



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

**INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION EN CIENCIAS
AGRÍCOLAS**

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS

BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL ACUÍFERO IRAPUATO - VALLE: COMPONENTE AGRÍCOLA

DAVID GARCÍA GARCÍA

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO

2015

La presente tesis titulada: **BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL ACUÍFERO IRAPUATO - VALLE: COMPONENTE AGRÍCOLA**; realizada por el alumno: **David García García**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS

HIDROCIENCIAS

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



DR. JESÚS CHÁVEZ MORALES

ASESOR



DR. ROBERTO ASCENCIO HERNÁNDEZ

ASESOR



M.C. GUILLERMO CARRILLO FLORES

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Diciembre de 2015



BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL ACUÍFERO IRAPUATO - VALLE:
COMPONENTE AGRÍCOLA
García García David, MC.
Colegio de Postgraduados, 2015

RESUMEN

El conocimiento de las diferentes componentes que integran un balance de aguas subterráneas permite una evaluación integral de los acuíferos; sin embargo es necesario analizar con mayor detenimiento aquellas que por su grado de impacto sean más representativas. En el Acuífero Irapuato-Valle, la agricultura demanda la mayor cantidad de agua subterránea por lo que es necesario analizar y estimar el volumen utilizado por este sector. El presente trabajo presenta un análisis particular de la componente agrícola y su integración en la actualización del balance de aguas subterráneas. El análisis permitió estimar la demanda de agua en el sector agrícola a partir del uso de imágenes de satélite, bajo las condiciones de eficiencias y cultivos reportados en las estadísticas de la Comisión Nacional del Agua de los distritos y unidades de riego. En los resultados obtenidos a partir de las imágenes, se identificó una superficie de 12,948.13 ha que hacen uso de agua subterránea sin contar con derechos de concesión. La demanda de agua en el sector agrícola estimada con la metodología empleada fue de 544.97 Hm³. Con base en ello, se actualizó el balance de aguas subterráneas mediante la metodología propuesta y la establecida por la Comisión Nacional del Agua. Los resultados obtenidos con la metodología propuesta indican un déficit de 346.50 Hm³, 113% superior al valor establecido con la normatividad vigente de la CONAGUA.

Palabras clave: sobreexplotación, agricultura, Acuífero Irapuato – Valle, equilibrio, sustentabilidad.



BALANCE OF GROUNDWATER AQUIFER IRAPUATO - VALLE:
AGRICULTURAL COMPONENT
García García David, MC.
Colegio de Postgraduados, 2015

ABSTRACT

Knowledge of the different components that make up a balance of groundwater allows a comprehensive assessment of aquifers; however it is necessary to examine more closely those that by their degree of impact more representative. In Irapuato-Valle aquifer, agriculture demand as much groundwater so it is necessary to analyze and estimate the volume used by this sector. The research presents a specific analysis of the agricultural component and its integration in updating the balance of groundwater. The analysis allowed to estimate the demand for water in agriculture through the use of satellite images under the terms of efficiencies and crops reported in the statistics of the Comisión Nacional del Agua districts and irrigation units. The results obtained from the images, an area of 12,948.13 hectares that use groundwater without concession rights was identified. Water demand in the methodology estimated agricultural sector was 544.97 Hm³. Subsequently, the balance of groundwater through the methodology proposed and established by the National Water Commission was updated. The results obtained with the proposed methodology indicate a deficit of 346.50 Hm³, 113% higher than the value set with the current regulations of the CONAGUA.

Keywords: overexploitation, agriculture, Aquifer Irapuato - Valle, balance, sustainability.



AGRADECIMIENTOS

Le agradezco a Dios por haberme acompañado y guiado a lo largo de mis estudios, por ser mi fortaleza en momentos de debilidad y por haberme dado salud para lograr mis objetivos; además de su infinita bondad y amor.

Al pueblo de México, quien a través del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), me brindo una beca para realizar mis estudios.

Al Colegio de Postgraduados por permitirme ser parte de su alumnado y realizar mis estudios de postgrado.

Al Dr. Roberto Ascencio Hernández por la dirección de esta tesis y todo el apoyo brindado para poder llevarla a cabo.

Al Dr. Jesús Chávez Morales por sus valiosos consejos e invaluable apoyo para poder culminar mis estudios de maestría.

Al M.C. Guillermo Carrillo Flores por el apoyo para la realización del presente trabajo.

Al Dr. Abel Quevedo Nolasco por el apoyo para culminar mis estudios.

A los Doctores Jorge Arturo Salgado Tránsito y Enrique Mejía Sáenz por su invaluable apoyo para poder llevar a cabo mis estudios de maestría.

A las instituciones donde he colaborado (ANEI A.C, COLMERN A.C.), a quienes debo parte importante de mi formación profesional.

A todos y cada uno de mis amigos, compañeros de aula y trabajo y cada una de las personas que me han brindado su amistad, apoyo y palabras de aliento.



DEDICATORIA

A ti Dios, por permitirme la vida.

A ti mamá por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por cada una de las palabras que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor.

A ti papá porque gracias a tu forma de ver la vida, has sido el forjador de la persona que soy hoy en día.

A ti hermana por todas y cada una de las palabras que me alientan a seguir adelante. Por todos los momentos vividos y la fortuna de contar con una personita como tú en mi vida.

A ti hermano y tu familia por estar siempre a mi lado; esperando que nuestra amistad perdure por siempre y con la emoción de la futura llegada de mi pequeño sobrino(a).

A toda mi familia, fuente de apoyo constante e incondicional en toda mi vida y más aún en todos y cada uno de los años de carrera profesional. En especial a ti Kari cuyas palabras han hecho que mi camino este lleno de éxitos.

A todos aquellos amigos que me han acompañado a lo largo de mi vida y que sin duda han contribuido tanto en mi crecimiento personal como profesional. Para no omitir a alguno prefiero no mencionarlos; pero saben que se les estima.

A dos personitas que marcaron mi vida (Ashley e Ian), que aunque se adelantaron en el camino; sé que si Dios así lo quiere nos volveremos a encontrar.

"¿Has contemplado a un hombre hábil en su trabajo? Delante de reyes es donde él se apostará, no se apostará delante de hombres comunes" (Proverbios 22:29)



CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	12
2. OBJETIVOS.....	15
3. HIPÓTESIS	15
4. REVISIÓN DE LITERATURA	16
4.1. LOS RECURSOS HÍDRICOS EN MÉXICO	16
4.1.1. Aguas Superficiales	17
4.1.2. Aguas Subterráneas.....	20
4.2. ESTIMACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	24
4.2.1. El Ciclo Hidrológico y el Balance Hídrico.....	24
4.2.2. Balance Hidrológico	30
4.2.3. Importancia del Balance Hídrico en la definición de disponibilidad y uso sustentable del agua subterránea.....	32
4.2.4. Expresiones del Balance Hídrico de Aguas Subterráneas.....	33
4.2.5. Componentes del balance hídrico de las aguas subterráneas.....	35
4.2.6. Estimación de los componentes del balance hídrico de las aguas subterráneas	36
5. MATERIALES Y MÉTODOS	54
5.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	54
5.1.1. Localización de la Zona de Estudio.	54
5.1.2. Hidrografía.....	55
5.1.3. Fisiografía.....	56
5.1.4. Clima.....	57
5.1.5. Áreas Naturales Protegidas	58
5.1.6. Edafología.....	59
5.1.7. Ámbito Sociodemográfico	60
5.1.8. Eventos Hidrometeorológicos Extremos.....	61
5.1.9. Infraestructura Hidráulica Urbana	62
5.1.10. Infraestructura Hidroagrícola	64
5.1.11. Infraestructura de Red Hidrometeorológica.....	71



5.2. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL ACUÍFERO.....	74
5.2.1. <i>Recopilación de la Información</i>	74
5.2.2. <i>Determinación del Balance de Aguas Subterráneas</i>	76
5.2.3. <i>Balance Oficial</i>	77
5.3.2. <i>Balance Real Calculado</i>	87
6. RESULTADOS	96
6.1. VOLÚMENES MEDIOS MENSUALES Y ANUALES DE ESCURRIMIENTO....	96
6.2 SITUACIÓN ACTUAL DEL ACUÍFERO.....	96
6.3 DEMANDA ACTUAL DEL ACUÍFERO.....	97
6.3.1 <i>Volúmenes concesionados en el acuífero</i>	97
6.3.2 <i>Volúmenes medios mensuales y anuales requeridos para los distintos usos</i>	98
6.4 BALANCE SUBTERRÁNEO DEL ACUÍFERO.....	101
6.4.1. <i>Balance Oficial</i>	101
6.4.2. <i>Balance Real Estimado</i>	103
6.4.3. <i>Comparativo de Balances</i>	105
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	107
8. BIBLIOGRAFÍA	110
9. ANEXOS	114
ANEXO A.....	115
ANEXO B.....	123
ANEXO C.....	130
ANEXO D.....	143
ANEXO E.....	145



CONTENIDO DE CUADROS

CUADRO 1.	POBLACIÓN EN LA ZONA DE INFLUENCIA DEL ACUÍFERO IRAPUATO - VALLE ..	60
CUADRO 2.	MUNICIPIOS DENTRO DEL ACUÍFERO IRAPUATO-VALLE.	64
CUADRO 3.	CARACTERÍSTICAS DE LAS PRINCIPALES PRESAS DENTRO DEL ÁREA DE INFLUENCIA DEL ACUÍFERO IRAPUATO-VALLE.	65
CUADRO 4.	SUPERFICIE DE PARCELAS DEL DR 011 ALTO RÍO LERMA, QUE SE UBICAN DENTRO DE LOS LÍMITES DEL ACUÍFERO IRAPUATO-VALLE.	67
CUADRO 5.	RED DE CANALES DEL DR 011 ALTO RÍO LERMA DENTRO DEL ACUÍFERO IRAPUATO-VALLE.	69
CUADRO 6.	SUPERFICIE DE UNIDADES DE RIEGO DENTRO DEL ACUÍFERO IRAPUATO-VALLE.	70
CUADRO 7.	ESTACIONES METEOROLÓGICAS EN EL ÁREA DE INFLUENCIA DEL ACUÍFERO IRAPUATO-VALLE.	71
CUADRO 8.	ESTACIONES HIDROMÉTRICAS EN EL ÁREA DE INFLUENCIA DEL ACUÍFERO IRAPUATO-VALLE.	73
CUADRO 9.	USO DEL AGUA EN APROVECHAMIENTOS SUBTERRÁNEOS (PRIMER ANÁLISIS).	84
CUADRO 10.	USO DEL AGUA EN APROVECHAMIENTOS SUBTERRÁNEO, SEGUNDO ANÁLISIS.	86
CUADRO 11.	EFICIENCIA GLOBAL EN EL SECTOR PÚBLICO URBANO EN LOS MUNICIPIOS DENTRO DE LA ZONA DE ESTUDIO.	91
CUADRO 12.	EFICIENCIA GLOBAL EN EL SECTOR INDUSTRIAL EN LA ZONA DE ESTUDIO. ..	91
CUADRO 13.	VOLUMEN DE ESCURRIMIENTO MEDIO ANUAL EN LAS CUENCAS HIDROLÓGICAS QUE INTERVIENEN EN EL ACUÍFERO IRAPUATO-VALLE.	96
CUADRO 14.	VOLÚMENES DE AGUA SUBTERRÁNEA CONCESIONADOS POR MUNICIPIO	97
CUADRO 15.	VOLÚMENES DE AGUA UTILIZADOS EN LAS ZONAS AGRÍCOLAS BAJO RIEGO PRESENTES EN EL ACUÍFERO IRAPUATO-VALLE.....	98
CUADRO 16.	VOLÚMENES DE AGUA SUBTERRÁNEA CONCESIONADOS POR MUNICIPIO PARA EL SECTOR PÚBLICO-URBANO.....	99
CUADRO 17.	VOLÚMENES DE AGUA SUBTERRÁNEA CONCESIONADOS POR MUNICIPIO PARA EL SECTOR INDUSTRIAL.....	100
CUADRO 18.	VOLUMEN TOTAL UTILIZADO POR EL SECTOR INDUSTRIAL.....	100
CUADRO 19.	BALANCE GENERAL DE AGUAS EN EL ACUÍFERO IRAPUATO-VALLE.	105
CUADRO 20.	NIVELES DE PROCESAMIENTO DE IMÁGENES RAPIDEYE	146



CONTENIDO DE FIGURAS

FIGURA 1.	DISPONIBILIDAD NATURAL MEDIA PER CÁPITA EN MÉXICO (INEGI 2013).....	16
FIGURA 2.	DISTRIBUCIÓN DEL AGUA EN MÉXICO POR USO CONSUNTIVO	17
FIGURA 3.	REGIONES HIDROLÓGICAS DE MÉXICO (INEGI, 2015)	17
FIGURA 4.	PRINCIPALES RÍOS DE MÉXICO (INEGI 2013).....	18
FIGURA 5.	PRINCIPALES LAGOS Y LAGUNAS DE MÉXICO (INEGI 2005).....	19
FIGURA 6.	DISPONIBILIDAD NATURAL MEDIA ANUAL DE AGUA EN MÉXICO (CONAGUA 2013) ..	20
FIGURA 7.	DELIMITACIÓN DE LOS ACUÍFEROS DE MÉXICO (CONAGUA, 2014)	21
FIGURA 8.	ESTATUS DE DISPONIBILIDAD DE AGUA EN ACUÍFEROS DE MÉXICO (CONAGUA, 2014)	22
FIGURA 9.	DISTRIBUCIÓN DE VEDAS SUBTERRÁNEAS EN MÉXICO (CONAGUA, 2014)	23
FIGURA 10.	EVOLUCIÓN DEL USO DE AGUA EN MÉXICO	23
FIGURA 11.	REPRESENTACIÓN DEL CICLO HIDROLÓGICO	25
FIGURA 12.	REPRESENTACIÓN DEL SISTEMA HIDROLÓGICO	25
FIGURA 13.	PRINCIPALES TIPOS DE PRECIPITACIÓN	26
FIGURA 14.	PROCESO DE EVAPORACIÓN	27
FIGURA 15.	PROCESO DE CONDENSACIÓN.....	28
FIGURA 16.	PROCESO DE TRANSPIRACIÓN	28
FIGURA 17.	COMPONENTES QUE INTERVIENEN EN EL PROCESO DE INTERCEPCIÓN.....	29
FIGURA 18.	PROCESO DE ESCORRENTÍA SUPERFICIAL	29
FIGURA 19.	ESCORRENTÍA SUBSUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEA.....	30
FIGURA 20.	BALANCE DE AGUA EN MÉXICO.....	31
FIGURA 21.	EJEMPLO DEL ÁLGEBRA DE MAPAS APLICADO A MAPAS RASTER.....	38
FIGURA 22.	ESQUEMA DE BALANCE HÍDRICO EN EL SUELO.....	38
FIGURA 23.	ESQUEMA DE POZO DE OBSERVACIÓN PARA MEDIR NIVEL FREÁTICO.....	40
FIGURA 24.	MEDIDOR DE FILTRACIÓN DE CABEZA CONSTANTE PARA LECHOS DE CANALES (LERNER, ET.AL. 1990).....	41
FIGURA 25.	ESQUEMATIZACIÓN DE LEY DE DARCY PARA FLUJOS SUBTERRÁNEOS	43
FIGURA 26.	RED DE FLUJO QUE ESQUEMATIZA EL FLUJO SUBTERRÁNEO NATURAL EN UNA REGIÓN DE CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA	44
FIGURA 27.	SUPERFICIE EQUIPOTENCIALES EN UN ACUÍFERO LIBRE (A) CON COMPONENTE VERTICAL DE FLUJO Y EN UN ACUÍFERO CONFINADO (B) CON FLUJO HORIZONTAL	45
FIGURA 28.	SUPERFICIE FREÁTICA GENERADA POR UNA RECARGA UNIFORME	46
FIGURA 29.	ESQUEMA DE VARIABLES INCLUIDAS EN EL CÁLCULO DE LA EFICIENCIA DE APLICACIÓN	48
FIGURA 30.	URBANIZACIÓN DE ZONAS AGRÍCOLAS	49
FIGURA 31.	DIVERSAS FUENTES DE RECARGA URBANA.....	50
FIGURA 32.	MÉTODOS DE RECARGA ARTIFICIAL EN UN ACUÍFERO	51
FIGURA 33.	REPRESENTACIÓN DE UN MODELO HIDROGEOLOGÍCO CONCEPTUAL.....	53
FIGURA 34.	UBICACIÓN DEL ACUÍFERO IRAPUATO – VALLE	54
FIGURA 35.	HIDROGRAFÍA DEL ACUÍFERO IRAPUATO – VALLE	55
FIGURA 36.	PROVINCIAS FISIAGRÁFICAS PRESENTES DENTRO DEL ACUÍFERO IRAPUATO –VALLE.	56
FIGURA 37.	CLIMATOLOGÍA DEL ACUÍFERO IRAPUATO – VALLE.....	57
FIGURA 38.	ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS DE GUANAJUATO (INSTITUTO ESTATAL DE ECOLOGÍA, 2013).....	58
FIGURA 39.	EDAFOLOGÍA DEL ACUÍFERO IRAPUATO – VALLE.....	59
FIGURA 40.	ZONAS EN RIESGO POR INUNDACIÓN EN EL ACUÍFERO	61

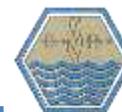


FIGURA 41.	MUNICIPIOS QUE INTERVIENEN EN EL ÁREA DE INFLUENCIA DEL ACUÍFERO IRAPUATO-VALLE.	63
FIGURA 42.	PRESAS DE ALMACENAMIENTO DENTRO DEL ACUÍFERO IRAPUATO-VALLE.	66
FIGURA 43.	POZOS AGRÍCOLAS PERTENECIENTES A LOS DISTRITOS DE RIEGO 011 Y UNIDADES DE RIEGO UBICADOS DENTRO DEL ACUÍFERO IRAPUATO-VALLE.	67
FIGURA 44.	DISTRITOS DE RIEGO EN EL ÁREA DE INFLUENCIA DEL ACUÍFERO IRAPUATO-VALLE. .	68
FIGURA 45.	DISTRITOS DE RIEGO EN EL ÁREA DE INFLUENCIA DEL ACUÍFERO IRAPUATO-VALLE. .	69
FIGURA 46.	UNIDADES DE RIEGO UBICADAS DENTRO DEL ACUÍFERO IRAPUATO-VALLE.	70
FIGURA 47.	ESTACIONES METEOROLÓGICAS EN EL ÁREA DE INFLUENCIA DEL ACUÍFERO IRAPUATO-VALLE.	72
FIGURA 48.	ESTACIONES HIDROMÉTRICAS EN EL ÁREA DE INFLUENCIA DEL ACUÍFERO IRAPUATO-VALLE.	73
FIGURA 49.	DIAGRAMA DE FLUJO DE METODOLOGÍAS PARA DETERMINACIÓN DE BALANCE SUBTERRÁNEO	74
FIGURA 50.	REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DEL BALANCE OFICIAL DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.	79
FIGURA 51.	CUENCAS HIDROLÓGICAS QUE FORMAN PARTE DEL ACUÍFERO IRAPUATO-VALLE.	80
FIGURA 52.	BASE DE DATOS CONAGUA (REPDA Y PLATAFORMA SIG)	83
FIGURA 53.	APROVECHAMIENTOS SUBTERRÁNEOS QUE GEOGRÁFICAMENTE SE ENCUENTRAN DENTRO DEL ACUÍFERO IRAPUATO-VALLE.	84
FIGURA 54.	USOS DEL AGUA DE APROVECHAMIENTOS SUBTERRÁNEOS DEL ACUÍFERO IRAPUATO-VALLE (PRIMER ANÁLISIS).	85
FIGURA 55.	APROVECHAMIENTOS SUBTERRÁNEOS QUE PERTENECEN AL ACUÍFERO IRAPUATO-VALLE, SEGÚN SUS DATOS.	86
FIGURA 56.	USOS DEL AGUA DE LOS APROVECHAMIENTOS SUBTERRÁNEOS DEL ACUÍFERO IRAPUATO-VALLE (SEGUNDO ANÁLISIS).	87
FIGURA 57.	BASE DE DATOS DE CENSOS DE APROVECHAMIENTOS SUBTERRÁNEOS	90
FIGURA 58.	DISTINTOS TIPOS DE PATRONES AGRÍCOLAS OBTENIDOS MEDIANTE SATÉLITES	93
FIGURA 59.	INFORMACIÓN DE PATRÓN DE CULTIVOS DENTRO DEL ACUÍFERO IRAPUATO – VALLE	94
FIGURA 60.	GRÁFICAS COMPARATIVAS DE RESULTADOS PARA BALANCES DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	106
FIGURA 61.	DELIMITACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO, PARA SOLICITAR IMÁGENES DE SATÉLITE ...	145
FIGURA 62.	COMPROBACIÓN DE COBERTURA DE SUPERFICIE DE ACUÍFERO IRAPUATO-VALLE CON IMÁGENES RAPID EYE	147
FIGURA 63.	PROCESAMIENTO DE IMÁGENES DE SATÉLITE CON ERDAS IMAGINE 2011	148
FIGURA 64.	HOJAS DE CÁLCULO PARA TRANSFORMACIÓN DE RADIANCIA A REFLECTANCIA ...	148
FIGURA 65.	MODELO PARA CONVERSIÓN DE RADIANCIA A REFLECTANCIA	149
FIGURA 66.	DIFERENCIAS ENTRE IMÁGENES CON CORRECCIÓN POR RADIANCIA – REFLECTANCIA	149
FIGURA 67.	MODELO PARA CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA EN IMÁGENES DE SATÉLITE.....	150
FIGURA 68.	PROCESAMIENTO DE MOSAICO EN ERDAS IMAGINE 2011	151
FIGURA 69.	DIFERENTES MOSAICOS UTILIZANDO DIFERENTES ALGORITMOS DE CÁLCULO.....	151
FIGURA 70.	MOSAICO FINAL DE LA ZONA DE ESTUDIO	152
FIGURA 71.	MENÚ SPATIAL ANALYST DE ARCGIS	153
FIGURA 72.	VENTANA RASTER CALCULATOR - ARCGIS.....	154
FIGURA 73.	IMAGEN NDVI EN ESCALA DE GRISES	154



FIGURA 74.	IMAGEN NDVI CON NUEVA COLORACIÓN.....	155
FIGURA 75.	USO DE NDVI, PARA CUANTIFICACIÓN DE SUPERFICIE AGRÍCOLA DE RIEGO NO INVENTARIADA.....	156
FIGURA 76.	SUPERFICIE DE RIEGO CUYO TIPO DE APROVECHAMIENTO ES DE ORIGEN SUBTERRÁNEO.....	157
FIGURA 77.	USO DE CROPWAT PARA DETERMINAR REQUERIMIENTOS DE RIEGO	158
FIGURA 78.	DETERMINACIÓN DE VOLÚMENES APLICADOS EN EL ACUÍFERO.....	158
FIGURA 79.	DETERMINACIÓN DE VOLÚMENES TOTALES EXTRAÍDOS DEL ACUÍFERO	159



1. INTRODUCCIÓN

En todo el mundo, la actividad humana y los factores naturales están agotando los recursos hídricos disponibles. Aunque en la última década la sociedad se ha ido concienciando de la necesidad de mejorar la gestión y la protección del agua, los criterios económicos y los factores políticos todavía tienden a dirigir todos los ámbitos de la política del agua. La ciencia y las mejores prácticas a menudo no reciben la atención adecuada. (GreenFacts. 2009)

Hoy en día los estudios en la investigación sobre el agua son abundantes y permiten ver la evolución que ha tenido este elemento desde diversas perspectivas. No es novedad que la mayoría se centren en el estudio del agua superficial y más recientemente en el ciclo hidrológico. Sin embargo, poca ha sido la atención que ha tenido el estudio del agua subterránea. El interés es escaso si se tiene en cuenta la importancia que reviste para el equilibrio de los ecosistemas y para mantener un equilibrio favorable para todos los componentes del ambiente. Quizá el hecho se debe a que los impactos que estas puedan tener no son tan visibles y son a más largo plazo que aquellos relacionados con el agua superficial y no han llamado la atención pública. Además, los estudios técnicos y científicos sobre su funcionamiento son relativamente recientes, lo que ha limitado comprender su papel como eje primordial del ambiente (FEA, 2006).

En todo el estado de Guanajuato existe una condición de sobreexplotación de acuíferos, consecuencia de una ruptura en el equilibrio que debe haber entre la recarga de los almacenamientos subterráneos y la extracción por bombeo de pozos. En la entidad hay aproximadamente 16 mil pozos (CONAGUA 2013), que equivale a cerca de 25 por ciento de todos los pozos del país.

El resultado de la sobreexplotación en el estado es el descenso en los niveles del agua subterránea, que oscilan entre uno y tres metros al año, alcanzando en algunas zonas profundidades de bombeo de hasta 450 metros (CEAG – CONAGUA, 2010). Esta situación a su vez provoca que los costos de operación de los pozos se incrementen constantemente.



Por otra parte, el descenso del nivel del agua subterránea causa asentamientos de terreno, produce fallas que afectan a la infraestructura urbana en ciudades como Celaya, Irapuato, Abasolo y Silao.

La región del acuífero Irapuato-Valle se caracteriza porque la competencia por el uso del agua aumenta día con día a fin, de satisfacer las necesidades de los usos: doméstico, agrícola, ganadero, industrial y de servicios. Esta competencia ha ocasionado que la extracción del agua subterránea se incremente año con año, a costa del almacenamiento acuífero.

El Acuífero Irapuato – Valle se encuentra en el centro del estado de Guanajuato, en donde las principales actividades económicas son la agricultura y la industria; lo cual le hace tener una participación muy importante en el denominado corredor industrial del bajío. Debido a lo anterior, en la zona que domina el acuífero se presentan problemas de contaminación por desechos de aguas residuales ocasionados por el crecimiento urbano, además del fuerte impulso y crecimiento de los parques industriales.

De acuerdo con lo anterior, los diferentes niveles de gobierno han establecido planes de manejo para la conservación de los mantos acuíferos; sin embargo al carecer de información veraz y actualizada, se cae en la disyuntiva de si dichos organismos están utilizando los valores de disponibilidad reales. Además existe incertidumbre en relación a si los balances que se reportan oficialmente cumplen con su propósito y como consecuencia, si se están desarrollando los mecanismos adecuados de gestión y planeación que permitan restablecer el equilibrio del acuífero.

Con base en lo anterior, podemos jerarquizar los principales problemas que se encuentran en el acuífero:

- Información de Balance desactualizada y poco fiable para realizar planes integrales de recuperación y manejo del acuífero.
- Abatimiento del nivel freático debido a la sobreexplotación del acuífero.
- Distribución del recurso de manera inequitativa entre los diferentes sectores presentes en el acuífero.



- Bajas eficiencias globales de aprovechamiento en los diferentes sectores.

Como se puede apreciar, la problemática se puede dividir en varias vertientes; sin embargo, la que mayor impacto tiene es la desactualización de la información y por ende la mala planeación y aplicación de mecanismos que permitan dar solución a los demás aspectos que se mencionan.

Por ello es importante conocer el estado actual del acuífero, su comportamiento a partir de censos actuales y que permitan a las dependencias de gobierno, asociaciones civiles, instituciones educativas y a la sociedad en su conjunto tener más y mejores planes de manejo que tengan como finalidad garantizar el abasto del recurso agua a los diferentes sectores, sin afectar el equilibrio y disponibilidad del acuífero.

El balance hídrico consiste en la aplicación del principio de la conservación de masa a una cierta región de volumen conocido y definida por determinadas condiciones de contorno. Dicho balance depende directamente de los volúmenes de entrada y salida que se registran dentro de los límites del acuífero.

Para el presente estudio, se realizó la estimación del balance global de aguas subterráneas, a partir de dos vertientes: una el balance con datos oficiales reportados por la CONAGUA en el Diario Oficial de la Federación y la otra con información obtenida de censos de aprovechamientos actualizados por dependencias de los diferentes niveles de gobierno en el estado de Guanajuato; así como del uso de tecnologías de percepción remota.



2. OBJETIVOS

2.1. GENERAL

- Determinar el volumen de aguas subterráneas correspondiente a la componente agrícola (mediante el uso de imágenes de satélite), del Acuífero Irapuato – Valle (1119), en el estado de Guanajuato.

2.2. PARTICULARES

- Actualizar el balance de aguas subterráneas del Acuífero Irapuato – Valle.
- Integrar la información de diferentes dependencias para la comparación del balance de aguas subterráneas oficial y el calculado propuesto en la investigación.
- Analizar y estimar la demanda de agua en el sector agrícola mediante el uso de percepción remota (imágenes de satélite).

3. HIPÓTESIS

El balance de aguas subterráneas, permitirá conocer el estado actual del acuífero, especialmente el comportamiento de la componente agrícola; permitiendo de esta manera conocer los volúmenes reales de demanda (salidas) que son utilizados en la agricultura y complementándose con los requeridos por otros sectores, conociéndose de esta manera el estatus de disponibilidad actual en el acuífero.

4. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1. *Los Recursos Hídricos en México*

México cuenta con una extensión territorial de aproximadamente dos Millones de kilómetros cuadrados, de los cuales cerca del 50% es de terrenos montañosos y el 50% restante le corresponde a terrenos de topografía más o menos plana. En estos últimos es donde se encuentran asentados los grandes núcleos poblacionales y se desarrollan la mayor parte de las actividades económicas, para los cuales son de vital importancia los recursos hídricos. Sin embargo, como se aprecia en la Figura 1, la distribución del agua en el territorio nacional es irregular, debido a la gran diversidad fisiográfica y climática (UNAM, 2009).



Figura 1. Disponibilidad natural media per cápita en México (Inegi 2013)

De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (2013); el uso consuntivo del agua en México se clasifica en:

- Agrícola, el cual incluye además el pecuario y el acuícola.
- Abastecimiento público para uso doméstico y público-urbano.
- Industrial bajo la modalidad de industria autoabastecida y que incluye a parte de la industria, los usos agroindustrial, servicios y comercio.
- Termoeléctrico para plantas generadoras de electricidad que no son hidroeléctricas.

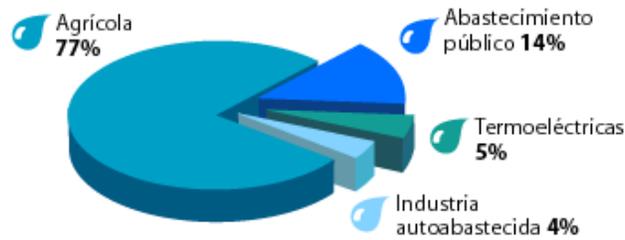


Figura 2. Distribución del Agua en México por Uso Consuntivo

Para satisfacer las necesidades anteriores se hace uso tanto de las aguas superficiales disponibles como de las aguas subterráneas, cuya aportación es cada vez más importante.

4.1.1. Aguas Superficiales

En México se presenta un promedio anual de 780 mm de precipitación pluvial, que corresponde a un volumen de 1,532 millones de m³. En la zona norte y en el altiplano (a los cuales les corresponde el 52 % del territorio) la lluvia media anual es inferior a los 500 mm, y en sólo una porción del sureste (7% del territorio), la precipitación alcanza valores superiores a los 2,000 mm anuales. La distribución orográfica y climática origina en gran medida que la mayor parte del territorio sea de zonas semiáridas. Se considera que el 50 % del escurrimiento anual total se concentra en los ríos más caudalosos ubicados en el sureste del país, cuya región hidrológica comprende sólo el 20 % de la superficie total del territorio. De esta forma, el agua se encuentra disponible en escurrimientos superficiales cuyo volumen promedio se estima en 410,164 millones de m³ anuales (CONAGUA, 2014).



Figura 3. Regiones hidrológicas de México (Inegi, 2015)

México posee 314 cuencas hidrológicas en las cuales fluyen los numerosos ríos y arroyos del país, los cuales se encuentran agrupados en tres vertientes: pacífico, golfo y la vertiente interior. Sin embargo, para propósitos de administración de las aguas nacionales, especialmente de la publicación de la disponibilidad, la Conagua ha definido 731 cuencas hidrológicas, organizadas en 37 regiones hidrológicas que se muestran en la Figura 3, y a su vez se agrupan en las 13 regiones hidrológico-administrativas (RHA). En la Figura 4 se observan las principales corrientes superficiales de México.



Figura 4. Principales ríos de México (Inegi 2013).

De todos los ríos del país, existen siete que por su importancia y cobertura; son los principales (Grijalva-Usumacinta, Papaloapan, Coatzacoalcos, Balsas, Pánuco, Santiago y Tonalá), que constituyen 22% de la superficie continental del país y que canalizan dos terceras partes del escurrimiento superficial. Cabe mencionar al Río Bravo que también forma parte de la red hidrológica nacional y que sirve como frontera natural con los Estados Unidos (INEGI 2013).

Dentro del territorio nacional existen 70 lagos que cubren una superficie cercana a las 371 mil hectáreas. El mayor número de lagos en el país se localiza en la zona del Eje Volcánico Transversal. El volumen almacenado en los lagos y lagunas de país, es de poco más de 6.5 km³ (INEGI, 2005).



Figura 5. Principales lagos y lagunas de México (Inegi 2005)

Adicionalmente México posee más de 4 mil 500 embalses artificiales, de los cuales 667 están clasificados como “grandes Presas”. La capacidad de almacenamiento de las Presas en el país es del orden de 150 km^3 , que equivale a 40% del escurrimiento promedio anual del país. Sin embargo, la cantidad de agua almacenada en ellas varía de un año a otro dependiendo de la cantidad de lluvia (CONAGUA, 2013).

La disponibilidad natural de agua no es homogénea a lo largo del territorio nacional, así como tampoco lo es su disponibilidad estacional y esto se debe a que México se encuentra en latitudes donde la precipitación se presenta sólo en algunos meses del año. Esta heterogeneidad en la disponibilidad de agua dificulta el sistema de gestión del recurso ya que implica un mayor costo en infraestructura de almacenamiento y drenaje de agua.

En cuanto a la distribución espacial del recurso superficial, en general, las cuencas situadas en el centro y norte del territorio tienen una baja disponibilidad natural de agua porque la precipitación media anual de estas regiones es menor a 500 mm. No obstante, es en ellas

donde se concentra una elevada proporción de población y actividades económicas. Por el contrario, en la península de Yucatán y en el sureste en general, la disponibilidad natural media de agua es alta, y concentra a menos del 10% de la población del país. En la Figura 6 se presenta la distribución de la disponibilidad de agua que existe en México.

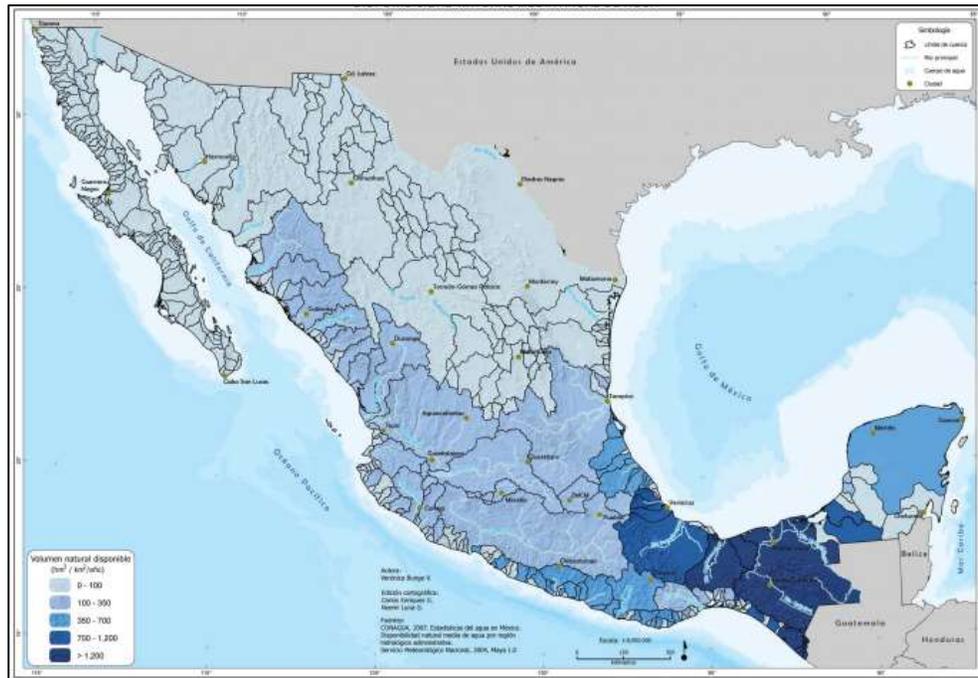


Figura 6. Disponibilidad Natural Media Anual de agua en México (CONAGUA 2013)

En México, las aguas superficiales que escurren por ríos y arroyos o que se almacenan en lagos, lagunas y humedales representan el 82% del agua renovable total del país; el resto del agua se encuentra en formaciones subterráneas. Lamentablemente, una gran proporción de las fuentes superficiales de agua tienen una calidad deficiente debido a las descargas de aguas residuales sin tratamiento que se hacen a sus cauces, esto sí, de manera bastante uniforme en todo el país.

4.1.2. Aguas Subterráneas

Las aguas subterráneas desempeñan un papel de creciente importancia en el crecimiento socioeconómico del país, gracias a sus características físicas que les permiten ser aprovechadas de manera versátil, pues funcionan como presas de almacenamiento y red de



distribución, siendo posible extraer agua en cualquier época del año de prácticamente cualquier punto de la superficie del acuífero. Funcionan además como filtros purificadores, preservando la calidad del agua.

La importancia del agua subterránea se manifiesta en la magnitud del volumen utilizado por los principales usuarios. Alrededor del 38% del volumen total concesionado para usos consuntivos (31.8 mil millones de m³ por año al 2012), procede de agua subterránea.

El territorio nacional, para fines de administración del agua subterránea se ha dividido en 653 acuíferos, cuyos nombres oficiales fueron publicados en el Diario Oficial de la Federación el 5 de diciembre de 2001.

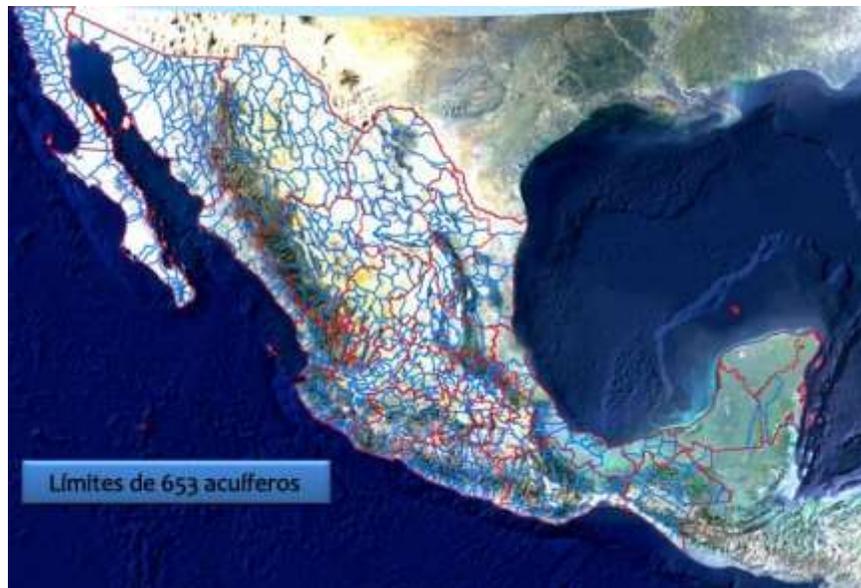


Figura 7. Delimitación de los Acuíferos de México (CONAGUA, 2014)

A partir de ese momento se inició un proceso de delimitación y estudio de los acuíferos para dar a conocer de manera oficial la disponibilidad media anual de éstos, siguiendo la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000. Para el 31 de diciembre del 2012 se tenían publicadas las disponibilidades de los 653 acuíferos en el DOF. La disponibilidad es básica para la preservación del recurso a través de la administración de las aguas nacionales mediante los instrumentos de concesión o asignación de derechos para uso de aguas nacionales, así como medidas de ordenamiento de la explotación de los acuíferos tales como

vedas, reglamentos, zonas reglamentadas y zonas de reserva. En la siguiente figura se pueden observar los acuíferos y el estatus en el que actualmente se encuentran.

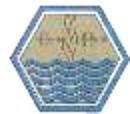


Figura 8. Estatus de Disponibilidad de Agua en Acuíferos de México (CONAGUA, 2014)

Uno de los aspectos más relevantes del manejo adecuado del agua subterránea radica en el control del volumen aprovechado por los diferentes usuarios consuntivos. En ocasiones la demanda puede ser muy intensa, y puesto que algunos acuíferos tienen periodos de renovación muy largos, la demanda puede superar la recarga del acuífero y producir su sobreexplotación.

A partir de la década de los años setenta, el número de acuíferos sobreexplotados se ha incrementado notablemente. En 1975 existían 32 acuíferos en esta categoría, cifra que se elevó a 36 en 1981, 80 en 1985, 100 en 2009 y 102 en 2011. Los 102 acuíferos con sobreexplotación representan el 15% de los 653 que hay en el país. Los acuíferos sobreexplotados se concentran en las regiones hidrológicas Lerma-Santiago-Pacífico, Cuencas Centrales del Norte, Río Bravo, Noroeste y Península de Baja California (CONAGUA, 2013).

Cabe señalar que las vedas de agua subterránea cubren cerca del 53% del territorio nacional, comprendiendo totalmente a 12 estados y parcial a los otros 20, incluido el Distrito Federal. La fracción complementaria es zona de libre alumbramiento. De acuerdo con la CONAGUA



(2014), actualmente se tienen establecidas vedas para la extracción de agua subterránea en 330 de los 653 acuíferos del país.



Figura 9. Distribución de vedas subterráneas en México (CONAGUA, 2014)

En la siguiente gráfica se muestra la evolución del volumen concesionado para usos consuntivos del periodo 2004 al 2013. Como se muestra, el 62.8% del agua utilizada para uso consuntivo proviene de fuentes superficiales (ríos, arroyos y lagos), mientras que el 37.2% restante corresponde a fuentes subterráneas (acuíferos) (CONAGUA, 2014).

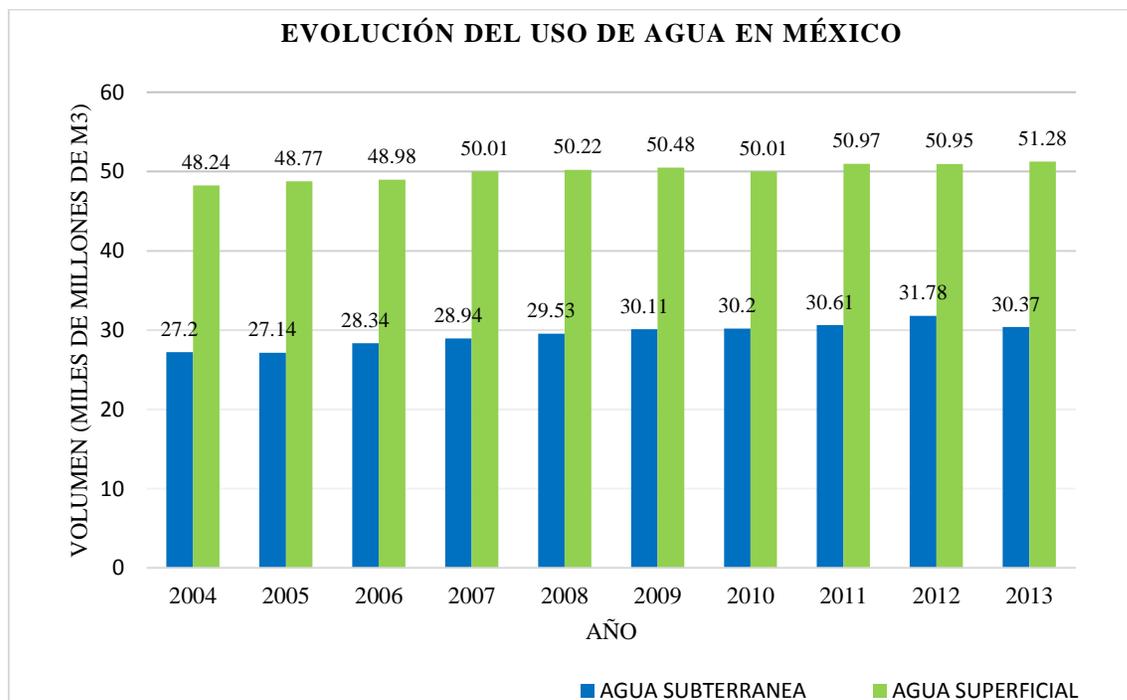


Figura 10. Evolución del Uso de Agua en México
(Fuente: Elaboración propia con base en CONAGUA 2014)



Como se observa existen tanto incrementos como decrementos en los volúmenes concesionados a lo largo del tiempo. Respecto del inicio de la estadística reciente (2001), en el año 2013 el volumen de agua superficial concesionada es 16.5% mayor, en tanto que la subterránea es 22.5% mayor, lo que permite corroborar la creciente importancia que tiene el aprovechamiento de agua subterránea en el país. (CONAGUA, 2014).

4.2. Estimación de la Disponibilidad de Aguas Subterráneas

4.2.1. El Ciclo Hidrológico y el Balance Hídrico

Si bien el estudio del agua subterránea es abordado casi en forma exclusiva por la hidrogeología, es de gran importancia tener presente y comprender todos los aspectos del ciclo hidrológico, ya que las aguas subterráneas no representa más que una parte del ciclo hidrológico total del agua.

En este sentido, el ciclo del agua tiene lugar en tres medios diferentes que son: la atmósfera, la superficie del suelo y el subsuelo. Estos tres niveles definen a su vez tres campos de estudio: la hidrometeorología o estudio de las aguas atmosféricas, la hidrología de superficie y la hidrología subterránea, todos ellos fuertemente relacionados (Vélez, 1999).

Ciclo Hidrológico

Se entiende por ciclo hidrológico a la sucesión de etapas que atraviesa el agua al pasar de la tierra a la atmósfera y volver a la tierra: evaporación desde el suelo, mar o aguas continentales, condensación de nubes, precipitación, acumulación en el suelo o masas de agua y reevaporación.

El ciclo hidrológico involucra un proceso de transporte recirculatorio e indefinido o permanente, este movimiento permanente del ciclo se debe fundamentalmente a dos causas: la primera, el sol que proporciona la energía para elevar el agua (evaporación); la segunda, la gravedad terrestre, que hace que el agua condensada descienda (precipitación y escurrimiento), (Chavarri, 2004).

De acuerdo con Guevara y Cartaya (1991), los fenómenos hidrológicos son muy complejos, por lo que nunca pueden ser totalmente conocidos. Sin embargo, a falta de una concepción perfecta, se pueden representar de una manera simplificada mediante el concepto de sistema.



Figura 11. Representación del ciclo hidrológico

Un sistema viene a ser un conjunto de partes diferenciadas que interactúan como un todo. El ciclo hidrológico podría considerarse como un sistema, cuyos componentes son: precipitación, evaporación, escorrentía, y las otras fases del ciclo, tal como se muestra en la siguiente figura.

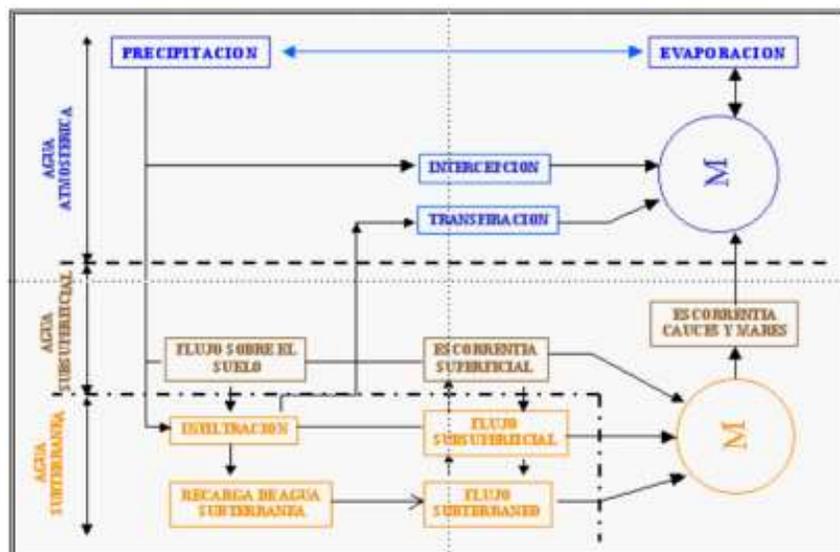


Figura 12. Representación del sistema hidrológico

En general, se puede diferenciar la existencia de un ciclo rápido y de un ciclo lento del agua. El ciclo rápido estará representado por: precipitación - escorrentía superficial - río - mar - evaporación - precipitación. Mientras que el ciclo lento sería: precipitación - infiltración - circulación en el manto acuífero (muy lenta) - manantial - río - mar - evaporación - precipitación. De esta forma, el ciclo rápido puede durar pocos días, o algunos meses a lo sumo, en contraparte, el ciclo lento puede durar varios años, e incluso milenios, como consecuencia de la baja velocidad de circulación de las aguas en el interior de los acuíferos.

- **Precipitación**

Se denomina precipitación, a toda agua meteórica que cae en la superficie de la tierra, tanto en forma líquida (llovizna, lluvia, etc.) y sólida (nieve, granizo, etc.) y las precipitaciones ocultas (rocío, la helada blanca, etc.). Ellas son provocadas por un cambio de la temperatura o de la presión. La precipitación constituye la única entrada principal al sistemas hidrológico continental (Musy, 2001).

Existen diferentes tipos de precipitación: precipitación convectiva, precipitación orográfica y precipitaciones frontales, tal como se puede apreciar en la siguiente figura.

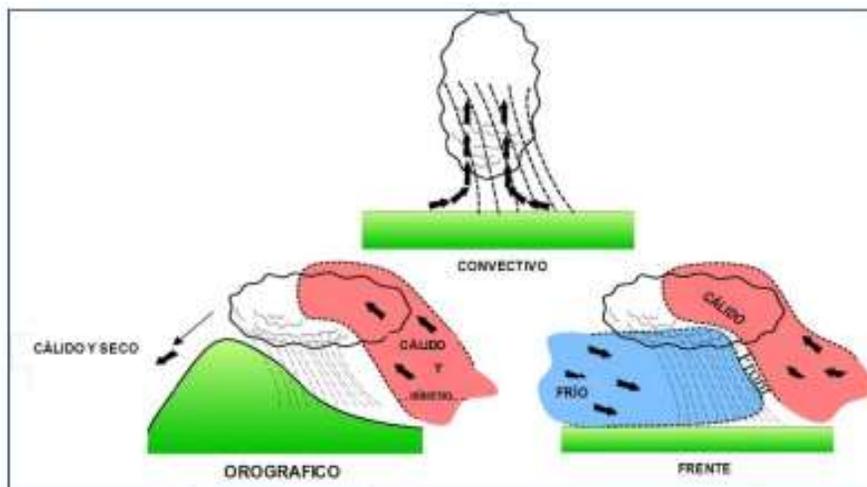


Figura 13. Principales tipos de precipitación

Para la formación de la precipitación se requiere la condensación del vapor de agua atmosférico. La saturación es una condición esencial para desbloquear la condensación. Los

varios procesos termodinámicos son convenientes para realizar la saturación de las partículas atmosféricas inicialmente no saturadas y causar su condensación:

- Saturación y condensación isobárica (a presión constante),
- Saturación y condensación por presión adiabática,
- Saturación y condensación por presión de vapor de agua,
- Saturación por mezcla y turbulencia.

• Evaporación

Se define como el proceso mediante el cual se convierte el agua líquida a un estado gaseoso. La evaporación puede ocurrir solamente cuando el agua está disponible. También se requiere que la humedad de la atmósfera sea menor que la superficie de evaporación (Figura 14).

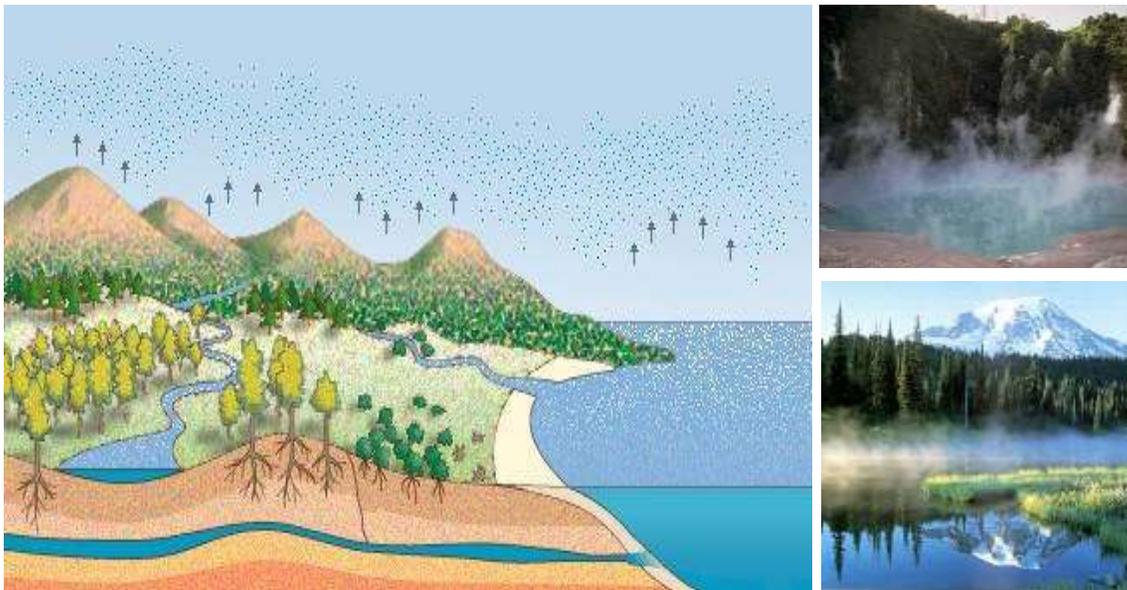


Figura 14. Proceso de Evaporación

• Condensación

El cambio en el estado de la materia de vapor a líquido que se produce con el enfriamiento. Normalmente se utiliza en meteorología cuando se habla de la formación de agua líquida en vapor. Este proceso libera energía de calor latente para el medio ambiente (Figura 15).

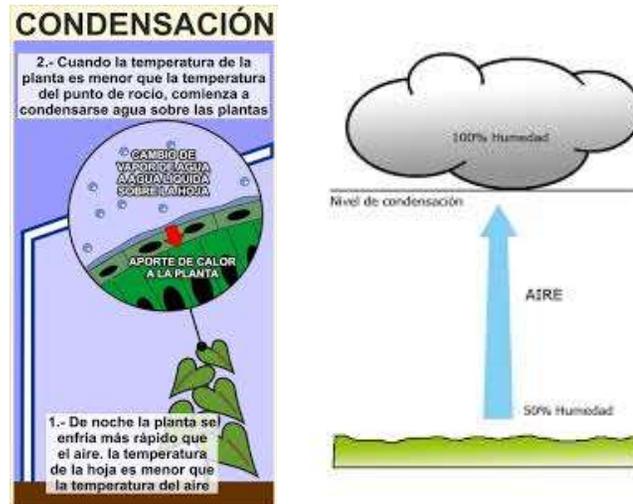


Figura 15. Proceso de Condensación

- **Transpiración**

Es la evaporación a través de las hojas. El proceso fisiológico de alimentación de las plantas se efectúa mediante el paso de ciertas cantidades de agua, portadoras de los alimentos, por el interior de ellas y ese tráfico solamente es posible gracias a la transpiración. (Figura 16).

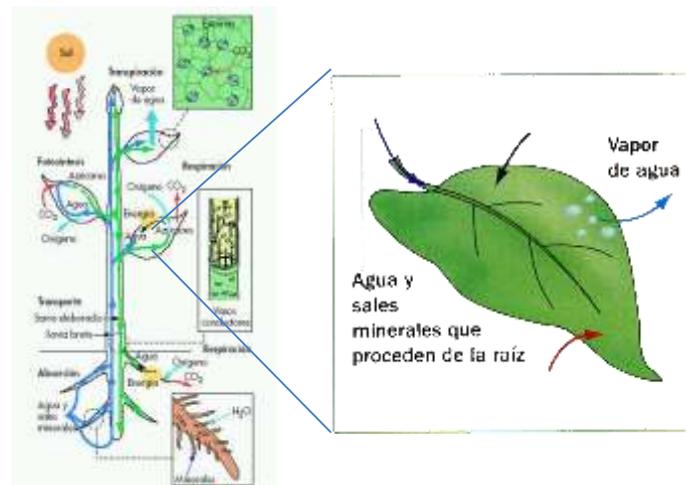


Figura 16. Proceso de Transpiración

- **Intercepción**

Es la parte de la precipitación que es interceptada por objetos superficiales como la cubierta vegetal (Figura 17) o los tejados, en general, parte de esta agua interceptada nunca alcanza al suelo porque se adhiere y humedece estos objetos y se evapora.

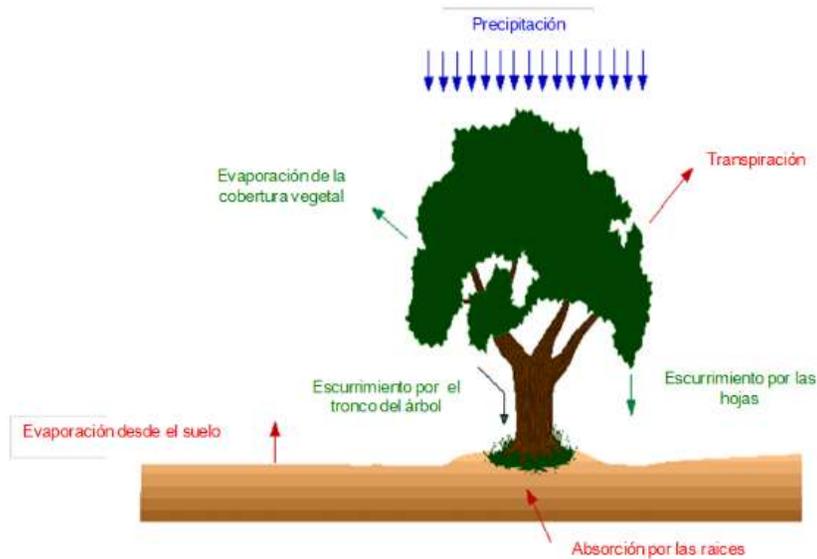


Figura 17. Componentes que intervienen en el Proceso de Intercepción

- **Escorrentía superficial**

Es la porción de lluvia que no es infiltrada, interceptada o evaporada y que fluye sobre las laderas. En realidad la escorrentía superficial, la infiltración y la humedad del suelo son interactivas entre sí, por tal motivo se debe tener cuidado en seleccionar el modelo adecuado para su estudio y cuantificación (Figura 18).

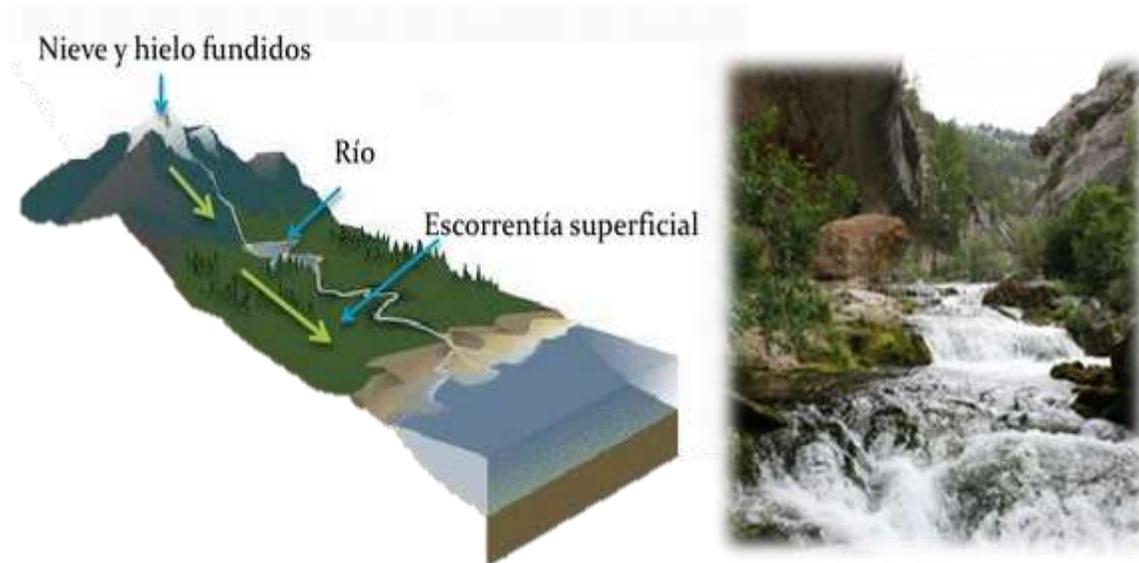


Figura 18. Proceso de Escorrentía Superficial

- **Escorrentía Subsuperficial**

Es el agua que ha sido previamente infiltrada y no alcanza el almacenamiento subterráneo o acuífero, por lo tanto debe ser considerada como parte de la escorrentía.

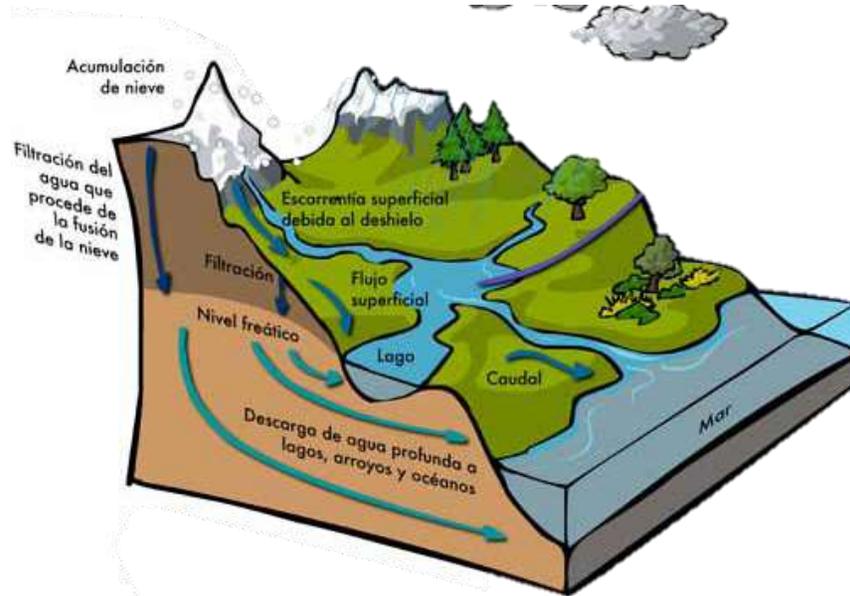


Figura 19. Escorrentía Subsuperficial y Subterránea

4.2.2. Balance Hidrológico

La evaluación de los recursos hídricos de una cuenca requiere de una estimación correcta del balance hidrológico, es decir, comprender el ciclo en sus diferentes fases, la forma en que el agua que se recibe por precipitación se reparte como parte del proceso de evapotranspiración, escorrentía e infiltración (Escolero, Oscar. 2010).

El balance hídrico consiste en la aplicación del principio de la conservación de masa a una cierta región de volumen conocido y definida por unas determinadas condiciones de contorno. Durante un determinado periodo de tiempo en el que se realiza el balance, la diferencia entre el total de entradas y el total de salidas debe ser igual al cambio de agua en el almacenamiento. El establecimiento de un balance supone medir flujos de agua (caudales) y almacenamientos (niveles), aunque con una apropiada selección de la región y del período de tiempo, se pueden suprimir algunas medidas y términos (niveles iguales al principio y al



final, ausencia de flujo de agua a través de divisorias o de límites impermeables, etc.). Si las entradas superan a las salidas existe una acumulación (aumento del almacenamiento) y lo contrario si las salidas superan a las entradas (Samper, 1997).

En general, se puede afirmar que del agua que cae en un determinado sitio (precipitación = P), una parte vuelve a la atmósfera, ya sea por evaporación directa o por transpiración de la vegetación (evapotranspiración = ETR); otra parte escurre por la superficie (escorrentía superficial = ES) confluyendo a través de la red de drenaje hasta alcanzar los cauces principales y finalmente el mar, y el resto se infiltra en el terreno y se incorpora al sistema de aguas subterráneas o acuífero (infiltración = I). Estas magnitudes deben cumplir con la ecuación del balance hidrológico (Escolero, et. al., 2010):

$$CAPTACIÓN - EVAPOTRANSPIRACIÓN = ESCORRENTÍA SUPERFICIAL + INFILTRACIÓN$$

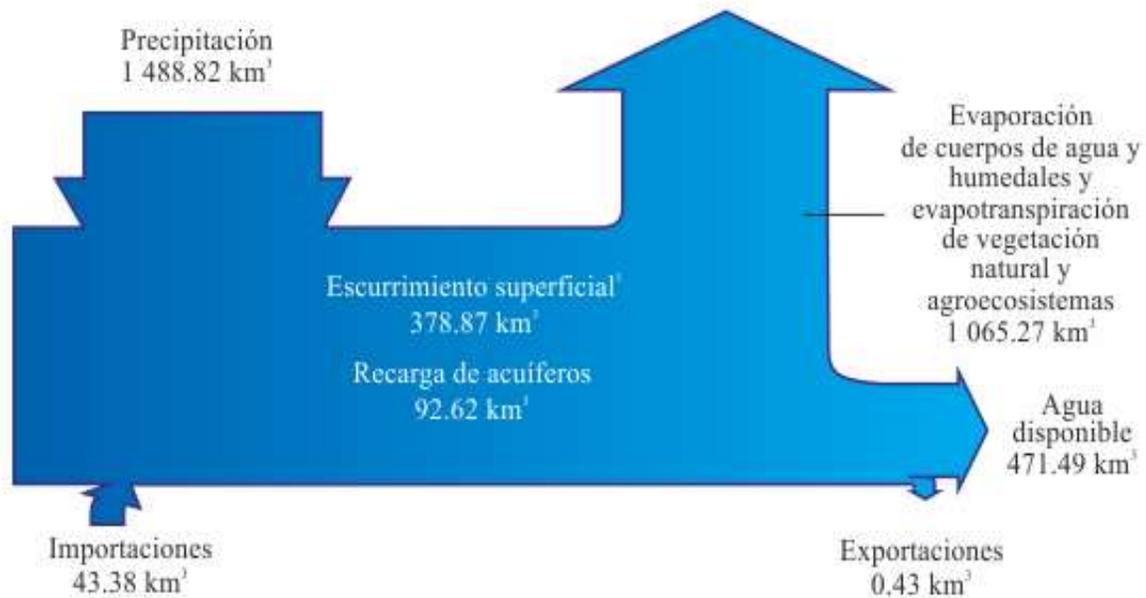


Figura 20. Balance de Agua en México
(Fuente: Conagua – Semarnat, 2014)



4.2.3. Importancia del Balance Hídrico en la definición de disponibilidad y uso sustentable del agua subterránea

El balance hídrico de un espacio específico, ya sea cuenca, subcuenca, acuífero o unidad de estudio permitirá conocer la estructura de éstas y su funcionamiento. Dicha información puede ser utilizada en diferentes contextos de acuerdo con las necesidades planteadas para estudiar el balance en la unidad de estudio. De esta manera, se pueden obtener resultados importantes que permitan realizar estudios ambientales y ecológicos, planes de ordenamiento territorial, políticas públicas en la gestión de recursos hídricos, entre otros.

En el caso particular de México, la realización de balances hídricos tiene un alcance vital en los siguientes aspectos:

- Conocer la factibilidad de establecer un cultivo, bajo determinadas condiciones climáticas, edáficas y de disponibilidad de agua, entre otros.
- Definición de necesidades hídricas de los diferentes centros de población, productivos, regiones, unidades de estudio, etc.
- Desarrollo de planes estratégicos para la gestión de los recursos hídricos, atendiendo la demanda en los diferentes sectores productivos.
- Estabilización de los niveles freáticos en los acuíferos.
- Conocimiento del funcionamiento particular de cada uno de los acuíferos y su comportamiento a través del tiempo bajo las condiciones de su entorno.
- Examinar las relaciones entre las condiciones de humedad y el rendimiento de los cultivos.
- Estudiar las relaciones de precipitación-escorrentía y con base en ellos definir la implementación de las prácticas de conservación de suelo.
- Establecer programas gubernamentales de recuperación de acuíferos.

De acuerdo con lo anterior, el balance hídrico de oferta y demanda constituye la principal herramienta para evaluar si el recurso hídrico de un área hidrográfica, región, municipio o unidad de estudio es suficiente o deficitario. Si a la disponibilidad del agua se le agrega el ingrediente de calidad se encuentra entonces el soporte para la planificación, el desarrollo y el uso eficiente y racional de todos los recursos naturales que rodean al hombre como



principal unidad dentro de una comunidad que hace parte del conglomerado general (García Martha, 1999).

4.2.4. Expresiones del Balance Hídrico de Aguas Subterráneas

El estudio del balance hídrico en hidrología se basa en la aplicación del principio de conservación de masas, también conocido como ecuación de continuidad. Esta, establece que, para cualquier volumen arbitrario, y durante cualquier período de tiempo, la diferencia entre las entradas y salidas estará condicionada por la variación del volumen de agua almacenada. En general, la técnica del balance hídrico implica mediciones de ambos aspectos, almacenamientos y flujos del agua; sin embargo, algunas mediciones se eliminan en función del volumen y período de tiempo utilizados para el cálculo del balance (UNESCO, 1971).

4.2.3.1 Fórmula Sintética

La expresión sintética del balance hídrico es:

$$Estado_{T+1} = Estado_T + \sum_{i=1}^N Entradas_i - \sum_{j=1}^M Salidas_j \quad (1)$$

Donde:

Estado_{T+1}: Nueva estimación del balance hídrico.

Estado_T: Balance hídrico de la cuenca antes de iniciar el análisis (almacenamiento en suelo).

Entradas_i: Son todas las entradas de agua a la cuenca (Precipitación, aporte de agua almacenada en el suelo y el subsuelo).

Salidas_j: Son todas las salidas de agua de la cuenca (evapotranspiración, escurrimientos).

Lo que establece que el cambio de almacenamiento en un periodo de tiempo corresponderá al balance entre las entradas (aportes) y salidas en el área de estudio.



4.2.3.2 Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015

Esta Norma Oficial Mexicana referente a la conservación del recurso agua, publicada en el Diario Oficial de la Federación en Marzo de 2015, establece las especificaciones y el método base para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales superficiales y subterráneas, para su explotación, uso y/o aprovechamiento.

Para los fines de la administración del agua, en la NOM-011 se define la disponibilidad de agua como: “Volumen medio anual de agua subterránea que puede ser extraído de una unidad hidrogeológica para diversos usos, adicional a la extracción ya concesionada y a la descarga natural comprometida, sin poner en peligro el equilibrio de los ecosistemas”.

De acuerdo con esta Norma, la disponibilidad media anual de agua subterránea en una unidad hidrogeológica (acuífero) se determina por medio de la siguiente expresión:

$$\text{Disponibilidad Media Anual de Agua Subterránea} = \text{RTMA} - \text{DNCom} - \text{VCAS} \quad (2)$$

Donde:

RTMA: Recarga Total Media Anual

DNCom: Descarga Natural Comprometida

VCAS: Volumen Concesionado de Agua Subterránea

Para este caso, entenderemos por Recarga Total Media Anual a todo el volumen que recibe un acuífero, en un intervalo de tiempo determinado.

En cuanto a la Descarga Natural comprometida esta se refiere a la fracción del volumen de agua que descarga un acuífero a través de manantiales, vegetación, ríos, humedales o subterráneamente a cuerpos de agua y que se encuentra comprometido como agua superficial para diversos usos o que deben conservarse para prevenir un impacto ambiental negativo a los ecosistemas o a la migración de agua de mal calidad a otro sistema acuífero. Este parámetro se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que están comprometidos como agua superficial, alimentados por un acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar la alimentación de



acuíferos adyacentes, sostener el uso ambiental y prevenir la inmigración de agua de mala calidad al acuífero considerado (NOM-011-CONAGUA-2015).

El volumen de agua concesionado (VCAS) se refiere a aquellos volúmenes anuales de agua asignados o concesionados por la Comisión Nacional del Agua mediante títulos inscritos en el Registro público de Derechos de Agua (REPDA), los volúmenes de agua que se encuentran en proceso de registro y titulación y, en su caso, los volúmenes de agua correspondientes a reservas, reglamentos y programación hídrica; los cuales estarán determinados para un acuífero en específico y referidos a una fecha de corte específica. En el caso de los acuíferos en zonas de libre alumbramiento, la extracción de aguas subterráneas será equivalente a la suma de los volúmenes de agua extraídos estimados con base en los estudios técnicos, que sean efectivamente extraídos aunque no hayan sido titulados ni registrados, y en su caso, los volúmenes de agua concesionados de la parte vedada del mismo acuífero. Los volúmenes de agua inscritos en el Registro Nacional Permanente no serán contabilizados en la extracción para fines de la determinación de la disponibilidad de agua, a menos que las verificaciones de campo demuestren que son extraídos físicamente.

La metodología descrita en el Norma antes mencionada, se presenta en el Anexo A del presente trabajo.

4.2.5. Componentes del balance hídrico de las aguas subterráneas

Considerando los componentes de entrada y salida de un sistema, el balance hidrológico de agua subterránea se representa por la ecuación para acuíferos no confinados (Kommadath 2000, modificado por Cruz 2007), con lo que se calcula un cambio de almacenamiento Δa , para un periodo de tiempo.

$$\Delta a = (Rv + Rc + Rr + Ra + Rh) - (Et + Es + Ds + Ep) \quad (3)$$

Donde las entradas son:

Rv = recarga vertical por lluvias (infiltración).

Rc = recarga proveniente de algún canal o río.



Rr = recarga por riego.

Ra = recarga artificial.

Rh = recarga horizontal de alguna otra cuenca o acuífero

En cuanto a los componentes de salida, estas son:

Et = evapotranspiración.

Es = escurrimiento superficial.

Ds = descarga subterránea al mar, lago, río, manantial, u otro acuífero.

Ep = explotación de pozos.

4.2.6. Estimación de los componentes del balance hídrico de las aguas subterráneas

4.2.6.1. Entradas

4.2.6.1.1. Recarga directa (precipitación)

El agua que precipita puede tomar tres caminos: infiltrarse, escurrirse o evaporarse, por lo tanto la ecuación de balance sería:

$$\text{Precipitación} = \text{Infiltración} + \text{Escorrimento} + \text{Evapotranspiración} \quad (4)$$

$$P = I + R + ET$$

La precipitación (P) se mide mediante pluviómetros en estaciones meteorológicas, y se obtiene en unidades de longitud (usualmente mm). La escorrentía superficial (R) se calcula a partir de estaciones hidrométricas, donde se mide la velocidad del agua que multiplicada por la sección transversal de flujo, da un gasto, en unidades de volumen entre tiempo (usualmente m³/s). La evapotranspiración (ET) se obtiene usualmente mediante métodos empíricos, y se expresa en unidades de longitud (mm).

Ahora bien, la precipitación como recarga de agua, dentro de un balance es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a ello, existen diversas metodologías para su estimación, las cuales se mencionarán a continuación (CONAGUA, 2011).



a) **Método Rudo (Recarga Determinada mediante aplicaciones Geomáticas):** Este método plantea que la recarga media anual es directamente proporcional a la precipitación y, por consiguiente, se pretende establecer una constante de proporcionalidad para cada acuífero en función de variables intrínsecas del mismo. Para esto, se debe disponer de información de las diferentes variables que condicionan la recarga y el flujo del agua subterránea, como son: la precipitación pluvial, la pendiente del terreno, el tipo de roca, las clases de vegetación y el tipo de suelo (Chávez Rubén, 2012).

De cada variable se elabora una capa de información en un sistema de Información Geográfica (SIG), a partir de la cartografía temática básica 1:250,000 del INEGI. De esta forma se obtiene una ecuación de la infiltración potencial, mediante un coeficiente de infiltración que permite estimar la infiltración, integrando la interceptación de lluvia en las hojas y raíces, la infiltración básica del suelo, la litología y la topografía.

La metodología se basa en el álgebra de mapas para lo cual hay que reclasificar los mapas vectoriales para convertirlos en imágenes raster con pixeles de 100x100 metros. A cada pixel se le asigna un valor tomado del polígono correspondiente. Para la aplicación del método, se tiene un sistema de puntuaciones para clasificar la información del mapa de cada variable.

Se tiene una ecuación general de la infiltración de lluvia, la que se ajusta por las siguientes variables: pendiente topográfica, cobertura vegetal, tipo de suelo y litología. El valor de la infiltración potencial obtenida por la ecuación general, comparado con los valores de infiltración obtenidos por otros métodos muestra una confiabilidad del 80%. La ecuación utilizada en este método es la siguiente:

$$\text{Recarga} = \text{Precipitación} * (\text{Litología} * 0.03 + \text{Pendiente} * 0.03 + \text{Suelo} * 0.03 + \text{Vegetación} * 0.01)$$

(5)

Esta operación se realiza en cada pixel y se obtiene un nuevo mapa raster. Posteriormente se suma el resultado de cada una de las celdas para obtener un total en milímetros de altura que

debe multiplicarse por el total de la superficie analizada para obtener el volumen infiltrado en metros cúbicos al año (Figura 21).

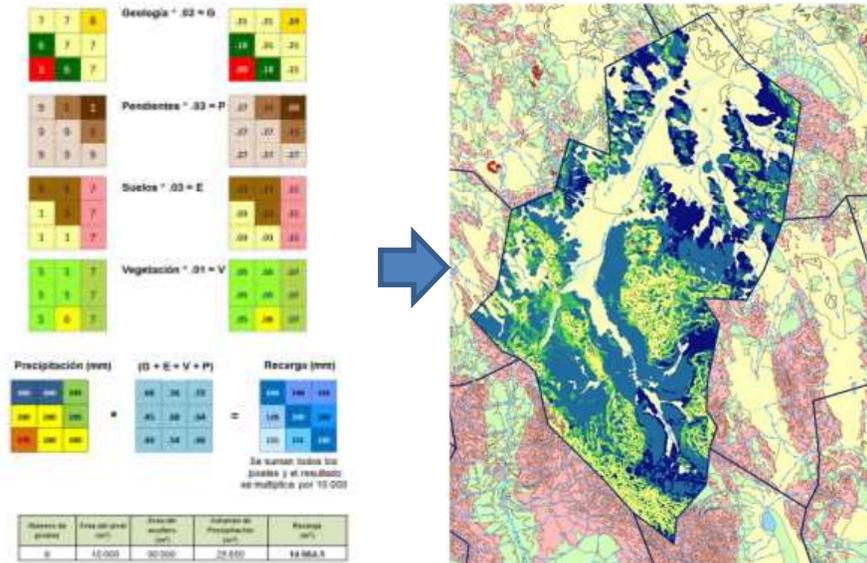


Figura 21. Ejemplo del álgebra de mapas aplicado a mapas raster

b) **Medidas Directas (Lisímetro):** El único método que se puede aplicar en la práctica de medidas directas del flujo de recarga es el lisímetro (Lerner et al., 1990), en el cual los diferentes componentes del balance de agua se miden con exactitud. Los lisímetros son tanques o bloques instrumentados llenos de suelo alterado o inalterado, con o sin vegetación donde el flujo que circula a través de él puede ser medido; el bloque de suelo es aislado hidrológicamente del suelo que lo rodea, pero es una muestra representativa porque tiene la misma vegetación y está expuesto al mismo clima.

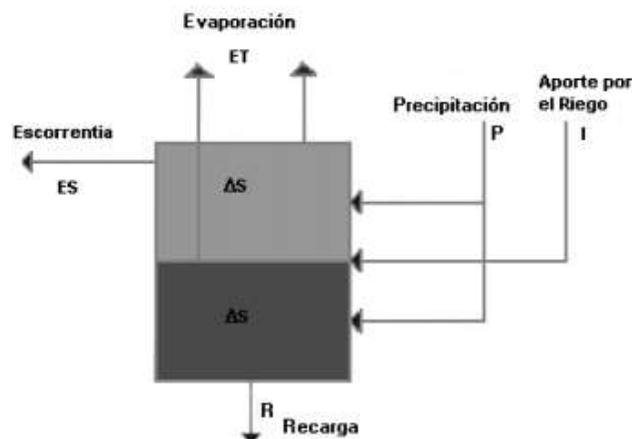


Figura 22. Esquema de Balance Hídrico en el suelo



El balance de agua que realiza un lisímetro se basa en la medida del volumen de todos los componentes del mismo y puede representarse mediante la siguiente expresión:

$$I + P = ET + ES + R \pm \Delta S \quad (6)$$

Donde:

ET = evapotranspiración

P = precipitación

I = aporte debido al riego

R = recarga

ES = escorrentía superficial

ΔS = cambio en el almacenamiento

Donde todos los componentes pueden ser medidos excepto la ET.

c) Medidas Directas (Nivel Freático): El volumen almacenado producto de un aumento del nivel freático es igual a la recarga, luego de tener en cuenta otros flujos de entrada y salida como pozos de bombeo y flujo entre acuíferos.

Este método es quizás el más utilizado para estimar la recarga. Entre sus ventajas, cabe citar su sencillez e independencia respecto al mecanismo de desplazamiento del agua en la zona no saturada (Healy y Cook, 2002). La recarga se utiliza utilizando la siguiente expresión:

$$R = S_y \frac{dh}{dt} = S_y \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (7)$$

Donde:

R = Recarga

S_y = Rendimiento específico

h = altura

t = tiempo

La altura del nivel freático se determina mediante la construcción de pozos de observación, donde el nivel medido es representativo de un área de al menos varios metros cuadrado, por lo que no corresponde a una medida puntual. Sin embargo, el método tiene sus limitaciones de acuerdo con Healy y Cook (2002):

- a. Proporciona mejores resultados si se aplica para niveles freáticos superficiales
- b. Los pozos deben localizarse de manera que los niveles freáticos sean representativos de toda el área de recarga.
- c. El método es aplicable para recarga en condiciones estables
- d. Identificar la causa de fluctuaciones del nivel freático es un asunto complejo así como calcular el valor de rendimiento específico debido a la heterogeneidad de los acuíferos.

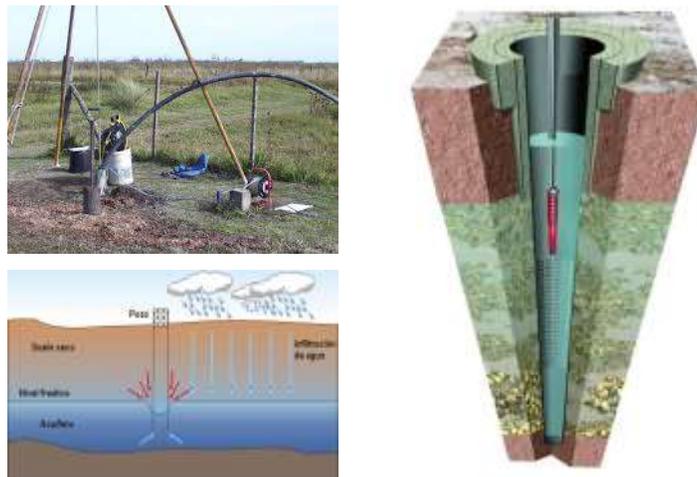


Figura 23. Esquema de pozo de observación para medir nivel freático

Debido a que la velocidad de desplazamiento del agua en los medios porosos del suelo es muy baja, el cambio en los niveles de los acuíferos puede no necesariamente responder a las condiciones inmediatas anteriores ocurridas al período de evaluación o durante la misma.

4.2.6.1.2. Recarga indirecta (infiltración en cauces, embalses, etc.,)

Al igual que la recarga directa existen diversas metodologías y/o procedimientos para su estimación dependiendo de los parámetros que se deseen conocer. A continuación se mencionarán los más importantes para el caso de la recarga indirecta.

a) Medidores de Infiltración: Los medidores de infiltración han sido desarrollados para medir recarga en canales de riego y ríos. Este método consiste en una “campana de filtración” o cilindro el cual es introducido dentro del sedimento en la base de un canal; junto al cilindro está un tanque de agua, la tasa a la cual el agua dentro del cilindro se infiltra es determinada

por cambios en el volumen del tanque (Lerner et al., 1990). El cilindro es insertado mientras la manguera se deja abierta para permitir que escape el aire y el exceso de agua. La bolsa plástica permanece sujeta a la manguera y flota justo bajo la superficie.

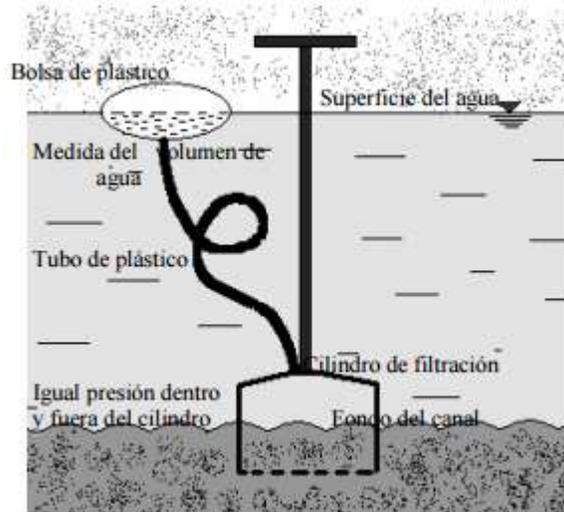


Figura 24. Medidor de Filtración de cabeza constante para lechos de canales (Lerner, Et.al. 1990)

El volumen de la bolsa es medido luego de que haya pasado un tiempo y la tasa de infiltración se calcula con la siguiente expresión:

$$q = \frac{(V_1 - V_2)}{(\pi * r^2 * t)} \quad (8)$$

Donde:

q = tasa de infiltración (L/T)

V1 = volumen inicial (L3)

V2 = volumen después de un tiempo t (L3)

r = radio interno del cilindro de infiltración

Un requisito indispensable para el uso de este método es que la base del canal debe ser suave para poder insertar el cilindro, presentando dificultades en suelos de grava o pedregosos; en suelos arenosos se presenta un inconveniente ya que los remolinos que se crean pueden lavar la zona que rodea el cilindro dando así tasas más altas de infiltración. El medidor de infiltración no es la mejor opción para estimar pérdidas por infiltración para el canal



completo, sin embargo son excelentes para la localización de áreas de alta infiltración a lo largo de la longitud del canal.

b) Medidas de Caudal: La manera más sencilla para estimar las pérdidas por transmisión a lo largo de un canal ya sea natural o de irrigación es mediante un balance de agua del flujo. La recarga en un canal se puede expresar con la siguiente ecuación:

$$R = Q_{A.Arriba} - Q_{A.Abajo} + \sum Q_{entra} - \sum Q_{sale} - E - \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad (9)$$

Donde:

Q: Caudal

$Q_{A.Arriba}$: Flujo aguas arriba

$Q_{A.Abajo}$: Flujo aguas abajo

Q_{entra} : Flujo aguas arriba de punto de control

Q_{sale} : Flujo aguas debajo de punto de control

E: Evaporación de cuerpos superficiales de agua o lechos de río

ΔS : Cambio de almacenamiento en el canal y en la zona no saturada

4.2.6.1.3. Flujos subterráneos

El flujo subterráneo de agua es una componente importante de todos los sistemas hidráulicos y su determinación resulta fundamental para predecir el comportamiento de los niveles de un acuífero como respuesta a bombeos u otros estímulos (Domenico, 1998).

Actualmente existen diversas formas que permiten conocer el comportamiento del agua en un acuífero; siendo los modelos numéricos y mapas de isopiezas los de mayor uso y aplicación dependiendo del tipo de análisis y resultados que se deseen obtener (Sánchez, 2013).

Es bien conocido que una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del área de estudio se infiltra por las fracturas de las rocas que



forman parte de ellas y a través del pie de monte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación.

La recarga al acuífero tienen su origen en la precipitación pluvial sobre el valle y en la infiltración de los escurrimientos superficiales. La cuantificación del caudal de agua subterránea que participa como flujo de entrada subterránea horizontal al acuífero, para un período considerado, se realiza aplicando la Ley de Darcy a la red de flujo a través de una sección limitada por dos isolíneas equipotenciales y dos líneas de corriente, definidas en la configuración de elevación del nivel estático para el período analizado. (Escalante Carlos. 2012)

$$Q = B * i * T \quad (10)$$

$$i = \frac{h}{a}$$

Donde:

Q = Caudal en $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$

B = Largo del canal de flujo en m

i = Gradiente hidráulico (i)

T = Transmisividad en el canal de flujo en $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$

H = Altura entre curvas en m

a = Ancho de la celda en m

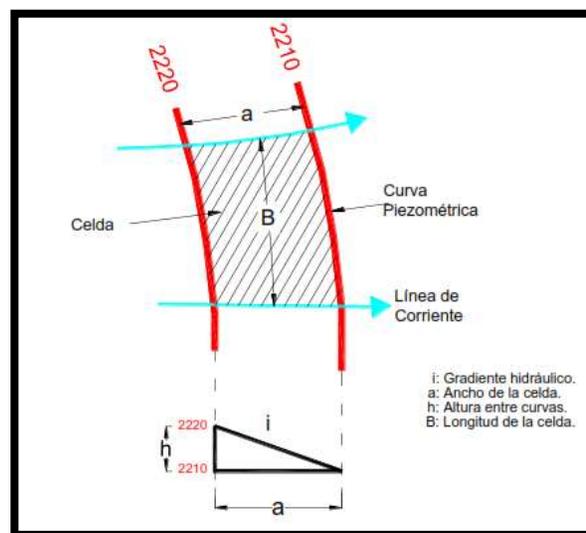


Figura 25. Esquematación de Ley de Darcy para Flujos Subterráneos

Con base en la ley de Darcy es como se han desarrollado diversas formas de estimar los caudales de flujos subterráneos en un acuífero. Dentro de las más importantes y utilizadas se encuentran los modelos numéricos y los mapas de isopiezas, los cuales e describirán a continuación:

a) Modelos Numéricos

Un modelo numérico (o modelo matemático, o digital) consiste en la creación en un ordenador de un mundo virtual que sea equivalente al medio físico, y que mediante las operaciones adecuadas, calcule la evolución de los niveles y el flujo hídrico producido, en los incrementos de tiempo que se le soliciten.

El primer paso en cualquier esfuerzo de modelización es el desarrollo de un modelo conceptual. El modelo conceptual es una representación tridimensional del flujo de agua subterránea y el sistema de transporte basado en todos los datos geológicos, hidrogeológicos y geoquímicos disponibles del lugar. Un modelo conceptual completo incluirá mapas geológicos y topográficos del lugar, representaciones de las secciones transversales, la hidrología y geología del lugar, una descripción de los parámetros físicos y químicos asociados al acuífero(s), la concentración de contaminantes y los mapas de distribución. El propósito del modelo conceptual es la integración de los datos disponibles en una representación coherente del sistema de flujo para ser modelizado. El modelo conceptual se utiliza para ayudar en la selección del modelo, en su construcción y en la interpretación de los resultados del propio modelo (Kozlovsky, 1988).

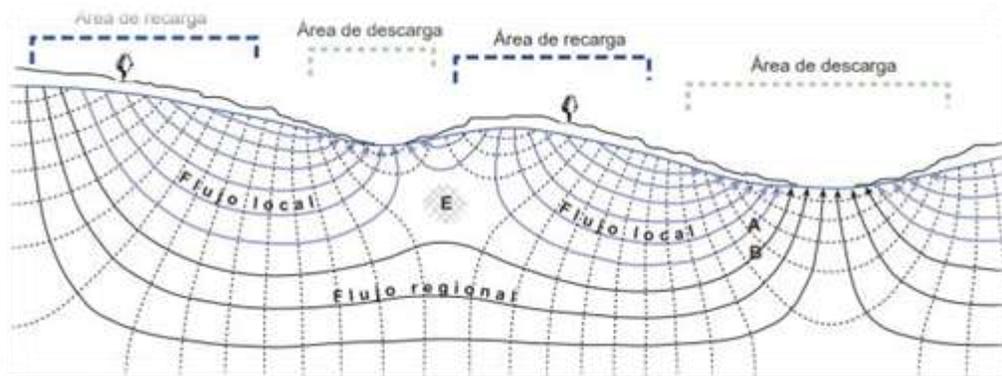


Figura 26. Red de flujo que esquematiza el flujo subterráneo natural en una región de conductividad hidráulica

Existen diferentes softwares que permiten realizar el modelado de un acuífero; y estos dependen de los parámetros que se deseen analizar y del alcance del estudio a realizar.

b) Mapa de Isopiezas

Un mapa de isopiezas refleja la forma de la superficie freática o de la superficie piezométrica, según se trate de acuífero libre o confinado, igual que un mapa topográfico refleja la forma de la superficie del terreno.

En el acuífero libre, las líneas isopiezas son las intersecciones de las superficies equipotenciales con la superficie freática, mientras que en el confinado las superficies equipotenciales están, lógicamente, dentro del acuífero, mientras que la superficie piezométrica con sus curvas isopiezas se encuentra en varios metros por encima.

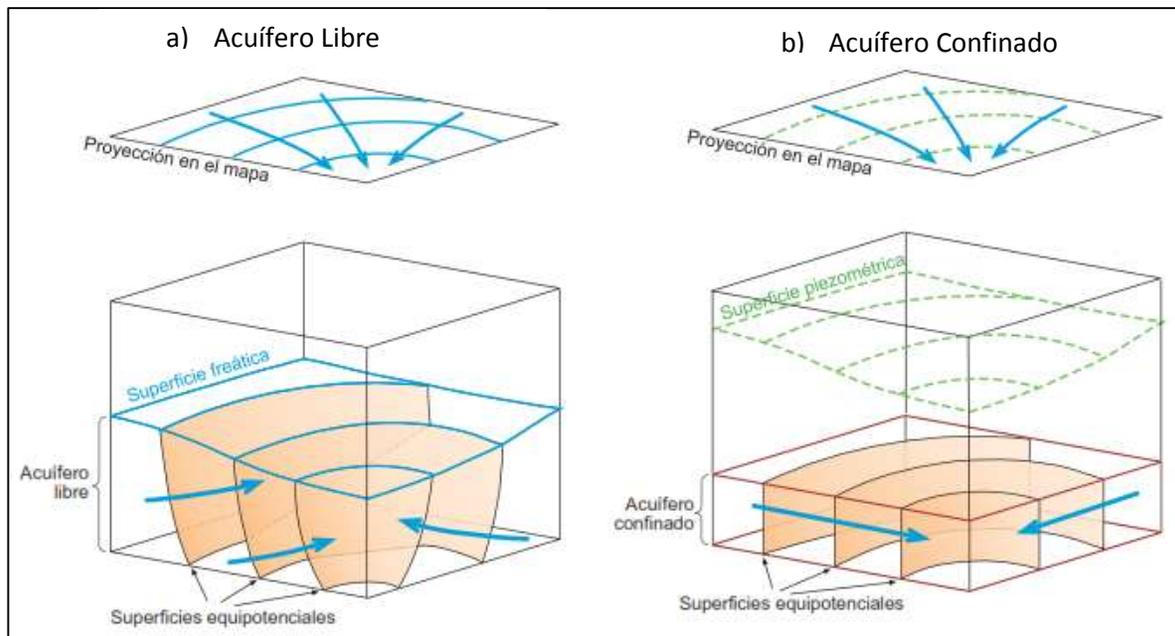


Figura 27. Superficie equipotenciales en un acuífero libre (a) con componente vertical de flujo y en un acuífero confinado (b) con flujo horizontal

Las fases para la realización de un mapa de isopiezas serían:

- Medida del nivel piezométrico en diversos puntos (los más posibles). Hay que obtener la cota del nivel del agua, que es igual a la cota del terreno menos la profundidad del

agua. Esta última se mide con un hidronivel, con precisión de un cm. la cota del terreno con mapas o altopímetros, que generalmente tendrán un error mínimo de un metro. En estudios de detalle, un topógrafo marca la cota del terreno en cada pozo con precisión de milímetros.

- Colocación sobre el mapa de todas las medidas y trazado de las isolíneas.
- Dibujo de las líneas de flujo perpendiculares a las líneas isopiezométricas. En un mapa de isopiezas a veces no se dibujan líneas de flujo. Lo habitual es trazar algunas para indicar las direcciones del flujo, pero no tantas para que formen una malla de cuadrados.

Al relizar un mapa de isopiezas se deben de tener las siguientes precauciones:

- Todos los pozos o piezómetros deben estar ubicados en el mismo acuífero.
- Si se trata de un acuífero con una componente vertical apreciable, las medidas deberían ser próximas a la superficie freática, o al menos de profundidades similares, si el acuífero es de gran espesor, ya que el potencial hidráulico (y por lo tanto el nivel del agua) varía a lo largo de una misma vertical.
- Las medidas deben tomarse en un lapso de tiempo breve, para que las variaciones temporales de los niveles no afecten a la distribución espacial de los mismos.

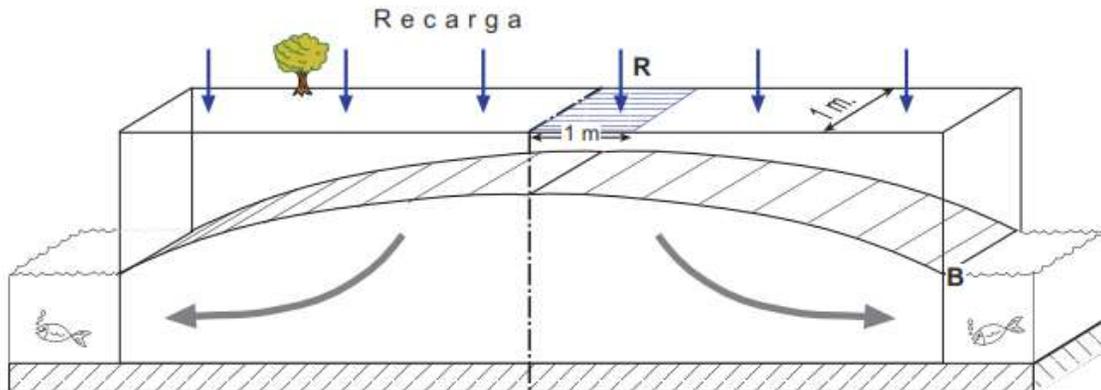


Figura 28. Superficie freática generada por una recarga uniforme

4.2.6.1.4. Retorno de riegos (eficiencia de riego, infiltración en canales, drenes...)

La recarga inducida o retorno de riego agrícola se determina en función del volumen que se extrae del acuífero para uso agrícola. De manera general, se considera que un 20% de este volumen retorna al sistema acuífero en forma de recarga inducida.



Ahora bien es importante señalar que de existir superficies agrícolas regadas con aguas superficiales también se deben cuantificar en el balance, considerando para ello su eficiencia. A continuación se detallan algunos de los métodos más comunes para estimar la recarga debida a retornos por riego.

La recarga en canales y/o drenes se puede medir mediante la aplicación de los métodos descritos en el punto b) Recarga Indirecta; complementándose con el siguiente:

- **Método de encharcamiento:** La recarga se estima midiendo la disminución del nivel del agua luego de haber sido aislada una sección del canal. Cuando las pérdidas por evaporación y cualquier precipitación que entra han sido tomadas en cuenta, la caída neta en el nivel de agua se atribuye a la infiltración. La tasa de pérdidas por infiltración por unidad de longitud se calcula con la siguiente expresión:

$$q = (d_1 - d_2) \frac{(W_1 - W_2)}{2t} \quad (11)$$

Donde:

q: tasa de infiltración por unidad de longitud (L³/T/L)

d₁: profundidad media inicial (L)

d₂: profundidad media después de un tiempo t (L)

W₁: ancho promedio inicial (L)

W₂: ancho promedio después de un tiempo t (L)

El uso de este método no es muy conveniente debido a que el canal debe estar fuera de servicio por varios días y resulta más costoso que usar medidores de infiltración.

Otro aspecto importante a tomar en cuenta para determinar los volúmenes de retorno de este tipo, es la eficiencia de riego, la cual se define como: la relación entre volumen de agua puesto a disposición de los cultivos para su zona radicular y el volumen total suministrado. Para su obtención es necesario calcular todas las componentes de la eficiencia global de riego: Eficiencia de conducción (E_c), Eficiencia de distribución (E_d) y Eficiencia de aplicación (E_a) (Salvatierra, 2010).

La obtención de las dos primeras es siempre como un cociente entre los valores de caudal entre valor del punto final con respecto al punto inicial del tramo objeto del cálculo de la eficiencia. Los valores de eficiencia de conducción y distribución son muy variables y dependen fundamentalmente del estado de la infraestructura, que en algunos casos llegan a valores extremos por obsolescencia y por falta de mantenimiento. La Eficiencia de aplicación (E_a) se entiende como la relación entre el volumen de agua de riego retenido en la zona radicular del cultivo y el volumen suministrado desde la toma del sistema de riego en parcela. La fórmula general para determinar la eficiencia de aplicación es:

$$\text{Eficiencia de Aplicación} = \frac{\text{Agua Almacenada}}{\text{Agua Aplicada}} * 100 \quad (12)$$



Figura 29. Esquema de variables incluidas en el cálculo de la eficiencia de aplicación.

Si bien existen procedimientos puntuales para el cálculo de las componentes de la eficiencia de riego, actualmente el desarrollo de nuevas tecnologías ha permitido el desarrollo e integración de nuevas metodologías de cálculo. Tal es el caso del uso de imágenes de satélite para la determinación de las variables antes mencionadas.

4.2.6.1.5. Recarga urbana (fugas en sistema de abastecimiento y de saneamiento)

La recarga urbana es variable en el tiempo, y responde a cambios en el uso del suelo, en la infraestructura de la zona subsuperficial y a los cambios climáticos. La urbanización puede alterar radicalmente y por completo el balance hídrico de un área, debido a que en la mayoría de las grandes áreas urbanas el agua es importada, incrementando todos los ítems del balance. Se puede desarrollar un microclima, particularmente en zonas húmedas, presentándose

cambios en temperatura, humedad y velocidad del viento, lo cual puede llevar a cambios en la precipitación y en la evapotranspiración (Hall, 1984; En Lerner, 2002).

Las fuentes y vías de recarga en zonas urbanas son más numerosas y complejas que en medios rurales. Los edificios, carreteras y otras infraestructuras superficiales se combinan con las obras antrópicas de drenaje para modificar las vías de infiltración. Aunque una parte de la recarga directa se pierde, puede haber contribuciones adicionales a partir de los sistemas de drenaje de aguas pluviales, ya que se importa grandes volúmenes de agua a la mayoría de las ciudades para su abastecimiento, se distribuye luego por medio de tuberías subterráneas, y es recogida de nuevo en alcantarillas o fosas sépticas; todos estos sistemas de redes presentan fugas que alimentan las reservas subterráneas. Adicionalmente se presenta recarga directa de parques y jardines y recarga localizada a lo largo de los lados de calles y vías donde no existe un drenaje de aguas lluvias. Esta situación es común en zonas áridas y semiáridas y en ciudades urbanizadas rápidamente.



Figura 30. Urbanización de zonas agrícolas

En general las fuentes de recarga en zonas urbanas se pueden identificar mediante tres métodos: piezometría, trazadores químicos y balances de agua, pero los tres presentan problemas.

Los métodos usuales de estimación de recarga se pueden utilizar también en áreas urbanas, sin embargo, la complejidad de las ciudades y la falta de datos genera grandes

incertidumbres. En la mayoría de los casos la estimación de la recarga urbana se realiza por zonas, las cuales son escogidas de manera que el uso de la tierra, el tipo de suelo y la infraestructura hídrica sean uniformes para cada zona. La recarga puede cuantificarse por dos métodos generales que son: Balance Hídrico y Técnicas Holísticas.



Figura 31. Diversas Fuentes de Recarga Urbana

La principal recomendación que se puede sugerir para estimar la recarga, es el uso de dos o más técnicas que permitan comparar resultados; tomando una de ellas como método principal y las restantes como técnicas auxiliares, teniendo en cuenta que todas sean aptas para aplicarse en la región de interés, y poniendo especial cuidado en la elaboración del modelo conceptual y en las hipótesis o simplificaciones asumidas.

4.2.6.1.6. Recarga artificial

Se designa como recarga artificial a un conjunto de técnicas que permiten, mediante intervención programada e introducción directa o inducida de agua en un acuífero, incrementar el grado de garantía y disponibilidad de los recursos hídricos, así como actuar sobre su calidad (Bridget, 2002).

Los procedimientos ideados para poder llevar a la práctica esta técnica son múltiples y variados, aunque resulta muy clásico el establecimiento de dos grandes grupos de métodos en función de que la recarga se efectúe bien por infiltración a través de la superficie del

terreno, o bien por introducción directa del agua hasta el acuífero mediante una perforación que lo atraviesa (Bridget, 2002).

Este tipo de recarga al ser directamente inducido por el hombre, puede tener un mayor control en cuanto a seguimiento y cuantificación de los volúmenes inyectados al acuífero.

De esta manera el tamaño de una instalación de recarga artificial (dispositivo de infiltración) está relacionado con el método de recarga empleado (superficial o profundo) y con los aspectos hidráulicos del terreno e hidrodinámicos del acuífero donde se ubiquen los dispositivos de infiltración.

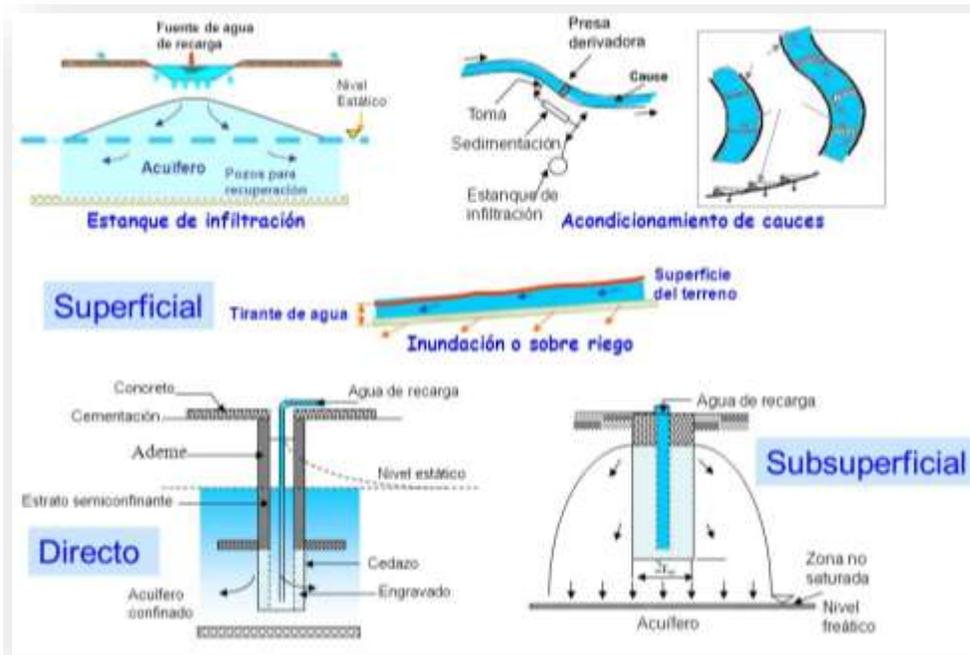


Figura 32. Métodos de Recarga Artificial en un acuífero

Para el caso de México, se deben cumplir los procedimientos y requisitos establecidos en la NOM-014-CONAGUA-2003, la cual establece los lineamientos para la recarga artificial de acuíferos con aguas tratadas o con la presencia de residuos.

4.2.6.2. Salidas

4.2.6.2.1. Bombeo



La extracción de agua subterránea mediante bombeo se determina en un intervalo de tiempo a partir del registro de lecturas de los medidores instalados en los pozos. En caso de no ser confiable la información o que no se tengan registros se puede determinar por métodos indirectos. La estimación de la extracción se calcula a partir de los censos de los aprovechamientos ubicados en el ámbito del acuífero y con información más actualizada y delimitados por el área en estudio incluyendo todos los pozos dentro del área del acuífero. Se siguen los siguientes criterios (Escalante, 2012):

- Pozos Agrícolas.- Esta se puede hacer por medio del gasto medio y el tiempo de operación o bien, conociendo el tipo de cultivo, mediante la determinación de la lámina y superficies de riego.
- Pozo Público-Urbano.- su extracción puede estimarse con el gasto medio y su tiempo de operación o mediante la dotación y el número de habitantes servidos.
- Pozos Industriales.- La estimación se puede realizar al definir el gasto y el tiempo de operación o determinando los factores de consumo de acuerdo al tipo de industria.

Para el caso de la determinación de superficies sembradas y vegetación natural: así como de la evaporación del cultivo (ETc); se puede optar por los censos antes mencionados, o bien de información estadística histórica de las diferentes dependencias gubernamentales. Sin embargo actualmente existen herramientas de última generación como la teledetección que permiten conocer en tiempo real el comportamiento de estos parámetros.

4.2.6.2.2. Flujo subterráneo. (Modelos Hidrogeológicos)

Los modelos hidrogeológicos son representaciones de un sistema real. Estos permiten observar de manera simplificada el comportamiento de un acuífero como herramienta de la investigación hidrogeológica, la cual se fundamenta con información proveniente del campo y el laboratorio. La relación directa entre la información proveniente de estas fuentes y los modelos asistidos por ordenador, se basan en sus características espaciales definiendo un grupo de geodatos del área objeto de interés (Rushton, 1988).

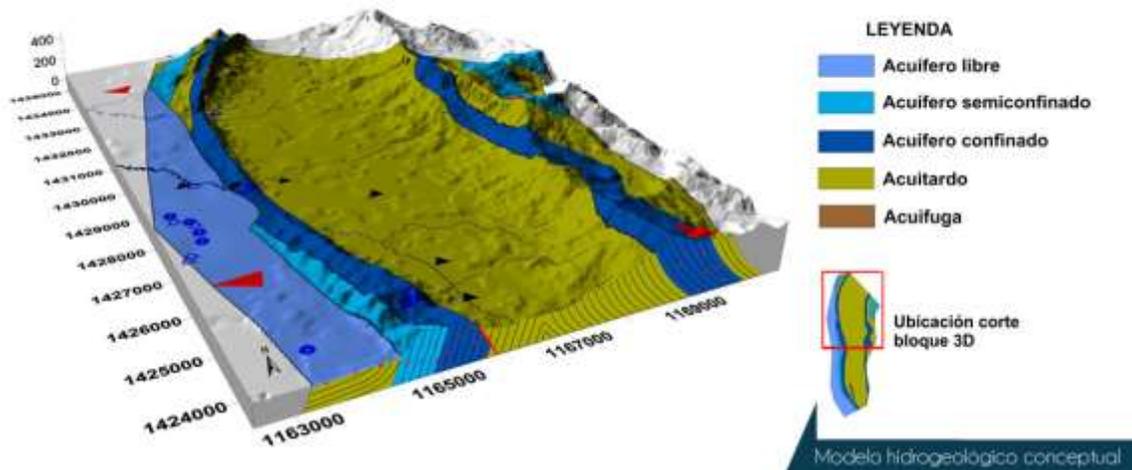


Figura 33. Representación de un modelo hidrogeológico conceptual

En la actualidad existen diversos softwares especializados que se utilizan para generar los modelos matemáticos de un acuífero, los cuales permiten diferenciar los elementos que componen el modelo hidrogeológico conceptual, realizando para ello una discretización del acuífero.

Discretizar un medio físico consiste en dividirlo en celdas mediante algún método, dentro de los cuales podemos mencionar los dos más utilizados que es el método de elementos finitos y el método de las diferencias finitas. El método de los elementos finitos consiste en dividir medio físico en elementos infinitesimales, resulta ser muy versátil ya que se adapta a medios físicos complejos; sin embargo resulta muy complejo para programar (Linares, 2003)

En el método de las diferencias finitas se reemplazan las diferencias infinitesimales por diferencias mensurables. Es un método intuitivo y fácil de programar; sin embargo es difícil que se adapte a zonas complejas con capas deformes, pudiendo considerar zonas fuera del área de interés (Linares, 2003).

En el Anexo B del presente documento se encuentra la representación hidrogeológica del Acuífero 1119 “Irapuato – Valle”.



5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ÁREA DE ESTUDIO.

5.1.1. Localización de la Zona de Estudio.

El Acuífero Irapuato-Valle se encuentra ubicado entre las coordenadas 101° y 102° Longitud Oeste y los 20° y 21° de Latitud Norte, está ubicado en la parte centro sur del Estado de Guanajuato. La superficie que comprende el acuífero Irapuato-Valle de Santiago es de aproximadamente 2,458.50 km² el cual fue establecido en las ultimas delimitaciones realizadas en 2009, el cual representa un aumento de 9.13 % de la superficie anterior, y corresponde un 8.1% de la superficie estatal.



Figura 34. Ubicación del Acuífero Irapuato – Valle
(Fuente: Elaboración propia)

Dentro de los límites que ocupa el acuífero existen 15 municipios, los seis más importantes por su población son Irapuato, Salamanca, Valle de Santiago, Jaral del Progreso, Cortázar y Pueblo Nuevo. Estos municipios agrupan a 816,255 habitantes (INEGI, 2010), que representan el 17.5% de la población del estado y el 98.4% de la zona de estudio. Otros 9 municipios se incluyen marginalmente en la zona de estudio y son: Abasolo, Allende,

Guanajuato, Dolores Hidalgo, Huanímaro, Santa Cruz de Juventino Rosas, Salvatierra, Yuriria y Villagrán; en algunos es tan pequeña la proporción de territorio que se incluye en la poligonal del acuífero, que no hay población registrada habitando en ella. La población total para el año 2010 era de 1, 871,671 habitantes, lo que representa una densidad de población de 745.35 habitantes por kilómetro cuadrado.

5.1.2. Hidrografía.

La hidrografía la compone principalmente el Río Lerma, que se conduce en la parte central y sureste del área en estudio. Los afluentes principales del Río Lerma son: el Río Guanajuato, el cual confluye al río Lerma a la altura del poblado Pueblo Nuevo; otros afluentes del Río Lerma son, el Arroyo Ortega, que se ubica en la porción norte, tiene una dirección preferencial E-W, se trata de un arroyo intermitente que nace en la vertiente sur de la Sierra de Guanajuato y el Río Temascalío, que también se trata de un arroyo intermitente, con dirección norte-sur y que también es un afluente del Río Lerma (CONAGUA, 2002).

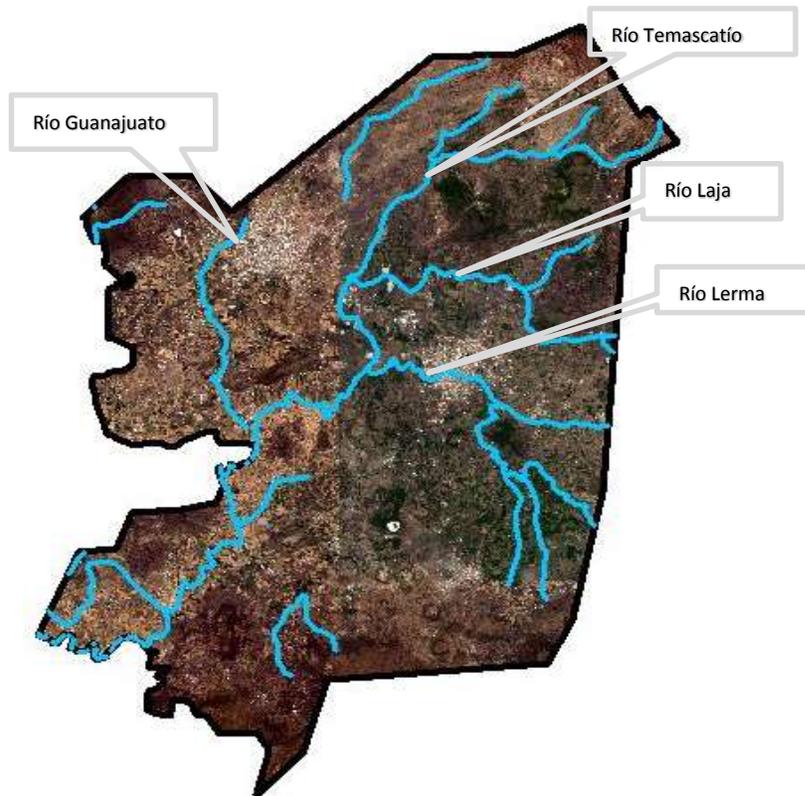


Figura 35. Hidrografía del acuífero Irapuato – Valle
(Fuente: Elaboración propia)

5.1.3. Fisiografía

El estado de Guanajuato está cruzado por diversos accidentes orográficos, cuyas elevaciones fluctúan entre los 2,300 m y los 3,000 msnm, siendo la altura media del relieve topográfico de 2,305 m para las partes altas y de 1,725 m para las llanuras.

El acuífero Irapuato – Valle se localiza dentro de dos provincias fisiográficas: en el Eje Neovolcánico en la porción sur y la Mesa del Centro en la parte noreste. De ellas, la primera es la que abarca mayor área (INEGI, 2010).

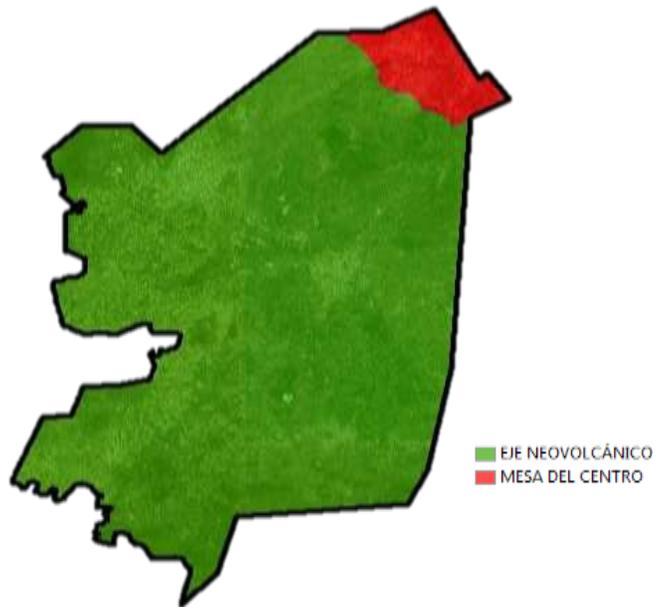


Figura 36. Provincias Fisiográficas presentes dentro del acuífero Irapuato –Valle
(Fuente: Elaboración propia)

La primera zona corresponde al Bajío Guanajuatense o simplemente el Bajío, que es una región llana, interrumpida por algunos lomeríos y cerros aislados, destacando la Gavia y el Culiacán; y cráteres extinguidos en Salamanca, Valle de Santiago y Yuriria. Esta región, ocupa toda la parte del estado que se ubica al sur de la Sierra de Guanajuato. Se caracteriza por una llanura de 1,700 a 1,800 msnm y en su mayoría está ocupada por terrenos agrícolas. Los suelos son de tipo chernozem de color negro y chesnut, con predominio de los primeros y la precipitación pluvial anual promedio se encuentra en los 700 mm, se considera que las tierras de esta zona son de las más ricas del país (INEGI, 2010).

5.1.4. Clima.

En el estado de Guanajuato prevalece el clima seco y semiseco en un 43% de su superficie y el que menor porcentaje representa es el clima templado subhúmedo con un 24%. En cuanto al acuífero bajo estudio, este presenta en toda su superficie un clima templado subhúmedo en sus tres variantes de acuerdo con el INEGI, como se puede apreciar en la siguiente figura.

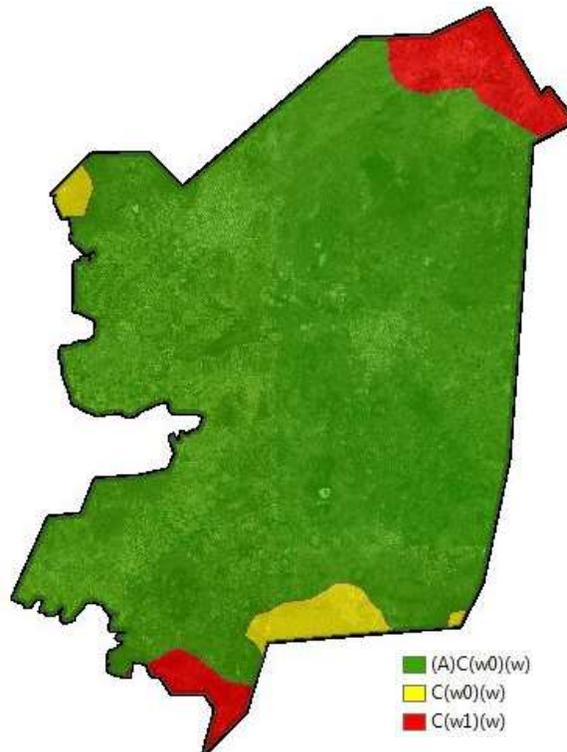


Figura 37. Climatología del acuífero Irapuato – Valle
(Fuente: Elaboración propia)

Clima templado subhúmedo (menos húmedo): Los rangos de precipitación media anual fluctúan entre los 700 - 800 mm y la temperatura media anual oscila entre los 16 y 18 °C.

Clima templado subhúmedo (humedad media). Intermedio en cuanto a humedad, la precipitación media anual oscila entre los 700 - 800 mm y la temperatura media anual varía de los 16 a los 18 °C.

Clima templado subhúmedo (mayor humedad). El más húmedo de los tres, la precipitación media es mayor a los 800 mm y los rangos térmicos de menos de 16 °C.

5.1.5. Áreas Naturales Protegidas

Con el propósito de garantizar la preservación y conservación de nuestro patrimonio natural y asegurar el aprovechamiento sustentable y disponibilidad de los recursos naturales en el Estado de Guanajuato, a partir del año 1997 el Ejecutivo del Estado ha venido realizando la declaratoria y manejo integral de Áreas Naturales Protegidas.

De acuerdo con información de CONABIO, INEGI y la CONANP dentro de los límites del acuífero no se encuentra ningún área natural protegida. Sin embargo de acuerdo con el Instituto de Ecología de Guanajuato, se encuentra un Monumento Natural denominado “Región Volcánica Siete Luminarias”, así como una parte de Áreas de Uso Sustentable. El impacto que tienen estas áreas para el balance de aguas en el acuífero se debe a que en estos espacios se llevan a cabo procesos de infiltración y recarga de los mantos acuíferos debido a la vegetación y actividades que se desarrollan.

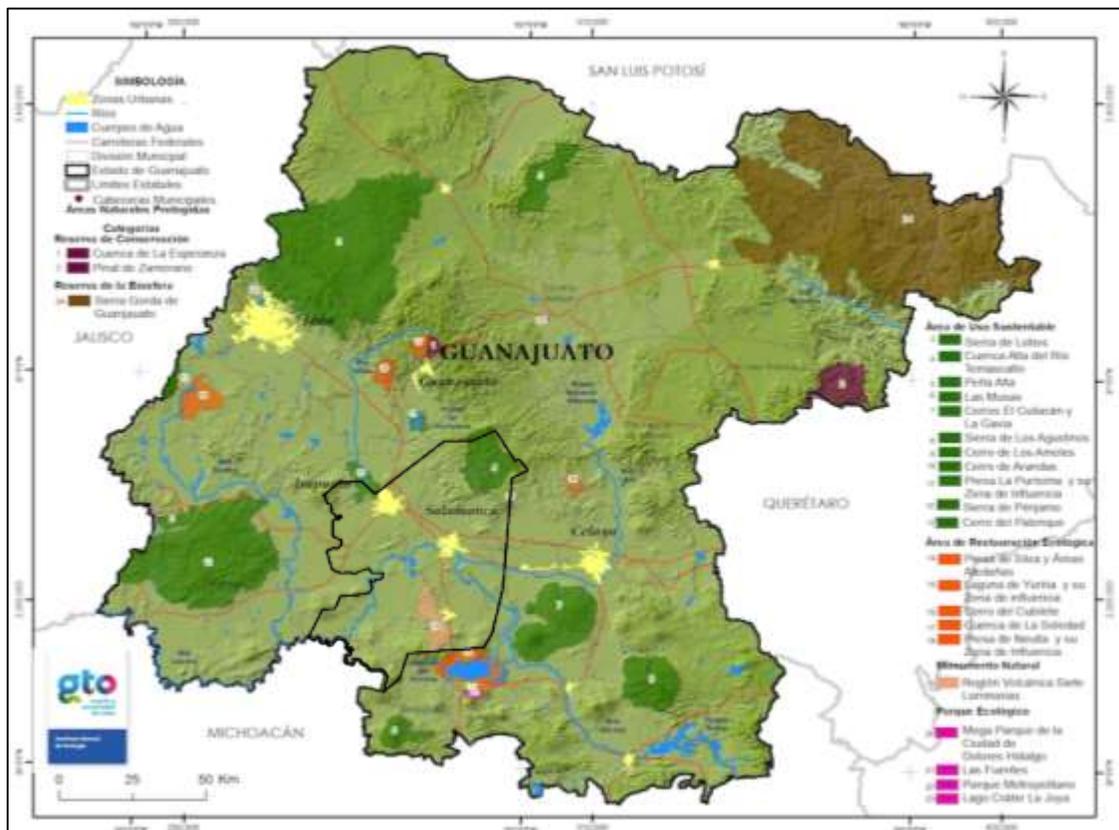


Figura 38. Áreas Naturales protegidas de Guanajuato (Instituto Estatal de Ecología, 2013)

5.1.6. Edafología

Los suelos en Guanajuato presentan características muy variables, con diferencias en textura, pH, profundidad, contenido de materia orgánica, cantidad de nutrimentos, etcétera. En la siguiente figura se muestran los principales tipos de suelo del área de influencia del acuífero Irapuato-Valle de acuerdo con la Clasificación Mundial de Suelos de la FAO, en donde destacan los Vertisoles al sur del acuífero y los tipos Feozem (háplico y lúvico) en el norte. También se presentan con una superficie menor los Litosoles, Luvisoles y Planosoles, principalmente.

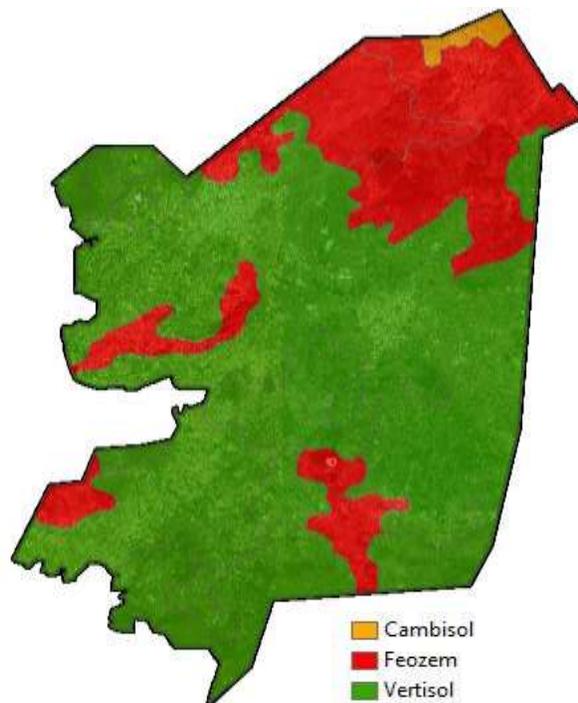
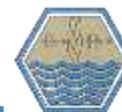


Figura 39. Edafología del acuífero Irapuato – Valle
(Fuente: Elaboración propia)

Las características edafológicas favorecen la práctica agrícola como actividad económica principal del estado sobre todo en la zona del centro y sur. Un factor que condiciona la mayor recarga de los acuíferos es el drenaje interno de este tipo de suelos. El hecho de que los suelos en los valles del Bajío sean pesados se relaciona directamente con la ocurrencia de inundaciones y disminuyen las posibilidades de recarga natural de los acuíferos en dichas zonas. Con la expansión de la frontera agrícola y de las zonas urbano-industriales se han alterado irreversiblemente superficies que antaño conformaban los ecosistemas terrestres.



5.1.7. Ámbito Sociodemográfico

El Acuífero Irapuato - Valle se ubica en el lugar de mayor dinamismo demográfico en el estado de Guanajuato, siendo el municipio de Irapuato el de mayor crecimiento y de mayor volumen de población. En 2010 se censaron 529 mil 440 habitantes, lo que representó el 9.65% de la población estatal y el 28.29% de su propia región (INEGI, 2014).

Cuadro 1. Población en la zona de influencia del Acuífero Irapuato - Valle

Municipio	Habitantes	%
Abasolo	84,332	4.51
Allende	160,383	8.57
Dolores Hidalgo	148,173	7.92
Guanajuato	171,709	9.17
Irapuato	529,440	28.29
Pueblo Nuevo	11,169	0.60
Romita	56,655	3.03
Salamanca	260,732	13.93
Santa Cruz de Juventino Rosas	79,214	4.23
Silao	173,024	9.24
Valle de Santiago	141,058	7.54
Villagrán	55,782	2.98
TOTAL	1,871,671	100%

Fuente: Censo 2010, INEGI

La región en su conjunto es demográficamente importante en el estado de Guanajuato, ya que concentró el 34.11% de la población estatal en 2010 y ha mantenido un incremento constante en su participación desde 1960. El volumen y crecimiento de la población de Irapuato y la región es de vital importancia, puesto que representa la presión a la que están sometidos los servicios públicos que los doce gobiernos municipales considerados, están comprometidos a garantizar. En números absolutos, Irapuato ha incorporado entre 2000 y 2010 a cerca de 9 mil habitantes por año. Los ritmos de crecimiento son también muy importantes, porque marcan la velocidad a la que se demandan los bienes y servicios. Irapuato es el municipio con mayor crecimiento absoluto en la región (INEGI, 2014).

La población irapatense ha experimentado un crecimiento sostenido de 40 años (1950-1990) con tasas poblacionales promedio en aumento y un altibajo en 1970, para repuntar en 1980,

hasta llegar a una tasa promedio anual en la siguiente década de 3.95%. No obstante, a partir de esta fecha inicia una desaceleración similar a la del estado y del país (INEGI, 2010).

5.1.8. Eventos Hidrometeorológicos Extremos

México es afectado por varios tipos de fenómenos hidrometeorológicos que pueden provocar la pérdida de vidas humanas o daños materiales de importancia; principalmente está expuesto a lluvias, granizadas, nevadas, heladas y sequías (CENAPRED, 2006).

Guanajuato ha sido en varias ocasiones afectado por éste tipo de eventos, que han traído como consecuencia problemas de sequías, inundaciones, heladas y granizadas principalmente, aunque no hay que descartar los incendios forestales que acaban con la cubierta vegetal fundamental para fines de recarga de agua a los mantos acuíferos del estado.

En el Anexo C del presente trabajo, se describen algunos de los principales eventos hidrometeorológicos que han acontecido en los municipios que forman parte del acuífero Irapuato – Valle.

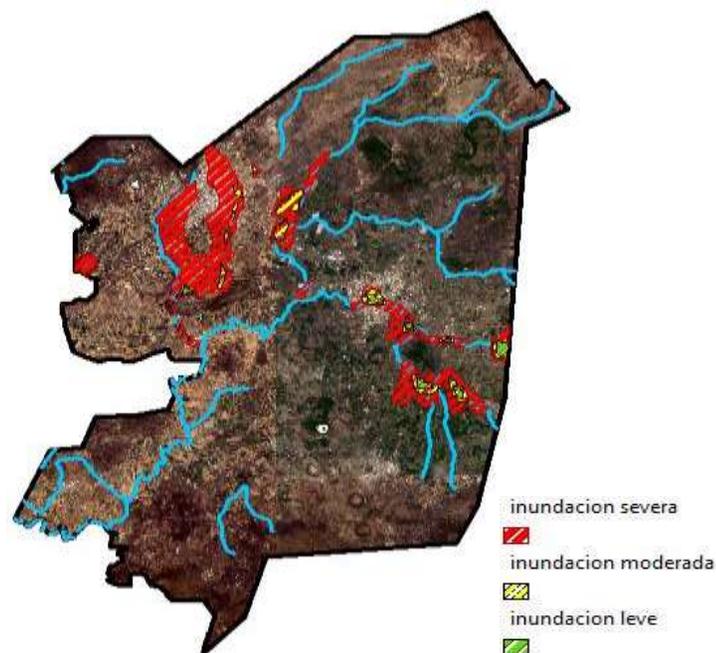


Figura 40. Zonas en Riesgo por Inundación en el acuífero
(Fuente: Elaboración propia)



Debido a la importancia que tienen en la zona de estudios los fenómenos relacionados con inundaciones, la brigada PIAE (Protección a la Infraestructura y Atención de Emergencias) del estado de Guanajuato se ha dado a la tarea de “semaforizar” los principales cauces del estado y en base al gasto que por ellos transitan delimitar las zonas que son susceptibles de inundarse (Ver Figura 40).

5.1.9. Infraestructura Hidráulica Urbana

Entendiéndose por infraestructura hidráulica a una construcción, particularmente del ramo de la ingeniería civil, donde el elemento dominante tiene que ver con el agua. Se puede decir que las obras hidráulicas constituyen un conjunto de estructuras construidas con el objeto de manejar el agua, cualquiera que sea su origen, con fines de aprovechamiento o de protección.

Generalmente se consideran obras hidráulicas a cualquiera que se encuentre dentro de los siguientes grupos:

- Canales.
- Dispositivos para la medición del caudal.
- Dispositivos de seguridad.
- Cruces
- Presas
- Estaciones de bombeo
- Sistema de abastecimiento de agua potable
- Sistema de recogida de aguas residuales
- Sistemas de riego
- Sistemas de drenaje
- Defensas ribereñas
- Recarga de acuíferos, Pozos de absorción.
- Tránsito de cuenca
- Entre otros.

El acuífero Irapuato-Valle es uno de los de mayor extensión territorial en el estado de Guanajuato, además de que en él se encuentran importantes centros urbanos y una amplia franja que corresponde a los corredores tanto industriales como agrícolas.

Para cuantificar la cobertura en infraestructura de diferente índole dentro de la zona de estudio y poder realizar los análisis, primero se identificaron los municipios y principales centros urbanos que se encuentran dentro de la zona de influencia del acuífero. Lo anterior se debe a que la información de partida con que se cuenta está a nivel de municipios.

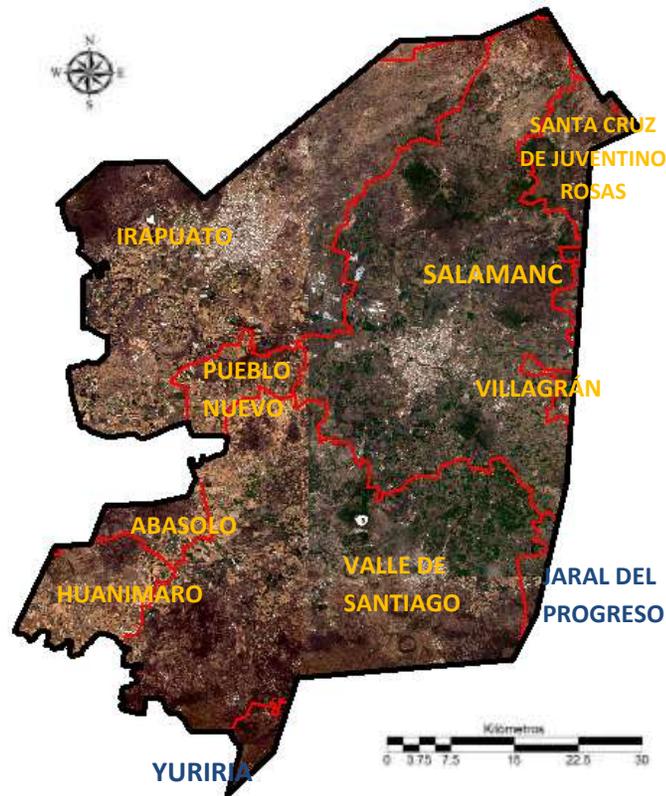


Figura 41. Municipios que intervienen en el área de influencia del acuífero Irapuato-Valle.
(Fuente: Elaboración propia)

Para lo anterior, resulta importante definir el área que se desea analizar; siendo en este caso el acuífero y los municipios (Figura 41) que se encuentran dentro de su área de influencia. En el Cuadro 2, se muestran los municipios dentro del acuífero Irapuato-Valle, el porcentaje se su superficie territorial que se encuentra dentro del acuífero, así como datos correspondientes a cantidad de viviendas y habitantes.



Cuadro 2. Municipios dentro del acuífero Irapuato-Valle.

Núm.	Nombre	Viviendas particulares habitados	Área total (km ²)	Área en el acuífero (km ²)	% de influencia del municipio en el acuífero	Viviendas particulares habitados dentro del acuífero	Habitantes totales en el municipio
1	Abasolo	19,055	615.88	50.71	8.23	1,568	84,332
2	Huanímaro	4,630	127.63	99.76	78.16	3,619	20,117
3	Irapuato	121,028	851.66	616.61	72.40	87,624	529,440
4	Jaral del Progreso	8,876	175.44	20.29	11.57	1,027	36,584
5	Pueblo Nuevo	2,833	59.92	59.92	100.00	2,833	11,169
6	Salamanca	63,592	755.94	734.32	97.14	61,824	260,732
7	Santa Cruz de Juventino Rosas	17,101	429.20	84.46	19.68	3,413	79,214
8	Valle de Santiago	32,912	820.12	746.33	91.00	29,950	141,058
9	Villagrán	12,404	128.52	10.84	8.44	1,047	55,782
10	Yuriria	17,709	666.69	22.96	3.44	609	70,782
Total						193,515	1,289,210

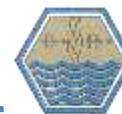
Fuente: Diagnóstico sectorial de agua potable y saneamiento, 2013 – INEGI, 2010.

5.1.10. Infraestructura Hidroagrícola

En el caso particular de la infraestructura hidroagrícola, el acuífero es de los más representativos, ya que cuenta con una gran cantidad y diversidad de estructuras con propósito agrícola. Para identificar este tipo de infraestructura, se realizan cruces de información vectorial y estadística de lo siguiente:

- Principales presas dentro de los límites del acuífero, con sus principales características.
- Pozos en el acuífero
- Infraestructura en Distritos y Unidades de Riego. Para este caso se divide en infraestructura de conducción, distribución, aprovechamientos superficiales y subterráneos, entre otros criterios.

A continuación se detalla cada uno de los puntos anteriores.



a.- Presas de almacenamiento

Dentro del área de estudio del presente trabajo se encuentran cinco presas pequeñas; y de acuerdo con la información encontrada cuatro se utilizan para riego. En el Cuadro 3 se muestra la información relativa a cada una de las Presas.

Cuadro 3. Características de las principales presas dentro del área de influencia del acuífero Irapuato-Valle.

CARACTERÍSTICAS	PRESAS (NOMBRE OFICIAL)				
	PAREDONES	SAN ISIDRO	SANTA CATARINA	CAL Y CANTO	ORTEGA
NOMBRE COMÚN	CABERO		SANTA CATARINA		ORTEGA
ESTADO	GUANAJUATO	GUANAJUATO	GUANAJUATO	GUANAJUATO	GUANAJUATO
MUNICIPIO	APASEO EL ALTO	ACÁMBARO	SAN FELIPE	ACÁMBARO	IRAPUATO
LATITUD	20.39	19.99	21.55	19.97	20.74
LONGITUD	-100.56	-100.73	-101.07	-100.87	-101.23
CORRIENTE	LA CAÑADA	ARROYO LA TOMA	ARROYO ARAMBULLO		RÍO TEMASCATÍO
ALTURA DE LA CORTINA (m)	8.00	12.00	7.00	8.00	23.00
MATERIAL DE LA CORTINA	HOMOGENEA DE TIERRA	CALICANTO	HOMOGENEA CON PROTECCIÓN DE ENROCAMIENTO	MAMPOSTERÍA	MATERIALES GRADUADOS
TIPO	FLEXIBLE DE TIERRA Y/O ENROCAMIENTO	RÍGIDA DE GRAVEDAD	FLEXIBLE DE TIERRA Y/O ENROCAMIENTO	RÍGIDA DE CONTRAFUERTES	FLEXIBLE DE TIERRA Y/O ENROCAMIENTO
CAPAC. DE ALMAC. N.A.M.O. (hm ³)	0.67	0.14	0.17	1.00	8.10
AÑO DE TERMINACIÓN	1960		1900		2003
USO DEL AGUA	RIEGO	RIEGO	RIEGO	RIEGO	S/D
ORGANISMO RESPONSABLE	USUARIOS	EJIDO TÓCUARO	USUARIOS		GOBIENO DEL ESTADO

Fuente: Elaboración propia con datos de CONAGUA.

En la siguiente imagen se muestra la ubicación de las presas anteriores, dentro del Acuífero Irapuato – Valle.

Cabe señalar que la Presa “La Purísima” no se encuentra dentro de los límites del acuífero en estudio; sin embargo es una fuente importante de aportaciones de agua al sector agrícola de Irapuato. Además de las implicaciones que dichas aguas superficiales tienen en la recarga por retorno agrícola.

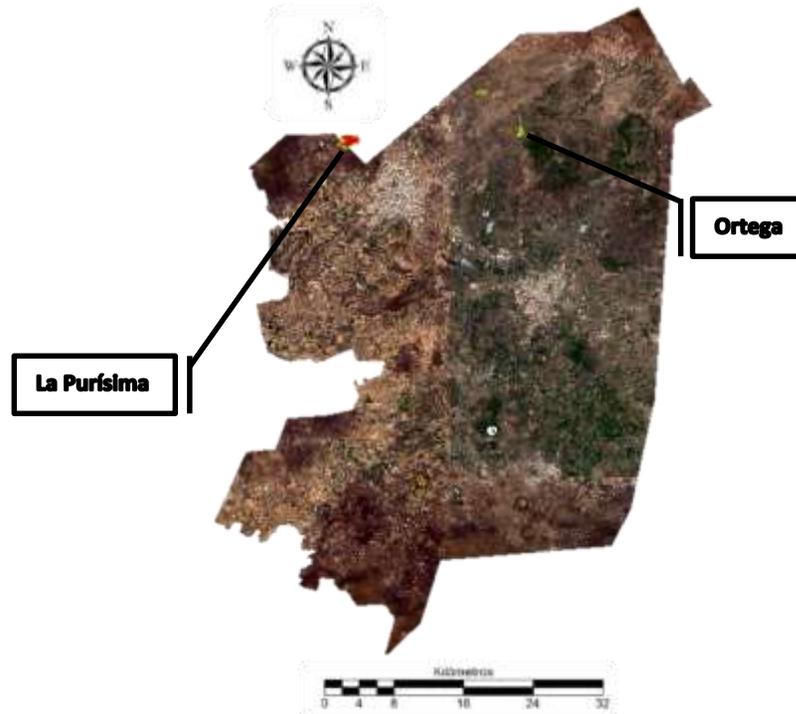


Figura 42. Presas de almacenamiento dentro del acuífero Irapuato-Valle.
(Fuente: Elaboración propia)

b.- Pozos

Dentro del área de influencia del acuífero bajo estudio, se ubica la mayor parte del Distrito de Riego 011 “Alto Río Lerma”, y de acuerdo con su Sistema de Información Geográfica, en dicha área se localizan 984 pozos, de los cuales 93 son oficiales y el resto particulares, que en conjunto riegan una superficie aproximada de 3,188.4 hectáreas del DR.

Del total de pozos oficiales, 35 pozos se encuentran en buen estado (37.63%), 43 en estado regular (46.24%) y 15 en mal estado (16.13%). De los pozos particulares, 448 se encuentran en buen estado (50.28%), 337 en estado regular (37.82%) y 106 en mal estado (11.90%).

Por otra parte de acuerdo al sistema de Información Geográfica de las Unidades de Riego (UR) dentro de la zona del presente acuífero se encuentran 668 pozos que riegan una superficie aproximada de 21,101.73 ha. En la Figura 43 se muestran los pozos ubicados dentro del acuífero Irapuato-Valle clasificados por el estado físico que guarda su infraestructura.

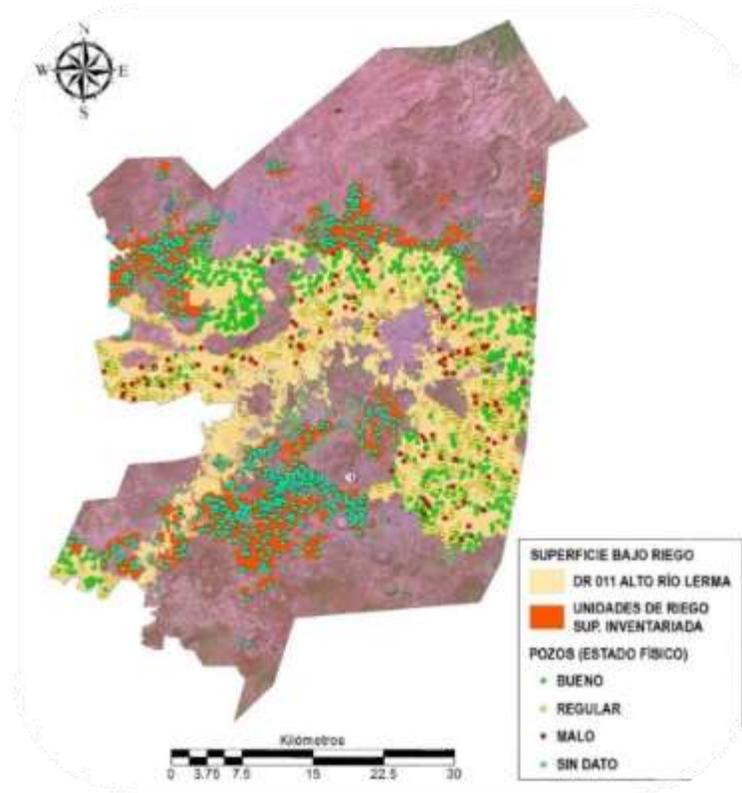


Figura 43. Pozos agrícolas pertenecientes a los Distritos de Riego 011 y Unidades de Riego ubicados dentro del Acuífero Irapuato-Valle.
(Fuente: Sistema de Información Geográfica DR 011 “Alto Río Lerma” y Unidades de Riego en Gto.)

c.- Distritos de Riego

- Superficie Bajo riego

De acuerdo al SIG del Distrito de Riego 011 “Alto Río Lerma”, cuenta con una superficie total de 119,858.82 ha, que es 17% y 16 % inferior a la registrada como física y de riego, respectivamente. Dentro del área de influencia del acuífero se ubican 17,624 parcelas (o fracciones de parcelas), lo que equivale aproximadamente al 51.7% (61,921.71 ha), en el Cuadro 4 se muestra la información referida.

Cuadro 4. Superficie de parcelas del DR 011 Alto Río Lerma, que se ubican dentro de los límites del acuífero Irapuato-Valle.

Módulo	Núm. Parcelas	Superficie (ha)			
		Sup. calculada	Sup. física*	Sup. riego*	Sup. procede*
Módulo 04	3,107.00	12,279.70	13,995.90	13,932.10	1,788.30

Módulo	Núm. Parcelas	Superficie (ha)			
		Sup. calculada	Sup. física*	Sup. riego*	Sup. procede*
Módulo 05	2,302.00	9,137.30	10,680.00	10,658.60	4,290.70
Módulo 06	4,027.00	14,656.80	21,251.20	20,698.40	4,228.00
Módulo 07	2,267.00	8,160.20	10,295.30	10,247.40	4,459.50
Módulo 08	5,004.00	15,860.50	15,387.60	15,288.50	4,166.10
Módulo 09	917.00	1,827.40	2,451.40	2,445.60	915.60
Total	17,624.00	61,921.90	74,061.50	73,270.60	19,848.20

Fuente: SIG del DR 011 “Alto Río Lerma”

En la Figura 44 se muestra la superficie de cada uno de los módulos de los distritos de riego que intervienen en el Acuífero Irapuato - Valle.

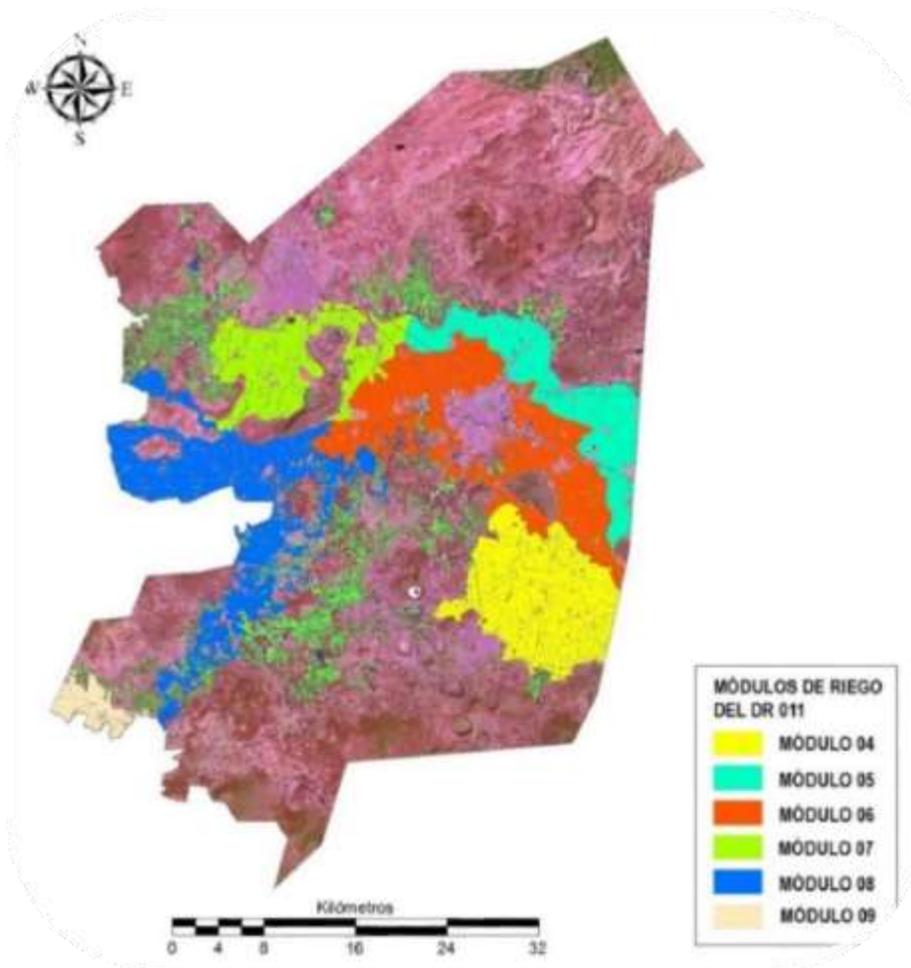


Figura 44. Distritos de riego en el área de influencia del acuífero Irapuato-Valle.
(Fuente: SIG del DR 011 “Alto Río Lerma” y 087 “Rosario-Mezquite”)

- **Red de conducción**

Respecto a la red de conducción se tienen canales a cielo abierto y tubería; ambos a nivel de red principal, lateral y otro (sublateral, ramal, subramal, etc.). En el Cuadro 5 se presenta la longitud por tipo de canales que dispone para riego el DR 011 “Alto Río Lerma, así como la proporción que se localiza dentro del acuífero Irapuato-Valle.

Cuadro 5. Red de canales del DR 011 Alto Río Lerma dentro del acuífero Irapuato-Valle.

Canal	Longitud en el DR 011 (m)	Longitud dentro del acuífero Irapuato-Valle (m)	%
Principal	485,884.33	147,203.72	30.30
Lateral	773,320.19	380,477.11	49.20
Otro	470,834.27	276,772.70	58.78
Total	1,730,038.79	804,453.53	

Fuente: SIG del DR 011 “Alto Río Lerma”

La Figura 45 muestra la red de conducción perteneciente al Distrito de Riego que toma parte en el acuífero Irapuato-Valle.

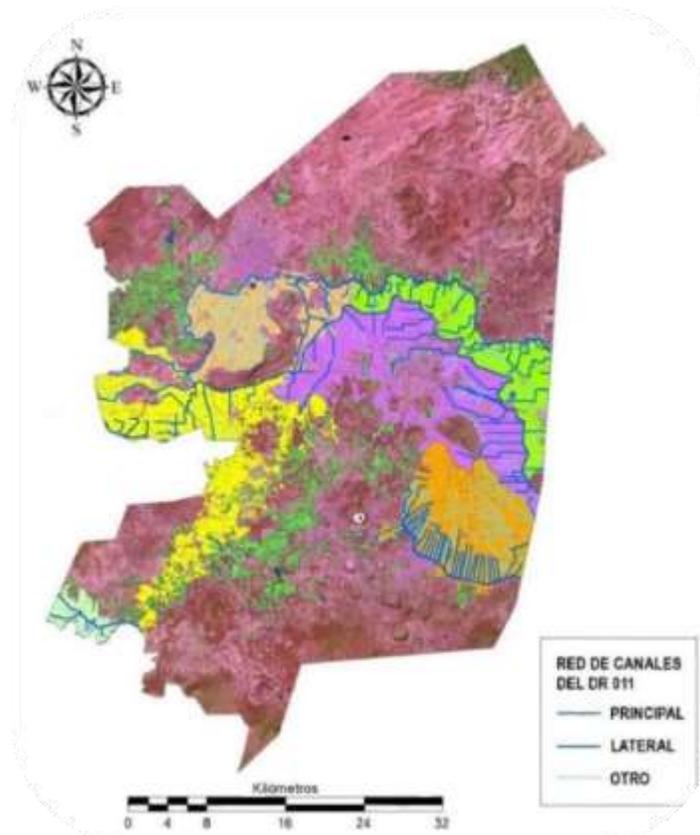


Figura 45. Distritos de riego en el área de influencia del acuífero Irapuato-Valle. (Fuente: SIG del DR 011 “Alto Río Lerma” y 085 “La Begoña”)

d.- Unidades de Riego

En el acuífero se tienen en total 5,463 parcelas de unidades de riego, con una superficie de 25,379.11 ha, mismas que son abastecidas en su totalidad por agua subterránea. Sin embargo al analizar el presente acuífero al analizar la superficie bajo riego se encontró que también se riega una superficie adicional de 12,948.13 ha, que no está inventariada pero que pertenece a las unidades de riego, por lo que suma una superficie total de 38,327.14 ha.

Cuadro 6. Superficie de Unidades de Riego dentro del acuífero Irapuato-Valle.

TIPO DE SUPERFICIE	SUPERFICIE (HA)
INVENTARIADA	25,379.11
NO INVENTARIADA	12,948.13
Total	38,327.14

Fuente: Elaboración propia

En la Cuadro 6 y Figura 46 se muestra la superficie bajo riego que pertenece a las unidades de riego, incluyendo la superficie inventariada y la no inventariada.

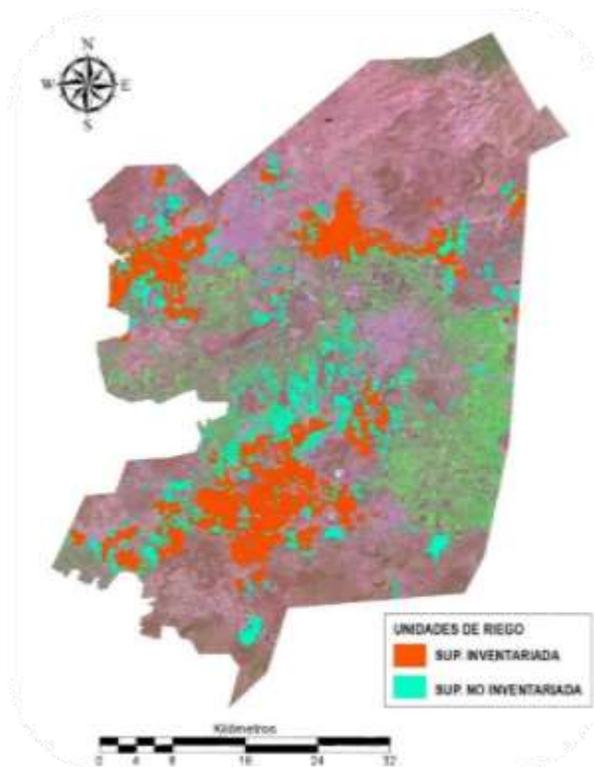


Figura 46. Unidades de Riego ubicadas dentro del Acuífero Irapuato-Valle.
(Fuente: SIG de Unidades de Riego en Gto)



5.1.11. Infraestructura de Red Hidrometeorológica

Dentro del área de influencia del acuífero bajo estudio, se encuentran estaciones climáticas e hidrométricas, siendo parte fundamental de la infraestructura hídrica en la zona.

A.- Estaciones Meteorológicas y/o Climatológicas y Servicios

En el área de influencia del acuífero Irapuato-Valle se localizan 24 estaciones meteorológicas y climatológicas, las cuales registran datos suficientes para la realización de estudios; dichas estaciones están distribuidas en toda el área del acuífero, en las zonas más importantes de los municipios y se encuentran bajo supervisión de diferentes dependencias. Dichas dependencias son las siguientes:

- *AMI = Bernardo Stephan Teufel*
- *DR011 = Distrito de Riego 011*
- *CCAUG = Centro de Ciencias Atmosféricas de la Universidad de Guanajuato*
- *INIFAP = Fundación Guanajuato Produce*
- *CEAG = Comisión Estatal del Agua de Guanajuato*
- *JAPAMI = Junta de Agua Potable y Alcantarillado de Irapuato*
- *CEPCE = Coordinación Ejecutiva de Protección Civil del Estado*
- *SMN = Servicio Meteorológico Nacional*

En el Cuadro 7 se presentan las estaciones encontradas, así como su respectiva información; mientras que en la Figura 47 se muestra la ubicación de las mismas dentro del acuífero.

Cuadro 7. Estaciones meteorológicas en el área de influencia del Acuífero Irapuato-Valle.

Núm.	Clave	Nombre	Municipio	Longitud (°)	Latitud (°)	Altitud msnm	Dependencia
1		Repetidor Huanímaro	Huanímaro	-101.48	20.36	N/D	DR011
2		La Joya	Huanímaro	-101.49	20.35	1737.00	INIFAP
3		Ami	Irapuato	-101.38	20.69	1720.00	AMI
4		Noria Nueva	Irapuato	-101.43	20.52	1700.00	INIFAP
5		El Copal	Irapuato	-101.33	20.74	1757.00	INIFAP
6		JAPAMI	Irapuato	-101.35	20.68	1709.00	JAPAMI
7	1128	Irapuato (SMN)	Irapuato	-101.35	20.68	1724.00	SMN
8	11164	El Copal E.A.Z.	Irapuato	-101.35	20.68	1750.00	SMN
9		Casa Blanca	Pueblo Nuevo	-101.31	20.56	1711.00	DR011
10	1154	Pueblo Nuevo	Pueblo Nuevo	-101.37	20.53	1714.00	SMN
11		La Ordeñita	Salamanca	-101.14	20.78	N/D	CEAG
12		Coria 67+800	Salamanca	-101.22	20.66	1722.00	DR011

Núm.	Clave	Nombre	Municipio	Longitud (°)	Latitud (°)	Altitud msnm	Dependencia
13		Repetidor Palo Blanco	Salamanca	-101.24	20.54	N/D	DR011
14		El Fuerte	Salamanca	-101.21	20.62	1716.00	INIFAP
15		Los Aguilares	Salamanca	-101.07	20.58	1726.00	INIFAP
16	1196	Salamanca (DGE)	Salamanca	-101.20	20.56	1723.00	SMN
17	1141	Los Razos	Salamanca	-101.15	20.67	1753.00	SMN
18	1152	Pericos	Salamanca	-101.11	20.52	1722.00	SMN/CEAG
19	11136	La Joyita	Santa Cruz de Juventino Rosas	-101.16	20.76	1830.00	SMN
20		Villadiego	Valle de Santiago	-101.12	20.40	1691.00	INIFAP
21		Las Estacas	Valle de Santiago	-101.35	20.44	1711.00	INIFAP
22	11133	Santa María Sanabria	Valle de Santiago	-101.30	20.42	1730.00	SMN
23	1179	Valle de Santiago	Valle de Santiago	-101.18	20.39	1748.00	SMN
22	11056	Planta R. Millán	Villagrán	20.51	-100.95	1730	SMN

Fuente: Elaboración propia con información de CEAG, 2013.

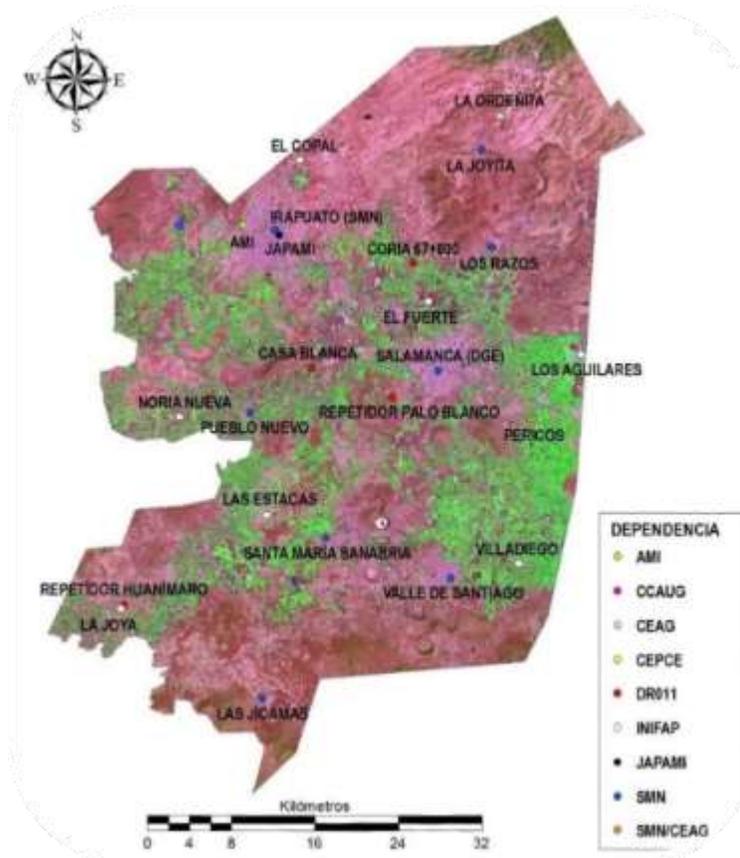


Figura 47. Estaciones meteorológicas en el área de influencia del acuífero Irapuato-Valle.
(Fuente: Elaboración propia con información de CEAG, 2012)

B.- Estaciones Hidrométricas

Dentro del área de influencia del Acuífero Irapuato-Valle se localizan siete estaciones hidrométricas, cuya descripción se presenta en el Cuadro 8.

Cuadro 8. Estaciones Hidrométricas en el área de influencia del Acuífero Irapuato-Valle.

Clave	Nombre	Rio principal	Región hidrológica	Longitud	Latitud	Gasto máx. (m ³ /s)
12007	Salamanca	Rio Lerma	Lerma - Santiago	-101.17	20.38	17
12238	Pericos	Rio de la Laja	Lerma - Santiago	-101.11	20.53	75
12352	Salamanca II	Rio Lerma	Lerma - Santiago	-101.20	20.57	67
12562	La Trinidad	Arroyo Temascalatío	Lerma - Santiago	-101.25	20.72	8
12743	San Juan Temascalatío	Arroyo Temascalatío	Lerma - Santiago	-101.22	20.73	22
12744	Copalillo	Rio Guanajuato	Lerma - Santiago	-101.35	20.72	26
12908	Arandas	Rio de la Llave	Lerma - Santiago	-101.37	20.71	32

Fuente: Elaboración propia con datos CONAGUA

En la siguiente figura se muestra la ubicación de las estaciones hidrométricas comprendidas dentro del área de influencia del acuífero Irapuato – Valle.

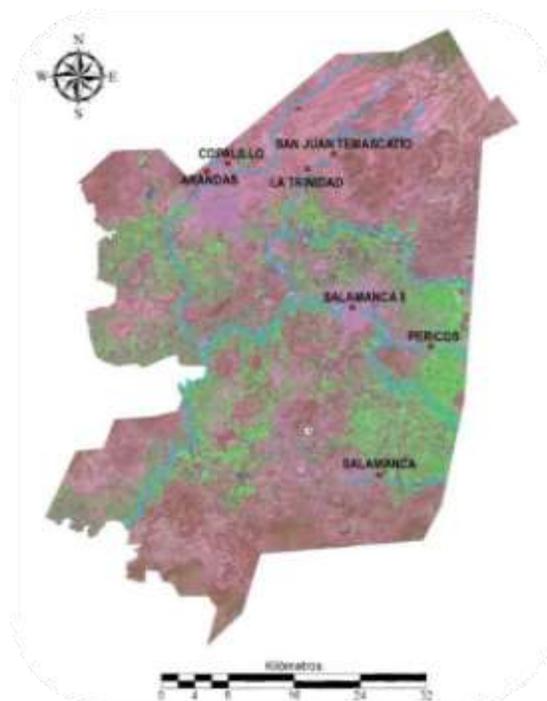


Figura 48. Estaciones hidrométricas en el área de influencia del acuífero Irapuato-Valle.
(Fuente: Elaboración propia con datos CONAGUA)

5.2. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL ACUÍFERO.

La disponibilidad de aguas subterráneas se estimó tomando como unidad de estudio al Acuífero 1119 Irapuato - Valle. Para su cálculo se siguieron dos metodologías o estrategias:

1) El Balance Oficial y 2) El Balance Real Calculado:

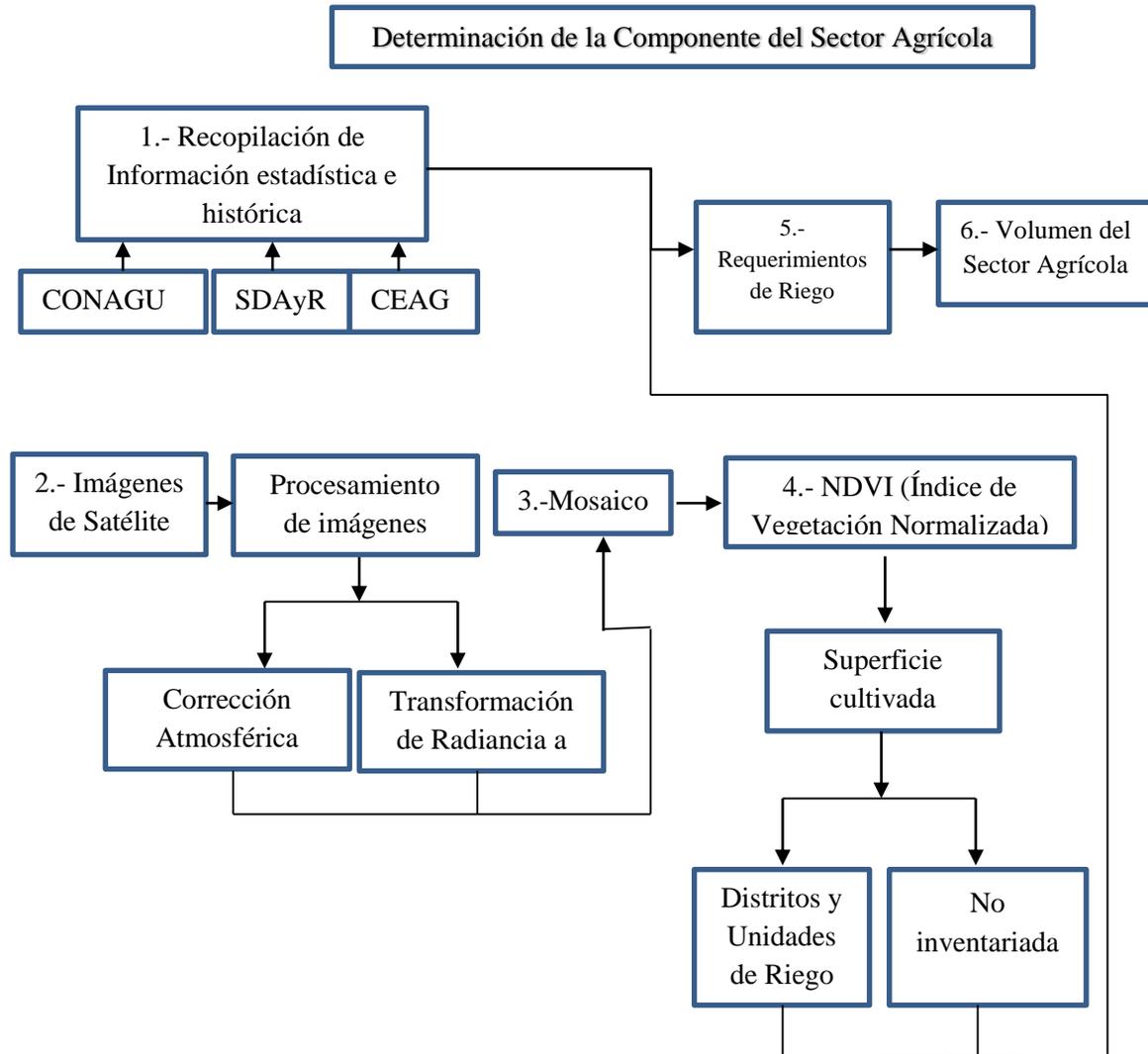


Figura 49. Diagrama de Flujo de metodologías para determinación de balance subterráneo

5.2.1. Recopilación de la Información

Para poder realizar el balance de aguas subterráneas, fue necesaria la recopilación de la información estadística con la que se cuenta. Para este propósito, se obtuvo información de las diferentes dependencias del sector hídrico en el estado; siendo la CONAGUA y la



Comisión Estatal del Agua de Guanajuato (CEAG) los que mayor información proporcionaron al respecto.

- Archivos tipo vector de: acuíferos, cuencas, ríos, presas de almacenamiento, pozos, distritos de riego, unidades de riego, municipios, estaciones meteorológicas, estaciones hidrométricas.
- Información de las características de las presas de almacenamiento localizadas en el sitio web de la Comisión Estatal del Agua de Guanajuato (CEAG), en la siguiente ruta: <http://seia.guanajuato.gob.mx/presas/Buscador/consultapresa.php>.
- Información de las estaciones meteorológicas e hidrométricas consultadas en el sitio web de la Centro de Información Hidroclimatológica de la CEAG, en la siguiente ruta: <http://hidroclima.guanajuato.gob.mx/red-de-monitoreo.html>.
- Documento del Diario Oficial de la Federación con fecha del 28 de Agosto del 2009, titulado: “Actualización de la disponibilidad Media anual de agua subterránea, Acuífero (1119) Irapuato-Valle. Estado de Guanajuato”.
- Documento del diario oficial de la federación publicado el 20 de diciembre de 2013, titulado: Acuerdo por el que se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las regiones hidrológico-administrativas que se indican.
- Documento del diario oficial de la federación publicado el 26 de febrero de 2014, titulado: Acuerdo por el que se dan a conocer los valores de cada una de las variables que integran las fórmulas para determinar durante el ejercicio fiscal 2014 las zonas de disponibilidad, a que se refieren las fracciones I y II, del artículo 231 de la ley federal de derechos, vigente a partir del 1 de enero de 2014.
- Archivo del CEAG con fecha de publicación de agosto del 2013, Titulada: “Diagnostico Sectorial de Agua Potable y Saneamiento 2012”.
- Archivo de la CONAGUA con fecha de septiembre del 2006, titulada: “Formulación del Plan Director para la Modernización Integral del Riego, del Distrito de Riego 011 Alto Rio Lerma, Guanajuato”.
- Estadísticas de usos de agua “Cubo de usos de agua”, CONAGUA 2010.



- Información de patrón de cultivos para ciclo O-I (2013) y P-V (2014) en los municipios de Abasolo, Irapuato, Salamanca, Santa Cruz de Juventino Rosas, que se encuentran dentro del área de influencia del acuífero Irapuato – Valle.
- Información estadística de INEGI, CONAPO.
- Censo de Aprovechamiento de aguas subterráneas del acuífero Irapuato-Valle, CEAG 2014.
- Documento del diario oficial de la federación publicado el 20 de diciembre de 2013, titulado: Acuerdo por el que se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las regiones hidrológico-administrativas que se indican.
- Documento del diario oficial de la federación publicado el 26 de febrero de 2014, titulado: Acuerdo por el que se dan a conocer los valores de cada una de las variables que integran las fórmulas para determinar durante el ejercicio fiscal 2014 las zonas de disponibilidad, a que se refieren las fracciones I y II, del artículo 231 de la ley federal de derechos, vigente a partir del 1 de enero de 2014.
- Documento de CONAGUA, Gerencia Regional Lerma Santiago Pacifico, publicado en Septiembre del 2006, titulado: “Formulación del Plan Director para la Modernización Integral del Riego, del Distrito de Riego 011, Alto Río Lerma, Guanajuato”.
- Diario Oficial de la Federación (20 – Abril – 2015). Acuerdo por el que se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las regiones hidrológico-administrativas que se indican.

5.2.2. Determinación del Balance de Aguas Subterráneas

El balance hídrico consiste en la aplicación del principio de la conservación de masa a una cierta región de volumen conocido y definida por unas determinadas condiciones de contorno. Es importante tener en consideración que los elementos incluidos en el balance hídrico se deben ajustar a un periodo de registro común y actual. Como se explicó anteriormente dicho balance depende directamente de los volúmenes de entrada y salida que se registran dentro de los límites del acuífero.



En el presente estudio, se realizó la estimación del balance global de aguas subterráneas, a partir de dos enfoques: una el balance con datos oficiales reportados por la CONAGUA en el Diario Oficial de la Federación y la otra con información de censos de aprovechamientos registrados y actualizados por dependencias de los diferentes niveles de gobierno en el estado de Guanajuato; así como de volúmenes estimados durante el desarrollo del presente trabajo.

Ambos enfoques, se ajustan a las especificaciones establecidas en la NOM-011-CNA-2015, en donde se indican los requerimientos técnicos mínimos obligatorios para determinar la disponibilidad media anual de aguas nacionales, pero se enfatiza que no se excluye la aplicación adicional de métodos complementarios o alternos más complicados y precisos, cuando la información disponible así lo permita.

A continuación se describe cada uno de los enfoques metodológicos con los que se calculó el balance de aguas subterráneas en el acuífero.

5.2.3. Balance Oficial

Este Balance corresponde al que se publica institucionalmente en el Diario Oficial de la Federación; y que para su determinación se utiliza la expresión 1.3, establecida en la NOM-011-CNA-2015 misma que nos permitirá obtener el valor de la disponibilidad o déficit de agua en el acuífero.

$$\begin{array}{l}
 \text{Disponibilidad Media} \\
 \text{Anual de Agua del} \\
 \text{subsuelo en un acuífero}
 \end{array}
 =
 \begin{array}{l}
 \text{Recarga} \\
 \text{Total Media} \\
 \text{Anual}
 \end{array}
 +
 \begin{array}{l}
 \text{Descarga Natural} \\
 \text{Comprometida}
 \end{array}
 +
 \begin{array}{l}
 \text{Extracción de} \\
 \text{Aguas} \\
 \text{Subterráneas}
 \end{array}
 \quad (12)$$

La Recarga Total Media Anual se determina siguiendo la normativa expuesta en la NOM-011-CONAGUA-2015 en su apéndice normativo “B” en el que se establece la siguiente expresión:



$$\text{Recarga Total (Suma de Entradas)} = \text{Cambio de Almacenamiento del Acuífero} + \text{Descarga Total (Suma de Salidas)} \quad (13)$$

Para estimar una recarga media representativa, el balance se formuló para un intervalo de tiempo de un año.

El cambio de almacenamiento del acuífero se refiere a la diferencia que se presenta en su nivel freático durante un intervalo de tiempo. Se determina a partir de la evolución de los niveles del agua subterránea correspondientes al mismo intervalo y de valores representativos del coeficiente de almacenamiento del acuífero. El valor de este coeficiente se determina a partir de pruebas de bombeo y/o con base en consideraciones relativas al tipo de litología del acuífero en estudio.

En cuanto a la descarga total, esta se calcula como la suma de los volúmenes descargados en forma natural y de los extraídos del mismo por medio de aprovechamientos, durante el mismo intervalo. Las componentes de la descarga total comprenden las descargas a través de corrientes superficiales (caudal base de arroyos, manantiales), evapotranspiración de la flora, cuerpos y corrientes de agua además del flujo subterráneo.

Las salidas en un acuífero están afectadas por dos factores que son: la descarga natural comprometida y el volumen de extracción de aguas subterráneas para los diferentes usos, lo cual se define mediante la expresión siguiente:

$$\text{Salidas} = \text{DNCOM} + \text{VCAS} \quad (14)$$

Donde:

DNCOM: Descarga natural comprometida, miles de m³.

VCAS: Extracción de aguas Subterráneas, miles de m³.

La Descarga Natural Comprometida ya ha sido explicada en apartados anteriores. En cuanto a la extracción de agua subterránea, se determina a partir de las lecturas registradas en los medidores instalados en las descargas de los pozos o, a falta de ellos, con base en los métodos indirectos (caudal y tiempo de bombeo, consumo de energía eléctrica, población servida y

dotación, índices de consumo, superficies y láminas de riego) que sean aplicables según el uso del agua.

El valor correspondiente a la Recarga Total Media Anual se obtiene de los datos que publica el DOF en el documento titulado: “acuerdo por el que se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las regiones hidrológico-administrativas que se indican”.

METODO PARA DETERMINAR LA DISPONIBILIDAD DE AGUAS SUBTERRANEAS



Figura 50. Representación esquemática del balance oficial de aguas subterráneas.
(Fuente: CONAGUA)

5.2.3.1 Determinación de las Entradas (Oferta) en el acuífero

Para el caso del acuífero bajo estudio, la oferta de agua está representada por la sumatoria de entradas de agua al sistema acuífero, ya sean naturales o inducidas. En este estudio, la información de partida referente a las componentes de recarga del acuífero se obtuvieron a partir de la información de la CONAGUA y de estudios o informes oficiales realizados por la diferentes dependencias del sector hidráulico del estado.

Como primer punto, se identificaron las corrientes de agua y almacenamientos (presas) ubicados dentro de los límites del acuífero, los cuales se aprecian en los puntos 5.1.2 y 5.1.10 antes descritos.

Posteriormente se realizó un análisis de los volúmenes medios mensuales y anuales de escurrimientos, delimitando las cuencas que se encuentran dentro del área de influencia (2,457.5 km² o 245,750.1 ha) del acuífero: Río La Laja 1, Río La Laja 2, Río Lerma 4, Río Lerma 5 y Laguna de Yuriria. La Figura 51 muestra el acuífero y las cuencas que se ubican en el mismo.

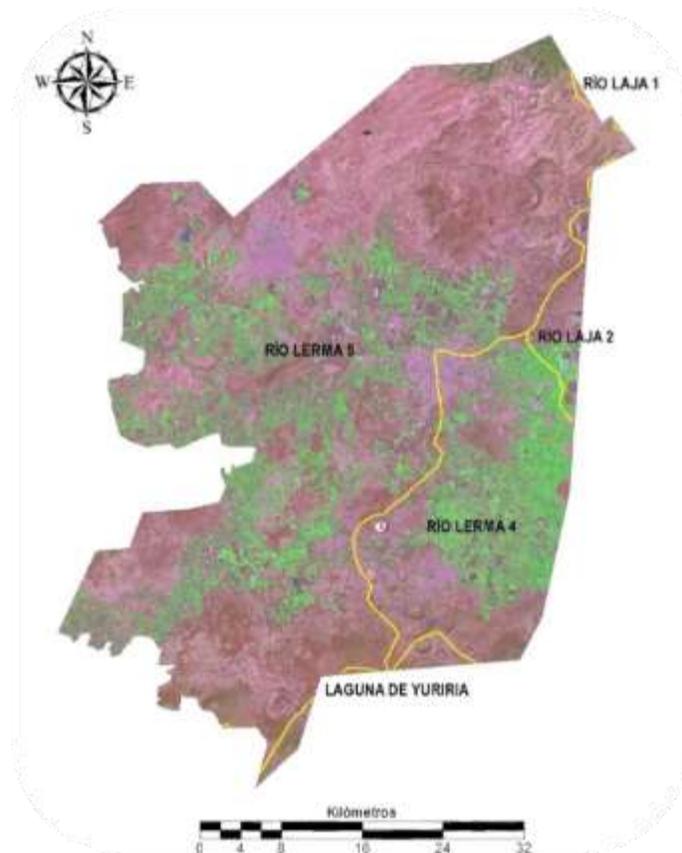


Figura 51. Cuencas Hidrológicas que forman parte del acuífero Irapuato-Valle.
(Fuente: Elaboración propia)

De acuerdo con la NOM-011-CNA-2015, las determinaciones de agua superficial se realizan a nivel cuenca y es la propia Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales a través de la Comisión Nacional del Agua la encargada de publicar la información necesaria para el cálculo de la “Disponibilidad media anual de agua superficial en la cuenca hidrológica”. Dicha publicación se hace a través del Diario Oficial de la Federación.



En este caso y debido a que las cuencas forman parte de varios acuíferos, los volúmenes de agua superficial son estimados a partir del porcentaje que de cada cuenca toma parte dentro del presente acuífero, así como de los cruces de información estadística.

Cabe señalar que estos cálculos resultan indispensables para determinar los volúmenes de agua infiltrados en el acuífero; y sirven como base para las estimaciones realizadas por la NOM-011-CNA-2015.

Para el cálculo de la recarga total se involucra: el flujo subterráneo que proviene de las sierras aledañas que alimentan al valle; el aporte vertical que recibe el acuífero, originado por la infiltración del agua de lluvia; el flujo lateral que se genera de los acuíferos adyacentes y los retornos de agua debidos a la infiltración de riego, de pérdida de canales, de fuga de las tuberías de agua potable, entre otros. Para ello, se utiliza la metodología presentada en el Anexo A del presente trabajo.

5.2.3.2 Determinación de las salidas (demanda) en el acuífero

Las salidas de agua se componen de los volúmenes de agua, ya sean naturales o extraídos, que pierde el acuífero. De esta manera, las descargas están representadas en la mayoría de los casos por bombeos, salidas horizontales y por evapotranspiración.

Para el balance oficial, los componentes a incluir en la ecuación de disponibilidad o balance del acuífero se obtienen a partir de la información de la CONAGUA y de estudios e informes oficiales, tal es el caso de los volúmenes concesionados para cada sector por lo que se realizó un análisis e identificación de variables que originan la demanda.

A.- Análisis e identificación de variables que originan la demanda

Debido a las condiciones que imperan dentro de la superficie territorial del acuífero Irapuato-Valle, se debe de realizar un análisis que permita identificar y describir las principales variables por las cuales la unidad de estudio se encuentra con problemas de disponibilidad de agua. Dichas variables, se ubicarán en alguna de las siguientes clases:



- **Variables Naturales:** Se entenderá por variables naturales a aquellas que tengan su origen o deban su presencia al funcionamiento natural dentro del acuífero y que no dependan de las condiciones impuestas por la actividad humana.
- **Variables Antropogénicas:** Dentro de ellas se considerarán aquellas cuyo origen depende directamente de las actividades humanas dentro de la superficie del acuífero.

B.- Volúmenes concesionados en el acuífero.

Para el cálculo del balance con información oficial los volúmenes concesionados son aquellos volúmenes anuales de extracción, de acuerdo con los títulos de concesión inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), de la Subdirección General de Administración del Agua, con fecha de corte al 20 de Diciembre de 2013.

De las diferentes fuentes que contienen información acerca del volumen de agua subterránea concesionada para el acuífero Irapuato-Valle, se reportan en este documento las siguientes:

- **Diario Oficial de la Federación:** En el acuífero Irapuato-Valle el volumen anual concesionado, de acuerdo con los títulos de Concesiones inscritas en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA).
- **Comisión Nacional del Agua (CONAGUA):** De la misma manera que en el caso de las concesiones de agua superficial; la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) publicó los volúmenes concesionados de agua subterránea, clasificados por tipo de uso. La mayor parte de la información deriva del Registro Público de Derechos de Agua (REPDA).
- Otra de las fuentes de información sobre el volumen concesionado en los aprovechamientos subterráneos registrados en el REPDA (Registro Público de Derechos de Agua) fue obtenido en el sitio **web SIGA de la CONAGUA.**

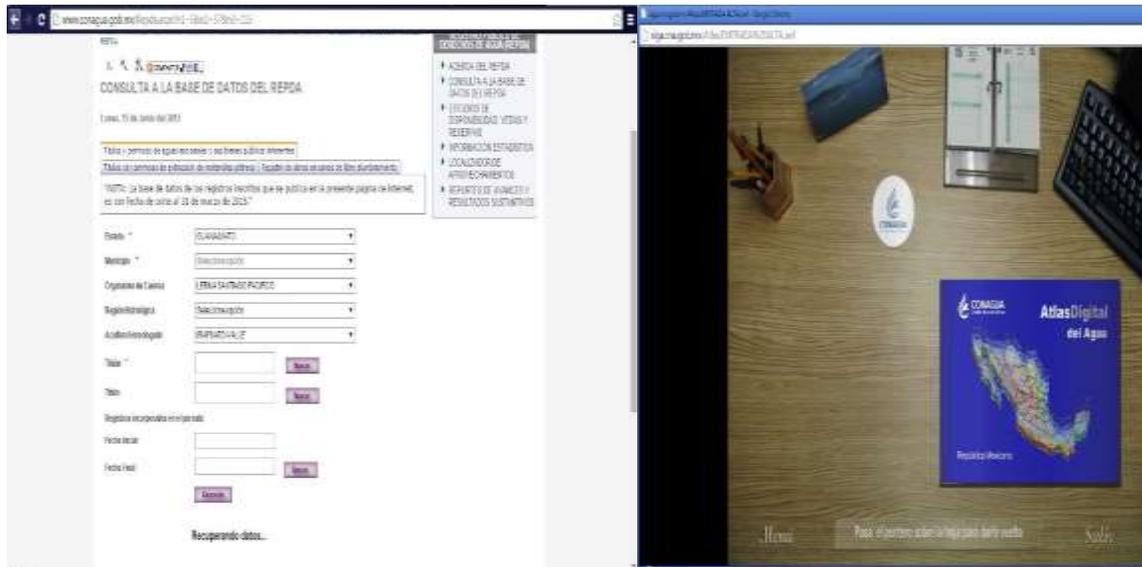


Figura 52. Base de Datos CONAGUA (Repda y Plataforma SIG)

Una vez que se tiene la información estadística de los aprovechamientos subterráneos, se utiliza la plataforma SIG para poder visualizar en un plano de referencia con coordenadas UTM o Geográficas la ubicación exacta de cada uno de los pozos, así como sus principales características. De esta manera se tienen los siguientes análisis:

Primer análisis

Se realizó el análisis de los aprovechamientos subterráneos que según las coordenadas geográficas físicamente se encuentran localizados dentro del Acuífero Irapuato-Valle. En este caso se encontraron 2,423 aprovechamientos subterráneos; sin embargo, de éstos se detectó que 466 aprovechamientos dicen pertenecer a otro acuífero, o bien no cuentan con esta información en su base de datos correspondiente. En la Figura 53 se muestra de manera gráfica la situación antes descrita, donde se pueden ver los aprovechamientos que se supone no pertenecen al citado acuífero.

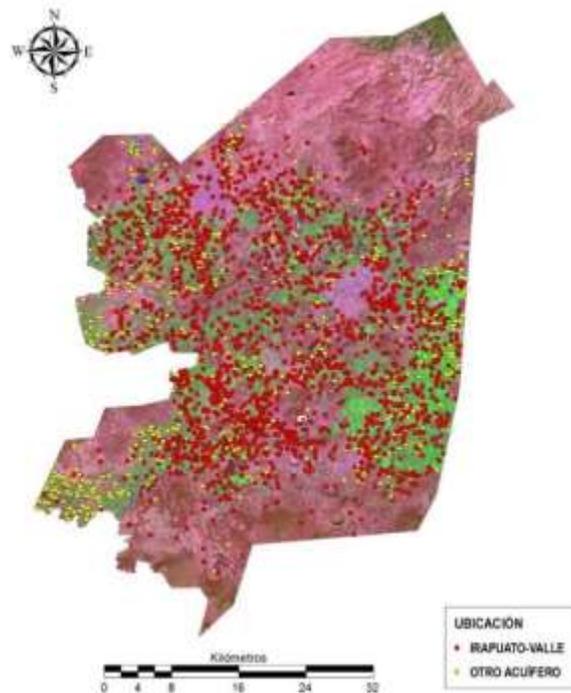


Figura 53. Aprovechamientos subterráneos que geográficamente se encuentran dentro del acuífero Irapuato-Valle.
(Fuente: Elaboración propia)

De este análisis, se obtuvo el volumen total concesionado de 251,850.44 miles de m³. En el Cuadro 9 se muestra el volumen concesionado y la distribución en los tipos de uso que tienen estos aprovechamientos.

Cuadro 9. Uso del agua en aprovechamientos subterráneos (primer análisis).

Uso	Volumen concesionado	
	miles de m ³	%
Agropecuario	226,574.36	89.97
Público-Urbano	8,719.94	3.46
Industrial	16,556.14	6.57
Total	251,850.44	100.00

Fuente: Elaboración propia con datos del REPDA.

Como se puede observar, el mayor volumen de agua esta concesionado para uso agropecuario, seguido del industrial y finalmente el público-urbano (Figura 54).

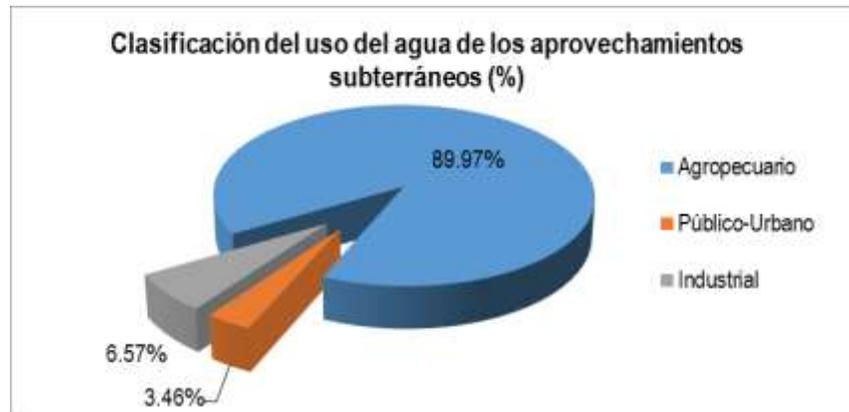


Figura 54. Usos del agua de aprovechamientos subterráneos del acuífero Irapuato-Valle (Primer análisis).
(Fuente: Elaboración propia con datos del REPDA)

Segundo análisis

Para el segundo análisis, la base de datos obtenida del sitio web SIGA de la CONAGUA, permitió clasificar los aprovechamientos por acuífero y se seleccionaron los pertenecientes al Acuífero Irapuato-Valle; así se obtuvieron 2,313 aprovechamientos subterráneos. Sin embargo al visualizarlos de acuerdo a sus coordenadas, se detectó que 356 aprovechamientos no se localizan dentro del mismo. Dicha situación fue verificada en campo con lo que comprobó que los pozos tienen error tanto en coordenadas (285) y en su existencia (71). En la Figura 55 se muestra gráficamente la situación descrita.

De este análisis, se obtuvo que el volumen total concesionado es de 234,242.96 miles de metros cúbicos. El Cuadro 10 muestra el volumen concesionado y la distribución en los tipos de uso que tienen estos aprovechamientos.



Figura 55. Aprovechamientos subterráneos que pertenecen al acuífero Irapuato-Valle, según sus datos.

(Fuente: Elaboración propia con datos del REPDA)

Cuadro 10. Uso del agua en aprovechamientos subterráneo, segundo análisis.

Uso	Volumen Concesionado	
	miles de m ³	%
Agropecuario	210,666.85	89.94
Público-Urbano	7,342.88	3.13
Industrial	16,233.23	6.93
Total	234,242.96	100.00

Fuente: Elaboración propia con datos del REPDA.

En la Figura 56, se observa de manera gráfica la distribución por uso del agua subterránea. Puede observarse que al igual que en el análisis anterior, se tiene una predominancia en el uso del sector agrícola, seguido del industrial, y finalmente el público-urbano.

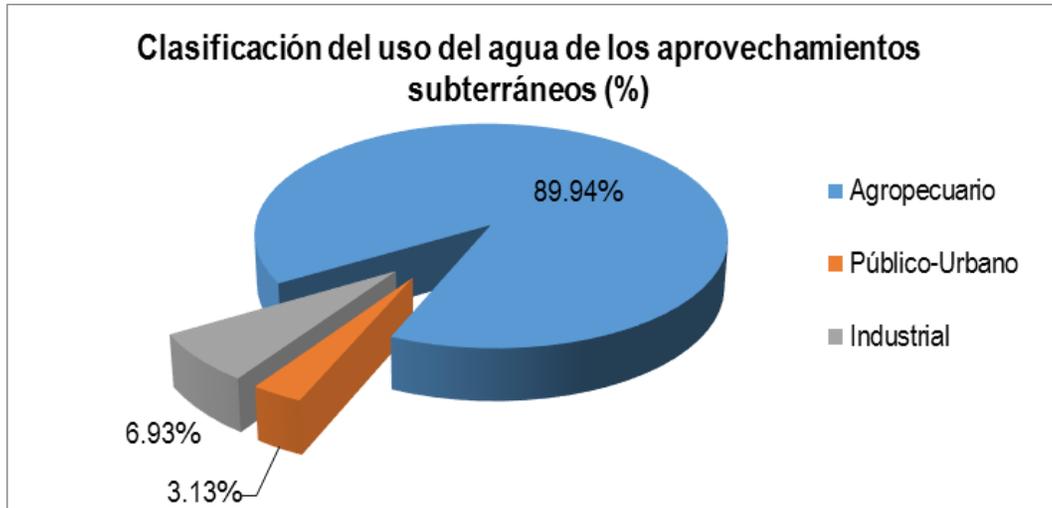


Figura 56. Usos del agua de los aprovechamientos subterráneos del acuífero Irapuato-Valle (segundo análisis).

(Fuente: Elaboración propia con datos del REPGA)

A partir de esta información que se encuentra en la base estadística e informática de las dependencias gubernamentales y que se encuentran publicadas de manera oficial, se determina el balance de aguas correspondiente.

5.3.2. Balance Real Calculado

Este Balance corresponde al que se determina a partir de información actualizada, así como de la estimación y cálculo de volúmenes realmente utilizados por los diferentes sectores en el acuífero. De igual manera que el balance oficial, se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{Balance}_{\text{Subterráneo}} = \text{Entradas} - \text{Salidas} = \text{Oferta}_{\text{total}} - \text{Demanda}_{\text{total}} \quad (15)$$

Las Entradas y Salidas están en función de diferentes características y parámetros, los cuales se describirán a continuación:



5.3.2.1 Entradas u oferta total

Los datos de agua subterránea dependen de la recarga natural más la recarga inducida, lo que es igual a la recarga total media anual; sin embargo el tratamiento de aguas residuales puede constituir otro componente para la oferta de agua subterránea, pues al reutilizar el agua podemos disminuir la extracción de la misma. Para el estudio, las entradas corresponden al valor obtenido del Diario Oficial de la Federación, mismo que se explicó en el punto 5.2.3.1.

$$\text{Entradas} = \text{RTMA} \quad (16)$$

Donde:

RTMA: Recarga Total Media Anual, miles de m³.

Para el caso de estudio, el valor correspondiente a la Recarga Total Media Anual considera las siguientes componentes: flujo subterráneo, manantiales, retornos de riego, así como la recarga inducida en el acuífero.

5.3.2.2 Salidas o demanda total

La demanda de agua subterránea depende en gran medida de los volúmenes de uso del agua por los distintos sectores; en este caso, para determinar las salidas totales de agua se utiliza la siguiente expresión:

$$\text{Salidas} = \text{DNCOM} + \text{Vsp} + \text{Vsi} + \text{Vsa} + \text{Vso} \quad (17)$$

Donde:

Salidas: Volúmenes anuales de salida de la cuenca, miles de m³.

DNCOM: Descarga natural comprometida, miles de m³.

Vsp: volumen anual de extracción de agua por el sector público-urbano, miles de m³.

Vsi: Volumen anual de extracción de agua por el sector industrial, miles de m³.

Vsa: Volumen anual de extracción de agua por el sector agrícola, miles de m³.

Vso: Volumen anual de extracción de agua para otros servicios, miles de m³.

En la expresión anterior se tienen cinco términos que se consideran con influencia en la demanda de agua, los datos se obtienen de la siguiente manera:



El término DNCOM se obtiene de los datos publicados por el Diario Oficial de la Federación. Los términos V_{sp} , V_{si} y V_{so} se obtienen de los datos publicados por los censos de aprovechamiento realizados por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), donde la mayor parte de la información deriva del Registro Público de Derechos de Agua (REPDA); así como de la Comisión Estatal del Agua de Guanajuato (CEAG).

El término V_{sa} fue obtenido a partir del análisis de imágenes de satélite y obtención de los requerimientos de riego con el programa CROPWAT; para los datos de superficies realmente cultivadas, obtenidos a partir del análisis de NDVI.

Dentro de la información oficial se encuentran los censos de aprovechamientos realizados por las dependencias (CONAGUA, CEAG, SDAyR) y cuyas actualizaciones pudiesen diferir de lo presentado en el Diario Oficial de la Federación.

Ahora bien, se consideró importante calcular o estimar otras componentes como las salidas del sector agrícola, además de realizar una verificación de los volúmenes concesionados comparados con los volúmenes de los censos de aprovechamiento realizados por la Comisión Estatal del Agua de Guanajuato.

Al igual que para el caso del balance oficial, es necesario identificar y analizar las variables que originan la demanda de agua dentro del acuífero, los cuales se describirán a continuación.

A.- Volúmenes reales requeridos para los distintos usos.

Para determinar los volúmenes reales que se extraen del acuífero para los distintos usos registrados, se utilizó en una primera etapa información de los censos de aprovechamiento realizados por la Comisión Estatal del Agua de Guanajuato y la Comisión Nacional del Agua.

Para fines de cálculo se clasificaron tres grandes componentes en los que se hace uso del agua: Agrícola, Público-Urbano e Industrial. El análisis sólo se orientó para los cálculos de agua subterránea, dado que es el sector donde se encuentran los mayores problemas de explotación.



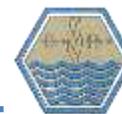
Para el caso de los sectores Público-Urbano e Industrial, se dispone con censos de aprovechamientos actualizados y con información confiable debido al seguimiento puntual que les da la Comisión Estatal del Agua del Estado, así como las empresas particulares que forman parte de estos sectores.

Debido a que los volúmenes reportados en los censos de aprovechamiento, se encuentran a nivel de municipio, es necesario un cruce de información que permita obtener los valores para el acuífero Irapuato – Valle.

A. Entidad Fed.	B. Municipio	C. Año	D. Volumen Agrícola	E. Volumen Abastecimiento	F. Volumen Industrial Integrado
Guajalajara	Altaflorencia	2009	130 688 811.30	0 787 066.71	347 990.30
	Acámbaro		71 140 428.40	9 235 715.08	40 206.00
	Apaseo el Alto		21 932 381.00	4 941 095.18	2 000.00
	Apaseo el Grande		58 418 244.30	3 378 166.86	1 279 380.00
	Atarjea		0.00	89 653.82	0.00
	Celaya		94 057 867.06	49 643 012.55	5 481 119.58
	Coroncheril		19 444 938.73	2 360 553.17	54 136.00
	Coroneo		1 215 837.00	762 955.12	0.00
	Cortazar		57 577 942.34	4 915 367.67	381 488.00
	Cuaránmaro		27 500 434.80	492 108.01	0.00
	Doctor Mora		34 263 771.20	1 034 606.00	0.00
	Dolores Hidalgo Cuna de la Independencia Nacional		128 203 325.18	10 012 051.42	2 680.00
	Guajalajara		2 621 091.20	19 136 130.91	513 760.00
	Guamantla		25 896 988.00	1 465 847.58	0.00
	Irapuato		122 570 644.87	34 412 285.20	3 233 165.20
	Jaral del Progreso		38 014 495.20	3 636 404.07	80 000.00
	Jerécuam		9 515 068.00	2 387 907.70	0.00

Figura 57. Base de datos de censos de aprovechamientos subterráneos (Fuente: CONAGUA, 2010)

Para el caso del sector Público –Urbano, se analiza la población dentro del acuífero para cada uno de los municipios; así como las eficiencias reportadas por los organismos operadores a través de la Comisión Estatal del Agua. En el Cuadro 11 se muestran las eficiencias del sector público-urbano en los municipios que forman parte del acuífero Irapuato-Valle; las cuales son necesarias para determinar los volúmenes extraídos por dicho sector.



Cuadro 11. Eficiencia global en el sector público urbano en los municipios dentro de la zona de estudio.

Núm.	Nombre	Eficiencia comercial (%)	Eficiencia física (%)	Eficiencia global (%)
1	Abasolo	86	43	37
2	Huanímaro	35	51	18
3	Irapuato	55	70	39
4	Jaral del Progreso	69	49	34
5	Pueblo Nuevo	93	52	48
6	Salamanca	76	49	37
7	Santa Cruz de Juventino Rosas	82	64	52
8	Valle de Santiago	41	54	22
9	Villagrán	91	65	59
10	Yuriria	70	62	43
Promedio		70	56	39

Fuente: CEAG, 2013.

De igual manera se debe de tener en cuenta la cantidad de infraestructura hidráulica urbana presentada en el punto 5.1.9 del presente trabajo.

En el sector industrial, la eficiencia es alta debido a la normatividad bajo la que se rige; sin embargo el control, cuantificación y seguimiento aún se encuentra a cargo de las diferentes empresas y/o industrias del sector.

La Comisión Nacional del Agua, de acuerdo con sus censos y estudios realizados en la zona que domina el acuífero estima una eficiencia del orden del 70% en el sector industrial.

Cuadro 12. Eficiencia global en el sector industrial en la zona de estudio.

Eficiencia comercial (%)	Eficiencia física (%)	Eficiencia global (%)
95	74	70

Fuente: CONAGUA, 2013

Los volúmenes reportados por las dependencias para estos sectores, se pueden consultar en el Anexo D del presente documento.



Como se ha venido explicando, la agricultura es el mayor consumidor de agua y la mayoría proviene de fuentes subterráneas, por lo que en la metodología propuesta solo se analizan los datos de la información referente a ésta fuente de agua.

B.- Determinación de Requerimientos de Riego, a partir de imágenes de satélite de alta resolución (RAPIDEYE).

Una de las bases fundamentales para hacer una correcta programación en cuanto al manejo y planeación del recurso agua en el sector agrícola, es el conocimiento del uso actual del mismo, ya que los recursos sufren constantes cambios. El impacto de estos cambios sobre el ambiente, ha sido tradicionalmente evaluado por procesos de interpretación en fotografías aéreas, sin embargo, en años recientes el desarrollo de los sensores remotos ha facilitado la generación de nuevos métodos basados en interpretación de imágenes de satélite y el uso de equipo computarizado, que ofrece mayor rapidez y confiabilidad en la generación de la cartografía de los recursos naturales. Williams y Millar, (1979) citado por Cámara, (1983) plantean que el mayor potencial de las técnicas de sensores remotos radica en el mapeo periódico (monitoreo), mediante el cual es posible medir entre otros aspectos, el sentido y la periodicidad de los procesos de desmonte, reforestación y cambio de uso de suelo (Flores, 2000).

La percepción remota se encuentra principalmente dirigida al estudio de los recursos naturales, apoyándose en mayor medida en el espectro electromagnético que abarca, generando ventajas al discriminar tipos de cubiertas vegetales. Debido a ello, es posible identificar la respuesta espectral de la cubierta vegetal y el uso del suelo que predominan sobre determinada superficie. Varios autores han experimentado con el uso de imágenes de satélite como Jefferson et al., 1992, quienes realizaron una clasificación de uso de suelo y vegetación utilizando la combinación de bandas Spot XS y Landsat TM, que fueron procesadas con el programa Arc/Info, las cuales proporcionan información de las condiciones de la cobertura del suelo por arriba del 80 % de precisión (Labrador, 2012).

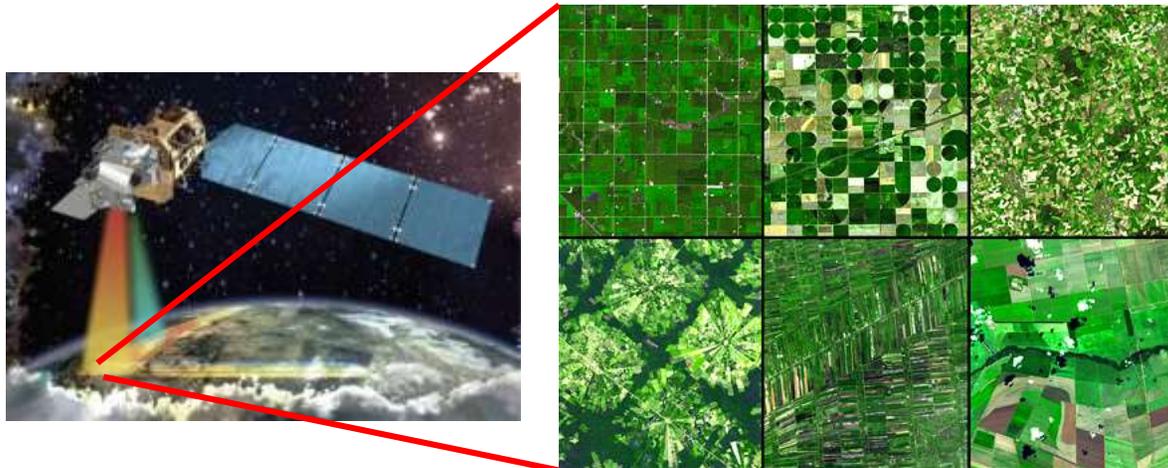


Figura 58. Distintos tipos de patrones agrícolas obtenidos mediante satélites
(Fuente: Elaboración propia)

De esta manera, el uso de percepción remota resulta muy importante en la agricultura si se desea conocer su comportamiento a través del tiempo y los impactos que dichos cambios tienen sobre el entorno inmediato.

En el caso específico del acuífero Irapuato – Valle, los grandes cambios e impactos se ven reflejados en el uso de agua subterránea en la actividad agrícola. Debido a ello, el conocimiento exacto de los volúmenes de agua demandados por este sector resulta de vital importancia para tener un entendimiento de las condiciones en que se encuentra el acuífero sobre el que se desarrolla esta actividad.

Una de las formas más precisas actualmente para determinar los volúmenes de agua destinados al sector agrícola es mediante el uso de tecnologías de percepción remota e información de campo referente a láminas de riego aplicadas, eficiencias de riego así como el patrón de cultivos establecido. Con la información anterior es posible calcular los volúmenes que se extraen y se usan en el sector agrícola perteneciente al acuífero.

Para el cálculo del volumen de agua subterránea utilizada en el sector agrícola en el Acuífero Irapuato - Valle; se sigue la siguiente metodología:



1. Definición de Patrón de Cultivos:

Esta primera parte corresponde a recopilar la información referente a las estadísticas tanto del Distrito de Riego 011, como de lo reportado por el SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera), respecto de los cultivos establecidos durante los periodos Otoño-Invierno 2013 y Primavera-Verano 2014. Esta información se utilizó como base de datos para el análisis e interpretación posterior.



Figura 59. Información de Patrón de Cultivos dentro del acuífero Irapuato – Valle
(Fuente: Elaboración propia)

Cabe hacer la aclaración, que todos aquellos cultivos cuyo porcentaje resulta menor al 1% del total de la superficie agrícola; se omitió para el desarrollo de los cálculos.

Ahora bien, de acuerdo con la Comisión Nacional del Agua y sus estudios recientes de catastro existe una gran cantidad de superficie que no se encuentra registrada dentro de la base de datos oficiales (CONAGUA – SIAP), por lo que resulta importante conocer la superficie total cultivada y con base en ello determinar la superficie correspondiente a cada tipo de cultivo.



2. Determinación de superficie de riego cuyo tipo de aprovechamiento es de origen subterráneo.

Para la estimación de las superficies de riego abastecidos con agua subterránea se hace uso de las imágenes de satélite para cuantificar la superficie que se encuentra cultivada

Antes de diferenciar el tipo de aprovechamiento de cada una de las parcelas, se debe dar un tratamiento especial a las imágenes de satélite a utilizar. La metodología utilizada para el procesamiento, análisis e interpretación de la información de las imágenes; se presenta en el Anexo E del presente trabajo.

Cabe señalar que con fines administrativos, la Comisión Nacional del Agua y la Comisión Estatal del Agua de Gto, incluyen el volumen utilizado en el sector pecuario en el volumen agrícola; bajo la denominación “Volumen Agropecuario”.

Cabe señalar que este punto representa el principal aporte del presente trabajo de investigación, debido a la inconsistencia de información estadística del sector agrícola y a que se carecen de entidades o instituciones que permitan sistematizar la información y actualizarla con el paso del tiempo.



6. RESULTADOS

6.1. VOLÚMENES MEDIOS MENSUALES Y ANUALES DE ESCURRIMIENTO

En el Cuadro 13 se muestra el volumen de escurrimiento en las cuencas hidrológicas que integran el acuífero de estudio así como el volumen escurrido que de manera proporcional corresponde al área de recarga del Acuífero Irapuato-Valle; cuyo valor en este caso es de 104,839.01 miles de m³. Este valor no se utiliza para la determinación del balance; sin embargo de este volumen una cantidad es ingresada al sistema acuífero a través de la infiltración y/o percolación a través del suelo; por lo que sirve como información de referencia.

Cuadro 13. Volumen de escurrimiento medio anual en las cuencas hidrológicas que intervienen en el Acuífero Irapuato-Valle.

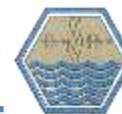
Cuenca	Volumen de escurrimiento en la cuenca (miles de m ³)	Área total (km ²)	Área en el acuífero (km ²)	Porcentaje de área (%)	Volumen en el acuífero (miles de m ³)
Río La Laja 1	275,010.00	7,062.36	1.85	0.026	72.04
Río La Laja 2	84,090.00	2,624.57	51.98	1.981	1,665.41
Río Lerma 4	102,620.00	2,474.23	459.30	18.563	19,049.71
Río Lerma 5	286,890.00	6,913.60	1,915.26	27.703	79,476.53
Laguna de Yuriria	193,100.00	1,228.58	29.11	2.369	4,575.32
Total					104,839.01

Fuente: Elaboración propia.

6.2 SITUACIÓN ACTUAL DEL ACUÍFERO

La Recarga media anual de aguas subterráneas se estimó tomando como unidad de estudio al “Acuífero” y para su cálculo se siguen los procedimientos descritos en la NOM-011-CNA-2015.

En este sentido, el Acuífero 1119 “Irapuato – Valle” la recarga corresponde a 522,200.00 miles de m³ anuales, dato que se publicó en el Diario Oficial de la Federación el 20/04/2015, y el procedimiento de cálculo respectivo se indica en el Anexo A.



6.3 DEMANDA ACTUAL DEL ACUÍFERO.

6.3.1 Volúmenes concesionados en el acuífero.

De las diferentes fuentes que contienen información acerca del volumen de agua subterránea concesionada para el acuífero Irapuato-Valle, se reportan en este documento las siguientes:

A) *Diario Oficial de la Federación*

En el acuífero Irapuato-Valle el volumen anual concesionado, de acuerdo con los títulos de Concesiones inscritas en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), de la Subdirección General de Administración del Agua, al 20 de Abril del 2015 es de 552,337.71 miles de m³ anuales.

B) *Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)*

De la misma manera que en el caso de las concesiones de agua superficial; la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) publicó los volúmenes concesionados de agua subterránea, clasificados por tipo de uso. La mayor parte de la información deriva del Registro Público de Derechos de Agua (REPDA); en el Cuadro 14 se muestran los datos de las concesiones de agua subterránea, para los municipios que intervienen en el acuífero Irapuato-Valle, según su porcentaje de participación en el mismo.

Cuadro 14. Volúmenes de agua subterránea concesionados por municipio

Núm.	Municipio	Porcentaje %	Vol. Agropecuario (miles de m ³)	Vol. Público-Urbano (miles de m ³)	Vol. Industrial (miles de m ³)
1	Abasolo	8.23	10,755.69	558.58	28.64
2	Huanímaro	78.16	20,217.64	1,145.71	0.00
3	Irapuato	72.40	88,746.94	39,408.97	3,788.81
4	Jaral del Progreso	11.57	4,398.28	420.73	9.26
5	Pueblo Nuevo	100.00	5,208.77	1,221.76	0.00
6	Salamanca	97.22	102,486.25	37,920.57	29,647.62
7	Santa Cruz de Juventino Rosas	19.96	8,616.77	953.11	101.80
8	Valle de Santiago	91.00	114,807.19	5,875.09	1.03
9	Villagrán	8.44	4,451.75	280.17	285.32
10	Yuriria	3.44	1,317.82	119.00	1.20



Totales	361,007.09	87,903.69	33,863.66
---------	------------	-----------	-----------

Fuente: Elaboración propia con datos CONAGUA, 2014.

6.3.2 Volúmenes medios mensuales y anuales requeridos para los distintos usos.

El ser humano utiliza grandes cantidades de agua para la producción de sus alimentos, así como de los bienes y servicios; el desarrollo de los pueblos ha estado estrechamente vinculado con el agua, ya que éste es un factor importante en la selección de sitios para ubicar plantas industriales, centros urbanos y agropecuarios.

Para fines de cálculo se estiman tres grandes componentes o rubros en los que se hace uso del agua; éstos son: Agrícola, Público-Urbano e Industrial. A continuación se presenta un análisis realizado para estimar los volúmenes de agua utilizados en cada uno de los 3 rubros citados anteriormente; este análisis sólo está enfocado para los cálculos de agua subterránea, dado que es el sector donde se encuentran los mayores problemas de explotación.

A. Agrícola

En el Cuadro 14, se presentaron los volúmenes de agua concesionados para diferentes usos incluido el agropecuario; sin embargo, debido a que este es el sector de mayor consumo de agua, en este apartado se presentarán los resultados del estudio realizado para estimar el volumen de agua consumido, a partir del análisis de la superficie de cultivo establecida, de los requerimientos de riego y las eficiencias de riego según el grado de tecnificación. Los volúmenes de agua subterránea obtenidos para este uso se presentan en el siguiente cuadro.

Cuadro 15. Volúmenes de agua utilizados en las zonas agrícolas bajo riego presentes en el acuífero Irapuato-Valle.

Origen de la superficie de riego	Sistema de riego	Superficie establecida (ha)	Volumen superficial (miles de m ³)		
			Vol. neto	Vol. bruto	Vol. aplicado
Distritos de riego	Gravedad	14,109.46	66,554.00	138,654.17	110,923.33
	Aspersión	2,678.26	12,633.27	19,739.48	15,791.59
	Goteo	1,447.91	6,829.76	9,485.77	7,588.62
	Mixto	2,366.34	11,161.97	19,932.09	15,945.67
Unidades de riego	Gravedad	20,251.49	95,525.80	199,012.08	159,209.67
	Aspersión	367.82	1,735.02	2,710.96	2,168.77



Origen de la superficie de riego	Sistema de riego	Superficie establecida (ha)	Volumen superficial (miles de m ³)		
			Vol. neto	Vol. bruto	Vol. aplicado
	Goteo	1,924.85	9,079.45	12,610.35	10,088.28
	Mixto	4,007.91	18,905.21	33,759.30	27,007.44
Unidades de riego (Superficie no inventariada)	Mixto	12,948.13	61,076.02	109,064.31	87,251.45
Volumenes totales de agua			283,500.50	544,968.54	435,974.83

Fuente: Elaboración propia.

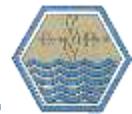
B. Público-Urbano

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) publicó los volúmenes concesionados de agua subterránea, clasificados por tipo de uso. La mayor parte de la información deriva del Registro Público de Derechos de Agua (REPGA); en el Cuadro 16 se muestran los datos de concesiones de agua subterránea proporcionales para los municipios que intervienen en el acuífero Irapuato-Valle.

Cuadro 16. Volúmenes de agua subterránea concesionados por municipio para el sector público-urbano.

Núm.	Nombre	Volumen concesionado de aguas subterráneas (miles de m ³)	% de influencia del municipio en el acuífero	Volumen concesionado total en el acuífero (miles de m ³)
1	Abasolo	6,787.07	8.23	558.58
2	Huanímaro	1,465.85	78.16	1,145.71
3	Irapuato	54,432.29	72.40	39,408.97
4	Jaral del Progreso	3,636.40	11.57	420.73
5	Pueblo Nuevo	1,221.76	100.00	1,221.76
6	Salamanca	39,004.90	97.14	37,920.57
7	Santa Cruz de Juventino Rosas	4,775.12	19.68	953.11
8	Valle de Santiago	6,456.15	91.00	5,875.09
9	Villagrán	3,319.56	8.44	280.17
10	Yuriria	3,459.20	3.44	119.00
Total				87,903.69

Fuente: Elaboración propia con datos CONAGUA, 2014.



C. Industrial

Respecto a la publicación de los volúmenes concesionados de agua subterránea, realizada por la CONAGUA; en el siguiente cuadro se muestran los volúmenes correspondientes a las concesiones del sector industrial.

Cuadro 17. Volúmenes de agua subterránea concesionados por municipio para el sector industrial.

Núm.	Nombre	Volumen concesionado de aguas subterráneas (miles de m ³)	% de influencia del municipio en el acuífero	Volumen concesionado total en el acuífero (miles de m ³)
1	Abasolo	347.99	8.23	28.64
2	Huanímaro	0.00	78.16	0.00
3	Irapuato	5,233.17	72.40	3,788.81
4	Jaral del Progreso	80.00	11.57	9.26
5	Pueblo Nuevo	0.00	100.00	0.00
6	Salamanca	30,495.39	97.14	29,647.62
7	Santa Cruz de Juventino Rosas	510.00	19.68	101.80
8	Valle de Santiago	1.13	91.00	1.03
9	Villagrán	3,380.53	8.44	285.32
10	Yuriria	34.78	3.44	1.20
Total				33,863.66

Fuente: Elaboración propia con datos CONAGUA, 2014.

No obstante, específicamente para este caso; este volumen no tiene integrado la parte correspondiente a lo que utilizan la Refinería de Pemex en Salamanca y CFE que de acuerdo con la Dirección Local de CONAGUA con sede en Guanajuato es de 28,520.00 miles de m³. De esta manera, el volumen total utilizado en el sector industrial es de 62,383.66 miles de m³, como se muestra en el siguiente cuadro.

Cuadro 18. Volumen Total utilizado por el sector industrial

Volumen Total de Sector Industrial (miles de m ³)	
Volumen concesionado en industrias de la zona	33,863.66
Volumen Refinería y CFE	28,520.00
Total	62,383.66

Fuente: Elaboración propia con información CONAGUA, 2014



D. Otros Servicios

A partir de análisis que se mostró en el Cuadro 14 se obtiene como resultado un volumen concesionado total de 482,774.44 miles de m³, donde se incluyeron los sectores: agropecuario, publico-urbano e industrial; sin embargo, de acuerdo con el Diario Oficial de la Federación existe un volumen concesionado total de 552,337.71 miles de m³. Al sumar los volúmenes de agua utilizados por los tres principales sectores (agropecuario, público-urbano e industrial) obtenemos un volumen que resulta menor al volumen concesionado total, existiendo una diferencia de 41,043.27 miles de m³, mismos que corresponden a otros servicios presentes en la zona del acuífero y que no están catalogados dentro de los sectores antes enumerados; dentro de los cuales se encuentran las actividades pecuarias, recreación, ecoturismo, turismo, principalmente.

6.4 BALANCE SUBTERRÁNEO DEL ACUÍFERO

6.4.1. Balance Oficial

Para la realización del balance de aguas subterráneas se utiliza la expresión 1.4, misma que nos permitirá obtener el valor de la disponibilidad o déficit de agua.

$$\text{Balance}_{\text{Subterráneo}} = \text{Entradas} - \text{Salidas} = \text{Oferta}_{\text{total}} - \text{Demanda}_{\text{total}} \quad (18)$$

Entradas u oferta total

Para la realización del balance de aguas subterráneas, las entradas de agua u oferta total dentro del acuífero dependen solamente según la norma oficial mexicana de la recarga total media anual, por lo que la expresión 0:

$$\text{Entradas} = \text{Recarga total media anual} \quad (19)$$

El único término de la expresión anterior se obtiene de los datos que publica el DOF en el documento titulado: “acuerdo por el que se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las regiones hidrológico-administrativas que se indican”; por lo que dicha expresión queda de la siguiente manera:
522,200.00



Entradas = 522,200.00 miles de m³ anuales

Por lo tanto, la oferta total anual de agua subterránea del acuífero Irapuato-Valle es de 522,200.00 miles de m³ anuales.

➤ **Salidas o Demanda total**

Las salidas en un acuífero está afectado por dos factores que son: la descarga natural comprometida y el volumen de extracción para los diferentes usos, se define mediante la expresión **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

$$\text{Salidas} = \text{DNCOM} + \text{VCAS} \quad (20)$$

Donde:

DNCOM: Descarga natural comprometida, miles de m³.

VCAS: Extracción de Aguas Subterráneas, miles de m³.

Para el presente acuífero, de acuerdo con el DOF la descarga natural comprometida es de 132,400.00 miles de m³ anuales, en tanto que el volumen de extracción de aguas subterráneas es de 552,337.71 miles de m³ anuales.

$$\text{Salidas} = 132,400.00 + 552,337.71$$

$$\text{Salidas} = 684,737.71 \text{ miles de m}^3 \text{ anuales}$$

Finalmente tenemos que la demanda total anual de agua subterránea en el acuífero Irapuato-Valle es de 684,737.71 miles de m³ anuales.

➤ **Balance de aguas subterráneas**

Utilizando la expresión (1.1) se realiza el balance de aguas subterráneas

$$\text{Balance}_{\text{Subterráneo}} = \text{Entradas} - \text{Salidas} = \text{Oferta}_{\text{total}} - \text{Demanda}_{\text{total}} \quad (21)$$

$$\text{Balance}_{\text{Subterráneo}} = 522,200.00 - 684,737.71$$

$$\text{Balance}_{\text{Subterráneo}} = -162,537.71 \text{ miles de m}^3 \text{ anuales}$$



Así, según el balance de aguas subterráneas con el método del Diario Oficial de la Federación (DOF) existe un déficit en el área de influencia del acuífero de -162,537.71 miles de m³ anuales; es decir, que la oferta es menor que la demanda, siendo superada con cerca del 30%.

6.4.2. Balance Calculado

Como se mencionó anteriormente, en el caso del agua superficial solo puede tomarse el agua disponible; sin embargo los acuíferos contienen aguas que se han almacenado por años, y que en muchos lugares constituyen la única fuente de agua disponible siendo susceptibles a una sobreexplotación.

➤ Entradas u oferta total

Los datos de agua subterránea dependen de la recarga natural más la recarga inducida, lo que es igual a la recarga total media anual; sin embargo el tratamiento de aguas residuales puede constituir otro componente para la oferta de agua subterránea, pues al reutilizar el agua podemos disminuir la extracción de la misma.

$$\text{Entradas} = \text{RTMA} \quad (22)$$

Donde:

RTMA: Recarga Total Media Anual, miles de m³.

Por lo tanto se tiene que:

$$\text{Entradas} = 522,200.00 \text{ miles de m}^3 \text{ anuales}$$

Así, la oferta total anual de agua dentro en el acuífero Irapuato-Valle es de 522,200.00 miles de m³ anuales.

➤ Salidas o demanda total

La demanda de agua subterránea depende en gran medida de los volúmenes de uso del agua por los distintos sectores; en este caso, para determinar las salidas totales de agua se utiliza la siguiente expresión:



$$\text{Salidas} = \text{DNCOM} + \text{Vsp} + \text{Vsi} + \text{Vsa} + \text{Vso} \quad (23)$$

Donde:

Salidas: Volúmenes anuales de salida de la cuenca, miles de m³.

DNCOM: Descarga natural comprometida, miles de m³.

Vsp: volumen anual de extracción de agua por el sector público-urbano, miles de m³.

Vsi: Volumen anual de extracción de agua por el sector industrial, miles de m³.

Vsa: Volumen anual de extracción de agua por el sector agrícola, miles de m³.

Vso: Volumen anual de extracción de agua para otros servicios, miles de m³.

En la expresión anterior se tienen cinco términos que se consideran con influencia en la demanda de agua, los datos se obtienen de la siguiente manera:

El término **DNCOM** se obtiene de los datos publicados por el Diario Oficial de la Federación.

Los términos **Vsp** y **Vsi** se obtienen de los datos publicados por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), donde la mayor parte de la información deriva del Registro Público de Derechos de Agua (REPGA).

El término **Vsa** fue obtenido a partir del análisis de requerimientos de riego con el programa CROPWAT para los datos obtenidos a través del análisis de NDVI.

Y el término **Vso** se obtiene a través de la diferencia entre el dato de VCAS y la suma de los términos Vsp, Vsi y Vsa.

Finalmente el resultado obtenido es el siguiente:

$$\text{Salidas} = 132,400.00 + 87,903.69 + 62,383.66 + 544,968.54 + 41,043.27$$

$$\text{Salidas} = 868,699.16 \text{ miles de m}^3 \text{ anuales}$$

La demanda total anual de agua subterránea en el acuífero Irapuato-Valle es de 868,699.16 miles de m³ anuales.



➤ **Balance general propuesto de aguas**

Utilizando la expresión para determinar la disponibilidad de aguas subterráneas, se realizó el balance general propuesto de disponibilidad de aguas (subterráneas).

$$\text{Balance General}_{\text{Propuesto}} = \text{Entradas} - \text{Salidas} = \text{Oferta}_{\text{total}} - \text{Demanda}_{\text{total}}$$

$$\text{Balance General}_{\text{Propuesto}} = 522,200.00 - 868,699.16$$

$$\text{Balance General}_{\text{Propuesto}} = - 346,499.16 \text{ miles de m}^3 \text{ anuales}$$

6.4.3. Comparativo de Balances

En los dos puntos anteriores se abordaron los cálculos de volúmenes de agua ofertados y demandados en el presente acuífero, en lo referente a aguas subterráneas; esto, a partir de las metodologías del Diario Oficial de la Federación y la metodología propuesta.

Con el objetivo de verificar la diferencia existente entre los volúmenes calculados, en el siguiente cuadro se hace una comparación entre los resultados obtenidos con la metodología del DOF y los obtenidos con el método propuesto.

Cuadro 19. Balance general de aguas en el acuífero Irapuato-Valle.

Métodos	Volumen subterráneo (miles de m ³)		Balance (miles de m ³)
	Oferta	Demanda	
DOF	522,200.00	684,737.71	-162,537.71
Propuesto	522,200.00	868,699.16	-346,499.16
Diferencia	0.00	183,961.45	183,961.45

Fuente: Elaboración propia

Puede observarse que con ambos métodos (DOF y Propuesto) el resultado sugiere que existe un déficit; sin embargo, es notable que al analizar con el método propuesto los resultados indican un déficit que es mayor en alrededor de un 113%.

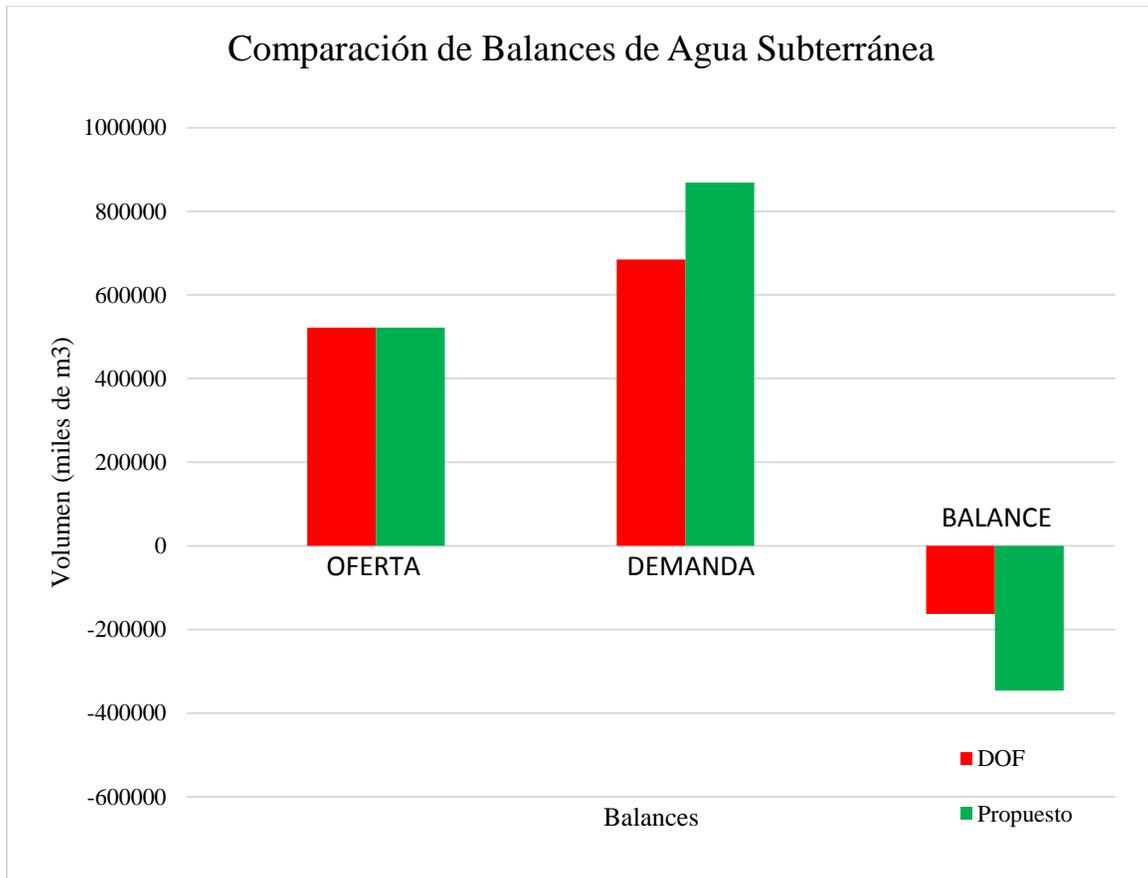


Figura 60. Gráficas comparativas de Resultados para Balances de Aguas Subterráneas
Fuente: Elaboración propia

De acuerdo al balance general de disponibilidad de agua obtenido con el método propuesto, existe un déficit en el área de influencia del acuífero de 346,499.16 miles de m³ año; como puede verse, la demanda de agua supera con más del 50% la oferta existente en el acuífero.



7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La presente Tesis ha permitido conocer el estatus actual que tiene el Acuífero “Irapuato – Valle”, mediante la determinación de la disponibilidad de aguas subterráneas con el uso de dos metodologías.

El Acuífero 1119 “Irapuato – Valle” constituye la principal fuente de abastecimiento de agua para las actividades que se desarrollan en la zona de estudio, siendo la agricultura el sector que más porcentaje de agua subterránea utiliza (89%). Sin embargo, actualmente no existe un plan que permita modificar la estructura de abastecimiento de agua en la zona, por lo que es necesario implementar planes y programas de gestión que permitan tener un manejo sustentable del acuífero.

El objetivo de esta tesis ha sido el de determinar el balance real de aguas subterráneas del acuífero Irapuato – Valle, a través de los diferentes parámetros de entradas y salidas de agua presentes en el sistema acuífero y hacer la comparación con la información oficial reportada por las instituciones del sector hídrico. De los resultados obtenidos se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- De acuerdo con las metodologías utilizadas, se encontró que el acuífero presenta un déficit de 346.5 millones de m³, superior en 183.9 millones de m³ al obtenido por la metodología de uso oficial. Lo anterior se debe en gran medida a la falta de información verificada en campo y cuyo impacto se ve reflejado en la información incompleta utilizada en las estadísticas oficiales.
- Se logró determinar el volumen de aguas subterráneas utilizadas en el sector agrícola para los ciclos otoño – invierno 2013 y primavera – verano 2014, obteniéndose una importante diferencia respecto de la información estadística reportada por las diferentes instituciones del sector hídrico.



- Del análisis de las imágenes de satélite para el sector agrícola, se encontró que existe una importante diferencia entre la superficie real cultivada en los ciclos antes mencionados y lo que se reporta por el SIAP y los Distritos de Riego de la CONAGUA. En este caso se cuantificaron 12,948.13 hectáreas con algún cultivo establecido y que carece de registro alguno y que hace uso de volúmenes de agua fuera de la normativa vigente. La superficie anterior demanda un volumen del orden de los 150 millones de m³ del sistema acuífero.

Debido a lo anterior, es importante señalar que existe una seria desactualización de la información de las diferentes parcelas que utilizan aguas subterráneas; por lo tanto se genera un problema de desconocimiento del estatus en que se encuentra el acuífero.

- Se identificó la necesidad de actualizar las bases de datos del acuífero que permitan dar seguimiento a la evolución de los diferentes parámetros y características del acuífero en espacio y tiempo y de esta manera tener conocimiento del estatus que tiene el acuífero con el paso del tiempo; y con los planes de manejo actuales y/o próximos a realizarse.
- Durante el proceso de desarrollo y elaboración del presente trabajo, se pudo constatar que gran parte del tiempo invertido fue para la recopilación de la información. Lo anterior se debe a que las bases de datos y estadísticas requeridas se encuentran muy dispersas y las fuentes de información no son tan accesibles.
- El resultado de la presente investigación espera servir como una herramienta que permita tener una mejor planeación y manejo del recurso agua en el acuífero, y que además exista un equilibrio que permita la sustentabilidad del acuífero garantizando el abasto para los diferentes sectores que prevalecen en la zona de estudio.



Para la sustentabilidad y conservación del Acuífero 1119 “Irapuato –Valle” es necesario disminuir la sobreexplotación, por lo que es urgente tomar medidas para detener este problema. De continuar con el mismo escenario, sin tomar las medidas adecuadas de conservación y/o recuperación del sistema acuífero, así como contemplar otras alternativas de gestión y manejo del recurso hídrico, en un futuro cercano el acuífero sufrirá un daño irreversible y la población se verá gravemente afectada por la escasez de agua potable.

Se recomienda continuar con la línea de investigación que se plantea en el presente trabajo, para poder tener un conocimiento del estatus que guardan los acuíferos del estado de Guanajuato y de esta manera poder elaborar un programa donde se establezcan las estrategias y lineamientos a seguir para garantizar las sustentabilidad del recurso agua en el estado.

De igual manera se sugiere crear o asignar en un mediano a largo plazo un organismo o plataforma virtual mediante la cual se dé seguimiento y constante actualización de las diferentes bases de datos referentes al uso del agua tanto subterránea como superficial en el estado de Guanajuato.



8. BIBLIOGRAFÍA

- Bridget RS, Healy RW, Cook PG (2002) Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal* 10: 18-39.
- Campbell, J. B. 1996. *Introduction to Remote Sensing*, ed. Guilford Press,
- Courteix, S. et al. 1994 "Droit Télédétection et Environnement", ed. SIDES.
- Chavarri Velarde, Eduardo. 2004. *Apuntes de Curso: Hidrología Aplicada*. Perú. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Chávez Guillén, Rubén. "Rudo, Un Método Para Determinar La Recarga Vertical En Acuíferos" en XXII Congreso Nacional De Hidráulica. México
- Comisión Estatal del Agua de Guanajuato - CEAG. 1997. *Estudio hidrogeológico y modelo matemático del acuífero del Valle de Irapuato – Valle de Santiago, Gto.* Elaborado por IGC, S.A. de C.V.
- Comisión Estatal del Agua de Guanajuato - CEAG. 2000. *Seguimiento del Estudio hidrogeológico y modelo matemático del acuífero del Valle de Irapuato – Valle de Santiago - Huanímaro, Gto.* Elaborado por Lesser y Asociados, S.A. de C.V.
- Comisión Estatal del Agua de Guanajuato (CEAG). 2012. *Diagnóstico sectorial de agua potable y saneamiento*. Dirección general de desarrollo hidráulico. Guanajuato.
- Comisión Estatal del Agua de Guanajuato (CEAG). 2013. *Diagnóstico sectorial de agua potable y saneamiento*. Dirección general de desarrollo hidráulico. Guanajuato.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Subsistema de visualización, en Google Earth, de las capas de datos geográficos de los aprovechamientos inscritos del Registro Público de Derechos de Agua (REPDA). Gerencia de Aguas Subterráneas (GAS). Subgerencia de Información Geográfica del Agua (SIGA). Disponible en su página de internet en: <http://siga.conagua.gob.mx/REPDA/Menu/MenuKMZ.html>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2009. *Determinación de la disponibilidad de agua en el Acuífero Irapuato - Valle, Estado de Guanajuato*. Subgerencia de Evaluación y Ordenamiento de Acuíferos. Gerencia de Aguas Subterráneas.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2009b. *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento: Alcantarillado sanitario*. Ed. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México D.F.



- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2013. Acciones para la prevención y mitigación de contingencias por inundaciones y sequía (Documento no publicado).
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) - Semarnat. 2012. Estadísticas del Agua en México Edición 2011. México.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) - Semarnat. 2013. Estadísticas del Agua en México Edición 2012. México.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) - Semarnat. 2014. Estadísticas del Agua en México Edición 2013. México.
- Escalante Sandoval, Carlos A. 2012. “Determinación de la Disponibilidad de agua Subterránea del acuífero La Muralla con la Norma 011”
- Escolero, Oscar; et. al. 2014. Atlas de la Cuenca Lerma-Chapala: Ciclo hidrológico. CONAGUA. México
- Domenico, P.A. & Schwartz, F. W. 1998. Physycal and chemical hydrogeology. Wiley, 502 pp.
- FEA, et. al. 2006. “El agua en México: lo que todas y todos debemos saber”. Centro de Información Virtual del Agua. México
- Flores Francisco, et. al. 2000. “Superficie Agrícola Estimada Mediante Análisis de Imágenes de Satélite en Guanajuato, México”. Instituto Internacional Del Manejo Del Agua. México.
- Foro Consultivo Científico y Tecnológico, AC. 2012. “Diagnóstico del Agua en las Américas” FCCyT.
- García, Marleny. 2010. “Balance Hídrico de las Aguas Subterráneas: Municipio de Santiago de Cali”. Departamento Administrativo de Gestión Medio Ambiente. Colombia.
- García, Martha. 1999. Sistema de Información: Componente Hidrológico (Redes, Mediciones, Observaciones y Procesos Básicos). Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
- GreenFacts. 2009. “Resumen del 2º Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo”. <http://www.greenfacts.org/es/recursos-hidricos/> [Consulta: 2 de mayo de 2015]
- IDEAM. 1998. Estudio Nacional del Agua, Balance Hídrico y Relaciones Oferta Demanda en Colombia. Primera versión. Santa Fe de Bogotá.
- Unesco – Heras, Rafael. 1981. “Métodos de Cálculo de Balance Hídrico: Guía internacional de investigación y métodos” Instituto de Hidrología de España/Unesco. España



- Labrador, Mauricio, et. al. 2012. “Satélites de Teledetección para la Gestión del Territorio”. Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Aguas del Gobierno de Canarias. España.
- Lerner, D.N.; Identifying and quantifying urban recharge: a review. En: Hydrogeology Journal, No. 10: (2002). p. 143-152.
- Lerner, D.N.; ISSAR, A.S.; SIMMERS, I.; Groundwater recharge. A guide to understanding the natural recharge. Hannover: Ed. R. van Acken GmbH, 1990. 345p.
- Lerner, D.N.; Techniques. En: Groundwater recharge. A guide to understanding the natural recharge. Hannover: Ed. R. van Acken GmbH, 1990. p. 99-229.
- López, Juan Antonio. 2008. “Las Aguas Subterráneas y Los Acuíferos: Su Estrategia de Utilización en Periodos de Sequía” Instituto Geológico y Minero de España. Madrid. 89-103 pp.
- Kozlovsky, E.A. 1988. Geology and the Environment, and International Manual in Three Volumes. Unesco and Unep.
- McDonald, M.G., Harbaugh, A. W. 1988. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model: U.S. Geological Survey, Techniques of water-Resources Investigations
- Ordoñez, J. Julio. 2011. “Cartilla Técnica: El ciclo Hidrológico”. Sociedad Geográfica de Lima. Perú.
- Poveda, Ignacio et. al. 2010. “Procesado de Imágenes de Satélite: Obtención de Magnitudes Biofísicas de la Vegetación” Universidad de Castilla La Mancha. Albacete, España.
- Prickett, T.A., Lonquist, C.G. 1971. Selected digital computer techniques for groundwater resource evaluation: Illinois State Water simulation Survey, Report of Investigation, pp 55 – 62.
- Problemática del agua en los distritos de riego por bombeo del estado de Sonora. 2009. Revista Digital Universitaria. UNAM. Volumen 10, Número 6.
- Rodda J.C. 1980. Facets of Hydrology. John Wiley & Sons.
- Rushton, K. Numerical and conceptual models for recharge estimation in arid and semi-arid zones. En: Estimation of Natural Groundwater Recharge. Boston: Ed. Reidel, NATO ASI Series, 1988. p. 223-237.
- Salvatierra, Benito. 2010. “Eficiencia De Aplicación Del Riego En Andalucía”. IFAPA. Andalucía, España.
- Samper, J. (1995). Las redes de observación y control de las aguas subterráneas en España: Estado actual, necesidades y perspectivas. En: Jornadas sobre Las Aguas



- Subterráneas en la Ley de Aguas Española: Un Decenio de Experiencia. Ed. AIH-GE. Murcia, pp. 363-385, Vol.1.
- Samper, J. (1997a). Métodos de evaluación de la recarga por la lluvia por balances de agua: utilización, calibración y errores. En: La evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica. Seminario de la AIH-GE. E. Custodio, M.R. Llamas y J. Samper editores, Ed. Instituto Tecnológico Geominero de España. Madrid. pp. 41-79.
- Samper, J. (1997b). Evaluación de la recarga a partir de modelos numéricos de flujo en acuíferos. En: La evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica. Seminario de la AIH-GE. E. Custodio, M.R. Llamas y J. Samper editores, Ed. Instituto Tecnológico Geominero de España. Madrid. pp. 153-180.
- Tinajero, GJA (1982). Aspectos fundamentales en el estudio del agua subterránea (Geohidrología). Comisión del Plan Nacional Hidráulico, México, D.F. 232 pp.
- UNESCO. Ground Water managing the “invisible” resource. Environment and development, BRIEFS. UNESCO No. 12. 1992. 15 p.
- Vásquez, L.M.; Estudio de diferentes métodos para estimar la recarga en acuíferos. Medellín 2003, 145p. Tesis (Ingeniería Civil), Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas.
- Villarroya, Fermín. 2006. “APUNTES DE HIDROGEOLOGÍA, Tema 1”. Departamento de Geodinámica- Facultad de Ciencias Geológicas. Universidad Complutense. Madrid



9. ANEXOS



ANEXO A

(NOM-011-CONAGUA-2015)

18/6/2015

DOF - Diario Oficial de la Federación

DOF: 27/03/2015

NORMA Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua-Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales.

Al margen un sello con el Escudo Nacional, que dice: Estados Unidos Mexicanos.- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

JUAN JOSÉ GUERRA ABUD, Secretario de Medio Ambiente y Recursos Naturales, con fundamento en los artículos 7 fracción I, 8 fracción V, y 9 fracción XXXI de la Ley de Aguas Nacionales; 38 fracción II, 40 fracción X, 46, 47 fracción IV y 51 primer párrafo de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización; 28 y 34 del Reglamento de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización y 5 fracción XXXV del Reglamento Interior de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, y

CONSIDERANDO

Que la Ley de Aguas Nacionales establece en el artículo 7 fracción I que la gestión integrada de los recursos hídricos, superficiales y del subsuelo, a partir de las cuencas hidrológicas en el territorio nacional, son prioridad y asunto de seguridad nacional.

Que la protección, el mejoramiento, la conservación y restauración de las cuencas hidrológicas, acuíferos, cauces, vasos y demás depósitos de agua de propiedad nacional, zonas de captación de fuentes de abastecimiento, así como la infiltración natural o artificial de aguas para reabastecer mantos acuíferos acorde con las Normas Oficiales Mexicanas y la derivación de las aguas de una cuenca o región hidrológica hacia otras, es una prioridad del gobierno federal.

Que el restablecimiento del equilibrio hidrológico de las aguas nacionales, superficiales o del subsuelo, incluidas las limitaciones de extracción en zonas reglamentadas, las vedas, las reservas y el cambio en el uso del agua para destinarlo al uso doméstico y al público urbano, acorde con la normatividad vigente, es una labor constante de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, a través de la emisión y actualización de los estudios de disponibilidad de aguas nacionales de la Comisión Nacional del Agua, de acuerdo al artículo 22 último párrafo, de la Ley de Aguas Nacionales.

Que la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, establece en su artículo 40 fracción X, que una de las finalidades de las Normas Oficiales Mexicanas, es establecer las características y/o especificaciones, criterios y procedimientos que permitan proteger y promover el mejoramiento del medio ambiente y los ecosistemas, así como la preservación de los recursos naturales.

Que la Ley de Aguas Nacionales establece las facultades de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, de expedir Normas Oficiales Mexicanas que promuevan el uso y aprovechamiento sustentable del agua a propuesta de la Comisión Nacional del Agua.

Que con fecha 17 de abril de 2002 se publicó en el Diario Oficial de la Federación, la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000, "Conservación del recurso agua-Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales", con el fin de cumplir con lo establecido en la Ley de Aguas Nacionales en su artículo 9, segundo párrafo.

Que de acuerdo al artículo 51 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, el 14 de mayo de 2007, se sometió a consideración del pleno del Subcomité de Normalización de Obras Hidráulicas en Cauces y Zonas sujetas a Riesgos de Inundación del Comité Consultivo Nacional de Normalización del Sector Agua, donde se acordó aprobar su ratificación.

Que con fecha 14 de enero de 2009 se publicó en el Diario Oficial de la Federación el "Acuerdo por el se modifica la nomenclatura de las Normas Oficiales Mexicanas derivadas del Comité Consultivo Nacional de Normalización del Sector Agua", el cual incluye la citada Norma Oficial Mexicana.

Que el "PROYECTO de Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000, Conservación del recurso agua-Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales", se sometió a consideración del Comité Consultivo Nacional de Normalización del Sector Agua, quien la aprobó el día 23 de noviembre de 2009, para su publicación en el Diario Oficial de la Federación, con el propósito de someterlo a consulta pública, de conformidad con el artículo 47 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, a efecto de que los interesados, dentro de los 60 días naturales, contados a partir de la fecha de su publicación en el Diario Oficial de la Federación, presentasen sus comentarios ante el citado Comité, sito en Av. Insurgentes Sur 2416, Tercer Piso, Colonia Copilco El Bajo, Delegación Coyoacán, en México, Distrito Federal, o al correo electrónico jose.camacho@conagua.gob.mx.

Que el Proyecto de Modificación a la Norma Oficial Mexicana se publicó el 23 de julio de 2014, en el Diario Oficial de la Federación, para consulta pública.

Que durante el plazo mencionado la Manifestación de Impacto Regulatorio a que se refiere el artículo 45 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, estuvo a disposición del público para su consulta en el domicilio del Comité antes señalado.

Que de acuerdo a lo establecido en el artículo 47, fracciones II y III de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, los interesados presentaron sus comentarios al proyecto de modificación en cuestión, los cuales fueron analizados por el Comité Consultivo Nacional de Normalización del Sector Agua, realizándose las modificaciones procedentes al proyecto.

Que de conformidad con lo establecido en el artículo 28 fracción II, inciso d) del Reglamento de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, el año de la clave cambia a 2015, debido a que el instrumento regulatorio se presentó ante el



18/6/2015

DOF - Diario Oficial de la Federación

citado Comité, para su aprobación en ese año.

Que las respuestas a los comentarios de la consulta pública y las modificaciones derivadas de los mismos, fueron publicadas en el Diario Oficial de la Federación el doce de marzo de 2015.

Que una vez cumplido el procedimiento establecido en la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, para la elaboración de los proyectos de modificación de Normas Oficiales Mexicanas, el Comité Consultivo Nacional de Normalización del Sector Agua, en su Primera Sesión extraordinaria de 2015, aprobó para publicación definitiva la presente norma oficial mexicana NOM-011-CONAGUA-2015.

Que habiéndose cumplido los requisitos que establece la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, la Comisión Nacional del Agua ha sometido a la firma del suscrito del presente documento, por lo que he tenido a bien expedir la siguiente:

NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-011-CONAGUA-2015, CONSERVACIÓN DEL RECURSO AGUA-QUE ESTABLECE LAS ESPECIFICACIONES Y EL MÉTODO PARA DETERMINAR LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE LAS AGUAS NACIONALES

CONTENIDO

0. Introducción
1. Objetivo
2. Campo de aplicación
3. Definiciones
4. Especificaciones
5. Grado de concordancia con normas y recomendaciones internacionales
6. Bibliografía
7. Observancia de esta Norma

APÉNDICE NORMATIVO A

MÉTODOS PARA DETERMINAR EL VOLUMEN MEDIO ANUAL DE ESCURRIMIENTO NATURAL

APÉNDICE NORMATIVO B

MÉTODOS PARA DETERMINAR LA RECARGA TOTAL DE UN ACUÍFERO

APÉNDICE INFORMATIVO C

EJEMPLO PARA DETERMINAR MEDIANTE EL MÉTODO DIRECTO EL VOLUMEN MEDIO ANUAL DE ESCURRIMIENTO NATURAL

APÉNDICE INFORMATIVO D

EJEMPLO PARA DETERMINAR MEDIANTE EL MÉTODO INDIRECTO EL VOLUMEN MEDIO ANUAL DE ESCURRIMIENTO NATURAL

0. Introducción

Los recursos hídricos accesibles para su aprovechamiento por el hombre tienen su origen en la precipitación pluvial(*), que al ocurrir sobre "tierra firme", se divide en dos fracciones:

- La primera fracción escurre superficialmente por las redes de drenaje natural como arroyos y ríos, hasta desembocar al mar o a cuerpos interiores de agua.
- La fracción complementaria se infiltra y circula a través de acuíferos, que a su vez descargan a cuerpos y cursos superficiales, a través de manantiales o subterráneamente al mar.

Donde el agua no es desviada de manera artificial desde las fuentes hasta sus salidas al mar, a la parte baja de una cuenca interna o a la frontera interior de un acuífero, se desarrolla un sistema natural o "virgen".

Antes de que el hombre alterara el equilibrio hidrológico para satisfacer sus necesidades, el escurrimiento virgen sustentaba a ecosistemas. Por ello, la naturaleza puede ser visualizada como el primer y natural usuario del agua.

El equilibrio natural fue gradualmente afectado conforme el hombre fue aumentando la derivación artificial de agua para satisfacer sus necesidades personales (uso doméstico), para la producción de alimentos (uso agrícola y pecuario) y para el desarrollo de procesos económicos (uso industrial).

Hasta el siglo XIX el aprovechamiento creciente del agua por el hombre con la consecuente reducción gradual de los escurrimientos naturales, en general, no causó daños graves al ambiente. Sin embargo, en el transcurso del siglo XX la derivación del agua para diversos usos creció de modo acelerado, especialmente durante su segunda mitad, al grado que ahora existen porciones importantes de la superficie continental del planeta, en las cuales el ambiente ha sufrido daños graves; en casos extremos, irreparables.

En vista de lo anterior, es de suma importancia tomar conciencia de que sólo una fracción de los escurrimientos naturales,



18/6/2015

DOF - Diario Oficial de la Federación

superficiales o subterráneos, debe ser aprovechada por el hombre. Además de los requerimientos del ambiente, existen limitaciones de índole técnica que reducen aún más la proporción de los escurrimientos naturales aprovechables.

La porción accesible de los escurrimientos naturales de una cuenca, cuya infraestructura de regulación ha sido plenamente desarrollada, en la mayoría de los casos no supera el 70%, a la que hay que deducir los requerimientos del ambiente para determinar la cantidad de agua que puede destinarse a los diversos usos humanos.

Por otra parte, con base en los estudios que ha realizado la Comisión Nacional del Agua se ha detectado que en diversas regiones, entidades federativas y localidades del país, los volúmenes de agua concesionados superan el escurrimiento y la recarga de los acuíferos, situación que genera escasez del recurso, conflictos entre los usuarios y diversos efectos perjudiciales.

Considerando todo lo anterior y que la Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento dispone que para el otorgamiento de asignaciones y concesiones se tomará en cuenta la disponibilidad media anual de agua, es necesario establecer en la presente Norma Oficial Mexicana las especificaciones para determinar con una metodología consistente, a nivel nacional, la disponibilidad media anual de aguas nacionales superficiales y del subsuelo, como base técnica para regular su uso, de manera racional y equitativa.

1. Objetivo

La presente Norma Oficial Mexicana tiene como objetivo establecer el método base para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales superficiales y del subsuelo, para su explotación, uso o aprovechamiento.

2. Campo de aplicación

Las especificaciones establecidas en la presente Norma Oficial Mexicana son de observancia obligatoria para la Comisión Nacional del Agua y para los usuarios que realicen estudios para determinar la disponibilidad media anual de aguas nacionales.

3. Definiciones

Para los efectos de esta Norma, además de las definiciones contenidas en la Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento, se entenderá por:

3.1. Aforo: mediciones realizadas en un cauce con el objetivo de obtener datos básicos para calcular el caudal que pasa por una sección transversal del mismo.

3.2. Cambio de almacenamiento: incremento o decremento del volumen de agua almacenada en el acuífero en un intervalo de tiempo cualquiera.

3.3. Cauce principal: el canal principal que capta y conduce el agua hasta la descarga de una cuenca.

3.4. Caudal base: gasto o caudal que proviene del agua subterránea.

3.5. Comisión: Comisión Nacional del Agua, órgano desconcentrado de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

3.6. Creciente máxima ordinaria: es la que ocurre dentro de un cauce sin que en éste se produzca desbordamiento, en un periodo de retorno de cinco años.

3.7. Cuencas homogéneas: son las cuencas hidrológicas en que, por tener características geomorfológicas, climatológicas, geológicas e hidrológicas similares, es válido transferir información hidrológica de una a otra.

3.8. Derrame de un embalse: es aquel que descarga a través de una obra de excedencias.

3.9. Descarga natural: volumen de agua que descarga un acuífero a través de manantiales, vegetación, ríos y humedales, o subterráneamente a cuerpos de agua.

3.10. Descarga natural comprometida: fracción de la descarga natural de un acuífero, que está comprometida como agua superficial para diversos usos o que debe conservarse para prevenir un impacto ambiental negativo a los ecosistemas o la migración de agua de mala calidad a un acuífero.

3.11. Diversos usos: se refiere a todos los usos definidos en la Ley de Aguas Nacionales, como doméstico, agrícola, acuicultura, servicios, industrial, uso ambiental, pecuario, público urbano, recreativo y otros.

3.12. Disponibilidad media anual de agua del subsuelo: volumen medio anual de agua subterránea que puede ser extraído de un acuífero para diversos usos, adicional a la extracción ya concesionada y a la descarga natural comprometida, sin poner en peligro el equilibrio de los ecosistemas.

3.13. Embalse: Depósito artificial en el que se almacenan las aguas de un río o un arroyo, mediante la construcción de una presa o un dique que cierra la boca de un valle.

3.14. Escurrimiento desde aguas arriba: es el volumen medio anual de agua que en forma natural proviene de una cuenca hidrológica ubicada aguas arriba de la cuenca o subcuenca en análisis.

3.15. Escurrimiento natural: es el volumen medio anual de agua superficial que se capta por la red de drenaje natural de la propia cuenca hidrológica.

3.16. Evaporación: es el proceso por el cual el agua, en la superficie de un cuerpo de agua natural o artificial o en la tierra húmeda, adquiere la suficiente energía cinética de la radiación solar, y pasa del estado líquido al gaseoso.



18/6/2015

DOF - Diario Oficial de la Federación

3.17. Evapotranspiración: es la cantidad total de agua que retorna a la atmósfera en una determinada zona por evaporación del agua superficial y del suelo, y por transpiración de la vegetación.

3.18. Extracción de aguas subterráneas: volumen de agua que se extrae artificialmente de un acuífero para los diversos usos.

3.19. Extracción de aguas superficiales: volumen de agua que se extrae artificialmente de los cauces y embalses superficiales para los diversos usos.

3.20. Exportación: es el volumen de agua superficial o subterránea que se transfiere de una cuenca hidrológica o acuífero a otra u otras, hacia las que no drena en forma natural.

3.21. Hidrograma: representación gráfica de la variación del gasto o caudal con respecto al tiempo.

3.22. Importación: es el volumen de agua que se recibe en una cuenca hidrológica o acuífero desde otra u otras, hacia las que no drena en forma natural.

3.23. Parteaguas: límite físico de una cuenca o subcuenca hidrológica, representado por la línea imaginaria formada por los puntos de mayor elevación topográfica, que las separa de las vecinas.

3.24. Programación Hídrica: instrumento fundamental para la gestión integrada de los recursos hídricos y la seguridad hídrica, que aplica políticas y establece objetivos, estrategias, disposiciones y prioridades, a nivel nacional, estatal o local, para asegurar la autosuficiencia y sostenibilidad del sector hídrico a fin de garantizar el derecho humano al agua.

3.25. Recarga total: volumen de agua que recibe un acuífero, en un intervalo de tiempo específico.

3.26. Retornos: son los volúmenes que se reincorporan a la red de drenaje de la cuenca hidrológica, como remanentes de los volúmenes aprovechados en los diferentes usos del agua.

3.27. Subcuenca: fracción de una cuenca hidrológica, que corresponde a la superficie tributaria de un afluente o de un sitio seleccionado.

3.28. Transpiración: es el proceso por el cual la vegetación extrae humedad del suelo y la libera al aire circundante como vapor.

3.29. Unidad de gestión: territorio de la cuenca o subcuenca hidrológica superficial, o del acuífero, que se definen como una unidad para la evaluación, manejo y administración de los recursos hídricos.

3.30. Variación de almacenamiento en embalses: es el cambio de volumen que se presenta en los embalses, sean naturales o artificiales, debido al régimen de escurrimiento, salidas por evaporación en el vaso y políticas de operación, en un intervalo de tiempo.

4. Especificaciones

4.1 Generales

4.1.1 Las especificaciones establecidas en la presente Norma Oficial Mexicana se deben aplicar en los estudios para determinar la disponibilidad media anual de aguas nacionales en cuencas hidrológicas y en acuíferos. El método se considerará como el requerimiento técnico mínimo obligatorio y no excluye la aplicación adicional de métodos complementarios o alternos más complicados y precisos, cuando la información disponible así lo permita, en cuyo caso la Comisión revisará conjuntamente con los usuarios y determinará cuáles son los resultados que prevalecen.

4.1.2 La disponibilidad media anual de aguas nacionales superficiales en cuencas hidrológicas clasificadas como grandes (área mayor de 3000 km²), deberán subdividirse en función de la problemática regional que enfrente el uso del recurso, de la importancia de sus afluentes, localización de los diferentes usuarios e información hidrométrica y climatológica disponible.

4.1.3 Los elementos considerados en el balance hídrico se deben ajustar a un periodo de registro de información común y actual.

4.2 Disponibilidad media anual de agua superficial en una cuenca hidrológica

4.2.1 Se determina en el cauce principal en la salida de la cuenca hidrológica, mediante la siguiente expresión:

$$\text{DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA SUPERFICIAL EN LA CUENCA HIDROLÓGICA} = \text{VOLUMEN MEDIO ANUAL DE ESCURRIMIENTO DE LA CUENCA HACIA AGUAS ABAJO} - \text{VOLUMEN ANUAL ACTUAL COMPROMETIDO AGUAS ABAJO}$$

4.2.2 El volumen medio anual de escurrimiento de la cuenca hacia aguas abajo del sitio de interés, se determina al aplicar la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \text{VOLUMEN MEDIO ANUAL DE ESCURRIMIENTO DE LA CUENCA HACIA AGUAS ABAJO} &= \text{VOLUMEN MEDIO ANUAL DE ESCURRIMIENTO DESDE LA CUENCA AGUAS ARRIBA} + \text{VOLUMEN MEDIO ANUAL DE ESCURRIMIENTO NATURAL} + \text{VOLUMEN ANUAL DE RETORNOS} \\ &+ \text{VOLUMEN ANUAL DE IMPORTACIONES} - \text{VOLUMEN ANUAL DE EXPORTACIONES} - \text{VOLUMEN ANUAL DE EXTRACCIÓN DE AGUA SUPERFICIAL} \\ &- \text{VOLUMEN MEDIO ANUAL} - \text{VOLUMEN MEDIO} \end{aligned}$$



18/6/2015

DOF - Diario Oficial de la Federación
DE EVAPORACIÓN EN EMBALSES ANUAL DE VARIACION DE ALMACENAMIENTO EN EMBALSES

4.2.3 El volumen medio anual de escurrimiento desde la cuenca aguas arriba, se determina con la expresión utilizada para calcular el volumen medio anual de escurrimiento de la cuenca hacia aguas abajo que corresponde al de la cuenca en estudio ubicada aguas arriba.

4.2.4 El volumen medio anual de escurrimiento natural, se determina aplicando alguno de los métodos descritos en el Apéndice Normativo "A" de esta Norma Oficial Mexicana.

4.2.5 El volumen anual de retornos, se determina mediante aforo o estimación de las salidas de los volúmenes que se reincorporan a la red de drenaje de una cuenca, para los diferentes usos donde no se cuenta con aforos, se pueden estimar con el cuadro siguiente:

CUADRO 1

PORCENTAJES RECOMENDADOS DE RETORNOS CON RELACIÓN AL RANGO DE DIFERENTES USOS		
USOS	% RANGO	% RETORNO
Agrícola	10-30	20
Público Urbano	70-80	75
Industrial	50-60	55
Doméstico	70-80	75
Pecuario	10-30	15
Acuacultura	95-100	100
Generación de energía eléctrica	95-100	100

4.2.6 El volumen anual de importaciones, se determina sumando los volúmenes de agua superficial que se reciben en la cuenca hidrológica en estudio, de otra u otras cuencas hidrológicas o acuíferos.

4.2.7 El volumen anual de exportaciones, se determina sumando los volúmenes de agua superficial que se transfieren de la cuenca hidrológica en estudio, a otra u otras a las que no drena en forma natural.

4.2.8 El volumen anual de extracción de agua superficial debe incluir, en su caso, algunos o todos los volúmenes anuales siguientes:

a) Los volúmenes anuales asignados y concesionados por la Comisión, mediante títulos inscritos actualmente en el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) para la explotación, uso o aprovechamiento de agua en la cuenca hidrológica,

b) Los volúmenes anuales correspondientes a las solicitudes de concesión o asignación aprobadas y que están en proceso de emisión del título correspondiente; y los volúmenes consignados en los títulos de concesión o asignación que aún no se han registrado ante el REPGA, y

c) Los volúmenes anuales correspondientes a las reservas, el caudal ecológico y las zonas reglamentadas.

4.2.9 El volumen anual de evapotranspiración, está considerado de manera implícita, en el volumen medio anual de escurrimiento natural, al restarle a los volúmenes aforados en la estación aguas abajo los volúmenes aforados en la estación aguas arriba.

4.2.10 El volumen anual actual comprometido aguas abajo se determina como la parte de los escurrimientos de la cuenca hacia aguas abajo, necesaria para cumplir con los volúmenes asignados y concesionados por la Comisión, limitaciones que se establezcan en las vedas y, si es el caso, los volúmenes correspondientes a reservas, uso ambiental, reglamentos y Programación Hídrica.

4.2.11 Las salidas naturales que se tengan en el cauce del tramo analizado por: evaporación de la superficie libre del agua expuesta a la atmósfera; la evapotranspiración por la vegetación ribereña; y, la infiltración en el propio cauce, ya están consideradas en el término del volumen anual de escurrimiento aforado de la cuenca hacia aguas abajo.

4.2.12 El volumen medio anual de evaporación en embalses se determina a partir de la lámina de evaporación medida, aplicada a la superficie libre del agua expuesta, en los embalses naturales o artificiales.

4.2.13 El volumen medio anual de variación del almacenamiento en embalses, se determina mediante la diferencia del volumen final menos el volumen inicial (V final - V inicial).

4.2.14 La disponibilidad media anual de agua superficial en una subcuenca o en un punto específico de la red de drenaje de la cuenca hidrológica, se determina aplicando las expresiones y términos que aparecen en los puntos 4.2.1 a 4.2.13 de este inciso.



18/6/2015

DOF - Diario Oficial de la Federación

4.3 Disponibilidad media anual de agua del subsuelo en un acuífero.

4.3.1 Se determina por medio de la siguiente expresión:

$$\text{DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA DEL SUBSUELO EN UN ACUÍFERO} = \text{RECARGA TOTAL MEDIA ANUAL} - \text{DESCARGA NATURAL COMPROMETIDA} - \text{EXTRACCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS}$$

4.3.2 La recarga total media anual se determina mediante la metodología descrita en el Apéndice Normativo "B" de esta Norma Oficial Mexicana.

4.3.3 La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que están comprometidos como agua superficial, alimentados por un acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar la alimentación de acuíferos adyacentes, sostener el uso ambiental y prevenir la inmigración de agua de mala calidad al acuífero considerado.

4.3.4 La extracción de aguas subterráneas se determina sumando los volúmenes anuales de agua asignados o concesionados por la Comisión mediante títulos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA), los volúmenes de agua que se encuentren en proceso de registro y titulación y, en su caso, los volúmenes de agua correspondientes a reservas, reglamentos y programación hídrica, determinados para el acuífero de que se trate, todos ellos referidos a una fecha de corte específica. En el caso de los acuíferos en zonas de libre alumbramiento, la extracción de aguas subterráneas será equivalente a la suma de los volúmenes de agua extraídos estimados con base en los estudios técnicos, que sean efectivamente extraídos aunque no hayan sido titulados ni registrados, y en su caso, los volúmenes de agua concesionados de la parte vedada del mismo acuífero. Los volúmenes de agua inscritos en el Registro Nacional Permanente no serán contabilizados en la extracción para fines de la determinación de la disponibilidad de agua, a menos que las verificaciones de campo demuestren que son extraídos físicamente.

4.4 Disponibilidad media anual de aguas nacionales.

4.4.1 Los volúmenes de agua accesibles en un lugar y tiempo determinado, dependen regional y localmente, de la climatología, de la variación de la precipitación atmosférica y de la estación del año, de las características geomorfológicas, topográficas, hidrográficas y geológicas, así como de la infraestructura hidráulica existente, por lo cual no siempre son suficientes para que los concesionarios puedan captar la totalidad de los volúmenes medios anuales asignados y concesionados por la Comisión.

4.4.2 En el caso de que la disponibilidad media anual de agua en las cuencas hidrológicas o en los acuíferos, resulte negativa, su valor será representativo de un déficit.

4.4.3 En el caso de que en la cuenca hidrológica en estudio existan presas de almacenamiento y regulación, los volúmenes aprovechables de aguas superficiales, su distribución y usos por cada sistema o subsistema de usuarios de la cuenca, serán establecidos en los reglamentos y disposiciones de la Comisión y, serán determinados con base en los volúmenes de agua almacenados en los embalses naturales y artificiales al inicio del ciclo de interés y considerando, con base en datos históricos, el escurrimiento probable del mismo ciclo, así como el estudio hidrológico y de funcionamiento de embalses correspondiente.

4.4.4 En el caso de cuencas y acuíferos compartidas por dos o más entidades federativas y de cuencas o acuíferos transfronterizas internacionales, la disponibilidad de aguas superficiales y del subsuelo se fijará considerando, además de lo consignado en los incisos anteriores, las disposiciones establecidas en los respectivos reglamentos, tratados internacionales o en otros ordenamientos análogos.

4.4.5 Para el caso de los acuíferos en estudio, los volúmenes máximos autorizables para cada sistema o subsistema de usuarios de las aguas del subsuelo, serán establecidos en los reglamentos y disposiciones particulares de la Comisión.

4.4.6 La Disponibilidad de Agua Superficial aguas abajo de un embalse natural o artificial, se determina sumando los derrames del mismo y el volumen medio anual de escurrimiento natural generado entre el embalse y el sitio de interés, y restando al resultado el volumen anual actual comprometido aguas abajo del mismo sitio.

4.4.7 La información requerida para aplicar los métodos descritos en los apéndices A, B, C y D de esta Norma Oficial Mexicana, que obre en poder de la Comisión, podrá ser consultada por los interesados en las oficinas de los Organismos de Cuenca y Direcciones Locales de la entidad de que se trate.

5. Grado de concordancia con normas y recomendaciones internacionales

No se encontró norma internacional similar a la presente Norma Oficial Mexicana.

6. Bibliografía

- Angelos N. Findikakis and K.uniaki Sato. Groundwater Management Practices. CRC Press/Balkema. The Netherlands. 2011.
- ASCE, Groundwater Management, Third Edition, Manuals and Reports on Engineering Practice No. 40, American Society of Civil Engineers, New York, 1987.
- Aparicio Mijares, F.J., Fundamentos de Hidrología de Superficie. Editorial Limusa, México, 1994.
- Balek, J., Groundwater Resources Assessment, Developments in Water Sciences, No. 38, Elsevier, Amsterdam, 1989.
- Bisson, Roben A. y Lehr. Jay H., Modern Groundwater Exploration. John Wiley and Sons Inc., United States of America.



Apéndice normativo "B"

Método para determinar la recarga total media anual de un acuífero

En este Apéndice se describen los métodos que deberán aplicarse para determinar la recarga total media anual de un acuífero. La descripción de los métodos se limita a los conceptos y expresiones básicas; su detalle puede consultarse en las referencias bibliográficas de esta Norma Oficial Mexicana.

B.1 Balance de aguas del subsuelo

La recarga total que recibe un acuífero en un intervalo de tiempo dado, se determina por medio del balance de aguas del subsuelo, que en su forma más simple está representado por la siguiente expresión:

$$\text{RECARGA TOTAL (SUMA DE ENTRADAS)} = \text{CAMBIO DE ALMACENAMIENTO DEL ACUÍFERO} + \text{DESCARGA TOTAL (SUMA DE SALIDAS)}$$

Para deducir una recarga media representativa, se planteará el balance a un intervalo de tiempo de varios años en que se disponga de los datos básicos para cuantificar sus términos y que incluya tanto años secos como años lluviosos. En su defecto, el balance se planteará para un intervalo mínimo de un año.

B.2 Cambio de almacenamiento de un acuífero

El cambio de almacenamiento en el intervalo de tiempo considerado en el balance, se determina a partir de la evolución de los niveles del agua subterránea correspondientes al mismo intervalo y de valores representativos del coeficiente de almacenamiento del acuífero. El valor de este coeficiente se determina a partir de pruebas de bombeo y/o con base en consideraciones relativas al tipo y litología del acuífero en estudio.

B.3 Descarga total

La descarga total de un acuífero en el intervalo de tiempo considerado en el balance, se calcula como la suma de los volúmenes descargados en forma natural y de los extraídos del mismo por medio de captaciones, durante el mismo intervalo.

B.3.1 Descarga natural

Para determinar la descarga natural a través de las salidas más comunes de un acuífero, se utilizará dependiendo del caso, alguno de los métodos indicados a continuación:

B.3.1.1 Caudal base

La descarga de un acuífero a una corriente superficial, por convención denominada "Caudal Base", se determina a partir de los datos registrados en estaciones hidrométricas instaladas sobre el cauce de la corriente, mediante el análisis de hidrogramas para diferenciar el caudal base. Si se dispone de varias estaciones hidrométricas, el método mencionado se aplicará a los tramos comprendidos entre ellas, para conocer la distribución de esta descarga a lo largo del cauce. Las mediciones para determinar el caudal deberán realizarse a lo largo de los periodos de estiaje.

B.3.1.2 Manantiales

La descarga de un acuífero a través de un manantial se determina integrando el área bajo el hidrograma, esto es, multiplicando el intervalo de balance por el gasto medio correspondiente.

El hidrograma se trazará con base en aforos realizados con frecuencia suficiente para conocer las variaciones estacionales y anuales del gasto. En todo caso, mediante consideraciones topográficas, hidrogeológicas, hidrodinámicas e hidrogequímicas, deberá verificarse que el manantial en cuestión es alimentado por un acuífero que se está evaluando.

B.3.1.3 Evapotranspiración

La descarga de un acuífero a la atmósfera puede tener lugar por evaporación directa de agua freática somera y por la transpiración de la flora.

La descarga de agua subterránea por evaporación directa se estima multiplicando el área donde tiene lugar el fenómeno por una lámina de agua equivalente a una fracción de la evaporación potencial medida en las estaciones climatológicas. El valor de esa fracción varía entre un máximo de uno, cuando el nivel freático aflora, y cero cuando éste se halla a profundidades mayores que la altura de la faja capilar de los materiales predominantes entre la superficie del terreno y el nivel freático; a falta



18/6/2015

DOF - Diario Oficial de la Federación

de información, se supondrá que el valor de la fracción varía entre valores extremos linealmente según la profundidad de dicho nivel.

La descarga de agua subterránea por evapotranspiración depende de varios factores climáticos, hidrogeológicos y fisiológicos (tipo y densidad de vegetación), que por su amplia variación en el espacio y en el tiempo no son controlables a la escala de una cuenca o de un acuífero. Ante esta dificultad, la magnitud de este componente de descarga no se estimará por separado y su valor quedará implícito en el resultado del balance, lo cual se traducirá en una estimación conservadora de la recarga y de la disponibilidad de agua subterránea.

Sin embargo, en los casos en que la evapotranspiración sea la principal o la única componente de la descarga del acuífero, se podrán aplicar las técnicas de la percepción remota (interpretación de imágenes de satélite) para estimar la evapotranspiración real procedente del acuífero.

B.3.1.4 Flujo subterráneo

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

B.3.2 Extracción

La extracción de agua subterránea en los intervalos de tiempo considerados en el balance se determina a partir de las lecturas registradas en los medidores instalados en las descargas de los pozos o, a falta de ellos, con base en los métodos indirectos -caudal y tiempo de bombeo, consumo de energía eléctrica, población servida y dotación, índices de consumo, superficies y láminas de riego- que sean aplicables según el uso del agua.

B.4 Recarga total media anual

La recarga total media anual se obtendrá dividiendo la recarga total deducida del balance, entre el número de años del intervalo de tiempo utilizado para plantearlo.

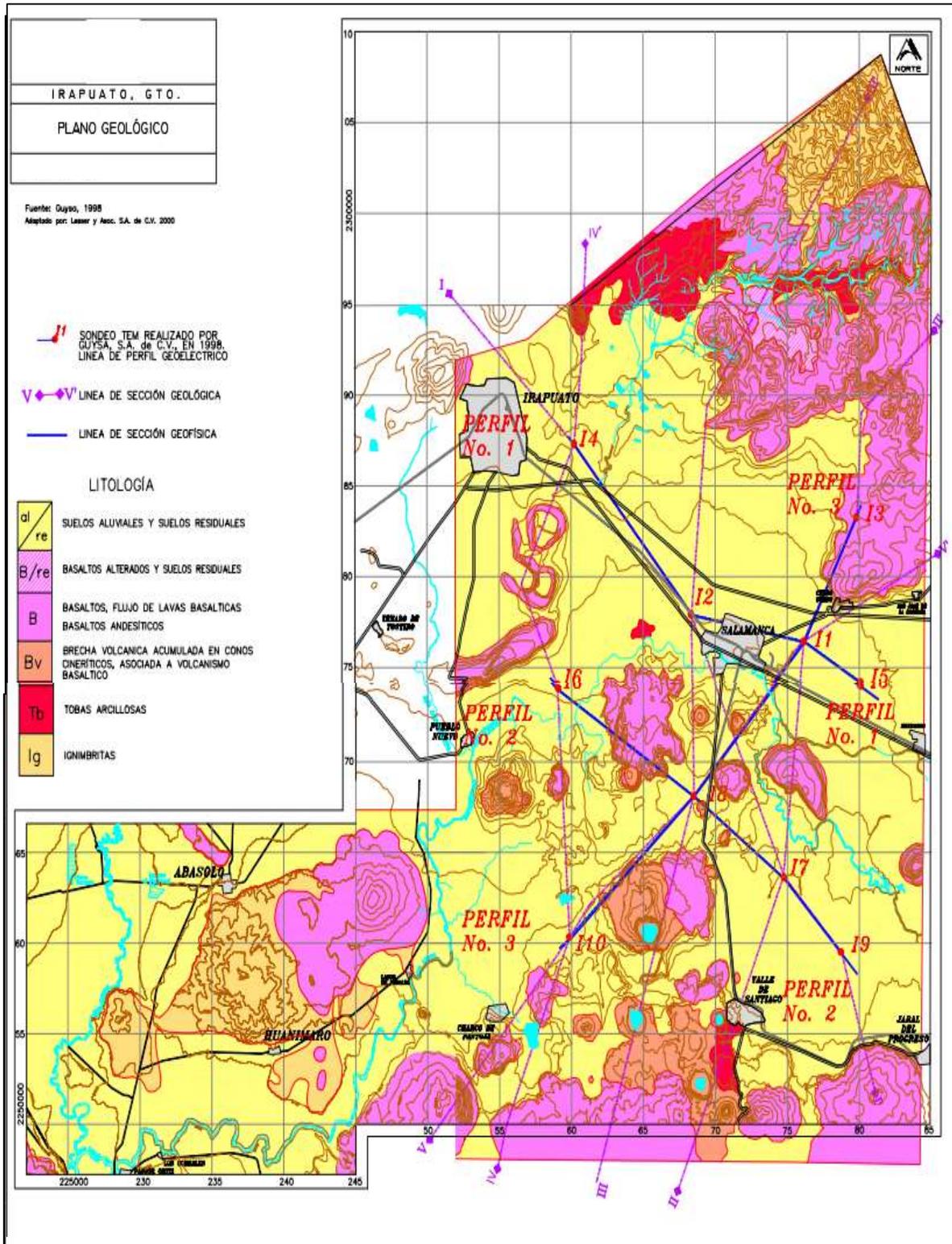
B.5 Información requerida:

- Mapa base del acuífero (planta y cortes)
 - Descripción geológica, hidrológica e hidrogeológica
 - Datos climatológicos
 - Censo de captaciones de agua subterránea
 - Cortes litológicos de pozos
-
- Investigación geofísica
 - Cotas de brocal de los pozos de observación
 - Datos del comportamiento de los niveles del agua subterránea a través del tiempo
 - Características hidráulicas de los acuíferos
 - Registro hidrométrico de extracciones y descargas naturales de agua subterránea
 - Información de la infraestructura hidráulica urbana, agrícola o industrial y datos de los volúmenes de agua manejados por medio de ella
 - Cálculo de redes de flujo subterráneo (entradas y salidas para diferentes periodos)



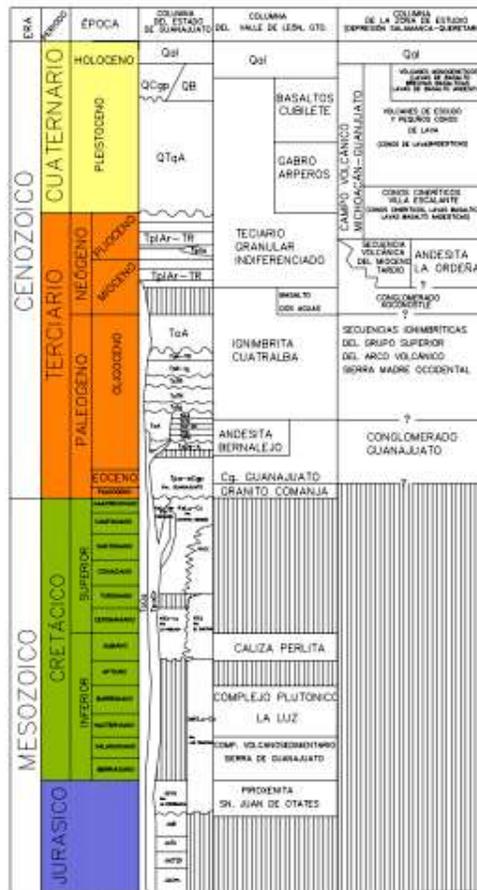
ANEXO B*

(PLANOS HIDROGEOLÓGICOS ACUÍFERO IRAPUATO – VALLE)

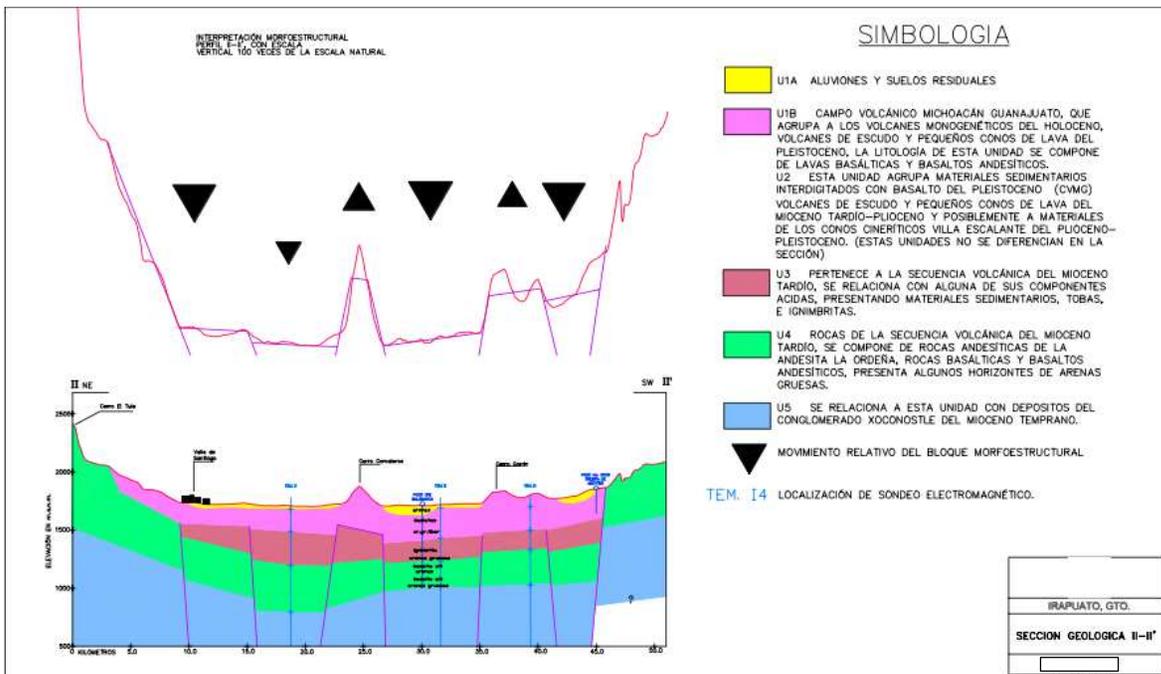




COLUMNA DE CORRELACIÓN LITOESTRATIGRAFICA



Fuente: Goyco, 1995

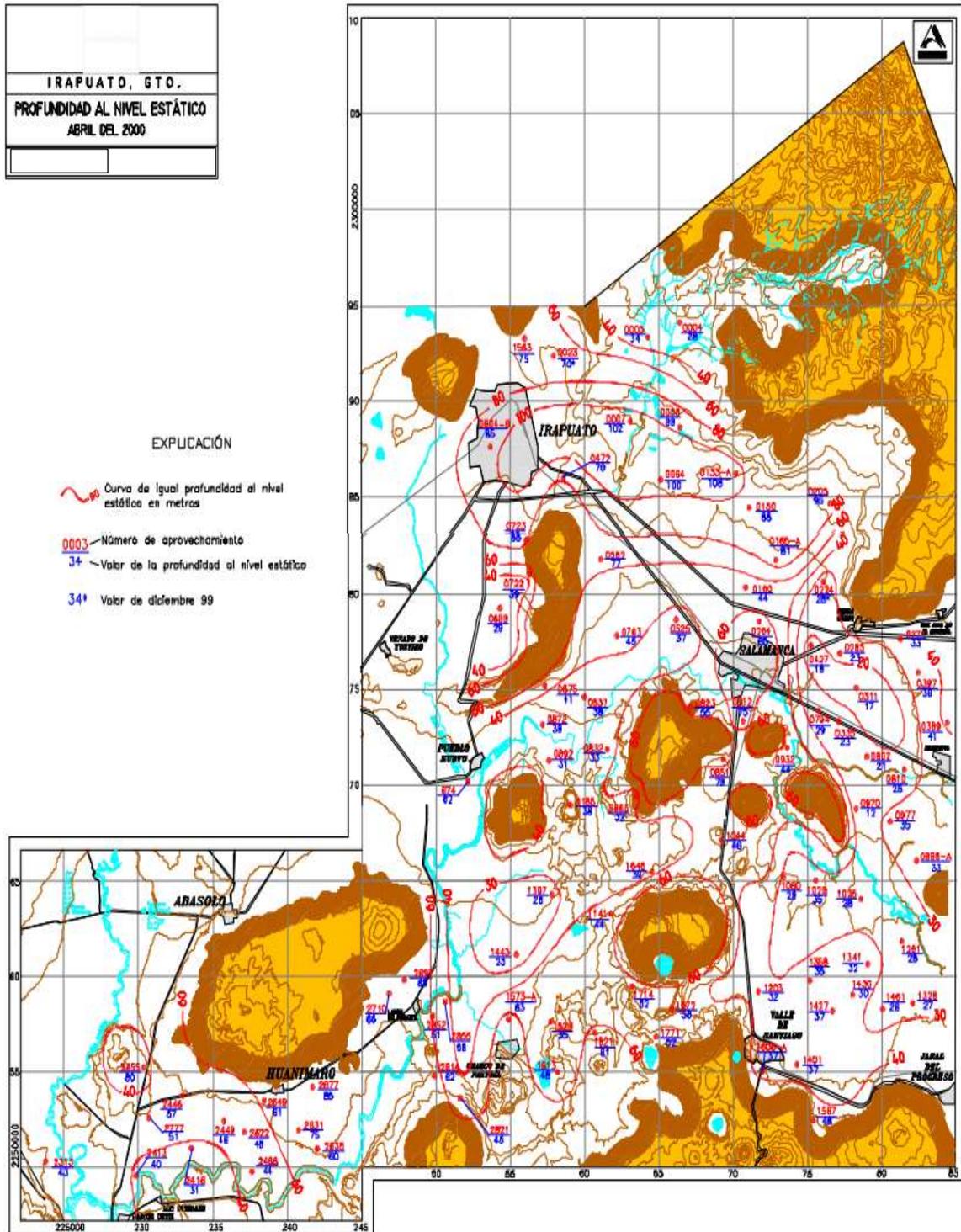




IRAPUATO, GTO.
PROFUNDIDAD AL NIVEL ESTÁTICO ABRIL DEL 2000

EXPLICACIÓN

- Curva de Igual profundidad al nivel estático en metros
- 0003 - Número de aprovechamiento
- 34 - Valor de la profundidad al nivel estático
- 34' - Valor de diciembre 99

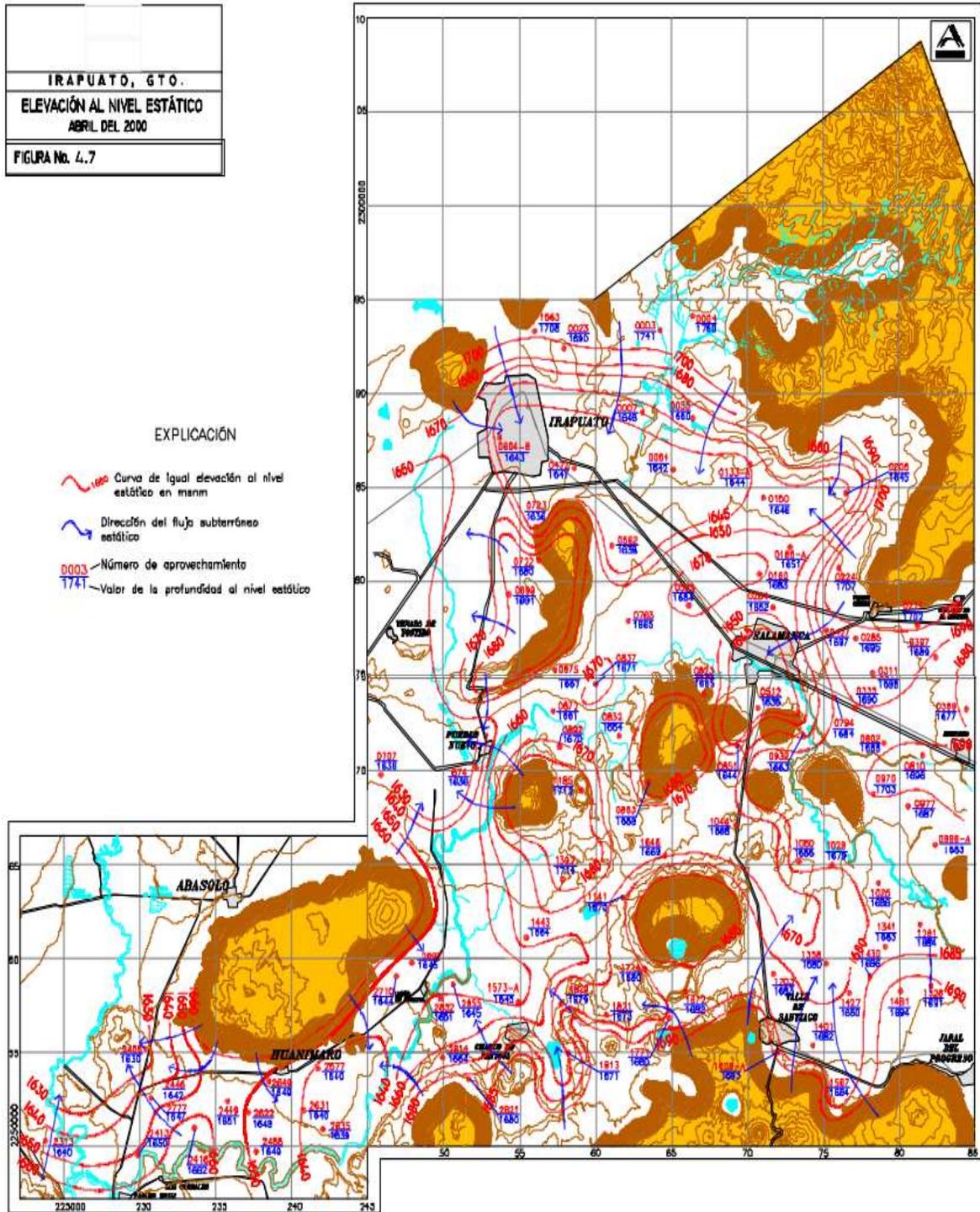




IRAPUATO, GTO.
ELEVACIÓN AL NIVEL ESTÁTICO
ABRIL DEL 2000
FIGURA No. 4.7

EXPLICACIÓN

- Curva de igual elevación al nivel estático en manm
- Dirección del flujo subterráneo estático
- Número de aprovechamiento
- Valor de la profundidad al nivel estático





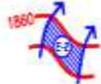
BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL ACUÍFERO IRAPUATO - VALLE: COMPONENTE AGRÍCOLA



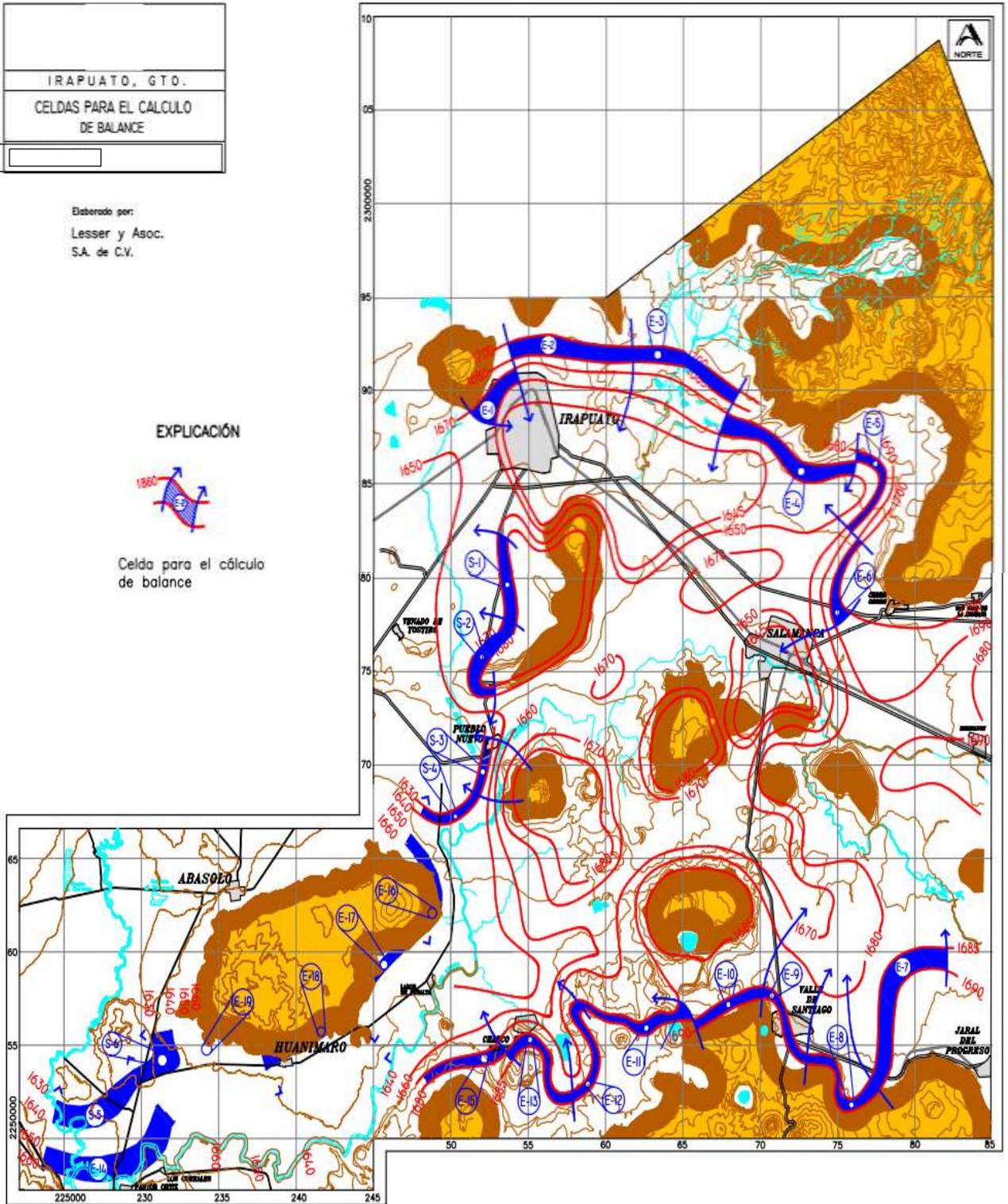
IRAPUATO, GTO.
CELDAS PARA EL CÁLCULO DE BALANCE

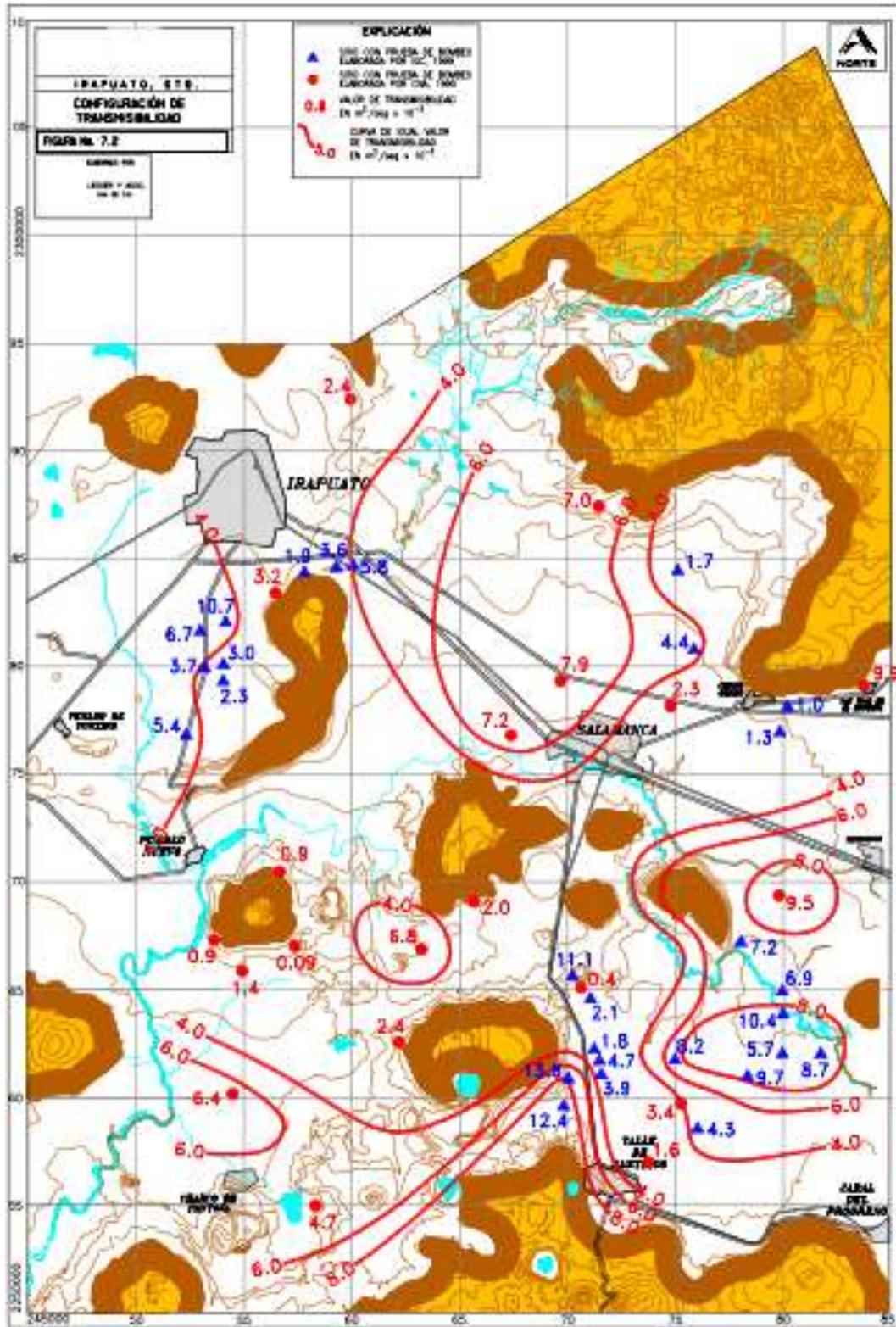
Elaborado por:
Lesser y Asoc.
S.A. de C.V.

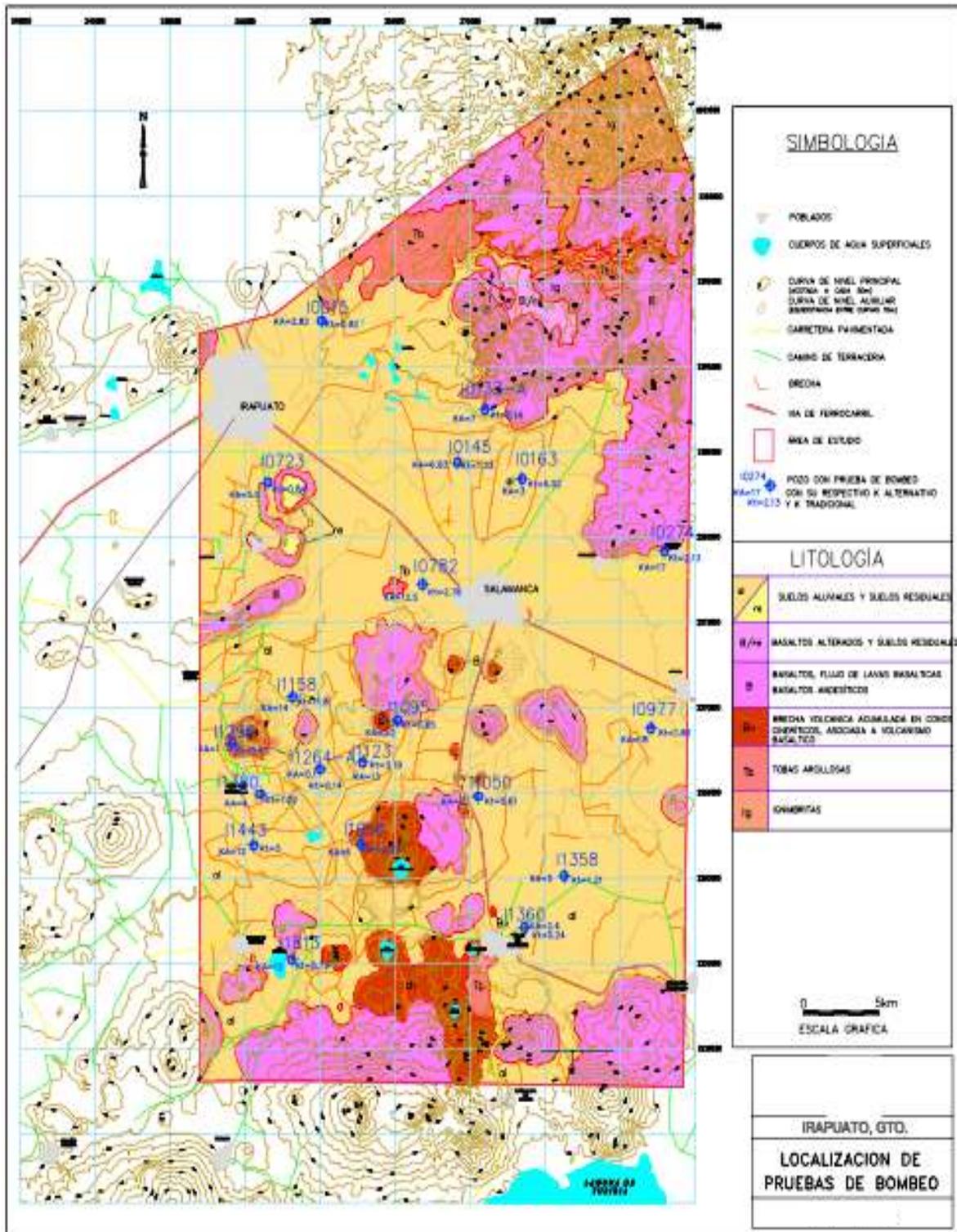
EXPLICACIÓN

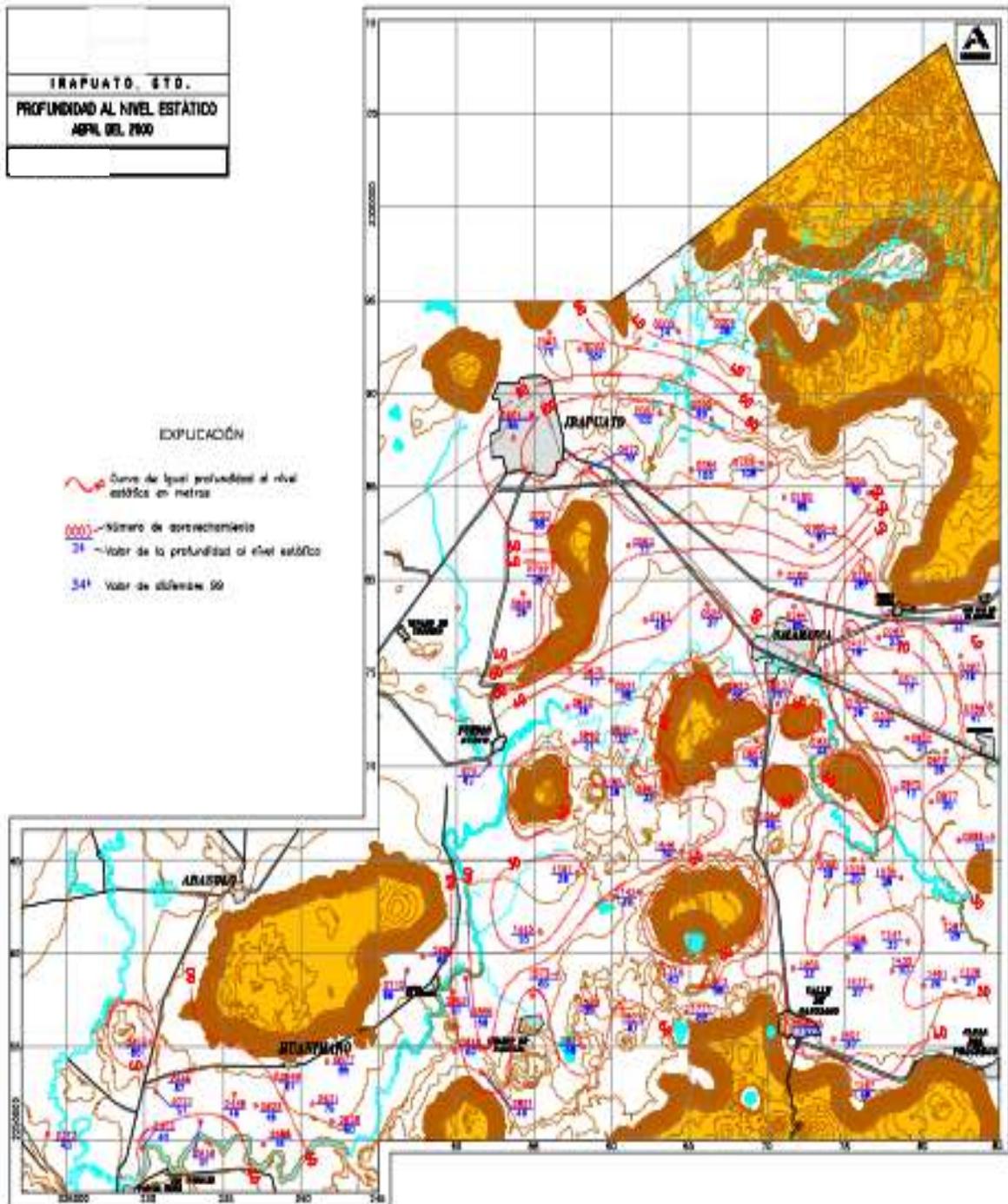


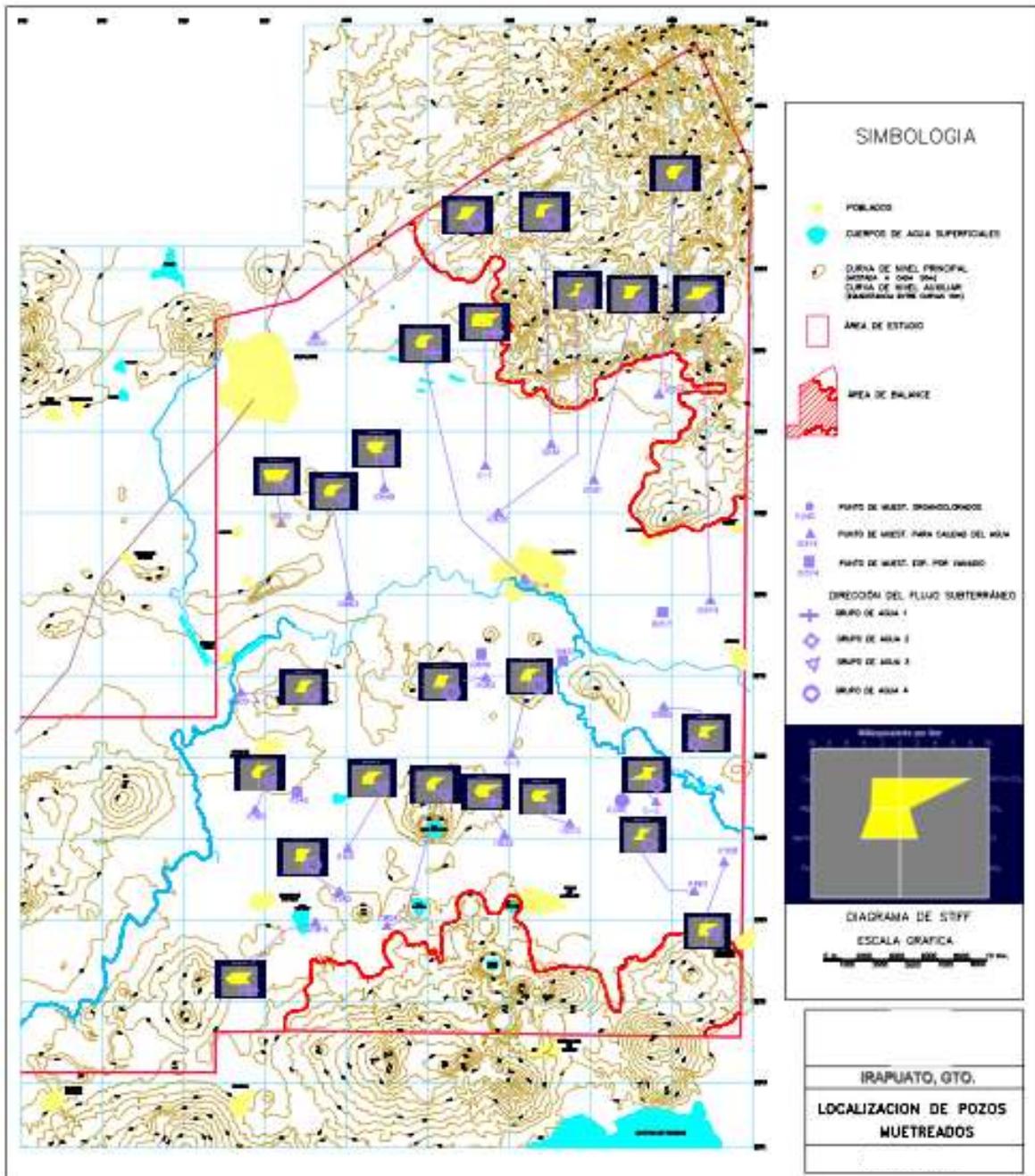
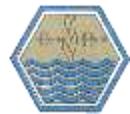
Celda para el cálculo
de balance











(*Información Lesser y Asociados, S.A. de C.V. – Comisión Estatal del Agua de Guanajuato)



ANEXO C

(EVENTOS HIDROMETEOROLÓGICOS EN MUNICIPIOS DENTRO DEL ACUÍFERO 1119 “IRAPUATO – VALLE”)

ABASOLO

- ❖ En el mes de Julio de 1976, debido a los derrames de las presas El Sauz y San Antonio, se colapsaron los bordos Los Arrieros, Los Sauces y La Recibidora, ocasionando la inundación de 12,000 hectáreas en los municipios de Abasolo y Manuel Doblado.
- ❖ En los meses de Julio y Agosto de 1996, afectando a las comunidades de La Carroza y El Tule, con 1000 y 600 habitantes, 100 y 200 viviendas, respectivamente; siendo la causa azolve en el cauce y falta de bordería en las márgenes.
- ❖ En los meses de Julio y Agosto de 2001, afectando a la comunidad Estación Abasolo, con 600 habitantes y 200 viviendas, siendo la causa azolve en el cauce y falta de bordería en las márgenes.
- ❖ Del 09 de Julio al 30 de Octubre de 2003, el municipio se vio afectado por precipitaciones intensas atípicas, a tal grado que hubo la necesidad de hacer la declaratoria de Desastre Natural, siendo un total de 45 comunidades, con 1,087 viviendas afectadas y 1, 143 familias evacuadas (5,300 habitantes), siendo la causa asolvamientos, sección hidráulica insuficiente, poca pendiente y dificultad de descarga del Río Turbio en la confluencia con el Río Lerma, cuando este último presenta tirantes elevados.

GUANAJUATO

- ❖ De 1704 a 1905, en 19 ocasiones la cabecera municipal ha sufrido de inundaciones, ya que en su origen se encuentra asentada y las prácticas inapropiadas de uso y abuso del río que atraviesa la población. Población localizada en una cañada de 4 km. aproximadamente, distancia contemplada de la presa de la Olla al jardín del Cantador, y los primeros asentamientos de casas y haciendas se situaron en las márgenes de este río, es decir, las paredes de las casas fueron mucho tiempo los bordes del mismo.
- ❖ El día 01 de julio de 1905, afectando a la cabecera municipal en la zona centro, siendo la causa una altura de 2 metros de nivel de aguas, ocasionado por el desbordamiento



de la Presa de San Renovato y la insuficiente capacidad hidráulica del túnel que la comunica con la Presa de la Olla.

- ❖ De 1704 a 1905, en 19 ocasiones la cabecera municipal ha sufrido de inundaciones, ya que en su origen se encuentra asentada y las prácticas inapropiadas de uso y abuso del río que atraviesa la población. Población localizada en una cañada de 4 km. aproximadamente, distancia contemplada de la presa de la Olla al jardín del Cantador, y los primeros asentamientos de casas y haciendas se situaron en las márgenes de este río, es decir, las paredes de las casas fueron mucho tiempo los bordes del mismo.
- ❖ El día 01 de julio de 1905, afectando a la cabecera municipal en la zona centro, siendo la causa una altura de 2 metros de nivel de aguas, ocasionado por el desbordamiento de la Presa de San Renovato y la insuficiente capacidad hidráulica del túnel que la comunica con la Presa de la Olla.

HUANÍMARO

- ❖ En la cabecera municipal se ubican dos zonas susceptibles de inundaciones fluviales por los escurrimientos de los cerros aledaños ubicados en la calle Arroyo sin afectación en la zona centro y en el Fraccionamiento Las Arboledas sin afectación en la salida a El Rodeo Michoacán.
- ❖ En los meses de septiembre y octubre de 2003, afecto las zonas de Cerrito de Aguirre, Cerrito Alto Viejo, El Durazno, Paso de Carretas, Rancho de Guadalupe, San Cristóbal y Zapote de Aguirre., con 90 viviendas afectadas, siendo la causa tener bajo nivel del bordo en el Río Lerma.

IRAPUATO

- ❖ Inundación en Agosto de 1973. Se originó en la subcuenca del Río La Llave, la causa que la motivó, fue la falla en serie de varios bordos, en particular el llamado Conejo I, a consecuencia de precipitaciones acumuladas durante quince días del orden de los 300 mm, que ocasionaron pérdida de vidas humanas y cuantiosos daños materiales en toda la ciudad.
- ❖ Inundación Río Guanajuato, en Julio de 1976. En el tramo Puente de las Américas - Presa Derivadora La Garrida, 6 km., aguas debajo de la estación Las Américas, el Río



Guanajuato se desbordó e inundó 600 Has., de los ejidos Márquez, La Calera y Gabino Vázquez, aguas arriba de la Derivadora La Garrida se rompieron bordos sobre la margen derecha, inundando zonas urbanas de los ejidos Copalillo y Arcos de la Garrida, así como zonas de cultivo por 800 Has., con tirantes de 1.50 m. comprendidos entre Río Guanajuato y Canal Tepalcates, el cual funciona como vaso regulador drenado por un sifón hacia el Canal Las Ardillas, siendo insuficiente por lo que se rompió el Canal Tepalcates, erosionando aproximadamente 2 km del mismo, posteriormente la ruptura de ambas márgenes del canal ocasionaron la inundación de los ejidos Arandas y Lo de Juárez, drenando esta agua hacia la ciudad en donde los tirantes alcanzaron hasta 1.20 m. Con un gasto de 500 metros cúbicos por segundo en la Estación Américas, más la aportación del Arroyo El Sauz, la Presa Derivadora La Garrida resultó inoperable.

- ❖ Tramo Presa Derivadora La Garrida - Cruce Autopistas Salamanca - Irapuato. A la altura del Puente Peatonal El Carrizalito, el Río Guanajuato socavó y erosionó el bordo, inundando su margen izquierda, 30 Has., de zona agrícola y a la altura de la colonia Morelos se desbordó por su margen izquierda afectándola.
- ❖ Tramo Autopista Salamanca - Irapuato - Ejido Tomelopitos. Por su margen derecha el Río Guanajuato se desbordó afectando los ejidos y comunidades de San Francisco, San Miguelito, Tlaxcalita, San José de Jorge López, Candelaria, San Juan de Retana, Purísima del Jardín, San José de Bernalejo, El Coecillo, El Carmen, La Sonaja, La Luz del Día, San Isidro de Borja, Santa Elena, Tomelópez y Tomelopitos ocasionando pérdidas considerables.
- ❖ Confluencia Río Guanajuato - Río Silao. Como consecuencia de un mayor tirante del Río Guanajuato se produjo un remanso sobre el Río Silao, inundando 200 Has., del ejido Venado de Yóstiro y Ampliación San Roque. A su paso por Yóstiro, el Río Guanajuato se desbordó por su margen izquierdo inundando partes bajas, drenando rápidamente a 300 mts., aguas debajo de este poblado, por su margen derecha inundaron 180 Has., del Ejido de Yóstiro.
- ❖ Inundación Río Guanajuato 1991. El 16 de Julio se registraron avenidas extraordinarias provenientes tanto del Arroyo El Zarco, afluente del Río Guanajuato cuya confluencia se ubica aguas arriba de la Presa Derivadora La Garrida, y del



Arroyo El Carrizalito aguas abajo. De esta presa propiciando primero debilitamiento del bordo a la altura del poblado Copalillo y segundo la ruptura del mismo pasando el cruce del Canal Irapuato con el Río Guanajuato junto a la colonia Las Carmelitas, inundando aproximadamente 300 Has., de Cultivo del Ejido San Roque y pequeñas propiedades.

- ❖ Inundación Río Guanajuato 1996. Durante la noche y madrugada de los días 5 y 6 de Septiembre, se registraron precipitaciones del orden de 42 mm. en las subcuencas altas de los Arroyos El Carrizalito y Santa Rita, afluentes del Río Guanajuato, los cuales confluyen aguas abajo de la Presa Derivadora La Garrida registrándose el gasto máximo estimado en el Río Guanajuato a la altura de la ciudad, de 140 m³/s. Siendo esta avenida la que provocó la ruptura del bordo de protección de la margen derecha a la altura de la Colonia San Roque inundándose 15 colonias aledañas, alcanzando una altura en las partes más bajas de 1.80 mts., para el día 8 de Septiembre se había drenado el 100% de las aguas que inundaron la zona Sur - Oriente de la ciudad, encausándose desde el principio de la contingencia hacia el canal lateral Irapuato y al Canal de aguas negras de la ciudad, descargando posteriormente estos al cauce del Río Silao.

JARAL DEL PROGRESO

- ❖ Inundaciones en el año de 1958 (Gasto Máximo registrado 785 m³/s). En Jaral del Progreso, se tuvo una inundación muy severa, resultando afectadas gran cantidad de hectáreas de terrenos agrícolas así como varias comunidades y la cabecera municipal, la comunidad más afectada fue Victoria de Cortazar ya que una parte del poblado está ubicada en una hondonada, algunas viviendas se inundaron con tirantes de hasta con 1.5 m, de altura, la población fue evacuada hacia el Cerro de la Gavia. Esta inundación fue provocada porque el Río Lerma se desbordó a la altura de la presa Derivadora Lomo de Toro; entonces toda la población se unió para trabajar por turnos y levantar rápidamente un bordo de más de 3 km de longitud y así evitar que se inundara toda la zona urbana; desde el 4 de septiembre inició el estado de alerta, siendo la etapa más crítica del 10 al 16 de septiembre; la carretera a Cortazar está recién construida y se



reventó en un tramo de 50 m para permitir el paso del agua, ya que estaba sirviendo como represa.

- ❖ Inundaciones en el año de 1967 (Gasto máximo registrado 323 m³/s). Algunos poblados y tierras de cultivo situados a la ribera del Río Lerma, resultaron con afectaciones parciales debido a desbordamientos del mismo.
- ❖ Inundaciones en el año de 1971 (Gasto máximo registrado 477 m³/s). Al igual que en las inundaciones de 1967, se afectaron por desbordamientos del Río Lerma poblados situados en sus riberas, al igual que tierras de cultivo aledañas, así como otras que se encuentran en partes bajas.
- ❖ Inundaciones en el año de 1973 (Gasto máximo registrado 498 m³/s). Durante éste año, se afectaron nuevamente las comunidades antes mencionadas.
- ❖ En su recorrido por el municipio recibe las aguas del Río Laborio, el Arroyo El Desagüe, El Lerma que a su vez proporciona agua para los terrenos laborables a través de canales, entre los que destacan: Antonio Coria, La Extracción, El Diezmo, El Padrón, Bajo Salamanca y Comunicaciones.

PUEBLO NUEVO

- ❖ El Municipio es cruzado del Noreste al Oeste por el canal de riego agrícola Alto Lerma, el cual en algunos puntos se encuentra dañado por el cruce de fallas geológicas o hundimientos regionales.
- ❖ Inundación Agosto de 1973. A consecuencia de problemas en la zona de Irapuato y a las fuertes lluvias, los Ríos Silao y Guanajuato registraron gastos extraordinarios, causando su desbordamiento en forma regional, ocasionando pérdidas de vidas humanas y cuantiosos daños materiales.
- ❖ Inundación Río Guanajuato en Junio 1976. Confluencia Río Guanajuato – Río Silao como consecuencia de un mayor tirante del Río Guanajuato, se produjo un remanso sobre el Río Silao, inundando 200 hectáreas del Ejido Venado de Yóstiro y ampliación San Roque. A su paso por Yóstiro, el Río Guanajuato se desbordó por su margen izquierda inundando partes bajas, drenando rápidamente a 300 m. agua abajo de este poblado, por su margen derecha inundó 180 hectáreas del Ejido de Yóstiro. En la confluencia con el Río Lerma, el Río Guanajuato produjo un remanso,



provocando desbordamientos por ambas márgenes inundando 50 hectáreas de Santa Eulalia y Pueblo Nuevo.

- ❖ Inundación Río Guanajuato 1991. El 16 de Julio se presentaron ligeras inundaciones en pequeñas propiedades.
- ❖ Inundación Río Guanajuato en 1996. Durante la noche y madrugada de los 5 y 6 de Septiembre, se registraron precipitaciones del orden de 42 mm. en las subcuencas altas de los arroyos, El Carrizalito y Santa Rita afluentes del Río Guanajuato, siendo esta avenida la que provocó inundaciones en la zona Sur riente de la ciudad de Irapuato y en la confluencia con el Río Silao inundando parte del Ejido de Yóstiro.
- ❖ Durante la temporada de lluvias y ciclones Tropicales 2003, el municipio se vio afectado por precipitaciones intensas atípicas, a tal grado que hubo la necesidad de hacer la declaratoria de Desastre Natural, siendo un total de 14 comunidades con 475 viviendas afectadas y 472 familias evacuadas.

SALAMANCA

- ❖ En el año 1888 a partir del 19 de Junio de ese año, se presentó la inundación más catastrófica registrada durante ese siglo, desbordándose tanto el Río Grande (Lerma) así como el arroyo de San Antonio al inundarse prácticamente todo el Bajío de Guanajuato, quedando incomunicadas la mayoría de poblaciones existentes. Llamándole los pobladores “El Diluvio del Bajío”.
- ❖ Ya en el siglo XXI el año de 2003, año en que la ciudad celebró sus 400 años de fundación, también se vio impactada por una inundación que afectó gravemente a sus pobladores. El sábado 6 de septiembre dio inicio la pesadilla con una lluvia torrencial que algunos catalogaron de Tromba y la cual aunada a fuertes precipitaciones en la región y aguas arriba del Río Lerma mantuvieron copada a la ciudad por 2 semanas, las afectaciones se presentaron en más áreas por el crecimiento demográfico que para entonces tenía la cabecera Municipal.
- ❖ La continuidad de la lluvia, y los desbordamientos de canales drenes y zonas de retención, crean severos daños a el área rural y en algunos casos el derrumbe de construcciones de adobe o muy antiguas, lo que provoca severas preocupaciones tanto en las autoridades como en la ciudadanía. Las colonias o asentamientos afectados va



en aumento por lo que las autoridades, ya en sesión permanente del Consejo Municipal de Protección Civil, van incrementando el número de albergues con lo que la participación conjunta de diferentes instancias tanto del sector privado como del público, permiten que la ciudadanía afectada, reciba ayuda pronta y expedita. El Ejército Mexicano, La Benemérita Cruz Roja, los H. Bomberos, Protección Civil, el grupo SAMI, Clubes de Servicio, Escuelas, organizaciones brindan su apoyo a los afectados. Por el nivel alcanzado Las afectaciones fueron de diversa índole, en casas habitación las construcciones, muebles, enseres.

- ❖ En las vías de comunicación se presentó también, la carretera libre Salamanca – Irapuato, quedo cubierta al desbordarse el canal 20 a la altura de la Charca. Esta inundación dejo claros ejemplos de la fuerza incontenible del agua, cuando bien por fuertes precipitaciones o por desbordamientos de ríos y canales, las áreas potencialmente afectables sufren severos daños, así mismo dejo clara respuesta de la ciudadanía, los grupos de apoyo y la autoridad, que unidos pueden lograr minimizar los impactos de un Agente Destructor. La integración de 10 albergues donde recibieron apoyo más de 700 personas, sin contar aquellas que se albergaron con amigos y familiares. Un total de más de 32,000 personas afectadas, 6,500 viviendas con daños, 100 escuelas afectadas, más de 500 pobladores rurales resultaron afectados.
- ❖ Las colonias que sufrieron el impacto fueron entre otras: Constituyentes, El Pitayo, Reforma, Insurgentes, Las Estancias, El Divisador, Infonavit II, La Herradura, Ampliación Los Sauces, San Pedro, Insurgentes 4, La Cruz 4, Ampliación Bellavista, Aztlán, Frac. El Parque, Guanajuato, San Javier, El Rocío, Las Reynas, 1910, La Luz, El Edén, La Gloria; Así como las comunidades: Los Ramírez, Loma de San Antonio, La Capilla, Ventanilla, San Manuel de Valderrama, Los Sotos, San Bernardo, La Noria de San Bernardo, Puerto de Rojas, Cerro Blanco, Puerto de Guadalupe, Los Negrete, Los Zavala, Ojo de Agua y Puerto de Valle.

SAN MIGUEL DE ALLENDE

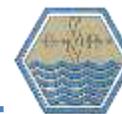
- ❖ Se tiene conocimiento de las primeras inundaciones dentro de la ciudad, siendo el Arroyo de Las Cachinches que en 1894 se desbordó, inundando la zona de lo que es



hoy Calzada de la Luz, Avenida Guadalupe, Calzada a la Estación, posteriormente éstas se repiten en 1933, 1973 y 1998, esta última con mayor fuerza ya que el cauce fue afectado por la invasión de calles y fincas. En el día 09 de septiembre de 1967 (Gasto máximo registrado $574 \text{ m}^3/\text{s}$), el Río Laja se desbordo a 14 Km. aguas abajo de la Presa Ignacio Allende por su margen izquierda, inundando 36 has de tierras de cultivo. En los años de 1933, 1973 y 1998, esta última con mayor fuerza ya que el cauce fue afectado por la invasión de calles y fincas, registrando 10 lesionados y 3 muertes, siendo el Arroyo de las Cachinches el que se desbordo.

SANTA CRUZ DE JUVENTINO ROSAS

- ❖ ARROYO JARALILLO, El desbordamiento del Arroyo Jaralillo provoca inundaciones en las Colonias Río Grande, San José y El puente con regularidad en cada temporada de lluvias, afectaciones de 10 ha, aproximadamente.
- ❖ Tramo carretero estatal km1 J. Rosas – Celaya: Cada año en temporada de lluvias, hay encharcamiento por las bajadas del Arroyo El Jaralillo.
- ❖ Tramo carretera estatal km 1 Juventino Rosas – Celaya (gasolinera): Encharcamiento de agua por el Arroyo Jaralillo.
- ❖ Afectando a las Colonias: Nueva, Santa Cruz, Arboledas, Unión de Allende y Josefina Villa; Nivel de agua de 60 a 70 cm aproximadamente; Colonias La Luz 1 y 2, únicamente encharcamiento.
- ❖ Tramo carretero km 1 carretera a Villagrán: En el puente denominado El Conde, encharcamiento por desbordamiento del Arroyo El Jaralillo.
- ❖ ARROYO PIEDRAS ANCHAS, Colonia Agrarismo: Desbordamiento del Arroyo Piedras Anchas, 6 hectáreas aproximadamente de afectación. El nivel de agua es de 60 cm. aproximadamente cada temporada de lluvias.
- ❖ Colonia Lindavista: Afectación a toda la colonia por los desbordamientos de los Arroyos Piedras Anchas en cada temporada de lluvias.
- ❖ Comunidad San Nicolás: Desbordamiento del Arroyo Piedras Anchas, afectación a toda la comunidad con un nivel de agua de 60 cm. en temporada de lluvias.
- ❖ Colonia la Galeana: Desbordamiento del Arroyo Piedras Anchas, 15 calles afectadas, nivel de agua 60 cm. en temporada de lluvias.



- ❖ Comunidad Santa María de Guadalupe: Se inunda de 30 a 70 cm. toda la comunidad por bajada de agua de los cerros de la parte Norte del municipio, a través del Arroyo Piedras Anchas.
- ❖ La zona centro de la ciudad: Se inunda, por insuficiencia del drenaje con precipitación pluvial normal, afectando la zona comprendida de las calles Emiliano Zapata, Isabel la Católica, Rayón y Zapata. Las aguas fluviales salen de la mancha urbana y llegan a una caja de agua ubicada por el libramiento carretero, lado Suroeste de la cabecera municipal en cada temporada de lluvias.
- ❖ Comunidad San Julián: Desbordamiento de canales de riego en temporada de lluvias.
- ❖ Comunidades Franco, Tavera, Casa Blanca y La Esperanza: Esguimientos por laderas de los cerros ubicados por el norponiente, el agua afecta con un nivel de 80 cm. aproximadamente cada año.

VALLE DE SANTIAGO

- ❖ En el año de 1972, afectando la zona Norte del Municipio en las siguientes comunidades; Rincón de Alonso, Gachupina, San José de Brazo, La Isla, Pitayo, El Alto de Altamira, El Cuatro de Altamira, Lobos, Noria de Mozqueda, Paso Blanco, Los Duranes, Cerro Prieto y Purísima del Sauz.
- ❖ El 6 de agosto de 1998 se desbordo el Arroyo Camémbaro por alta precipitación pluvial en la zona Suroeste del Municipio afectando la Zona Centro y las colonias de: Labradores, Camémbaro, Atlántida, Hacienda Santiago y La Gallega, hubo 255 personas damnificadas. El nivel de agua fue de 85 cm. aproximadamente. Ahora el canal cuenta con asentamientos irregulares por ambos lados del bordo y en algunas partes se reduce su cauce, la problemática física que se observa en el arroyo es la falta de desazolve en toda su trayectoria y la regeneración de sus bordos de contención.
- ❖ En el año de 2003, afectando la zona Norte del Municipio en las siguientes comunidades; Rincón de Alonso, Gachupina, San José de Brazo, La Isla, Pitayo, El Alto de Altamira, El Cuatro de Altamira, Lobos, Noria de Mozqueda, Paso Blanco, Los Duranes, Cerro Prieto y Purísima del Sauz, un total de 42 comunidades con 272 viviendas afectadas y 224 familias evacuadas.



VILLAGRÁN

- ❖ Zonas vulnerables de inundaciones: En el día 9 de Septiembre de 1967 (gasto máximo registrado 574 m³/s), Frente a la ciudad de Villagrán se desbordó por ambas márgenes, inundando por la derecha la ciudad y 120 hectáreas de cultivos, por la margen izquierda se afectaron 40 hectáreas de los ejidos Vista Hermosa y Santa Teresa, a la altura de la zona habitacional del Campo Militar Sarabia, se desbordó por ambas márgenes e inundó 47 casas de la Comunidad de Puente de Guadalupe y 70 hectáreas de cultivos diversos. Sobre la Comunidad de Sarabia se desbordó por ambas márgenes inundando 215 casas de los poblados de Sarabia y Mexicanos.
- ❖ En el día 16 de Octubre 1967(gasto máximo registrado 250 m³/s), A la altura de Villagrán se desbordó por su margen derecha inundando 25 hectáreas de cultivos, sobre la Comunidad de Puente de Guadalupe por su margen izquierda inundando 31 casas, 15 hectáreas de cultivo y parte de la Zona Militar de Sarabia frente a la Comunidad de Sarabia por su margen derecha inundando 60 hectáreas de cultivos pertenecientes al poblado Mexicanos.
- ❖ En el día 29 de Junio de 1971 (gasto máximo registrado 395 m³/s), A la altura del poblado de Puente de Guadalupe se desbordó por la margen izquierda e inundó 38 casas, 25 hectáreas de cultivo y parte de la Zona Militar de Sarabia, en la Comunidad de Sarabia inundó 112 hectáreas y 20 casas pertenecientes al Rancho de Perico de Razos.
- ❖ En el día 16 de Septiembre de 1973 (gasto máximo registrado 423 m³/s), A la altura de Villagrán se desbordó e inundó 100 hectáreas de cultivos y la Hacienda de Vista Hermosa, en Puente de Guadalupe por su margen izquierda inundó 42 casas, así como parte de la zona habitacional de los militares de Sarabia y 30 hectáreas de cultivos; a la altura de la Comunidad de Sarabia y Congregación de Mexicanos se desbordó por ambas márgenes inundando 195 hectáreas de cultivos y el 8 % de la zona habitacional de Sarabia.
- ❖ En el día 9 de Abril de 1999 hubo un encharcamiento en la Comunidad El Chinaco y Los Ángeles nivel de agua 15 cm. aproximadamente. Afectación ninguna.
- ❖ Zonas vulnerables de inundaciones, Calle Morelos Pte., entre calle Pípila y calle 16 de Septiembre nivel de agua de 20 a 30 cm. aprox., Calle Morelos Pte., entre calle



Cuahtémoc y Boulevard Poniente, nivel de agua de 30 cm. a 1 mt. , Calle Morelos esq. Blvd. Poniente y camino a Suchitlan. Nivel de agua 1mt., cada año, Calle Morelos Ote., esquina 5 de Mayo, nivel de agua 50 cm. aprox.

- ❖ Durante la temporada de lluvias y ciclones Tropicales 2003, el municipio se vio afectado por precipitaciones intensas atípicas, a tal grado que hubo la necesidad de hacer la declaratoria de Desastre Natural, siendo un total de 4 comunidades con 266 viviendas afectadas y 443 familias evacuadas.
- ❖ Heladas: Son esporádicas, donde hay más afectación es la zona rural, en los tiempos de heladas que pueden ser de Noviembre a Enero.
- ❖ Sequías: En los últimos 10 años se han presentado, siendo severas en las zonas rurales afectando a la agricultura, ganadería y el medio ambiente facilitando los incendios de pastizales.

YURIRIA

- ❖ Zonas vulnerables de inundaciones: Cabecera Municipal: Calle Villafuerte, Calle Chinampas, Calle Fray Miguel F. Zavala, Calle Fernando Núñez, Calle 5 de Mayo, Boulevard 5 de Mayo, Calle Tomás Moreno, Calle de la Salud, Calle Mina, Calle Marinero. Comunidades: San Francisco de la Cruz, Ochomitas, Xoconoxtle, Monte de los Juárez, La Faja, San José de Gracia, El Tigre, San Vicente Ciénega.
- ❖ Desbordamientos, El Canal de la Ciénega Prieta. Durante la temporada de lluvias y ciclones Tropicales 2003, el municipio se vio afectado por precipitaciones intensas atípicas, a tal grado que hubo la necesidad de hacer la declaratoria de Desastre Natural, siendo un total de 4 comunidades con 720 viviendas afectadas y 515 familias evacuadas.
- ❖ Heladas: Comunidades vulnerables: Ciénega Prieta, San José, San Francisco, El Timbinal, Córdoba, El Bosque, Jerécuaro.



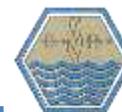
ANEXO D

VOLÚMENES DE AGUA EN SECTORES DEL ESTADO DE GUANAJUATO (MILLONES DE M³)			
MUNICIPIOS	SECTOR AGROPECUARIO	SECTOR PÚBLICO-URBANO	SECTOR INDUSTRIAL
Abasolo	130 688 811.20	6 787 066.73	347 993.30
Acámbaro	71 148 426.40	9 239 715.06	60 206.00
Apaseo el Alto	21 932 381.00	4 941 093.16	2 000.00
Apaseo el Grande	58 418 244.50	5 376 166.86	1 279 380.00
Atarjea	0.00	60 653.82	0.00
Celaya	94 057 867.06	49 643 012.55	5 461 119.98
Comonfort	19 444 936.73	2 360 553.17	64 136.00
Coroneo	1 215 837.00	762 933.12	0.00
Cortázar	57 577 943.34	4 915 367.67	383 488.00
Cuerámara	27 506 634.80	692 108.01	0.00
Doctor Mora	24 263 771.20	1 014 606.00	0.00
Dolores Hidalgo Cuna de la Independencia Nacional	128 205 325.16	10 012 051.62	2 680.00
Guanajuato	2 621 091.20	19 136 130.91	513 760.00
Huanímaro	25 866 988.00	1 465 847.59	0.00
Irapuato	122 578 644.87	54 432 285.20	5 233 165.10
Jaral del Progreso	38 014 495.20	3 636 404.07	80 000.00
Jerécuaro	9 515 068.00	2 287 907.70	0.00
León	91 376 258.75	227 771 016.01	4 402 280.41
Manuel Doblado	47 536 180.60	3 079 880.19	0.00
Moroleón	514 026.20	5 424 458.19	126 860.00
Ocampo	12 000.00	1 592 043.81	0.00
Pénjamo	153 373 334.90	6 786 686.27	271 655.00
Pueblo Nuevo	5 208 765.40	1 221 755.70	0.00
Purísima del Rincón	41 145 778.00	1 771 625.24	396 631.00
Romita	56 545 985.86	4 119 846.30	54 000.00
Salamanca	105 416 839.17	39 004 903.74	30 495 389.00
Salvatierra	56 846 623.40	7 098 329.58	60 000.00
San Diego de la Unión	26 741 051.20	3 300 270.25	0.00
San Felipe	65 620 923.00	5 530 723.58	0.00
San Francisco del Rincón	55 957 583.39	9 558 221.23	96 460.00
San José Iturbide	41 870 395.80	4 074 059.06	4 796 817.00
San Luis de la Paz	90 501 996.00	6 273 614.33	245 600.00
San Miguel de Allende	79 444 085.55	13 445 127.60	210 966.00
Santa Catarina	0.00	355 394.62	0.00
Santa Cruz de Juventino Rosas	43 170 190.61	4 775 116.14	510 000.00



VOLÚMENES DE AGUA EN SECTORES DEL ESTADO DE GUANAJUATO (MILLONES DE M ³)			
MUNICIPIOS	SECTOR AGROPECUARIO	SECTOR PÚBLICO-URBANO	SECTOR INDUSTRIAL
Santiago Maravatío	5 782 196.00	375 780.19	2 000.00
Silao	59 763 014.28	11 929 752.74	1 600 677.00
Tarandacuao	10 847 630.37	1 160 845.63	0.00
Tarimoro	27 248 546.13	2 010 993.28	0.00
Tierra Blanca	152 995.00	536 615.44	0.00
Uriangato	1 396 458.00	5 353 327.44	0.00
Valle de Santiago	126 161 752.20	6 456 145.90	1 128.00
Victoria	2 010 533.00	1 013 357.13	0.00
Villagrán	52 745 850.20	3 319 564.44	3 380 533.00
Xichú	0.00	0.00	0.00
Yuriria	38 308 641.16	3 459 200.11	34 779.00
TOTAL	2 118 756 099.83	557 562 557.38	60 113 703.79

Fuente: CEAG – CONAGUA, 2013.



Cuadro 20. Niveles de Procesamiento de Imágenes RapidEye

NIVEL	DESCRIPCIÓN
1B	Producto Basic RapidEye – Imágenes con correcciones radiométricas y de sensor aplicadas. El posicionamiento y efemérides son aplicados a los datos a bordo del satélite.
3A	Producto Ortho RapidEye – Imágenes con correcciones radiométricas y de sensor aplicadas. La precisión geométrica de los productos depende de la calidad de los datos de control (GCPs) y DEM utilizados. Los productos son procesados individualmente como tiles de 25 km por 25 km.
3B	Producto RapidEye Ortho Take – Imágenes ortorrectificadas derivadas de Image Takes.

Fuente: RapidEye, 2015.

De esta manera, y dependiendo del nivel de las imágenes, el tipo de postprocesamiento varía de un tipo de imagen a otro. Para este caso, se utilizaron imágenes de Nivel 3A.

Imagen RapidEye Nivel 3A: Son imágenes ortorrectificadas con un tamaño de 25 km por 25 km, las cuales están pensadas para una gran variedad de aplicaciones que requieren imágenes con una geolocalización precisa y proyección cartográfica. Los datos están procesados para eliminar distorsiones causadas por el terreno y pueden ser utilizados para numerosos usos cartográficos. Este tipo de imágenes está corregido radiométricamente, a nivel de sensor, geoméricamente y referenciados a una proyección cartográfica. La corrección geométrica utiliza DEM's con un paso de malla de entre 30 y 90 metros.

Imagen RapidEye Nivel 3A: Este productor amplía la utilidad de las imágenes RapidEye para cubrir áreas extensas mediante el uso de images takes completos que son ajustados conjuntamente, reduciendo así el número final de archivos. El producto está corregido radiométricamente, a nivel de sensor, geoméricamente y referenciados a una proyección cartográfica. La corrección geométrica utiliza DEMs con un paso de malla de entre 30 y 90 metros. Para la generación de cada imagen de cada imagen se utilizan puntos de control (GCPs). Par cubrir el área de interés pueden ser necesarias varias imágenes, las cuales son ajustadas en bloque antes de su ortorrectificación. Las imágenes resultantes son producidas y entregadas en archivos separados sin implicar ningún tipo de operación de mosaico y ajuste

de colores.

Una vez que se obtuvieron las imágenes, se procede a verificar si estas cubren la totalidad de la superficie bajo estudio.

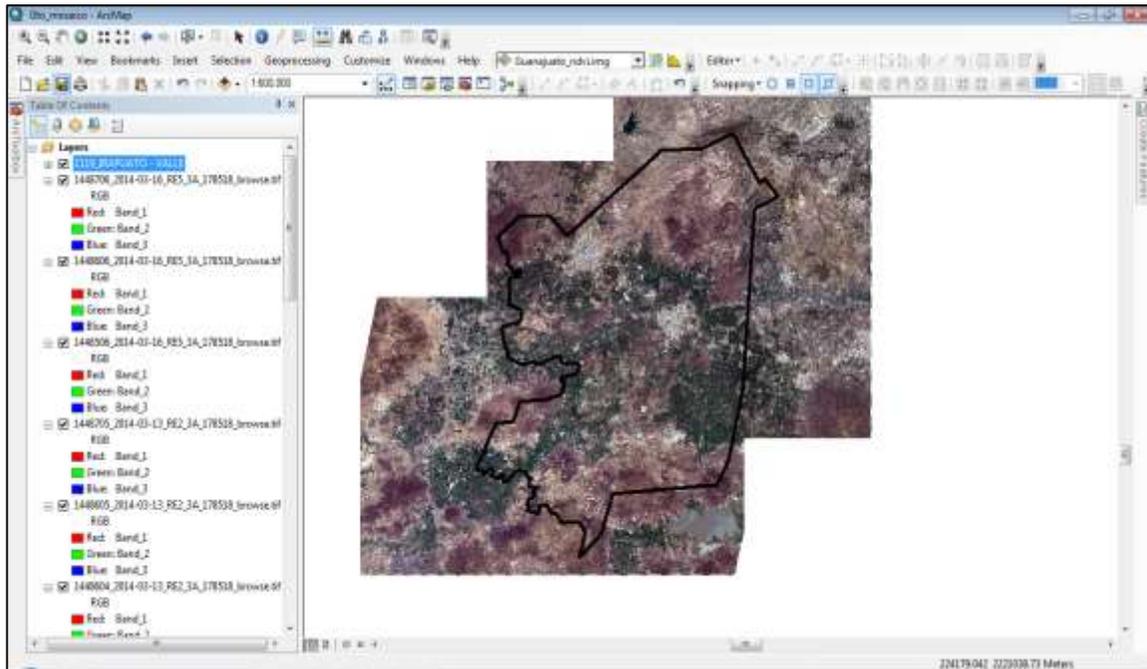


Figura 62. Comprobación de cobertura de superficie de acuífero Irapuato-Valle con imágenes RapidEye

Una vez que se tiene cubierta toda la zona de estudio se procede a realizar algunas correcciones a cada una de las imágenes, dependiendo de las necesidades del estudio.

2) *Procesamiento de Imágenes de Satélite*

Dada la naturaleza compleja del procesamiento de imágenes satelitales, se emplea el software ERDAS IMAGINE, ya que éste cuenta con las herramientas más avanzadas de análisis de imágenes y modelado espacial para la generación de nueva información. Uno de los requerimientos propios del software, es que requiere de imágenes de formato *.img, por lo que el procesamiento inicia con una transformación de formato de imagen, de TIFF a IMG.

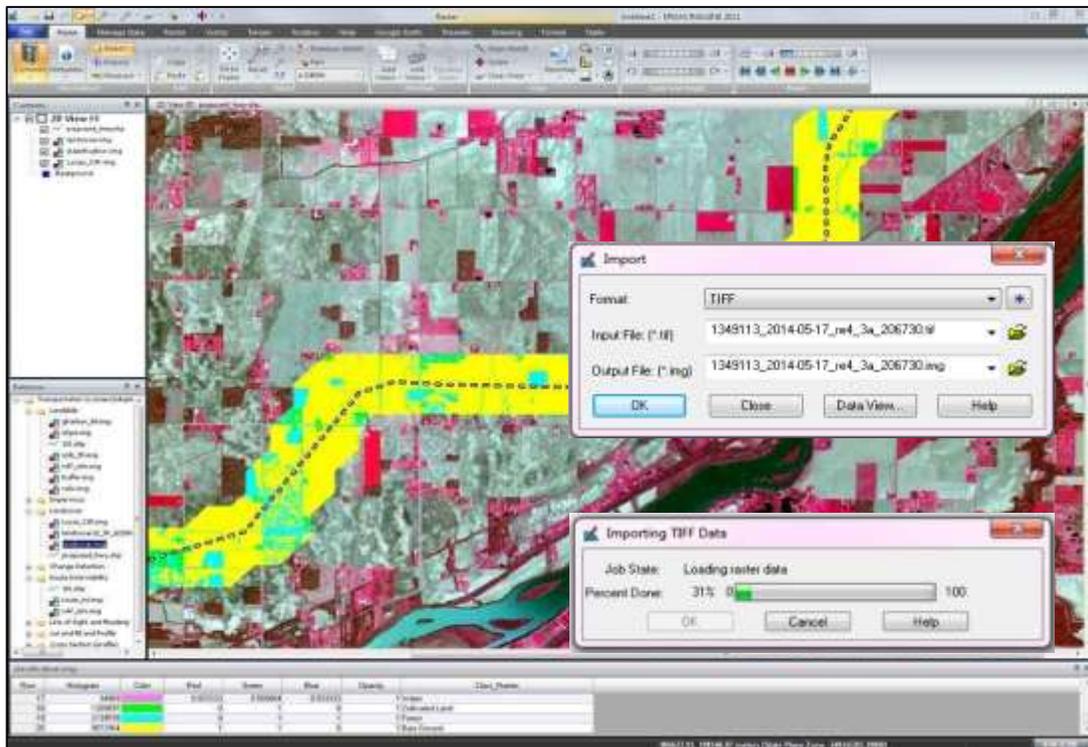


Figura 63. Procesamiento de imágenes de satélite con Erdas Imagine 2011

3) Transformación de radiancia a reflectancia

El siguiente paso fue la transformación de los datos de la imagen de radiancia a reflectancia, utilizando las ecuaciones descritas anteriormente, para ello se hizo el cálculo de la constante de ajuste a utilizar para cada una de las bandas que componen a cada imagen. En la siguiente figura muestra una hoja de cálculo que se utilizó para calcular las constantes para el modelo a utilizar.

DETERMINACIÓN DE LOS VALORES DE LAS CONSTANTES PARA EL CÁLCULO DE REFLECTANCIA			
DATOS DE ENTRADA			
Fecha de la Imagen	13/05/2014		
Illumination/ElevationAngle (SunZenith)	84.87	El valor del Metadato:	
VALORES DE IRRADIANCIA ESDATMOSFÉRICA (E₀)			
EA:			
Azul	1997.8	W/m ² /m	
Verde	1893.5	W/m ² /m	
Rojo	1568.4	W/m ² /m	
Borde rojo	539	W/m ² /m	
Infrarrojo cercano	1124.4	W/m ² /m	
RESULTADOS			
adquisición día	136	Día Juliano	
EARTHSDISTANCE	1.01828274		
Constantes para el Modelo en Erdas			
Azul	0.001613	0.0016130	
Verde	0.001725	0.0017254	
Rojo	0.002465	0.0024654	
Borde rojo	0.002310	0.0023100	
Infrarrojo cercano	0.002862	0.0028620	

Figura 64. Hojas de Cálculo para transformación de radiancia a reflectancia

Como se indicó anteriormente, se procesa banda por banda, por lo que se genera un modelo que permite separar las bandas de una imagen satelital (solo para RapidEye), aplicar las ecuaciones a cada una de las bandas (con la alimentación de los valores de las constantes previamente calculadas) y posteriormente volviera a unir todas las bandas en una sola imagen. La figura siguiente muestra el modelo que se utilizó para el procesamiento de las imágenes.

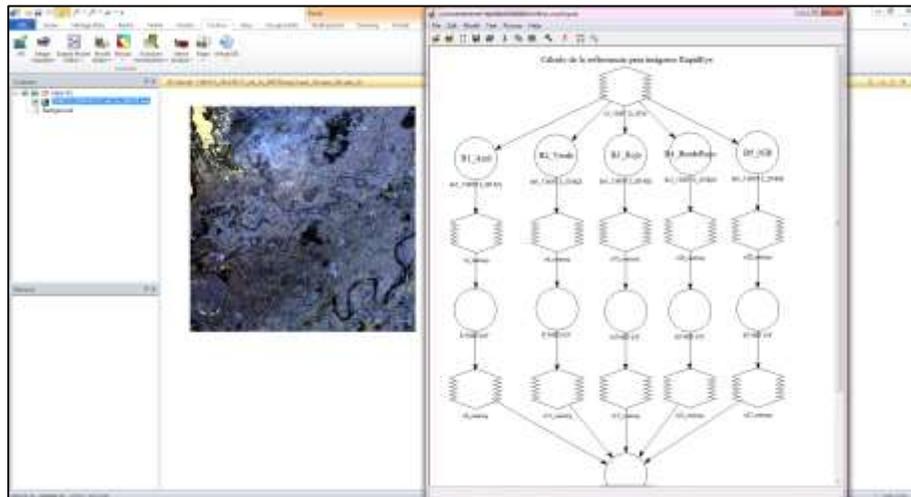


Figura 65. Modelo para conversión de radiancia a reflectancia

El resultado final de este paso se muestra en la siguiente imagen; en la cual se aprecia que con el procedimiento anterior, existe una mejoría con respecto de las imágenes obtenidas originalmente, en las cuales existían diferencias de tonalidad debido a que las mismas se toman en diferentes horarios y condiciones.

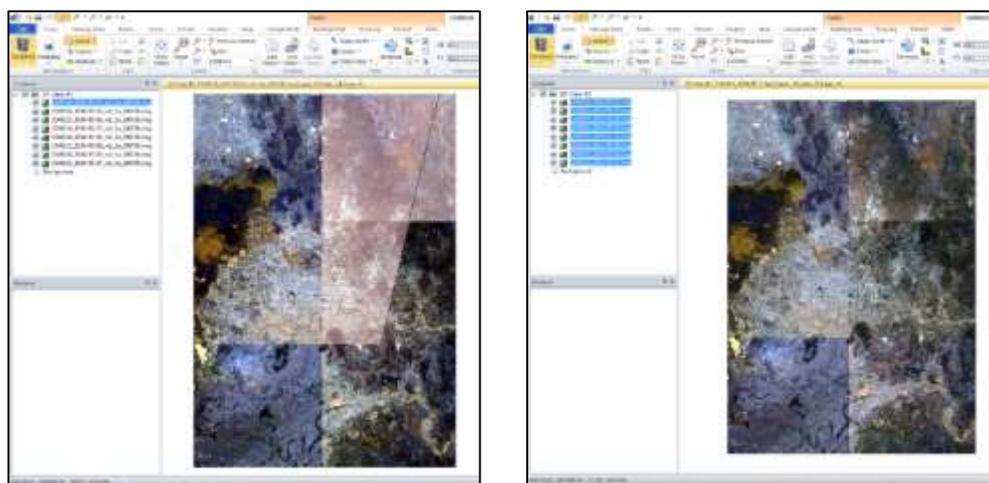


Figura 66. Diferencias entre imágenes con corrección por radiancia – reflectancia

4) *Corrección atmosférica*

Finalmente y una vez calculada la reflectancia se procede a llevar a cabo una corrección atmosférica por el método de sustracción de objetos oscuros (DOS por sus siglas en ingles), para aplicar este método se parte del supuesto de que muy pocos objetos en la superficie de la Tierra son negro absoluto, por lo que se asume un 2 por ciento (2%) de reflectancia mínima.

Para llevar a cabo este método, se consultan las estadísticas de cada una de las bandas de imagen y se computan los valores mínimos existentes, posteriormente se lleva a cabo un ajuste a través de un modelo en ERDAS de tal manera que el valor mínimo en reflectancia resulte en un 2%. Para aplicar esta corrección también es necesaria la generación de un modelo que nos permita llevar a cabo los procedimientos de corrección.

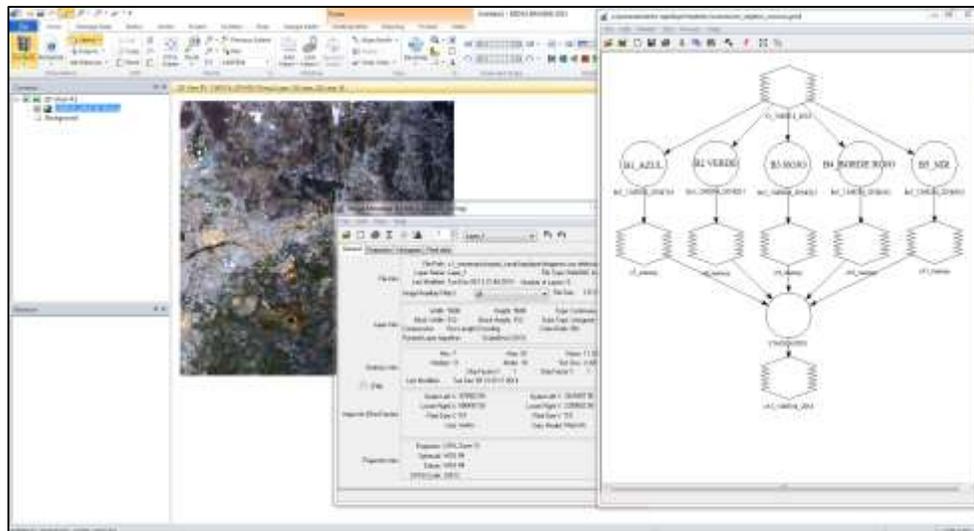


Figura 67. Modelo para corrección atmosférica en imágenes de Satélite

5) *Elaboración de mosaico a partir de las imágenes corregidas*

Hasta este punto existen ya todas las imágenes procesadas y corregidas, pero aún se encuentran separadas por lo que el paso final es la elaboración de un mosaico a partir de dichas imágenes. La siguiente imagen muestra desde el procedimiento inicial para la elaboración de un mosaico y algunos de los resultados previos a obtener la imagen final.

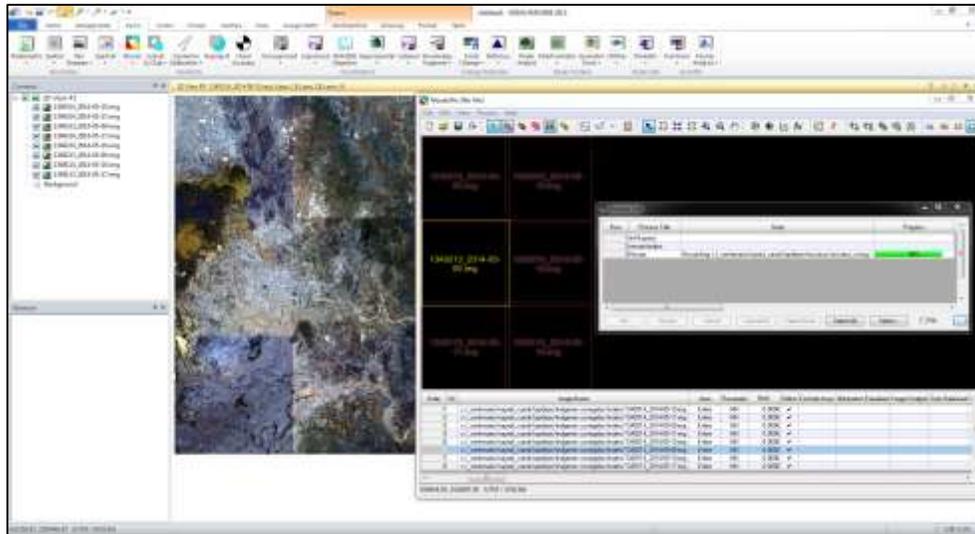


Figura 68. Procesamiento de Mosaico en Erdas Imagine 2011

Algunas veces existen diferencias entre las mismas pues no se tomaron el mismo día ni a la misma hora; por lo que para obtener un mosaico con una tonalidad lo más homogénea posible se llevan a cabo la corrida de varios algoritmos hasta obtener el producto deseado. Con cada nuevo proceso para la creación del mosaico, se utilizaran diferentes herramientas como balance de colores, igualación de los histogramas de cada imagen, modificación de las líneas de intersección de las imágenes, variaciones en el remuestreo de las imágenes, etc. Desde luego cada nuevo proceso que se utiliza implica el uso de ecuaciones complejas.



Figura 69. Diferentes Mosaicos utilizando diferentes algoritmos de cálculo.

Finalmente se obtiene una imagen, con características deseables para el manejo, análisis e interpretación de la información; como puede verse en la siguiente figura.



Figura 70. Mosaico Final de la Zona de Estudio

6) Obtención de Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI)

El índice diferencial de vegetación normalizado (NDVI) es un índice normalizado que le permite generar una imagen que muestra el “verdor” (la biomasa relativa). Este índice aprovecha el contraste de las características de dos bandas de un dataset ráster multiespectral: las absorciones de pigmento de clorofila en la banda roja y la alta reflectividad de los materiales de las plantas en la banda cercana al infrarrojo (NIR).

El NDVI se utiliza en todo el mundo para hacer un seguimiento de las sequías, supervisar y predecir la producción agrícola, ayudar en la predicción de las zonas con riesgo de incendio y cartografiar la desertización. El NDVI es muy utilizado en el seguimiento de la vegetación global porque ayuda a compensar los cambios en las condiciones de iluminación, la pendiente de la superficie, la orientación y otros factores extraños (Lillesand 2004).

El índice de vegetación NDVI en ArcGis se calcula con las Bandas 3 y 4 de una imagen y para ello se utiliza la siguiente ecuación:



$$NDVI = \frac{B4 - B3}{B4 + B3} \quad (24)$$

Donde

B4 = Banda 4 de la imagen

B3 = Banda 3 de la imagen

En este caso se utilizará una imagen RapidEye de la zona correspondiente al acuífero Irapuato – Valle. A continuación se muestran los pasos para obtener una imagen analizada con NDVI en ArcGis:

Paso 1. Damos clic en Spatial Analyst seguido de **Raster Calculator...**

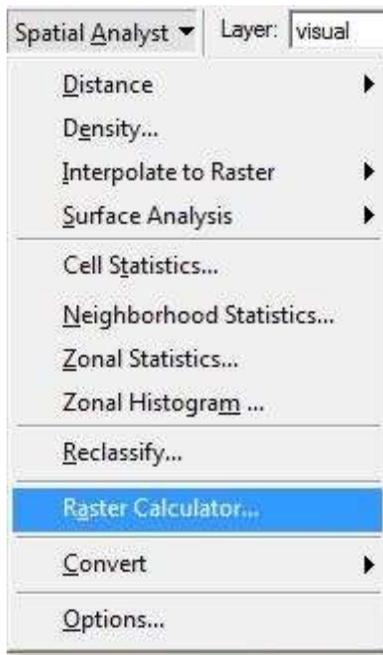


Figura 71. Menú Spatial Analyst de ArcGis

En la ventana que nos aparece agregamos las capas correspondientes de acuerdo a la siguiente ecuación:

$NDVI = \text{Float}([B4] - [B3]) / \text{Float}([B4] + [B3])$, el operador Float, en la ecuación, se utiliza para que el resultado de la operación sea punto flotante. Si se omite Float el resultado final va ser entero (cero y uno), lo cual es incorrecto para calcular este índice de vegetación.



Figura 72. Ventana Raster Calculator - ArcGis

Damos clic en el botón Evaluate y el resultado obtenido es una imagen NDVI clasificada en escala de grises.

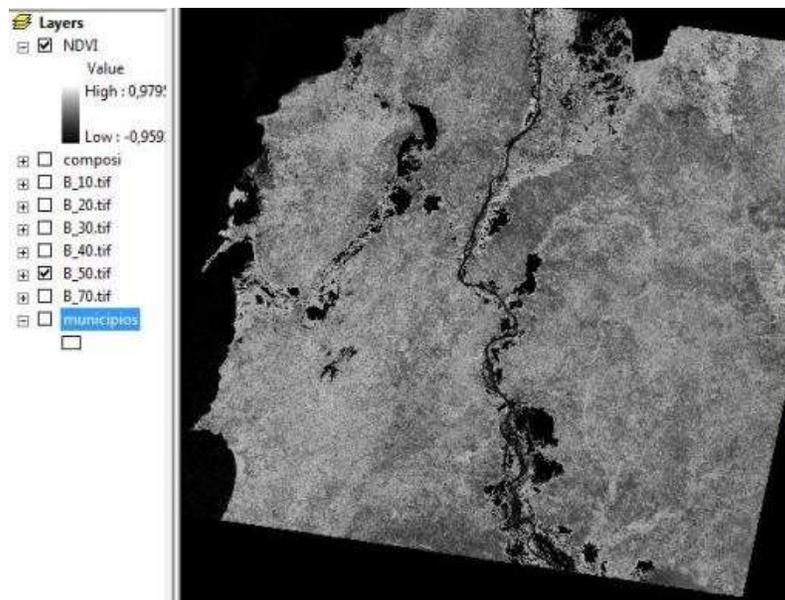


Figura 73. Imagen NDVI en escala de grises

Paso 2. Para que el trabajo de analizar e identificar las zonas cultivadas en la imagen, se cambia el color de la imagen, resultando lo siguiente:

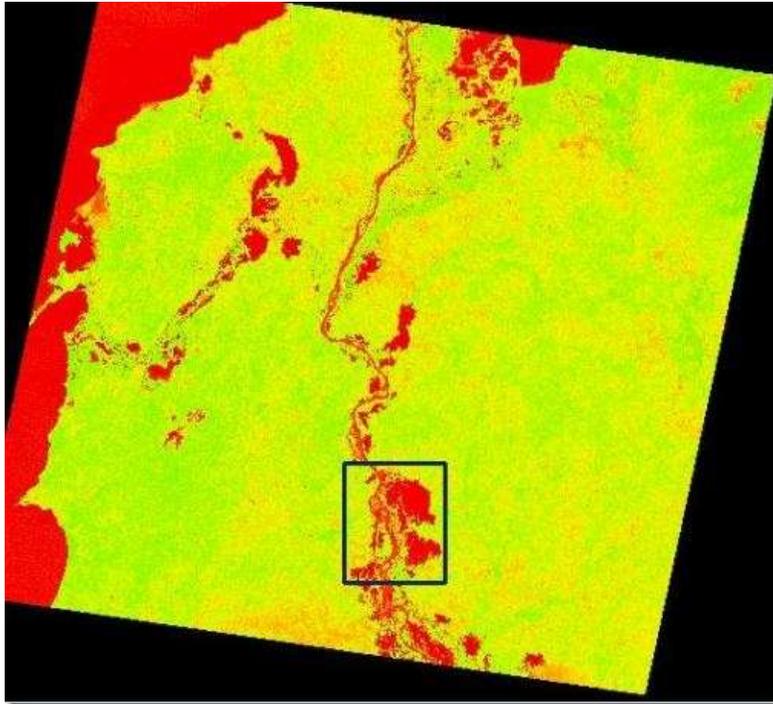


Figura 74. Imagen NDVI con nueva coloración

Dependiendo de la clasificación mediante los colores que se deseen, se obtienen diferentes tonalidades, identificándose diferentes características de acuerdo con cada imagen.

Paso 3. Para el presente estudio no requerimos de una reclasificación; por lo que el procesamiento de la información se termina en este punto.

Paso 4. Una vez que se tiene la imagen NDVI con una coloración que permita identificar plenamente las zonas cultivadas o áreas verdes, se procede a montar la imagen, junto con los archivos vectoriales de parcelas tanto de distritos como de unidades de riego.

Realizando lo anterior, se puede obtener la superficie que no se encuentra inventariada, pero que consume volúmenes de agua fuera de las normas y reglas establecidas, así como de los derechos de concesión establecidos.



Figura 75. Uso de NDVI, para cuantificación de superficie agrícola de riego no inventariada

Con lo anterior, se puede actualizar la información referente a volúmenes utilizados en el sector agrícola dentro del acuífero, así como establecer la superficie real cultivada en cada uno de los ciclos agrícolas bajo estudio.

Una vez que se cuenta con las imágenes procesadas, se realiza lo siguiente, lo cual se divide en dos aspectos importantes, los cuales son:

A.- Superficie de Riego Inventariada en Distritos y Unidades de Riego

De acuerdo con la información estadística de los Distritos de Riego con la que cuenta la Comisión Nacional del Agua, se realiza el filtro de información para determinar la superficie que tiene como fuente de abastecimiento a los pozos. Cabe señalar que esto no se realiza para las Unidades de riego debido a que su fuente de aprovechamiento de la totalidad de su superficie es regada con agua subterránea.

Para el caso de los Distritos de riego, se realiza un cruce de información identificando las parcelas que son regadas mediante pozos (Ver Figura 69). Debido a que se requiere de un análisis espectral de las imágenes para determinar las superficies en pie para cada uno de los

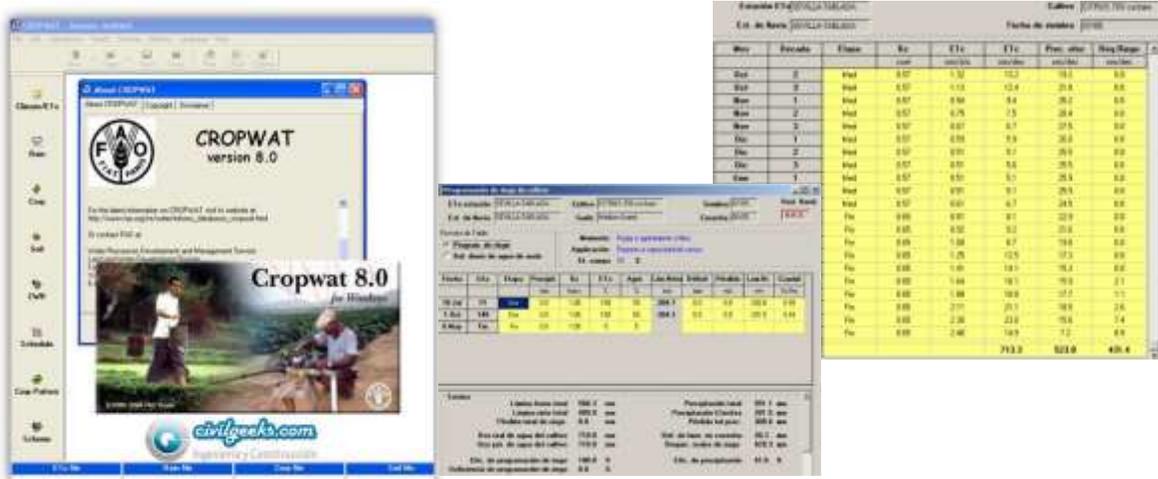


Figura 77. Uso de CROPWAT para determinar requerimientos de riego

Una vez calculados los requerimientos de riego, se genera la base de datos en Excel; para posteriormente determinar los volúmenes requeridos por los cultivos establecidos en el acuífero.

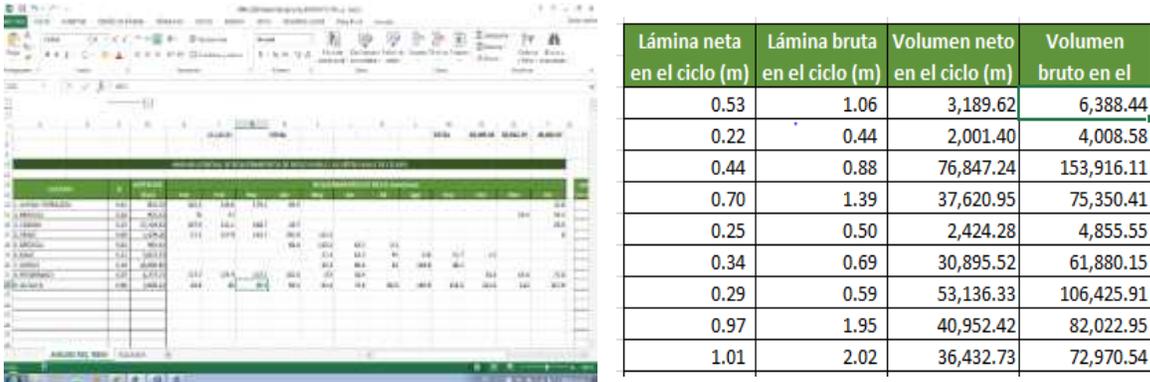


Figura 78. Determinación de volúmenes aplicados en el acuífero

Una vez determinados los volúmenes se afectan por las eficiencias correspondientes a cada uno de los sistemas de riego presentes en el acuífero; para de esta manera obtener el volumen estimado que se extrae de aguas subterráneas.



BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL ACUÍFERO IRAPUATO - VALLE: COMPONENTE AGRÍCOLA



ANÁLISIS Demanda agrícola_IRAPUATO VALLE - Excel

ARCHIVO INICIO INSERTAR DISEÑO DE PÁGINA FÓRMULAS DATOS REVISAR VISTA DESARROLLADOR Nitro Pro 8 Acrobat

Calibri 11 A A Ajustar texto General

Pegar Fuente Alineación Número Estilos

Formato condicional Dar formato como tabla Estilos de celda Insertar Elim

P15

ACUÍFERO IRAPUATO - VALLE										
Cálculo de Requerimientos de Riego en el Acuífero Irapuato - Valle										
	SISTEMA DE RIEGO	SUPERFICIE CULTIVADA	EFICIENCIAS			VOLUMENES SUP. FISICA (MILES DE M3)				
			FISICA	APLICACIÓN	GLOBAL	VOL NETO	VOL BRUTO	APLICACIÓN		
14	IMAGEN	MIXTO	12,948.13	12,948.13	80.00	70.00	56.00	61,076.02	109,064.31	87,251.45
15										
16	DR	POZO+GRAVEDAD	14,109.46	14,109.46	80.00	60.00	48.00	66,554.00	136,654.17	110,923.33
17		POZO+ASPERSIÓN	2,678.28	2,678.28	80.00	80.00	64.00	12,633.27	19,739.48	15,791.59
18		POZO+GOTEO	1,447.91	1,447.91	80.00	90.00	72.00	6,829.76	9,485.77	7,588.62
19		POZO+MIXTO	2,366.34	2,366.34	80.00	70.00	56.00	11,161.97	19,932.09	15,945.67
20			20,601.97	20,601.97			51.74	97,179.00	187,811.52	150,249.21
21	UR	POZO+GRAVEDAD	20,251.49	20,251.49	80.00	60.00	48.00	95,525.80	199,012.08	159,209.67
22		POZO+ASPERSIÓN	367.82	367.82	80.00	80.00	64.00	1,735.02	2,716.96	2,168.77
23		POZO+GOTEO	1,924.85	1,924.85	80.00	90.00	72.00	9,079.45	12,610.35	10,088.28
24		POZO+MIXTO	4,007.91	4,007.91	80.00	70.00	56.00	18,905.21	33,759.30	27,007.44
25			26,552.07	26,552.07	80.00	63.10	50.48	125,245.48	248,092.71	198,474.16
26										

ANÁLISIS REQ. RIEGO RESUMEN

LISTO

Figura 79. Determinación de volúmenes totales extraídos del acuífero

Con estos cálculos se cuenta con los datos necesarios para realizar la actualización del balance de aguas subterráneas, con la componente agrícola calculada. Cabe señalar que esta componente es la que se estudió con más profundidad por lo motivos expuestos en puntos anteriores.