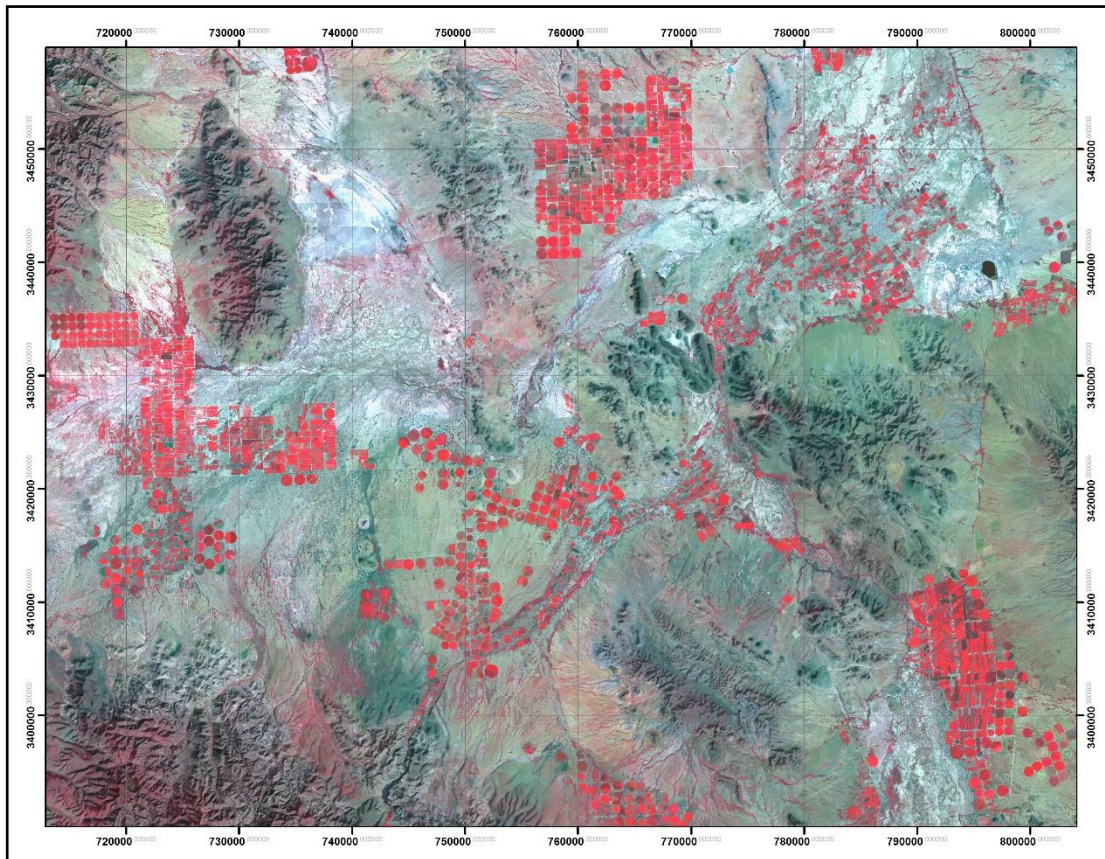




Monitoreo de zonas agrícolas de riego sobre acuíferos localizados en zonas áridas de México, mediante imágenes de satélite e información complementaria, Primera etapa.



COORDINACIÓN DE HIDROLOGÍA
SUBCOORDINACIÓN DE PLANEACIÓN HÍDRICA

Responsable del proyecto:

Jorge Enrique Brena Zepeda

Participantes:

Aguilar Hernández Julio
Castillo Romano Cervando
González Sánchez Alberto
Gordillo Salinas Víctor Manuel
Mendoza Cazares Edgar Yuri
Ontiveros Capurata Ronald Ernesto





MEDIO AMBIENTE
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES



IMTA
INSTITUTO MEXICANO
DE TECNOLOGÍA DEL AGUA



2019
AÑO DEL GAUDIJO DEL SUR
EMILLANO ZAPATA



Contenido

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUCCIÓN | 4 |
| 2. OBJETIVOS GENERALES | 6 |
| 2.1. Objetivo específico..... | 6 |
| 3. ESTRATEGIA PARA LA REALIZACIÓN DEL TRABAJO | 7 |
| 4. METODOLOGÍA | 8 |
| 4.1. Delimitación de superficies cultivadas | 8 |
| 4.2. Imágenes de satélite | 9 |
| 4.3. Elección de imágenes de satélite..... | 10 |
| 4.3.1. Características de las imágenes Sentinel 2..... | 10 |
| 4.3.2. Características de las imágenes LANDSAT | 14 |
| 4.3.3. Características de las imágenes Spot | 16 |
| 4.4. Imágenes empleadas..... | 20 |
| 4.5. Georreferencia de imágenes | 24 |
| 4.6. Procesamiento | 26 |
| 4.6.1. Cálculo de NDVI | 26 |
| 4.6.2. Cálculo de la temperatura de la superficie (LST)..... | 26 |
| 4.6.3. Cálculo de la radiancia espectral de parte superior de la atmósfera (TOA)..... | 28 |
| 4.6.4. Conversión de TOA a la temperatura de brillo (BT)..... | 29 |
| 4.6.5. Cálculo de emisividad (ϵ) | 29 |
| 4.6.6. Cálculo la temperatura de la superficie terrestre (LST) | 29 |
| 4.6.7. Cálculo de la pendiente del terreno..... | 30 |
| 4.6.8. Cálculo de umbrales para clasificación de superficies agrícolas | 30 |
| 4.7. Recorrido de campo..... | 31 |
| 4.7.1. Trabajo de campo en el Acuífero Principal Región Lagunera..... | 32 |
| 4.7.2. Trabajo de campo en el Acuífero Irapuato Valle..... | 39 |
| 4.7.3. Trabajo de campo en el Acuífero Laguna de Hormigas..... | 42 |
| 5. RESULTADOS..... | 45 |
| 5.1. Región hidrológica administrativa Río Bravo | 46 |
| 5.2. Región hidrológica administrativa Cuencas Centrales del Norte | 48 |
| 5.3. Región hidrológica administrativa Noroeste..... | 50 |
| 5.4. Región hidrológica administrativa Península de Baja California..... | 52 |
| 5.5. Región hidrológica administrativa Pacífico Norte..... | 54 |
| 5.6. Región hidrológica administrativa Valle de México..... | 56 |
| 5.7. Región hidrológica administrativa Balsas..... | 57 |
| 5.8. Caracterización hidrogeológica de tres acuíferos..... | 61 |
| 5.8.1. Trabajo de campo en el Acuífero Laguna de Hormigas..... | 61 |
| 5.8.2. Acuífero Principal Región Lagunera, Durango-Coahuila | 64 |
| 5.8.3. Acuífero Irapuato Valle..... | 67 |
| 5.9. Evaluación multitemporal de la superficie de cultivos en acuíferos seleccionados..... | 71 |
| 5.9.1. Acuífero Laguna de Hormigas, Chih..... | 71 |
| 5.9.2. Acuífero Principal Región Lagunera..... | 73 |





1. INTRODUCCIÓN

La importancia del agua subterránea se manifiesta en la magnitud del volumen utilizado por los principales usuarios. El 39.1% del volumen total concesionado para usos consuntivos (34,380 hm³ por año al 2017), es de origen subterráneo. Para fines de administración del agua subterránea, el país se ha dividido en 653 acuíferos, cuyos nombres oficiales fueron publicados en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 5 de diciembre de 2001. Para el 31 de diciembre de 2009 se tenían 282 acuíferos con disponibilidad publicada en el DOF (Conagua, 2018).

A partir de la década de los setentas, ha aumentado sustancialmente el número de acuíferos sobreexplotados, en el año 1975 eran 32 acuíferos, 80 en 1985, y 101 acuíferos sobreexplotados al 31 de diciembre de 2008. De los acuíferos sobreexplotados se extrae el 58% del agua subterránea para todos los usos. De acuerdo con los resultados de los estudios recientes se define si los acuíferos se convierten en sobreexplotados o dejan de serlo, en función de la relación extracción/ recarga (Conagua, 2010). A partir del proceso de identificación, delimitación, estudio y cálculo de la disponibilidad, comenzado en 2001, el número de acuíferos sobreexplotados ha oscilado anualmente entre 100 y 106. Al 31 de diciembre de 2017 se reportan 105 acuíferos sobreexplotados. De acuerdo con los resultados de los estudios recientes, se define si los acuíferos se convierten en sobreexplotados o dejan de serlo, en función de la relación extracción/recarga.

El mayor uso del agua en México es el agrícola. Con base en el VII Censo Agrícola, Ganadero y Forestal 2007 (el último disponible a escala nacional), la superficie en unidades agrícolas de producción fue de 30.2 millones de hectáreas, de las cuales 18% eran de riego y el resto tenían régimen de temporal. La superficie sembrada anualmente (considerando el año agrícola y los cultivos perennes, en régimen de riego y temporal) ha variado entre 21.4 y 21.6 millones de hectáreas durante el periodo 2006-2017 (SIAP 2017). El 36.4% del agua concesionada para uso agrupado agrícola es de origen subterráneo. Tomando en cuenta que existen variaciones anuales, el volumen de agua subterránea concesionada para este uso agrupado es 15.8% mayor que el de 2008, (Conagua, 2018).

De acuerdo con el análisis de sobreposición de las capas temáticas de áreas agrícolas de riego (INEGI, 2018) con el mapa de acuíferos con disponibilidad (Conagua, 2015) realizado en el IMTA, se observó que aproximadamente 6 millones de hectáreas de riego, se ubicaron sobre acuíferos sin disponibilidad.

El presente, es un proyecto interno financiado con recursos fiscales del IMTA, y fue denominado "Monitoreo de zonas agrícolas de riego sobre acuíferos localizados en zonas áridas de México, mediante imágenes de satélite e





información complementaria, Primera etapa”, tiene por objetivo ubicar, cuantificar y cartografiar la superficie cultivadas en acuíferos sobre explotados ubicados en las zonas áridas del norte y centro del país. La selección de estos acuíferos se realizó con base en la relación que se presenta en el 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 (RHA); y que fue publicada por la CONAGUA en el Diario Oficial de la Federación el 20 de abril de 2015. De acuerdo con esta relación se obtuvo 106 acuíferos a nivel nacional se catalogaron como sobreexplotados, de ello la mayoría se localizaron en cuatro de las trece regiones hidrológico administrativas: Península de Baja California, Río Bravo, Cuencas Centrales del Norte y Lerma Santiago Pacífico.

Adicionalmente de la relación obtenida, fueron seleccionados tres acuíferos con características particulares de aprovechamiento del agua subterránea: Laguna de Hormigas, ubicado en el Estado de Chihuahua (RHA Río Bravo), Principal Región Lagunera, ubicado en los estados de Coahuila y Durango (RHA Cuencas Centrales del Norte); e Irapuato Valle, localizado en el Estado de Guanajuato (RHA Lerma Santiago Pacífico), con objeto de evaluar la dinámica del comportamiento de la superficie de cultivo de riego durante el intervalo comprendido entre 1986 y 2019, con base en imágenes de satélite LANDSAT y Sentinel 2 disponibles.

Para esta evaluación se emplearon técnicas de Geomática basadas en imágenes de satélite, cartografía temática disponible y *software* especializado; complementadas con interpretación asistida por computadora. En forma paralela, se obtuvieron las principales características hidrogeológicas de los tres acuíferos mencionados.





2. OBJETIVOS GENERALES

Generar, aplicar y transferir conocimiento para incrementar las capacidades de investigación aplicada, desarrollo tecnológico e innovación del sector agua.

Generar conocimiento, tecnología e innovación para la gestión sustentable del agua.

2.1. Objetivo específico

Ubicar, cuantificar y evaluar los cambios en la superficie con cultivos de riego ubicada en acuíferos sobreexplotados de la zona árida del país empleando series de imágenes de satélite e información complementaria.





3. ESTRATEGIA PARA LA REALIZACIÓN DEL TRABAJO

Se emplean métodos digitales de análisis y procesamiento de datos para la generación de la información temática. El diagrama presenta de manera esquemática el proceso realizado para el cálculo de la superficie del espejo de agua, a partir de la imagen de satélite (Figura 1).

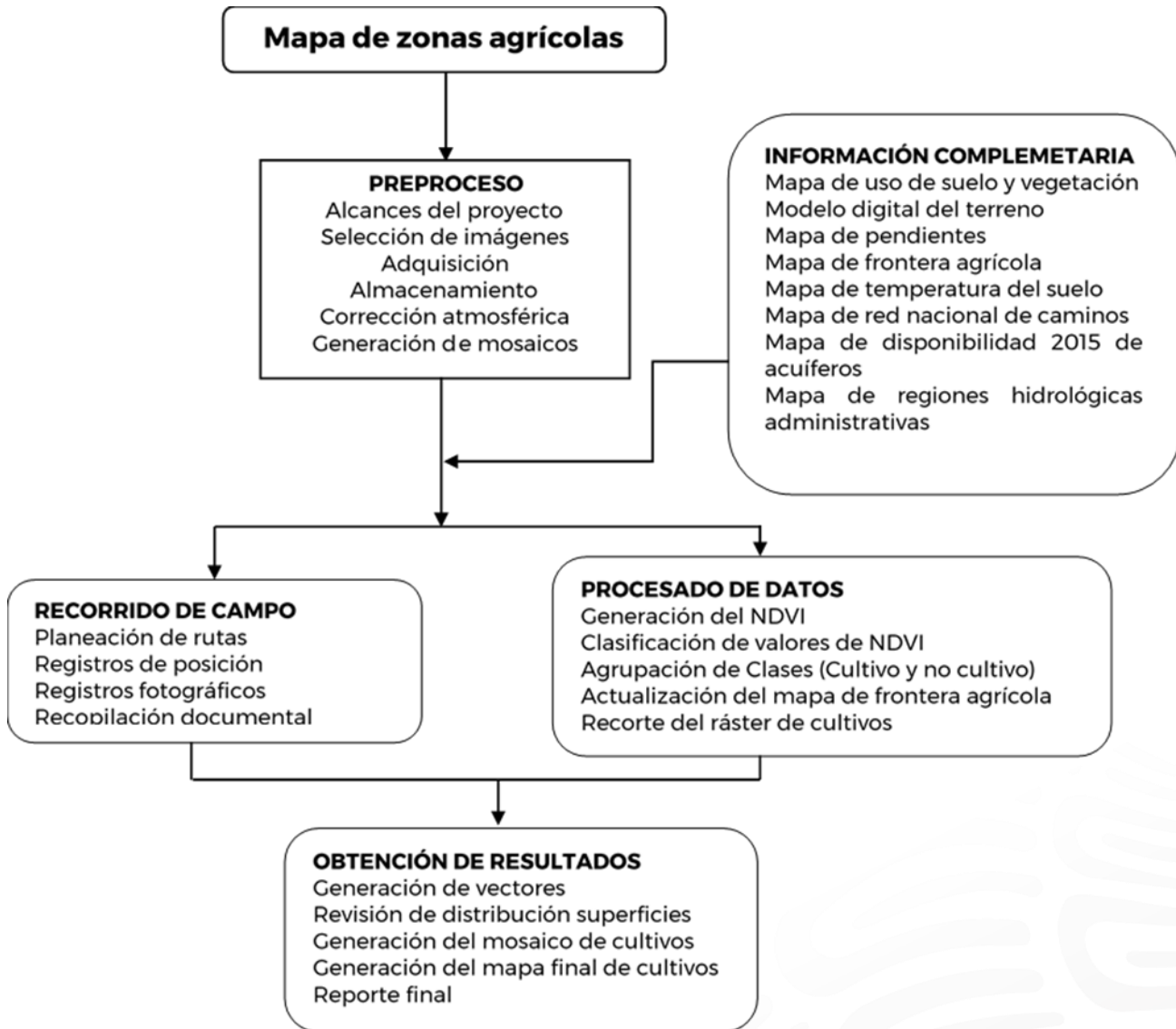


Figura 1. Diagrama de Estrategia para la elaboración del inventario de cuerpos de agua



4. METODOLOGÍA

Para satisfacer el objetivo de este proyecto la metodología planteada en este proyecto se divide en dos partes: en la primera de identifica, clasifica y delimita la superficie cultivada utilizando imágenes de satélite, la cual se basa en el comportamiento espectral de la vegetación, es decir, en la respuesta de intensidad reflectiva de la luz en diferentes rangos del espectro electromagnético (longitudes de onda).

En la segunda, se basa en el empleo de sistemas de información geográfica para el manejo vectorial y numérico de los datos y para el análisis estadístico de estos. De esta manera se obtienen los cuerpos de agua mayores a 3500 m2 en la zona hidrológica.

Las imágenes utilizadas fueron georreferenciadas de origen con un nivel de procesamiento conocido como 3A, con base en el esferoide y el Datum WGS84, a la proyección es del sistema de coordenadas UTM.

Las proyecciones establecidas para la cartografía generada para el presente estudio a nivel de acuífero fue la UTM con Datum WGS84, y la Cónica Conforme de Lambert se empleó en la elaboración de los mosaicos regionales; los siguientes parámetros fueron definidos por el INEGI para la proyección Cónica:

| | | | |
|------------------------------------|------------------|--|--|
| Falso Este: | 2500000.00000000 | | |
| Falso Norte: | 0.00000000 | | |
| Meridiano Central: | -102.00000000 | | |
| Paralelo estándar 1: | 17.50000000 | | |
| Paralelo estándar 2: | 29.50000000 | | |
| Latitud de origen: | 12.00000000 | | |
| Unidad Linear: | Meter | | |
| Sistema de Coordenadas Geográfico: | GCS_ITRF_1992 | | |
| Datum: | D_ITRF_1992 | | |
| Meridiano de origen: | Greenwich | | |
| Unidad angular: | Grados | | |

4.1. Delimitación de superficies cultivadas

La vegetación, como cualquier otro recurso que se encuentra en la superficie terrestre, posee cualidades particulares que hacen que la luz que incide sobre su superficie, sufra transformaciones por causa de sus propiedades físicas y de agentes externos. La propiedad que nos interesa analizar es la reflectancia





espectral, la cual se cuantifica por el porcentaje de energía que se refleja con respecto del total que incide.

Las condiciones naturales y los agentes externos condicionan las variaciones de reflectancia de la vegetación en diferentes rangos de longitud de onda, en este caso el de las bandas espectrales del sensor OLI cargado en el LANDSAT 8 o el MS de los satélites Sentinel 2. Por ejemplo, la presencia de sólidos suspendidos o de vegetación hidrófita en la superficie impiden la absorción de la luz, lo que influye de manera significativa en la intensidad de la reflectancia.

4.2. Imágenes de satélite

El programa espacial para el estudio de recursos naturales mediante imágenes de satélite comenzó formalmente en 1972 con el lanzamiento del *ERST-1* por parte de la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), y desde entonces a la fecha, se han lanzado un número importante de satélites cargados con sistemas sensores que capturan información tanto en la sección visible del espectro electromagnético como en el infrarrojo cercano, medio, térmico y en las microondas (radar).

Algunos de los satélites activos orientados a la evaluación de recursos naturales que se encuentran actualmente circundando la tierra son: *LANDSAT*, *ASTER*, *RADARSAT*, *IRS-1C*, *CARTOSAT*, *ALOS*, *FORMOSAT*, *SPOT*, *SENTINEL 2*, *ERS*, *RAPIDEYE*, *IKONOS*, *QUICKBIRD*, *PLEIADES*, *WORLDVIEW* y *GEOEYE* y otros. Los satélites *RADARSAT*, *ERS-2* y *ENVISAT* capturan imágenes de radar, mientras que todos los demás capturan imágenes ópticas.

Los satélites *RAPIDEYE*, *CARTOSAT*, *ALOS*, *FORMOSAT*, *SPOT*, *IKONOS*, *QUICKBIRD*, *PLEIADES*, *WORLDVIEW* y *GEOEYE* generan imágenes de alta resolución espacial, las cuales están en el rango que va de los 5 m a los 34 cm. Las imágenes de mayor resolución espacial disponibles comercialmente en la actualidad son las generadas por el satélite *GEOEYE* que comercialmente se distribuyen en el modo pancromático con un píxel de 0.4 m y de 2 m en modo multiespectral.

De esta constelación de satélites, se destacan los sistemas *LANDSAT*, *SPOT* por la importancia que han tenido en el desarrollo de la Percepción Remota y ser los primeros programas que establecen continuidad en la captura de información lo que ha propiciado la integración de bancos de imágenes que han sido tomadas a través de varias décadas. Recientemente se ha incorporado La información de ambas plataformas, son de acceso inmediato a los usuarios interesados, ya que





las imágenes LANDSAT se distribuyen libremente a todo público; mientras que las SPOT son proporcionadas por la ERMEXS mediante convenio a dependencias de los tres niveles de gobierno e instituciones de educación superior.

4.3. Elección de imágenes de satélite.

En la selección de las imágenes de satélite a emplearse en cada estudio se deben tener en cuenta varios factores entre los que podemos destacar se encuentran los siguientes:

- Dimensiones del área de estudio. Es importante considerar el volumen de información requerido para cubrir la totalidad del área de estudio. Una mala elección impactará el tiempo de procesamiento y la calidad de los productos entregables.
- Cumplimiento de los requisitos de escala. La escala 1:50,000 se estableció para la evaluación de las zonas cultivadas, con un área mínima cartografiable de 2 ha. De manera que la resolución espacial, espectral y temporal constituyen un factor relevante para el cumplimiento de las metas establecidas en el proyecto.
- Presupuesto asignado al desarrollo del proyecto. Es un factor frecuentemente determinante para la elección de un determinado tipo de cobertura de imágenes, ya que en ciertos casos la compra de imágenes de muy alta resolución espacial por su elevado costo puede quedar fuera presupuesto por las dimensiones de la cobertura del elemento a cartografiar.

4.3.1. Características de las imágenes Sentinel 2

La ESA está desarrollando una serie de misiones de observación de la Tierra de próxima generación, en nombre de la iniciativa conjunta de la ESA / Comisión Europea GMES (Monitoreo Global para el Medio Ambiente y la Seguridad).

El objetivo del programa SENTINEL es reemplazar las misiones de observación de la Tierra más antiguas que se han retirado, como la misión ERS, o que actualmente están llegando al final de su vida útil operativa. Esto asegurará la continuidad de los datos para que no haya vacíos en los estudios en curso.



La misión Copernicus Sentinel-2 comprende una constelación de dos satélites de órbita polar colocados en la misma órbita sincrónica del sol, en fase a 180 ° entre sí. Su objetivo es monitorear la variabilidad en las condiciones de la superficie terrestre, y su ancho de franja ancha (290 km) y su alto tiempo de revisión (10 días en el ecuador con un satélite y 5 días con 2 satélites en condiciones sin nubes, lo que resulta en 2-3 días en latitudes medias) apoyarán el monitoreo de los cambios en la superficie de la Tierra. Los límites de cobertura son de entre latitudes 56 ° sur y 84 ° norte. El satélite Sentinel-2A fue lanzado por la ESA el 23 de junio de 2015. Un segundo satélite idéntico (Sentinel-2B) se lanzó el 7 de marzo de 2017, ambos están operativos con adquisiciones de datos disponibles en el portal EarthExplorer.

El sensor *MultiSpectral Instrument* (MSI) mide la radiación reflejada a través de la atmósfera dentro de 13 bandas espectrales (Figura 2). La resolución espacial depende de la banda espectral particular:

- 4 bandas a 10 metros: azul (490 nm), verde (560 nm), rojo (665 nm) e infrarrojo cercano (842 nm).
- 6 bandas a 20 metros: 4 bandas estrechas para la caracterización de la vegetación (705 nm, 740 nm, 783 nm y 865 nm) y 2 bandas SWIR más grandes (1,610 nm y 2,190 nm) para aplicaciones como detección de nieve / hielo / nubes o vegetación evaluación del estrés por humedad.
- 3 bandas a 60 metros: principalmente para la detección de nubes y correcciones atmosféricas (443 nm para aerosoles, 945 nm para vapor de agua y 1375 nm para detección de cirros).

Los datos del sensor MSI son complementarios a los datos adquiridos por el USatS Survey (USGS) Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) y Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) (Figura 3). En un esfuerzo de colaboración entre la ESA y el USGS se proporciona el acceso público y la redistribución de las adquisiciones globales de los datos Sentinel-2 de la ESA sin costo a través de portales secundarios con sede en los Estados Unidos, además del acceso directo de los usuarios desde la ESA.



| Banda | Resolución | Longitud de onda central | Descripción |
|-------|------------|--------------------------|-------------------------------------|
| B1 | 60 m | 443 nm | Ultra azul (Costa y Aerosol) |
| B2 | 10 m | 490 nm | Azul |
| B3 | 10 m | 560 nm | Verde |
| B4 | 10 m | 665 nm | rojo |
| B5 | 20 m | 705 nm | Visible e Infrarrojo Cercano (VNIR) |
| B6 | 20 m | 740 nm | Visible e Infrarrojo Cercano (VNIR) |
| B7 | 20 m | 783 nm | Visible e Infrarrojo Cercano (VNIR) |
| B8 | 10 m | 842 nm | Visible e Infrarrojo Cercano (VNIR) |
| B8a | 20 m | 865 nm | Visible e Infrarrojo Cercano (VNIR) |
| B9 | 60 m | 940 nm | Onda Corta Infrarroja (SWIR) |
| B10 | 60 m | 1375 nm | Onda Corta Infrarroja (SWIR) |
| B11 | 20 m | 1610 nm | Onda Corta Infrarroja (SWIR) |
| B12 | 20 m | 2190 nm | Onda Corta Infrarroja (SWIR) |

Figura 2. Principales características de las bandas que componen las imágenes Sentinel 2.

Fuente: Guías de usuario Sentinel 2 en:

<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi>

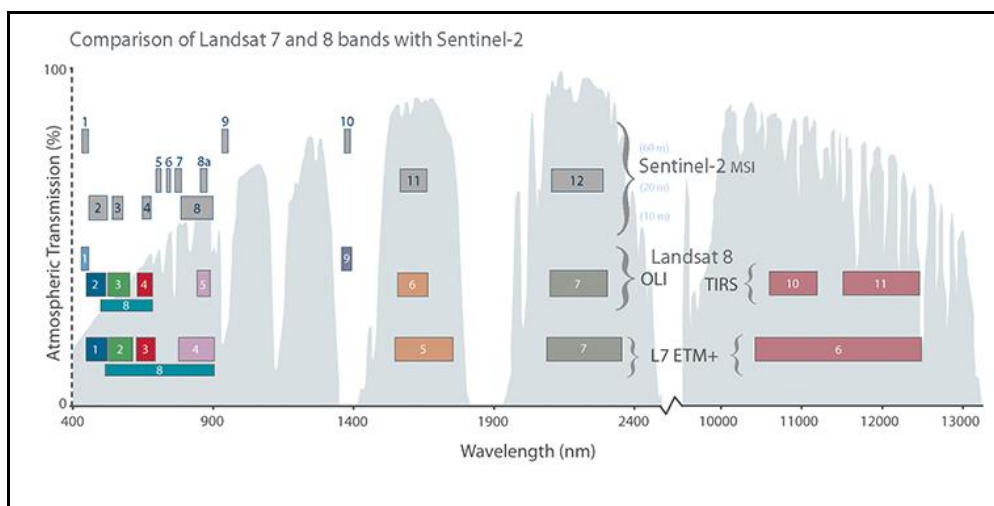


Figura 3. Cobertura espectral de las bandas de LANDSAT y Sentinel 2

Fuente: USGS





Los datos adquiridos, la cobertura de la misión y la alta frecuencia de revisión permiten la generación de información geográfica a escala local, regional, nacional e internacional. Los datos están diseñados para ser modificados y adaptados por usuarios interesados en áreas temáticas como:

- la ordenación del territorio
- monitoreo agroambiental
- monitoreo de agua
- monitoreo de bosques y vegetación
- carbono terrestre, monitoreo de recursos naturales
- monitoreo global de cultivos

Los productos Sentinel-2 disponibles para los usuarios (ya sea generados por el segmento terrestre o por la Caja de herramientas Sentinel-2) se enumeran en la Tabla 2.

Tabla 1. tipo de productos Sentinel-2

| Nombre | Descripción de alto nivel | Producción y distribución | Volumen de datos |
|----------|--|--|--|
| Nivel-1C | Reflectancias de la parte superior de la atmósfera en geometría cartográfica | Generación sistemática y distribución en línea. | 600 MB (cada 100x100 km ²) |
| Nivel 2A | Reflectancia del fondo de la atmósfera en geometría cartográfica | Generación sistemática y distribución en línea y generación en el lado del usuario (usando Sentinel-2 Toolbox) | 800 MB (cada 100x100 km ²) |

Los productos son una compilación de gránulos elementales de tamaño fijo, dentro de una sola órbita. Un gránulo es la partición mínima indivisible de un producto (que contiene todas las bandas espectrales posibles).

Para Level-1C y Level-2A, los gránulos, también llamados mosaicos, son ortoimágenes de 100x100km² en proyección UTM / WGS84. El sistema UTM (Universal Transversa Mercator) divide la superficie de la Tierra en 60 zonas. Cada zona UTM tiene un ancho vertical de 6 ° de longitud y un ancho horizontal de 8 ° de latitud. (Las baldosas tienen un tamaño aproximado de 600 MB. Los mosaicos pueden estar total o parcialmente cubiertos por datos de imagen. Los cuadrantes parcialmente cubiertos corresponden al borde de la franja que cubre el satélite en una órbita.



4.3.2. Características de las imágenes LANDSAT

La serie LANDSAT consta hasta el presente de ocho satélites. La Tabla 2 muestra los satélites componentes de esta serie, el periodo de operación y los sensores cargados; así como los datos satelitales generados por cada uno de ellos

La serie de satélites *LANDSAT* han producido imágenes por medio de cinco sensores diferentes: RBV, MSS, TM y ETM (Tabla 3). El LANDSAT 3 fue el primero de la serie que contó con una quinta banda en la porción térmica del espectro con resolución de 237 metros por lado. El sistema RBV (sistema de televisión) actualmente cuenta con tres canales, a diferencia del LANDSAT 3, con un solo canal. El LANDSAT 7 cuenta con un nuevo sensor que es el ETM+, y cuyas características espectrales y de resolución se muestran en la Tabla 3, y el LANDSAT 8 con un sensor de nueva tecnología (OLI) que genera imágenes con resolución espectral de 14 Bits.

Tabla 2. Serie de satélites LANDSAT

| Resumen del Programa LANDSAT | | | | | | |
|------------------------------|---------------------------|-------------|-----------------------------------|--------------|---------------------|-----------------------|
| Satélite | Inicio (fin de operación) | Instrumento | Resolución (m) | Altitud (km) | Periodicidad (días) | Rango de datos (Mbps) |
| LANDSAT 1 | 7/23/72 (1/6/78) | RBV MSS | 80 80 | 917 | 18 | 15 |
| LANDSAT 2 | 1/22/75 (2/25/82) | RBV MSS | 80 80 | 917 | 18 | 15 |
| LANDSAT 3 | 3/5/78 (3/31/83) | RBV MSS | 30 80 | 917 | 18 | 15 |
| LANDSAT 4 | 7/16/82 (12/14/1993) | MSS TM | 80 30 | 705 | 16 | 85 |
| LANDSAT 5 | 3/1/84 (12/--/2012) | MSS TM | 80 30 | 705 | 16 | 85 |
| LANDSAT 6* | 10/5/93 (10/5/93) | ETM | 15 (pan) 30 (ms) | 705 | 16 | 85 |
| LANDSAT 7 | 04/15/99 | ETM+ | 15 (pan) 30 (ms) | 705 | 16 | 150 |
| LANDSAT 8** (LDCM) | 18/03/13 | OLI TIRS | 15 (pan) 30 (ms) 100 (tirs) | 705 | 16 | 384 / 260.92 |





MSS = *Multispectral scanner.*

RBV = *Return beam vidicom.*

TM = *Thematic mapper.*

ETM+ = *Enhanced thematic mapper.*

OLI = *Operational Land Imager*

TIRS = *Thermal Infrared Sensor*

** LDCM = *LANDSAT Data Continuity Mission*

* Nunca funcionó ya que no logró alcanzar su órbita.

Fuente: USGSEDC.

Tabla 3. Bandas y resolución espacial de los sensores instalados en los satélites LANDSAT.

| Satélite/sensor | (Banda) | µm | Resolución (m ²) |
|-------------------------------|-------------|---------------|------------------------------|
| LANDSAT 5 / MSS | (4) | 0.5 - 0.6 | 79 x 53 |
| | (5) | 0.6 - 0.7 | 79 x 53 |
| | (6) | 0.7 - 0.8 | 79 x 53 |
| | (7) | 0.8 - 1.1 | 79 x 53 |
| LANDSAT 5 / TM | (1) | 0.45 - 0.53 | 30 x 30 |
| | (2) | 0.52 - 0.60 | 30 x 30 |
| | (3) | 0.63 - 0.69 | 30 x 30 |
| | (4) | 0.76 - 0.90 | 30 x 30 |
| | (5) | 1.55 - 1.75 | 30 x 30 |
| | (6) | 10.40 - 12.50 | 120 x 120 |
| | (7) | 2.08 - 2.35 | 30 x 30 |
| LANDSAT 7 / ETM+ | (1) | 0.45 - 0.515 | 30 x 30 |
| | (2) | 0.525 - 0.605 | 30 x 30 |
| | (3) | 0.63 - 0.69 | 30 x 30 |
| | (4) | 0.75 - 0.90 | 30 x 30 |
| | (5) | 1.55 - 1.75 | 30 x 30 |
| | (6) | 10.40 - 12.50 | 60 x 60 |
| | (7) | 2.09 - 2.35 | 30 x 30 |
| | (8) | 0.52 - 0.90 | 15 x 15 |
| LANDSAT 8 (LDCM) / OLI y TIRS | 1 | 0.433 - 0.453 | 30 x 30 |
| | 2 | 0.450 - 0.515 | 30 x 30 |
| | 3 | 0.525 - 0.600 | 30 x 30 |
| | 4 | 0.630 - 0.680 | 30 x 30 |
| | 5 | 0.845 - 0.885 | 30 x 30 |
| | 6 | 1.560 - 1.660 | 30 x 30 |
| | 7 | 2.100 - 2.300 | 30 x 30 |
| | 8 | 0.500 - 0.680 | 15 x 15 |
| | 9 | 1.360 - 1.390 | 30 x 30 |
| | TIRS | | |
| | 10 | 10.3 - 11.3 | 100 x 100 |
| 11 | 11.5 - 12.5 | 100 x 100 | |





Los satélites *LANDSAT* se desplazan de norte a sur en una órbita geocéntrica, circular, casi polar y heliosíncrona (el ángulo sol-tierra-satélite permanece casi constante), esto permitió a los satélites *LANDSAT 4, 5 y 7* obtener datos de una misma región de la tierra cada 16 días en condiciones semejantes de iluminación.

4.3.3. Características de las imágenes Spot

El programa de satélites *Spot* es una coparticipación de Francia, Suecia y Bélgica y consta, hasta la fecha, de siete satélites. Los tres primeros satélites poseen exactamente el mismo sensor y fueron planeados para tener una continuidad en la toma de información. Detalles específicos sobre sensores y resolución pueden consultarse en la Tabla 4 y Tabla 5. El cuarto satélite *Spot* posee una modificación del sensor, siendo una de sus principales diferencias la incorporación de una banda en el infrarrojo medio. Además, se tiene un quinto satélite que mejora la resolución espacial de los satélites *Spot* anteriores. *Spot 6 y Spot 7* forman una constelación de satélites de observación de la Tierra diseñada para garantizar la continuidad de la disponibilidad de los datos con productos cuya resolución espacial de 1,5 m permitirá cubrir zonas muy extensas y campo amplio hasta 2024. La órbita heliosíncrona, mostrada en la Figura 4, permite la comparación de dos escenas de la misma zona tomadas en diferentes fechas con condiciones similares de iluminación.

Tabla 4. Serie de satélites Spot.

| Satélites | Periodo | Sensor |
|---------------|---------------------------------|-----------|
| <i>Spot 1</i> | 22/02/1986 operación esporádica | HRV |
| <i>Spot 2</i> | 22/01/1990 operando | HRV |
| <i>Spot 3</i> | 23/09/1993 al 14/11/1997 | HRV |
| <i>Spot 4</i> | 24/03/1998 operando | HRVIR |
| <i>Spot 5</i> | 04/05/2002 operando | HRG y HRS |
| <i>Spot 6</i> | 09/09/2012 operando | NAOMI |
| <i>Spot 7</i> | 30/06/2014 operando | NAOMI |

HRV = alta resolución visible.
 HRVIR = alta resolución visible infrarroja.
 HRG = alta resolución geométrica.
 HRS = alta resolución estereoscópica.



Tabla 5. Bandas disponibles y resolución espacial de los sensores en los satélites Spot.

| Sensores | Espectro electromagnético | Tamaño de los píxeles | Bandas espectrales (µm) |
|--|----------------------------|-----------------------|-------------------------|
| Spot 6 y 7 | Pancromática | 1.5 m | 0.450-0.745 |
| | Azul: | 6.0 m | 0.450-0.520 |
| | Verde: | 6.0 m | 0.530-0.590 |
| | Rojo: | 6.0 m | 0.625-0.695 |
| | IR cercano: | 6.0 m | 0.760-0.890 |
| Adquisición de datos simultánea en las 5 bandas. | | | |
| Spot 5 | Pancromático | 2,5 m o 5m | 0,48 - 0,71 :m |
| | B1: verde | 10 m | 0,50 - 0,59 :m |
| | B2: rojo | 10 m | 0,61 - 0,68 :m |
| | B3: infrarrojo cercano | 10 m | 0,78 - 0,89 :m |
| B4: infrarrojo medio (MIR) | 20 m | 1,58 - 1,75 :m | |
| Spot 4 | Monoespectral | 10 m | 0,61 - 0,68 :m |
| | B1: verde | 20 m | 0,50 - 0,59 :m |
| | B2: rojo | 20 m | 0,61 - 0,68 :m |
| | B3: infrarrojo cercano | 20 m | 0,78 - 0,89 :m |
| | B4: infrarrojo medio (MIR) | 20 m | 1,58 - 1,75 :m |
| Spot 1 | Pancromático | 10 m | 0,50 - 0,73 :m |
| Spot 2 | B1: verde | 20 m | 0,50 - 0,59 :m |
| Spot 3 | B2: rojo | 20 m | 0,61 - 0,68 :m |
| | B3: infrarrojo cercano | 20 m | 0,78 - 0,89 :m |

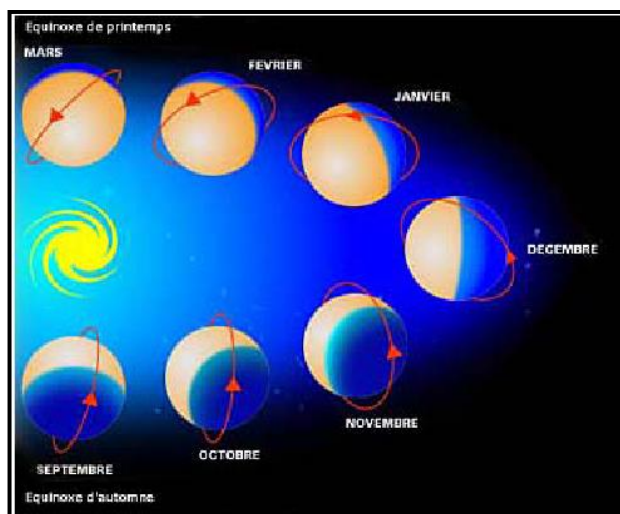


Figura 4. Órbita heliosincrónica de la misma zona en condiciones similares de iluminación.

Fuente: *Spot Image* (2003).

Los satélites *Spot* han sido colocados a una altitud media de 830 km, en una órbita circular casi polar, inclinada 8° con respecto al norte geográfico. La cobertura de la mira vertical y oblicua del *Spot*, ilustrada en la Figura 4, es de 950 km. Estos satélites dan la vuelta a la tierra en 101 minutos, lo cual combinado con el movimiento de rotación de la tierra, hace que la traza en el suelo de dos órbitas consecutivas aparezca desplazada 2,823 km en el ecuador. Cada uno de los satélites *Spot* vuelve a pasar en la vertical de un mismo punto al cabo de 369 revoluciones, o sea cada 26 días. Una característica de los satélites *Spot* es que pueden efectuar vistas oblicuas dentro de un ángulo que varía de -27° a $+27^\circ$ con respecto a la vertical en sentido este-oeste.

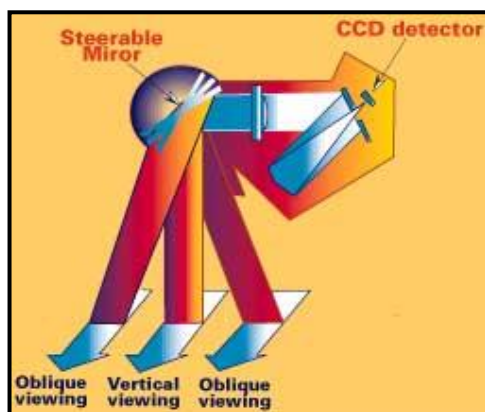


Figura 5. Cobertura de la mira vertical y oblicua del *Spot*.

Fuente: *Spot Image* (2003).

Los satélites *Spot* están dotados de dos sensores idénticos capaces de funcionar de forma independiente. Cada instrumento barre una banda de dimensión, en sentido este-oeste, de 60 km en mira vertical y puede alcanzar los 80 km en visión oblicua. Cuando funcionan en forma conjunta (Figura 6), cubren una franja de 120 kilómetros. La escena *Spot* cubre una superficie de 60 por 60 km en mira vertical, y hasta 60 por 80 km, en visión oblicua.

Una escena *Spot* consta de 3,000 líneas por 3,000 píxeles de 20 m, en modo multibanda, y de 6,000 líneas por 6,000 píxeles de 10 m en modo pancromático (monocromático en el *Spot* 4). En mira oblicua, hasta 27° hacia el este o hacia el oeste; el paso de muestreo varía en consecuencia entre 10 y 13.5 m o entre 20 y 27 m, según el modo espectral. A continuación las líneas se someten a un remuestreo al paso fijo de 10 o 20 m, con lo cual aumenta el número de píxeles



en la línea. El nuevo satélite *Spot 5* genera en modo pancromático imágenes con resolución espacial de 5 y 2.5 metros.

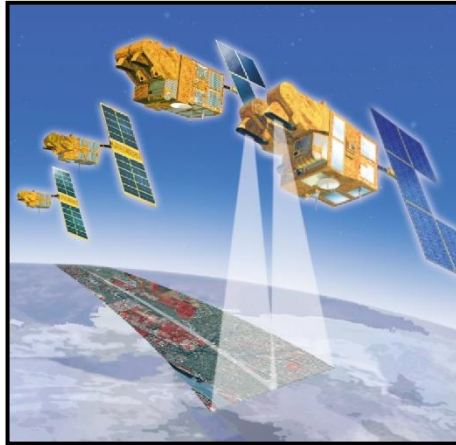


Figura 6. Vista vertical de los dos instrumentos HRS del *Spot 5*.

Fuente: Spot Image (2003).

Dada su órbita casi polar y heliosíncrona, las condiciones de iluminación son semejantes para todas las escenas de una misma latitud en determinada época. Si a lo largo del año varían el azimut y la elevación del sol, el ángulo entre la dirección solar, el centro de la tierra y el plano de la órbita permanece constante. La mira oblicua del *Spot* posibilita, por un lado, la visión estereoscópica, por otra observación repetida de una misma zona durante 6 días continuos en ciclos de 26 días (Figura 4 y Figura 7).

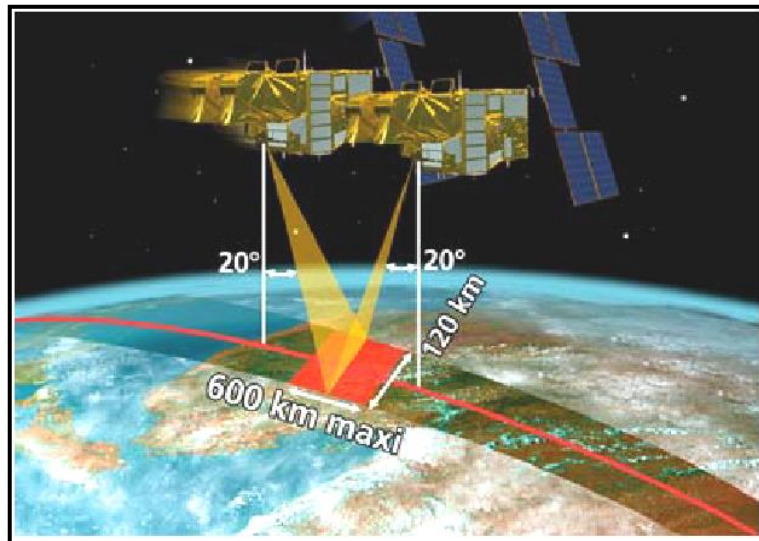


Figura 7. Observación estereoscópica debida a la paralaje creado por dos miras con diferente ángulo.

Fuente: Spot Image (2003).



En septiembre del año 2003, Apoyos y Servicios para la Comercialización Agropecuaria (ASERCA) organismo federal dependiente de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), firmó un acuerdo con *Spot Image* para la recepción directa de las imágenes generadas por los satélites *Spot 2, 4 y 5*, entrando en operación en diciembre de 2003; y actualmente se ha convertido en un programa de trabajo administrado por el SIAP-SAGARPA-SEDENA. El programa contempla la transferencia de imágenes a diferentes instituciones del gobierno mexicano (en sus tres niveles) e instituciones estatales de educación superior. Las imágenes empleadas en el presente estudio fueron proporcionadas sin costo al IMTA por la ERMEXS, al amparo del convenio mencionado.

4.4. Imágenes empleadas

Por las dimensiones del área de estudio y la distribución y de los predios cultivados en los diferentes acuíferos sobreexplotados, se emplearon imágenes LANDSAT por su calidad espectral y cobertura temporal; y Sentinel por su resolución espacial de 10m, para obtener mejores resultados en donde las superficies a evaluar presentaron una gran dispersión y tamaño reducido. Así mismo, otro factor determinante para el empleo de ambos tipos de imágenes fue su disponibilidad inmediata, ya que se puede tener acceso a ellas, sin más procedimiento que el llenado del registro en la primera sesión para su descarga en el portal de Internet correspondiente. Lo que las hizo preferentes sobre las imágenes SPOT, para las que hay que desarrollar un trámite adicional y esperar cierto tiempo de respuesta. La totalidad de los acuíferos fue cubierta por 57 escenas LANDSAT y 157 escenas Sentinel, la Tabla 6 y Tabla 7 presentan la relación de estas imágenes, la fecha de toma y la resolución espacial; así mismo, la Figura 8 y Figura 9 presentan su distribución en la zona de estudio.

Tabla 6. Relación de imágenes Sentinel 2 que cubren la zona de estudio.

| IDENTIFICACIÓN | FECHA DE TOMA | IDENTIFICACIÓN | FECHA DE TOMA |
|-----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|
| T13QGE_A007574 | 18/08/2018 | T13RHJ_A017169 | 05/10/2018 |
| T13QGE_A008332 | 10/10/2018 | T14RKN_A007188 | 22/07/2018 |
| T11RNP_A019000 | 10/02/2019 | T14RKN_A008332 | 10/10/2018 |
| T11RNQ_A010063 | 08/02/2019 | T14RKN_A008761 | 09/11/2018 |
| T11RNQ_A019000 | 10/02/2019 | T14RKN_A016268 | 03/08/2018 |
| T11RPP_A019000 | 10/02/2019 | T14RKN_A017126 | 02/10/2018 |





| IDENTIFICACIÓN | FECHA DE TOMA | IDENTIFICACIÓN | FECHA DE TOMA |
|----------------|---------------|----------------|---------------|
| T11RPQ_A019000 | 10/02/2019 | T14RKN_A017269 | 12/10/2018 |
| T11SNR_A009877 | 10/02/2019 | T14RKP_A019271 | 01/03/2019 |
| T11SNS_A010306 | 25/02/2019 | T14RKP_A019271 | 01/03/2019 |
| T11SPR_A019000 | 10/02/2019 | T14RKQ_A010334 | 27/02/2019 |
| T11SPS_A019000 | 10/02/2019 | T14RKQ_A019171 | 22/02/2019 |
| T12QWM_A010320 | 26/02/2019 | T14RKR_A010334 | 27/02/2019 |
| T12QXL_A019300 | 03/03/2019 | T14RLN_A016268 | 03/08/2018 |
| T12RTR_A009834 | 23/01/2019 | T14RLP_A016554 | 23/08/2018 |
| T12RTR_A018771 | 25/01/2019 | T13QFA_A019457 | 14/03/2019 |
| T12RUP_A010363 | 01/03/2019 | T13QFB_A019457 | 14/03/2019 |
| T12RUQ_A010363 | 01/03/2019 | T13QDG_A008375 | 13/10/2018 |
| T12RUR_A010363 | 01/03/2019 | T13QEF_A008332 | 10/10/2018 |
| T12RVP_A010363 | 01/03/2019 | T13QEG_A008332 | 10/10/2018 |
| T12RVQ_A010363 | 01/03/2019 | T13QEG_A016497 | 19/08/2018 |
| T12RYU_A016869 | 14/09/2018 | T13RDH_A008375 | 13/10/2018 |
| T12RYV_A016869 | 14/09/2018 | T13REH_A008375 | 13/10/2018 |
| T12SYA_A016869 | 14/09/2018 | T13REJ_A008375 | 13/10/2018 |
| T13RBM_A016254 | 02/08/2018 | T13RFH_A017169 | 05/10/2018 |
| T13RBN_A007989 | 16/09/2018 | T13RFJ_A017169 | 05/10/2018 |
| T13RBP_A007989 | 16/09/2018 | T13RFK_A006902 | 02/07/2018 |
| T13RBP_A016869 | 14/09/2018 | T13RFK_A006902 | 03/10/2018 |
| T13RBQ_A016869 | 14/09/2018 | T13RFK_A017169 | 05/10/2018 |
| T13RCL_A016254 | 02/08/2018 | T14QLG_A010391 | 03/03/2019 |
| T13RCL_A017255 | 11/10/2018 | T14QMG_A010534 | 13/03/2019 |
| T13RCM_A016254 | 02/08/2018 | T14QNG_A010534 | 13/03/2019 |
| T13RCM_A017255 | 11/10/2018 | T13QGA_A019414 | 11/03/2019 |
| T13RCN_A007989 | 16/09/2018 | T13QHC_A010434 | 06/03/2019 |
| T13RCN_A017255 | 11/10/2018 | T13QHD_A010434 | 06/03/2019 |
| T13RCP_A007703 | 27/08/2018 | T14QKH_A012579 | 03/08/2019 |
| T13RCQ_A016826 | 11/09/2018 | T14QKH_A019414 | 11/03/2019 |





| IDENTIFICACIÓN | FECHA DE TOMA | IDENTIFICACIÓN | FECHA DE TOMA |
|----------------|---------------|----------------|---------------|
| T13RDK_A016068 | 20/07/2018 | T14QKJ_A010434 | 06/03/2019 |
| T13RDK_A016497 | 19/08/2018 | T14QKJ_A012722 | 13/08/2019 |
| T13RDK_A017212 | 08/10/2018 | T14QLJ_A019414 | 11/03/2019 |
| T13RDL_A008232 | 03/10/2018 | T14QMH_A010534 | 13/03/2019 |
| T13RDL_A016068 | 20/07/2018 | T14QNH_A010534 | 13/03/2019 |
| T13RDL_A016640 | 29/08/2018 | T13QFC_A019457 | 14/03/2019 |
| T13RDM_A008232 | 03/10/2018 | T13QGD_A019457 | 14/03/2019 |
| T13RDM_A008275 | 06/10/2018 | T13QGD_A019414 | 11/03/2019 |
| T13RDQ_A016826 | 11/09/2018 | T13QGC_A019414 | 11/03/2019 |
| T13REK_A008375 | 13/10/2018 | T14QPF_A010491 | 10/03/2019 |
| T13REK_A010377 | 02/03/2019 | T14QPG_A010491 | 10/03/2019 |
| T13REK_A015925 | 10/07/2018 | T14QPG_A010534 | 13/03/2019 |
| T13REL_A016640 | 29/08/2018 | T14QLH_A010534 | 13/03/2019 |
| T13REL_A017069 | 28/09/2018 | T14QLH_A019414 | 11/03/2019 |
| T13REL_A017212 | 08/10/2018 | T13QHF_A007574 | 18/08/2018 |
| T13REM_A007660 | 24/08/2018 | T14QKK_A007717 | 28/08/2018 |
| T13REM_A016640 | 29/08/2018 | T14QKL_A007574 | 18/08/2018 |
| T13REN_A007660 | 24/08/2018 | T14QKL_A007717 | 28/08/2018 |
| T13REN_A016640 | 29/08/2018 | T14QKM_A007717 | 28/08/2018 |
| T13RFK_A010377 | 02/03/2019 | T14QLK_A007717 | 28/08/2018 |
| T13RFK_A015925 | 10/07/2018 | T14QLL_A007717 | 28/08/2018 |
| T13SCR_A016826 | 11/09/2018 | T14QLM_A007717 | 28/08/2018 |
| T13RBM | 26/09/2019 | T11SQR_A019143 | 20/02/2019 |
| T13RBN | 26/09/2019 | T12RTV_A019100 | 17/02/2019 |
| T13RCM | 26/09/2019 | T12RUV_A019100 | 17/02/2019 |
| T13RCN | 26/09/2019 | T12RUV_A019343 | 06/03/2019 |
| T13RDL | 08/09/2019 | T12RVS_A019200 | 24/02/2019 |
| T13RDL | 26/09/2019 | T12RVS_A019200 | 24/02/2019 |
| T13RDM | 08/09/2019 | T12RVU_A019343 | 06/03/2019 |
| T13RDM | 11/09/2019 | T12RVV_A019343 | 06/03/2019 |





| IDENTIFICACIÓN | FECHA DE TOMA | IDENTIFICACIÓN | FECHA DE TOMA |
|----------------|---------------|----------------|---------------|
| T13RDM | 26/09/2019 | T12RWR_A019300 | 03/03/2019 |
| T13RDN | 26/09/2019 | T12RWS_A010320 | 26/02/2019 |
| T13RGH_A017169 | 05/10/2018 | T12RWT_A019200 | 24/02/2019 |
| T13RGJ_A017169 | 05/10/2018 | T12RWU_A019343 | 06/03/2019 |
| T13RCK_A010191 | 17/02/2019 | T12STA_A018957 | 07/02/2019 |
| T13RGL_A010334 | 27/02/2019 | T12SUA_A018957 | 07/02/2019 |
| T13RGL_A010334 | 25/09/2018 | T13QFE_A008332 | 10/10/2018 |
| T13RGM_A010334 | 27/02/2019 | T13QFF_A017169 | 05/10/2018 |
| T13RHH_A016025 | 17/07/2018 | T13QFG_A008332 | 10/10/2018 |
| T13RHH_A016268 | 03/08/2018 | T13QGF_A008332 | 10/10/2018 |
| T13RHJ_A010334 | 27/02/2019 | T13QGG_A008332 | 10/10/2018 |
| T13RHJ_A016025 | 17/07/2018 | T13QHE_A007574 | 18/08/2018 |
| T13QHG_A007717 | 28/08/2018 | | |

Tabla 7. Relación de imágenes LANDSAT que cubren la zona de estudio.

| IDENTIFICACIÓN | FECHA DE TOMA | IDENTIFICACIÓN | FECHA DE TOMA |
|----------------|---------------|----------------|---------------|
| 25-46 | 22/01/2019 | 33-38 | 24/09/2018 |
| 26-46 | 02/03/2019 | 33-39 | 22/07/2018 |
| 26-47 | 29/01/2019 | 33-40 | 23/08/2018 |
| 27-42 | 20/01/2019 | 33-41 | 19/03/2019 |
| 27-45 | 09/03/2019 | 34-38 | 30/08/2018 |
| 27-46 | 21/02/2019 | 34-38 | 15/09/2018 |
| 28-41 | 20/08/2018 | 34-39 | 11/04/2019 |
| 28-42 | 19/07/2018 | 34-43 | 22/02/2019 |
| 28-43 | 20/08/2018 | 34-44 | 22/02/2019 |
| 28-44 | 19/07/2018 | 35-39 | 17/03/2019 |
| 28-45 | 19/07/2018 | 35-40 | 01/03/2019 |
| 28-46 | 28/02/2019 | 35-41 | 01/03/2019 |
| 29-42 | 27/08/2018 | 36-38 | 20/02/2019 |





| IDENTIFICACIÓN | FECHA DE TOMA | IDENTIFICACIÓN | FECHA DE TOMA |
|----------------|---------------|----------------|---------------|
| 29-43 | 27/08/2018 | 36-39 | 20/02/2019 |
| 29-44 | 11/08/2018 | 36-40 | 20/02/2019 |
| 29-45 | 07/03/2019 | 36-42 | 19/01/2019 |
| 29-46 | 07/03/2019 | 37-38 | 06/10/2018 |
| 30-41 | 18/08/2018 | 37-38 | 11/02/2019 |
| 30-42 | 05/10/2018 | 37-39 | 06/10/2018 |
| 30-43 | 18/08/2018 | 38-37 | 01/01/2019 |
| 30-44 | 18/08/2018 | 38-38 | 06/03/2019 |
| 30-44 | 05/10/2018 | 39-37 | 24/01/2019 |
| 31-40 | 25/08/2018 | 39-38 | 05/02/2019 |
| 31-41 | 25/08/2018 | 39-39 | 08/01/2019 |
| 31-42 | 25/08/2018 | 27-46 | 14/03/1986 |
| 31-43 | 25/08/2018 | 27-46 | 15/04/1986 |
| 32-39 | 16/08/2018 | 28-46 | 22/04/1986 |
| 32-40 | 14/09/2017 | 30-42 | 14/09/1987 |
| 32-41 | 01/09/2018 | | |

4.5. Georreferencia de imágenes

Tanto las imágenes Sentinel como LANDSAT se recibieron con un nivel de procesamiento conocido como 3A, es decir, ortorrectificadas en proyección UTM Datum WGS84, por lo que únicamente se realizó un proceso de cambio de proyección geográfica a Cónica Conforme de Lambert con Datum WGS84, cuando las extensión del área procesada rebasó el límite de una zona UTM y en los mosaicos regionales.





Figura 8. Distribución de las 157 escenas Sentinel 2 descargadas para el presente estudio.

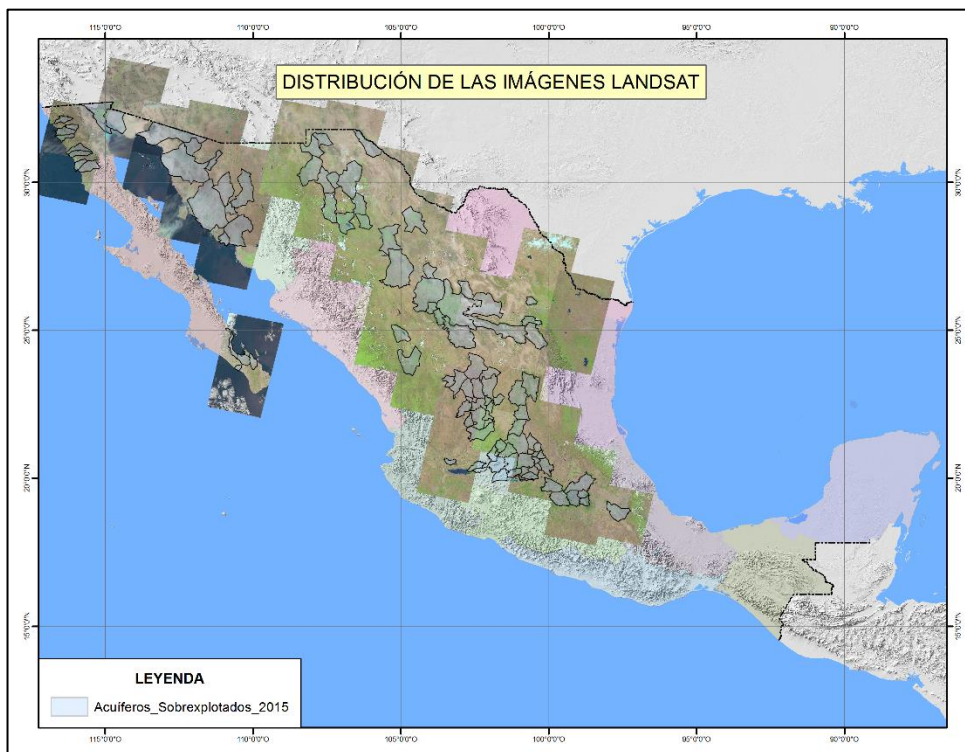


Figura 9. Mapa con la distribución de las 57 escenas LANDSAT descargadas para el proyecto.



4.6. **Procesamiento**

A partir de las bandas espectrales se calculó el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y los valores de temperatura de la superficie (LST). Así mismo, a partir del modelo de elevación digital elaborado por INEGI se calculó la pendiente expresada en porcentaje y se la utilizó como variable discriminadora de las zonas agrícolas bajo riego. Todos los cálculos fueron realizados en el software de uso libre QGIS y la librería GRASS usando el modo de consola en lenguaje Python, así como ArcMap.

4.6.1. Cálculo de NDVI

El índice de vegetación de diferencia normalizada o NDVI (por sus siglas en inglés de Normalized Difference Vegetation Index), se calcula a partir de las mediciones de reflectancia en las longitudes de onda roja e infrarroja cercana (NIR) (Montandon & Small, 2008). Para este cálculo se utilizan las bandas espectrales 4 y 5 del sensor OLI cargado en LANDSAT 8, o 4 y 8 del sensor MSI cargado en los satélite Sentinel 2A y 2B, en ambos casos que corresponden a las regiones del rojo e infrarrojo cercano respectivamente (Figura 10), según la siguiente ecuación:

$$\text{NDVI} = (B5 - B4) / (B5 + B4)$$

Donde B4 y B5 corresponden a las bandas espectrales en las regiones rojo e infrarrojo cercano respectivamente.

4.6.2. Cálculo de la temperatura de la superficie (LST)

El primer paso es contar con las imágenes que cubren el área de interés, con sus respectiva corrección geométrica y radiométrica y verificar que cuenten con toda la información dentro de los metadatos.

El cálculo de la temperatura de la superficie (LST) por sus siglas en inglés se realizó la mediante la metodología propuesta por (Avdan & Jovanovska, 2016) y que se resume en la Figura 11. Los valores de LST se pueden calcular utilizando las bandas multiespectrales del LANDSAT 8 en particular la banda 10 como la banda térmica, y las bandas 4 y 5 para calcular el Índice de Vegetación de



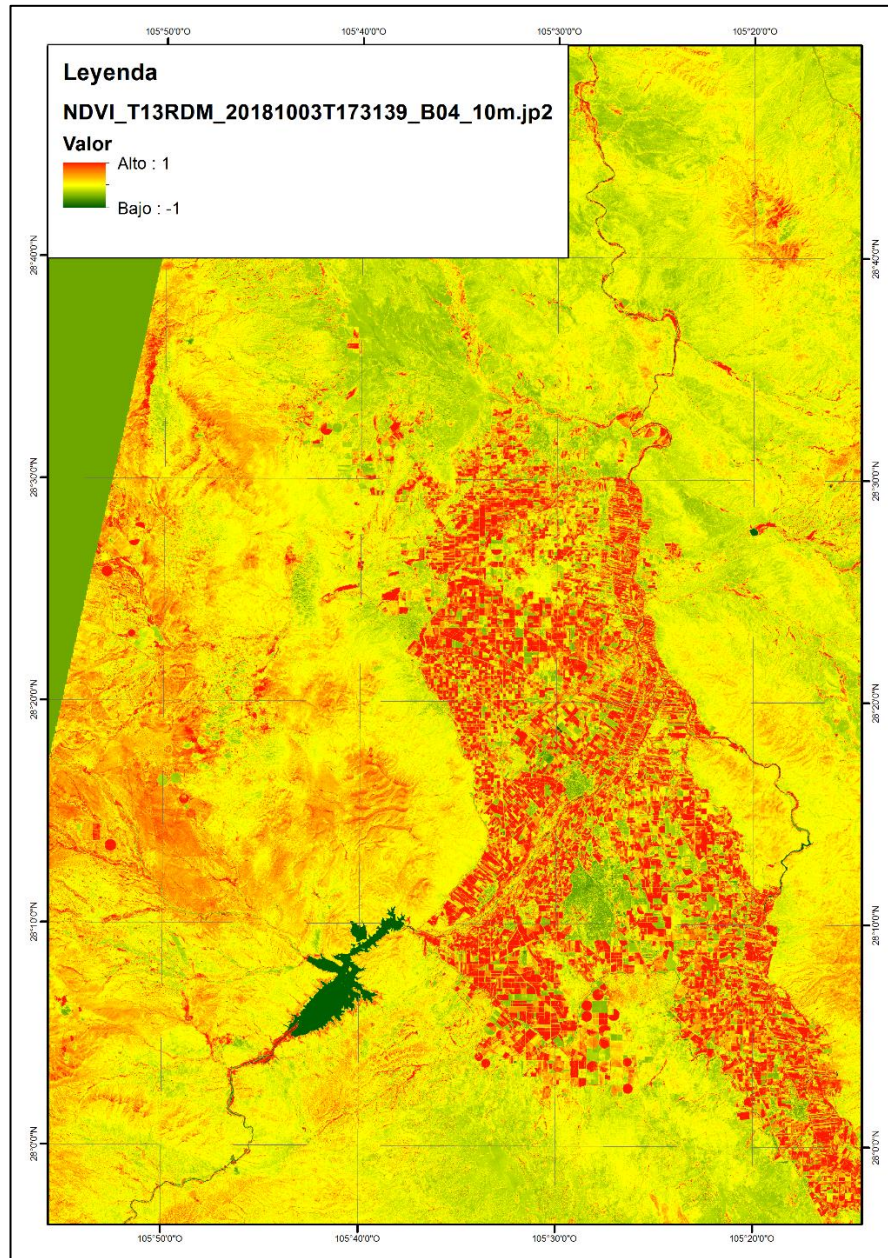


Figura 10. Imagen resultante de la aplicación del NDVI, en rojo sobresale la vegetación vigorosa.

Diferencia Normalizada (NVDI). El cálculo se realiza mediante la aplicación de un conjunto de ecuaciones a través de una calculadora de imágenes ráster como la que tiene QGIS, y sigue el proceso que se describe a continuación:

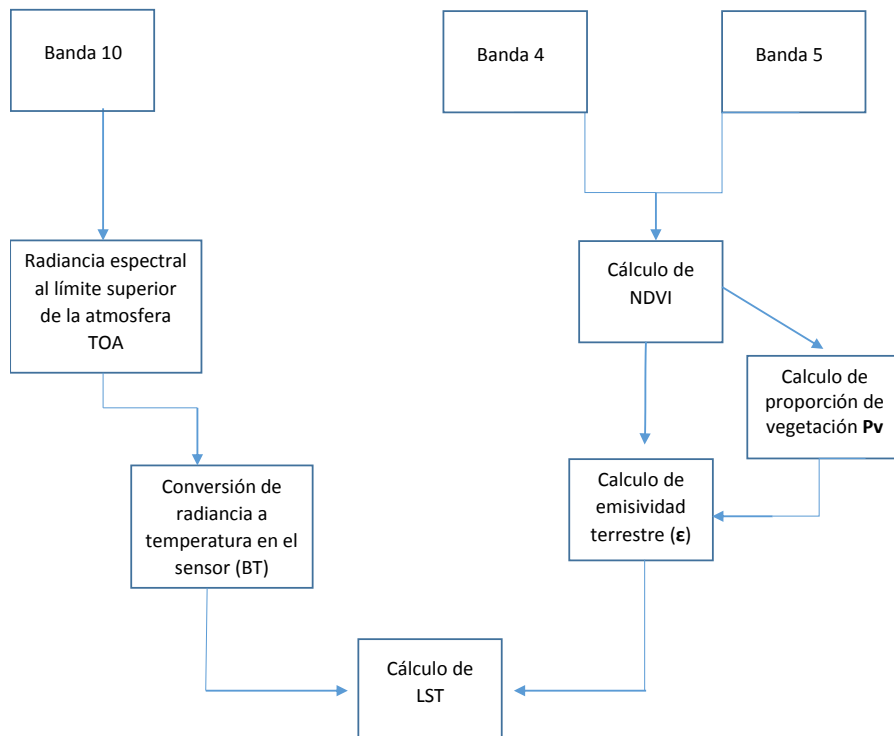


Figura 11. Flujograma para el cálculo de LST (Avdan & Jovanovska, 2016)

4.6.3. Cálculo de la radiancia espectral de parte superior de la atmósfera (TOA).

$$TOA (L) = M_L * Q_{cal} + A_L$$

Dónde: M_L = Factor de reescalamiento multiplicativo específico de banda de los metadatos (RADIANCE_MULT_BAND_x, donde x es el número de banda), Q_{cal} = corresponde a los valores de reflectancia de la banda 10 y A_L = Factor de reescalado aditivo específico de banda de los metadatos (RADIANCE_ADD_BAND_x, donde x es el número de banda).



4.6.4. Conversión de TOA a la temperatura de brillo (BT).

La temperatura de la superficie se calcula mediante la siguiente expresión:

$$BT = (K_2 / (\ln (K_1 / L) + 1)) - 273.15$$

Donde, K_1 = Constante de conversión térmica específica de banda de los metadatos ($K1_CONSTANT_BAND_x$, donde x es el número de banda térmica), K_2 = constante de conversión térmica específica de banda de los metadatos ($K2_CONSTANT_BAND_x$, donde x es el número de banda térmica) y L = TOA. Para obtener los resultados en grados Celsius, la temperatura radiante se ajusta agregando el cero absoluto (aprox. -273.15 °C).

3.5.1 Cálculo de la proporción de vegetación (P_v)

El NDVI calculado anteriormente, al estar altamente relacionado con la presencia y estado de la vegetación es utilizado para el cálculo de del porcentaje de vegetación (P_v), y la emisividad (ϵ).

La proporción de vegetación se calcula según la siguiente expresión:

$$P_v = ((NDVI - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min}))^2$$

Para obtener los valores mínimos y máximos de la imagen NDVI es necesario obtener las estadísticas de cada imagen y desplegarlas desde QGIS o abrir las propiedades del ráster para obtener esos valores. Alternativamente puede utilizar la función *provider.band Statistics* para obtener los extremos máximo y mínimo del índice usando la consola de comandos de Python.

4.6.5. Cálculo de emisividad (ϵ)

El cálculo de la emisividad se realiza mediante la siguiente expresión:

$$\epsilon = 0.004 * P_v + 0.986$$

Donde el valor de 0.986 corresponde a un valor de corrección de la ecuación.

4.6.6. Cálculo la temperatura de la superficie terrestre (LST)

Finalmente, la siguiente ecuación permite obtener los valores de LST con lo cual se tiene el mapa de temperatura de la superficie.



$$LST = (BT / (1 + (0.00115 * BT / 1.4388) * Ln(\epsilon)))$$

Como resultado se cuenta con un mapa de temperatura de la superficie terrestre, debe tenerse en cuenta que estos valores no representan la temperatura del aire.

4.6.7. Cálculo de la pendiente del terreno

A partir del modelo digital de elevación (MDE) elaborado por INEGI se calculó la pendiente expresada en porcentaje mediante la herramienta de GRASS disponible en QGIS "v.slope". Es importante señalar que el modelo, originalmente obtenido en formato .bil y en grados, es re-proyectado en coordenadas UTM para el cálculo de la pendiente en porcentaje.

4.6.8. Cálculo de umbrales para clasificación de superficies agrícolas

Los valores umbrales para la clasificación de superficies agrícolas fueron determinados empíricamente en función de las características espectrales de las zonas agrícolas. De esta manera se muestran como ejemplo los valores que se establecieron para las imágenes que cubren la Región Lerma:

| Cuadrantes Landsat | ZONA UTM | Filtro PV | Filtro Pendiente | Temperatura LST Mínima | Temperatura LST Máxima |
|--------------------|----------|-----------|------------------|------------------------|------------------------|
| 27-45 | 14 | 47 | 10 | 18 | 45 |
| 27-46 | 14 | 53 | 10 | 18 | 45 |
| 28-45 | 13 | 44 | 15 | 20 | 44 |
| 28-45 | 14 | 43 | 10 | 22 | 48 |
| 29-45 | 14 | 50 | 10 | 18 | 46 |
| 29-47 | 14 | 50 | 10 | 19 | 46 |
| 30-46 | 14 | 55 | 10 | 18 | 45 |

De esta manera, se aplicó un filtro para cada una de las imágenes procesadas (ejemplo):





$$Pv \geq 0.47; 18 \text{ }^\circ\text{C} \leq LST < 45 \text{ }^\circ\text{C}; \text{Pendiente} \leq 10 \%$$

Una vez aplicado el filtro con la “calculadora ráster”, se utilizó la herramienta *sieve*, que elimina agrupamientos pequeños de píxeles. El umbral utilizado para esto último fue de 10 (eliminando todos los montículos con tamaño inferior o igual a 10 píxeles). El ráster resultante fue convertido a vector, y sometido a un nuevo proceso de limpieza para eliminar aquellos vectores que destacan vegetación que no corresponden a la actividad agrícola, y se eliminaron aquellos inferiores a 2 ha (Figura 12).

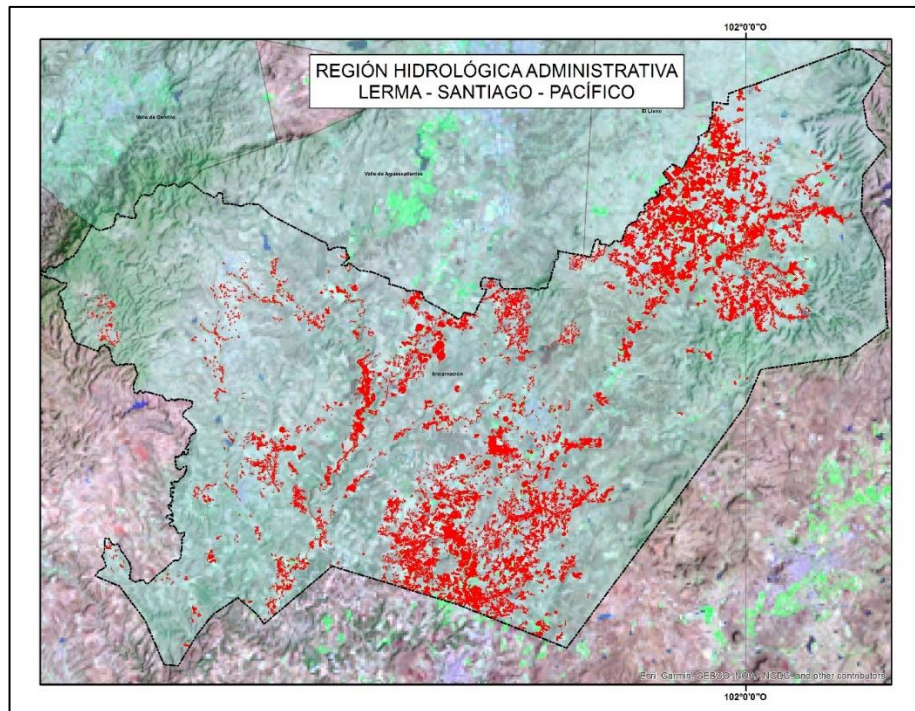


Figura 12. Acuífero Encarnación, ejemplo del mapa resultante de áreas cultivadas (rojo).

4.7. Recorrido de campo

Tiene como objetivo la recopilación de información documental, la toma de fotografía terrestre en puntos de interés, para apoyar las actividades de interpretación de las imágenes en gabinete, y dar al intérprete una visión de la realidad y su correlación con la imagen.

Para el desarrollo del trabajo de campo, fueron seleccionados tres acuíferos que por sus características de escasas hidrometeorológica y de aprovechamiento



económico, tienen relevancia a nivel nacional. De acuerdo a ello y con base en la división en regiones hidrológicas administrativas, se eligió a en las siguientes regiones:

Para la Región Hidrológica Administrativa Río Bravo, se eligió al Acuífero Laguna de Hormigas.

Para la Región Hidrológica Administrativa Cuencas Centrales del Norte, se eligió al Acuífero Principal Región Lagunera.

Y para la Región Hidrológica Administrativa Lerma Santiago Pacífico, se eligió al Acuífero Irapuato Valle.

4.7.1. Trabajo de campo en el Acuífero Principal Región Lagunera

Como ejemplo de las actividades realizadas en campo en los acuíferos seleccionados, presentamos en detalle las actividades realizadas en el acuífero Principal Región Lagunera.

Realizamos el trabajo de campo, durante el período del 13 al 16 agosto del presente y se orientó a visitar a sitios específicos, que permiten la observación directa de las características presentes y asociarlas a la imagen (Figura 13).

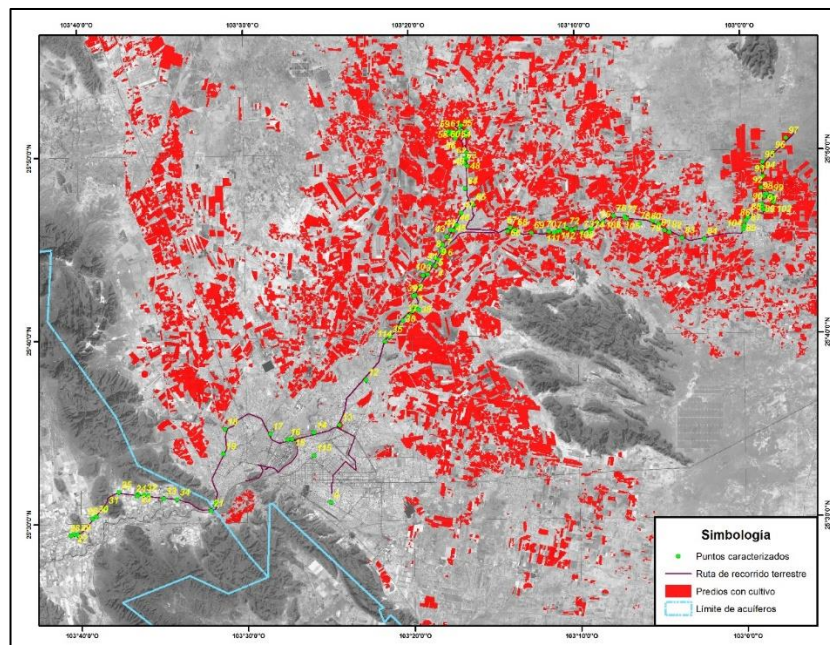


Figura 13. Acuífero Principal Región Lagunera, ruta del recorrido terrestre y mapa de puntos caracterizados.




Actividad 1. Entrevista con personal de la CONAGUA. Con el fin conocer de manera directa las necesidades de CONAGUA, así como el interés potencial del proyecto y obtener su apoyo en el recorrido de campo a las zonas de interés, la primera actividad consistió en contactar al Ing. Jorge Meave Galván, Director Técnico de la CONAGUA en Coahuila.

En la reunión, se le hizo una presentación del proyecto, y se abordó la problemática de la disminución de la disponibilidad del agua subterránea por la sobreexplotación de los acuíferos de la zona.

En la presentación, se le consultó al Ing. Meave sobre las zonas más adecuadas para realizar los recorridos y adquisición de imágenes con dron, a lo cual recomendó tres zonas, dos de las cuales se riegan principalmente por agua subterránea y otra más donde predomina la fuente superficial.

Las primeras zonas recomendada se ubicó en los municipios de Matamoros y Francisco I. Madero, la segunda en la zona conurbada de Lerdo, y la tercera en el Valle de Villa Juárez. El director también asignó al Arq. Gilberto Martínez para el acompañamiento técnico en los recorridos realizados en campo.

Además de lo presentado por el personal IMTA, el director técnico indicó también una problemática adicional, que consiste en distinguir de manera precisa las superficies regadas con agua superficial y aquellas regadas con agua subterránea, para lo cual propone usar las fechas de cierre de las compuertas (establecidas típicamente a finales de agosto). Se le comentó que el actual proyecto podría ayudar en dicha problemática, al realizar una clasificación de la superficie de las zonas de riego antes y después de la apertura de las compuertas, en fechas significativas que permitieran obtener lo regado con agua subterránea por diferencia de superficies. Los tecnólogos del IMTA quedaron en realizar un contacto posterior para presentar la propuesta.

Actividad 2. Levantamiento de ortomosaicos con dron. Esta actividad se realizó en los municipios de Matamoros y Francisco I. Madero, estando la zona de vuelo seleccionada justo entre los límites de ambos municipios. El acuífero en donde se encuentra la zona de vuelo es el Principal-Región Lagunera (0523), en una región perteneciente al Distrito de Riego 017 "Región Lagunera". Entre los cultivos que pudieron apreciarse, predominan la alfalfa y el maíz. El vuelo fue realizado para cubrir un área de 20.82 ha. Se voló a una altura de 116.5 m a 5 m/s, obteniendo una resolución de 5 cm/pixel, utilizando 5 líneas de vuelo (Figura 14). El ortomosaico obtenido se muestra en la Figura 15 (la línea amarilla indica el límite municipal, estando al oeste el municipio de Matamoros y al este Francisco y Madero. Se obtuvieron cuatro puntos de control sobre el terreno con un 



marca Garmin, por lo cual se aprecia un buen empalme entre la superficie y el ortomosaico generado.

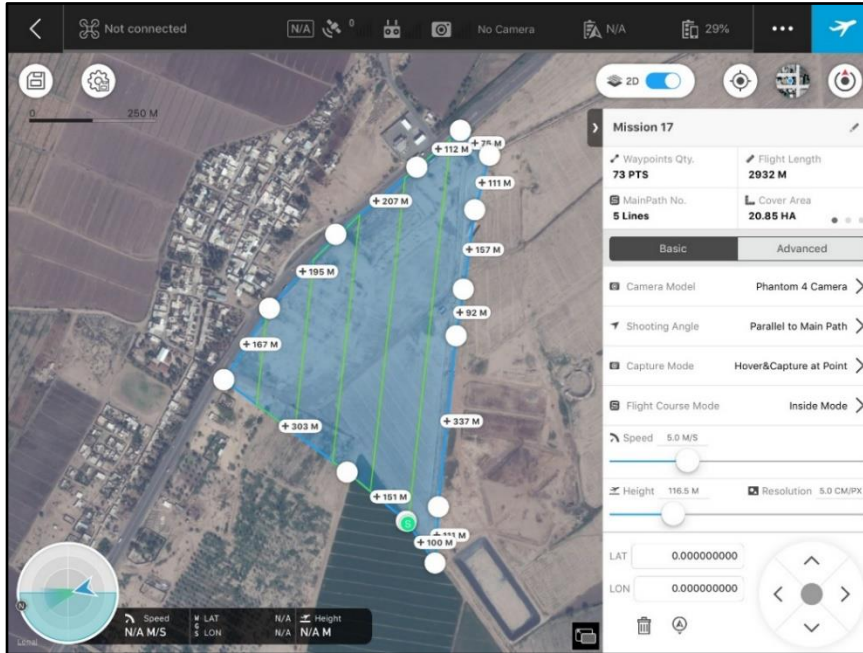


Figura 14. Diseño del vuelo en la zona 1



Figura 15. Ortomosaico en zona 1 generado a partir de imágenes tomadas con el dron

Vuelo en zona 2. Esta actividad se realizó en el municipio de Lerdo, ya en el estado de Durango. El acuífero en donde se encuentra la zona de vuelo es el de Villa-Juárez (1022), en una región también perteneciente al Distrito de Riego 017 “Región Lagunera”, pero ya en sus límites. Entre los cultivos que pudieron apreciarse, predominan el algodón y el maíz. El vuelo fue realizado para cubrir un área de 28.27 ha. Se voló a una altura de 113.2 m a 9.2 m/s, obteniendo una resolución de 4.9 cm/píxel (Figura 16), utilizando 5 líneas de vuelo. El ortomosaico obtenido se muestra en la Figura 17 (la línea roja indica la delimitación del distrito de riego). Como se puede observar en la figura 2, existe una desviación del ortomosaico respecto a la imagen mostrada por el proveedor de mapas de satélite de Google, lo cual se puede explicar por la falta de puntos de control en esta zona.

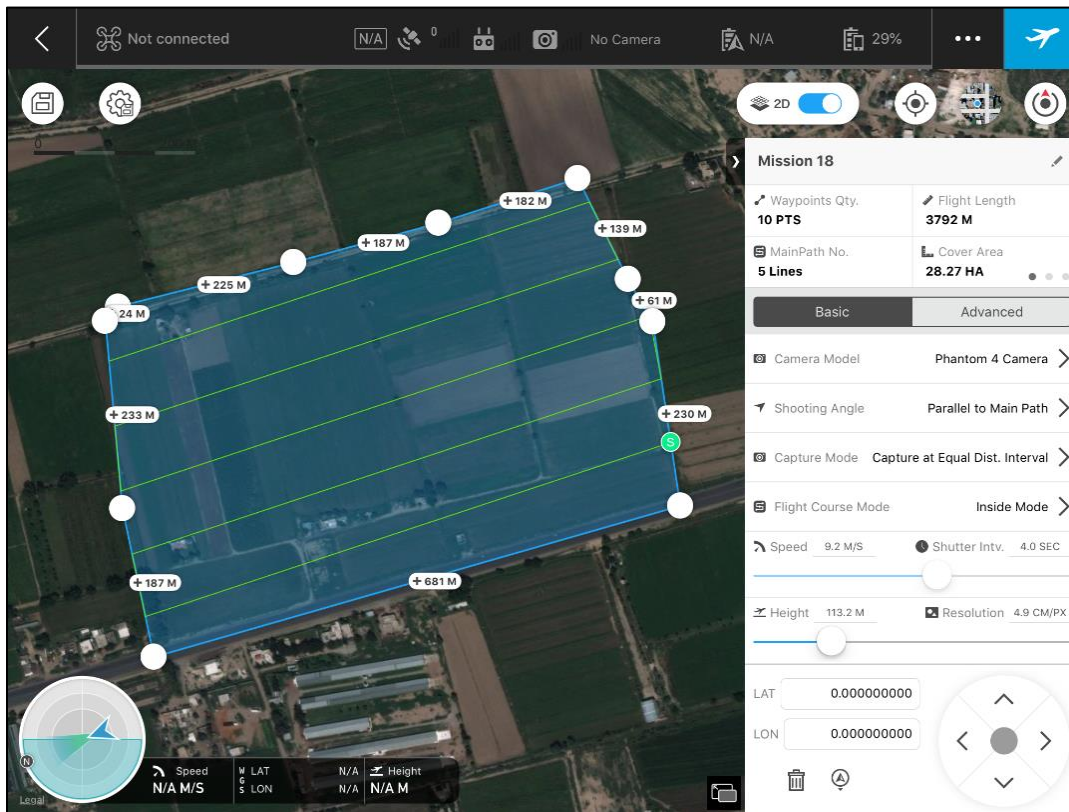


Figura 16. Diseño del vuelo en la zona 2



Figura 17. Ortomosaico en zona 2 generado a partir de imágenes tomadas con el dron.

Vuelo en zona 3. Esta actividad se realizó en el municipio de Francisco I. Madero, Coahuila. El acuífero en donde se encuentra la zona de vuelo es el de Principal-Región Lagunera (0523), en una región también perteneciente al Distrito de Riego 017 “Región Lagunera” (Figura 18). Entre los cultivos que pudieron apreciarse, predominan el nogal, la alfalfa y el maíz. El vuelo fue realizado para cubrir un área de 60.33 ha. Se voló a una altura de 149.9 m a 9.7 m/s, obteniendo una resolución de 6.5 cm/píxel, utilizando 9 líneas de vuelo. El ortomosaico obtenido se muestra en la Figura 19. Se obtuvieron 6 puntos de control en la zona.

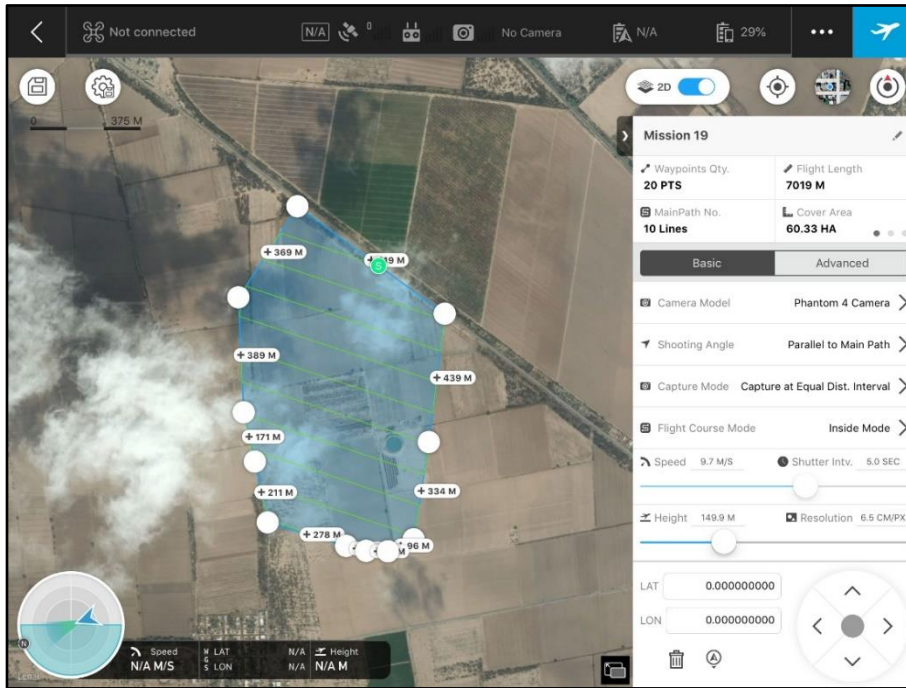


Figura 18. Diseño del vuelo en la zona 3



Figura 19. Ortomosaico en zona 3 generado a partir de imágenes tomadas con el dron



Vuelo en zona 4. Esta actividad se realizó en el municipio de San Pedro, Coahuila. El acuífero en donde se encuentra la zona de vuelo es el de Principal-Región Lagunera (0523), en una región perteneciente al Distrito de Riego 017 “Región Lagunera” (Figura 20). Entre los cultivos que pudieron apreciarse, predominan el nogal, la alfalfa y el maíz. El vuelo fue realizado para cubrir un área de 52.32 ha. Se voló a una altura de 147.9 m a 9.6 m/s, obteniendo una resolución de 6.4 cm/pixel, utilizando 6 líneas de vuelo. El ortomosaico obtenido se muestra en la Figura 21. Se obtuvieron 6 puntos de control en la zona.

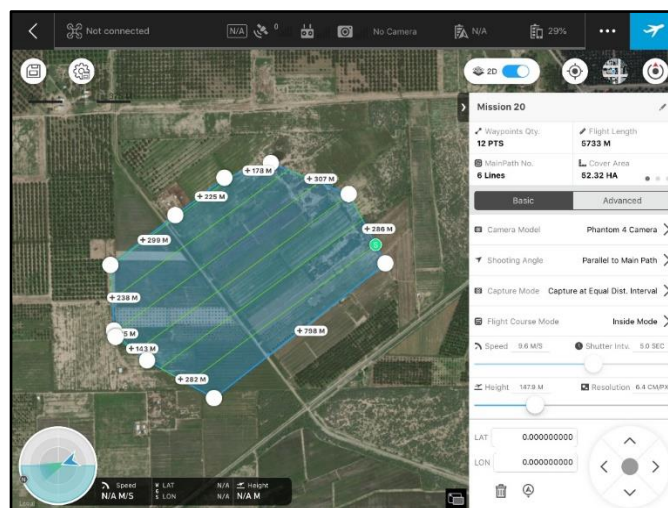


Figura 20. Diseño del vuelo en la zona 4.



Figura 21. Ortomosaico en zona 4 generado a partir de imágenes tomadas con el dron.





Conclusiones:

La visita en las zonas de interés en Torreón, Coahuila permitió obtener insumos para la generación de ortomosaicos útiles para la determinación del error presente en la clasificación realizada con imágenes Landsat y Sentinel, contra la clasificación visual que se realiza manualmente en imágenes de alta resolución. Esto último requiere un procesamiento adicional, que se realiza en una etapa de trabajo de gabinete.

Adicionalmente, se obtuvo información de los cultivos predominantes en las zonas, su ubicación y asociación a la superficie que destaca como vegetación en las imágenes. Así mismo, nos proporcionaron información sobre la existencia de una lámina de riego de 1.30 m establecida con propósitos de planeación, y de igual manera, nos proporcionaron las láminas efectivas para los principales cultivos, lo que será de gran utilidad para que al asociarla con la superficie cultivada, obtenida en el presente estudio, se pueda obtener el volumen extraído durante el período cubierto por las imágenes.

La visita también permitió detectar necesidades por parte de los responsables técnicos en CONAGUA que podrían generar proyectos futuros para el IMTA relacionados a la aplicación de sensores remotos para el apoyo de actividades agrícolas en zonas de riego.

4.7.2. Trabajo de campo en el Acuífero Irapuato Valle.

El trabajo de campo se realizó durante el período del 17 al 20 de septiembre del presente año y se orientó a visitar a sitios específicos, que permiten la observación directa de las características presentes y asociarlas a la imagen (Figura 22).

Previo a la visita de campo se llevó a cabo una Reunión técnica con personal del COTAS de Salamanca: Dr. Ricardo Gonzáles Barbosa (director), Ing. Dan Levi Rodríguez García, Ing. Manuel Selio Rojas y Dra. Beatriz Acevedo (Comisión Estatal del Agua).

El Dr. Ricardo Gonzáles llevó a cabo una presentación de los trabajos que lleva a cabo el COTAS y de la información geográfica que han recopilado y que actualmente en formato digital incorporada a un sistema de información geográfica.

Datos presentados: inventario de pozos para riego, 3200 aproximadamente; déficit de agua del acuífero: 255 Mm³/año; piezometría de pozos; acontecimientos geológicos del área del acuífero que influye en la presencia de



arsénico en el agua subterránea; calidad del agua de los pozos; apoyo a organizaciones de usuarios para obtener información estadística aproximada del volumen utilizado y superficie regada en el acuífero Irapuato Valle; programas de tecnificación agrícola; finalmente los efectos del cambio climático en la agricultura del Distrito de riego.

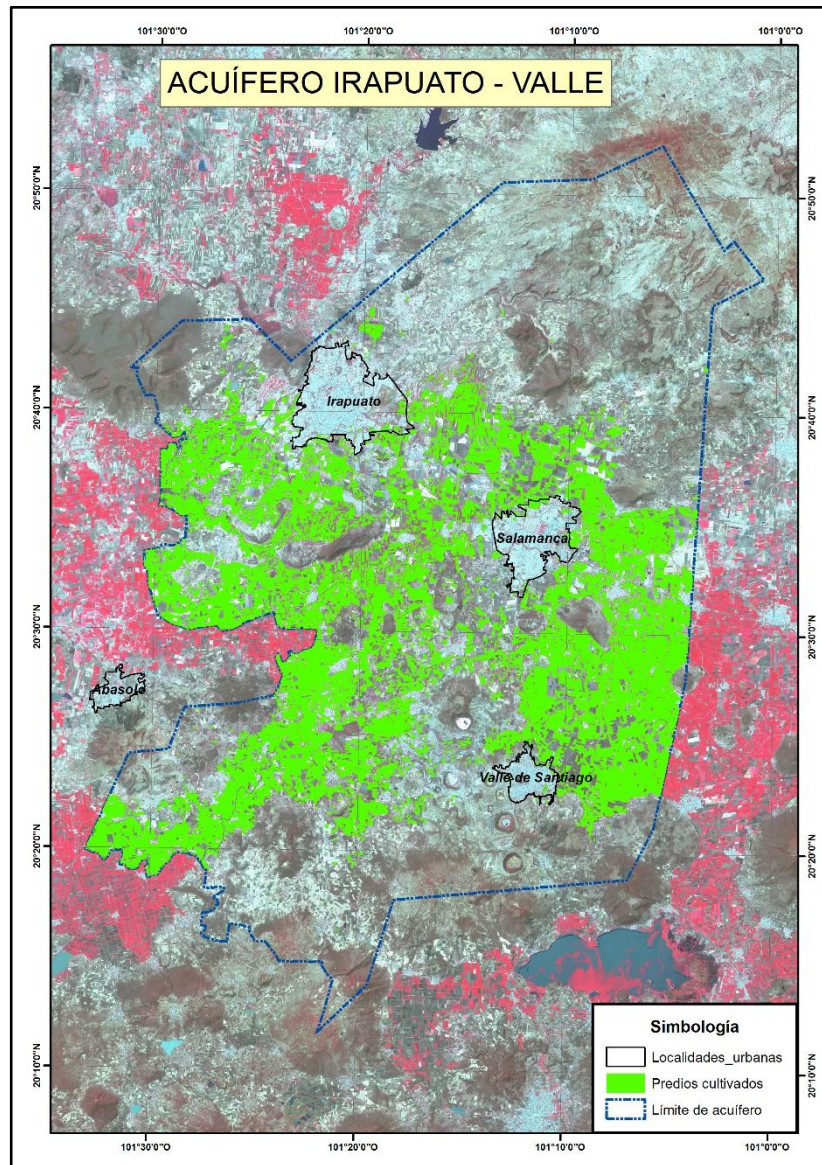


Figura 22. Perímetro del acuífero y zona cultivada en Irapuato Valle.

Por parte del personal del IMTA se llevó a cabo la presentación de los objetivos del proyecto interno TH1915.1, en el cual se seleccionó el acuífero



Irapuato Valle por su condición de sobreexplotación de agua y por las repercusiones que puede tener en el futuro cercano.

Finalmente, con apoyo de personal del COTAS se llevó a cabo el recorrido de campo en las regiones representativas de los diferentes cultivos en el área de acuífero (Figura 23), como el cultivo de maíz, la de alfalfa, agave tequilero, zonas de agricultura cubierta (invernaderos), vegetales y zonas de frutales como la fresa.

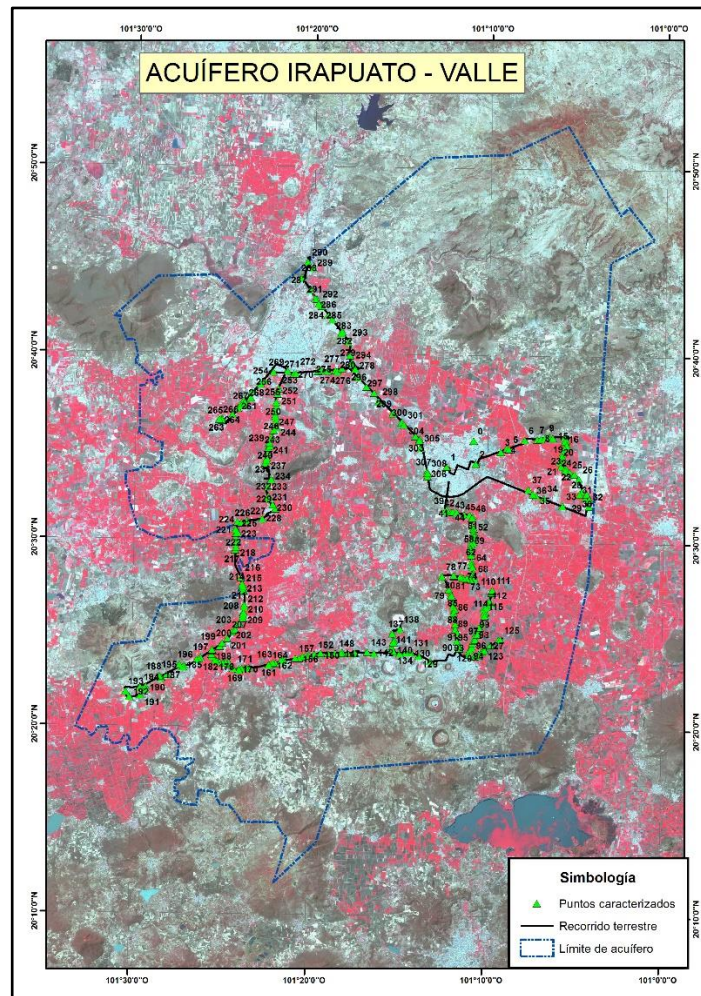


Figura 23. Ruta del recorrido y ubicación de puntos caracterizados.

Conclusiones:

Gran parte de la zona cultivada se encuentra comprendida dentro del distrito de riego 011, que cuenta con una amplia red de distribución de agua superficial para riego. No obstante, se viene observado un incremento en el aprovechamiento del





agua subterránea; debido principalmente a la contaminación prevaeciente en el agua superficial.

Por otra parte, se detectaron algunas limitaciones de la metodología empleada en este estadio, al no poder evaluar ciertos cultivos desarrollados de manera limita en la zona como son el agave tequilero, los espárragos y la agricultura protegida; ya que en los primeros dos casos, las plantas tienen una baja respuesta espectral, ya dominan los valores atribuidos al suelo; de manera semejante, en los casos de superficies correspondientes a agricultura protegida, las estructuras construidas en estas superficies impiden la detección de la vegetación que resguardan. Por lo que se requiere de un método más sofisticado para poder evaluarlas.

4.7.3. Trabajo de campo en el Acuífero Laguna de Hormigas.

El trabajo de campo se realizó durante el período del 1° al 4 de octubre del presente año y se orientó a visitar a sitios específicos en la zona agrícola, que permiten la observación directa de las características presentes y asociarlas a la imagen (Figura 24).

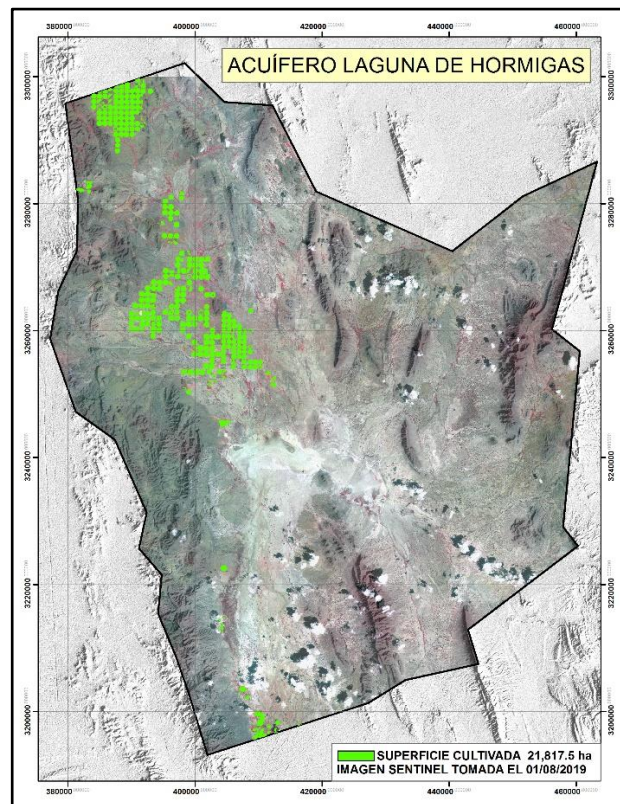


Figura 24. Perímetro y zona agrícola del acuífero Laguna de Hormigas, Chih.



Para el caso de Chihuahua, se estableció contacto con la Junta Central de Agua y Saneamiento de Chihuahua (JCAS), y mediante la participación del Ing. Oscar Estrada de la Subdirección de Estudios y Proyectos; se convocó a una reunión técnica en la que estuvieron presentes, el Ing. Carlos Navarrete y MC Marcela Rascón de la Secretaría de Desarrollo Rural.

En esta reunión personal de IMTA, llevó a cabo la presentación de los objetivos del proyecto interno TH1915.1, en el cual se seleccionó el acuífero Laguna de Hormigas por su condición de sobreexplotación de agua y por las repercusiones que puede tener en el futuro cercano. Por otra parte, el Dr. Alberto González llevó a cabo la presentación del proyecto con fondos CONACYT sobre el estudio de la evaluación temporal de cultivos en el Distrito de Riego aplicando técnicas de sensores remotos utilizando drones para el registro espacial.

Cabe mencionar que derivado de las condiciones meteorológicas que provocaron precipitaciones a lo largo de los días de la comisión, no fue posible desarrollar el recorrido por el acuífero Las Hormigas, como se tenía planeado originalmente, ya que los accesos al mismo fueron afectados por el temporal. Por lo que de acuerdo con el personal de la JCAS se llevó a cabo un recorrido alternativo por la zona del acuífero Cuauhtémoc y Meoqui - Delicias (Figura 25), en este último contándose con el apoyo del personal de distrito de riego administrado por la CONAGUA.

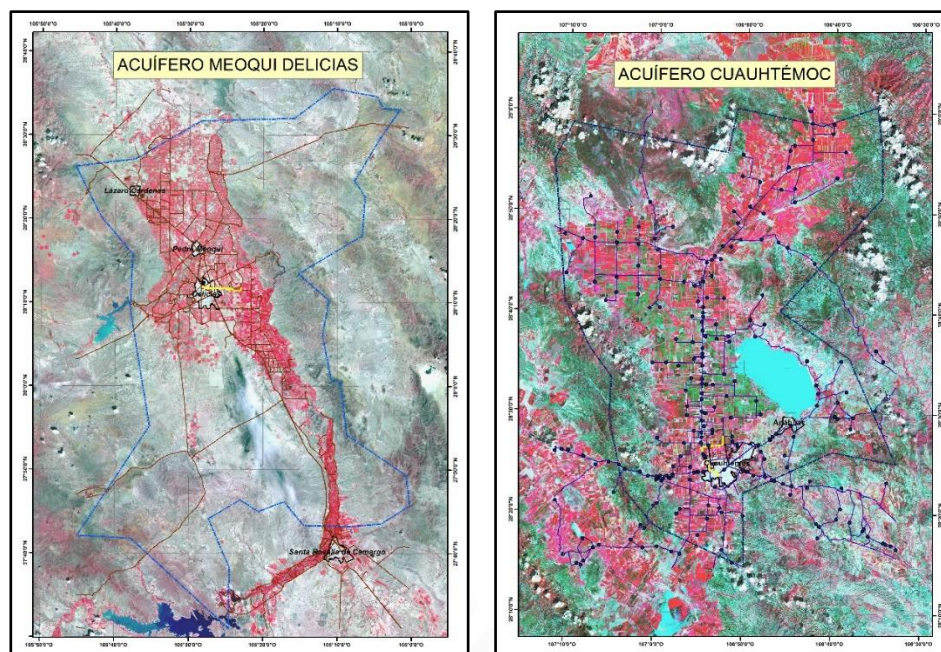


Figura 25. Mapas con los perímetros de los acuíferos Meoqui Delicias (izquierda) y Cuauhtémoc (derecha)





En ambas zonas, las zonas representativas de los cultivos en el área fueron las correspondientes a los cultivos de maíz, nogal, avena y frutales como manzana. Además, se llevó a cabo un registro de puntos de control terrestre con GPS para apoyar la georreferencia de los mosaicos fotográficos obtenidos a partir de dron.

Conclusiones:

Como resultado de la presentación del proyecto a los especialistas de JCAS se planteó el interés de contar con este tipo de herramientas, tanto para aplicaciones de uso público urbano del agua como agrícola. Pues en lo relativo al primer punto mencionado, manifestaron que han tenido problemas para el abastecimiento de agua doméstica debido a que aprovechamientos periurbanos con permiso de explotación para uso urbano, son usados con fines agrícolas. Esto ha provocado un fuerte descenso en el nivel freático que a su vez ha impactado a varios de los pozos administrados por la Junta y que en varios casos se han secado, produciendo el desabasto de la zona urbana a la que daban servicio.

Con respecto al tema agrícola, la herramienta les es de utilidad para detectar aprovechamientos tanto registrados como no registrados, dado que han observado de manera indirecta la dinámica en el desarrollo y expansión de la superficie de riego, en acuíferos estatales con capacidad de recarga muy limitada y numerosos aprovechamientos que la superan.

En cuanto a lo observado distrito de riego Meoqui Delicias, se planteó la necesidad de este tipo de herramientas y productos, para apoyar la validación de las estadísticas agrícolas y su distribución en el mapa del catastro predial del distrito, ya que no obstante de contar con sistemas de información geográfica y cartografía digital, no tienen acceso a imágenes de satélite ni el personal capacitado para su manejo. Lo que constituye un nicho de oportunidad para desarrollar un proyecto de transferencia y capacitación en el manejo de esta tecnología.





5. RESULTADOS

El principal producto de este estudio lo constituyen los mapas de zonas cultivadas, cuyas superficies son reportadas a nivel acuífero y región hidrológica administrativa.

Los mapas se presentan en medios digitales y fueron obtenidos a partir del procesamiento de imágenes Sentinel 2 que tienen una resolución espacial de 10 metros, y de imágenes LANDSAT con resolución de 30 metros, que en su mayoría fueron tomadas entre agosto y octubre de 2018 y para casos limitados en febrero y abril de 2019.

El área mínima cartografiable se estableció en 2 ha para la mayor parte de ellos. Sin embargo, para los casos en donde se observó una gran dispersión y fragmentación del espacio agrícola, se redujo a 0.8 de hectárea, como por ejemplo en el acuífero de Tecamachalco, Pue; en donde si se hubiera mantenido el área originalmente planteado, más de la mitad de la superficie agrícola de este acuífero habría quedado eliminada.

Otro producto que se generó a partir de imágenes LANDSAT, lo constituyen los espaciomapas elaborados para las regiones hidrológicas administrativas donde se ubicaron los 105 acuíferos sobreexplotados en 2015. Las regiones hidrológicas administrativas cubiertas fueron: Península de Baja California, Noroeste, Río Bravo, Cuencas Centrales del Norte, Lerma Santiago Pacífico, Pacífico Norte, Balsas y Valle de México.

Ambos productos serán conjuntados y organizados en una *file geodatabase*, compatible con el software ArcMap, ver. 10.4. Misma que será almacenada en un DVD y anexa al presente informe.

Otro producto que se elaboró, fue la caracterización de caracterización hidrogeológica de los tres acuíferos y que se presenta más adelante en el presente capítulo.

Y para finalizar, se presenta el análisis multitemporal de los acuíferos seleccionados, en donde se observa la dinámica de la superficie agrícola en el intervalo definido para cada una de ellos.



5.1. Región hidrológica administrativa Río Bravo

A continuación, en la Figura 26 se presenta el mapa de RHA, al que para darle un contexto físico geográfico, se colocó como base de la información temática el mosaico de imágenes LANDSAT tomadas en 2017, construido con escenas seleccionadas por su calidad espectral y escasa cobertura de nubes. Se empleó la combinación de bandas 7, 5, 3 (RGV) en la que se observan los colores naturales y baja influencia atmosférica. A esto se superpusieron los mapas de zonas cultivadas en color rojo y los polígonos de los acuíferos analizados. Posteriormente en la Tabla 8 se presenta las superficies cultivadas en cada acuífero y la fuente de la cual se fueron obtenidas. La superficie total regional de zonas cultivadas en el año 2018 fue de 475,368 ha

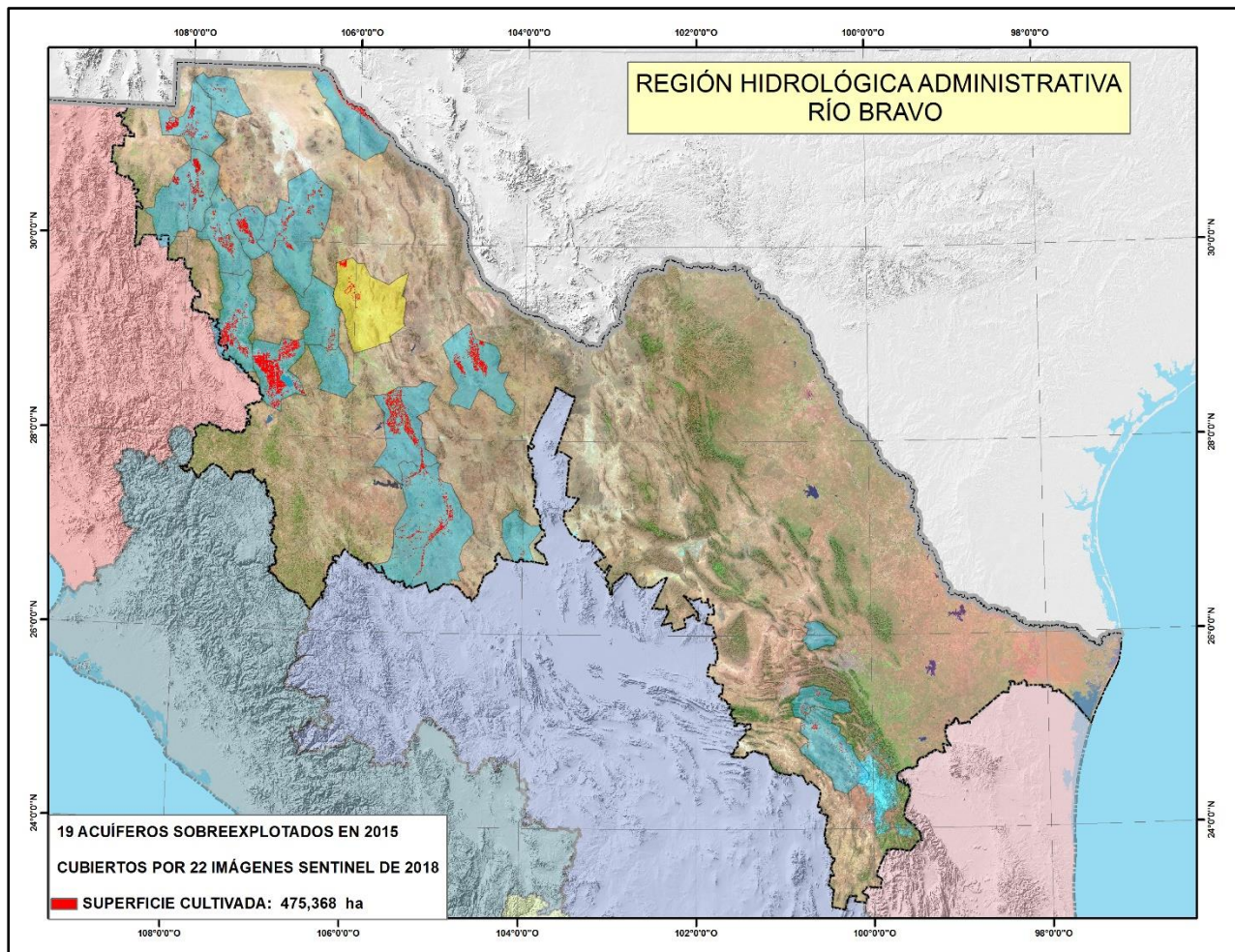


Figura 26. Mapa de áreas cultivadas sobre acuíferos sobreexplotados en 2015 en la RHA.



Tabla 8. Superficie de cultivo de riego sobre acuíferos sobreexplotados en 2015 en la RHA Río Bravo.

| ACUÍFERO | ARCHIVO | ESTADO | SATÉLITE | FECHA DE TOMA | HA |
|---|--|------------|------------|---------------------|-------------------|
| ASCENSIÓN | Agrícola_acuífero_Ascensión_20180914 | CHIHUAHUA | SENTINEL 2 | 14/09/2018 | 23,483.38 |
| BAJA BABÍCORÁ | Agrícola_acuífero_B_Babicora_20180916y0802 | CHIHUAHUA | SENTINEL 2 | 16/09 - 02/08/2018 | 35,529.00 |
| BUENAVENTURA | Agrícola_acuífero_Buenaventura_20180916 | CHIHUAHUA | SENTINEL 2 | 16/09/2018 | 16,814.00 |
| CAMPO MINA | Agrícola_acuífero_Campo_Mina_20180803 | NUEVO LEÓN | SENTINEL 2 | 03/08/2018 | 192.82 |
| CASAS GRANDES | Agrícola_acuífero_Casas_Grandes_20180914 | CHIHUAHUA | SENTINEL 2 | 16/09/2018 | 27,812.87 |
| CHIHUAHUA - SACRAMENTO | Agrícola_acuífero_Chihuahua_Sacramento_20181011y0802 | CHIHUAHUA | SENTINEL 2 | 11/10 - 02/08/2018 | 2,014.00 |
| CUAUHTÉMOC | Agrícola_acuífero_Cuauhtémoc_20180802 | CHIHUAHUA | SENTINEL 2 | 02/08/2018 | 103,136.00 |
| EL SAUZ - ENCINILLAS | Agrícola_acuífero_El_Sauz_Encinillas_20181011 | CHIHUAHUA | SENTINEL 2 | 11/10/2018 | 5,868.00 |
| FLORES MAGÓN - VILLA AHUMADA | Agrícola_acuífero_Flores_Magón_Villa_Ahumada_20180827 | CHIHUAHUA | SENTINEL 2 | 27/08/2018 | 22,013.00 |
| JIMÉNEZ - CAMARGO | Agrícola_acuífero_Jiménez_Camargo_20181008y0720 | CHIHUAHUA | SENTINEL 2 | 20/07/2018 | 46,268.00 |
| LAGUNA DE PALOMAS | Agrícola_acuífero_Laguna_de_Palomas_20190302 | CHIHUAHUA | SENTINEL 2 | 02/03/2019 | 1,632.00 |
| LAGUNA DE HORMIGAS | Agrícola_acuífero_Laguna_de_Hormigas_20181011 | CHIHUAHUA | SENTINEL 2 | 01/09/2018 | 21,817.58 |
| LAGUNA LA VIEJA | Agrícola_acuífero_Laguna_La_Vieja_20180916 | CHIHUAHUA | SENTINEL 2 | 16/09/2018 | 17,034.00 |
| LOS JUNCOS | Agrícola_acuífero_Los_Juncos_20180824 | CHIHUAHUA | LANDSAT 8 | 24/08/2018 | 40,640.00 |
| MEOQUI - DELICIAS | Agrícola_acuífero_Meoqui_Delicias_20181003y0720 | CHIHUAHUA | SENTINEL 2 | 20/07/ - 03/10/2018 | 65,862.00 |
| NAVIDAD - POTOSÍ - RAÍCES | Agrícola_acuífero_Navidad_Potosí_Raíces_20180803 | NUEVO LEÓN | SENTINEL 2 | 03/08/2018 | 20,581.99 |
| PALOMAS - GUADALUPE VICTORIA | Agrícola_acuífero_Palomas_Guadalupe_Victoria_20180914 | CHIHUAHUA | SENTINEL 2 | 14/09/2018 | 2,143.00 |
| REGION MANZANERA - ZAPALINAMÉ | Agrícola_acuífero_Región_Manzanera_Zapalinamé_20180803 | COAHUILA | SENTINEL 2 | 03/08/2018 | 12,082.76 |
| VALLE DE JUÁREZ | Agrícola_acuífero_Valle_de_Juárez_20180911 | CHIHUAHUA | SENTINEL 2 | 11/09/2018 | 10,444.00 |
| SUPERFICIE DE CULTIVOS DE RIEGO SOBRE ACUÍFEROS SOBREEXLOTADOS EN LA RHA | | | | | 475,368.39 |





5.2. Región hidrológica administrativa Cuencas Centrales del Norte

De manera semejante al punto anterior, se presenta el mapa regional con la distribución de las superficies cultivadas sobre en los 22 acuíferos sobreexplotados en 2015 ubicados en la región. La superficie de riego con cultivos en desarrollo obtenida mediante la metodología aplicada en este estudio fue de 297,823.87 ha (Figura 27). La Tabla 9, presenta las superficies por acuífero y la información de la imagen fuente de la que se obtuvo.

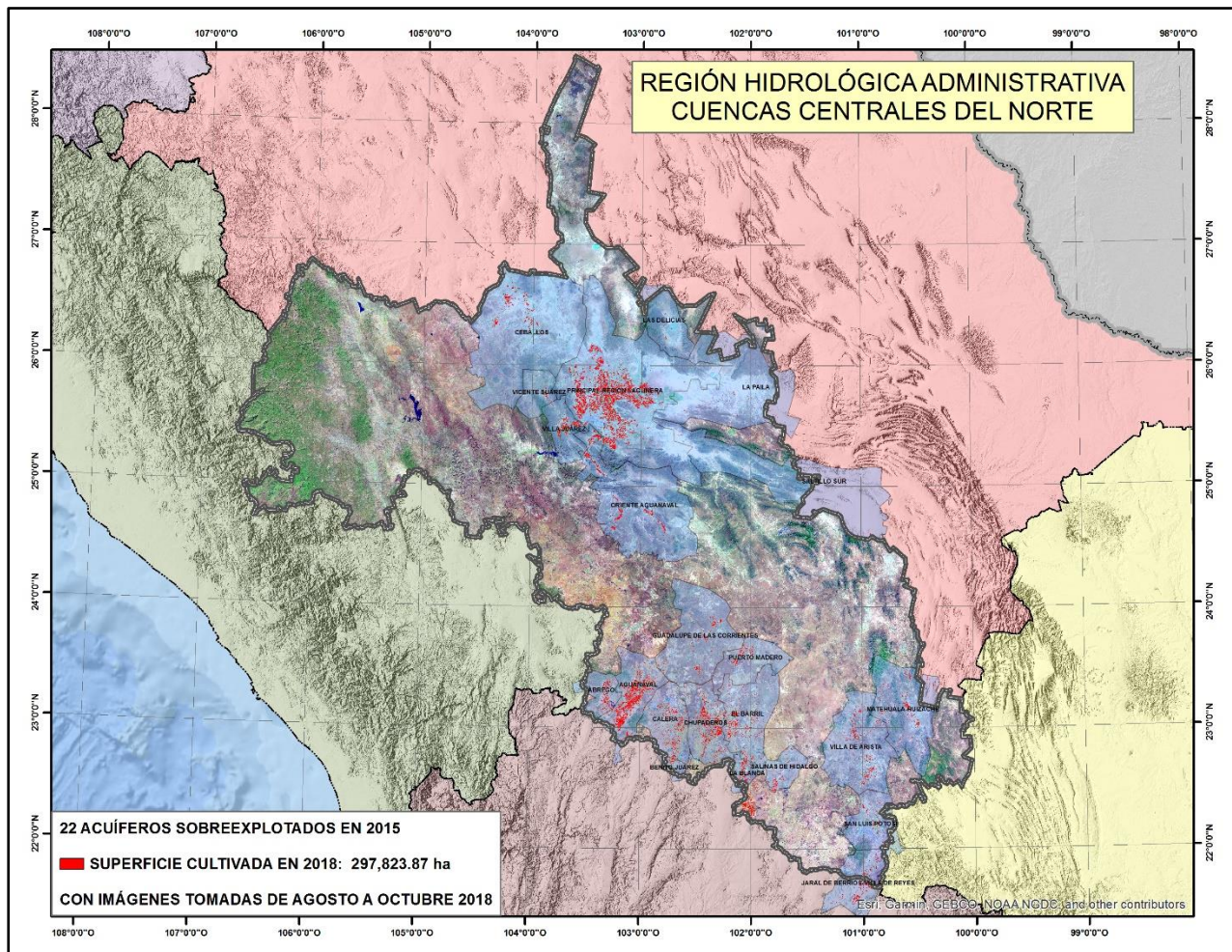


Figura 27. Mapa con la distribución de las superficies con cultivo en acuíferos sobreexplotados en la región.





Tabla 9. Superficie de cultivo de riego sobre acuíferos sobreexplotados en 2015 en la RHA.

| ACUÍFERO | ARCHIVO | ESTADO | SATÉLITE | FECHA DE TOMA | HA |
|---|--|-----------------|------------|---------------------|-------------------|
| ÁBREGO | Agricola_Acuifero_Abrego_20180827 | ZACATECAS | LANDSAT | 27/08/2018 | 5,614.88 |
| AGUANAVAL | Agricola_Acuifero_Aguanaval_20180827 | ZACATECAS | LANDSAT | 27/08/2018 | 37,104.60 |
| BENITO JUÁREZ | Agricola_Acuifero_Benito_Juárez_20181014 | ZACATECAS | LANDSAT | 14/10/2018 | 859.88 |
| CALERA | Agricola_Acuifero_Calera_20181014 | ZACATECAS | LANDSAT | 14/10/2018 | 12,820.08 |
| CEBALLOS | Agricola_acuifero_Ceballos_20181010 | DURANGO | LANDSAT | 05/10/2018 | 9,589.83 |
| CHUPADEROS | Agricola_Acuifero_Chupaderos_20181014 | ZACATECAS | LANDSAT | 14/10/2018 | 23,741.94 |
| EL BARRIL | Agricola_Acuifero_El_Barril_20181014y0719 | SAN LUIS POTOSI | LANDSAT | 07/19 - 14/10/2018 | 15,727.44 |
| GUADALUPE DE LAS CORRIENTES | Agricola_Acuifero_Guadalupe_Corrientes_20180827 | ZACATECAS | LANDSAT | 27/08/2018 | 5,557.01 |
| JARAL DE BERRIOS-VILLA DE REYES | Agricola_Acuifero_Jaral_de_Barrios_20180719 | SAN LUIS POTOSI | LANDSAT | 19/07/2018 | 9,362.79 |
| LA BLANCA | Agricola_Acuifero_La_Blanca_20181014y0719 | ZACATECAS | LANDSAT | 19/07/ - 14/10/2018 | 5,329.93 |
| LA PAILA | Agricola_Acuifero_La_Paila_20180827 | COAHUILA | LANDSAT | 27/08/2018 | 1,490.01 |
| LAS DELICIAS | Agricola_Acuifero_Las_Delicias_20181005 | COAHUILA | LANDSAT | 10/10/2018 | 552.06 |
| LORETO | Agricola_Acuifero_Loreto_20181014y0719 | ZACATECAS | LANDSAT | 07/19 - 14/10/2018 | 10,695.72 |
| MATEHUALA-HUIZACHE | Agricola_Acuifero_Matehuala_Huizache_20180719 | SAN LUIS POTOSI | LANDSAT | 19/07/ - 14/10/2018 | 9,035.37 |
| ORIENTE AGUANAVAL | Agricola_Acuifero_Oriente_Aguanaval_Ago_Oct_2018 | DURANGO | LANDSAT | 08/ - 10/2018 | 14,661.27 |
| PRINCIPAL-REGIÓN LAGUNERA | Agricola_Acuifero_RPL_20181010 | COAHUILA | LANDSAT | 05/10/2018 | 101,946.63 |
| PUERTO MADERO | Agricola_Acuifero_Puerto_Madero_20180827 | ZACATECAS | LANDSAT | 27/08/2018 | 3,759.53 |
| SALINAS DE HIDALGO | Agricola_Acuifero_Salinas_de_Hidalgo_20180719 | SAN LUIS POTOSI | LANDSAT | 19/07/2018 | 4,245.64 |
| SALTILLO SUR | Agricola_acuifero_Salttillo_Sur_20180717y1005 | COAHUILA | SENTINEL 2 | 17/07 - 05/10/2018 | 1,978.30 |
| SAN LUIS POTOSÍ | Agricola_Acuifero_San_Luis_Potosi_20180719 | SAN LUIS POTOSI | LANDSAT | 19/07/2018 | 3,237.19 |
| VICENTE SUÁREZ | Agricola_acuifero_Vicente_Suarez_20181010 | DURANGO | LANDSAT | 10/10/2018 | 1,234.53 |
| VILLA DE ARISTA | Agricola_Acuifero_Villa_de_Arista_20180719 | SAN LUIS POTOSI | LANDSAT | 19/07/2018 | 10,823.86 |
| VILLA JUÁREZ | Agricola_acuifero_Villa_Juarez_20181010 | DURANGO | LANDSAT | 05/10/2018 | 8,455.39 |
| SUPERFICIE DE CULTIVOS DE RIEGO SOBRE ACUÍFEROS SOBREEXLOTADOS EN LA RHA CUENCAS CENTRALES DEL NORTE | | | | | 297,823.87 |

5.3. **Región hidrológica administrativa Noroeste.**

Como resultado de la evaluación de la superficie de cultivos en pleno desarrollo, se obtuvo un área de 138,137.6 ha, distribuida en 10 acuíferos considerados como sobreexplotados en 2015 por la CONAGUA (Figura 28). La Tabla 10, presenta las superficies desarrolladas en cada acuífero.

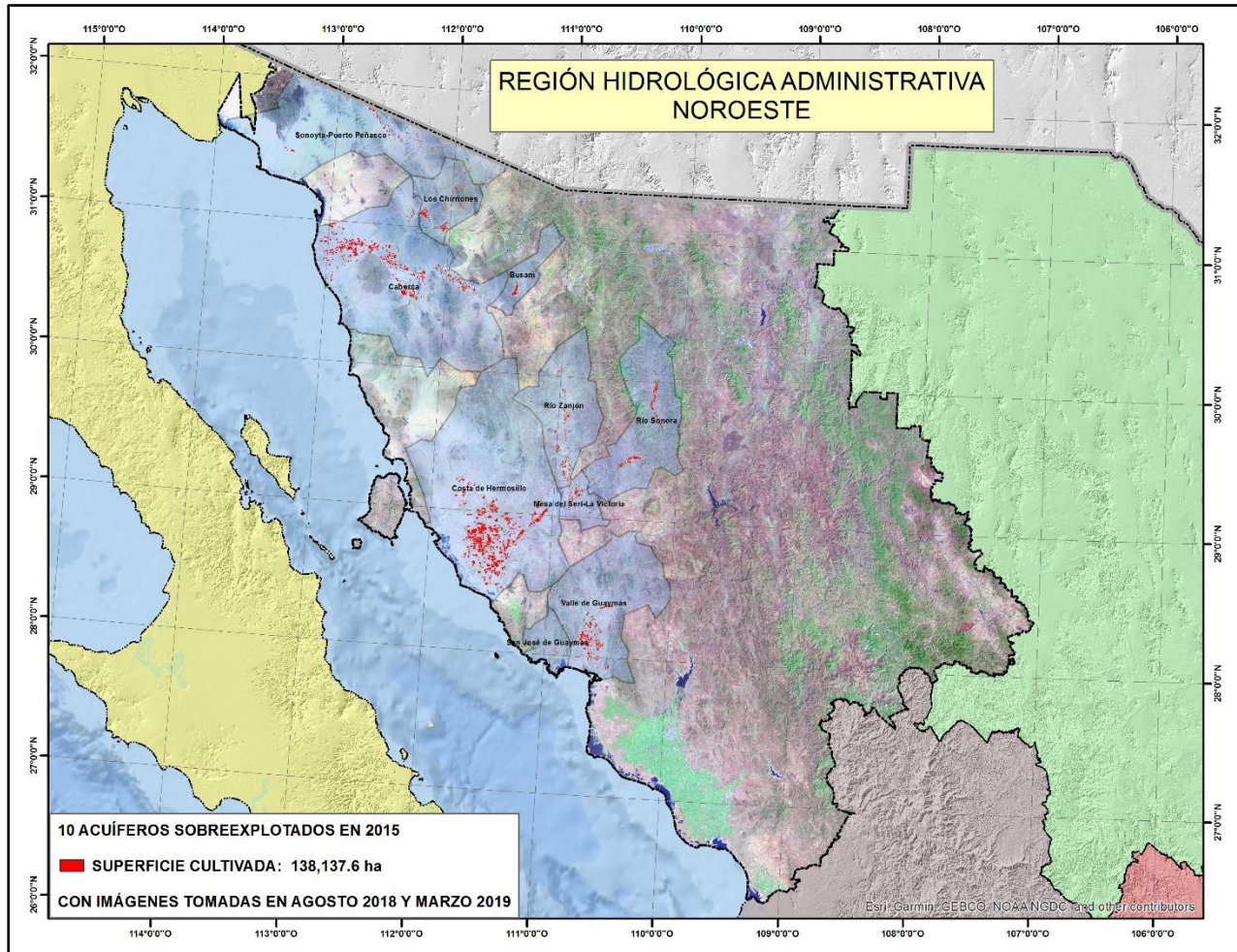


Figura 28. Mapa con la distribución de las superficies con cultivo en acuíferos sobreexplotados en la región.



Tabla 10. Superficie de cultivo de riego sobre acuíferos sobreexplotados en 2015 en la RHA

| ACUÍFERO | ARCHIVO | REGION HIDROLÓGICA ADMINISTRATIVA | ESTADO | SATÉLITE | FECHA DE TOMA | HA |
|--|---|-----------------------------------|--------|----------|---------------------|------------------|
| BUSANI | Agricola_Acuifero_Busani_20190425 | NOROESTE | SONORA | LANDSAT | 25/04/2019 | 2,219.4 |
| CABORCA | Agricola_Acuifeo_Cabroca_20190425y20190822 | NOROESTE | SONORA | LANDSAT | 25/04/ - 22/08/2019 | 32,725.6 |
| COSTA DE HERMOSILLO | Agricola_Acuifero_Costa_de_Hermosillo_20190301y0409 | NOROESTE | SONORA | LANDSAT | 01/03-09/04/2019 | 58,551.3 |
| LOS CHIRRIONES | Agricola_Acuifero_Los_Chirriones_20190425 | NOROESTE | SONORA | LANDSAT | 25/04/2019 | 3,697.8 |
| MESA DEL SERI - LA VICTORIA | Agricola_Acuifero_Mesa_del_Seri_Victoria_20190301 | NOROESTE | SONORA | LANDSAT | 01/03/2019 | 3,035.1 |
| RÍO SONORA | Agricola_Acuifero_Río_Sonora_20190808y0301 | NOROESTE | SONORA | LANDSAT | 01/03-08/08/2019 | 7,549.4 |
| RÍO ZANJÓN | Agricola_Acuifero_Río_Zanjón_20190808y0301 | NOROESTE | SONORA | LANDSAT | 01/03-08/08/2019 | 6,554.5 |
| SAN JOSÉ DE GUAYMAS | Agricola_Acuifero_Sn_José_de_Guaymas_20190301 | NOROESTE | SONORA | LANDSAT | 01/03/2019 | 580.9 |
| SONOYTA - PUERTO PEÑASCO | Agricola_Acuifero_Sonoyta_Puerto_Peñasco_20180822 | NOROESTE | SONORA | LANDSAT | 22/08/201 | 4,391.3 |
| VALLE DE GUAYMAS | Agricola_Acuifero_Valle_de_Guaymas_20190301 | NOROESTE | SONORA | LANDSAT | 01/03/2019 | 18,832.3 |
| SUPERFICIE DE CULTIVOS DE RIEGO SOBRE ACUÍFEROS SOBREPLOTADOS EN LA RHA | | | | | | 138,137.6 |



5.4. **Región hidrológica administrativa Península de Baja California.**

Como resultado del procesamiento de imágenes que cubren los 13 acuíferos sobreexplotados ubicados en la Península de Baja California, se obtuvo una superficie de 126,456.15 ha. (Figura 29); y las superficies obtenidas para cada acuífero se presentan en la Tabla 11.

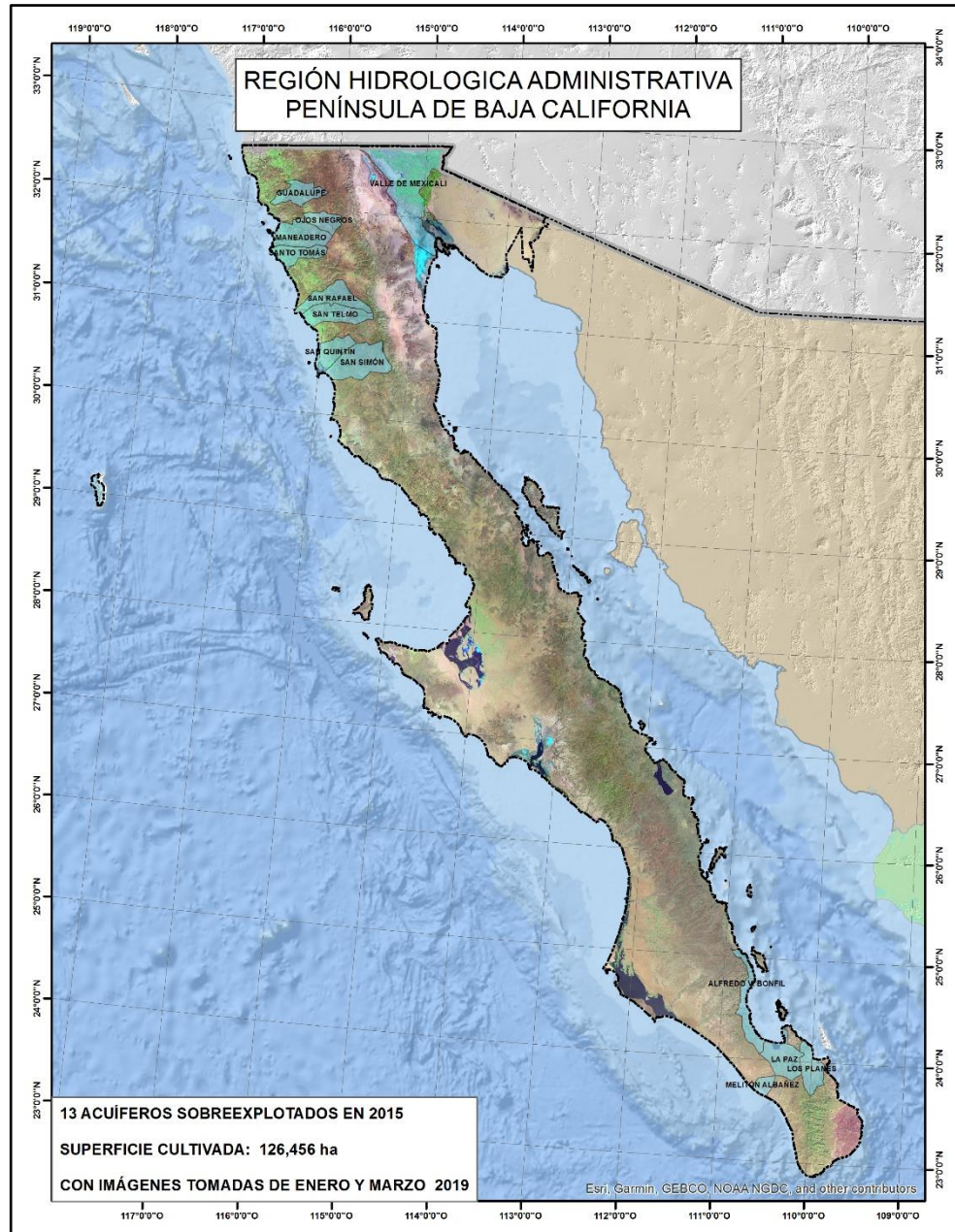


Figura 29. Mapa con la distribución de las superficies con cultivo en acuíferos sobreexplotados en la Península de Baja California





Tabla 11. Superficie de cultivo de riego sobre acuíferos sobreexplotados en 2015 en la RHA

| ACUÍFERO | ARCHIVO | ESTADO | SATÉLITE | FECHA DE TOMA | HA |
|--|---|---------------------|------------|---------------------|-------------------|
| ALFREDO V. BONFIL | Agrícola_AlfredoV_12_01_2019.shp | BAJA CALIFORNIA SUR | SENTINEL 2 | 12/01/2019 | 0.0 |
| GUADALUPE | Agrícola_Guadalupe_17_03_2019.shp | BAJA CALIFORNIA | SENTINEL 2 | 17/03/2019 | 4,363.1 |
| LA PAZ | Agrícola_LaPaz_12_01_2019.shp | BAJA CALIFORNIA SUR | SENTINEL 2 | 12/01/2019 | 1,146.7 |
| LOS PLANES | Agrícola_LosPlanes_12_01_2019.shp | BAJA CALIFORNIA SUR | SENTINEL 2 | 12/01/2019 | 1,115.9 |
| MANEADERO | Agrícola_Maneadero_17_03_2019.shp | BAJA CALIFORNIA | SENTINEL 2 | 17/03/2019 | 3,359.5 |
| MELITÓN ALBAÑEZ | Agrícola_MelitonAlbáñez_12_01_2019.shp | BAJA CALIFORNIA SUR | SENTINEL 2 | 12/01/2019 | 44.9 |
| OJOS NEGROS | Agrícola_OjosNegros_17_03_2019.shp | BAJA CALIFORNIA | SENTINEL 2 | 17/03/2019 | 7,657.1 |
| SAN QUINTÍN | Agrícola_SanQuintin_22_03_2019.shp | BAJA CALIFORNIA | SENTINEL 2 | 22/03/2019 | 12,976.2 |
| SAN RAFAEL | Agrícola_SanRafael_22_03_2019.shp | BAJA CALIFORNIA | SENTINEL 2 | 22/03/2019 | 5,695.2 |
| SAN SIMÓN | Agrícola_SanSimon_26_01_2019.shp | BAJA CALIFORNIA | SENTINEL 2 | 26/01/2019 | 5,046.3 |
| SAN TELMO | Agrícola_SanTelmo_22_03_2019.shp | BAJA CALIFORNIA | SENTINEL 2 | 22/03/2019 | 10,448.5 |
| SANTO TOMÁS | Agrícola_SantoTomas_22_03_2019y17_03_2019.shp | BAJA CALIFORNIA | SENTINEL 2 | 22/03/ - 17/03/2019 | 901.3 |
| VALLE DE MEXICALI | Agrícola_ValleDeMexicali_22_03_2019.shp | BAJA CALIFORNIA | SENTINEL 2 | 22/03/2019 | 73,701.5 |
| SUPERFICIE DE CULTIVOS DE RIEGO SOBRE ACUÍFEROS SOBREPLOTADOS EN LA RHA | | | | | 126,456.15 |



5.5. *Región hidrológica administrativa Pacífico Norte*

Los resultados obtenidos en la evaluación de las áreas con cultivo en máximo desarrollo sobre dos acuíferos sobreexplotados, alcanzan una superficie de 52,382 hectáreas (Figura 30) la Tabla 12 muestra los resultados para cada acuífero.

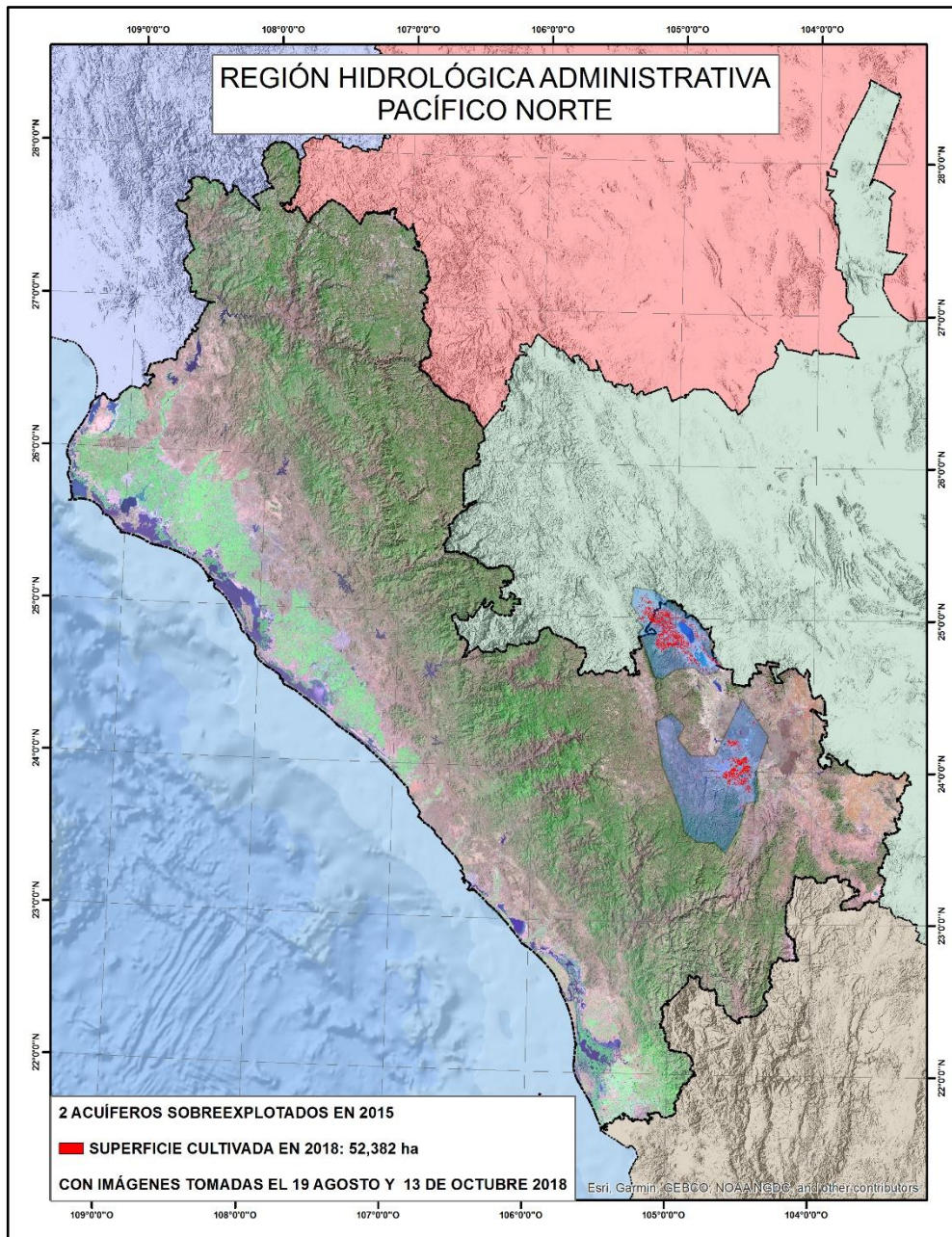


Figura 30. Mapa con la distribución de las superficies con cultivo en acuíferos sobreexplotados.





Tabla 12. Superficie de cultivo de riego sobre acuíferos sobreexplotados en 2015 en la RHA Pacífico Norte

| ACUÍFERO | ARCHIVO | ESTADO | SATÉLITE | FECHA DE TOMA | HA |
|--|---|---------|------------|---------------|------------------|
| VALLE DEL GUADIANA | Agricola_Acuifero_Valle_del_Guadiana_19_Ago_2018 | DURANGO | SENTINEL 2 | 19/08/2018 | 18,988.10 |
| VALLE DE SANTIAGUILLO | Agricola_Acuifero_Valle_de_Santiagoullo_13_Oct_2018 | DURANGO | SENTINEL 2 | 13/10/2018 | 33,394.80 |
| SUPERFICIE DE CULTIVOS DE RIEGO SOBRE ACUÍFEROS SOBREPLOTADOS EN LA RHA | | | | | 52,382.90 |

Tabla 13 . Superficie de cultivo de riego sobre acuíferos sobreexplotados en 2015 en la RHA Valle de México

| ACUÍFERO | ARCHIVO | ESTADO | SATÉLITE | FECHA DE TOMA | HA |
|--|---|------------------|------------|---------------|-----------------|
| CHALCO-AMECAMECA | Agricola_Acuifero_Chalco-Amecameca_20190313 | ESTADO DE MÉXICO | SENTINEL 2 | 13/03/2019 | 594.93 |
| CUAUTITLÁN-PACHUCA | Agricola_Acuifero_Cuautitlan-Pachuca_20190313 | ESTADO DE MÉXICO | SENTINEL 2 | 13/03/2019 | 7,958.07 |
| TEXCOCO | Agricola_Acuifero_Texcoco_20190313 | ESTADO DE MÉXICO | SENTINEL 2 | 13/03/2019 | 1,109.35 |
| ZONA METROPOLITANA DE LA CD. DE MÉXICO | Agricola_Acuifero_Zona_Metropolitana_CD_México_20190313 | CIUDAD DE MÉXICO | SENTINEL 2 | 13/03/2019 | 201.11 |
| SUPERFICIE DE CULTIVOS DE RIEGO SOBRE ACUÍFEROS SOBREPLOTADOS EN LA RHA VALLE DE MÉXICO | | | | | 9,863.46 |

Tabla 14. Superficie de cultivo de riego sobre acuíferos sobreexplotados en 2015 en la RHA Balsas

| ACUÍFERO | ARCHIVO | RHA | ESTADO | SATÉLITE | FECHA DE TOMA | HA |
|--|--|--------|--------|------------|------------------|-----------|
| VALLE DE TECAMACHALCO | Agrícola_Acuifero_Valle_de_Tecamachalco_20190301 | BALSAS | PUEBLA | SENTINEL 2 | 01/03/2019 | 12,226.31 |
| SUPERFICIE DE CULTIVOS DE RIEGO SOBRE ACUÍFEROS SOBREPLOTADOS EN LA RHA | | | | | 12,226.31 | |



5.6. *Región hidrológica administrativa Valle de México.*

La superficie de cultivos en desarrollo cuantificados en los acuíferos de la RHA alcanzó una superficie de 9,863.46 hectáreas (Figura 31). La Tabla 13 presenta los resultados obtenidos por acuífero.

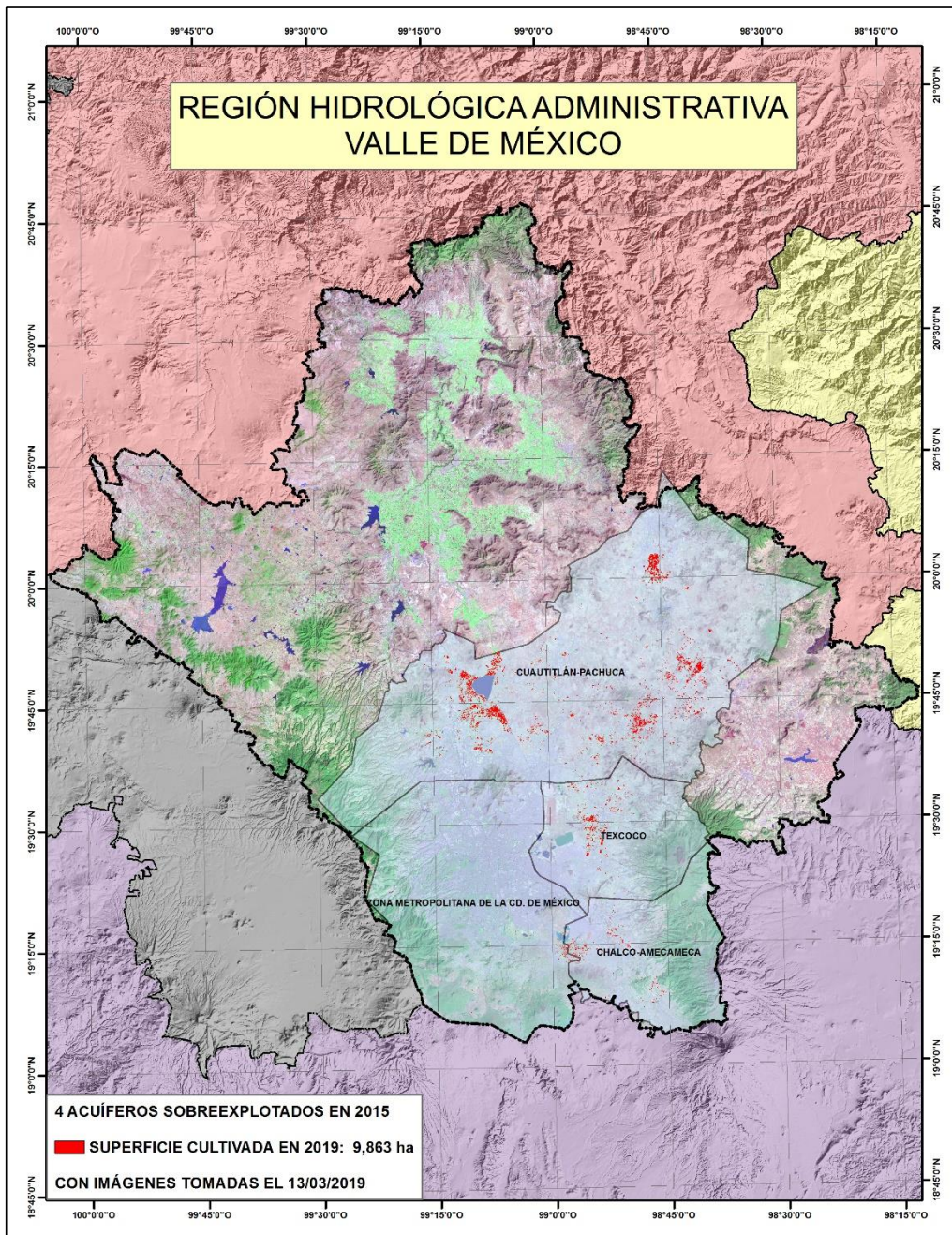


Figura 31. Mapa con la distribución de áreas cultivadas en la PHA Valle de México.





5.7.Región hidrológica administrativa Balsas.

La superficie cultivada en el acuífero sobreexplotado ubicado en la RHA Balsas fue de 12,226.31 hectáreas (Tabla 14). Cabe mencionar que gran parte de las superficies dedicadas a la agricultura en este acuífero son inferiores a 2 ha. Por lo que se ajustó el área mínima cartografiable a 0.8 ha, con objeto de hacer más precisa la evaluación de la zona.

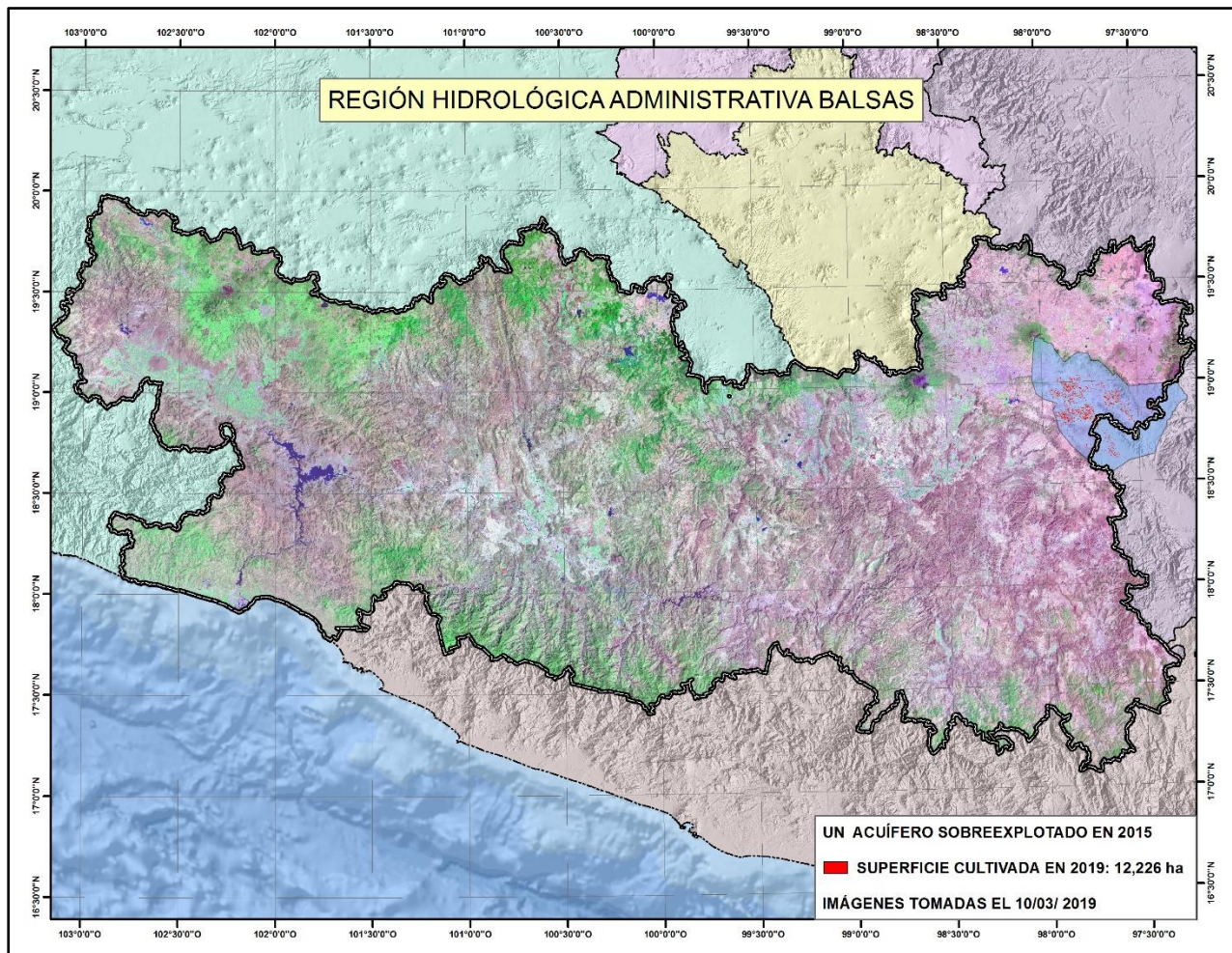


Figura 32. Mapa con la distribución de áreas cultivadas en la PHA Balsas.





4.8 Región hidrológica administrativa Lerma Santiago Pacífico.

En la presente RHA fueron evaluados 32 acuíferos, en los que se distribuyó una superficie de 468,599.02 hectáreas (Figura 33). La Tabla 15 presenta los resultados obtenidos para cada acuífero.

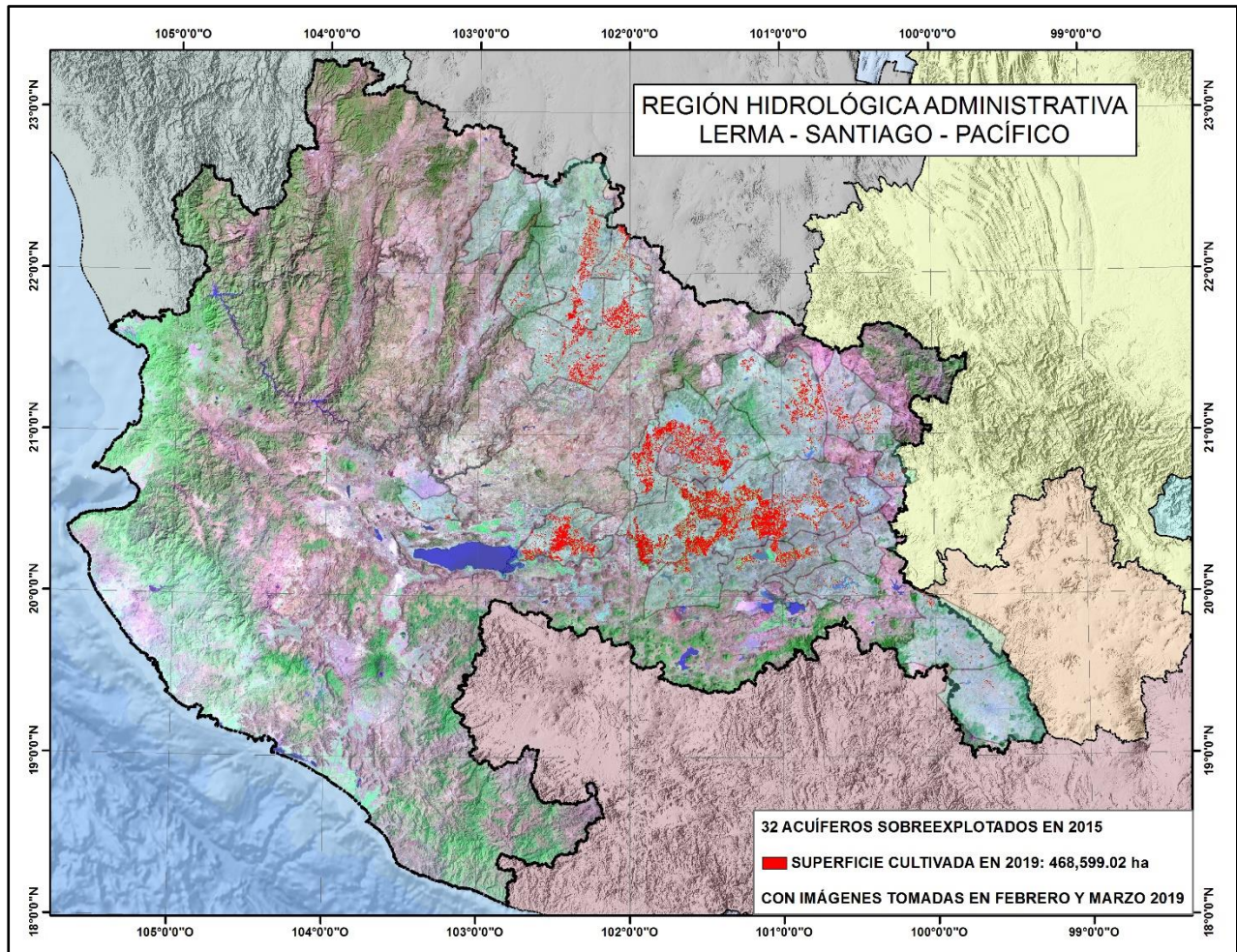


Figura 33. Mapa con la distribución de áreas cultivadas en la PHA Lerma Santiago Pacífico.





Tabla 15. Superficie de cultivo de riego sobre acuíferos sobreexplotados en 2015 en la RHA Lerma Santiago Pacífico.

| ACUÍFERO | ARCHIVO | ESTADO | SATÉLITE | FECHA DE TOMA | HA |
|---------------------------------|--|---------------------|----------|--------------------------------------|-----------|
| BRISEÑAS YURÉCUARO | Agricola_Acuifero_Briseñas_Yurécuaro_Feb_2019 | MICHOACÁN DE OCAMPO | LANDSAT | 28/02/2019 - 07/03/2019 | 16,628.99 |
| CIENEGA PRIETA - MOROLEÓN | Agricola_Acuifero_Ciénega_Prieta-Moroleón_Feb_2019 | GUANAJUATO | LANDSAT | 21/02/2019 | 13,563.15 |
| CUENCA ALTA DEL RÍO LAJA | Agricola_Acuifero_Cuenca_Alta_del_Río_Laja_Feb_2019 | GUANAJUATO | LANDSAT | 28/02/2019 - 21/02/2019 - 09/03/2019 | 27,314.58 |
| DR. MORA - SAN JOSÉ DE ITURBIDE | Agricola_Acuifero_Dr_Mora-San_José_Iturbide_Mar_2019 | GUANAJUATO | LANDSAT | 21/02/2019 - 09/03/2019 | 5,629.71 |
| EL LLANO | Agricola_Acuifero_El_Llano_Mar_2019 | AGUASCALIENTES | LANDSAT | 07/03/2019 - 28/02/2019 | 11,739.70 |
| ENCARNACIÓN | Agricola_Acuifero_Encarnación_Feb_Mar_2019 | JALISCO | LANDSAT | 07/03/2019 - 21/02/2019 | 43,342.95 |
| IRAPUATO - VALLE | Agricola_Acuifero_Irapuato-Valle_Feb_2019 | GUANAJUATO | LANDSAT | 28/02/2019 | 67,959.15 |
| IXTLAHUACA - ATLACOMULCO | Agricola_Acuifero_Ixtlahuaca-Atlacomulco_Feb_2019 | ESTADO DE MÉXICO | LANDSAT | 21/02/2019 | 2,317.52 |
| LA BARCA | Agricola_Acuifero_La_Barca_Feb_Mar_2019 | JALISCO | LANDSAT | 28/02/2019 - 07/03/2019 | 25,192.29 |
| LAGO DE CUITZEO | Agricola_Acuifero_Lago_de_Cuitzeo_Feb_2019 | GUANAJUATO | LANDSAT | 21/02/2019 | 386.57 |
| LAGUNA SECA | Agricola_Acuifero_Laguna_Seca_Feb_2019 | GUANAJUATO | LANDSAT | 28/02/2019 - 09/03/2019 | 9,643.23 |
| OJOCALIENTE | Agricola_Acuifero_Ojocaliente_Mar_2019 | ZACATECAS | LANDSAT | 07/03/2019 - 28/02/2019 | 664.74 |
| PASTOR ORTIZ - LA PIEDAD | Agricola_Acuifero_Pastor_Ortiz-La_Piedad_Feb_2019 | MICHOACÁN DE OCAMPO | LANDSAT | 28/02/2019 | 14,286.57 |
| PÉNJAMO - ABASOLO | Agricola_Acuifero_Pénjamo-Abasolo_Feb_2019 | GUANAJUATO | LANDSAT | 28/02/2019 | 55,377.85 |
| RÍO TURBIO | Agricola_Acuifero_Río_Turbio_Feb_2019 | GUANAJUATO | LANDSAT | 28/02/2019 | 24,958.73 |
| SALVATIERRA - ACÁMBARO | Agricola_Acuifero_Salvatierra-Acámbaro_Feb_2019 | GUANAJUATO | LANDSAT | 21/02/2019 | 5,688.98 |
| SILAO - ROMITA | Agricola_Acuifero_Silao-Romita_Feb_2019 | GUANAJUATO | LANDSAT | 28/02/2019 | 30,333.43 |
| TOLUQUILLA | Agricola_Acuifero_Toluquilla_Mar_2019 | JALISCO | LANDSAT | 07/03/2019 | 1,498.01 |
| VALLE DE ACAMBARO | Agricola_Acuifero_Valle_de_Acámbaro_Feb_2019 | GUANAJUATO | LANDSAT | 21/02/2019 | 3,221.64 |
| VALLE DE AGUASCALIENTES | Agricola_Acuifero_Valle_de_Aguascalientes_Feb_Mar_2019 | AGUASCALIENTES | LANDSAT | 07/03/2019 - 28/02/2019 | 29,546.02 |
| VALLE DE AMAZCALA | Agricola_Acuifero_Valle_de_Amazcala_Feb_2019 | QUERÉTARO | LANDSAT | 21/02/2019 - 09/03/2019 | 2,122.85 |
| VALLE DE BUENAVISTA | Agricola_Acuifero_Valle_de_Buenavista_Feb_2019 | QUERÉTARO | LANDSAT | 21/02/2019 - 09/03/2019 | 549.62 |
| VALLE DE CELAYA | Agricola_Acuifero_Valle_de_Celaya_Feb_2019 | GUANAJUATO | LANDSAT | 07/03/2019 | 37,632.92 |
| VALLE DE CHICALOTE | Agricola_Acuifero_Valle_de_Chicalote_Mar_2019 | AGUASCALIENTES | LANDSAT | 28/02/2019 - 21/02/2019 | 7,946.33 |
| VALLE DE HUIMILPAN | Agricola_Acuifero_Valle_de_Huimilpan_Feb_2019 | QUERÉTARO | LANDSAT | 07/03/2019 - 28/02/2019 | 764.66 |



| | | | | | |
|--|--|-------------------------------|---------|------------|-------------------|
| VALLE DE LA CUEVITA | Agricola_Acuifero_Valle_de_la_Cuevita_Feb_2019 | GUANAJUATO | LANDSAT | 21/02/2019 | 930.83 |
| VALLE DE LEÓN | Agricola_Acuifero_Valle_de_León_Feb_2019 | GUANAJUATO | LANDSAT | 21/02/2019 | 21,679.64 |
| VALLE DE QUERÉTARO | Agricola_Acuifero_Valle_de_Querétaro_Feb_2019 | QUERÉTARO | LANDSAT | 28/02/2019 | 1,730.02 |
| VALLE DE TOLUCA | Agricola_Acuifero_Valle_de_Toluca_Ene_Feb_2019 | ESTADO DE MÉXICO | LANDSAT | 21/02/2019 | 723.80 |
| VALLE DE CALVILLO | Agricola_Acuifero_Valle_del_Calvillo_Mar_2019 | ZACATECAS y AGUASCALIENTES | LANDSAT | 21/02/2019 | 3,842.92 |
| VENADERO | Agricola_Acuifero_Valle_del_Calvillo_Mar_2019 | AGUASCALIENTES | LANDSAT | 07/03/2019 | 211.90 |
| VILLANUEVA | Agricola_Acuifero_Villanueva_Mar_2019 | ZACATECAS | LANDSAT | 07/03/2019 | 1,169.73 |
| SUPERFICIE DE CULTIVOS DE RIEGO SOBRE ACUÍFEROS SOBREEXPLOTADOS EN LA RHA | | | | | 468,599.02 |



5.8. Caracterización hidrogeológica de tres acuíferos.

Como se mencionó con anterioridad, con objeto de evaluar la dinámica de que se presenta en las zonas agrícolas de riego con agua subterránea, se seleccionaron los acuíferos Laguna de Hormigas, Chih; Principal Región Lagunera, Coah.-Dgo; e Irapuato Valle; a continuación se presentan sus principales características.

5.8.1. Trabajo de campo en el Acuífero Laguna de Hormigas

Localización. El Acuífero Laguna de Hormigas, se localiza en la porción centro oriental del Estado de Chihuahua, entre los paralelos $28^{\circ} 48' 10.6''$ y $29^{\circ} 53' 41.6''$ de latitud norte y los meridianos $106^{\circ} 34' 40.8''$ y $105^{\circ} 18' 38.6.6''$ de longitud oeste; cubre una superficie aproximada de 6 014 km². Colinda al norte con los acuíferos Laguna Tres Castillos y Laguna de Tarabillas; al este con Bajo Rio Conchos; al sur con Potrero del Llano, Aldama-San Diego, Tabalaopa-Aldama y al oeste con Laguna El Diablo y el Sauz-Encinillas (Conagua, 2018).

Municipios. Comprende parcialmente los municipios Chihuahua, Aldama, Ahumada y Coyame del Sotol. Lo anterior tiene como base el archivo digital de la distribución municipal, emitido por CONABIO (Conabio, 2019), y el archivo digital de límites acuíferos editado por la Conagua (Conagua, 2018 b).

Clima. El clima que predomina en la zona es árido y extremoso. En la zona centro norte del acuífero tiene un clima seco templado (BWkw), con una temperatura media anual entre 12° y 18° C. La zona centro sur presenta un clima seco semicálido (BWhw), con temperatura media anual entre 18° y 22° C, mientras que al oeste y suroeste predomina un clima tipo seco templado (BSokw), con verano cálido y temperatura media anual entre 12° y 18° C. El valor de la temperatura media anual es de 16.3° C.

Las lluvias son características de zona áridas y semiáridas siendo aisladas, de alta intensidad y de poca duración, ocurriendo con mayor frecuencia en los meses de junio, julio, agosto, septiembre y octubre. En los meses de diciembre, enero y febrero se presentan lluvias intensas y agua nieve originadas por masas de aire frío, de baja intensidad, provenientes de la zona norte. La precipitación media anual es de 321.8 mm (Conagua, 2018).



Hidrología. El Acuífero se ubica en la Región Hidrológica 34, Cuencas Cerradas del Norte, constituida por pequeñas cuencas que depositan el agua pluvial en lagunas. Pertenece a la Subregión Cuencas Cerradas del Norte y a la cuenca hidrológica Arroyo El Carrizo y otros, la cual tiene una superficie de 21,450 km² y a la subcuenca Laguna el Cuervo (Laguna de Hormigas). La infraestructura hidráulica en la zona es escasa y se concentra en el extremo sur del acuífero. Se refiere a sistemas de riego ubicados en la zona de cultivo de Aldama, donde se encuentran presas pequeñas y una serie de canales no revestidos que transportan agua a las zonas de cultivo, entre los que predomina el nogal. Existen algunos sistemas de riego por aspersión y tanques elevados para la distribución de agua potable (Conagua 2018).

Acuífero. El acuífero se establece en un ambiente sedimentario compuesto por materiales (granulares, no consolidados) considerados de manera general de buena permeabilidad, que se encuentra rellenando los valles, es donde se ubican la mayoría de los aprovechamientos de la zona. Un segundo sistema acuífero se establece en las unidades de rocas fracturadas, con permeabilidad de media a alta, y conforman las formaciones Aurora, Benigno y Finlay.

Existe comunicación hidráulica en ambos sistemas acuíferos, a través de las fallas y fracturas. Se trata de un acuífero libre, que presenta zonas de semiconfinamiento local.

La recarga al acuífero se efectúa por infiltración del agua de lluvia que se precipita sobre la superficie del valle, piedemonte y sierras con permeabilidad adecuada. Existen aportaciones laterales procedentes de zonas serranas con permeabilidad media. A través de estructuras de carácter regional que manifiestan nuevamente la comunicación hidráulica entre ambos medios, existe aportación ascendente de la unidad fracturada hacia la unidad granular.

El acuífero se caracteriza por tener varios niveles piezométricos, el somero se encuentra en los primeros 30 m de profundidad, seguido por un nivel piezométrico que puede alcanzar hasta los 200 m, donde actualmente se extrae la mayor cantidad de agua en el sistema acuífero, posteriormente un nivel profundo, relacionado a un medio acuífero compuesto en su mayoría por rocas carbonatadas. La disposición espacial del material que rellena la cuenca del valle y la permeabilidad secundaria que pueda presentar el medio fracturado, son el principal control del régimen de flujo subterráneo. Se propone la existencia de tres sistemas o regímenes de flujo:

Flujo local. Asociado a la infiltración de agua meteórica de reciente precipitación. Se refiere a flujo que viaja en forma vertical y alimenta principalmente el nivel





freático. Cabe mencionar que, cuando su descenso no es interrumpido por unidades con permeabilidad baja, alimenta sus diferentes niveles piezométricos.

Flujo intermedio. Asociado a la recarga que se origina en las partes topográficamente altas de las sierras que circundan el valle, siempre y cuando posean características de permeabilidad apropiadas para infiltrar el agua de lluvia y permitir su tránsito hacia el acuífero. Gran parte del volumen de agua que recibe el acuífero está sustentado en un régimen tipo intermedio.

Flujo regional. Asociado al agua subterránea que circula por estructuras con presencia en la zona y que se evidencian por altas temperaturas que presentan algunos aprovechamientos, ya sea de este acuífero o de acuíferos vecinos, como es el caso del Acuífero El Sauz-Encinillas, donde se presentan temperaturas en el agua subterránea de hasta 39° C, además de condiciones isotópicas que así lo evidencian (Conagua 2018).

Piezometría. El nivele estático presenta valores que varían entre 1,190 y 1,250 msnm, que se ubican tanto en la parte centro sur del acuífero como al sureste del mismo. En la zona oriente los valores fluctúan entre 1,270 y 1,360 msnm, y es precisamente en esta zona donde el sistema acuífero tiene una de las entradas principales, misma que se evidencia por la diferencia de carga hidráulica en la zona. En la parte norte del acuífero la elevación del nivel estático se incrementa a medida que las condiciones topográficas hacen lo propio, mostrando valores que oscilan entre 1,220 hasta 1,240 msnm. La misma configuración de equipotenciales de elevación de nivele estático confirma la presencia de un sistema cerrado, es decir, no existen salidas subterráneas hacia acuíferos o cuencas vecinas (Conagua, 2018).

Balace de agua subterránea. Los resultados del balace de aguas subterráneas son trascritos de diario oficial de la federación (DOF, 2018), de fecha 4 de enero del 2019 (Tabla 16).

Tabla 16. Resultados del balace de aguas subterráneas, acuífero Laguna de Hormigas

| REGIÓN HIDROLÓGICO- ADMINISTRATIVA | ENTIDAD FEDERATIVA | CLAVE | ACUÍFERO | R | DCN | VEAS | | | | DMA | |
|--|-----------------------|-------|-----------------------|------|-----|--|------------|----------|----------|----------|-----------------------|
| | | | | | | VCAS | VEALA | VAPTYR | VAPRH | POSITIVA | NEGATIVA (DÉFICIT) |
| | | | | | | CIFRAS EN MILLONES DE METROS CÚBICOS ANUALES | | | | | |
| VI RÍO BRAVO | CHIHUAHUA | 0824 | LAGUNA DE HORMIGAS | 25.5 | 0.0 | 15.995057 | 209.681907 | 5.209300 | 0.000000 | 0.000000 | -205.386264 |





Nota: R: recarga total media anual; DCN: descarga natural comprometida; VEAS: volumen de extracción de aguas subterráneas; VCAS: volumen concesionado/asignado de aguas subterráneas; VEALA: volumen de extracción de agua en las zonas de suspensión provisional de libre alumbramiento y los inscritos en el Registro Nacional Permanente; VAPTYR: volumen de extracción de agua pendiente de titulación y/o registro en el REPDA; VAPRH: volumen de agua correspondiente a reservas, reglamentos y programación hídrica; DMA: disponibilidad media anual de agua del subsuelo. Las definiciones de estos términos son las contenidas en los numerales “3” (fracciones 3.10,3.12,3.18 y 3.25), y “4” (fracción 4.3), de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015. La actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea corresponde a la fecha de corte en el Registro Público de Derechos de Agua, al 31 de diciembre del 2015.

5.8.2. Acuífero Principal Región Lagunera, Durango-Coahuila

Localización. El acuífero Principal-Región Lagunera, se localiza en el extremo suroccidental del estado de Coahuila, en el límite con el estado de Durango, entre los paralelos 25°00' y 26°45' de latitud norte y entre los meridianos 102°15' y 103°50' de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 12,617 km².

Limita al norte con los acuíferos Acatita y Las Delicias; al este con La Paila, pertenecientes al estado de Coahuila; al sureste con Saltillo Sur y Cedros, del estado de Coahuila y Zacatecas, respectivamente; al sur con Oriente Aguanaval; al suroeste con Villa Juárez; al oeste con Vicente Suárez y al noroeste con al acuífero Ceballos; que pertenecen al estado de Durango (Conagua, 2018).

Municipios. El polígono del acuífero Principal Comarca Lagunera, se ubica dentro de los municipios: Torreón, Matamoros, Gómez Palacio, Mapimí, Tlahualilo, Francisco I. Madero, San Pedro, Viesca y de forma parcial en Parras y Lerdo. Lo anterior tiene como base el archivo digital de la distribución municipal, emitido por CONABIO (Conabio, 2019), y el archivo digital de límites acuíferos editado por la Conagua (Conagua, 2019).

Clima. Se clasifica como seco a desértico, semicálido con invierno seco, muy extremoso. La temperatura media varía entre 18 y 22 °C, con régimen de lluvias en verano y porcentaje de lluvia invernal entre 5 y 10.2% del total. En las sierras de mayor altura, Parras, El Rosario y Álamos, el clima semiseco templado; en tanto





que en las sierras bajas de Jimulco, Mapimí, EL Sarnoso, El Mármol y extremo oeste de la Sierra de Parras, domina el clima de tipo seco templado; con una temperatura media anual que varía entre 12 y 18 °C, temperatura del mes más frío entre -3 y 18 °C, y la del mes más cálido mayor a 18 °C, con régimen de lluvias en verano (Conagua, 2018).

Los valores promedio anuales de precipitación, temperatura y evaporación potencial son: 260 mm, 19.0 °C y 2500 mm, respectivamente.

Hidrología. Geográficamente, la zona de estudio está ubicada en la parte septentrional de la República Mexicana y ocupa las porciones suroeste del estado de Coahuila y noreste del estado de Durango.

La Comarca Lagunera, se ubica preferentemente en la Región Hidrológica 36, en esta región se localizan los Municipios de: Ocampo, Guanaceví, San Bernardo, Tepehuanes y Santiago Papasquiario del Estado de Durango caracterizados por una zona boscosa y montañosa que representa la Sierra Madre Occidental con altitudes de 3,020 m.s.n.m. (Cerro El Tagarote) y cadenas montañosas como la Sierra Matalotes, Sierra San Juan de Minas (2,720 m.s.n.m.), Cordón La Concepción (2,570 m.s.n.m.), Cordón Tovar, Cordón La Cumbre (2,630 m.s.n.m.) y Sierra La Candela (3,070 m.s.n.m.).

Marco hidrogeológico. El sistema que domina el valle lo integran los materiales granulares no consolidados del terciario y cuaternario, se ubica en las partes planas rellenando las depresiones tectónicas; que forman acuíferos libres de variable producción dado lo heterogéneo de los depósitos que la componen. Generalmente son buenos acuíferos y su potencialidad está limitada por su espesor y por la profundidad a que se encuentran.

Por la disposición geológica y topográfica que ocupan y la variabilidad granulométrica que poseen, su recarga proviene, principalmente, de las infiltraciones directas de las corrientes superficiales y de los canales de riego; en menor medida reciben aportaciones por flujo subterráneo, tanto de los sistemas hidrogeológicos en calizas, como de acuíferos en medios granulares adyacentes y, dada las bajas precipitaciones pluviales de la región, el aporte de las aguas meteóricas es el más bajo (IMTA, 1992 a; 1992 b).

En la zona de estudio, las áreas principales para el emplazamiento de estos sistemas se ubican a lo largo de las principales corrientes: río Nazas y río Aguanaval (IMTA 1991)





Piezometría. Con el objetivo de monitorear la variación del nivel piezométrico la CONAGUA en conjunto el OCCCN procedieron a monitorear un total de 293 pozos; en los que se cuentan pozos abandonados, rehabilitados; para funcionar como pozos de observación, pozos agrícolas y pozos de agua potable (IMTA, 1999; 2010).

Las brigadas se distribuyeron en nueve rutas denominadas Tlahualilo, Gómez, Bermejillo, Madero, San Pedro Urbanos, Torreón, Matamoros y Mieleras, con el objeto de cubrir todo el acuífero de la Comarca Lagunera, realizando repeticiones, de medición del nivel piezométrico, en los pozos cercanos a los cauces, Nazas y Agua Naval, paleocauces; zona del Caracol, Tlahualilo, y zona de calizas.

El período de medición cubre antes, durante y después del evento incidental de recarga; cubriendo desde los meses de julio y agosto; antes del evento, septiembre y octubre; durante el evento y, noviembre, diciembre, del 2008, febrero del 2009; después del evento.

El análisis de los datos se distribuye en nueve períodos de tiempo cubriendo como punto de inicio la piezometría del año de 2007, realizada en el mes de julio y agosto, y los siete meses anteriormente descritos, correspondientes a los años 2008 y 2009.

Balance de agua subterránea. Los resultados del balance de aguas subterráneas son transcritos de diario oficial de la federación (DOF, 2018), de fecha 4 de enero del 2019 (Tabla 17).

Tabla 17. Resultados del balance de aguas subterráneas, acuífero Principal Comarca Lagunera

| REGIÓN HIDROLÓGICO-ADMINISTRATIVA | ENTIDAD FEDERATIVA | CLAVE | ACUÍFERO | R | DCN | VEAS | | | | DMA | |
|-----------------------------------|--------------------|-------|---------------------------|-------|-----|--|----------|----------|----------|----------|--------------------|
| | | | | | | VCAS | VEALA | VAPTYR | VAPRH | POSITIVA | NEGATIVA (DÉFICIT) |
| | | | | | | CIFRAS EN MILLONES DE METROS CÚBICOS ANUALES | | | | | |
| VII CUENCAS CENTRALES DEL NORTE | COAHUILA | 0523 | PRÍNCIPAL REGIÓN LAGUNERA | 534.1 | 0.0 | 647.532028 | 0.000000 | 0.000000 | 0.000000 | 0.000000 | -113.432028 |

Nota: R: recarga total media anual; DCN: descarga natural comprometida; VEAS: volumen de extracción de aguas subterráneas; VCAS: volumen concesionado/asignado de aguas subterráneas; VEALA: volumen de extracción de agua en las zonas de suspensión provisional de libre alumbramiento y los inscritos en el Registro Nacional Permanente; VAPTYR: volumen de extracción de agua pendiente de titulación y/o registro en el REPDA; VAPRH: volumen de agua correspondiente a reservas, reglamentos y programación hídrica; DMA: disponibilidad media anual de agua del subsuelo. Las definiciones de estos términos son las contenidas en los numerales “3” (fracciones 3.10,3.12,3.18 y 3.25), y “4” (fracción 4.3), de la Norma Oficial Mexicana





NOM-011-CONAGUA-2015. La actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea corresponde a la fecha de corte en el Registro Público de Derechos de Agua, al 31 de diciembre del 2015.

5.8.3. Acuífero Irapuato Valle.

Localización. El acuífero Irapuato-Valle, se localiza en el extremo sur del estado de Guanajuato, en el límite con el estado de Michoacán, entre los paralelos 20°12' y 20°53' de latitud norte y los meridianos 101°01' y 101°33' de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 2,437 km².

Limita al norte con el acuífero Silao-Romita, al noreste con Cuenca Ata del Río Laja, al este con Valle de Celaya, al sur y sureste con Ciénega Prieta-Moroleón, al oeste con Pénjamo-Abasolo, todos ellos pertenecientes al estado de Guanajuato; el suroeste con el acuífero Pastor Ortiz-La Piedad, del estado de Michoacán.

Municipios. El polígono del acuífero Irapuato-Valle, se ubica dentro de los municipios: Irapuato, Salamanca, Pueblo Nuevo, Valle de Santiago, y Jaral; de forma parcial en: Cortázar, Santa Cruz Juventino Rosas, Abasolo y Yuriria. Lo anterior tiene como base el archivo digital de la distribución municipal, emitido por CONABIO (Conabio, 2019), y el archivo digital de límites acuíferos editado por la Conagua (Conagua, 2018 b).

Clima. Se identifican varios climas que varían del semicálido-subhúmedo hasta el semiseco-semicálido. El más común es el semicálido subhúmedo con lluvias en verano, (A)C(w0)(w)), que cubre la mayor parte de la superficie del acuífero. Presenta una temperatura media anual mayor de 18°C. El régimen de lluvias es en verano con valores máximos que se registran en el periodo mayo-octubre; mientras que la precipitación del mes más seco es menor de 40 mm, con porcentaje de lluvia invernal menor de 5%. El clima BS1hw(w) es de tipo semiseco-semicálido, con régimen de lluvias en verano, precipitación media anual que varía de 500 a 700 mm, y porcentaje de lluvias invernales menor de 5%.

La temperatura media anual oscila entre los 18.0° y los 21.0°C, el mes más frío es enero, con temperaturas medias entre 13.0° y 16.0°C.

El régimen de lluvias cubre el período de junio a septiembre, con máximos para julio y agosto que alcanzan entre 180 y 110 mm mensuales. La época de estiaje ocurre entre los meses de octubre y mayo.





El valor promedio anual de temperatura y precipitación son de :18.9 °C y 705 mm, respectivamente. La evaporación potencial, promedio anual es de 1,910 mm.

Hidrología. El acuífero se ubica en la Región Hidrológica 12 “Lerma-Santiago”, Subregión Hidrológica “Alto Lerma”, en la cuenca Río Lerma-Salamanca, subcuenca Guanajuato-Silao. La cuenca del Río Lerma-Salamanca, drena una superficie correspondiente a la zona centro y sur del estado de Guanajuato. Tiene su origen en la Presa Solís en donde recibe las aguas de la subcuenca Presa Solís-Salamanca, y forma la conocida bifurcación del Lerma; comprende además los afluentes del centro de la entidad, Salamanca-Río Angulo, arroyo Temazcatío y Río Guanajuato-Silao.

La hidrografía está representada principalmente por el río Lerma, que se conduce en la parte central y sureste de la zona, se bifurca cerca del poblado El Sabino, pasando por en medio de dos aparatos volcánicos y volviéndose a unir cerca de Cerritos de Camargo, para después pasar por la porción sur de la ciudad de Salamanca, dirigiéndose así al suroeste por el poblado Pueblo Nuevo, para salir del área en la misma dirección. Los afluentes principales del río Lerma son: Guanajuato y Silao, que atraviesan el área de estudio en dirección norte sur, rodeando a la ciudad de Irapuato, que aguas abajo se unen para formar el río Guanajuato, el cual a su vez confluye al río Lerma a la altura del poblado Pueblo Nuevo.

El río Guanajuato nace aproximadamente a 10 km de la ciudad de Guanajuato y desemboca en el Río Lerma, sus aguas son retenidas y reguladas por la Presa “La Purísima”. El Río Silao nace en la porción norte del acuífero, pasa por las inmediaciones de la ciudad que lleva el mismo nombre antes de interceptarse con el Río Guanajuato, al noroeste de Irapuato. Sus aguas son reguladas por la Presa “El Conejo”.

En la zona se ubica el Distrito de Riego 11, que cuenta con infraestructura hidráulica en sus módulos de riego, y existen algunas obras, principalmente para control de avenidas, como la Presa El Conejo II, cuya función primordial es proteger contra las inundaciones a la ciudad de Irapuato.

Marco hidrogeológico Regional. Tomando como base información geológica superficial, cortes litológicos de pozos y resultados de la interpretación de sondeos geofísicos, se determina que el agua subterránea está presente en un ambiente hidrogeológico constituido por un sistema distensivo, compuesto por bloques tectónicos escalonados, con una arquitectura en escalonamiento que conforman pilares (horts) y fosas (grabens) asimétricas. La composición geológica se caracteriza por rocas volcánicas y piroclásticas de composición riolítica, y en el





Conglomerado Xoconostle, rellenas de material terrígeno de origen continental, que presenta granulometría y compactación variables.

El sistema acuífero es considerado multicapas y se conforma en su porción superior, por un medio granular constituido por depósitos aluviales, fluviales, lacustres y conglomerados, cuyo espesor promedio es menor a 100 m, controlado estructuralmente por la presencia de fallas que generan fosas en el subsuelo; el acuífero inferior se emplaza en un medio fracturado alojado en rocas volcánicas, principalmente de composición riolítica y en menor proporción basáltica, que afloran en las sierras que constituyen el límite del acuífero. El paquete en su conjunto está afectado por tectonismo, generando un sistema de fosas y pilares tectónicos. La mayor estructura de este tipo es la gran depresión tectónica de Salamanca que está rellena por sedimentos fluviales de granulometría y compacidad variable y rocas volcánicas basálticas fracturadas del plio-cuaternario.

Los límites del acuífero se marcan por: 1) El parteaguas de las elevaciones topográficas. 2) Los grandes pilares tectónicos, son los rasgos orográficos de mayor elevación que rodean el Valle de Irapuato-Salamanca, como es la prolongación suroriental de la Sierra de Guanajuato que divide a los valles de Irapuato-Salamanca y Río Laja, donde el bloque tectónico está expuesto en superficie con la presencia de la Ignimbrita Cuatralba. 3) La Sierra de Las Luminarias, que divide esta zona del Valle del Lago de Yuriria, también es interpretado como un pilar tectónico el cual está coronado por aparatos volcánicos de rocas basálticas plio-cuaternarias. En la porción norponiente del valle se ha detectado otro levantamiento tectónico casi expuesto en superficie, que separa al valle del Valle Silao-Romita y en donde afloran localmente los depósitos lacustres del Plioceno Superior.

El basamento hidráulico está representado por las rocas riolíticas, a profundidades mayores de 500 m, cuando desaparece el fracturamiento, así como las rocas de baja permeabilidad del Conglomerado Guanajuato y las del Complejo Vulcanosedimentario Sierra de Guanajuato, cuya presencia no ha sido detectada en los pozos perforados; sin embargo, se infiere su existencia en el subsuelo del valle a profundidades mayores a los 1,000 m por medio de sondeos geofísicos electromagnéticos.

La disposición de las unidades de interés hidrogeológico en el subsuelo, así como las estructuras que las afectan, ocasionan su desplazamiento debido a la presencia de la prolongación de la Falla del Bajío.





Acuífero. Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas permiten establecer que el sistema acuífero es de tipo libre-semiconfinado, heterogéneo y anisótropo en el que el movimiento del agua subterránea ocurre en una gran estructura geológica regional, originada por la tectónica distensiva plio-cuaternaria del Eje Neovolcánico, que causó un sistema de fosas y pilares tectónicos dispuestos en escalonamiento hacia el centro del valle, que están edificados en las rocas del Conglomerado Xoconostle, rocas volcánicas fracturadas de la Andesita La Ordeña y las rocas riolíticas de las unidades Riolita Chichíndaro e Ignimbrita Cuatralba.

El sistema acuífero, está conformado, en su porción superior, por un medio granular constituido por depósitos aluviales, fluviales, lacustres y conglomerados, cuyo espesor promedio es menor a 100 m, que se encuentran intercalados e interdigitados con derrames basálticos, y está controlado estructuralmente por la presencia de fallas que generan fosas en el subsuelo; y un medio fracturado alojado en rocas volcánicas, principalmente de composición riolítica y en menor proporción basáltica, que afloran en las sierras que constituyen el límite del acuífero.

Localmente, la presencia de sedimentos arcillosos y calizas de origen lacustre, puede ocasionar condiciones de semiconfinamiento.

Piezometría. La elevación del nivel piezométrico para el año 2013 (Conagua, 2018 b), presentó valores que variaban de 1720 a 1605 msnm, los cuales crecen, al igual que los de profundidad, hacia las elevaciones topográficas que delimitan los valles, que se han formado por la existencia de lomeríos que los separan. La dirección preferencial del flujo subterráneo, es concéntrica hacia la porción central, los valores más altos, de 1690 a 1720 msnm, se registran en la porción norte del acuífero, hacia las estribaciones de la sierra que divide este acuífero de Cuenca Alta Río Laja; y los más bajos, de 1605 a 1625, en los conos de abatimientos que se han formado en la zona agrícola ubicada al oeste de Irapuato, entre esta ciudad y Salamanca y en porción suroccidental del acuífero.

Balance de agua subterránea. Los resultados del balance de aguas subterráneas son trascritos de diario oficial de la federación (DOF, 2018), de fecha 4 de enero del 2019 (Tabla 18).





Tabla 18. Resultados del balance de aguas subterráneas, acuífero Irapuato-Valle

| REGIÓN HIDROLÓGICO- ADMINISTRATIVA | ENTIDAD FEDERATIVA | CLAVE | ACUÍFEROS | R | DCN | VEAS | | | | DMA | |
|--|-----------------------|-------|--------------------|-------|------|--|----------|----------|----------|----------|-----------------------|
| | | | | | | VCAS | VEALA | VAPTYR | VAPRH | POSITIVA | NEGATIVA (DÉFICIT) |
| | | | | | | CIFRAS EN MILLONES DE METROS CÚBICOS ANUALES | | | | | |
| VIII LERMA SANTIAGO PACÍFICO | GUANAJUATO | 1119 | IRAPUATO- VALLE | 507.8 | 28.3 | 550.625810 | 0.000000 | 0.332128 | 0.000000 | 0.000000 | -71.457938 |

Nota: R: recarga total media anual; DCN: descarga natural comprometida; VEAS: volumen de extracción de aguas subterráneas; VCAS: volumen concesionado/asignado de aguas subterráneas; VEALA: volumen de extracción de agua en las zonas de suspensión provisional de libre alumbramiento y los inscritos en el Registro Nacional Permanente; VAPTYR: volumen de extracción de agua pendiente de titulación y/o registro en el REPDA; VAPRH: volumen de agua correspondiente a reservas, reglamentos y programación hídrica; DMA: disponibilidad media anual de agua del subsuelo. Las definiciones de estos términos son las contenidas en los numerales “3” (fracciones 3.10,3.12,3.18 y 3.25), y “4” (fracción 4.3), de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015. La actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea corresponde a la fecha de corte en el Registro Público de Derechos de Agua, al 31 de diciembre del 2015.

5.9. Evaluación multitemporal de la superficie de cultivos en acuíferos seleccionados.

A continuación, se presentan los resultados del análisis de las series de imágenes que cubren los acuíferos Laguna de Hormigas, Principal Región Lagunera e Irapuato Valle; para evaluar la dinámica de la superficie cultivada durante el correspondiente intervalo de tiempo.

5.9.1. Acuífero Laguna de Hormigas, Chih.

Para este acuífero se analizó el período anual comprendido de 2010 a 2019 **Figura**. Para ello se emplearon imágenes LANDSAT tomadas entre 2005 y 2014; e imágenes Sentinel 2 de 2015 a 2019. La superficie cultivada durante este período varió de 1,096 ha en 2005 a 21,817 ha registradas en 2019; lo que quiere decir que la superficie tuvo un incremento de cerca de 20 veces durante este período Tabla 19.

De acuerdo con los datos reportados por la Conagua en el presente año, el acuífero tiene una recarga de 25.5 hm³, que si la relacionamos con la superficie obtenida para 2019, y a una lámina de riego de 1 m (definida con base en información de campo) se obtiene un volumen para riego de 218.2 hm³ (Figura



35), lo que coloca a este acuífero como uno de los más sobreexplotados del país, además de que en breve no será disponible un volumen rentable de explotación.

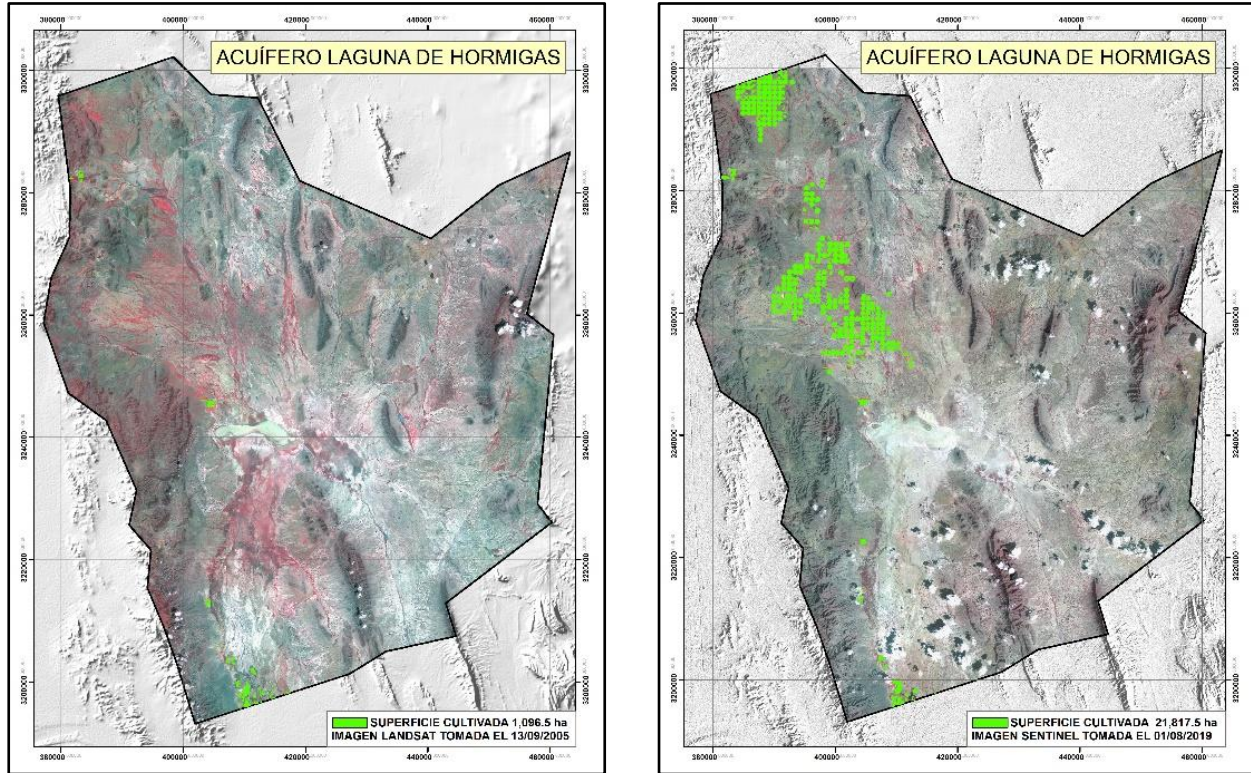
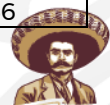


Figura 34. Cambios en la superficie de cultivos 2005(izquierda) y 2019 (derecha).

Tabla 19. Cambios en la superficie de cultivos en el acuífero Laguna de Hormigas, Chih. durante el período 2005-2019.

| ARCHIVO | SATÉLITE | FECHA DE TOMA | SUPERFICIE (ha) |
|---|------------|-------------------|-----------------|
| Agrícola_Acuífero_L_Hormigas_20190802 | SENTINEL 2 | 02/08/2019 | 21,817.58 |
| Agrícola_Acuífero_L_Hormigas_20180802 | SENTINEL 2 | 11/10/2018 | 20,356.77 |
| Agrícola_Acuífero_L_Hormigas_20170807 | SENTINEL 2 | 07/08/2017 | 14,392.26 |
| Agrícola_Acuífero_L_Hormigas_20160731 | SENTINEL 2 | 31/07/2016 | 10,599.79 |
| Agrícola_Acuífero_L_Hormigas_20150818 | SENTINEL 2 | 18/08/2015 | 5,650.26 |
| Agrícola_Acuífero_L_Hormigas_20140720 | LANDSAT 8 | 20/07/2014 | 6,085.30 |
| Agrícola_Acuífero_L_Hormigas_20130818 | LANDSAT 8 | 18/08/2013 | 6,711.64 |
| Agrícola_Acuífero_L_Hormigas_20110829 | LANDSAT 5 | 29/08/2011 | 6,051.78 |
| Agrícola_Acuífero_L_Hormigas_2010_0522y0810 | LANDSAT 5 | 22/05 -10/08/2010 | 5,677.79 |
| Agrícola_Acuífero_L_Hormigas_20090908 | LANDSAT 5 | 08/09/2009 | 5,386.81 |
| Agrícola_Acuífero_L_Hormigas_20080820 | LANDSAT 5 | 20/08/2008 | 2,992.97 |
| Agrícola_Acuífero_L_Hormigas_20070717y0820 | LANDSAT 5 | 17/07/-20/08/2017 | 1,178.72 |
| Agrícola_Acuífero_L_Hormigas_20060714 | LANDSAT 5 | 14/07/2006 | 851.40 |
| Agrícola_Acuífero_L_Hormigas_20050913 | LANDSAT 5 | 13/09/2005 | 1,096.56 |



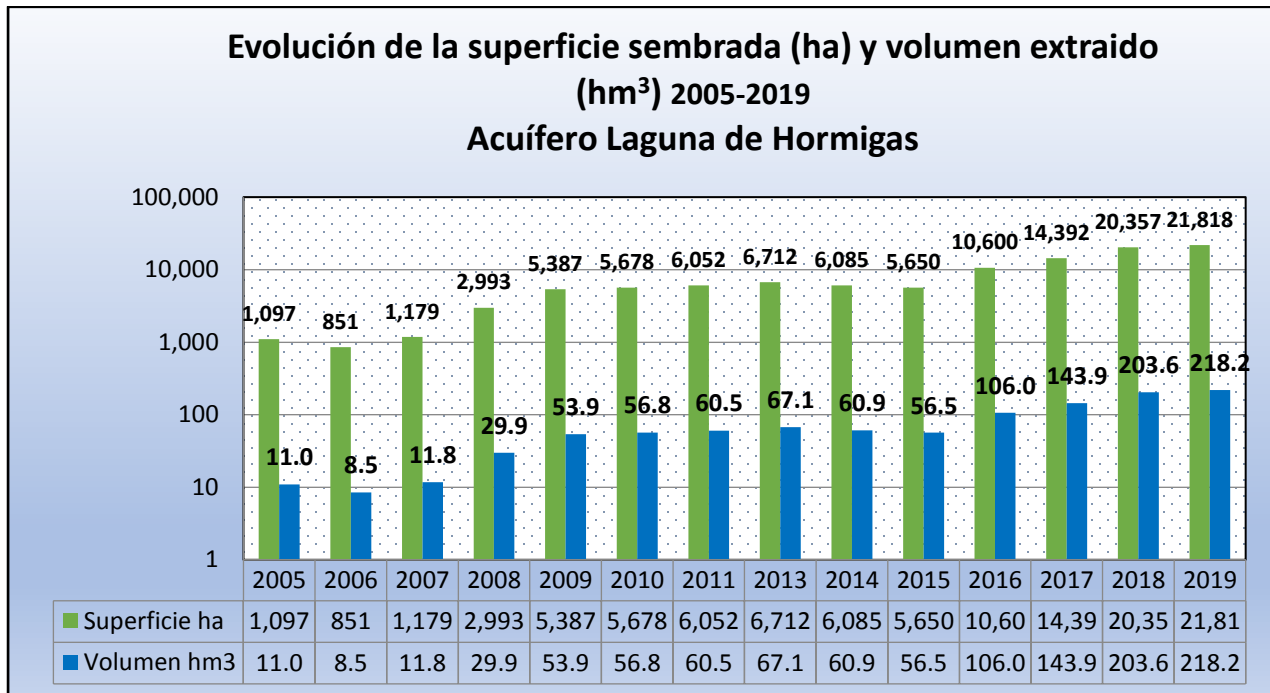


Figura 35. Gráfica de evolución de la superficie y volumen de riego agrícola.

5.9.2. Acuífero Principal Región Lagunera

La serie de imágenes LANDSAT que cubren el acuífero, comprenden el período de 1985 a 2019 (Figura 36); este esfuerzo estuvo orientado a cubrir intervalos de 5 años; que no se siguió al pie de la letra debido a la falta de imágenes disponibles. La superficie de cultivos registrada en el año de 1985 alcanzó un valor de 121,512 ha, mientras que en el año de 2019 fue de 87,827 ha (Tabla 20). La Figura 37 muestra de manera gráfica la evolución de esta superficie. De acuerdo con la información recabada en campo, esta disminución se debe a la sobreexplotación del acuífero, lo que a repercutido en el incremento de la profundidad del nivel freático, lo que en algunas zonas ha hecho incosteable la extracción de agua, y a la presencia de minerales que afectan la calidad de la misma.

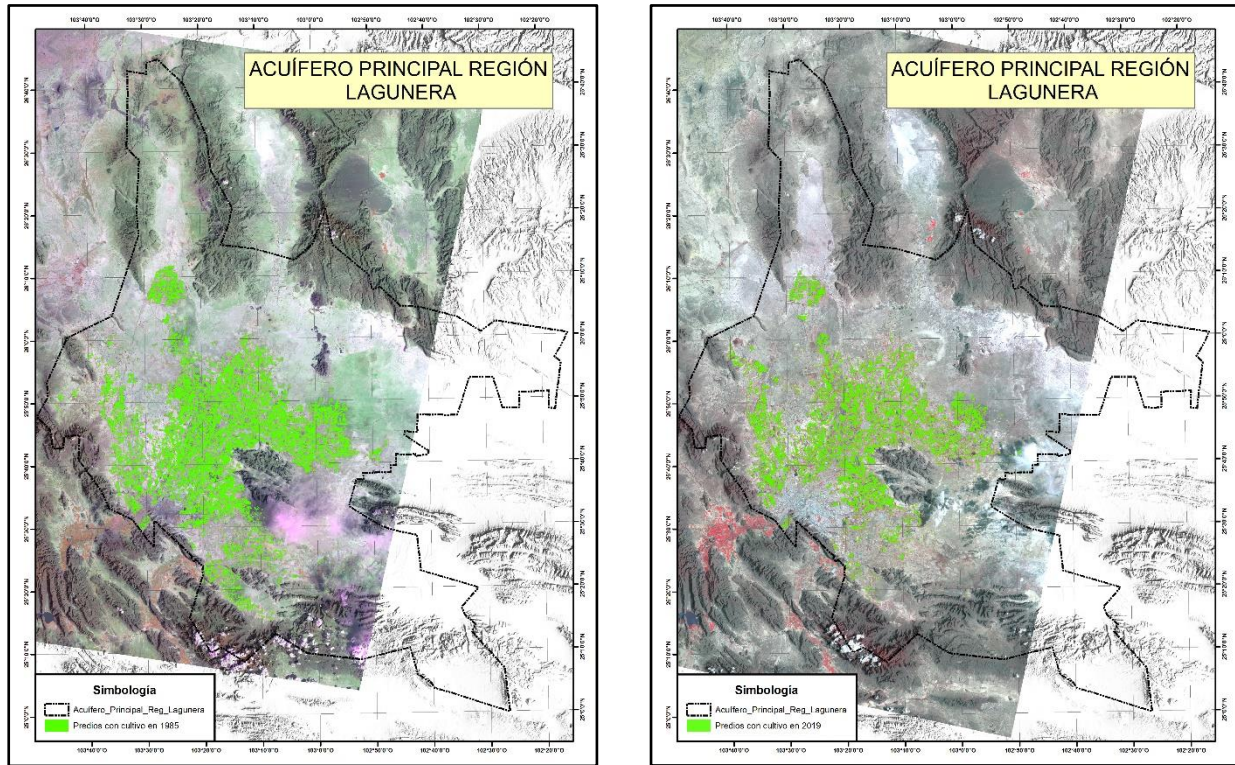


Figura 36. Superficie de cultivos en 1985 (izquierda) y 2019 (derecha) sobre el acuífero Principal Región Lagunera.

Tabla 20. Cambios en la superficie cultivada en el Acuífero Principal Región Lagunera entre 1985 y 2019.

| ARCHIVO | SATÉLITE | FECHA DE TOMA | hectáreas |
|--------------------------------|----------|---------------|------------|
| agricola_acuífero_PRL_19850924 | LANDSAT | 24/09/1985 | 121,512.67 |
| Agricola_acuífero_PRL_19860911 | LANDSAT | 11/09/1986 | 146,335.48 |
| Agricola_acuífero_PRL_19870914 | LANDSAT | 14/09/1987 | 165,823.87 |
| Agricola_acuífero_PRL_19950803 | LANDSAT | 03/08/1995 | 105,112.08 |
| Agricola_Acuifero_PRL_20000909 | LANDSAT | 09/09/2000 | 73,299.40 |
| Agricola_Acuifero_PRL_20050915 | LANDSAT | 15/09/2005 | 91,144.85 |
| Agricola_acuífero_PRL_20100913 | LANDSAT | 13/09/2010 | 95,825.76 |
| Agricola_acuífero_PRL_20150927 | LANDSAT | 27/09/2015 | 72,782.28 |
| Agricola_Acuifero_RPL_20181010 | LANDSAT | 10/10/2018 | 101,946.63 |
| Agricola_Acuifero_PRL20190720 | LANDSAT | 19/07/2019 | 87,827.59 |

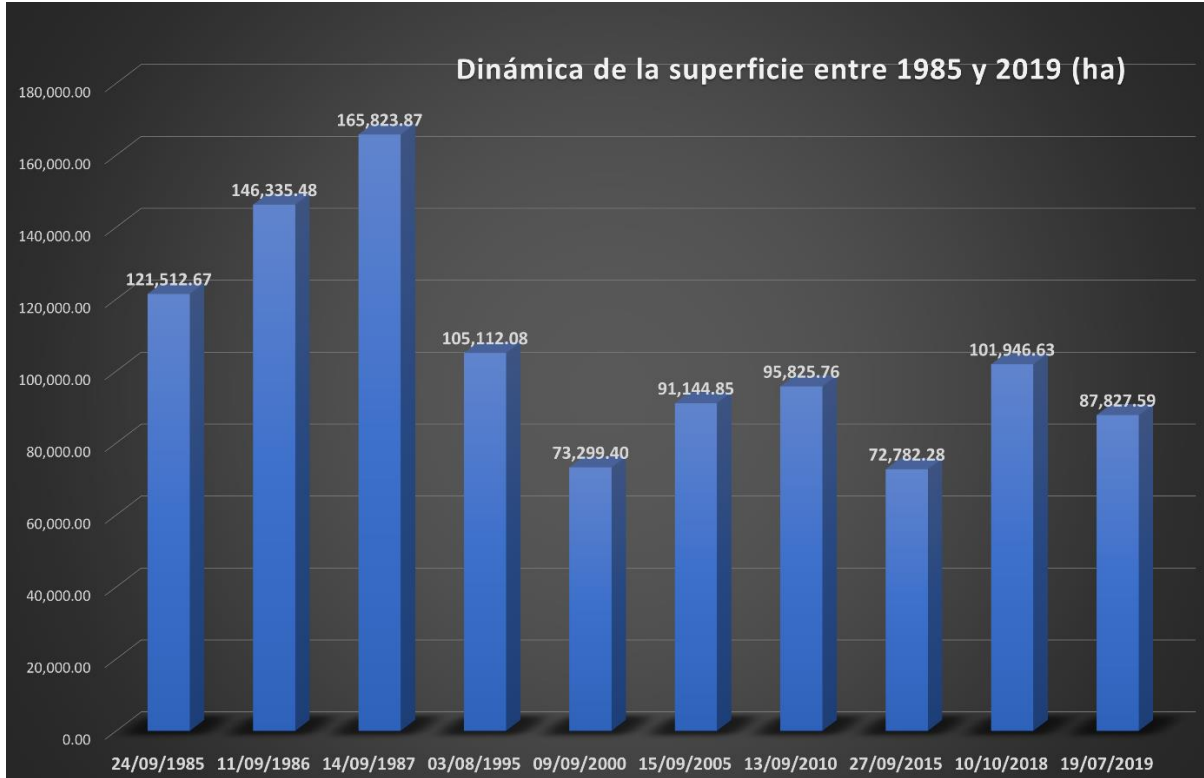


Figura 37. Presentación gráfica de superficies cultivadas en el período de 1985 a 2019 en el acuífero Principal Región Lagunera.

5.9.3. Acuífero Irapuato Valle

Las imágenes disponibles para este acuífero presentaron una cubierta de nubes que sobre la zona de interés y a la falta de información satelital, de manera que el intervalo de análisis multitemporal fue restringido, abarcando un período irregular que va del año 2000 al 2019. La superficie evaluada para el año 2000 alcanzó una superficie de 70,849.6 ha mientras que para el año 2019 fue de 85,730.9 ha (Figura 38). Como se puede observar, se presenta un incremento en la superficie agrícola, atribuido entre otras cosas por disponer de agua superficial correspondiente al Distrito de Riego 011, y adicionalmente se ha incrementado la extracción de agua subterránea mediante una cobertura de aproximadamente 4090 pozos (FIGURA 39) inventariados en 2015, lo que ha repercutido en el incremento en la profundidad del nivel freático que en algunos sitios críticos alcanza hasta 600 m de profundidad, tal es el caso de San Luis de la Paz, Gto.

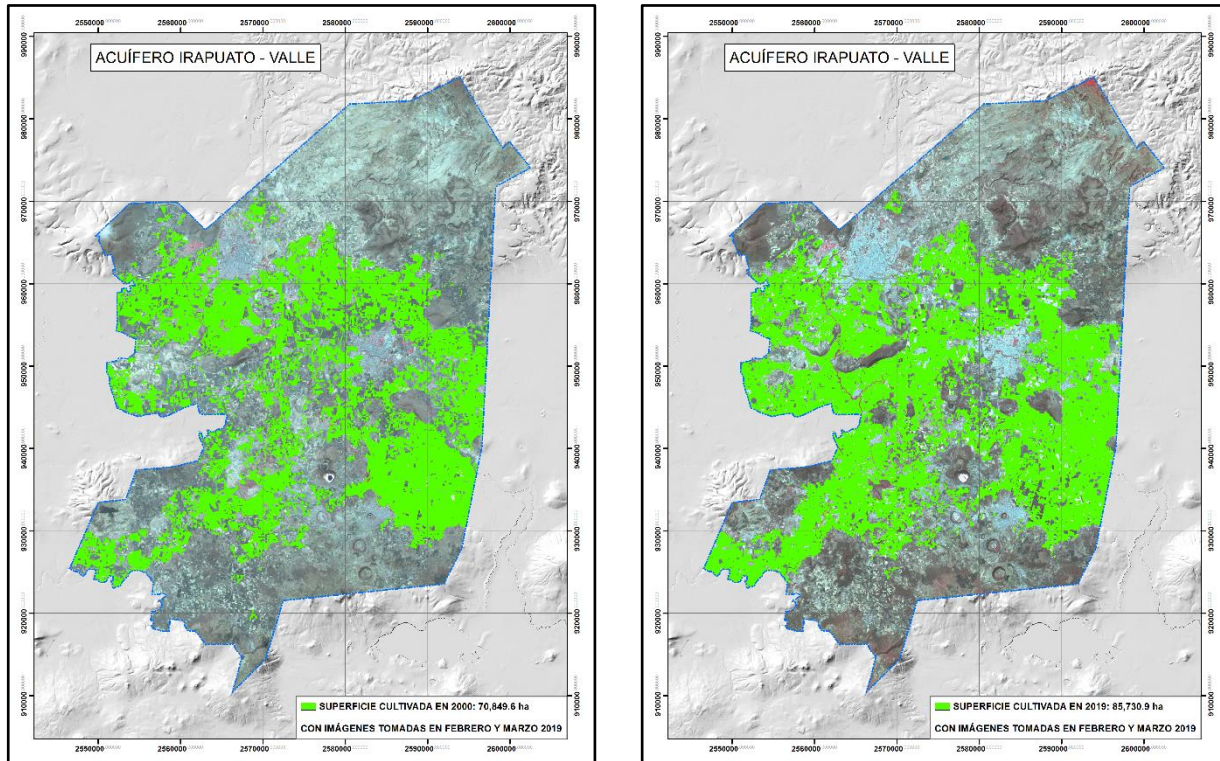


Figura 38. Distribución de la zona cultivada los años 2000 (izquierda) y 2019 (derecha).

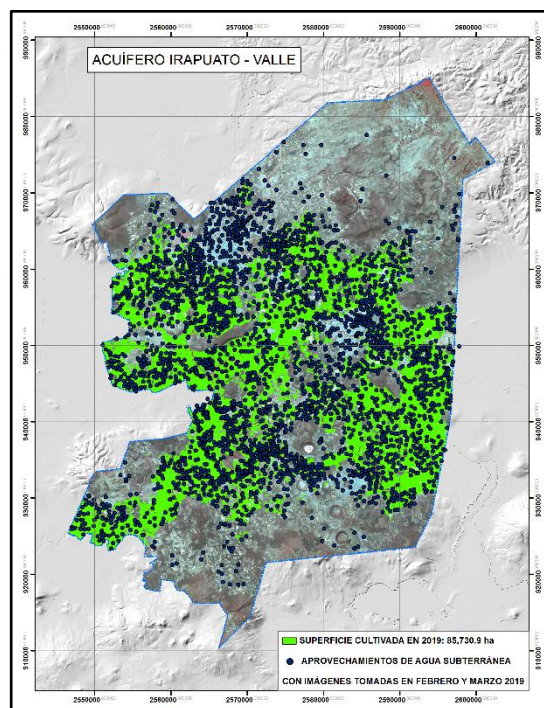


Figura 39. Distribución de pozos en el acuífero Irapuato Valle.