datos obtenidos varían temporalmente desde 1956 a 2010, por lo que se buscó la serie de tiempo más larga en varias estaciones que permita hacer calculo estadísticos para el llenado de datos en las estaciones faltantes, la serie de tiempo más larga fue de 1964 a 1984 con datos en las estaciones de Ixtlán, Ixtepeji, Nolasco y Rancho Tejas, estos datos permitieron completar la serie de la estación de Guelatao.

De manera esquemática el proceso que se siguió para obtener la información climatológica del área de estudio se representa en la figura 3.

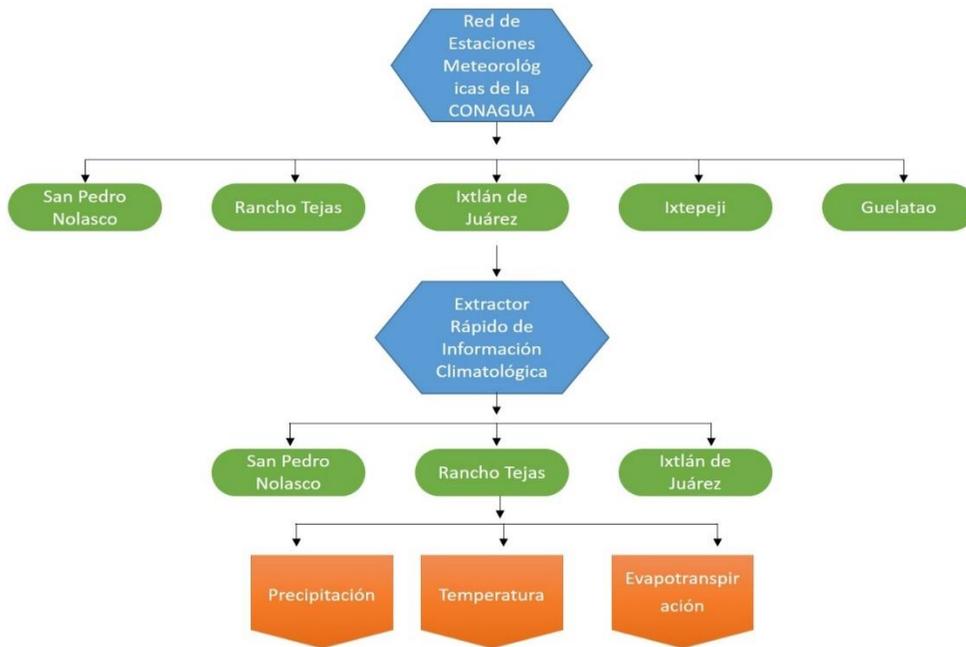


Figura 3. Proceso de obtención de información climatológica.

Con los datos de las estaciones se identificaron los años secos y húmedos mediante la media móvil y se generó un balance puntual para cada estación en año seco y húmedo, esto con el fin de conocer las variaciones en el comportamiento de la distribución de la precipitación en diferentes zonas de la cuenca.

Para el cálculo de la **Evapotranspiración** se utilizó el sistema desarrollado por Thornthwaite obtenía, a partir de datos de precipitación y temperatura, un balance del grado de humedad disponible de un lugar determinado; mediante la resta de la precipitación total anual menos la evapotranspiración potencial anual, es decir, la oferta menos la demanda de humedad de un área en particular, expresada en milímetros de agua (Monterroso et. Al., 2008) considerando la ecuación 1.

Ecuación 1. **Evapotranspiración**

$$ETP = Ev * Fc$$

Donde:

ETP = Evapotranspiración

Ev= evaporación

Fc= Factor de corrección (depende de la latitud)

Los cálculos de la **temperatura** se obtuvieron mediante los datos de temperatura máxima y mínima mensuales observados en la estación meteorológica del sitio, a dichos datos se hicieron cálculos estadísticos.

Para el cálculo de los valores de **escorrentía** se utilizó el Método de coeficientes de escorrentía, esta metodología se lleva a cabo mediante la asignación de un coeficiente de escurrimiento (c) correspondiente a los diferentes usos de suelo que se identifican en el mapa de uso de suelo (IMTA, 2008).

Se considera que el coeficiente de escurrimiento (c) es la relación que existe entre el volumen escurrido y el volumen llovido, como lo señala la ecuación 2.

Ecuación 2. Coeficiente de escurrimiento

$$c = \frac{\text{volumen escurrido}}{\text{volumen llovido}}$$

De esta ecuación 2 se despejo el volumen escurrido que correspondería a la escorrentía quedando de la manera en que se muestra en la ecuación 3:

Ecuación 3. Volumen escurrido

$$\text{Volumen escurrido} = c * \text{volumen llovido}$$

El IMTA 2008, determinó los coeficientes de escurrimiento para los diferentes usos de suelo en las regiones hidrológicas de México, de los cuales se seleccionaron los valores aplicables para los usos de suelo identificados nuestra zona de estudio.

Finalmente, para el cálculo de la **infiltración** que indica de la calidad de tierras en la recarga de acuíferos. Un área con mayor valor de infiltración en un periodo dado tiene más probabilidad de favorecer en la recarga del acuífero. Para ello se calculó este parámetro aplicando la fórmula de balance hídrico, considerando la ecuación 4:

Ecuación 4. Infiltración

$$inf = Pt - int + EVT + esc$$

Donde

Inf = Infiltración

PT = Precipitación total

Int = Intercepción de agua de lluvia

EVT = evapotranspiración

ESC = Escurrimiento

3.2 Complementación de la red Hídrica

Para hacer este proceso se consideró como base los datos proporcionados por INEGI mediante la Red Hidrográfica Nacional escala 1:50,000, la cual muestra los escurrimientos en la zona, el manejo de esta información se realizó en el sistema de información geográfica ArcGis 10.2 en el cual se sobrepusieron los datos vectoriales corrientes a cuerpos de aguas superficiales y curvas de nivel de la cuenca con la que se trabaja, las curvas de nivel fueron generadas a cada 15 metros a partir de un modelo de elevación digital (MDE) y se realizó la interpretación visual de los escurrimientos que no se encontraban registrados dentro de la Red Hidrológica de INEGI.

3.3 Interpretación visual de una imagen satelital de alta resolución

La interpretación de la imagen satelital de alta resolución tiene como objetivo ayudar a la identificación de las principales coberturas vegetales que existen en la zona,

para lo cual se utilizó una imagen de GeoEye del año 2014, dicha imagen fue cargada en el software ArcGis 10.2, al igual que el límite de la cuenca y se realizó la interpretación de la imagen a una escala 1:8,000.

Antes de iniciar el procedimiento de digitalización se definió el área mínima cartografiable, para la cuenca, la cual es estimó considerando una escala de trabajo 1:100,000 y un área mínima de 4 x 4 mm, quedando definida en un área de 160,000 m², de acuerdo a Salitchev (1979 citado Priego, et al., 2010), en el que indica que todas aquellas superficies que sean menores a este valor no serán representativas, por la escala que se maneja.

3.4 Índices de vegetación y humedad

Uno de los objetivos de la investigación que se está realizando es conocer las zonas de mayor filtración de agua, por lo que es necesario ubicar las zonas donde se presenta mayor infiltración, esto procedimiento se realizó con imágenes satelitales de la cuenca, en este caso se usó la imagen LandSat 8 del 22 de marzo de 2014.

Una vez que se obtuvo la imagen se realizaron las correcciones geométrica y atmosférica, para realizar estas correcciones se utilizó el programa Envi 5.1 que contiene módulos integrados específicamente para procesar imágenes Landsat 8, de acuerdo a la figura 4.

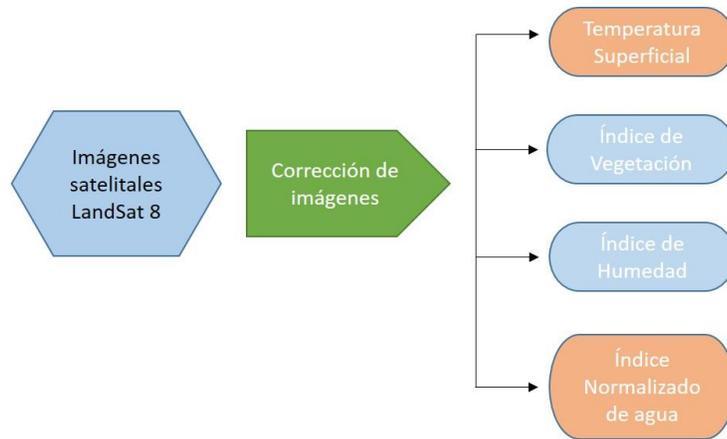


Figura 4. Proceso para la obtención de diferentes índices

Teniendo las imágenes corregidas se procedió a realizar el índice de vegetación de diferencia normalizado (NDVI por sus siglas en inglés) utilizando las bandas 4 y 5 de LandSat correspondiente al espectro infrarrojo cercano y rojo respectivamente (Walker, 2016). El índice se calculó utilizando los programas Envi 5.1, Idrisi Selva y ArcGis 10.2.

El cálculo se realizó tomando como base la ecuación 5:

Ecuación 5. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

Donde:

NIR: Infrarrojo cercano (banda 5 en LandSat 8)

RED: Rojo (Banda 4 en LandSat 8)

Posteriormente se procedió a calcular la temperatura de la superficie terrestre para lo cual se usó como base la metodología propuesta por Sobrino *et al* (2004), modificada para LandSat 8 con ayuda de las bandas 10 y 11 correspondientes al infrarrojo térmico del satélite LandSat 8, el procedimiento se realizó en ArcGis 10.2.

- 1. CALCULO DE LA RADIANZA.** Se realizó el cálculo la radiancia de las dos bandas térmicas del LANDSAT 8 (bandas 10 y 11), usando los datos de calibración del sensor, a través de la *raster calculator* en ArcGis 10.2 con la ecuación 6, así como en la tabla 1 se muestran las radiancia de la bandas TIRS:

Ecuación 6. Radiancia

$$L_{\lambda} = \text{RADIANCE}_{\text{MULT}_{\text{BAND}}} * \text{Banda térmica} + \text{RADIANCE_ADD_BAND}$$

Donde:

Tabla 1. Radiancia de las bandas TIRS

RADIANCIA DE LAS BANDAS TIRS	
RADIANCE_MULT_BAND_10	3.3420E-04
RADIANCE_MULT_BAND_11	3.3420E-04
RADIANCE_ADD_BAND_10	0.10000
RADIANCE_ADD_BAND_11	0.10000

Fuente: LandSat 8

- 2. CALCULO DE TEMPERATURA DE BRILLO.** Las bandas obtenidas por el sensor TIRS pueden ser convertidas en radiancia espectral a temperatura de brillo en grados kelvin (k) usando para ello la constante térmica suministrada en el archivo de metadatos, Debido a que el cálculo nos da como resultado temperaturas en grados Kelvin, es necesario al final de la formula restarle el valor 273.15 que es el factor de conversión para grados Celsius. La fórmula utilizada fue la que se muestra en la ecuación 6, así mismo la tabla 2 muestra las constantes de temperatura.

Ecuación 7. Temperatura de brillo

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} - 273.15$$

Donde:

T = Temperatura de brillo aparente

L λ = Corresponde a la reflectancia en el techo de la atmosfera TOA

K1 = Es la constante de conversión K1 específica para cada banda, dicha constante térmica se suministra en el metadato.

K2 = Es la constante de conversión K2 específica para cada banda, dicha constante térmica se suministra en el metadato.

Tabla 2. Constantes de Temperatura

CONSTANTES DE TEMPERATURA	
K1_CONSTANT_BAND_10	774.89
K1_CONSTANT_BAND_11	480.89
K2_CONSTANT_BAND_10	1321.08
K2_CONSTANT_BAND_11	1201.14

Fuente: LandSat 8

Una vez que se obtuvieron los datos del INDVI y las temperaturas superficiales de la cuenca, se procedió a obtener el índice de humedad, por lo que se realizó el cálculo de emisividad de la vegetación y generar un nuevo mapa de temperaturas sin estos valores, lo que finalmente permitió obtener el índice de humedad para la zona de estudio.

- **CALCULO DE LA EMISIVIDAD DE LA SUPERFICIE DE LA TIERRA (LSE) A PARTIR DEL NDVI:** se inició por calcular la **PROPORCIÓN DE LA VEGETACIÓN** (grado de cobertura de vegetación), para esto se utilizó como base el NDVI calculado con anterioridad y la ecuación 8:

Ecuación 8. Proporción de la vegetación

$$PV = \left(\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}}\right)^2$$

Donde:

PV= Proporción de la vegetación
NDVI= índice de vegetación de diferencia normalizado
NDVI_{min}= valor mínimo del índice de vegetación de diferencia normalizado
NDVI_{max}= valor máximo del índice de vegetación de diferencia normalizado

- **CALCULO DE LA EMISIVIDAD DE LA SUPERFICIE DE LA TIERRA:** Una vez obtenido el valor de la proporción de la vegetación (Pv), se procedió a calcular el LSE, utilizando la siguiente ecuación 9.

Ecuación 9. Emisividad de la superficie de la tierra

$$LSE = m * PV + n$$

Donde:

m = emisividad de la vegetación (0.004) y,

PV= Proporción de la vegetación (calculado anteriormente)

n = emisividad del suelo (0.986).

Para la aplicación de esta metodología, se requirieron valores de emisividad del suelo y de la vegetación. Para este caso se consideró un valor de emisividad típica de 0.004 para la vegetación de la cuenca y un valor de 0.986 para la emisividad del suelo.

- **CALCULO DEL ÍNDICE DE HUMEDAD.** Una vez que se obtuvieron los valores anteriores, se realizó el cálculo del índice de humedad de la cuenca, con la ecuación 10, propuesta por Holzman, et al 2012:

Ecuación 10. Índice de humedad

$$IH = \frac{Ts - Ts_{min}}{Ts_{max} - Ts_{min}}$$

Donde:

TS= temperatura superficial obtenida anteriormente

TS_{max}= valor más alto de temperatura obtenido (35.26 °C)

TS_{min}= valor más bajo de temperatura obtenido (16.70 °C)

3.5 Métodos electromagnéticos

Se realizaron 3 recorridos utilizando el equipo de VLF ABEM WADI propiedad del CIIDIR, para la selección de los sitios sobre los que se realizaron los recorridos, se utilizó el inventario de manantiales del Comisariado de Bienes Comunales de Capulálpam de Méndez, con esta ubicación de los manantiales, se buscó que los recorridos atravesaran de forma paralela dicha ubicación, con la finalidad de localizar posibles fallas en estas zonas como se muestra en la imagen 8.

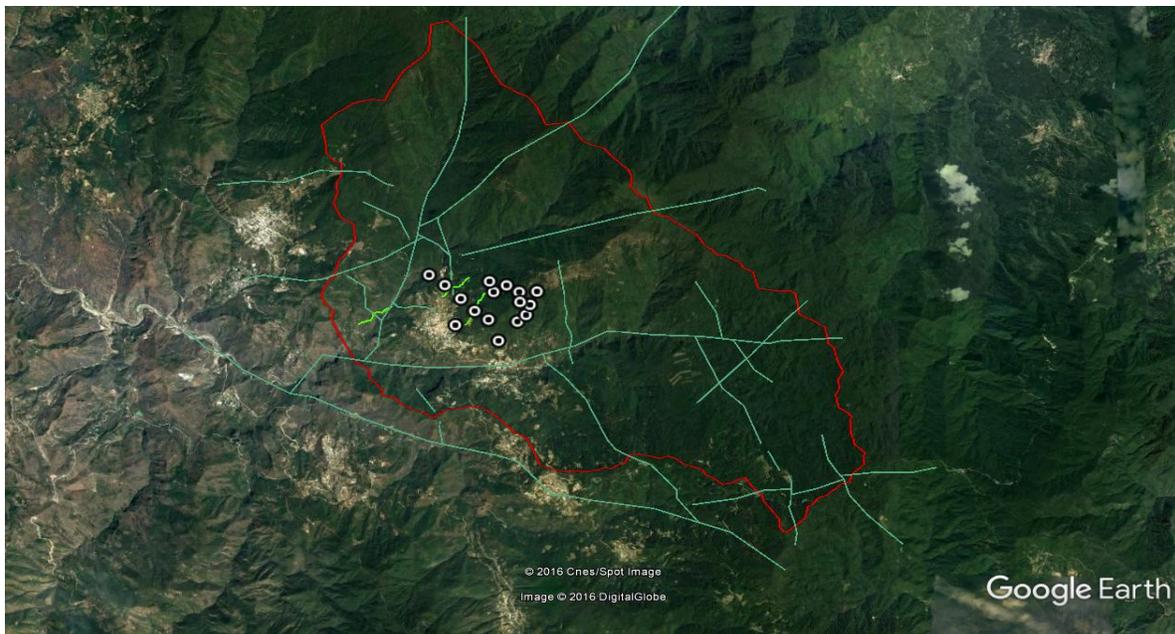


Imagen 8. Identificación de fallas geológicas, manantiales y recorridos VLF.

Para los recorridos que se realizaron se consideró cierta condición que fue: localizarse fuera de la zona urbana del municipio, para evitar intercepción en el equipo por parte de estructuras metálicas y líneas de conducción eléctrica, las frecuencias y las estaciones utilizadas por el equipo VLF, en los recorridos son los que se muestran en la tabla 9.

Tabla 3. Frecuencias y las estaciones utilizadas por el equipo VLF

Ubicación	Clave	Frecuencia	Poder (kW)
Annapolis, USA	NSS	21.4	400
Laulualei, Hawaii, USA	NPM	23.4	600
Cutler, Maine, USA	NAA	24.0	1000
Seattle, USA	NLK	24.8	125
Aguada, Puerto Rico	NAU	28.5	100

Como se mencionó anteriormente en los 3 transectos, se realizaron mediciones a cada 10 m, elegidas sobre las áreas propuestas, las longitudes de cada perfil varían entre 900 y 1200 metros, el primer recorrido realizado en la parte alta del municipio fue denominado “la Y”, el cual tuvo una longitud de 970 metros y se realizaron 96 mediciones, el segundo recorrido fue en la parte baja, la longitud en este caso fue de 1124 metros y se realizaron 112 mediciones, el último recorrido fue igualmente en la parte alta del municipio, la longitud total del recorrido fue de 1056 metros y se tomaron 97 mediciones, como se detalla en la imagen 9.

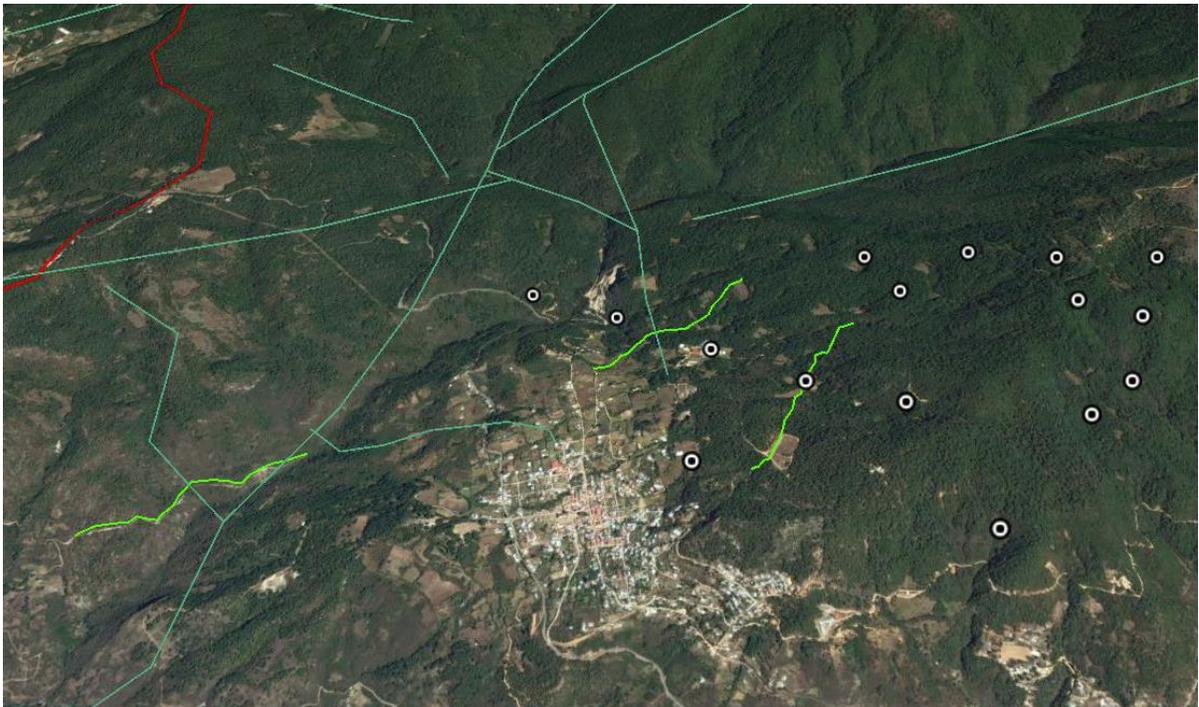
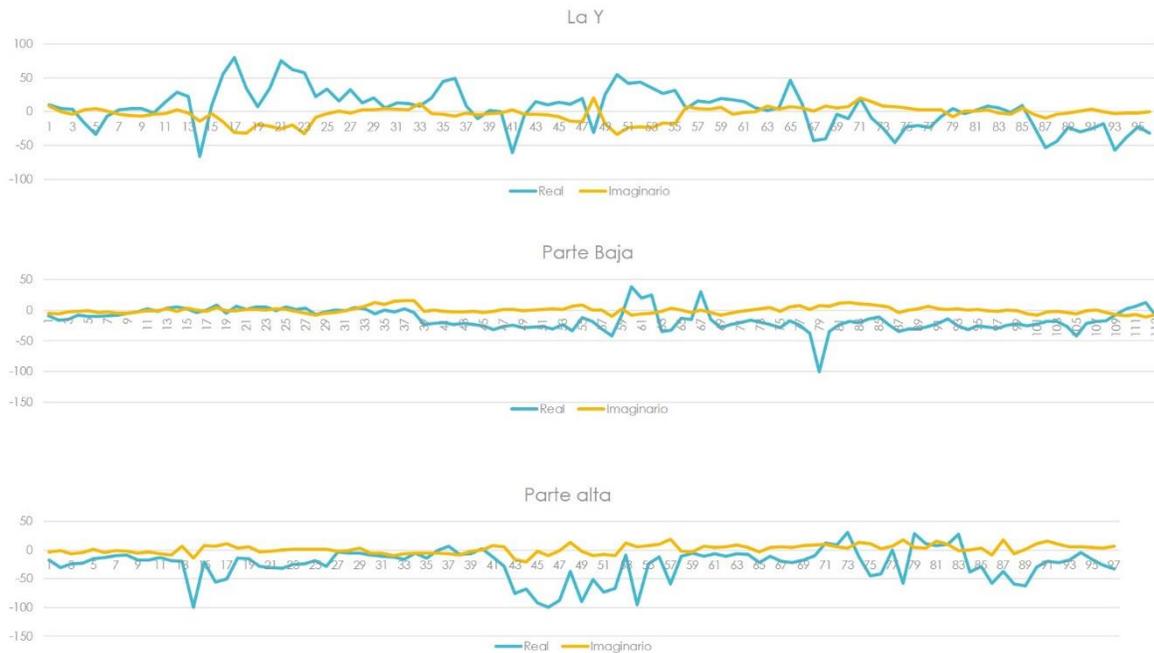


Imagen 9. Ubicación específica de los recorridos con equipo VLF.

Una vez que se tuvieron los datos de los tres recorridos se graficaron tanto la parte real como la imaginaria, para observar las diferencias en el comportamiento de ambos componentes, como se muestra en el grafico 3.



Grafica 3. Respuesta del componente real e imaginario

Debido a que el componente real es el que presenta las mayores variaciones en la amplitud de la respuesta, fue este el que se utilizó para realizar el modelado, para lo cual se utilizó el software KHFFILT de la universidad de Oulu en Finlandia para realizar el filtrado de Karous-Hjelt y Fraser en los datos de campo. Valores más bajos de densidad de corriente relativa corresponden a valores más altos de resistividad y baja conductividad, mientras que valores más altos de densidad de corriente relativa corresponden a valores más bajos de resistividad y alta conductividad (Monteiro Santos, 2006).

3.6 Análisis de elementos que inciden en la recarga hídrica.

Para la generación del modelo de AMC, se identificaron seis factores espaciales: pendiente, tipo de suelo, tipo de roca, índice de humedad, índice de vegetación y densidad de fallas; utilizados con éxito por otros autores para la ubicación de áreas de infiltración (Hsin-Fu et al., 2009; Matus et al., 2009; Pedrero et al., 2011), Estos factores fueron cartografiados a partir de información digital pre-existente, o bien mediante fotointerpretación, procesamiento espectral, y edición de bases de datos cartográficos; en plataforma de sistemas de información geográfica.

Cada una de las capas anteriores se subdividió en rangos de aptitud, con base en la idoneidad que presentan al proceso de recarga hídrica. Para esto se consideraron los criterios de Matus et al (2009); Gómez & Soriano (2013); Hsin-Fu et al (2009); quienes también han desarrollado Evaluaciones Multicriterio para identificar zonas con potencial de recarga y que se describen a continuación:

3.6.1 Pendiente:

En el relieve se pueden identificar superficies planas, cóncavas y convexas. En las superficies convexas, el agua se mueve dispersándose en distintas direcciones, en las superficies planas inclinadas la trayectoria del agua sigue direcciones casi paralelas y en las cóncavas se desplaza concentrándose en el lugar más bajo. Por lo tanto, se puede inferir que, en relieves con elevaciones altas, escarpados y de rápido escurrimiento superficial, el proceso de infiltración y recarga disminuye y se aceleran los procesos de erosión y compactación de los suelos; esto indica que el relieve afecta de forma negativa. Por el contrario, en lugares con relieves planos, semiplanos y cóncavos se favorece el proceso de infiltración y recarga hídrica al permitir un mayor tiempo de contacto del agua con el suelo.

Al igual que el relieve, la pendiente es un criterio muy importante para el análisis e identificación de las zonas con potencial para la recarga hídrica, ya que está directamente relacionada con la escorrentía superficial. En los sitios con pendientes altas o fuertes aumenta la velocidad de la escorrentía, lo que modifica las condiciones del suelo, la capacidad de recarga y la susceptibilidad a la erosión; por el contrario, en pendientes suaves, el agua se mueve lentamente y permanece por más tiempo en contacto con el suelo lo que favorece el proceso de infiltración.

Para determinar el grado de pendiente del terreno presente en la microcuenca se utilizó como base el Continuo Mexicano de Elevaciones 3.0 (CEM) elaborado por INEGI en 2012, el cual tiene una resolución de 15 metros, lo cual permitió tener mayor detalle para la diferenciación de pendientes, en la tabla 3, se describen las ponderaciones correspondientes al tipo de relieve con posibilidad de recarga hídrica.

Tabla 4. Ponderación de la posibilidad de recarga hídrica según tipo de pendiente

Relieve	Pendiente (%)	Posibilidad de recarga	Ponderación
Plano o casi plano	0 – 6	Muy alta	5
Moderadamente ondulado	6 – 15	Alta	4
Ondulado o cóncavo	15 – 45	Moderada	3
Escarpado	45 – 65	Baja	2
Fuertemente escarpado	> 65	Muy baja	1

3.6.2 Tipo de suelo:

El análisis y evaluación del tipo de suelo es importante porque refleja su textura, porosidad, permeabilidad y compactación. Así, entre mayor sea la porosidad, el tamaño de las partículas y el fisuramiento del suelo, mayor será la capacidad de infiltración. Las zonas de recarga hídrica deben ser muy permeables para asegurar una alta capacidad de infiltración; es decir que, en suelos con textura gruesa, porosos y por lo tanto, permeables se dan buenos niveles de recarga hídrica. Por el contrario, los suelos de textura fina, arcillosos, pesados y compactados impiden o dificultan la recarga hídrica.

Para la identificación de los tipos de suelo dentro de la cuenca se recurrió al conjunto de datos vectoriales edafológicos serie II, del continuo nacional, en esta se identificaron los tipos de suelos presente en la zona, posteriormente se obtuvieron sus índices de infiltración de literatura. Con lo que se pudo realizar la ponderación con respecto a la capacidad de recarga hídrica.

En la cuenca solo se encontraron 3 tipos de suelo, por lo que la clasificación de los suelos se realizó en 3 ponderaciones, Muy baja, Moderada y baja de acuerdo a sus características, como se muestra en la tabla 4.

Tabla 5. Ponderación de acuerdo a tipo de suelo

Textura	Posibilidad de recarga	Ponderación
Suelos franco limosos, con partículas de tamaño medio a finas, con moderada a moderadamente rápida capacidad de infiltración (2 – 12,7 cm/h). dentro de este grupo se ubican los suelos tipo cambisol	Moderada	3

Suelos franco arcillosos, combinación de limo y arcilla, con partículas finas, suelos pesados, con muestras de compactación, con lenta a moderadamente lenta capacidad de infiltración (0,13 – 2 cm/h). acrisol está dentro de esta clasificación.	Baja	2
Suelos arcillosos, muy pesados, con partículas muy finas, compactados, con muy lenta capacidad de infiltración (menos de 0,13 cm/h). el Luvisol se encuentra en este grupo de suelos.	Muy baja	1

3.6.3 Tipo de roca:

El análisis y evaluación del tipo de roca permite determinar si la recarga es subsuperficial (recarga hídrica) o profunda de aguas subterráneas (acuífero). Se puede tener una zona con buenas características climáticas, de pendiente, tipo de suelo, cobertura vegetal y buen uso del suelo que favorezcan la recarga del acuífero, pero si existe una capa de material rocoso o arcilla impermeable que no permite el paso del agua hacia las capas profundas del suelo, no habrá recarga de las aguas subterráneas sino que se formará un flujo de agua subsuperficial, con movimiento horizontal, que saldrá a la superficie a través de un manantial o alimentará a un río (INAB 2003).

Al igual que con el tipo de suelo, las características de las rocas determinan su capacidad de recarga, las cuales son: la porosidad y la permeabilidad. Las rocas duras con poros finos no favorecen la recarga; por el contrario, las rocas suaves o permeables, con macroporos, fallas o fracturas sí favorecen la recarga de los

acuíferos, la tabla 5 muestra la ponderación y clasificación de las rocas de acuerdo a su posibilidad de recarga.

Tabla 6. Ponderación y clasificación de las rocas de acuerdo a su posibilidad de recarga

Rocas	Posibilidad de recarga	Ponderación
Rocas muy permeables, muy suaves, constituidas por cristales o agregados gruesos, con macroporos interconectados; por ejemplo, caliza, lutita arenisca, andesita.	Muy alta	5
Rocas permeables, suaves, constituidas por cristales o agregados medianos, con poros interconectados; por ejemplo, arena fina o arenisca con poca cementación. Caliza - lutita	Alta	4
Rocas moderadamente permeables, semisuaves, con regular conexión entre poros.	Moderada	3
Rocas poco permeables, un poco duras, moderadamente compactadas, constituidas por partículas finas, con presencia de fracturas interconectadas; por ejemplo, la combinación esquisto.	Baja	2
Rocas impermeables, duras, cementadas, compactadas, constituidas por partículas muy finas, sin presencia de fracturas. Pizarra	Muy baja	1

3.6.4 Índice de vegetación.

Se entiende como cobertura vegetal al porcentaje del suelo ocupado por comunidades vegetales permanentes. La cobertura del suelo es otro elemento considerado en la metodología porque es un factor que influye en la infiltración del agua, ya que permite un mayor contacto con el suelo, disminuye la velocidad de la

escorrentía, la erosión, el impacto de la gota de lluvia y la sequedad causada por los rayos del sol. Todo esto contribuye a conservar las características del suelo que favorecen la recarga hídrica. La cobertura vegetal puede facilitar la infiltración del agua aún en suelos duros y arcillosos.

La presencia de varios estratos de cobertura vegetal favorece la recarga hídrica y ayuda a conservar las características del suelo que también favorecen la recarga. Al hablar de estratos se consideran básicamente tres: los árboles, los arbustos y las hierbas. Todos ellos garantizan una mejor cubierta vegetal, mayor cantidad de materia orgánica, mayor retención del agua y mayor infiltración.

La evaluación de la cobertura vegetal se realizó mediante el índice de vegetación generado a partir de imágenes satelitales, este índice identificó las zonas de mayor acumulación de vegetación, sus valores van de 0 a 1, por lo que se realizó una reclasificación como se muestra en la tabla 6.

Tabla 7. Reclasificación del índice de vegetación

Cobertura vegetal (porcentaje)	Posibilidad de recarga	Ponderación
>80	Muy alta	5
70 – 80	Alta	4
50 – 70	Moderada	3
30 – 50	Baja	2
<30	Muy baja	1

3.6.5 Índice de humedad

La humedad superficial del suelo es una variable que juega un papel importante en las zonas agrícolas, determina la distribución de la radiación solar incidente en flujo de calor sensible o de calor latente, la distribución de la precipitación en escorrentía superficial o infiltración (Álvarez-Mozos, 2005).

El índice de humedad fue desarrollado para establecer el estado de la humedad (sequedad) del sistema suelo planta. El índice toma valores entre 0 y 1, donde 0 indica máxima humedad y 1 alude a máxima sequedad. El índice no permite distinguir entre diferentes coberturas vegetales (cultivos, pasturas, monte, etc.) sino que representa el estado de déficit hídrico de la cobertura vegetal existente. Donde la cobertura vegetal es escasa o nula (suelo desnudo, siembras incipientes), el índice representa el estado hídrico de la parte superficial del suelo (aproximadamente 5-10 cm de profundidad).

El índice de humedad al igual que el de vegetación se generó a partir de una imagen Landsat, la ponderación y clasificación se muestran en la tabla 7.

Tabla 8. Ponderación para el índice de humedad

Valor del índice de humedad	Posibilidad de recarga	Ponderación
0.81- 1.0	Muy alta	5
0.61 – 0.80	Alta	4
0.41 – 0.60	Moderada	3
0.21 – 0.40	Baja	2
0.0 - 0.20	Muy baja	1

3.7 Determinación del potencial de recarga de las zonas evaluadas

Para determinar el potencial de recarga hídrica se emplea la ecuación 12. En ella se sustituye cada uno de los elementos del modelo por los valores respectivos obtenidos en la evaluación:

Ecuación 11. Potencia de recarga hídrica

$$ZR = [0.17(Pend) + 0.23(Ts) + 0.12(Tr) + 0.25(IV) + 0.13(IH) + 0.1 (Ff)]$$

Donde:

Pend: Pendiente

TS: Tipo de suelo

TR: Tipo de roca

IV: índice de vegetación

IH: índice de humedad

FF: Fallas y fracturas

Para determinar la posibilidad de recarga hídrica de una zona dada, una vez evaluadas las características de la zona considerando los elementos de la metodología y las tablas diseñadas para tal efecto, se multiplica cada resultado obtenido por su factor correspondiente y se suman los elementos. Esa sumatoria corresponde a un número dentro de un rango de posibilidades de recarga hídrica, la cual se detalla en la tabla 10. La asignación de pesos relativos a cada elemento se hace en función de la importancia de ese elemento en el proceso de infiltración del agua; o sea que los criterios que más favorecen la infiltración del agua en el suelo son los de mayor importancia. Los indicadores en la ecuación anterior corresponden a los pesos relativos elaborados para la subcuenca.

Tabla 9. Rango de posibilidades de recarga hídrica

Posibilidad de recarga	Rango
Muy alta	4.1 – 5

Alta	3.5 – 4.09
Moderada	2.6 – 3.49
Baja	2 – 2.59
Muy baja	1 – 1.99

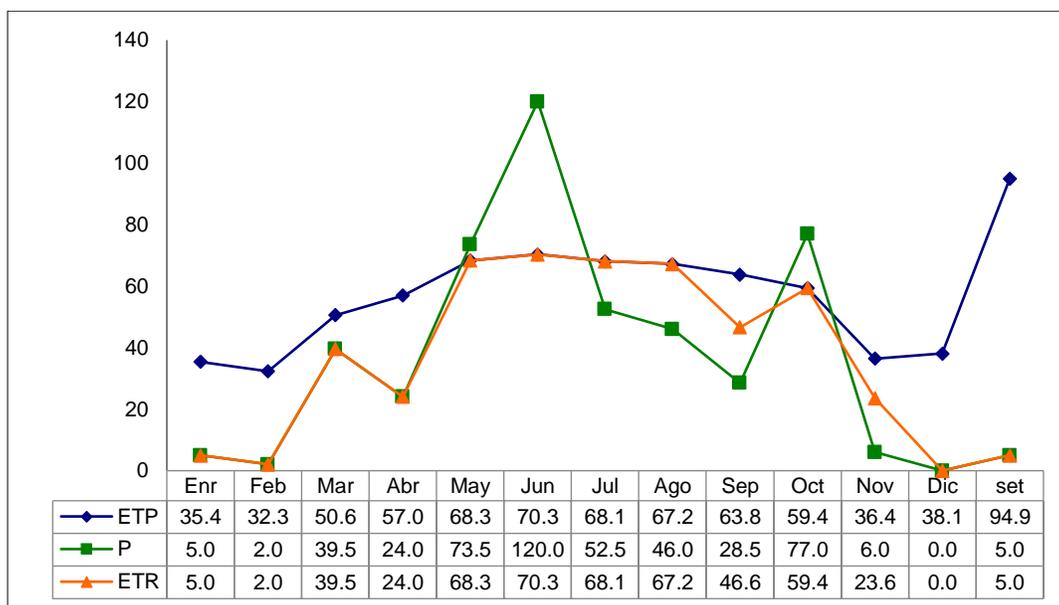
La generación de una sumatoria lineal ponderada con los pesos asignados a cada factor evidenció las zonas que tienen mayor potencial natural de recarga al acuífero

4 Resultados

4.1 Balance hídrico

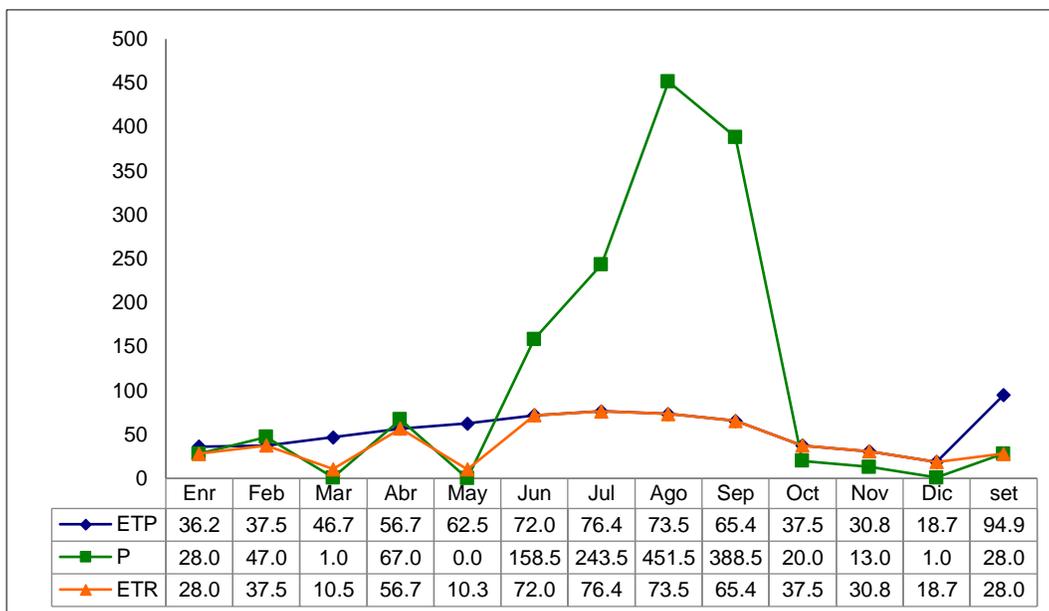
Se realizaron balances hídricos puntuales para las estaciones meteorológicas de Ixtlán e Ixtepeji, que cuentan con series de valores hasta 2010, para cada estación se calculó un año seco y un año húmedo, para la estación de Ixtepeji el año seco fue en 2010 y el año húmedo 2007, por su parte para Ixtlán el año seco fue 2007 y el año húmedo fue también 2010.

La grafica de valores con la distribución de la precipitación (P), evapotranspiración real (ETR) y la evapotranspiración potencial (ETP) para el año seco de la estación de Ixtepeji es la siguiente. La precipitación anual en este año fue de 474 mm. Los meses con mayor déficit hídrico son de diciembre a febrero, mientras que los meses en los que se presenta mayor almacenamiento son julio, agosto y septiembre.



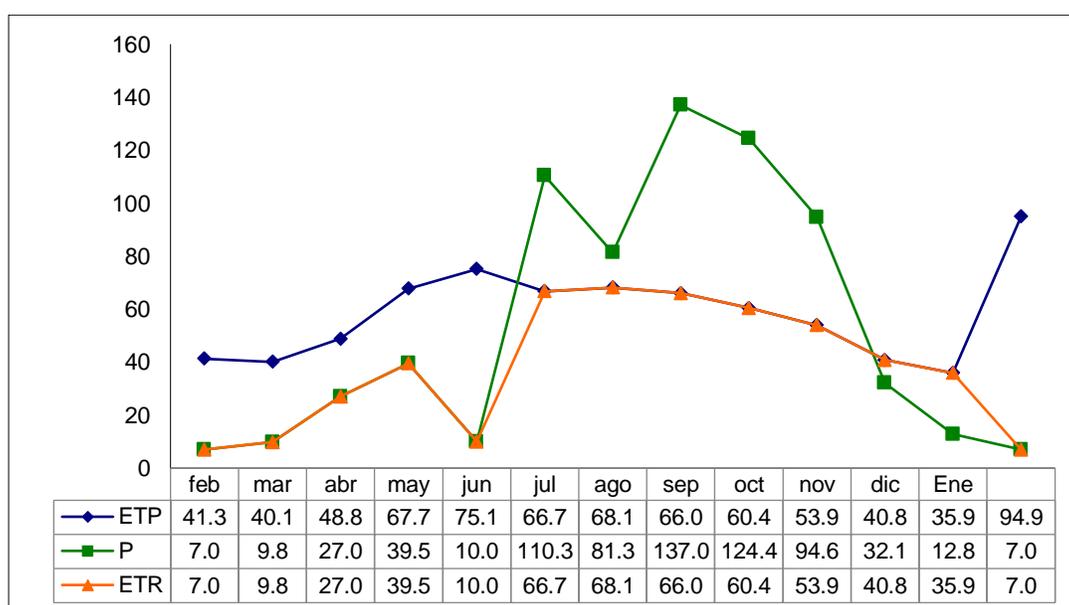
Grafica 4. Distribución de P, ETP y ETR para la estación meteorológica de Ixtepeji año seco.

Para el año húmedo la precipitación anual fue de 1419 mm, en la gráfica 3 se observa el incremento de la precipitación a partir del mes de junio y hasta octubre, los valores de ETP y ETR se mantuvieron sin grandes variaciones a lo largo del año. La mayor diferencia con respecto al año húmedo se presenta en los meses de junio a octubre donde existen mayores excedentes de agua.



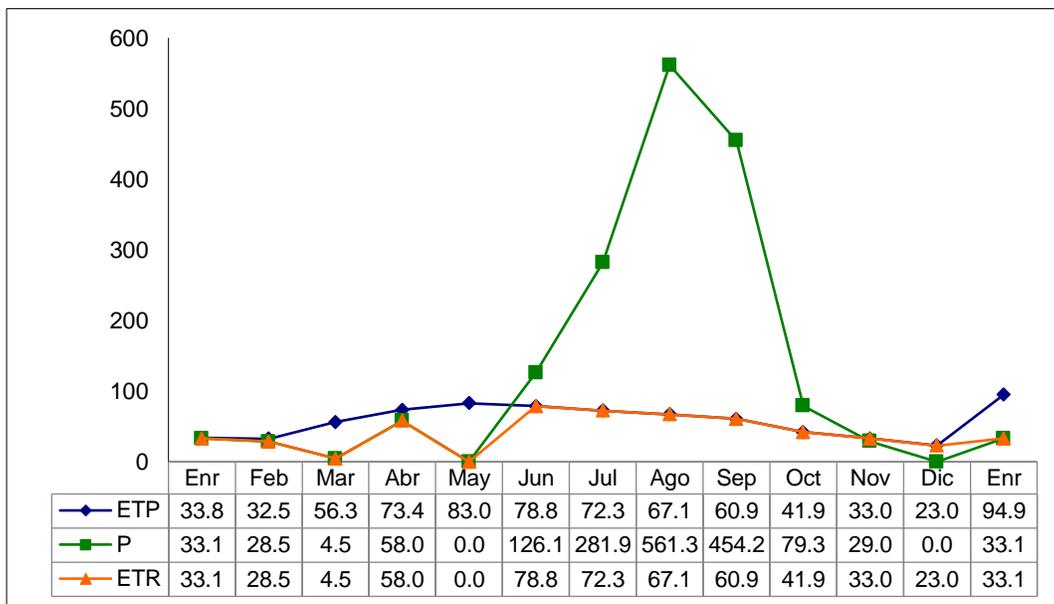
Grafica 5. Distribución de P, ETP y ETR para la estación meteorológica de Ixtepeji año húmedo.

Para la estación de Ixtlán se generó la gráfica de valores con la distribución de la precipitación (P), evapotranspiración real (ETR) y la evapotranspiración potencial (ETP) para el año seco (2007). La precipitación anual en este año fue de 685.8 mm. El mes con mayor precipitación fue septiembre y octubre. En este caso los meses con mayor déficit de agua son de febrero a junio.



Grafica 6. Distribución de P, ETP y ETR para la estación meteorológica de Ixtlán año seco.

Para el año húmedo (2010) en la estación meteorológica de Ixtlán la precipitación anual total fue de 1,655.9 mm, los meses con mayor precipitación fueron de junio a septiembre, siendo agosto el mes de mayor precipitación en toda la serie, para este año húmedo el déficit de agua no se consideró notorio y se visible en los meses de diciembre y enero, como se muestra en la gráfica 7.



Grafica 7. Distribución de P, ETP y ETR para la estación meteorológica de Ixtlán año húmedo.

4.2 Complementación de la red Hídrica

Como resultado de este proceso se obtuvo una red hídrica completa de la zona, cada uno de los escurrimientos fueron catalogados de acuerdo al orden, según el sistema de Sthraler. En este proceso se identificó que el orden máximo de la cuenca fue 5, y como es de esperarse el orden que más se repite es 1 como se muestra en la imagen 10.

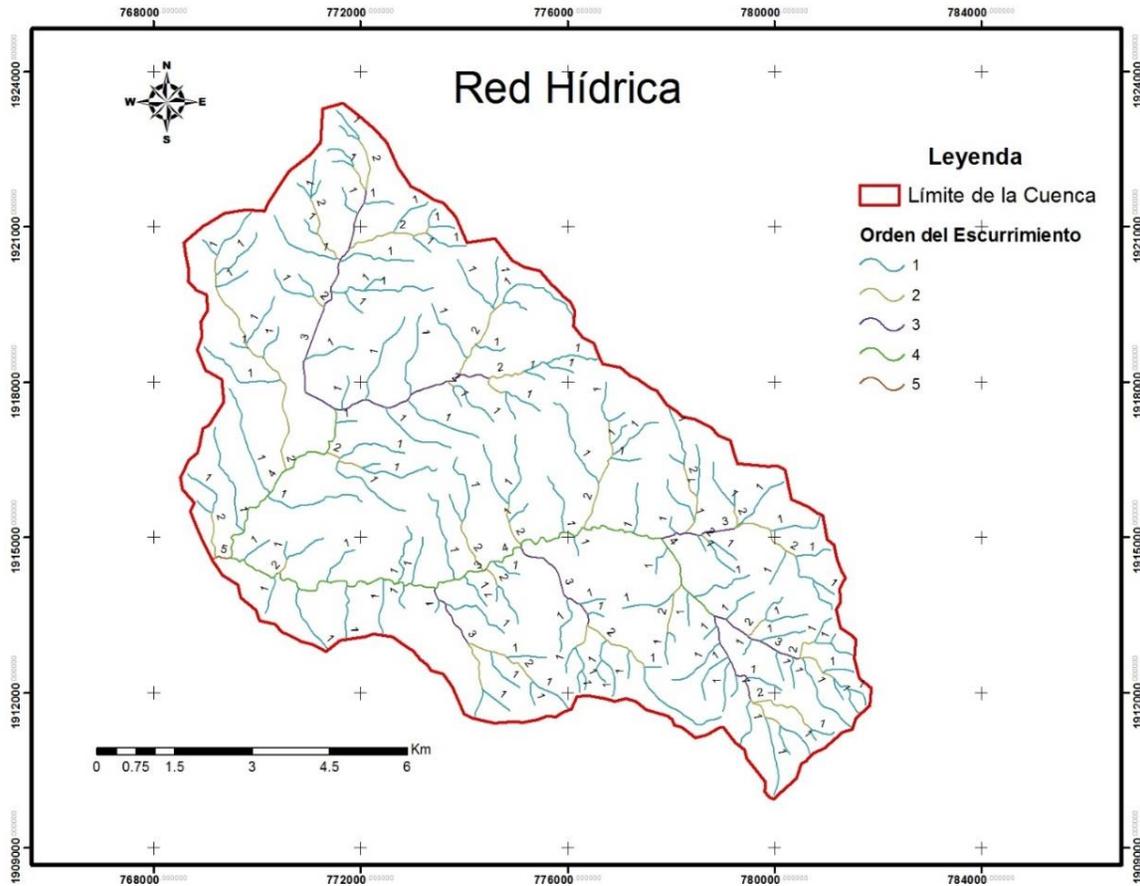


Imagen 10. Red Hídrica completa de la cuenca.

4.3 Interpretación visual de una imagen satelital de alta resolución

Dentro del área de la cuenca se identificaron 7 diferentes coberturas, que son: asentamientos humanos, agricultura de temporal, bosque mixto, selva baja, bosque mesófilo de montaña, pastizales, matorrales-pastizales (área perturbada) y zonas con aprovechamiento forestal; La ubicación de las coberturas y la superficie que ocupa cada cobertura se muestra en la Imagen 11.

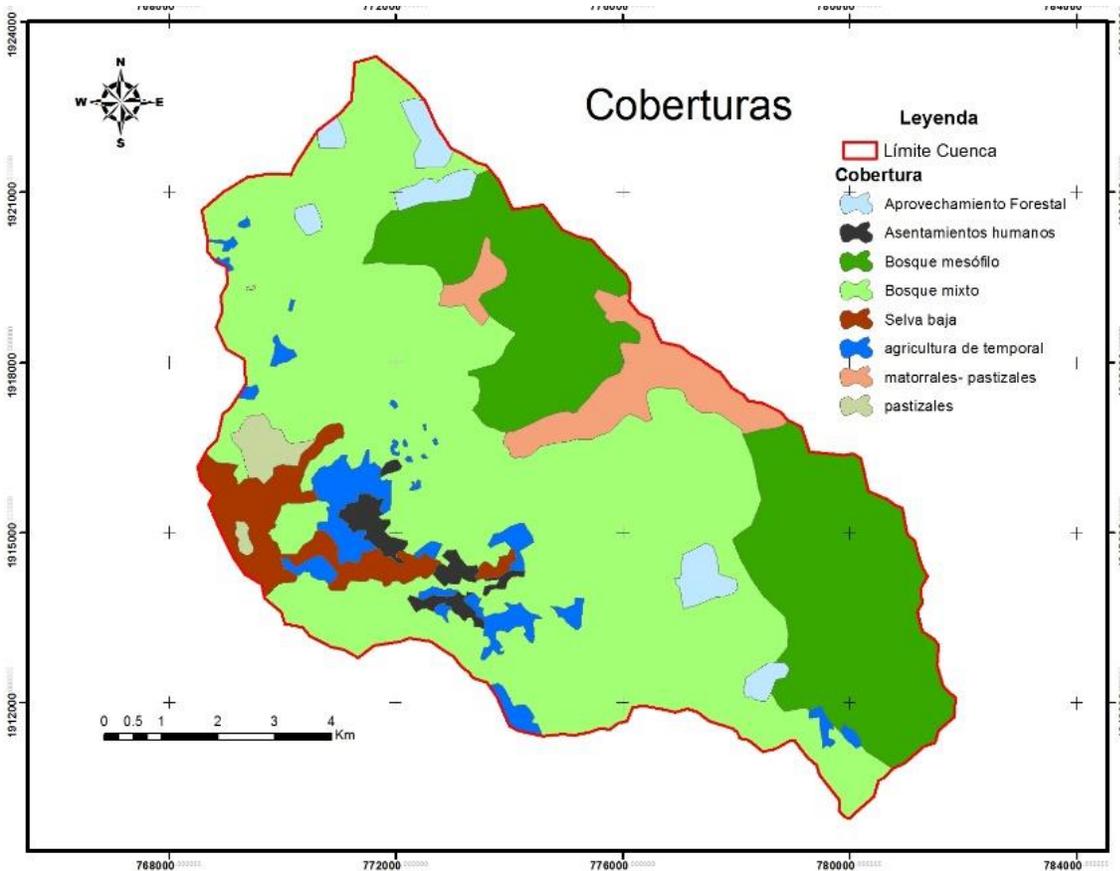


Imagen 11. Coberturas presentes en la cuenca y superficie de cada una.

En la tabla 11 se presentan las coberturas que se identificaron en la microcuenca y la superficie que abarca cada una, la mayor cobertura la presenta el bosque mixto con más de 5 mil hectáreas, seguido de bosque mesofilo, y las menores superficies están representadas por pastizales y asentamientos humanos.

Tabla 10. Superficie ocupada por tipo de coberturas

Cobertura	Superficie (Ha)	Porcentaje
Agricultura de temporal	375.40	3.9
Aprovechamiento Forestal	264.52	2.8
Asentamientos humanos	141.87	1.5

Bosque mesófilo	2,387.58	24.9
Bosque mixto	5,449.18	56.9
Matorrales-pastizales	469.23	4.9
Pastizales	102.60	1.1
Selva baja	385.11	4.0
Total	9,575.49	100

4.4 Índices de vegetación y humedad

El índice de vegetación muestra las zonas con mayor densidad de vegetación, como se puede observar en la imagen 12, en la cual muestra que gran parte de la cuenca presenta valores altos de vegetación, en la zona central de la cuenca se observa una zona con valores más bajos, que corresponde a un área perturbada identificada en el mapa de cobertura vegetal, los valores más bajos del índice se muestran en los asentamientos humanos, correspondientes a 3 municipios y una agencia municipal, finalmente en la parte baja de la cuenca hacia el oeste se observa menor grado de vegetación, que corresponde a vegetación de selva baja.

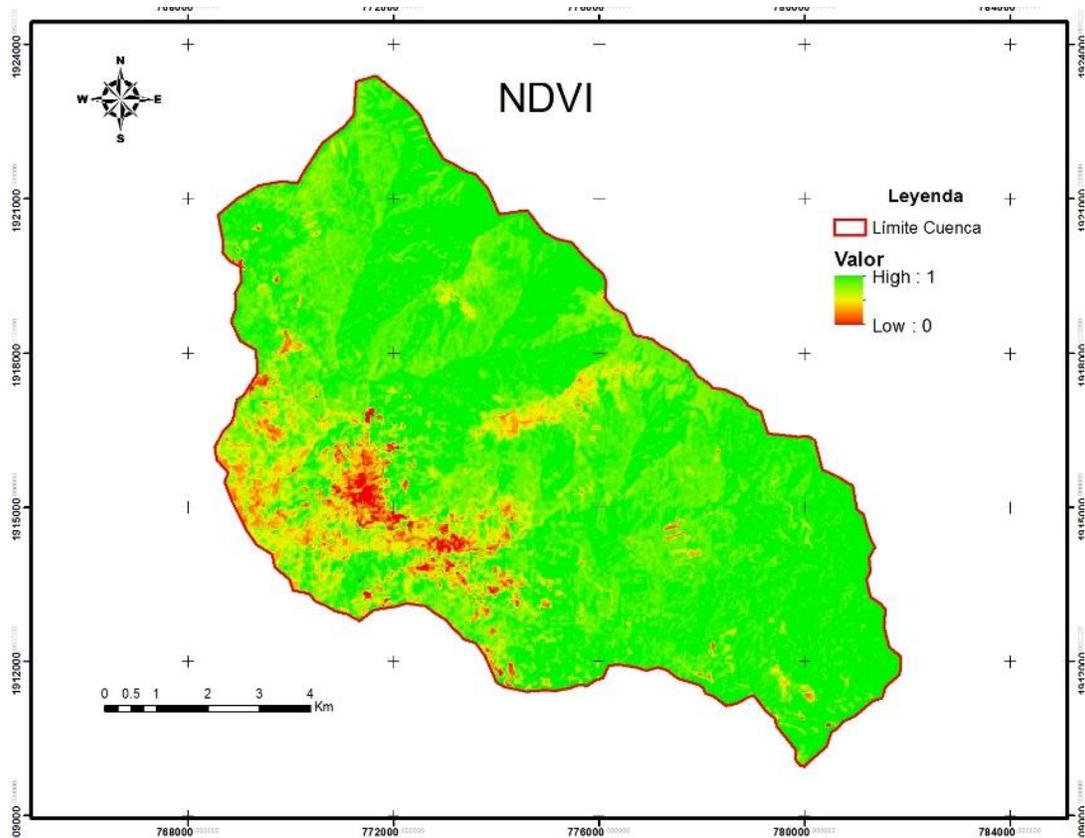


Imagen 12. Índice de vegetación de diferencia normalizado.

El mapa de temperatura superficial de la tierra muestra que los valores más altos de temperatura fueron de 36.3 °C y se ubicaron en las partes más bajas de la cuenca, por su parte los valores más bajos de temperatura fueron de 16.9 °C su distribución fue en las partes más elevadas con vegetación más abundante como se muestra en la Imagen 13.

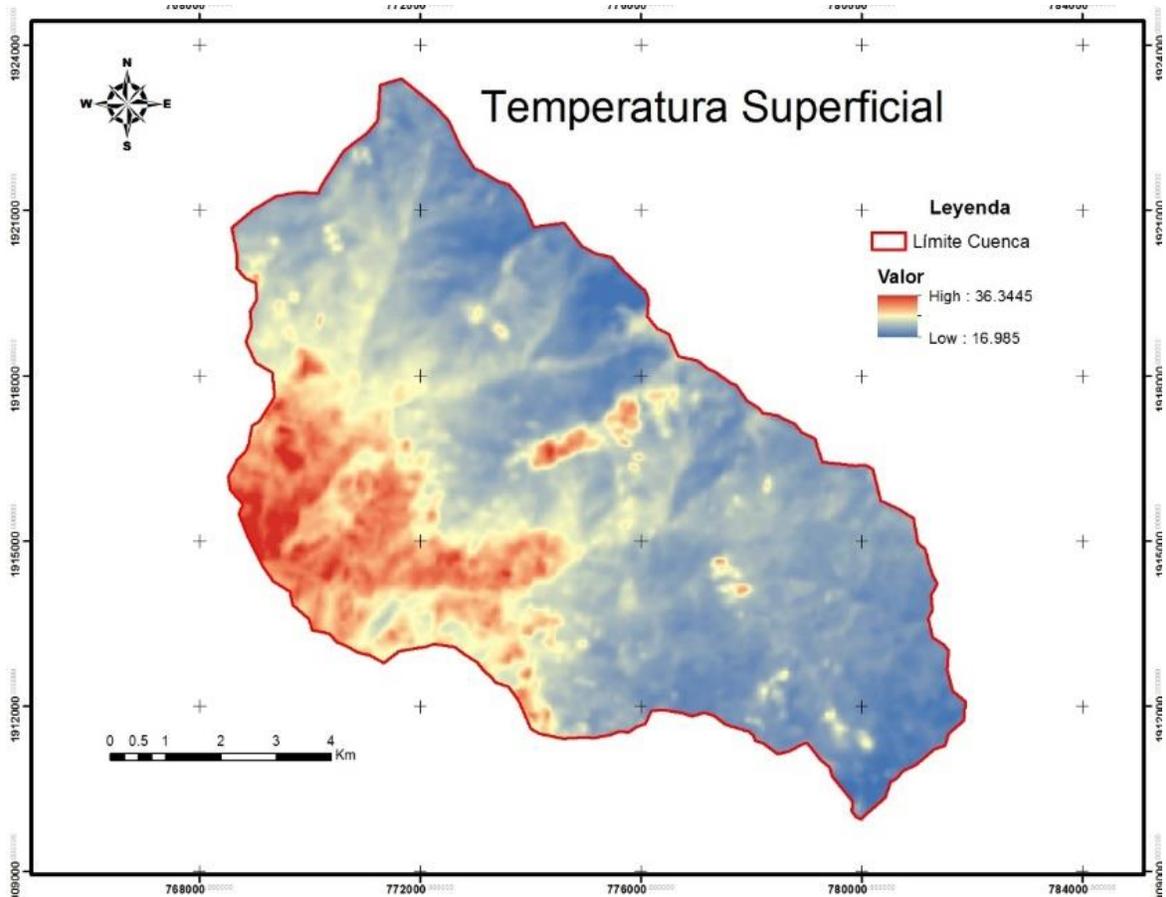


Imagen 13. Mapa de temperatura superficial de la cuenca.

Como resultado la imagen 14 muestra el índice de humedad de la cuenca, donde se aprecia que las zonas de mayor elevación y de mayor cobertura presentan los grados de mayor humedad, mientras que las zonas urbanas, y las zonas más bajas presentan mayor grado de sequía, se observa un área impactada al centro de la cuenca donde se desarrollaron actividades de derribo de vegetación.

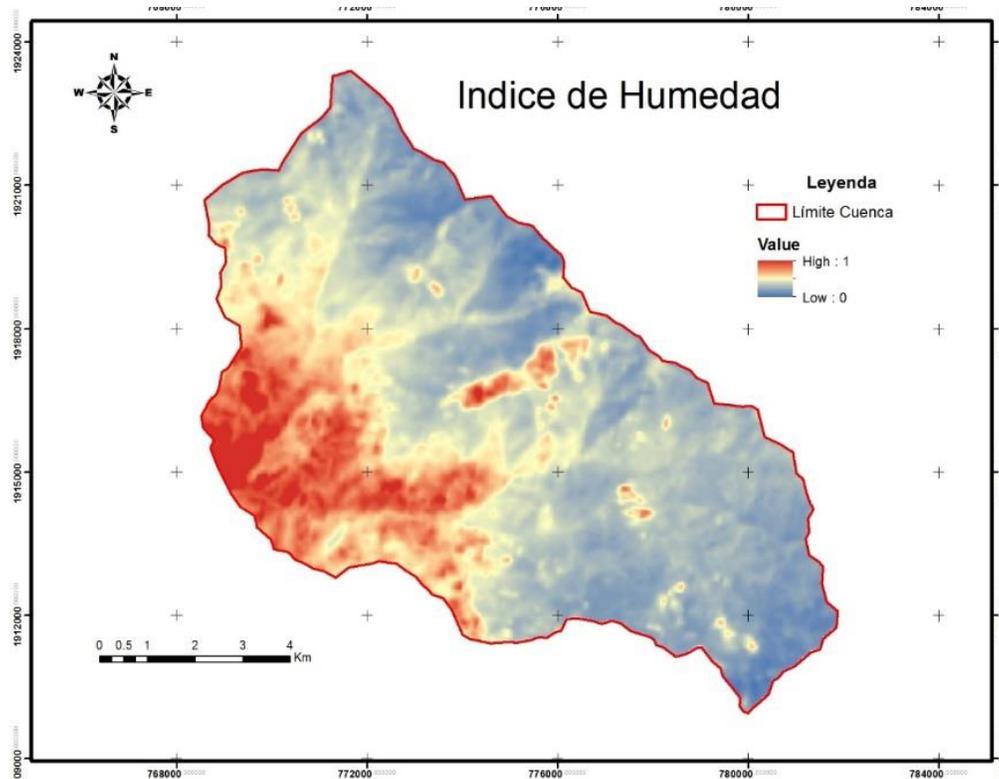


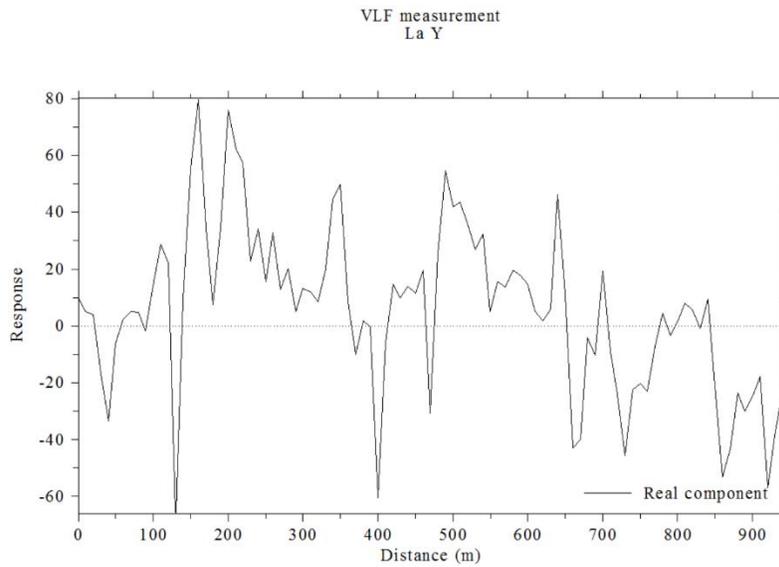
Imagen 14. Índice de humedad de la cuenca.

4.5 Métodos electromagnéticos.

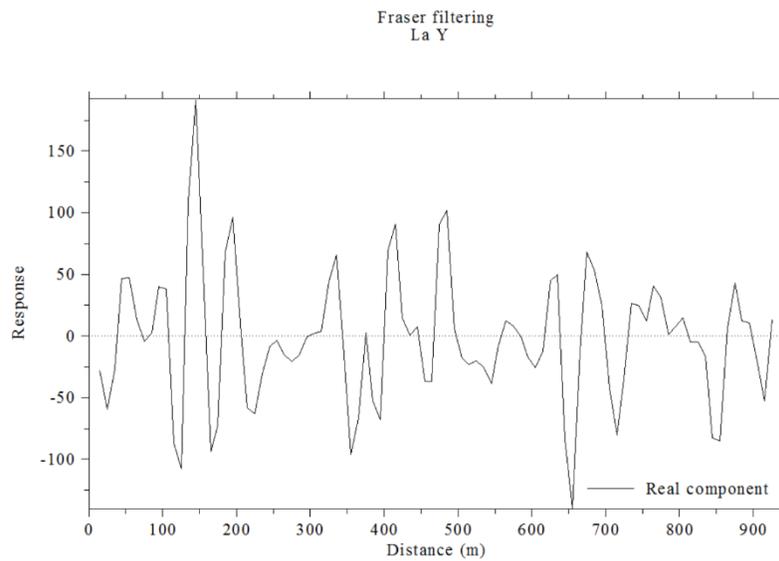
Los datos de VLF (muy baja frecuencia) se analizaron y procesaron trazando los datos de componentes en fase (reales) frente a las distancias de punto de muestreo tanto para los datos de campo sin procesar como para los datos filtrados utilizando el software KHFFILT para cada uno de los 3 recorridos realizados.

Para cada recorrido se muestra un gráfico con datos sin filtrar y los gráficos que resultaron de la aplicación del filtro Karous-Hjelt. Para el primer recorrido “la Y”, se muestra la gráfica 8. Las respuestas positivas del filtro Fraser se observaron en valores entre 25 – 170, mientras que la distribución respecto a la distancia fue irregular a lo largo de todo el recorrido como se muestra en la gráfica 9. Estas corresponden a zonas de fractura probables de profundidad entre 0 – 60 m, la zona fracturada entre los 400 y los 530 metros corresponde a la falla existente y que ya

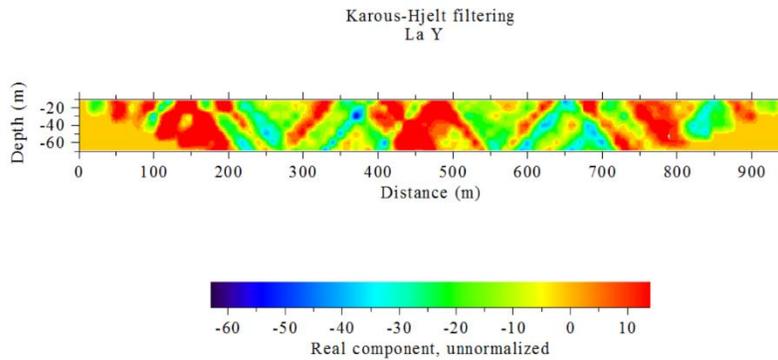
fue identificada por el Servicio Geológico Nacional como se muestra en la gráfica 10.



Grafica 8. Datos en fase sin filtrar contra la distancia recorrido la Y

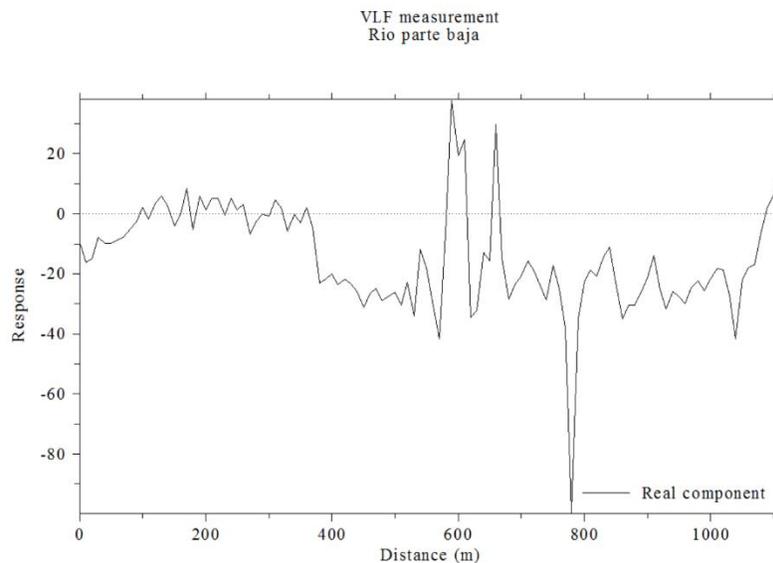


Grafica 9. Gráfico de los datos en fase filtrados en función de la distancia recorrido la Y

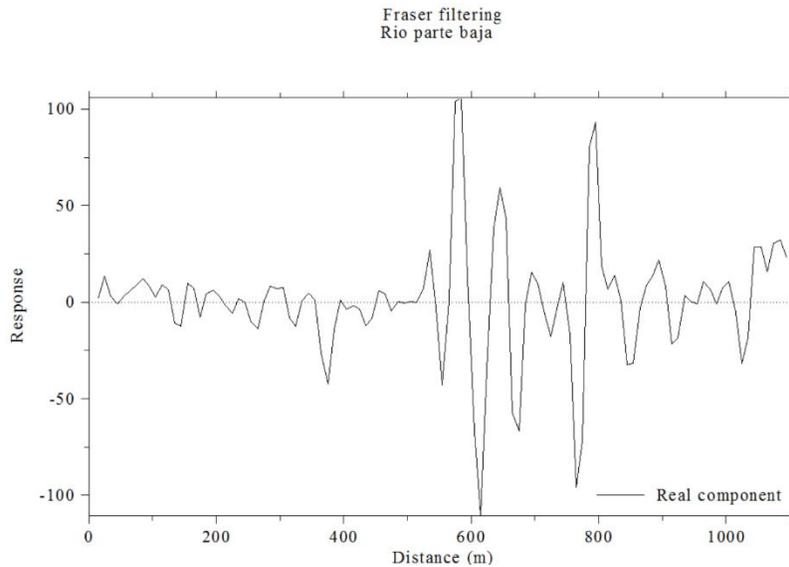


Grafica 10. Diagrama de la sección transversal de la densidad de corriente en fase contra la distancia.

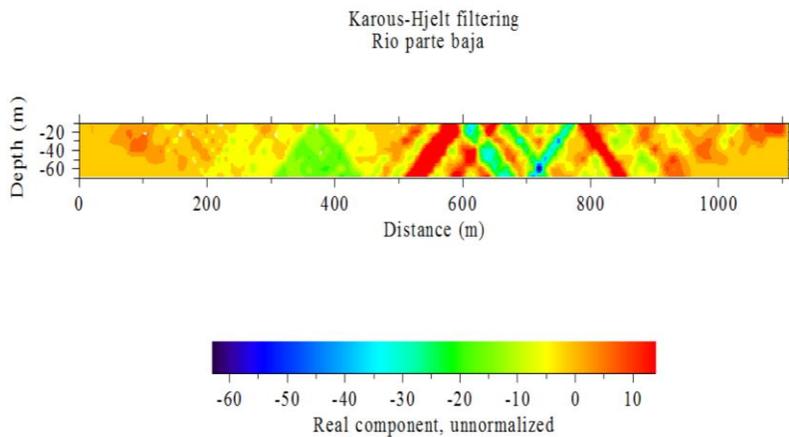
En el segundo recorrido igualmente se graficaron tanto los datos VLF de campo sin procesar en la gráfica 11, como los datos VLF filtrados. Se observó una respuesta prominente de filtro Fraser positivo del recorrido entre los 580 - 600 m, 640 - 670 m y 770 - 800 m, respectivamente se puede visualizar en la gráfica 12. Estas corresponden a una probable zona de fractura a una profundidad que se extiende desde 0 – 60 como se detalla en la gráfica 13 las fallas identificadas por el Servicio Geológico Mexicano se encuentran entre los 80-120 m y 520 -670 metros.



Grafica 11. Datos en fase sin filtrar contra la distancia recorrido Rio parte baja



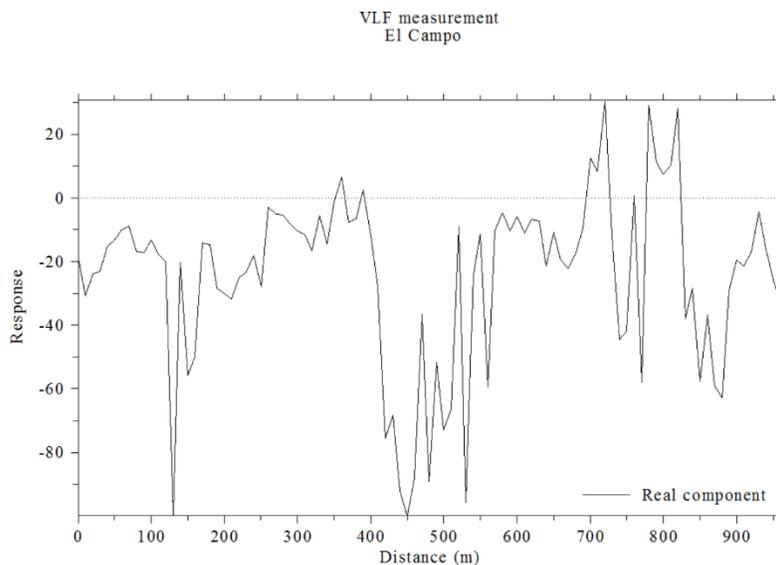
Grafica 12. Datos en fase filtrados en función de la distancia recorrido rio parte baja



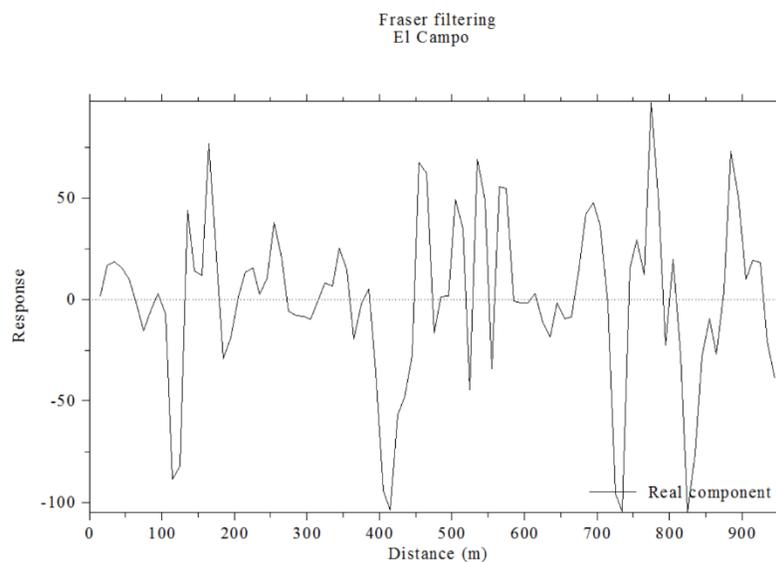
Grafica 13. Diagrama de la sección transversal de la densidad de corriente en fase contra la distancia recorrido rio parte baja.

Para el último recorrido se representaron los datos VLF sin procesar en la gráfica 14 y los datos VLF filtrados se identificaron diferentes zonas de fractura con respuesta positiva del filtro Fraser agrupados en tres grupos principales como se muestra en la gráfica 15. Estas zonas se encuentran a una distancia horizontal de entre 120 - 180 m, 420 - 570 m y 750 - 800 m a lo largo del recorrido. Éstas corresponden a unas zonas de fractura probables a una profundidad entre 0 - 60m,

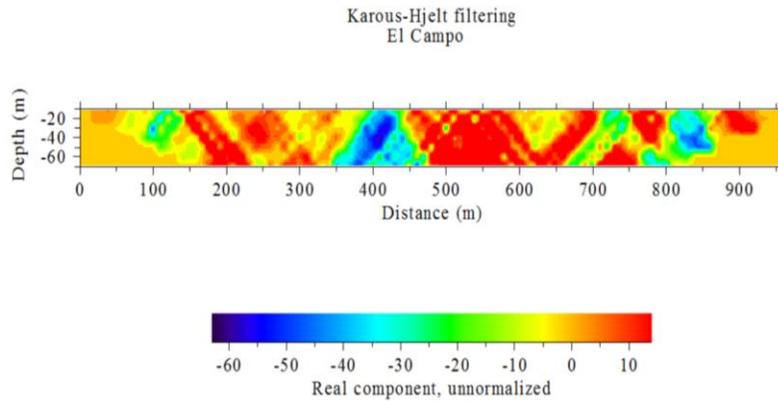
en los tres casos como se detalla en la gráfica 16 se identificó el mayor agrupamiento de fracturas entre los 420 y 700 metros.



Grafica 14. Datos en fase sin filtrar contra la distancia recorrido El campo.



Grafica 15. Gráfico de los datos en fase filtrados en función de la distancia recorrido El campo.



Grafica 16. Diagrama de la sección transversal de la densidad de corriente en fase contra la distancia recorrido El campo.

En el transecto 1, se identificaron dos zonas fracturadas, estas zonas se encontraron a una distancia horizontal de entre 100-200 metros y 740-810 metros, a lo largo del perfil en profundidad de entre 0-60M.

En el transecto 2, se identificó una zona fracturada, la cual se encuentra a distancia horizontal de entre 800-850 metros, a lo largo del perfil en profundidad de entre 0-60 metros.

El tercer transecto presenta el tipo de roca más dura donde las anomalías se ubicaron entre los 450 y 620 metros, en este caso se identifican fallas continuas de 0 a 60 metros.

Los tres transectos presentaron anomalías indicativas de fallas en el terreno, lo cual representan zonas donde el agua subterránea pueda desplazarse para el acuífero.

4.6 Elementos que inciden en la recarga.

4.6.1 Pendiente

Una vez realizada la ponderación de la morfología existente en la cuenca se obtuvo el mapa con la reclasificación de dicho elemento, en donde se obtuvieron las 5 posibilidades de recarga, la posibilidad que predominó en la cuenca tomando en

cuenta la pendiente es la **moderada** con el 60.9 % del total de la superficie, seguida de posibilidad **alta** con 23.51, por su parte las posibilidades muy baja, baja y alta obtuvieron porcentajes de 3.13, 5.75 y 6.69 respectivamente, como se observa en la imagen 15.

Esto indica que gran parte de la cuenca presenta un relieve ondulado a cóncavo con una pendiente que va de los 15 a los 45 grados.

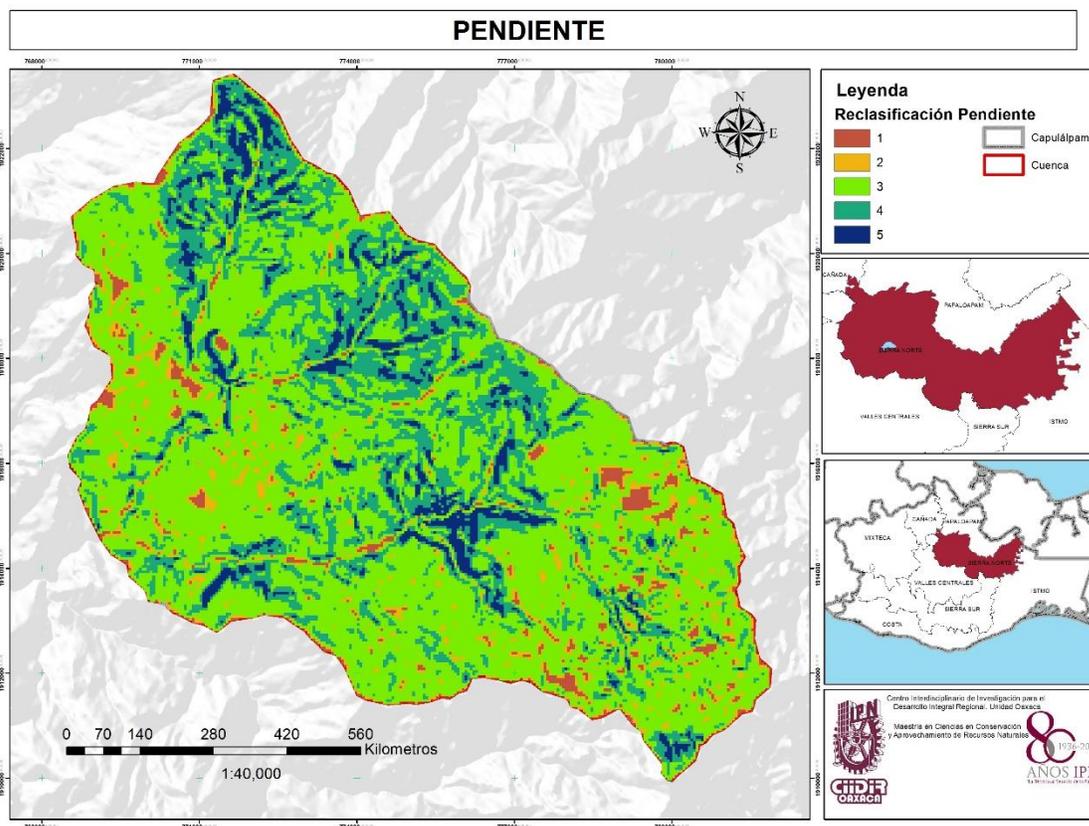


Imagen 15. Resultados de la ponderación con posibilidad de recarga respecto a la pendiente.

4.6.2 Tipo de suelo

Debido a que en la ponderación los tipos de suelo presentes en la cuenca solo se encontraron 3, de los cuales presentan los valores más bajos en la posibilidad de recarga. La posibilidad de recarga con mayor extensión dentro de la cuenca es **Moderada** con un 47.86 %, seguido de baja y muy baja con 42.20 % y 9.93

respectivamente, la distribución de la ponderación de factor suelo se presenta en la imagen 16.

Los suelos con la ponderación moderada se distribuyen hacia las partes más elevadas en la parte noreste de la cuenca, mientras que los valores más bajos están hacia la salida de la cuenca en la parte suroeste.

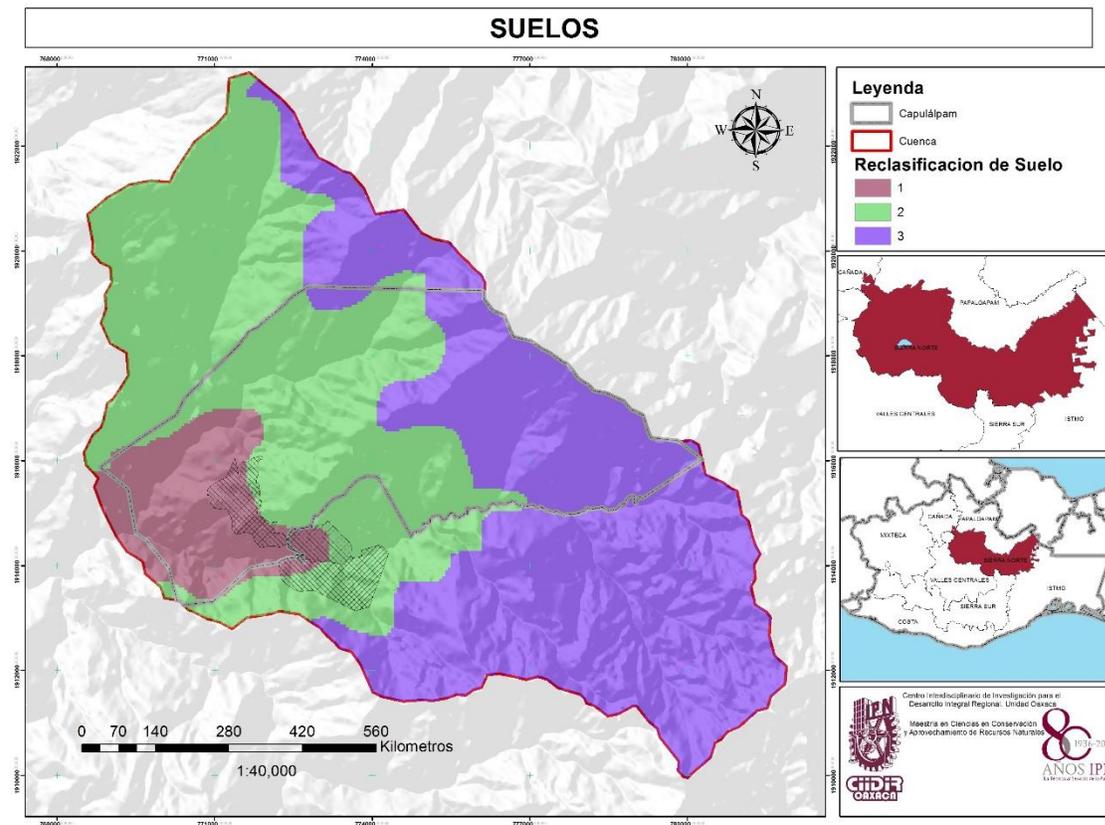


Imagen 16. Resultados de la ponderación con posibilidad de recarga respecto al tipo de suelo.

4.6.3 Tipo de roca

Al realizar la reclasificación de los tipos de roca se encontraron las 5 posibilidades de recarga, la categoría **muy baja** predomina en la cuenca con un 39.33 %, seguida de **muy alta** y **alta** con 28.24 % y 16.04 % respectivamente, las categorías con menor superficie fueron baja y moderada con 7.56% y 8.83% respectivamente, como se muestra en la imagen 17.

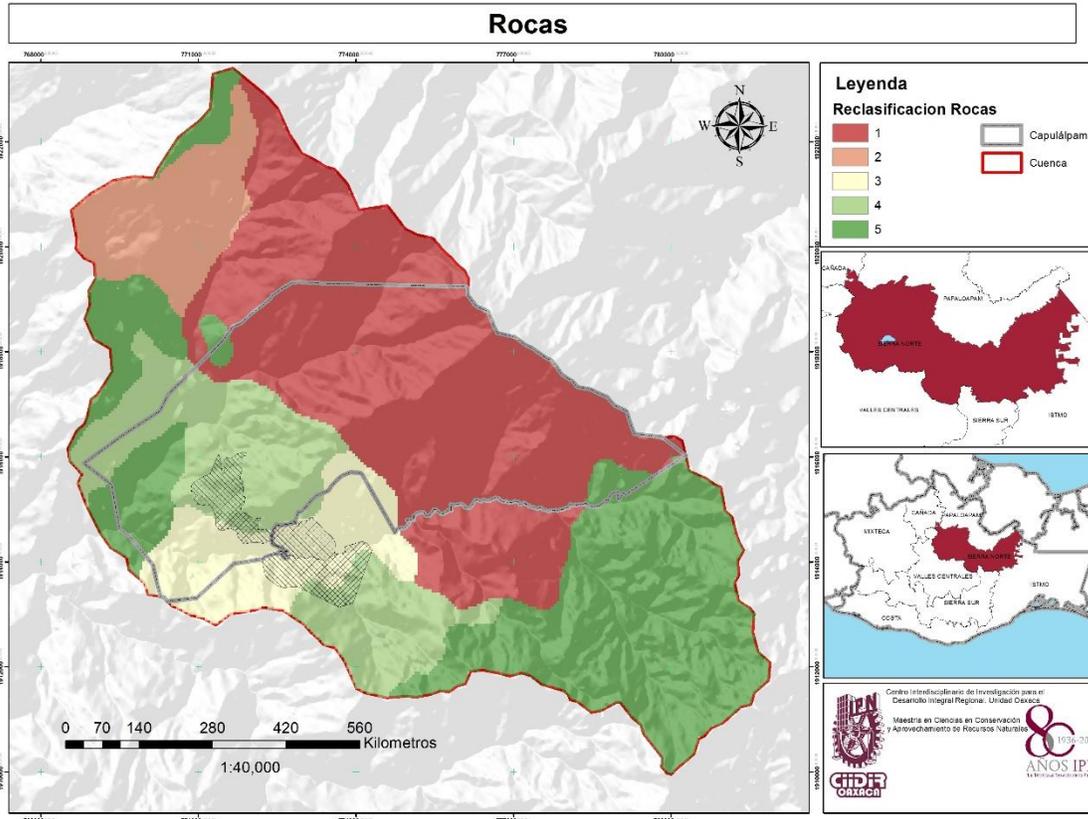


Imagen 17. Resultados de ponderación con posibilidad de recarga respecto al tipo de suelo.

Las zonas con menor posibilidad de recarga se ubicaron en la parte superior de la cuenca en la parte norte, por su parte las posibilidades moderada, alta y muy alta se ubican hacia el sur de la cuenca, específicamente suroeste y sureste.

4.6.4 Índice de vegetación

De acuerdo a la ponderación que se obtuvo la posibilidad de recarga predominante con el índice de vegetación es muy alta con un 83.74% de la cuenca, el resto de la superficie corresponde a posibilidad alta, moderada baja y muy baja con 9.30 %, 4.91%, 1.64% y 0.4%, como se muestra en la imagen 18.

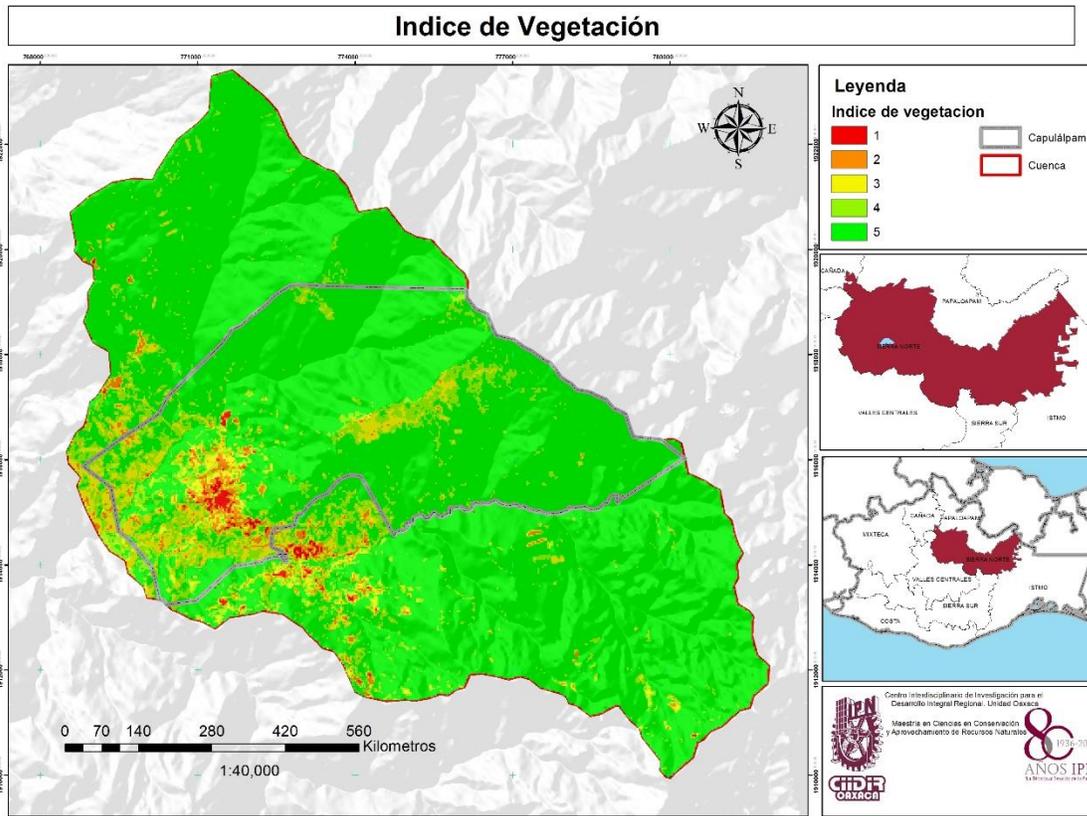


Imagen 18. Resultados de la ponderación con posibilidad de recarga respecto al índice de vegetación.

Al generar el índice de vegetación gran parte de la cuenca presenta valores altos de vegetación, en la zona central de la cuenca se observa una zona con valores más bajos, que corresponde a un área perturbada identificada en el mapa de cobertura vegetal, los valores más bajos del índice se muestran en los asentamientos humanos, correspondientes a 3 municipios, finalmente en la parte baja de la cuenca hacia el oeste se observa menor grado de vegetación, que corresponde a vegetación de selva baja.

4.6.5 Índice de humedad.

La ponderación resultante del índice de humedad mostró que en la cuenca se encuentran las 5 posibilidades de recarga indicadas inicialmente, la posibilidad con la mayor superficie es **alta** con 44.79 % de la cuenca, seguido de posibilidad **alta** y

moderada con 30.22 % y 15.60 % respectivamente, finalmente las posibilidades con menos superficie fueron baja y muy baja con 8.60% y 0.80% respectivamente, la distribución se observa en la imagen 19.

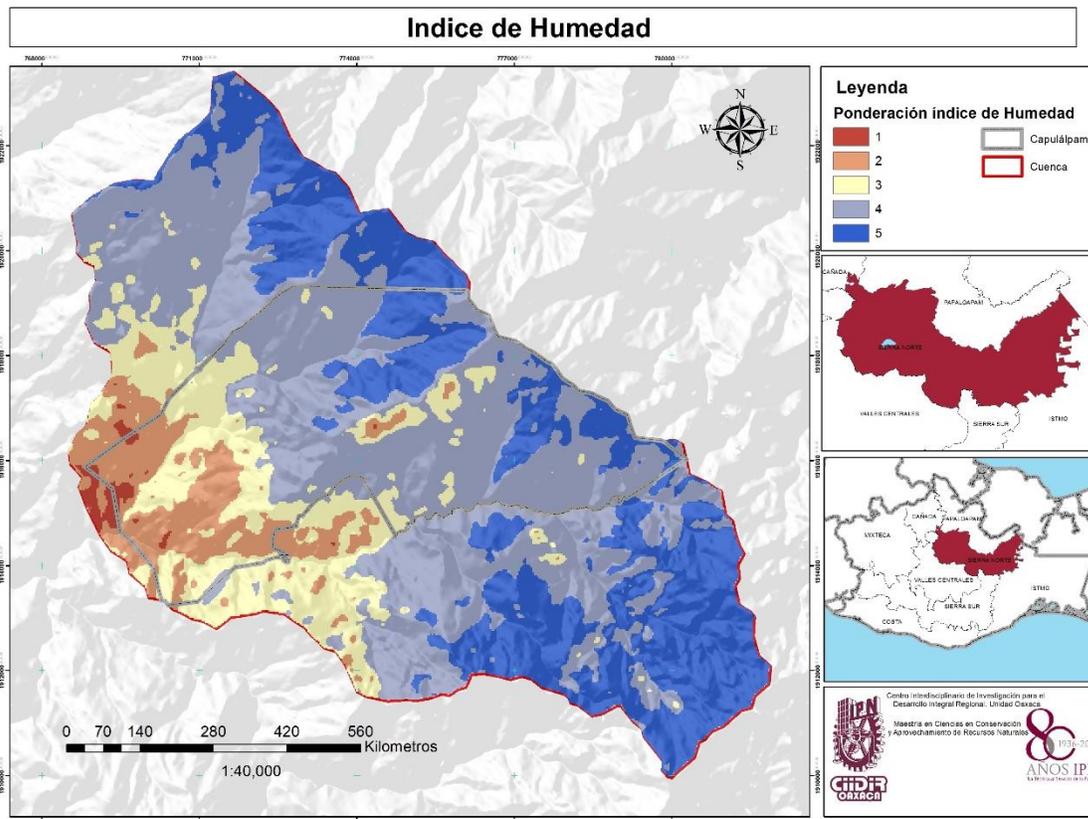


Imagen 19. Resultados de la ponderación con posibilidad de recarga respecto al índice de humedad. Se aprecia que las zonas de mayor elevación y de mayor cobertura presentan los grados de mayor humedad, mientras que las zonas urbanas, y las zonas más bajas presentan mayor grado de sequía, se observa un área impactada al centro de la cuenca donde se desarrollaron actividades de derribo de vegetación.

4.7 Identificación de las zonas con potencial de recarga.

El resultado de la aplicación de la metodología para la identificación de zonas de recarga dentro de la cuenca se muestra en la imagen 4 y la tabla 2, los resultados correspondientes a los porcentajes por categorías de posibilidad de recarga hídrica de la cuenca, el cual muestra que, de las 5 categorías, en la cuenca se identificaron 4 que corresponden a muy alta, alta, media y baja posibilidad de recarga.

Tabla 11. Porcentajes por categorías de posibilidad de recarga hídrica de la cuenca,

Categoría	Porcentaje (%)
Muy alta	1.12
Alta	37.98
Media	60.6
Baja	0.3
Muy baja	0.0

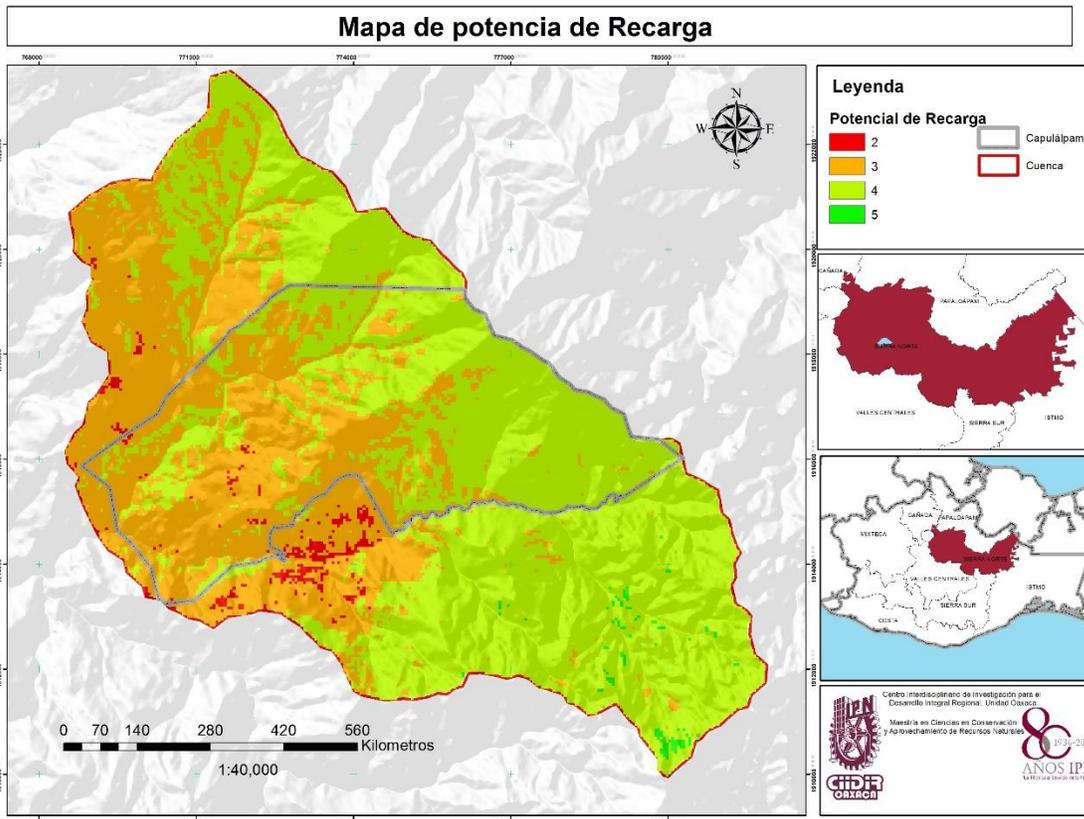


Imagen 20. Distribucion de la posibilidad de recarga hídrica en la cuenca.

En consecuencia, por sus características físicas la subcuenca se clasifica como buena para que ocurra la recarga hídrica o la infiltración del agua en el suelo, ya que el 97% del área total se ubica en las categorías de regular, alta y muy alta posibilidad de ocurrencia de recarga hídrica. Dicho de otra manera, la cantidad de agua que se precipita y queda disponible en la subcuenca tiene de moderadas a altas posibilidades de que se infiltre y recargue los acuíferos.

Por su parte en el municipio de Capulálpam de Méndez se encontraron solo 3 de las 5 posibilidades de recarga, siendo baja, moderada y alta, la mayor superficie del municipio se encuentra dentro de la categoría alta con un 53.73% de la superficie, seguido de moderada con 45.87% y finalmente la posibilidad baja con 0.40%.

La distribución espacial de estos 3 potenciales de recarga se muestra en la imagen 20, las zonas de mayor elevación hacia la parte suroeste presentan condiciones altas para la recarga de agua, esta distribución se extiende ligeramente hacia el noroeste de la cabecera municipal, donde predominan zonas con abundante vegetación, así como suelos con mayor permeabilidad.

Toda la parte central del municipio y hacia la parte sur se encuentran en una categoría moderada, ya que hay mayor pendiente y menos vegetación por la cercanía con el área urbana y cultivos agrícolas.

Finalmente las pocas zonas que se identificaron con una categoría de recarga hídrica baja se encuentran dispersos sobre todo al norte de la cabecera municipal, hacia el sur y manchones dispersos hacia el oeste.

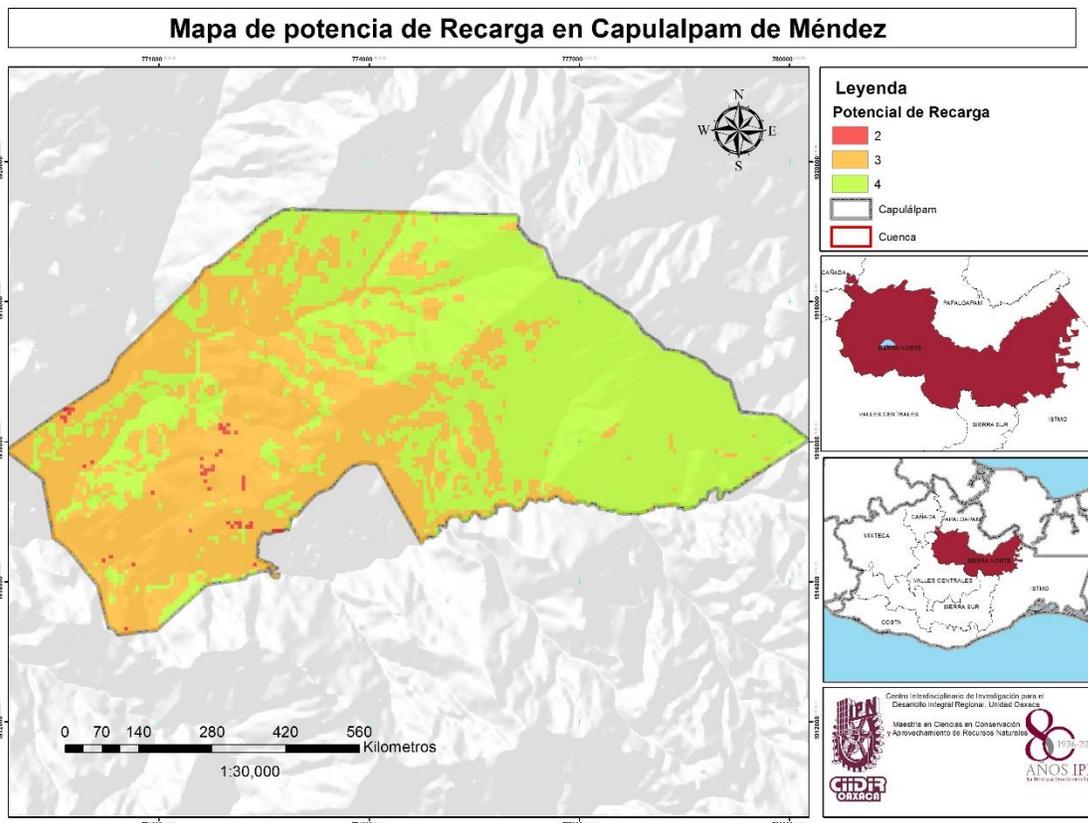


Imagen 21. Distribución del potencial de recarga en el municipio de Capulálpam.

4.8 Análisis de Resultados

Los tres transectos realizados con equipo VLF permitieron obtener información de la existencia de fallas en la zona de estudio, en el transecto 1, se identificaron dos zonas fracturadas, estas zonas se encontraron a una distancia horizontal de entre 100-200 metros y 740-810 metros, a lo largo del perfil en profundidad de entre 0-60M. En el transecto 2, se identificó una zona fracturada, la cual se encuentra a distancia horizontal de entre 800-850 metros, a lo largo del perfil en profundidad de entre 0-60 metros.

El tercer transecto presenta el tipo de roca más dura donde las anomalías se ubicaron entre los 450 y 620 metros, en este caso se identifican fallas continuas de 0 a 60 metros. Los tres transectos presentaron anomalías indicativas de fallas en el terreno, lo cual representan zonas donde el agua subterránea pueda desplazarse para el acuífero.

En el análisis de resultados se delimitó que la microcuenca posee una alta posibilidad de recarga hídrica (39.1%), concentrándose en las partes altas y medias de la misma. Por consiguiente, se puede determinar que la microcuenca, se encuentra en áreas con una cobertura vegetal alta y posee mayor potencial de recarga hídrica, considerando los factores que intervienen en este proceso.

Las variables que inciden en mayor grado para la identificación de zonas de recarga hídrica son la pendiente, el tipo de suelo y la presencia de vegetación,

Las zonas potenciales de recarga hídrica que se identificaron pueden asegurar el recurso hídrico en cantidad, considerando que las precipitaciones en la zona son

abundantes. Por consiguiente, la identificación de las zonas de recarga hídrica del área de estudio proporciona información pertinente para resguardar los recursos naturales asociados a estas zonas de vital importancia para el mejoramiento de la gestión ambiental a nivel territorial.

El análisis multicriterio permite considerar que los factores tienen importancias relativas distintas. Por ello, asumen unos pesos generados a partir de una serie de comparaciones, con la que se mide la importancia relativa de cada factor en comparación con el resto de factores. De este modo, los factores con mayor peso ejercen una influencia superior de ese criterio en el mapa final resultante, donde cada píxel asume un valor de adecuación con respecto a su posibilidad de recarga hídrica dentro de la cuenca.

Más del 95% del total del territorio de Capulálpam de Méndez se encuentra con un potencial de recarga moderado o alto, lo que representa que las posibilidades de que el agua de lluvia precipitada en estas zonas se incorporará al acuífero son muy altas. La salud de la vegetación no solo en el municipio sino en toda la cuenca es buena, lo que permite mayor infiltración al subsuelo.

5 Conclusiones.

La identificación de áreas potenciales de recarga, facilita también la definición de áreas de protección y rehabilitación ambiental, para incrementar la oferta de agua. Por lo que es un insumo útil para la planeación y gestión territorial en la zona.

El 80% de la cuenca presenta una vegetación abundante correspondiente a bosque mesófilo y bosque mixto de pino y encino, lo cual se reflejó en el índice de vegetación.

Las características de los elementos naturales (suelo, vegetación, pendiente, Humedad, rocas y fracturamiento) son resultado de diversos procesos involucrados en el funcionamiento del agua tanto subterránea como superficial, por lo que se consideran indicadores confiables de la manifestación superficial de zonas de recarga hídrica.

La ubicación de las zonas de recarga se encuentra condicionada por la presencia de los factores que se estudiaron, principalmente relieve, tipo de suelo y la presencia de vegetación.

Las zonas intermedias de la cuenca presentan las mejores condiciones para la recarga de agua, las partes más elevadas se encuentran condicionadas por el escarpado de la cuenca.

Las zonas caracterizadas como de aptitud media y alta, son prioritarias en la implementación de acciones que protejan las zonas de recarga hídrica. Estas estrategias deberán ser diseñadas de forma que puedan ejecutarse en las diferentes zonas, considerando a los actores que se desarrollan en el lugar.

Debido a las características de la cuenca y que la mayoría de su superficie cuenta con cobertura vegetal en buen estado, esta zona es considerada como una de las zonas de mayor importancia para la recarga hídrica no solo a nivel de microcuenca, sino a nivel de la cuenca del Papaloapan.

La interpretación de los datos a lo largo de estas travesías de VLF indica anomalías positivas y negativas de Fraser y Karous-Hjelt, dio indicios de una probable zona de fractura a lo largo de cada una de los transectos.

Se identificaron las respuestas del equipo VLF a fallas reconocidas por el SGM y adicionalmente se identificaron anomalías que pueden representar fallas sin identificar.

Las fallas encontradas identifican la dirección del flujo de agua en conjunto con coberturas arbóreas en buen estado permite la identificación de las principales zonas de recarga en el municipio.

5.1 Recomendaciones

Es necesario incorporar la opinión de los distintos sectores involucrados dentro de la cuenca mediante la realización de talleres para alcanzar un equilibrio entre las zonas de conservación propuestas y las actividades productivas desarrolladas en la zona. Los distintos puntos de vista respecto de la importancia relativa de los criterios utilizados en este trabajo, así como el consenso acerca de los mismos, son esenciales para el manejo exitoso de la cuenca.

Se recomienda la elaboración del balance hídrico con datos recientes es imprescindible se realice contemplando información meteorológica mensual debido a que los cambios estacionales alteran significativamente condiciones físicas como precipitación, temperatura, humedad relativa, entre otros.

Para mejorar la calidad de la información se recomienda utilizar información cartográfica a mayor detalle, que permite hacer una mejor ponderación de los elementos que inciden en la recarga hídrica, lo que daría la oportunidad de ser más específicos al identificar las áreas de recarga.

El municipio de Capulálpam debe generar instrumentos normativos internos que regulen las actividades que se realizan en su territorio, considerando la importancia ambiental de cada zona.

Las zonas con potencial de recarga hídrica alto deben de considerarse como áreas prioritarias en los planes de manejo de forestal que se elaboren a futuro, bajo proyectos de protección y conservación de recursos naturales para el resguardo de los servicios ecosistémicos del municipio.

Se sugiere la actualización del inventario de manantiales de agua en el municipio, debido a que durante el trabajo de campo y la interacción con actores locales se identificaron manantiales que están dentro del municipio, pero que no aparecen en dicho inventario, de igual manera es importante conocer el caudal de agua de cada manantial, cuando menos en temporada de estiaje y lluvias para estudios posteriores.

5.2 Bibliografía

- ABEM, A.B., 1990. ABEM Instructional Manual: ABEM AB, Bromma, Sweden, vol. 47.
- Adepelumi, A., Yi-j, M.J., Kim, J.H., Ako, B.D., Son, J.S., 2006. Integration of surface geophysical methods for fracture detection in crystalline bedrocks of southwestern Nigeria. *Hydrogeol. J.* 14.
- Álvarez-Mozos, J., Casali J., González-Audicana, M.: Teledetección radar como herramienta para la estimación de la humedad superficial del suelo en cuencas agrícolas. *Revista de Teledetección*, 23, 27—42 (2005).

- Ammar A.I., Kruse S.E. (2016). Resistivity soundings and VLF profiles for siting groundwater wells in a fractured basement aquifer in the Arabian Shield, Saudi Arabia. *Journal of African Earth Sciences* 116: 56-67.
- Arriaga Cabrera, L., et al. 2000. Regiones prioritarias y planeación para la conservación de la biodiversidad, en *Capital natural de México*, vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio. CONABIO, México, pp. 433-457
- Barredo. J. I. (1996). *Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio*. Madrid.
- Becker, F., Li, Z.L.: Towards a local split window method over land surfaces. *Int. J. Remote Sensing*, 11, 369--393 (1990).
- Benson, K.B., Payne, K.L., Stubben, M.A., 1997. Mapping groundwater contamination using dc resistivity and VLF geophysical methods e a case study. *Geophysics* 62 (1), 80e86.
- Benson, K.B., Payne, K.L., Stubben, M.A., 1997. Mapping groundwater contamination using dc resistivity and VLF geophysical methods e a case study. *Geophysics* 62 (1)
- Bernard, J., Valla, P., 1991. Groundwater exploration in fissured media with electrical and VLF methods. *Geoexploration* 27, 81e91.
- Bernard, J., Valla, P., 1991. Groundwater exploration in fissured media with electrical and VLF methods. *Geoexploration* 27.
- Bosque, J. & Mass. S. (1995). Modelo de localización – asignación y evaluación multicriterio para la localización de instalaciones no deseables. *Serie geográfica n°5*, 97 -12.
- Boza, A. 2007. Costa Rica requiere gestión integrada de su recurso hídrico (en línea). *Revista CIEMI*.
- Bueso-campos, M. (2009) identificación y caracterización de las zonas con mayor potencial de recarga hídrica en las subcuencas de los ríos tacó y shusho, municipio de Chiquimula. *Universidad De San Carlos De Guatemala*.

- Campbell, James B. (2006) Introduction to remote sensing. The Guilford Press. New York.
- Campos, D. 1998. Procesos del ciclo hidrológico. San Luis Potosí, MX.
- Chelotti, et al, 2010, Métodos Electromagnéticos y de Polarización Inducida. Cátedra de Geofísica Aplicada, Chubut, Argentina.
- Chow, V; Maidment, D; Mays, L. 1994. Hidrología aplicada. McGraw-Hill Interamericana, SA. Bogotá.
- Chuvioco, E. 2012. Fundamentos de teledetección espacial. Tercera Edición Madrid.
- CONAGUA (2011). Identificación de reservas potenciales de agua para el medio ambiente en México. México D.F. 2011
- CONAGUA, SEMARNAT. *Estadísticas del Agua en México. Edición 2011*. México. 2012.
- CONAGUA, SEMARNAT. *Estadísticas del Agua en México. Edición 2013*. México. 2014.
- CONAGUA, SEMARNAT. *Estadísticas del Agua en México. Edición 2015*. México. 2016.
- De la Maza E. R. y De la Maza E., J, 1998. *Historia de las Áreas Naturales Protegidas de México, Programa Agua, Medio Ambiente y Sociedad*. El Colegio de México. Fundación Gonzalo Río Arronte y UNAM, Documento de Trabajo No. 5. 32 pp.
- Duarte, J. R. 1998. Estudio Hidrogeológico del Acuífero de Guluchapa, San
- Eastman, J. R. (2012). *Idrisi Selva Manual* (17a ed.). Boston Ma: Clark University.
- Eastman, J. R. (2012). *Idrisi Selva Manual* (17a ed.). Boston Ma: Clark University.
- Eastman, R. 2003. IDRISI Kilimanjaro-Guía para SIG y Procesamiento de Imágenes. Clark Labs.

FAO-Aquastat. *Sistema de Información sobre el Uso del Agua en la Agricultura y el Medio Rural de la FAO*. 2012. Disponible en: www.fao.org/nr/water/aquastat/data/. Fecha de consulta: agosto de 2016.

Faustino, J. 2012. Identificación, evaluación y manejo de zonas de recarga hídrica. Managua, NI.

Fensholt, R., Sandholt, I.: Derivation of a shortwave infrared water stress index from MODIS near- and shortwave infrared data in a semiarid environment. *Remote Sensing of Environment*, 87(1), 111--121 (2003).

FNUAP (Fondo de Población de las Naciones Unidas). 2001. Estado de la población mundial: población y cambio del medio ambiente (en línea). Consultado 20 Oct. 2016. Disponible en: <http://www.unfpa.org/swp/2001/espanol/ch02.html>. 80 p.

Fraser, D.C., 1969. Contouring of VLF-EM data. *Geophysics* 34, 958e967

García – López G. (2011) Identificación de zonas potenciales para la recarga del manto acuífero en el municipio de Texcoco de Mora, Estado de México. Universidad Autónoma Chapingo. México.

García Galiano S.G. Assessment of vegetation indexes from remote sensing: theoretical basis. En: Erena M. (coord.), López-Francos A. (coord.), Montesinos S. (coord.), Berthoumieu J.-P. (coord.). *The use of remote sensing and geographic information systems for irrigation management in Southwest Europe*. Zaragoza: CIHEAM / IMIDA / SUDOE Interreg IVB (EU-ERD F), pp. 65--75 (2012).

García, E. (1998). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen / Enriqueta García. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía, 2004. México.

Gómez, V., & Soriano, R. (2013). Asignación de Grupo de Suelo a partir de clasificaciones edáficas de base morfométrica. (pp. 1–11).

Gómez, V., & Soriano, R. (2013). Asignación de Grupo de Suelo a partir de clasificaciones edáficas de base morfométrica. (pp. 1–11). Madrid: Sociedad Española de Ciencias Forestales.

- Gonzales, A. (2008). Los bosques de Oaxaca: Una visión de fin de siglo. Grupo Mesofilo
- GWP (Global Water Partnership, CH). 2011. Situación de los recursos hídricos en Centroamérica: hacia una gestión integrada. Tegucigalpa, HN.
- Holzman, M.E., Rivas, R y Piccolo, M.C., 2012. Utilización de imágenes de temperatura radiativa e índice de vegetación mejorado para el estudio de las condiciones hídricas en la región pampeana. *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*, 28: 25-33. ISSN: 1851-7838.
- Hsin-Fu, Y., Cheng-Haw, L., Kuo-Chin, H., & Po- Hsun, C. (2009). Gis for the assesment of the grounwater recharge potential zone. *Environmental Geology*, 58, 185–195.
- Hsin-Fu, Y., Cheng-Haw, L., Kuo-Chin, H., & Po-Hsun, C. (2009). Gis for the assesment of the grounwater recharge potential zone. *Environmental Geology*, 58, 185–195.
- IMTA (2008). coeficientes de escurrimiento para diferentes usos de suelo en las regiones hidrológicas de México. México D.F.
- INAB. (2005). *Metodología para la determinación de áreas críticas de recarga hídrica natural*. Guatemala.
- INEGI (1983). Diccionario de Datos del Continuo Nacional Geológico INEGI-SGM. escala 1:250,000.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática(INEGI) (2005). Carta climática de la república Mexicana. Escala 1:250000. México.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática(INEGI) (2005). Conjunto de datos vectorial edafológico. escala 1:250,000, serie II. México.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática(INEGI) (2005). Red hidrográfica nacional. escala 1:50,000. México.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (2011). Censo de Población y Vivienda, 2010 (Informe nacional y estatales), México. Disponible en: <http://www.censo2010.org.mx>

Jiménez, F. 2011. Introducción al manejo y gestión de cuencas hidrográficas. Turrialba, CR., CATIE.

Jose

JS Kayode, AO Adelusi, MNM Nawawi, M Bawallah, TS Olowolafe (2016). Geoelectrical investigation of near surface conductive structures suitable for groundwater accumulation in a resistive crystalline basement environment: A case study of Isuada, southwestern Nigeria. *Journal of African Earth Sciences* 119, 289-302.

Karous, M., Hjelt, S.E., 1977. Determination of Apparent Current Density from VLF Measurements. Contribution N. 89. Department of Geophysics, University of Oulu, Finland.

Karous, M., Hjelt, S.E., 1983. Linear filtering of VLF dip-angle measurements. *Geophys. Prospect.* 31.

Khalil, M.A., Monteiro Santos, F.A., Moustafa, S.M., Saad, U.M., 2009. Mapping water seepage from Lake Nasser, Egypt, using the VLF-EM method: a case study. *J. Geophys.* 6, 101e110.

Khalil, M.A., Monteiro Santos, F.A., Moustafa, S.M., Saad, U.M., 2009. Mapping water seepage from Lake Nasser, Egypt, using the VLF-EM method: a case study. *J. Geophys.*

Ledezma, M. 2011. Principios de meteorología y climatología. Madrid, España.

Ley de Aguas Nacionales. Diario oficial de la Federación. México, 1 de Diciembre de 1992.

Matus, O.- Faustino-Manco, J. y Jiménez-Otárola, F (2009) Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica: aplicación práctica en la subcuenca del río Jucuapa, Nicaragua & 40 p.

- Matus, O., Faustino, J., & Jiménez, F. (2009). Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.
- Matus, O., Faustino, J., & Jiménez, F. (2009). Guía para la identificación articipativa de zonas con potencial de recarga hídrica. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.
- McNeill, J.D., Labson, V.F., 1991. Geological mapping using VLF radio fields. In: Nabighian, M.C. (Ed.), *Geotechnical and Environmental Geophysics, Review and Tutorial*, vol. 1. Society of Exploration, Tulsa.
- MEA. *Ecosystems and human well-being: Our human planet. Summary for Decision Makers. Millennium Ecosystem Assessment*. Island Press. Washington D.C. 2005.
- MONTERROSO A.I.; GOMEZ D., J.D; J.D. ETCHEVERS C. GAY; J. CAMPO Y M. MARTÍNEZ. 2008. Spatial estimation of mean temperature and precipitation in Areas of scarce meteorological information. Publicado en la Revista Centro de Ciencias de la Atmósfera. Universidad Nacional Autónoma de México. Vol. 21, núm. 1. pp. 35-56.
- Moran M.S., Clarke T.R., Inoue Y., Vidal, A.: Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. *Remote Sens. Environ.*, 49, 246--263 (1994).
- MUÑOZ R. y RITTER A. 2005. *Hidrología Agroforestal*. Ediciones MundiPrensa. España. 348 p.
- ONU. (2012). *Agua para todos, agua para la vida: informa de las naciones unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo*. Cuarta edición. Francia.
- Oskooi, B., Pedersen, L.B., 2005. Comparison between VLF and RMT methods. A combined tool for mapping conductivity changes in the sedimentary cover. *J. Appl. Geophys.* 57, 227e241.

- Oskooi, B., Pedersen, L.B., 2005. Comparison between VLF and RMT methods. A combined tool for mapping conductivity changes in the sedimentary cover. *J. Appl. Geophys.*
- Parasnis, D.S., 1973. *Mining Geophysics: Methods in Geochemistry and Geophysics.* Elsevier, Amsterdam.
- Parasnis, D.S., 1973. *Mining Geophysics: Methods in Geochemistry and Geophysics.* Elsevier, Amsterdam.
- Pedrero, F., Albuquerque, A., Marecos Do Monte, H., Cavaleir 2011. Potencial use of reclaimed wastewater with GIS-based multi-criteria analysis in Portugal. *Resources, Conservation and Recycling* 56: 105-116. Impacto: 1.980 (2º cuartil, 53/181 en Environmental Scieces).
- Pedrero, F., Albuquerque, A., Marecos do Monte, H., Cavaleiro, V., & Alarcón, J. J. (2011). Application of GIS-based multi-criteria analysis for site selection of aquifer recharge with reclaimed water. *Resources, Conservation and Recycling*, 56(1), 105–116.
- Pedrero, F., Albuquerque, A., Marecos do Monte, H., Cavaleiro, V., & Alarcón, J. J. (2011). Application of GIS-based multi-criteria analysis for site selection of aquifer recharge with reclaimed water. *Resources, Conservation and Recycling*, 56(1), 105–116.
- Pedrero, F., Albuquerque, A., Marecos do Monte, H., Cavaleiro, V., & Alarcón, J. J. (2011). Application of GIS-based multi-criteria analysis for site selection of aquifer recharge with reclaimed water. *Resources, Conservation and Recycling*, 56(1), 105–116.
- PMD. Plan Municipal de desarrollo. (2013) Municipio de Capulálpam de Méndez. Febrero de 2013.
- PNUD, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, US. 2016. Informe sobre desarrollo humano 2011: Más allá de la escasez, poder pobreza y crisis mundial del agua (en línea). Nueva York, EEUU.

- Priego. A., Bocco G., Mendoza M., Garrido A., (2010). Propuesta para la generación semiautomatizada de unidades de paisajes. México, D.F. Instituto Nacional de Ecología-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental.
- Rahman, M. A., Rusteberg, B., Gogu, R. C., Lobo Ferreira, J. P., & Sauter, M. (2012). A new spatial multi-criteria decision support tool for site selection for implementation of managed aquifer recharge. *Journal of Environmental Management*, 99, 61–75.
- Rahman, M. A., Rusteberg, B., Gogu, R. C., Lobo Ferreira, J. P., & Sauter, M. (2012). A new spatial multi-criteria decision support tool for site selection for implementation of managed aquifer recharge. *Journal of Environmental Management*, 99, 61–75.
- Rahman, M. A., Rusteberg, B., Uddin, M. S., Lutz, A., Saada, M. A., & Sauter, M. (2013). An integrated study of spatial multicriteria analysis and mathematical modelling for managed aquifer recharge site suitability mapping and site ranking at Northern Gaza coastal aquifer. *Journal of Environmental Management*, 124, 25–39.
- Rahman, M. A., Rusteberg, B., Uddin, M. S., Lutz, A., Saada, M. A., & Sauter, M. (2013). An integrated study of spatial multicriteria analysis and mathematical modelling for managed aquifer recharge site suitability mapping and site ranking at Northern Gaza coastal aquifer. *Journal of Environmental Management*, 124, 25–39.
- Randall R. (2000) métodos alternos de geofísica en la búsqueda de agua subterránea. 1 st Joint World Congress on Groundwater.
- Romano, G., Dal Sasso, P., Trisorio Liuzzi, G., & Gentile, F. (2015). Multi-criteria decision analysis for land suitability mapping in a rural area of Southern Italy. *Land Use Policy*, 48, 131–143.
- Romano, G., Dal Sasso, P., Trisorio Liuzzi, G., & Gentile, F. (2015). Multi-criteria decision analysis for land suitability mapping in a rural area of Southern Italy. *Land Use Policy*, 48, 131–143.

- Rouse, J; Haas, R; Schell, J; Deering, D; Harlan, J. (1974). Monitoring the vernal advancement and retrogradation (Greenwave effect) of natural vegetation. Greenbelt. Maryland, US
- Salas, C. 2011. Comportamiento hidrológico y erosivo en usos de suelo prioritarios de la campiña lechera en Santa Cruz, Turrialba.
- Sandholt, I., Rasmussen, K., Andersen, J.: A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. *Remote Sensing of Environment*, 79(2-3), 213--224 (2002)
- SEMARNAT (2011). Protección, restauración y conservación de suelos forestales, segunda parte, México D.F.
- Senanayake, I. P., Dissanayake, D. M. D. O. K., Mayadunna, B. B., & Weerasekera, W. L. (s/f). An approach to delineate groundwater recharge potential sites in Ambalantota, Sri Lanka using GIS techniques. *Geoscience Frontiers*.
- SGM (2009) Estudio hidrogeológico en la mina Natividad, Oaxaca. Revista GeoCiencia. Servicio Geológico Mexicano. México.
- SGM, Servicio Geológico Mexicano (2013). Rocas Metamórficas. Obtenida de <http://portalweb.sgm.gob.mx/museo/es/rocas/rocas-metamorficas>. Consultada en julio 2016.
- SGM, Servicio Geológico Mexicano (2013). Rocas Metamórficas. Obtenida de <http://portalweb.sgm.gob.mx/museo/es/rocas/rocas-sedimentarias>. Consultada en julio 2016.
- Sharma, S.P., Kaikkonen, P., 1998. Two-dimensional non-linear inversion of VLF-R data using simulated annealing. *Geophys. J. Int.* 133.
- Shiklomanov, Igor. (2002) World Water resources at the beginning of the 21st century, PHIUNESCO.
- Sobrino, J. A., J. C. Jiménez-Muñoz, y L. Paolini. 2004. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sens. Environ.* 90:434-440.
- Sumathi, V. R., Natesan, U., & Sarkar, C. (2008). GIS-based approach for optimized siting of municipal solid waste landfill. *Waste Management*, 28(11), 2146–2160.

- Sumathi, V. R., Natesan, U., & Sarkar, C. (2008). GIS-based approach for optimized siting of municipal solid waste landfill. *Waste Management*, 28(11), 2146–2160.
- Sundararajan, N., Ramesh Babub, V., Shiva, P.N., Srinivas, Y., 2006. VLFPROS e a Matlab code for processing of VLF-EM data. *Comput. Geosci.* 32.
- Tabbagh, A., Benderitter, Y., Andrieux, P., Decriaud, J.P., Guerin, R., 1991. VLF resistivity mapping and verticalisation of the electric field. *Geophys. Prospect.*
- Telford, W.M., King, W.F., Becker, A., 1977. VLF mapping geological structure. *Geol. Surv. Can.* 25. No. 76.
- Universidad Autónoma de Guerrero (2007) Resumen del estudio geohidrológico realizado en la cuenca de la Y, Capulalpám de Méndez. México
- USG. 2013. Using the USGS Landsat 8 Product. U.S. Department of the Interior. U.S. Geological Survey. URL: <http://landsat.usgs.gov>.
- Velez, V. s.f. Métodos para determinar la recarga en acuíferos (en línea).
- Wang, P.X., Li, X., Gong, J., Song, C.: Vegetation temperature condition index and its application for drought monitoring. In: IEEE International, Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), pp. 141--143, Sydney (Australia) (2001) 8.
- WRI. *Water: Critical shortages ahead? World Resources 1998-99: Environmental change and human health*. 1999. Disponible en: http://pubs.wri.org/pubs_content_text.cfm?ContentID=1030. Fecha de consulta: octubre de 2016.