

Uso de sensores remotos y SIG para delimitar los cambios en el uso del suelo agrícola de 1970 a 1997 en el estado de Guanajuato

Hilario García Nieto*

Rolando R. García Daguer**

Rafael Moreno Sánchez***

Alfredo González Ramos*

Recibido: 14 de septiembre de 2001

Aceptado en versión final: 3 de abril de 2002

Resumen. Se delimitaron cuatro clases de uso actual del suelo en el estado de Guanajuato y se relacionaron con información del uso anterior, disponible en forma digital, con el propósito de estudiar los cambios en el uso del suelo agrícola durante el período 1970 – 1997. La delimitación del uso actual se realizó mediante el sistema ArcView, clasificando de manera visual, directamente en la pantalla de la computadora, imágenes de satélite Landsat TM de 1996 y 1997, con apoyo de información de cartas topográficas edición 1998, ortofotos digitales de 1993 y levantamientos de campo con GPS. Mediante la comparación de estadísticas de los mapas de uso anterior y actual se cuantificaron los cambios generales en el uso del suelo y la sobreposición de ambas capas de información permitió localizar espacialmente dichos cambios. Se calculó una disminución de 57 051 ha (4%) en la totalidad del área agrícola del estado de Guanajuato en un período aproximado de 27 años. Sin embargo, para el Distrito de Desarrollo Rural 004 la tendencia fue a la inversa, presentó un crecimiento de 22 642 ha (9.6%). A pesar de la tendencia general de disminución del área agrícola, la localización de los cambios indica el abandono de algunas áreas agrícolas, incorporación de tierras de uso pecuario o forestal a la agricultura y crecimientos urbanos e industriales sobre áreas de uso agrícola. La delimitación de los principales cambios en el uso del suelo y su posterior relación con la aptitud para la agricultura permitirá aportar más elementos de juicio que pueden ser de utilidad para soportar alternativas productivas dentro de las propuestas de reordenamiento de uso del suelo.

Palabras clave: Uso actual del suelo, uso anterior del suelo, cambios en el uso del suelo, percepción remota, sistemas de información geográfica, Guanajuato.

Use of remote sensing and GIS to delimit changes in agricultural soil from 1970 to 1997 in the state of Guanajuato

Abstract. In order to analyze land-use changes during 1970-1997, four current land-use classes were identified in the state of Guanajuato, and these were related to their previous agricultural land use. Landsat TM images for 1996 and 1997 were visually classified on the computer screen with the ArcView system, supported by information from topographic maps (1998 edition), digital orthophotos (1993) and fieldwork using a GPS device. The comparison of statistical data from previous and updated maps allowed to quantify the general changes in land use, and map superposition for the two years allowed to spatially locate those changes. A reduction of 57 051 hectares (4%) in total cultivated land in Guanajuato was observed for a period of 27 years approximately. However, in the Rural Development District-004 the opposite trend was observed, with a growth of 22 642 ha (9.6%). Despite the general trend towards a decrease in agricultural land, the location of changes indicates abandonment of some previously cultivated areas, incorporation of cattle-raising or forest land to agriculture and proliferation of urban and industrial areas at the expense of cultivated land. The delimitation of the major changes in land use and their relationship with adequateness for agriculture will allow to generate new elements of judgments that may be of utility to maintain production alternatives within the land use planning proposals.

Key words: current land use, previous land use, changes in land use, Remote Sensing, Geographic Information Systems, Guanajuato.

*Programa de Potencial Productivo, INIFAP-Campo Experimental Bajío, Km. 6.5 Carretera Celaya-San Miguel de Allende, Apdo. Postal 112, 38010 Celaya, Guanajuato, México. E-mail: inifap@prodigy.net.mx; Garcia99@hotmail.com

** Programa de Forrajes, INIFAP-Campo Experimental Querétaro, México.

*** Master of Science in Geographic Information Science Program, Department of Geography, University of Denver, Denver, CO, EUA.

INTRODUCCIÓN

Los principales factores que determinan los cambios ambientales a nivel global se han atribuido a las alteraciones en el uso y cobertura del suelo (IIASA, 1993). Sin embargo, existen marcadas variaciones geográficas en la intensidad de los cambios en dicho uso, en las causas que los provocan, así como en la consecuente degradación de los recursos naturales y del nivel de vida de los pobladores. Liu y Lu (1992) señalan que los cambios globales en el uso del suelo han sido lentos en la última década, no obstante, han sido significativos en muchos países en desarrollo, por ejemplo, en los de América Latina, África, Asia e islas del Pacífico, en donde aproximadamente 11 millones de ha de bosques tropicales son deforestadas cada año. La causa principal de dicha deforestación es la conversión en áreas agrícolas, debido al incremento en la demanda de alimentos y fibras. Las consecuencias más serias de estos cambios han sido la erosión del suelo y la contribución al cambio ambiental global.

La disminución de la cubierta de bosques, la reducción de las áreas con pastizales, la pérdida de la productividad del suelo y la erosión acelerada, son los principales impactos ambientales de los cambios en el uso del suelo en un área de Tanzania, los cuales se atribuyen a las siguientes causas: a) el rápido incremento de la población, la cual ejerce presión sobre la explotación de los recursos naturales; y b) los cambios tecnológicos que facilitan la explotación de estos recursos. Con base en lo anterior, se preve que el incremento de la población y del sobrepastoreo resultarán en una inevitable degradación de los recursos y empobrecimiento de las poblaciones rurales (Mwalyosi, 1992). Phondekar y Phadke (1993), en un estudio de caso sobre la India, señalan tres efectos que ha provocado la deforestación: a) un incremento en la superficie cultivada; b) reducción en la intensidad de cultivo; y c) menor extracción de agua del sub-

suelo debido al incremento de la profundidad del manto freático.

Uno de los efectos de los cambios de uso del suelo más consignados en la literatura es el proceso iniciado por la erosión, el transporte de sedimentos y, posteriormente, la sedimentación. Este proceso ha sido estudiado y demostrado en cuencas hidrológicas. En una cuenca experimental se encontró que la disminución de las tierras cultivadas de 26 a 12% durante el período de 1982 a 1990, redujo el transporte de sedimentos de la siguiente manera: el transporte de partículas menores de 0.062 mm y entre 0.062 y 2 mm se redujo en 66 y 62%, respectivamente, mientras que la reducción del transporte de arenas de más de 2 mm fue de solamente el 39% (Kuhnle *et al.*, 1996). Otros efectos de los cambios en el uso del suelo reportados en la literatura son: la disminución de la calidad del agua (Meissner *et al.*, 1998), el mayor riesgo de inundaciones de áreas urbanas (Cazorzi y Fontana, 1994) y los cambios en la clasificación de los suelos (Wielemaker y Landsu, 1991).

Las principales modificaciones ambientales para América Latina han sido: la deforestación, erosión, agotamiento de los suelos, sedimentación y pérdida de la flora y la fauna. Se han señalado como causas que dinamizan estos procesos: a) la modernización agropecuaria; b) los planes gubernamentales de urbanización e infraestructura (principalmente carreteras), y c) la demanda internacional e interna de recursos naturales como petróleo, minerales y madera. Dichas estrategias gubernamentales, además de las modificaciones ambientales señaladas, provocan una serie de efectos económico-sociales en el medio rural; sin embargo, estos problemas han sido generalmente relegados a un segundo plano, debido a la importancia que se le atribuye al crecimiento del producto agrícola y al empleo (CEPAL-PNUMA, 1983).

En México, la superficie cultivada ha evolucionado de dos maneras: a) por incremento en la apertura de la frontera agrícola, y b) por cambio en la distribución espacial de los cultivos (Soto y Soto, 1992). De acuerdo con Fuentes (1992), el espacio agrícola nacional libra una lucha desigual contra las presiones urbanas, la "ganaderización" de la agricultura, el establecimiento de industrias en áreas aptas para la agricultura, y el cambio introducido por las compañías transnacionales en el patrón de cultivos que demanda la población del país.

A partir de que la NASA pone en órbita el primer satélite de uso exclusivo para cartografía y evaluación de los recursos naturales de la serie ERTS (*Earth Resources Technology Satellite*), en 1972, se inician las aplicaciones civiles de la teledetección. Este Proyecto denominado Landsat, a partir del lanzamiento del segundo satélite de la serie ERTS en 1975, resultó el más fructífero para aplicaciones de la teledetección hasta el momento (Chuvienco, 1990). La principal aportación de este proyecto consistió en la incorporación del sensor *Thematic Mapper* (TM), como su nombre lo indica, las imágenes de este sensor son para uso en cartografía temática, categorizando específicamente tipos de cubierta y usos del suelo (Chuvienco, 1990). Las imágenes TM pueden jugar un papel importante en el estudio de los cambios en el uso del suelo en áreas donde se mezclan los usos agrícola y urbano (Gomarasca *et al.*, 1993).

La integración de sistemas de información geográfica (SIG), percepción remota (PR) y geoposicionamiento global (GPS), permite hacer más eficiente el estudio de los cambios en el uso del suelo. Existen muchas ventajas al combinar los datos de sensores remotos con la información espacial existente, los SIG proporcionan el medio para esta integración y, al mismo tiempo, brindan una poderosa herramienta para el análisis cuantitativo de cambios de uso del suelo

y revisión y corrección de mapas (Treitz *et al.*, 1992). Sin embargo, es difícil mapear algunas figuras lineales y puntuales, particularmente de manera digital, debido a que éstas no siempre son distinguibles por la resolución espacial de los datos, ni son representadas en su verdadera localidad, debido a las distorsiones panorámicas inherentes a la manera del sensor de coleccionar los datos (desde el espacio y en movimiento). Una alternativa para la colección de datos puntuales y lineales es el GPS, cuyos datos son coleccionados de manera estática y proporcionan información posicional de los cambios de uso del suelo más recientes, no incluidos en los mapas (Goodchild, 1991; Treitz *et al.*, 1992).

La agricultura es una de las actividades más importantes que determinan los cambios de uso del suelo, provocando efectos económico-sociales e impactos ambientales. En nuestro país, esta actividad enfrenta grandes retos, por una parte, en las áreas agrícolas con mayor aptitud física se debe responder a la demanda de tecnología para incrementar la productividad y competitividad de los cultivos tradicionales y alternativos (de acuerdo con las oportunidades del mercado), en forma sustentable y con el menor costo ecológico; y, por otro lado, en áreas agrícolas con menor aptitud, el reto es proponer cambios y alternativas en el uso del suelo con fines de conservación y restauración.

En este trabajo se determinó y delimitó el uso actual del suelo con base en imágenes Landsat TM de 1996 y 1997, y se comparó con la información del uso anterior generada por CETENAL a partir de fotografías aéreas de 1970 y disponible en forma digital para el estado de Guanajuato, con el propósito de delimitar y cuantificar los cambios de uso del suelo ocurridos durante ese período. Para hacer más eficiente la delimitación, cuantificación, análisis y documentación de los cambios en el uso del suelo se hizo uso de las tecnologías de SIG, PR y GPS. Los resultados

de este trabajo son parte del proyecto: "Cambios en el uso del suelo y aptitud agrícola en el estado de Guanajuato", y se utilizarán posteriormente a fin de analizarlos con relación a la clasificación de la aptitud potencial para la agricultura, con el objetivo final de apoyar con más elementos de juicio acciones que conduzcan a la reconversión del uso del suelo agrícola. La importancia de conocer los cambios en el uso del suelo radica en la localización de las áreas agrícolas prioritarias a ser apoyadas con programas de reconversión, bajo el supuesto de que las áreas agrícolas degradadas y abandonadas, así como las ampliaciones más recientes, presentan una baja aptitud para esta actividad.

El objetivo general de este trabajo fue estudiar los cambios en el uso del suelo agrícola en el estado de Guanajuato durante el período 1970-1997. Trabajos previos muestran que las tierras de labor en esta entidad se incrementaron gradualmente de 1 050 900 ha en el año de 1950 a 1 247 301 ha (15.7%) en 1980. La agricultura de temporal se incrementó de 847 999 a 956 252 ha (11.3%), mientras que la superficie de riego lo hizo de 202 901 ha a 291 048 ha (30.3%). Durante este período, la superficie ocupada por pastos y bosques disminuyó considerablemente, por lo que se infiere que las tierras de cultivo se ampliaron en 196 401 ha a expensas de éstos (Soto y Soto, 1990).

El área dedicada a la actividad agrícola interacciona con otros subsectores, ya sea ocupando o cediendo espacios, por lo que los objetivos particulares en este estudio son:

1. Delimitar y cuantificar las siguientes clases de uso actual (1997) del suelo: agricultura de temporal y riego, pecuario/forestal, zonas urbanas y cuerpos de agua.
2. Agrupar en las mismas clases el uso anterior del suelo (1970), generado en forma digital en un estudio previo.

3. Calcular los cambios generales en el uso del suelo agrícola hasta nivel de municipio por diferencia entre las superficies de los mapas digitales de uso anterior y actual del suelo.

4. Localizar y cuantificar los cambios en el área agrícola en relación con otros usos, mediante la sobreposición de los mapas digitales de uso anterior y actual.

ÁREA EN ESTUDIO

El área en estudio se localiza en el estado de Guanajuato, cuya superficie abarca 3 049 100 ha (SARH, 1993). Se ubica entre los 19° 55' 08" y los 21° 52' 09" de latitud norte y entre los 99° 39' 06" y los 102° 05' 07" de longitud oeste, y colinda al norte con San Luis Potosí, al este con Querétaro, al oeste con Jalisco, y al sur con Michoacán. Los municipios se han agrupado con fines operativos por la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) en cinco Distritos de Desarrollo Rural (DDR).

En la Figura 1 se presenta la localización del estado de Guanajuato, los DDR y municipios que lo integran, así como sus principales áreas urbanas, cuerpos de agua y vías de comunicación terrestre.

Las unidades de suelo dominantes que ocupan mayor superficie son: a) los phaeozems, que representan alrededor del 45% de superficie estatal y se localizan en su mayor parte en el norte del estado; b) los vertisoles, que se encuentran principalmente en El Bajío, ocupan una superficie aproximada al 38% de la superficie total; y c) en tercer lugar los litosoles (leptosoles), que con un 7% de la superficie, se ubican en las elevaciones más pronunciadas.

A excepción de "El Bajío", son muy escasas las áreas sin fases físicas (suelos con profundidad mayor de 1.0 m).

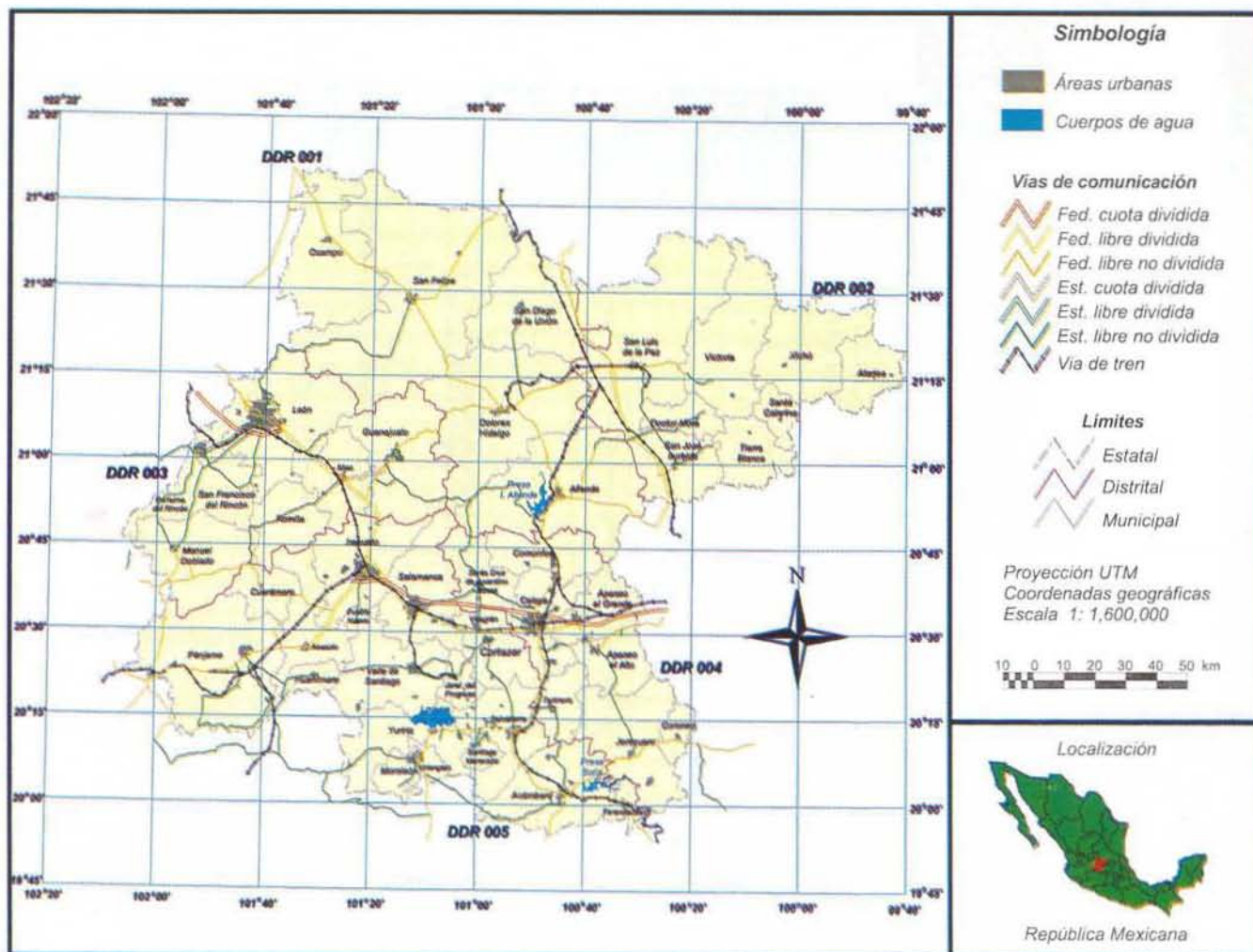


Figura 1. Localización, distritos de desarrollo rural (DDR), municipios y principales cuerpos de agua, áreas urbanas y vías de comunicación del estado de Guanajuato.

Los suelos vertisoles de El Bajío presentan fases químicas (problemas de salinidad y sodicidad) en varias áreas, las cuales suman una superficie de 28 198 ha en el DDR 003, 9 906 ha en el DDR 004 y 52 350 ha en el DDR 005 (CETENAL, 1973-1974). Los vertisoles y los phaeocems no presentan restricciones para la producción en la mayoría de los cultivos, mientras que los litosoles se consideran no aptos para la agricultura (FAO, 1978; 1981).

La precipitación presenta un gradiente positivo de norte a sur. Las cantidades anuales acumuladas varían de menos de 550 mm en el norte hasta alrededor de 1 000 mm en el extremo sur. La temperatura media anual en El Bajío y noreste, en los límites con la región de "La Huasteca", alcanza valores superiores a los 19 °C. En el centro predominan las temperaturas entre 17 y 18 °C, y las partes más frescas (menores de 15 °C) se ubican principalmente en las máximas elevaciones.

La SAGARPA cuenta con estadísticas de uso del suelo para el país, desagregadas por entidad federativa, DDR y municipios (SARH, 1993). En el Cuadro 1 se muestran las estadísticas de uso del suelo para el estado de Guanajuato y los cinco DDR que lo integran, las cifras totales de este cuadro indican que esta entidad se clasifica de la siguiente manera: a) 1 254 097 ha de agricultura, de las cuales 418 435 son de riego y 835 662 de temporal; b) 1 049 073 de uso pecuario; c) 336 500 de uso forestal, y d) 409 430 de otros usos.

MATERIALES Y MÉTODOS

En la Figura 2 se presenta el diagrama de la metodología general empleada, la información compilada o generada en estudios previos y disponible para este trabajo aparece en color gris. El uso anterior del suelo se obtuvo mediante la digitización de la cartografía de uso del suelo a escala 1:50 000.

El uso actual se delimitó a partir de imágenes de satélite de 1976 y 1977, con apoyo de cartas topográficas escala 1:50 000, ortofoto digital y levantamientos en campo con GPS. Se cuantificaron las superficies de los mapas de uso anterior y actual del suelo y se calcularon sus diferencias, también se compararon con los datos censales disponibles. La localización de los cambios entre el uso anterior y actual se obtuvo mediante la sobreposición de ambas capas de información, generándose un mapa de cambios en el uso del suelo. De la misma manera que en los mapas de uso anterior y actual, se cuantificaron superficies a nivel estatal, por DDR y por municipio en el mapa de cambios; finalmente, se sobrepusieron las referencias de ubicación y se editaron e imprimieron los mapas de presentación.

Se utilizó como herramienta el sistema ERDAS IMAGINE V. 5.3 NT (ERDAS Inc., 1996) para procesar las imágenes de satélite, ARC/INFO V. 7.1 NT (ESRI, 1996a) para procesar la información vectorial. El sistema IDRISI W V. 2.0 (Eastman, 1997) se utilizó para realizar el proceso de modelación espacial y ArcView V. 3.0 (ESRI, 1996b) se utilizó para desplegar, editar e imprimir los mapas de presentación.

Información de uso anterior del suelo en estudios previos

La capa de información generada en forma digital en un estudio previo y utilizada en este trabajo corresponde a la de uso anterior del suelo. Para cubrir la totalidad del área en estudio fue necesario digitizar, cuando menos en parte, 51 cartas de uso del suelo a escala 1:50 000, con excepción de las cartas E-14-A-14 y E-14-A-15 no editadas para este tema. A diferencia del uso actual, el uso anterior se generó por DDR con el propósito de tener archivos más pequeños y, así, facilitar su manejo.

A cada una de las diferentes áreas (polí-

Cuadro 1. Superficie (ha) por clase de uso del suelo por Distrito de Desarrollo Rural (DDR) del estado de Guanajuato

Distritos de Desarrollo Rural	CLASES DE USO DEL SUELO						
	Agrícola riego	Agrícola Tem.	Agrícola total	Pecuario	Forestal	Otros usos	Total
DDR 001 Dolores Hidalgo	47 691	223 384	271 075	373 238	94 000	55 786	794 099
DDR 002 San Luis de la Paz	24 918	51 742	76 660	329 749	101 075	55 211	562 695
DDR 003 León	56 636	132 193	188 829	84 250	80 175	116 052	469 306
DDR 004 Celaya	80 092	157 083	237 175	70 013	26 750	41 361	375 299
DDR 005 Cortázar	209 098	271 260	480 358	191 823	34 500	141 020	847 701
TOTAL ESTATAL	418 435	835 662	1 254 097	1 049 073	336 500	409 430	3 049 100

Fuente: SARH, 1993. Coordinación General de Delegaciones.

gonos) se le asignó una etiqueta con los siguientes atributos: a) Subsector: en este campo se clasificó el uso del suelo, de manera general, en: agrícola *A*, pecuario *P* y forestal *F*, cuerpos de agua *CA*, erosión *E*, principales áreas urbanas *CD*, zonas industriales *Z* y sin clasificar *SC*; b) Tipo 1: en el segundo campo se registraron las subdivisiones de los subsectores, por ejemplo, pastizal natural *Pn* dentro del subsector pecuario; c) Tipo 2: en este campo se registró, en caso de existir, el segundo tipo de uso en importancia, por ejemplo, *Pn-Me* que nos indica que el tipo de uso dominante es pastizal, pero asociado con mezquitil en segundo lugar de importancia, y d) Tipo 3: en algunos casos (principalmente en el subsector forestal) se presentó un tercer tipo de uso que se registró en este campo, por ejemplo, pastizal natural asociado con mezquitil y nopalera en tercer grado de importancia *Pn-Me-No*. En general, se utilizaron las mismas claves de las cartas de CETENAL para codificar las clases. Esta información se convirtió en formato *raster* para importarla al sistema IDRISI, en donde se integró con el uso actual del suelo. Otras capas de información disponibles en formato vectorial y utilizadas como referencias de ubicación en la edición de los mapas de presentación en el

sistema ArcView fueron: vías de comunicación, división política y gradícula.

El cálculo de superficies del uso anterior del suelo se realizó en el sistema IDRISI, mediante un archivo de comandos ejecutables por lote (con extensión .bat). Primeramente, se generaron ventanas para cada uno de los DDR, de tal manera que cada ventana cubriera las dimensiones de los municipios que los integran, posteriormente, estas ventanas fueron recortadas con base en los límites de dichos municipios. A partir de las imágenes por municipio se calcularon, de manera automatizada, las superficies de cada clase. Aunque en este trabajo se utilizó únicamente la información por subsector, la información desagregada hasta nivel municipal de las subdivisiones de los subsectores, puede ser utilizada en estudios posteriores, para hacer comparaciones más específicas de los cambios en el uso del suelo.

Delimitación y cuantificación del uso actual del suelo

En el Laboratorio de SIG y PR del Campo Experimental Bajío se cuenta con imágenes Landsat TM de 1996 y 1997 que cubren el estado de Guanajuato, donadas por

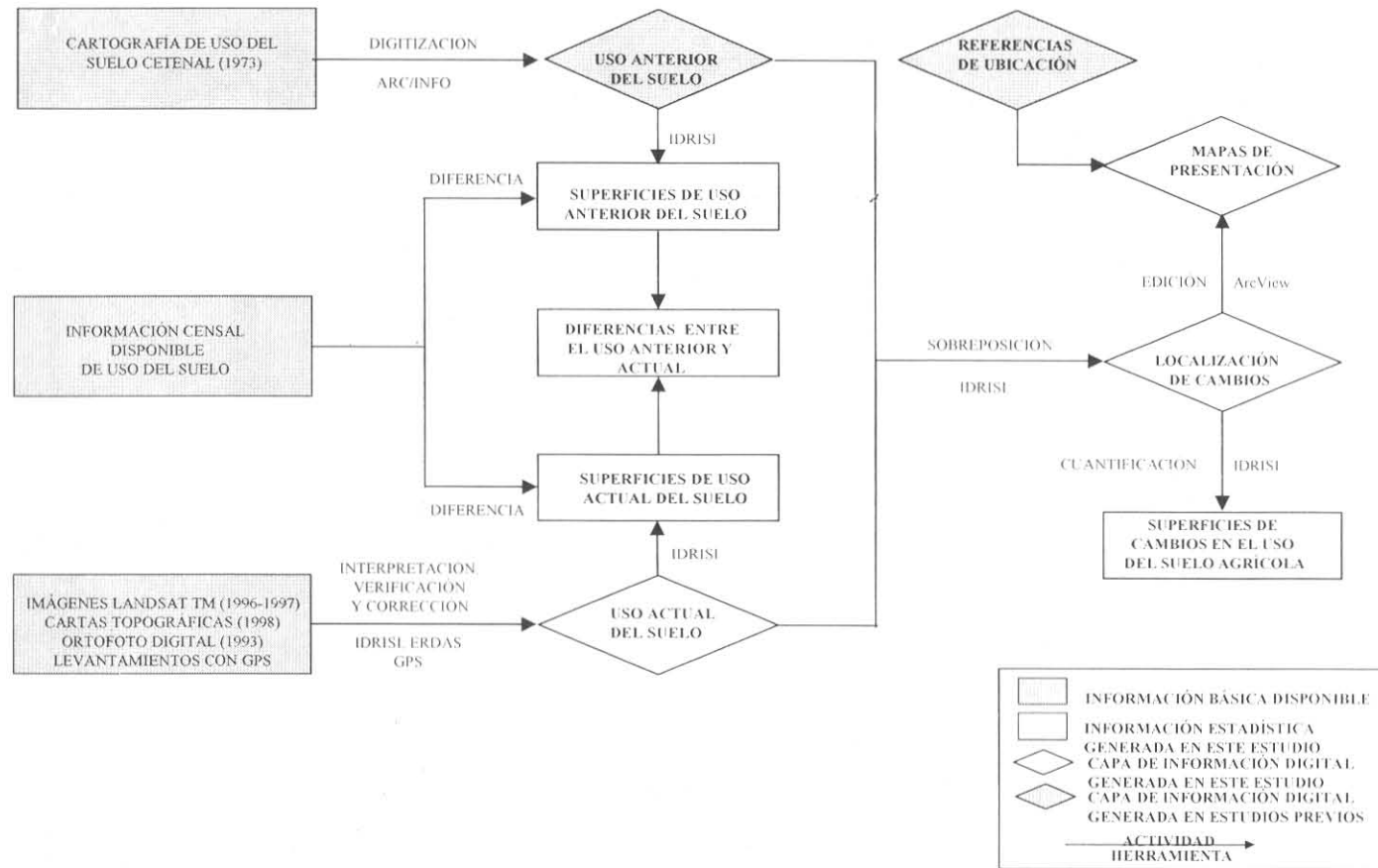


Figura 2. Diagrama metodológico general para delimitar y cuantificar los cambios en el uso del suelo agrícola del estado de Guanajuato.

ASERCA-SAGARPA para realizar algunos estudios de esta entidad.

Estas imágenes son de la época de secas (noviembre a abril), por lo que presentan mínima nubosidad; por la misma razón, los cultivos establecidos en esta época (trigo, hortalizas y cultivos perennes) son de riego. Por lo anterior, originalmente se supuso que se podría discriminar la superficie agrícola de riego de la de temporal y lograr una delimitación y cuantificación aproximada de la agricultura bajo las dos condiciones de humedad. De acuerdo con los objetivos de este trabajo se consideró suficiente la delimitación de las siguientes clases generales: uso agrícola (riego y temporal), pecuario/forestal, zonas urbanas y cuerpos de agua. A continuación se describe el procedimiento general para la delimitación y cuantificación de dichas clases.

Después de realizar algunas clasificaciones no supervisadas y supervisadas en el sistema ERDAS, de revisar la información complementaria y considerando el conocimiento general que se tiene del área en estudio, se decidió tomar como base para la clasificación del uso actual del suelo, la delimitación visual del compuesto de las bandas 4-3-2 (RGB), por ser el que mostró más claramente las clases a discriminar. Dicha clasificación se realizó desplegando la imagen en el sistema ArcView, creando una nueva cobertura en formato *Shape File* y digitizando, directamente en la pantalla de la computadora los diferentes tipos de uso del suelo a nivel de subsector (Figura 3).

Las fuentes de información de apoyo más importantes para esta clasificación fueron: las cartas topográficas escala 1:50 000 (INEGI, 1998a); una ortofoto digital con una resolución de 2 m, generada a partir de fotografías aéreas de 1993 (INEGI, 1993); y los levantamientos de campo con GPS. Se procuró extender los trazos fuera de los límites estatales. Una vez generada la cobertura de

uso actual del suelo se importó al sistema ARC/INFO para ser ajustada mediante puntos de control, recortada con el límite estatal y convertida a formato *raster*.

Para hacer comparables las clases "áreas urbanas" y "cuerpos de agua" del uso anterior (1970) y actual (1997), se establecieron algunos criterios. Debido a que en el uso anterior del suelo se digitizaron solamente los cuerpos de agua permanentes, se siguió el mismo criterio con esta clase en el uso de 1997. Originalmente, la digitización del uso anterior del suelo se hizo únicamente para las principales áreas urbanas, mientras que en el uso actual se digitizaron todas las áreas urbanas consideradas en las cartas topográficas escala 1:50 000, marcadas con color amarillo; por lo anterior, fue necesario agregar al uso anterior del suelo las ciudades faltantes.

Después de generar la cobertura de uso actual del suelo se identificaron 28 puntos de control, distribuidos en todo el estado, correspondientes a rasgos identificables claramente en la imagen (por ejemplo, cruces de carreteras). Esta cobertura de puntos se importó al sistema ARC/INFO, en donde se asignaron las coordenadas geográficas a cada punto de control con ayuda del GPS y cartas topográficas escala 1:50 000, luego se convirtió a la proyección de la imagen "Universal Transversa de Mercator" (UTM).

El error máximo aceptado para cada punto de control fue menor de 15 m en campo, equivalente a 0.3 mm en el mapa. Enseguida, la cobertura de uso actual del suelo se ajustó a esta cobertura de puntos con el propósito de lograr la máxima exactitud al realizar la sobreposición de las capas de uso anterior y actual del suelo. Posteriormente, se verificaron en campo las principales discrepancias mediante la clasificación supervisada automatizada y con otras capas digitales de información disponibles (por ejemplo, el modelo digital del terreno), algu-

nos polígonos se ajustaron como resultado de esta verificación. Finalmente, se recortó con base en el mismo límite estatal utilizado en el uso anterior del suelo, se convirtió en formato *raster* y se exportó al sistema IDRISI, en donde, junto con el uso anterior del suelo, se realizó el proceso de análisis espacial para delimitar y cuantificar los cambios en el mismo.

Para el cálculo de superficies de uso actual del suelo se procedió de manera similar que para el de su uso anterior, con la diferencia de que en este caso, la imagen estatal primeramente fue dividida por DDR y posteriormente por municipio. Las superficies de uso anterior y actual del suelo se agruparon en solamente cuatro clases: agrícola, áreas urbanas, cuerpos de agua y pecuario/forestal, para poder hacer comparaciones entre ellas y con los datos censales de uso del suelo.

Localización de los cambios en el área agrícola

Para conocer la distribución espacial de los cambios generales registrados en el uso del suelo agrícola y su relación con otros usos, se sobrepusieron en el sistema IDRISI el uso del suelo a nivel de subsector relativo a 1970, agrupado en cinco categorías, pero con las clases de uso del suelo delimitadas para 1997. A las clases de uso del suelo en 1970 se les asignaron los siguientes valores: 1 = agrícola, 2 = áreas urbanas, 3 = cuerpos de agua, 4 = otros usos y 5 = sin clasificar. A las clases de uso del suelo en 1997 se asignaron los siguientes valores: 10 = agrícola, 20 = áreas urbanas, 30 = cuerpos de agua y 40 = otros usos. Posteriormente, estas imágenes se sobrepusieron sumando ambas capas de información, los resultados, de acuerdo con las combinaciones posibles, se presentan en el Cuadro 2.

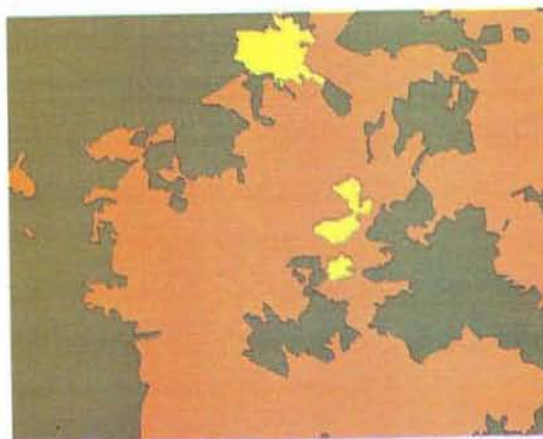


Figura 3. Imagen de satélite en RGB, vectores y polígonos generados.

Los valores diferentes de las combinaciones posibles señaladas en el Cuadro 2 se consideran un indicador de la exactitud de la sobreposición. Los posibles valores diferentes al realizar la sobreposición correspondiente a los valores originales de ambas capas de información (1, 2, 3, 4 y 5 para uso anterior y 10, 20, 30 y 40 para uso actual), los cuales, al ser sumados a las áreas fuera de los límites, con valor cero, dieron como resultado los valores originales de dichas capas.

Existen combinaciones que no son muy factibles, por ejemplo, el crecimiento agrícola y el de cuerpos de agua en áreas urbanas, en tal caso, se consideró como un indicador de la exactitud de la sobreposición y de la exactitud en la delimitación de las clases.

Para hacer más eficiente este proceso, se generó en el editor de textos un archivo de comandos ejecutables por lote con extensión.bat.

De la misma manera que para el uso anterior y actual del suelo, se calcularon superficies de los cambios en el uso del suelo a nivel estatal, por DDR y municipio.

Edición e impresión de mapas de presentación

Debido a que el acabado de los mapas de presentación es mejor en formato vectorial, los mapas finales en formato *raster* fueron vectorizados en el módulo ARC de ARC/INFO. Los mapas digitales de uso anterior, uso actual y cambios en el uso del suelo, se desplegaron y editaron en el sistema ArcView, donde se les sobrepuso la división política, vías de comunicación y gradícula. Posteriormente se enviaron a impresión a dos escalas: tamaño carta (escala 1: 1 600 000) y mapas de trabajo (escala 1:400 000). Estos últimos fueron muy importantes para realizar ajustes mediante verificación de campo.

Cuadro 2. Valores asignados al uso del suelo en 1970 y 1977, combinaciones posibles al realizar la sobreposición y descripción de la clase generada

Uso 1970	Uso 1997	Suma	Descripción de la clase
1	10	11	Coincidencia agrícola
	20	21	Crecimiento urbano sobre agricultura
	30	31	Crecimiento de cuerpos de agua sobre agricultura
	40	41	Crecimiento de otros usos sobre agricultura
2	10	12	Crecimiento agrícola sobre urbano
	20	22	Coincidencia de áreas urbanas
	30	32	Crecimiento de cuerpos de agua sobre urbano
	40	42	Crecimiento de otros usos sobre urbano
3	10	13	Crecimiento agrícola sobre cuerpos de agua
	20	23	Crecimiento urbano sobre cuerpos de agua
	30	33	Coincidencia de cuerpos de agua
	40	43	Crecimiento de otros usos sobre cuerpos de agua
4	10	14	Crecimiento agrícola sobre otros usos
	20	24	Crecimiento de áreas urbanas sobre otros usos
	30	34	Crecimiento de cuerpos de agua sobre otros usos
	40	44	Coincidencia de otros usos
5	10	15	Área agrícola en 1997 sobre área sin clasificar
	20	25	Área urbana en 1997 sobre área sin clasificar
	30	35	Área cuerpos de agua en 1997 sobre área sin clasificar
	40	45	Área de otros usos en 1997 sobre área sin clasificar

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Uso anterior del suelo

La Figura 4 muestra la distribución espacial de las clases generales del uso del suelo en 1970 en el estado de Guanajuato, las superficies desagregadas por DDR de este mapa se presentan en el Cuadro 3. De acuerdo con estas cifras, la superficie total cuantificada para el estado de Guanajuato es de 3 041 154 ha, la cual es inferior a la cifra oficial (3 049 100) en 7 946 ha equivalentes al 0.26%.

Uso actual del suelo

La Figura 5 corresponde a las cuatro clases de uso actual del suelo para el estado de Guanajuato y en el Cuadro 4 se presentan las superficies de dicho mapa, en este caso, se calculó una superficie total del estado de 3 041 119 ha, lo que difiere de la cifra oficial en 7 981 ha (0.26%) y en 35 ha (0.001%) con respecto a la superficie total calculada para el uso anterior del suelo. A pesar de que se utilizaron los mismos límites estatales (SPP, 1980), las superficies entre el uso anterior y actual no son exactamente las mismas, esto es debido a que, para el uso anterior del suelo, las estadísticas se calcularon directamente por DDR, mientras que para el uso actual fue necesario dividir el estado en DDR y posteriormente calcular las superficies, lo que provocó la pérdida de píxeles. Sin embargo, estas diferencias en términos porcentuales son mínimas.

Inicialmente se pensó realizar la discriminación entre agricultura de riego y temporal, lo que no fue posible debido a que, en los últimos años, durante la época de secas sólo se siembra una pequeña parte del área regable, por esta razón, el cálculo de las superficies de dicha clase resultó muy por debajo de la superficie obtenida en el mapa de uso anterior del suelo y de la información censal existente. Con apoyo de datos pro-

porcionados por la Delegación de la SAGARPA en el estado de Guanajuato, la explicación a esta situación es que la superficie sembrada con trigo durante el ciclo de otoño-invierno (O-I) presenta una tendencia descendente a partir de los últimos años de la década de los ochenta, cuando alcanzó más de 150 000 ha sembradas, mientras que para el ciclo O-I 2000-2001 apenas rebasó las 40 000 ha. Esta tendencia se atribuye a la baja rentabilidad del cultivo, con una relación costo-beneficio de 1.18 para el año 2000, provocada por la estabilidad de los precios del producto y la tendencia ascendente de los costos de producción; por ejemplo, en el período de 1997 a 2000 el precio del trigo se mantuvo en alrededor de \$1 200/ton, mientras los costos de producción se incrementaron de \$6 500 a \$7 500/ha. En las siembras con riego por gravedad, esta situación es más crítica, debido a que la restricción actual del agua (70 cm/ha/año) ha provocado la disminución de los rendimientos y, por tanto, de la rentabilidad. La tendencia descendente del cultivo de trigo ha sido compensada, en parte, por el incremento de la superficie sembrada con cebada, sin embargo, es muy evidente la disminución de la intensidad en la agricultura, observándose el descanso de las tierras agrícolas, principalmente durante el ciclo O-I.

Durante el ciclo primavera-verano (P-V) el sorgo enfrenta una situación similar a la del trigo, con una tendencia descendente en la superficie sembrada y sustituido, en parte, por los cultivos de maíz y frijol. La situación es más notoria en el caso de sorgo de temporal, ya que en la década de los ochenta alcanzó una superficie cosechada cercana a las 300 000 ha y para el 2000 apenas rebasó las 40 000 ha, mientras que la superficie cosechada de sorgo de riego disminuyó de 180 000 a 140 000 ha. De la misma manera que para el trigo, los precios del sorgo se han mantenido en alrededor de \$1 000/ton desde 1995, en contraste con los costos de

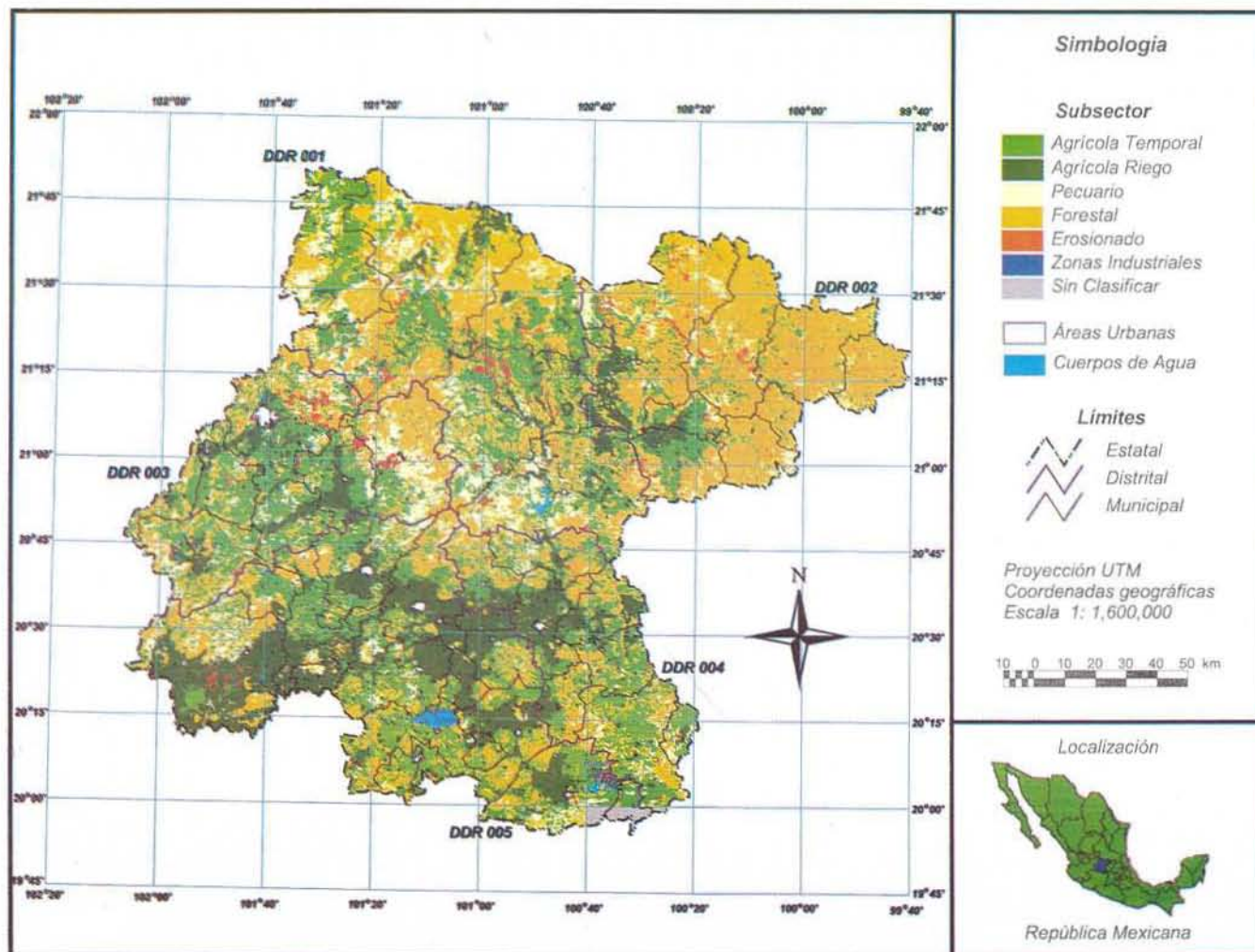


Figura 4. Uso anterior del suelo en el estado de Guanajuato (CETENAL, 1973).

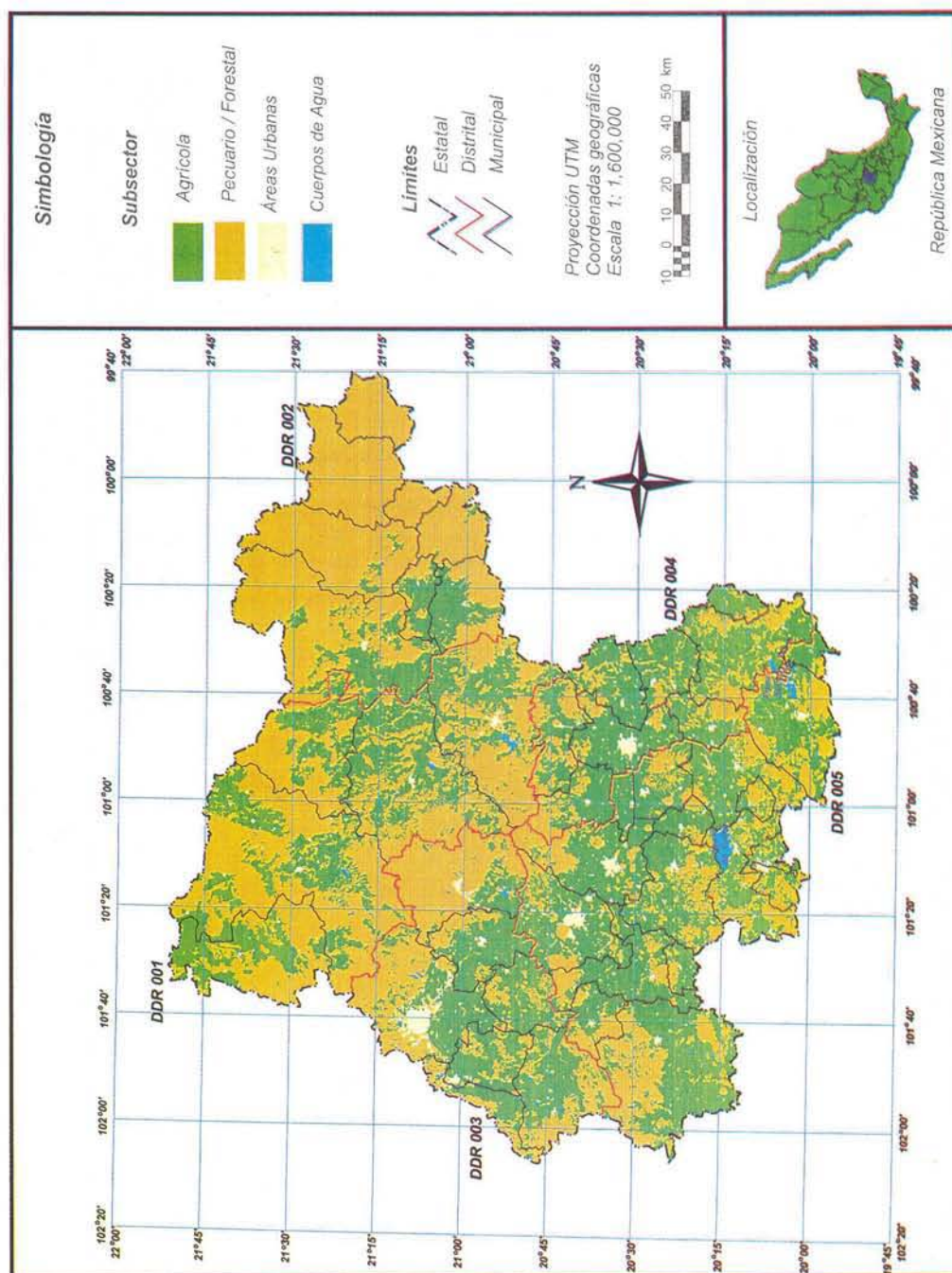


Figura 5. Uso actual del suelo en el estado de Guanajuato, 1997.

producción de este cultivo bajo condiciones de riego que se incrementaron de \$2 300 en 1995 a cerca de \$ 7 000/ha en el 2000.

Por lo tanto, se puede afirmar que el patrón de cultivos más importante por mucho tiempo en El Bajío, sorgo (P-V) y trigo (O-I), alcanzó su óptimo a fines de la década de los ochenta, actualmente está en plena decadencia y condenado a desaparecer, en caso de continuar las políticas de precios actuales.

Comparaciones de las superficies de uso anterior y actual del suelo

Al comparar la superficie agrícola total en 1970 (Cuadro 3) y 1997 (Cuadro 4) se observa una disminución de 57 051 ha (3.9%) durante este período. Sin embargo, a diferencia del resto de los Distritos, en el DDR 004 se observa un incremento de 23 642 ha (9.6%), esta tendencia es congruente con los resultados reportados en un estudio previo para la misma área (31 763 ha; García *et al.*, 2000).

La diferencia en el cálculo del incremento de la superficie agrícola se debe a que en el estudio previo, el uso del suelo para 1993

se delimitó mediante trazos en fotografías aéreas escala 1:75 000 y se digitizaron únicamente las principales áreas urbanas.

Algunas de las características de este Distrito, a las que se pueden atribuir las ampliaciones más recientes en el área agrícola de riego y temporal son: a) una gran superficie de laderas tendidas con suelos vertisoles, considerados muy aptos para la agricultura; y b) en este Distrito se localiza uno de los últimos acuíferos vedados para la explotación de aguas subterráneas (Valle de la Cueva), considerado actualmente en equilibrio entre la extracción y la recarga (INEGI, 1998b).

Al realizar comparaciones a nivel municipal, se observa que en el uso anterior del suelo todos los municipios presentan áreas agrícolas, mientras que en el uso actual, los municipios de Doctor Mora, Santa Catarina y Xichú no reportan áreas agrícolas, esto es debido a que no es posible detectar en la imagen de satélite pequeñas superficies aisladas de agricultura de temporal localizadas en la cartografía de uso anterior. También es un hecho el abandono de algunas de estas áreas.

Cuadro 4. Uso actual del suelo en el estado de Guanajuato con base en imágenes de satélite (1997)

Distritos de Desarrollo Rural (DDR)	Agrícola ha (%)	Pecuario/Forestal ha (%)	Urbano ha (%)	Cuerpos de Agua ha (%)
DDR 001 Dolores Hidalgo	305 675 (21.7)	501 511 (32.2)	5 036 (8.7)	2 799 (16.7)
DDR 002 San Luis de la Paz	96 754 (6.9)	460 919 (29.6)	1 221 (2.1)	152 (1.0)
DDR 003 León	230 638 (16.4)	225 020 (14.5)	17 270 (30.0)	2 291 (13.7)
DDR 004 Celaya	246 359 (17.5)	102 562 (6.6)	8 726 (15.1)	1 331 (8.0)
DDR 005 Cortázar	529 163 (37.5)	266 678 (17.1)	25 442 (44.1)	10 132 (60.6)
<i>Total estatal</i>	<i>1 408 589 (100)</i>	<i>1 556 690 (100)</i>	<i>57 695 (100)</i>	<i>16 705 (100)</i>

Los datos oficiales de la SAGARPA (SARH, 1993) muestran una superficie total de 1 254 097 ha dedicadas a la actividad agrícola y difieren de las cifras censales de 1980 (1 247 301 ha) en solamente 6 796 ha. Esto significa que la ampliación de la frontera agrícola en el estado de Guanajuato se realizó predominantemente durante el período de 1950-1980.

La tendencia del área agrícola total es congruente con las superficies de los mapas de uso anterior y actual del suelo, en el sentido de que en la actualidad se presente estabilidad o incluso una disminución de la superficie agrícola. Sin embargo, debido a que los cálculos de los mapas digitales realizados para este trabajo sobreestiman la superficie agrícola en alrededor de 150 000 ha, no son comparables con las cifras censales. Una explicación a estas diferencias es que las estadísticas existentes basadas en censos, consideran las superficies agrícolas netas, mientras que las calculadas para el uso anterior y actual del suelo, no descartan las superficies ocupadas por carreteras, caminos y pequeñas instalaciones rurales.

A pesar de la aparente estabilidad de la superficie agrícola total después de la década de los ochenta, la incorporación de superficie agrícola de temporal a la agricultura de riego fue considerable, pues ésta se amplió en 125 859 ha (aproximadamente la cuarta parte de la superficie total de riego) y el área agrícola de temporal disminuyó en 119 062 ha.

Actualmente la agricultura de riego presenta una gran variación en espacio y tiempo, debido a que el área con riego por bombeo enfrenta problemas, ante la disminución de la capacidad de aprovechamiento de los pozos y el costo creciente del agua al bombearla desde mayores profundidades; mientras que la escasez de agua en las presas ha obligado a su racionalización (70 cm/ha/año) en las áreas de riego por gravedad. Dicha variación dificulta la obtención

de un mapa detallado y confiable de la superficie regable en el estado de Guanajuato, ya que la estimación de la superficie agrícola de riego mediante imágenes de satélite es válida exclusivamente para la fecha de la imagen.

Por lo anterior, y teniendo en cuenta la veda total en el estado para la explotación de las aguas subterráneas para uso agrícola, se considera que a mediados de la década de los noventa la superficie sembrada con riego alcanzó el óptimo e inició un marcado descenso.

La clase del uso anterior del suelo "otros usos" (Cuadro 3), incluye los usos "zonas erosionadas" y "explotación industrial". Esta clase sumada a las clases de "uso pecuario" y "uso forestal" corresponden a la clase pecuario/forestal de 1997 (Cuadro 4). Esta clase se incrementó en 33 725 ha, lo que se explica por el abandono de tierras agrícolas degradadas, con un uso posterior, principalmente como agostaderos.

El área urbana se incrementó en 33 412 ha, por lo que, en términos porcentuales, el mayor crecimiento corresponde a esta clase, con un 58% de crecimiento durante el período 1970-1997. Sobresalen por su extensa ampliación las ciudades de León, Celaya, Irapuato, Salamanca y Silao.

Los cuerpos de agua aparentemente se incrementaron en 799 ha (4.8%), aunque la diferencia es pequeña, se esperaba que esta clase disminuyera para 1997. Esta aparente estabilidad o ligero incremento en los cuerpos de agua se debe a que en ambas capas únicamente se digitizaron los cuerpos de agua permanentes, quizá su reducción o desaparición se presente más bien en los que son temporales.

Por otra parte, las figuras alargadas de los ríos se perdieron en parte al *rasterizar* los mapas de uso anterior y actual, debido a

que tienen un ancho muy inferior a la resolución de las capas de información (100 x 100 m), estas figuras también resultaron más afectadas por los errores de coincidencia, al sobreponer el uso anterior y el actual. Lo anterior sugiere que, en el caso de cuerpos de agua, se debe trabajar en un sistema vectorial o incrementar la resolución en un sistema *raster*. Por estas razones, en el mapa de localización de los cambios, los cuerpos de agua no se analizan espacialmente en relación con la agricultura.

Localización de los cambios en el uso del suelo agrícola y cuantificación del error

En el Cuadro 5 se presentan las superficies en hectáreas, resultado de sobreponer el uso anterior y actual del suelo, en donde se pueden apreciar las coincidencias y crecimientos de las clases de uso del suelo y la cuantificación del error. El error total de coincidencia fue de 0.005%, ya que 163 de los 3 041 250 de ha totales (equivalentes a píxeles) no coincidieron al sobreponer ambas capas de información. Sin embargo, se observan diferencias entre Distritos, debido a que el uso anterior originalmente se digitizó por DDR, mientras que el uso actual se generó a nivel estatal y posteriormente se recortó por DDR, proceso que provocó la pérdida de píxeles.

Las diferencias entre Distritos están asociadas al número de líneas que fueron cortadas por los límites distritales, el mayor número de líneas cortadas correspondió al DDR 004, y como consecuencia, el mayor error de coincidencia.

La coincidencia de las áreas agrícolas entre 1970 y 1997 representa el 38.77 % de la superficie total, el crecimiento de esta clase sobre el uso pecuario/forestal equivale al 7.31 % y sobre áreas urbanas al 0.11%.

El crecimiento de la agricultura sobre áreas urbanas se considera poco probable, por lo

que se atribuye a errores de coincidencia entre capas de información y errores de exactitud en la delimitación de las clases. A pesar de que el área urbana correspondió a la clase que, en proporción, alcanzó mayor crecimiento durante el período en estudio, el crecimiento sobre áreas agrícolas representa solamente el 1.02% de la superficie total, la coincidencia de áreas urbanas el 0.66% y los crecimientos sobre áreas de uso pecuario/forestal el 0.23%.

La coincidencia del uso pecuario/forestal representa el 42.54% de la superficie total, su crecimiento sobre áreas agrícolas el 8.40% y atribuido a errores de coincidencia entre las capas de información y de clasificación, el crecimiento sobre áreas urbanas (0.03%).

El área sin clasificar correspondiente a las dos cartas sin editar de uso anterior del suelo se presenta únicamente en los DDR 005 y 004. Para el DDR 005 se calculó una superficie de 10 260 ha (0.34%) sin clasificar y 972 ha (0.03%) para el DDR 004.

A pesar de que el balance total de la superficie agrícola de los mapas de uso anterior y actual indica estabilidad o una pequeña disminución de la superficie agrícola entre 1970 y 1997 (-58 180 ha), la superposición de ambas capas de información demuestra la existencia de cambios. Por un lado, se presenta la disminución del área agrícola, debido al abandono de tierras y crecimiento de las áreas urbanas e industriales sobre tierras agrícolas; y por otro, dicho crecimiento se compensa, cuando menos en parte, por la incorporación de tierras de uso pecuario y forestal a la agricultura.

En la Figura 6 se muestran las clases más importantes de los cambios en el uso del suelo durante el período de 1970 a 1997, resultado de sobreponer el uso anterior y actual del suelo.

Cuadro 3. Superficie (ha) del uso anterior del suelo por Distrito de Desarrollo Rural del estado de Guanajuato de acuerdo con CETENAL (1973)

Distritos de Desarrollo Rural (DDR)	Agrícola riego ha (%)	Agríc. temporal ha (%)	Agrícola total ha (%)	Pecuario ha (%)	Forestal ha (%)	Urbano ha (%)	Cuerpos de agua ha (%)	Otros usos ¹ ha (%)	Sin clasificar ² ha (%)
DDR 001	44 248 (10.2)	279 417 (27.1)	323 665 (22.1)	139 179 (42.8)	324 928 (28.3)	2 802 (11.5)	2 647 (16.6)	22 168 (35.5)	0 (0)
DDR 002	28 753 (6.6)	86 926 (8.4)	115 679 (7.9)	39 998 (12.3)	392 898 (34.3)	700 (2.9)	292 (1.8)	9 494 (15.2)	0 (0)
DDR 003	48 521 (11.1)	203 982 (19.8)	252 503 (17.2)	66 230 (20.4)	136 608 (11.9)	6 309 (26.0)	1 010 (6.3)	12 570 (20.1)	0 (0)
DDR 004	61 385 (14.1)	162 170 (15.7)	223 555 (15.2)	2 3309 (7.2)	105 990 (9.2)	3 139 (12.9)	365 (2.3)	2 513 (5.6)	972 (8.7)
DDR 005	252 294 (58.0)	299 073 (29.0)	551 367 (37.6)	56 151 (17.3)	186 453 (16.3)	11 333 (46.7)	1,641 (73.0)	4 425 (23.6)	10 261 (91.3)
Total Estatal	435 201 (100)	1 031 568 (100)	1 466 769 (100)	324 867 (100)	1 146 877 (100)	24 283 (100)	15 955 (100)	51 170 (100)	11 233 (100)

¹ = Erosión y Zonas industriales, ² = pequeña parte sin clasificar correspondiente a las cartas no editadas: E-14-A14 y E-14-A-15.

Cuadro 5. Superficie (ha) de coincidencia y crecimiento de los usos de suelo agrícola, urbano y pecuario/forestal entre mapas de uso anterior y actual del suelo

Distrito de Desarrollo Rural (DDR)	Coincidencia agrícola (ha)	Crecimiento agrícola (ha) sobre:		Coincidencia urbana	Crecimiento urbano (ha) sobre:		Coincidencia Pec/For (ha)	Crecimiento Pec./For. (ha) sobre:		Cuerpos de agua (ha)	Sin clasificar (ha)	Error total de coincidencia (ha)
		Urbano	Pec./For.		Agricultura	Pec./For.		agricultura	Urbano			
DDR 001	239 697	509	65 681	1 952	1 720	1 223	419 390	82 078	331	2 810	0	28
DDR 002	80 500	194	16 059	368	696	210	426 314	34 425	133	149	0	23
DDR 003	192 040	463	38 098	5 684	8 433	3 186	173 717	51 135	161	2 300	0	25
DDR 004	201 584	417	44 535	2 660	5 636	475	86 748	15 402	65	1 331	972	50
DDR 005	465 307	1 710	57 897	9 311	14 448	1 974	187 670	72 560	338	10 140	10 260	37
SUBTOTAL (%)	1 179 128 (38.77)	3 293 (0.11)	222 270 (7.31)	19 975 (0.66)	30 933 (1.02)	7 068 (0.23)	1 293 839 (42.54)	255 600 (8.40)	1 028 (0.03)	16 730 (0.55)	11 232 (0.37)	163 (0.005)
TOTAL (%)	3 041 259 (100)											

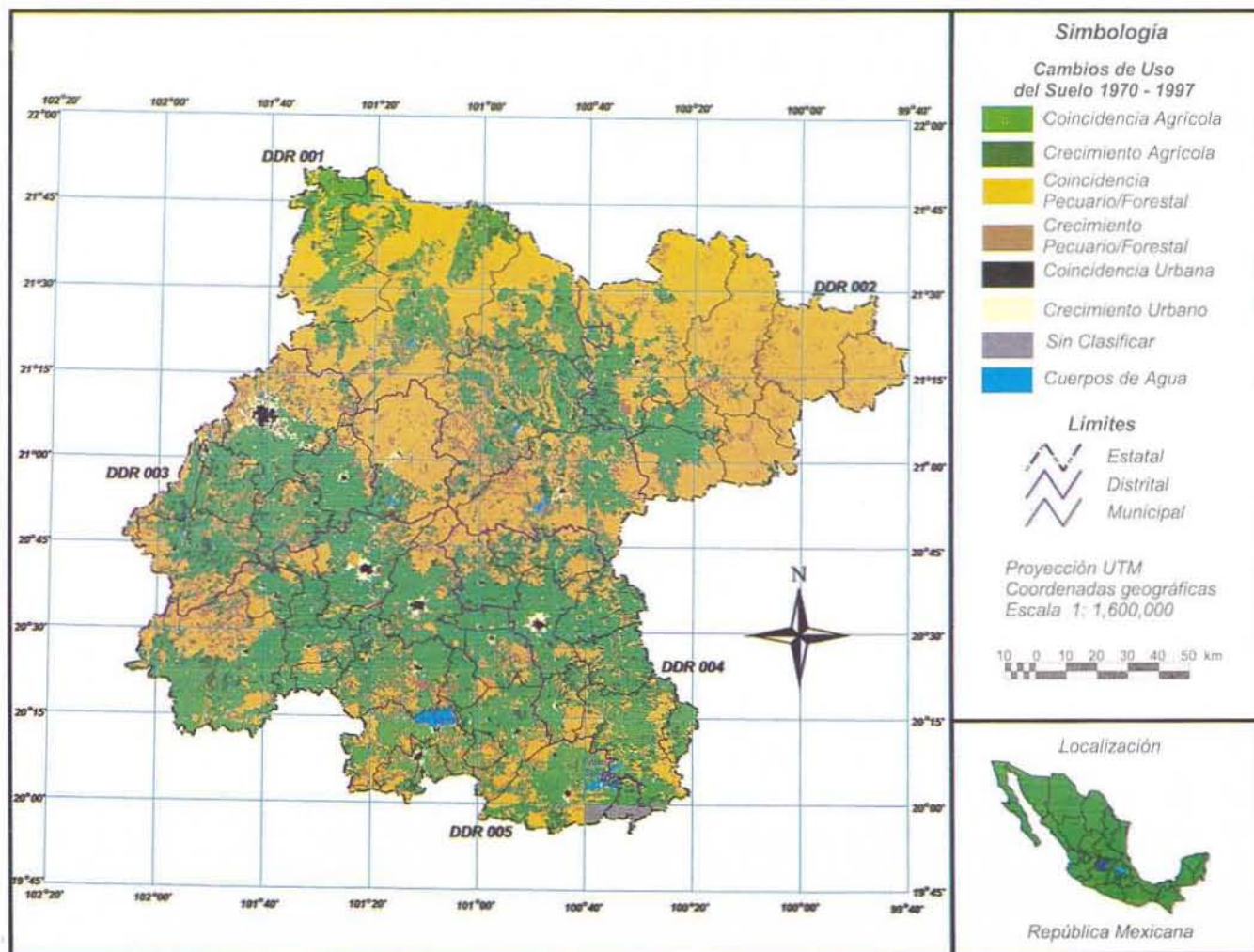


Figura 6. Localización de los cambios en el uso del suelo durante el período de 1970 a 1997.

CONCLUSIONES

La ampliación de la frontera agrícola en el estado de Guanajuato se realizó predominantemente hasta la década de los años ochenta, en la década de los noventa se presenta estabilidad y, actualmente, una leve tendencia a disminuir.

A pesar de la tendencia actual, se presentan cambios en el área agrícola, como son: el abandono de tierras y la ocupación por áreas urbanas e industriales, los cuales se compensan, en parte, con la incorporación de tierras de uso pecuario y forestal a la agricultura.

El principal cambio en la década de los noventa fue la incorporación de áreas agrícolas de temporal a las de riego. Actualmente, el área de riego presenta una tendencia contraria, la agricultura de temporal se incrementa debido a la escasez del agua de riego. Dicha área presenta, además, una gran variación espacial y temporal, lo que impidió discriminar la superficie agrícola actual de riego y temporal.

Proporcionalmente, los cambios más dinámicos de uso del suelo fueron los crecimientos urbanos e industriales (58%), predominantemente sobre áreas agrícolas y, en menor grado, sobre áreas de uso pecuario y forestal. Sin embargo, es necesario aclarar que la superficie total de las áreas urbanas e industriales actuales apenas rebasa el 1% de la superficie total del estado.

Se considera que la localización y cuantificación de los cambios en el uso del suelo y su posterior relación con su aptitud para la agricultura, permitirá aportar más elementos de juicio que pueden ser de utilidad para soportar acciones de reconversión productiva.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el financiamiento otorgado a través del proyecto de "Instalación I3567-B", del cual forma parte el presente artículo.

REFERENCIAS

- ☐ Cazorzi, F. y G. D. Fontana (1994), "Effect of land use changes on flood hazard: a case study", *Proceedings vol. 2: Eighth annual symposium on geographic information systems in forestry, environmental and natural resources management*, February 21-25, 1994, Vancouver, British Columbia, Canada, pp. 453-461.
- ☐ CETENAL (1973-1974), *Cartas de uso del suelo del estado de Guanajuato*, escala 1:50 000, Secretaría de Programación y Presupuesto, México.
- ☐ CEPAL-PNUMA (1983), *Expansión de la frontera agropecuaria y medio ambiente en América Latina*, Centro de Investigación de la Facultad de Ciencias Administrativas, Madrid, pp. 14-16.
- ☐ Chuvieco, E. (1990), *Fundamentos de teledetección espacial*, Ediciones Rialp, S.A., Madrid, España.
- ☐ Eastman, R. J. (1997), *IDRISI for Windows Version 2.0*, Clark University, Graduate School of Geography, Worcester, MA.
- ☐ ERDAS Inc. (1996), *ERDAS IMAGINE. ERDAS Field Guide*, 3a. ed. ERDAS Inc., Atlanta, GA.
- ☐ ESRI (1996a), *ARC/INFO. Version 7.1 for Windows NT*, Environmental Systems Research Institute, Inc. Redlands, CA.
- ☐ ESRI (1996b), *ArcView. Version 3.0 for Windows*, Environmental Systems Research Institute, Inc. Redlands, CA.
- ☐ FAO (1978), "Report on the Agro-Ecological Zones Project", *Methodology and results for Africa*, vol. 1, World Soil Resources Report 48/1, FAO, Rome.

- FAO (1981), "Informe del proyecto de zonas agroecológicas", *Metodología y resultados para América del Sur y Central*, vol. 3, Informe sobre recursos mundiales de suelos 48/3. FAO, Roma.
- Fuentes A., L. (coord.; 1992), *Cambios en el uso del suelo agrícola en México*, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 9-11.
- García N., H., J. López B., R. Moreno S., M. L. Villers R. y R. R. García D. (2000), "Delimitación y caracterización de las tierras con uso inadecuado para la agricultura en el Distrito de Desarrollo Rural 004 Celaya, Guanajuato", *Terra* 18 (1), pp. 11-25.
- Gomarasca, M. A., P. A. Brivio, F. Pagnoni y A. Galli (1993), "One century of land changes in the metropolitan area of Milan (Italy)", *International Journal of Remote Sensing* 14, pp. 211-223.
- Goodchild, M. F. (1991), "The technological setting of GIS", en Maguire D. J., M. F. Goodchild y D. W. Rhind (eds.), *Geographical information systems: principles and applications*, Longman, London, vol. 1, pp. 45-54.
- IIASA (1993), *Call for proposals. land use and global change: past, present and future*, Institute for Applied Systems Analysis. Laxemburg, Austria.
- INEGI (1993), Fotografías aéreas, escala 1:75 000 de la zona F14-10 (Querétaro), líneas de vuelo 147 a 152 con fecha de mayo y junio de 1993, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Aguascalientes, México.
- INEGI (1998a), *Cartas de uso del suelo del estado de Guanajuato*, escala 1:50 000, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, Aguascalientes, México.
- INEGI (1998b), *Estudio hidrológico del estado de Guanajuato*, Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática, Aguascalientes, México.
- Kunhnle, R. A., R. L. Bigner, G. R. Foster y E. H. Grissinger (1996), "Effect of land use changes on sediment transport in Goodwin Creek", *Water Resources Research* 32 (10), pp. 3189-3196.
- Liu, K. y C. C. Lu (1992), "Sustainable land use and sustainable development: critical issues", en Bellmy, M. A. y B. L. Greenshields (eds.), *Issues in agricultural development: sustainability and cooperation*, Dartmouth Publishing Company, Ltd., pp. 322-328.
- Meissner, R., J. Seeger y H. Rupp (1998), "Measuring environmental impacts of land use changes on water quality with lysimeters", en Fuhr, F., R. J. Hance, J. R. Okummer y J. O. Nelson (eds.), *21th National Meeting of the American Chemical Society*, April 3-17, San Francisco Ca., pp. 163-176.
- Mwalyosi R., B. B. (1992), "Land use changes and resource degradation in South-West Masailand, Tanzania", *Environmental Conservation* 19 (2), pp. 145-152.
- Phondekar, D. G. y V. S. Phadke (1993), "Impact of deforestation on rural land use: a case study of Budhawale", en Onkar S., N. Prithvish, V. K. Kumra y S. Jagadish (eds.), *Frontiers in environmental geography*, Concept Publishing Company, New Delhi, India, pp. 125-136.
- SARH (1993), *Características de los Distritos de Desarrollo Rural de México*, Coordinación General de Delegaciones, México.
- Soto M., C. y A. Soto M. (1990), "Cambios recientes en el uso del suelo agrícola en la región de El Bajío, Gto.", *Geografía y Desarrollo*, Revista del Colegio Mexicano de Geografía, A. C., núm. 2 (5), pp. 3-11.
- Soto M., C. y A. Soto M. (1992), "Cambios recientes en el uso del suelo agrícola en México", en Fuentes A., L. (coord.), *Cambios en el uso del suelo agrícola en México*, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 12-25.
- SPP (1980), *Síntesis geográfica de Guanajuato*, Secretaría de Programación y Presupuesto, Coordinación General de los Servicios Nacionales de Estadística, Geografía e Informática, México.
- Treitz, P. M., P. J. Howarth y P. Gong (1992), "Application of satellite and GIS technologies for land-cover and land-use mapping at the rural-urban fringe: a case study", *Photogrametric Engineering & Remote Sensing* 58 (4), pp. 439-448.
- Wielemaker, W. G. y A. L. E. Landsu (1991), "Land use changes affecting classification of a Costa Rican soil", *Soil Science Society of America Journal* 55 (6), pp. 1621-1624.