



Determinación del crecimiento urbano a través de imágenes satelitales:

*Caso de estudio Cd. Obregón y su relación con la pérdida de
tierras agrícolas en el Valle del Yaqui.*

Jesús Ariel Castro López

Agustín Robles Morua

Jaime Garatuza Payán

Luis A. Méndez Barroso

Zulia M. Sánchez Mejía

Enrico A. Yopez González

Fco. Alejandro Elías González Castro

Rodolfo Montes Rentería

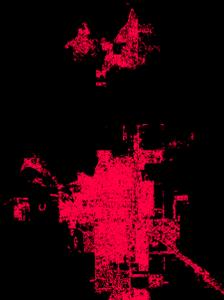
1973



1986



1995



2005





Determinación del crecimiento urbano a través de imágenes satelitales: caso de estudio Cd. Obregón y su relación con la pérdida de tierras agrícolas en el valle del yaqui

Autores:

M.C. Jesús Ariel Castro López

Dr. Agustín Robles Morua

Dr. Jaime Garatuza Payán

Dr. Luis Arturo Méndez Barroso

Dra. Zulia Mayari Sánchez Mejía

Dr. Enrico Arturo Yépez González

M.C. Francisco Alejandro Elías González Castro

M.C. Rodolfo Montes Rentería

ITSON

Instituto Tecnológico de Sonora

5 de Febrero, 818 sur, Colonia Centro, C.P. 85000

Ciudad Obregón, Sonora, México

Teléfono: (644) 410-90-00, E-mail: rectoria@itson.mx

Web: www.itson.mx

Determinación del crecimiento urbano a través de imágenes satelitales: caso de estudio Cd. Obregón y su relación con la pérdida de tierras agrícolas en el Valle del Yaqui

ISBN: 978-607-609-196-8

Primera edición 2018.

Se permite la reproducción total o parcial de la presente obra, así como su comunicación pública, divulgación o transmisión, mediante cualquier sistema o método, electrónico o mecánico [incluyendo el fotocopiado, la grabación o cualquier sistema de recuperación y almacenamiento de información], siempre y cuando esto sea sin fines de lucro y con la condición que se señale la fuente.

Agradecimientos

Agradecemos al Ing. Adolfo Pérez González director de catastro del municipio de Cajeme por darnos acceso a la información catastral actualizada que sirvió para validar los métodos de percepción remota presentados en este manual. También agradecemos al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por haber proporcionado el financiamiento para llevar a cabo este trabajo a través del proyecto del Fondo Sectorial de Investigación Ambiental SEMARNAT-CONACYT, Convocatoria 2015, No. **00000000263296**. Finalmente, agradecemos a la dirección de Recursos Naturales y al Departamento de Ciencias del Agua del Instituto Tecnológico de Sonora por apoyarnos en la realización de este documento.

Contenido

Lista de Tablas e Ilustraciones	5
Lista de Ecuaciones	7
Acerca de los autores	8
Prefacio / Resumen	10
Percepción Remota para Áreas Urbanas y Peri-Urbanas	11
Recopilación de datos	15
Descarga de imágenes satelitales Landsat.	15
Procesamiento de imágenes satelitales	18
Pre-procesamiento de cada una de las imágenes.	18
Composite de cada una de las imágenes.	19
Imágenes recortadas para cada banda de cada año.	21
Reescalamiento y agrupamiento de imágenes.	22
Clasificación no supervisada de cada una de las imágenes.....	23
Resultados de la clasificación no supervisada.	24
Análisis de datos y generación del modelo de predicción	26
Análisis de datos de crecimiento de la mancha urbana	26
Proyecciones del crecimiento urbano al año 2050	31
Validación en campo de la clasificación no supervisada y de las proyecciones del crecimiento urbano	40
Análisis de Imágenes en ArcMap 10.1.....	44
Generación de polígonos sin la capa de cuadras	44
Generación de polígonos utilizando la capa de cuadras	53
Caracterización del tipo de tenencia	59
Bibliografía	65
ANEXO I. INSTRUMENTO DE VALIDACIÓN	66

Lista de Tablas e Ilustraciones

Tabla 1. Evolución de la resolución de las bandas espectrales utilizadas históricamente en la plataforma satelital LANDSAT.	13
Tabla 2. Datos finales obtenidos de Idrisi y ArcMap para realizar el análisis de crecimiento.	26
Tabla 3. Crecimiento superficial acumulado entre 1973 y 2015.	27
Tabla 4. Comparación entre las superficies calculadas con los polígonos generados sin y con capa de cuadras.	58
Ilustración 1. Página de internet de USGS Earthexplorer donde se pueden bajar las imágenes satelitales de Landsat utilizando la herramienta de "Search Criteria"	16
Ilustración 2. Impresión de pantalla para seleccionar "Data sets" y buscar archivos Landsat.	17
Ilustración 3. Impresión de pantalla de cómo crear un proyecto nuevo en IDRISI.	18
Ilustración 4. Impresión de pantalla para realizar la conversión de formato LANDSAT a Idrisi.	19
Ilustración 5. Impresión de pantalla de la herramienta "Composite" de IDRISI.	20
Ilustración 6. Impresión de pantalla del "Cursor Inquiry Mode" necesario para obtener datos de cada imagen.	21
Ilustración 7. Impresión de pantalla de la herramienta "Window" utilizada para recortar imágenes.	22
Ilustración 8. Impresión de pantalla de la operación de re-escalamiento utilizando la herramienta "Project" de Idrisi.	23
Ilustración 9. Impresión de pantalla de la herramienta "Cluster" para realizar la clasificación no supervisada.	24
Ilustración 10. Crecimiento de la mancha urbana de Cd. Obregón desde 1973 a 2005 en formato raster.	24
Ilustración 11. Evolución histórica de la mancha urbana en Cd. Obregón (1973 a 2015) utilizando archivos vectoriales e imágenes de reflectancia de fondo.	25
Ilustración 12. Relación entre el crecimiento poblacional respecto al crecimiento de la mancha urbana de Cd. Obregón en el periodo de 1973 al 2015.	27
Ilustración 13. Relación de crecimiento entre zonas ejidales con respecto a la población durante el periodo de 1973 a 2015.	¡Error! Marcador no definido.
Ilustración 14. Relación del crecimiento de la pequeña propiedad respecto a la población durante el período 1973-2015.	29
Ilustración 15. Crecimiento urbano de Cd. Obregón en relación a la tenencia de la tierra adherida a la mancha urbana durante el periodo histórico de 1973 a 2015.	30
Ilustración 16. Impresión de pantalla para abrir el modulo "Land Change Modeler (LCM)" de Idrisi.	31
Ilustración 17. Impresión de pantalla y resultados de realizar el "Change Analysis y Change Maps" en el módulo LCM de Idrisi.	32

Ilustración 18. Impresión de pantalla de la herramienta "Spatial Trend of Change" del módulo LCM de Idrisi e imagen raster de tendencias de cambio.....	33
Ilustración 19. Impresión de pantalla de la pestaña de "Transition potentials" del módulo LCM de Idrisi.....	33
Ilustración 20. Impresión de pantalla de la pestaña "Variable Transformation Utility del módulo LCM de Idrisi e imagen raster de probabilidades de cambio a urbano.....	34
Ilustración 21. Impresión de pantalla de la pestaña de "Test and Selection of Site and Driver Variables" y "Transition Sub-Model Structure" del módulo LCM de Idrisi.....	35
Ilustración 22. Impresión de pantalla de la pestaña "Run Transition Sub-Model" del módulo LCM de Idrisi.....	36
Ilustración 23. Impresión de pantalla de la pestaña de "Change Prediction" y recuadro para modificar parámetros de la pestaña de "Change Demand Modeling" del modulo LCM de Idrisi. ..	37
Ilustración 24. Impresión de pantalla en la pestaña de "Planning", apartado de "Constraints and Incentives" del módulo LCM de Idrisi.....	37
Ilustración 25. Impresión de pantalla de 10 de la pestaña "Change Prediction" en su apartado "Change Allocation" donde se activa la casilla de "Zoning-Constraints/Incentives" y también se activa la opción de grabar y crear un video de la evolución de la mancha urbana e imagen raster del resultado como cobertura de suelo pronosticada.	38
Ilustración 26. Impresión de pantalla de la pestaña de "Validate" del módulo LCM de Idrisi e imagen raster de falsas alarmas, fallos y aciertos.....	39
Ilustración 27. Características de la periferia de la mancha urbana y la ubicación de los sitios de verificación para la validación de la clasificación no supervisada.....	41
Ilustración 28. Comparación entre la proyección oficial del H. Ayuntamiento de Cajeme y las proyecciones generadas utilizando el Land Change Modeler de IDRISI.....	42
Ilustración 29. Comparación entre las proyecciones al año 2050 en relación a la extensión de la mancha urbana sobre zonas agrícolas.	43
Ilustración 30. Impresión de pantalla del lanzamiento del software ArcMap 10.1 desde la barra de herramientas.....	44
Ilustración 31. Impresión de pantalla de la herramienta de "Raster to polygon" en ArcToolbox. ..	45
Ilustración 32. Impresión de pantalla del resultado de la conversión de "Raster to polygon"	45
Ilustración 33. Impresión de pantalla de la verificación de la tabla de atributos del archivo vectorial que se obtuvo de la imagen raster.....	46
Ilustración 34. Impresión de pantalla de la verificación del agrupamiento de polígonos en el archivo vectorial.....	47
Ilustración 35. Impresión de pantalla del polígono urbano resultante de la operación "Dissolve"...	48
Ilustración 36. Impresión de pantalla de los polígonos internos que representan "áreas verdes" dentro de la mancha urbana.....	48
Ilustración 37. Impresión de pantalla de la operación de editar vértices para borrar polígonos dentro de la mancha urbana.....	49
Ilustración 38. Resultado final del polígono de la mancha urbana en ArcMap después de haber realizado el procedimiento de borrado de todos los polígonos internos.	50

Ilustración 39. Imagen con la capa de mancha urbana final (fuente propia) y la capa de ejidos obtenida de INEGI o de las agencias de gobierno local.....	50
Ilustración 40. Impresión de pantalla de la operación de Geoprocessing "Intersect" y su resultado después de intersectar las capas de mancha urbana y ejidos.....	51
Ilustración 41. Tabla de atributos de la capa Intersectada que muestra los nombres de los ejidos que se encuentran dentro de la mancha urbana.	52
Ilustración 42. Procedimiento para calcular las áreas de vectores (polígonos) en Arcmap.....	53
Ilustración 43. Exportación Imagen reclasificada en formato ESRI-ArcRaster.	53
Ilustración 44. Exportación de una imagen reclasificada en formato raster de IDRISI a ArcGIS (ASCII).	54
Ilustración 45. Herramienta para importar archivos ASCII a ArcMap.	54
Ilustración 46. Imagen raster de pixeles de la mancha urbana de Cd. Obregón.....	55
Ilustración 47. Imagen raster importada de IDRISI a ArcGIS.....	55
Ilustración 48. Selección y extracción de pixeles de la mancha urbana.....	56
Ilustración 49. Exportación de pixeles a formato shapefile.	56
Ilustración 50. Polígono de pixeles de la mancha urbana de Cd. Obregón.	57
Ilustración 51. Sobreposición del mapa de pixeles y la capa de cuerdas.	57
Ilustración 52. Raster de zonas ejidales y pequeña propiedad en ArcGIS.....	59
Ilustración 53. Conversión raster a polígonos de zonas ejidales y pequeña propiedad.....	59
Ilustración 54. Sobreposición de capas de mancha urbana, pequeña propiedad y zonas ejidales..	60
Ilustración 55. Procedimiento para integración de las capas.....	60
Ilustración 56. Función "unión" para identificar tipo de tenencia.	61
Ilustración 57. Unión de capas de mancha urbana y zonas ejidales.	61
Ilustración 58. Identificar tipo de tenencia "pequeña propiedad" usando la tabla de atributos.....	62
Ilustración 59. Sobreposición de zonas ejidales con la mancha urbana.	62
Ilustración 60. Imagen de extracción de zonas ejidales.	63
Ilustración 61. Sobreposición de capas de tenencia.	63
Ilustración 62. Polígonos de tenencia de tierra.....	64
Ilustración 63. Área de zonas ejidales y pequeña propiedad.....	64

Lista de Ecuaciones

Ecuación 1. Tasa de crecimiento.	26
Ecuación 2. Modelo lineal de predicción del tamaño de mancha urbana.	28
Ecuación 3. Modelo matemático de la relación del crecimiento ejidal y la población.	28
Ecuación 4. Modelo matemático de la relación de pequeña propiedad con respecto a la población.	29

Acerca de los autores

M. C. Jesús Ariel Castro López

Profesor y Auxiliar Técnico del Departamento de Ciencias del Agua y Medio Ambiente y del Departamento de Matemáticas del Instituto Tecnológico de Sonora. Es egresado de la carrera de Ingeniería Química de la Universidad Autónoma de Sinaloa, realizó la Maestría en Ciencias en Recursos Naturales en el Instituto Tecnológico de Sonora. Es asistente de investigación en proyectos con relación a sistemas de información geográfica, ecohidrología e isótopos estables de agua, así como también proyectos que involucran análisis de calidad de agua y monitoreo ambiental.

Dr. Agustín Robles Morúa

Profesor Investigador del Departamento de Ciencias del Agua y del Medio Ambiente del Instituto Tecnológico de Sonora. Es egresado de la carrera de Ingeniería Industrial y de Sistemas de la Universidad de Sonora, obtuvo una Maestría en Políticas Ambientales y un Doctorado en Ingeniería Ambiental, ambos en la Universidad Tecnológica de Michigan. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores desde el 2011, actualmente Nivel I. Es el Coordinador Académico de la Red de Investigación de Sustentabilidad de Resiliencia Urbana ante Eventos Extremos Climáticos (UREx SRN).

Dr. Jaime Garatuza Payán

Es Profesor Investigador “Titular C” del Departamento de Ciencias del Agua y del Medio Ambiente del Instituto Tecnológico de Sonora. Es Ingeniero Agrónomo de la Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro”, Maestro en Ingeniería en Administración de Recursos Hidráulicos del Instituto Tecnológico de Sonora y obtuvo su Doctorado en Hidrología en la Universidad de Arizona. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores desde 1991, actualmente Nivel II. Es miembro de la Academia Mexicana de Ciencias desde el 2005. Sus líneas de investigación incluyen la hidroecología y el uso de sensores remotos y Sistemas de Información Geográficos.

M.C. Francisco Alejandro Elías González Castro

Es Ingeniero en Ciencias Ambientales y Maestro en Ciencias en Recursos Naturales, ambos estudios en el Instituto Tecnológico de Sonora. Es consultor en materia de hidrología, medio ambiente y tratamiento de aguas residuales, y es profesor en las materias de Evaluación de Impacto y Riesgo Ambiental y Sistemas de Información Geográfica. Sus investigaciones son de cuencas y áreas naturales protegidas, así mismo ha participado en la ejecución de periciales técnicos de carácter legal.

M.C. Rodolfo Montes Rentería

Maestro en Ciencias en Recursos Naturales por el Instituto Tecnológico de Sonora e Ingeniero Agrónomo especialista en Sistemas Agrícolas de Zonas Áridas por la Universidad Autónoma Chapingo. Es consultor externo en apoyo al seguimiento, sistematización y evaluación de programas de la SAGARPA en coordinación con las instituciones: Universidad Autónoma Chapingo, Universidad de Sonora y Universidad Autónoma de Chihuahua. Tutor y responsable de un Módulo en Línea en el Diplomado de Agenda y Estrategias para el Desarrollo Territorial del Centro Universitario del Noroeste en la Universidad Autónoma Chapingo: ha participado en el diseño y ejecución de programas de capacitación y certificación a Extensionistas en el Estado de Sonora, México; así como Profesor en el Instituto Tecnológico del Valle del Yaqui con las materias Desarrollo Sustentable y Taller de investigación.

Dr. Luis A. Méndez-Barroso

Profesor-Investigador adscrito al Departamento de Ciencias del Agua y Medio Ambiente del Instituto Tecnológico de Sonora. Miembro del Laboratorio Nacional de Resiliencia Costera (LANRESC) y del Sistema Nacional de Investigadores, Nivel I. Obtuvo una Maestría en Ciencias en Hidrología en el Instituto Tecnológico de Nuevo Mexico y un Doctorado en Ciencias Geológicas en la Universidad Estatal de Arizona.

Dra. Zulia Mayari Sánchez Mejía

Profesora Investigadora del Departamento de Ciencias del Agua y Medioambiente del Instituto Tecnológico de Sonora. Es egresada de la carrera de Ingeniería en Biotecnología Ambiental de la Universidad Autónoma de Guadalajara, obtuvo una Maestría en Ciencias en Recursos Naturales del Instituto Tecnológico de Sonora y un Doctorado en Ecohidrología y Manejo de Cuencas de la Universidad de Arizona. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores desde el 2015, Nivel C. Lidera el laboratorio de Ecometeorología y estudios costeros.

Dr. Enrico A. Yépez

Es profesor Investigador titular del Departamento de Ciencias del Agua y del Medio Ambiente del Instituto Tecnológico de Sonora. Es Licenciado en Biología por la Universidad de Guadalajara, obtuvo una Maestría y un Doctorado en Manejo y Ecología de Zonas Áridas en la Universidad de Arizona. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores desde el 2009, actualmente Nivel II. Desarrolla las líneas de investigación en biogeociencias y ecología de ecosistemas terrestres.

Prefacio / Resumen

El trabajo presentado aquí surgió como material que se generó para la Asociación Mexicana de Institutos Municipales de Planeación Urbana. El caso de estudio que se presenta es para una ciudad en el noroeste de México (Cd. Obregón, Sonora). Sin embargo, la intención es que los lectores puedan seguir las instrucciones aquí presentadas para realizar este tipo de análisis en cualquier ciudad del Mundo. Además, los materiales mostrados tienen la intención de que sean utilizados en diferentes cursos Universitarios. En particular en los cursos de *Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica (SIG)* que forman parte del programa de posgrado de Recursos Naturales del Instituto Tecnológico de Sonora.

Es importante que el lector de este libro este familiarizado con conceptos básicos de SIG, así como tener experiencia manejando los software IDRISI Selva y ArcMap los cuales se utilizaron para cuantificar el crecimiento de áreas urbanas. En el presente documento se presentan los pasos detallados para la clasificación, predicción y validación del avance de una mancha urbana a través del tiempo. Se intentó, a la medida posible, que el texto fuera como una guía para que los análisis presentados se puedan aplicar en cualquier parte del mundo.

El manual está dividido en cinco componentes:

- I. Breve resumen de las aplicaciones de percepción remota para cuantificar el crecimiento de las ciudades.
- II. Recopilación de datos base y obtención de imágenes.
- III. Procesamiento de imágenes.
- IV. Generación de modelos de predicción que expliquen el crecimiento de la mancha urbana, así como la proyección del incremento en la superficie de mancha urbana en relación con la tenencia de la tierra.
- V. Validación de proyecciones en campo.

Dos características importantes que resaltan de este trabajo son: 1) la validación de modelos de proyección; y 2) utilizar series de tiempo de imágenes satelitales disponibles gratuitamente en cualquier parte del mundo.

Esperamos que esta obra sea de interés y utilidad de la comunidad que se dedica a investigar el crecimiento de las ciudades, así como la planificación del uso adecuado de los suelos en zonas urbanas y peri-urbanas. En términos generales, además, este trabajo es de interés para personas que deseen abordar, de manera autodidacta los temas aquí presentados.

Los autores

Percepción Remota para Áreas Urbanas y Peri-Urbanas

Las zonas urbanas acogen, hoy, a la mitad de la población del mundo y se espera que para mediados del siglo XXI, las dos terceras partes de la población habiten en zonas urbanas (United Nations Population Division, 2008). Esto es especialmente notable si se considera que en 1850 solo el 2% de la población vivía en ciudades de 100,000 o más habitantes. Para 1900 ese número subió al 6% y al 16% en 1950 (Davis, 1972).

La transición de economías basadas en agricultura a la industrialización, ha forzado la urbanización y el desarrollo de ciudades, acompañado predominantemente, de un crecimiento urbano monocéntrico en áreas metropolitanas (Parés-Ramos et al., 2008; Anas et al., 1998). Las ciudades se extienden hacia sus alrededores absorbiendo comida, energía, agua y recursos naturales, sin tomar en cuenta las consecuencias sociales, económicas y ambientales generadas, a todos los niveles, por sus “huellas urbanas”. Estos cambios ambientales también se expresan como cambios de uso del suelo sobre todo cuando el cambio se da entre zonas agrícolas o de provisión de servicios ecosistémicos a áreas urbanas.

Los estudios relacionados principalmente con la extensión urbana (como el análisis de inventarios que se centran en las formas en que el campo puede ser engullido por el crecimiento urbano), tienden a guiarse por las definiciones del alcance de las estructuras artificiales urbanas irreversibles en la superficie de la Tierra. Tales estructuras soportan una variedad de usos residenciales, comerciales, industriales, de espacios abiertos y de transporte terrestre.

La teledetección o percepción remota se puede definir como la ciencia y tecnología de adquirir información de un objeto y del ambiente a través de registrar, medir e interpretar imágenes y representaciones digitales derivadas de sensores que miden energía electromagnética y que no están en contacto directo con el objeto. En el caso de áreas urbanas y peri-urbanas o suburbanas se define por naturaleza como la medición del brillo superficial (reflectancia) y de propiedades conectadas a la cubierta de la tierra y el uso de la tierra en ciudades. Hoy en día, muchos datos de diferentes sistemas de observación de la tierra, se encuentran disponibles y geocodificados de forma gratuita y presentan una oportunidad para recopilar información relevante para zonas urbanas y periurbanas.

La percepción remota ha sido, tradicionalmente, usada por la comunidad de ciencias de la tierra o de seguridad nacional y las preguntas urbanas han sido marginadas. Con las recientes innovaciones en datos, tecnologías y teorías en la arena de Observación de la Tierra, las aplicaciones urbanas de percepción remota han ganado popularidad.

Las aplicaciones de imágenes de sistemas de observación de la tierra (*Earth Observation Systems*), se dividen en seis categorías principales: servicios para la gestión de la tierra, servicios para el

medio marino, servicios relacionados con la atmósfera, servicios para ayudar a la respuesta de emergencia, servicios asociados con la seguridad y servicios relacionados con el cambio climático. Aquí nos enfocamos en presentar herramientas que nos ayudan a realizar una mejor gestión del manejo de la tierra, donde podremos utilizar herramientas para delimitar y predecir el crecimiento urbano. Claro que se necesita mucho más que una sola teoría, un método de análisis o una topología de datos para entender completamente el proceso de urbanización. Esto presenta un reto claro a los sistemas analíticos tradicionales y requiere la interacción de las ciencias sociales y ciencias de la tierra, usando técnicas de percepción remota y de sistemas de información geográfica para poder entender los patrones y tendencias de la urbanización.

La percepción remota, representa datos complementarios a las exploraciones socioeconómicas tradicionales y pueden proveer indicadores directos de la forma física y la morfología de la cobertura del suelo en zonas urbana y periurbanas. Aún más, los ambientes urbanos son caracterizados por diferentes tipos de materiales y coberturas que aquellos encontrados en los ambientes naturales y el análisis con sensores remotos considera las características espectrales únicas de cada tipo de cobertura.

La señal espectral es una de las características más importantes de la superficie que puede ser medida con sensores remotos. La cantidad y calidad de la energía electromagnética medida por un sensor remoto (radiancia) depende de la fuente de energía (generalmente el sol), el grado en que esa energía es modificada a su paso por la atmósfera y la estructura física y geométrica y los constituyentes químicos presentes en la superficie (reflectancia). El sensor mide la radiación (energía) en bandas espectrales, es decir en longitudes onda específicas o en rangos de longitudes de onda (ancho de banda). El número de bandas espectrales, sus anchos de banda y su localización en el espectro electromagnético es lo que determina la capacidad espectral o resolución espectral del sensor. La mayoría de los sensores remotos montados en satélites son multispectrales como LANDSAT (el usado en este trabajo) o IKONOS y exploran la superficie de la tierra en unas pocas bandas espectrales anchas.

A través de estas mediciones de reflectancia, es posible formular indicadores bastante robustos y objetivos de clase y extensión a través de la estadística de clasificación de las características de la cubierta terrestre y "modelado espacial" del tamaño, la forma y la dimensión de la tierra adyacente a parcelas agrícolas. Estos indicadores pueden proporcionar información útil y directa para medir la forma física y la morfología de la cubierta del suelo urbano que es muy útil en delinear el alcance de los asentamientos urbanos individuales y en generar magnitud de las estimaciones de tamaño para los sistemas de asentamiento.

El estudio genérico de la reflectancia de una superficie o su firma espectral, desde el punto de vista de mapeo, se hace en términos de su contraste espectral. Si una superficie tiene características únicas, es fácilmente discernible en las imágenes de sensores remotos y la precisión esperada en el mapeo de tales superficies es alta. En este sentido, parece fácil separar las superficies urbanas (asfalto, concreto, metal, vegetación dispersa, entre otros), de la vegetación natural y los campos agrícolas.

Para el presente trabajo se usaron imágenes multiespectrales de sensores remotos a bordo del satélite LANDSAT. El programa de LANDSAT ha contribuido con el mayor registro temporal de observaciones de la Tierra y son, actualmente, disponibles de forma gratuita. Estos archivos han sido un invaluable recurso para examinar cambios naturales y antropogénicos en el ambiente, incluido el cambio de uso de suelo. Es precisamente ese largo registro histórico lo que permite detectar cambios, como el crecimiento urbano, desde la década de los setenta, cuando inició el programa. Las características de los diferentes sensores utilizados, todos dentro del mismo programa, se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Evolución de la resolución de las bandas espectrales utilizadas históricamente en la plataforma satelital LANDSAT.

Fecha	No. de Landsat	Tipo de sensor	Bandas espectrales (usadas) (en μm)	Resolución espacial
1972-1983	1 y 3	MSS	Band 4 Verde (0.5-0.6) Band 5 Rojo (0.6-0.7) Band 6 IR cercano (0.7-0.8) Band 7 IR cercano (0.8-1.1)	60 m
1984-2012	5	TM	Band 1 Azul (0.45-0.52) Band 2 Verde (0.52-0.60) Band 3 Rojo (0.63-0.69) Band 4 IR cercano (0.76-0.90) Band 5 IR onda corta (1.55-1.75)	30 m
1999-	7	ETM+	Band 1 Azul (0.45-0.52) Band 2 Verde (0.52-0.60) Band 3 Rojo (0.63-0.69) Band 4 IR cercano (0.77-0.90) Band 5 IR onda corta (1.55-1.75)	30 m
2003-	8	OLI	Band 2 Azul (0.452-0.512) Band 3 Verde (0.533-0.590)	30 m

			Band 4 Rojo (0.636-0.673) Band 5 IR cercano (0.851-0.879) Band 6 IR onda corta (1.566-1.651)	
--	--	--	--	--

Fuente: elaboración propia.

Recopilación de datos

Para realizar el mapeo del crecimiento urbano es necesario realizar una búsqueda de productos digitales en bases de datos oficiales mexicanas, de las cuáles se puede obtener información que permite realizar comparaciones de los productos satelitales. Es importante obtener la siguiente información, que en el caso de México la mayoría está disponible en el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2015). La información básica de INEGI utilizada en este manual es la siguiente:

- Capa de cuadras de Cd. Obregón (INEGI).
- Capa de localidades urbanas de Sonora (Mancha urbana de Cd. Obregón al 2015) (INEGI).
- Capa de área de todo el estado de Sonora (INEGI).
- Capa de aspectos generales de la población a escala municipal y por Áreas Geoestadísticas Básicas (AGEB) (INEGI).

Además, se obtuvieron datos por medio de la colaboración con la Dirección de Catastro Municipal del Municipio de Cajeme. Esta información ayudó a la comparación y validación de los resultados de este trabajo. La información proporcionada por la catastro municipal fue la siguiente:

- Capa de ejidos (Catastro).
- Capa de manzanas (Catastro).
- Capa de zonas rurales (Catastro).
- Clave catastral de predios colindantes a la zona urbana
- Mapa de proyección urbana para el año 2050 realizado por Instituto Municipal de Investigación y Planeación Urbana de Cajeme (IMIP).

A su vez, se obtuvo del Registro Agrario Nacional (RAN), la *capa de zonas agrícolas* registradas en el padrón.

Descarga de imágenes satelitales Landsat.

Con el propósito de analizar los patrones de crecimiento históricos se utilizaron imágenes del satélite Landsat, que es la plataforma de observación satelital con mayor número de años disponibles, operando en Norteamérica desde 1972. Los satélites Landsat fueron construidos y puestos en órbita por Estados Unidos a través de la agencia de aeronáutica y del espacio (NASA por sus siglas en inglés), para la observación en alta resolución de la superficie terrestre. Los satélites Landsat orbitan alrededor de la Tierra en órbita circular heliosincrónica, a 705 km de altura, con una inclinación de 98.2º respecto del Ecuador y un período de 99 minutos de paso. La órbita de los satélites está diseñada de tal modo que cada vez que éstos cruzan el Ecuador de Norte a Sur lo hacen entre las 10:00 y las 10:15 de la mañana hora local. Los Landsat están equipados con instrumentos específicos para la teledetección multiespectral (ver Tabla 1) y en

este trabajo se utilizaron diferentes bandas para contar con imágenes de **reflectancia** en cada una de las bandas.

Todos los productos satelitales fueron descargados de la plataforma gratuita del sistema de exploración de la tierra de la NASA y fueron respaldados de manera digital y son accesibles para cualquier análisis adicional que se desee efectuar. Se descargaron las imágenes de Landsat del período histórico de 1973 al 2015. Se descargó el set de imágenes de los pixeles que abarcan el municipio de Cajeme. Todas las imágenes fueron descomprimidas y agrupadas en carpetas para su fácil manejo y acceso. Las imágenes después de descargadas fueron importadas y visualizadas utilizando el software IDRISI Selva™ que tiene una función automática para importar datos satelitales de Landsat.

Una forma de descargar los datos de Landsat (existen varios sitios) es ingresando a la página: <http://earthexplorer.usgs.gov/>. Es necesario crear una cuenta para descargar las imágenes satelitales. Una vez hecho lo anterior, en la pestaña "Search Criteria" colocar un polígono (de al menos tres vértices) en el plano como el que se muestra en la Ilustración 1, con la finalidad de seleccionar el sitio de interés en cualquier parte del mundo.

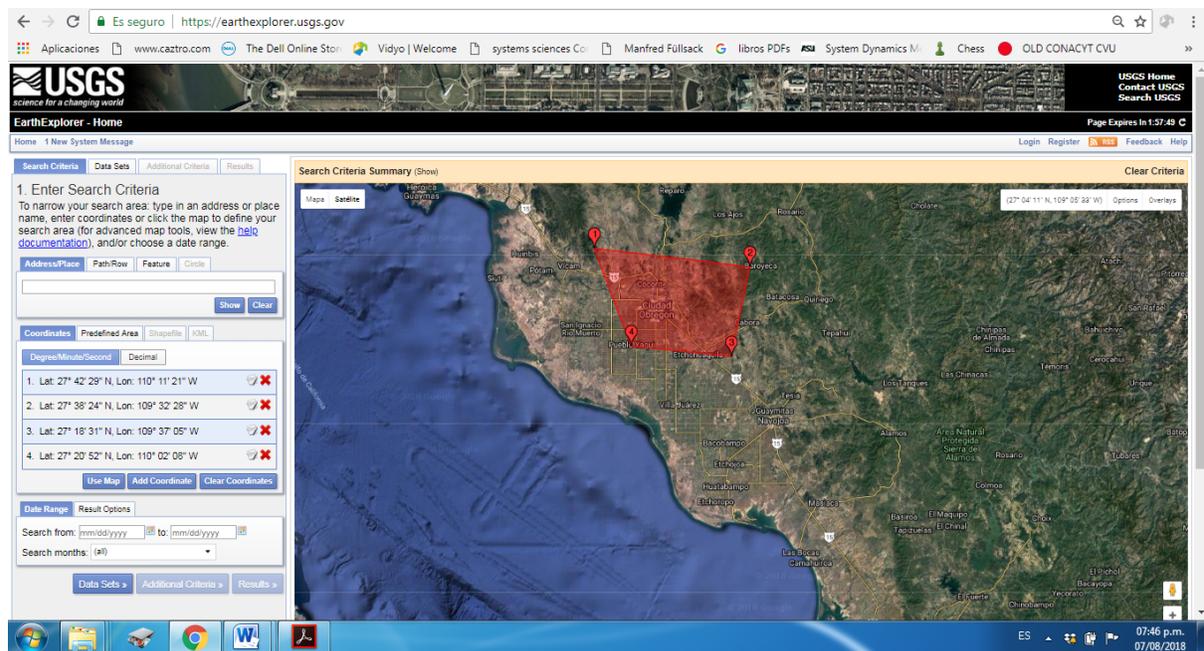


Ilustración 1. Página de internet de USGS Earthexplorer donde se pueden bajar las imágenes satelitales de Landsat utilizando la herramienta de "Search Criteria".

Una vez seleccionada el área de interés, seleccionar la pestaña "Data Sets" y buscar "Landsat Archive" (ver Ilustración 1). Cabe señalar que, L1-5 MSS corresponden a imágenes satelitales de 1972 a 1982; L4-5 TM de 1982 a 2011; y L8 OLI/TIRS de 2014 al presente. Existe un faltante de dos años (2012 y 2013) por fallas en el satélite Landsat 7. Al seleccionar la pestaña "Results" se desplegarán una serie de imágenes satelitales de acuerdo al criterio dado con anterioridad. Si se desea conocer el área que abarca la imagen satelital antes de descargarla, seleccionar la opción,

dentro de cada imagen, "Show Footprint". Para ver una vista preliminar de la imagen satelital, y así evitar descargar imágenes con "basura" como nubosidad, seleccionar la opción dentro de cada imagen "Show Browse Overlay". Si se desea descargar la imagen, seleccionar la opción dentro de cada imagen "Download Options". Una vez aquí, seleccionar la pestaña "Level 1 GeoTIFF Data Product (xxx.x MB)" para empezar la descarga. Es importante descargar imágenes que no tengan "basura" para poder realizar un análisis adecuado. La nubosidad ocasiona que no podamos obtener una representación adecuada sobre las ciudades. Es por eso que el análisis de imágenes se sugiere que sea realizado con imágenes en épocas históricas donde no hay lluvias (nubosidad).

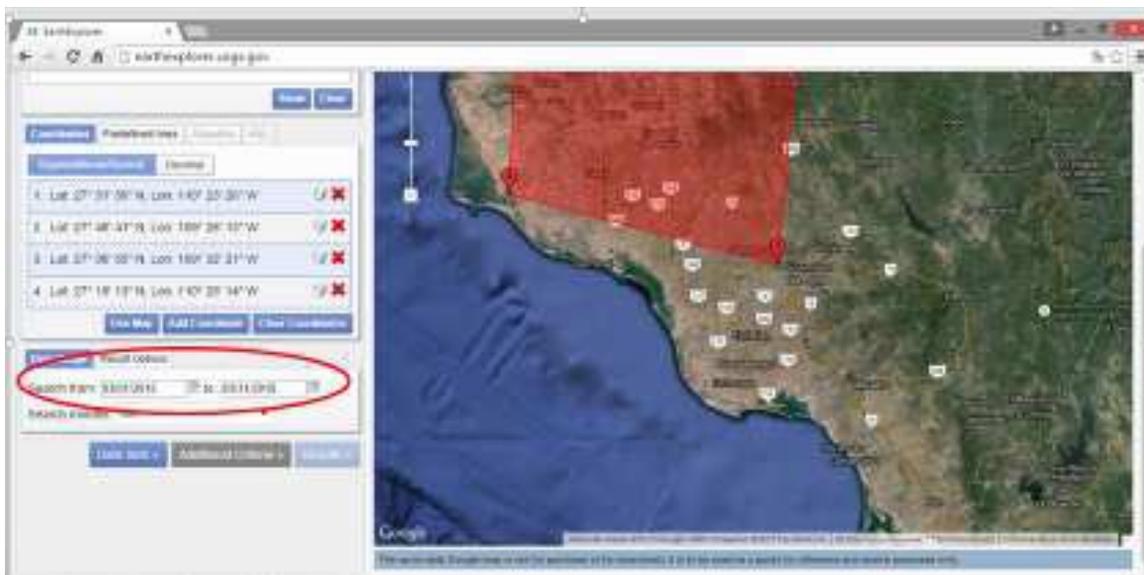


Ilustración 2. Impresión de pantalla para seleccionar "Data sets" y buscar archivos Landsat.

Procesamiento de imágenes satelitales

Pre-procesamiento de cada una de las imágenes.

El pre-procesamiento de imágenes se llevó a cabo siguiendo los principios básicos de operación descritos en el manual de IDRISI Selva (Eastman, 2012). Antes de iniciar, se debe de descomprimir cada imagen descargada para obtener los archivos con los que se trabajará. Es importante generar una carpeta en el sitio donde se quiera trabajar (por ejemplo en Escritorio o dentro de otra carpeta), y ya no mover dicha carpeta. Esto con el propósito de mantener todos los archivos bien organizados.

En IDRISI, el primer paso es crear un nuevo proyecto. Esto se realiza dando click derecho en la barra lateral izquierda en la pestaña "Projects", y seleccionar "New Project" con la finalidad de ligarla carpeta donde se trabajará (Ilustración 3).

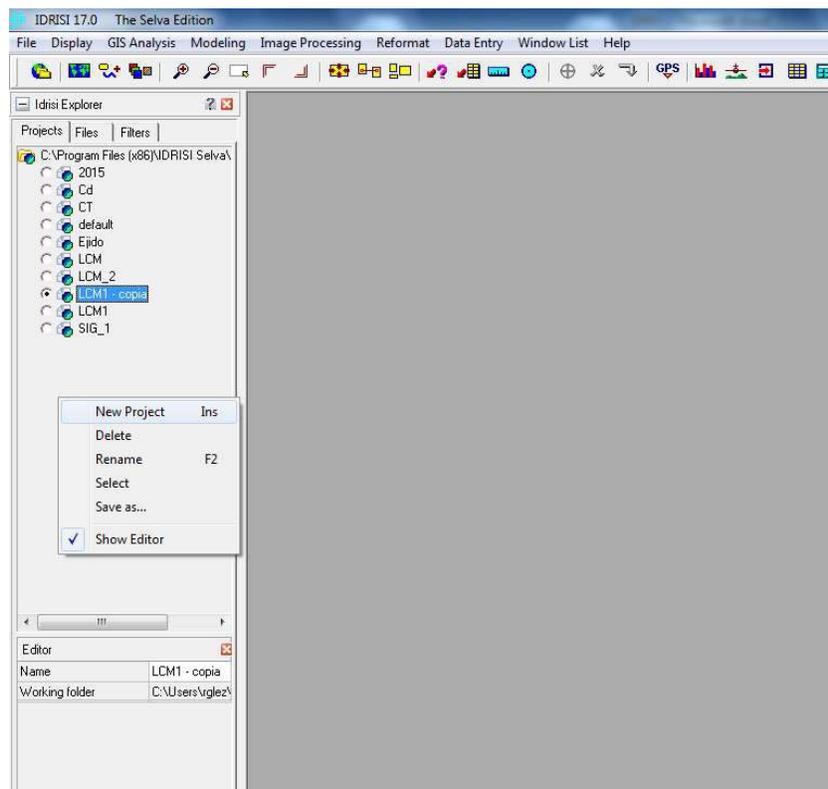


Ilustración 3. Impresión de pantalla de cómo crear un proyecto nuevo en IDRISI.

En el buscador de IDRISI, parte superior derecha, escribir "Geotiff" para desplegar dicha herramienta. Asegurar que está seleccionada la opción "GeoTIFF/Tiff to Idrisi" (Ilustración 4). En GeoTIFF file name ingresar cada una de las imágenes descomprimidas. Darle un nombre en "Idrisi image to create". Una forma de acelerar dicho proceso, es con la herramienta "Landsat" (teclearlo en el buscador de Idrisi). Asegurarse que se encuentra seleccionada la opción GeoTIFF. Ingresar en

cada casilla su respectiva banda. Por ejemplo: LC80260462015194LGN00_B1 corresponde a la Banda 1(Band 1) y LC80260462015194LGN00_B2 corresponde a la Banda 2 (Band 2). En "Output Idrisi Image" darle un nombre que corresponda al año que se está analizando.

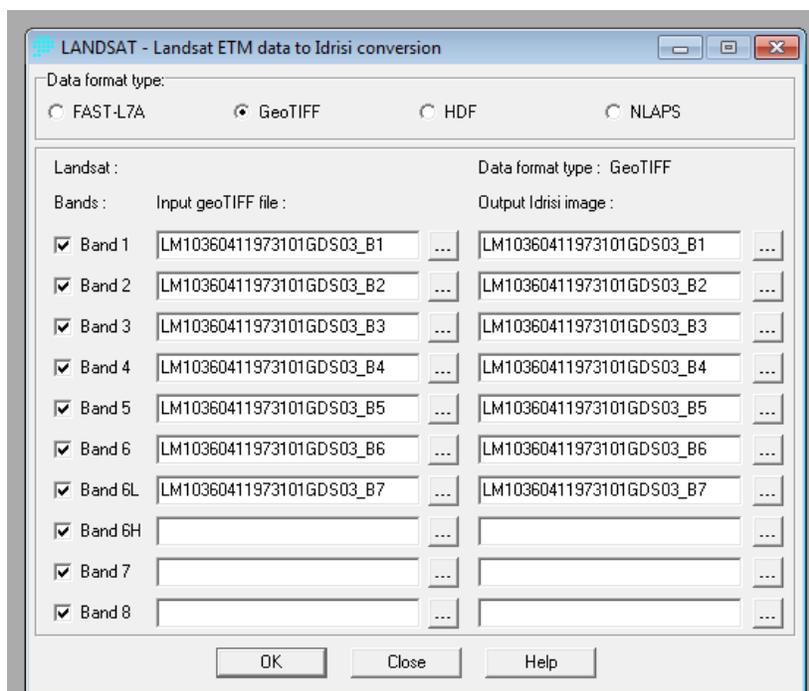


Ilustración 4. Impresión de pantalla para realizar la conversión de formato LANDSAT a Idrisi.

Nota importante, para los años antes de 1982 descargados por L1-5 MSS, sólo existen las bandas del 4 al 7, se deben de convertir todas. Para los años de 1982 a 2011 descargados por L4-5 TM, se deben convertir las bandas de 1 a 5 y 7. Para los años de 2014 al presente descargadas por L8 OLI/TIRS, se deben convertir las bandas 2 a 5 y 7 a 8.

Composite de cada una de las imágenes.

Una vez que ya se realizó la importación de las imágenes descargadas, el siguiente paso en el procesamiento de imágenes consiste en la utilización de la herramienta "Composite" disponible en el programa de IDRISI. Un "Composite" es una composición en falso color utilizando tres bandas que se proyectan en formato RGB (Red-Blue-Green), esta composición permite la interpretación visual de las imágenes y representa un indicador de reflectancia. Para crear un "Composite" el infrarrojo cercano es desplegado en el rojo (R-Red); la banda roja es proyectada en el verde (G-Green) y la banda verde es proyectada en el Azul (B-Blue). Los resultados del "Composite" para cada imagen histórica descargada fueron almacenadas con el nombre de "Composite_----" para cada año. Se decidió efectuar el procesamiento de imágenes Landsat en intervalos aproximados a 10 años para un mejor análisis de los datos generados. En este caso de estudio, se eligió el mes de marzo como guía, ya que es cuando las tierras de cultivo tienen su mayor verdor en la temporada y en esa época hay muy pocas probabilidades de lluvia. De esta manera es más fácil caracterizar cuál parte del suelo es tierra agrícola y cuál pertenece a la mancha urbana.

Una vez cargada la imagen de un año en particular, en el menú de IDRISI seleccionamos Display --> COMPOSITE o el icono Create Color Composite . En "Blue image band" desplegamos la banda verde (Banda 2 en Landsat); en "Green image band" desplegamos la banda roja (Banda 3 en Landsat) y en "Red image band" desplegamos la banda del infrarrojo cercano (Banda 4 en Landsat). Como imagen de salida ponemos: Compo 3145 432, ya que es una COMPOSITE, el PathRow ubicación en el espacio) es 3145 y las bandas RGB son 432. Dejamos los valores por default pero activamos la casilla de "Omit zeros from calculation in stretch" (ver Ilustración 5). Abrir la imagen de composite creada y acercarse con zoom [Zoom In/Center (símbolo de lupa con signo "+" ubicada en la barra de herramientas) o con scroll del mouse] al área de interés.

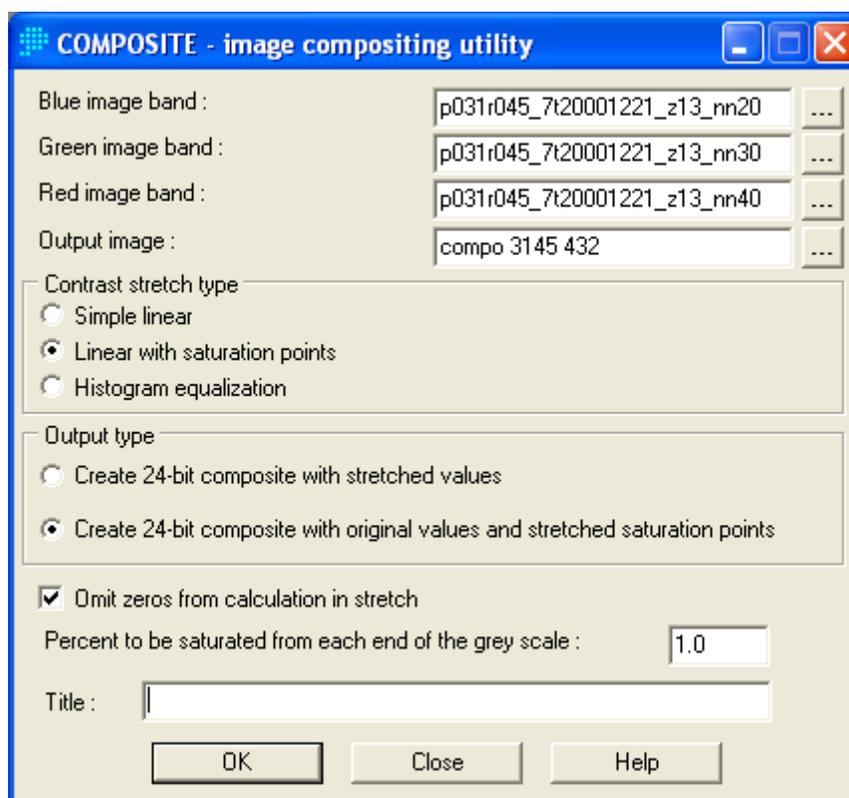


Ilustración 5. Impresión de pantalla de la herramienta "Composite" de IDRISI.

En la barra lateral derecha de la ventana de COMPOSITE, adherir una única banda de cada año con el que se esté trabajando. Para ello, seleccionar la opción "Add Layer". Posicionarse en "Raster Layer" y buscar la imagen (banda) que se desea. Al final darle Ok. Este proceso se realizará a cada año/periodo/mes con el que se esté trabajando. Seleccionar la herramienta "Cursor Inquiry Mode" (Ilustración 6) y posicionarse en la esquina superior izquierda y tomar los datos de este pixel desplegados en la barra inferior de Idrisi. Para el caso, sólo es necesario el dato de columna y renglón. Repetir la acción pero posicionándose en la esquina inferior Los pasos descritos se realizan de esta forma con el propósito de emparejar cada imagen/año de interés. Es decir, al final se logra obtener el mismo cuadro/fotografía para cada imagen, ya que cada imagen satelital cuenta con columnas y renglones diferentes entre sí. Por ejemplo, el pixel de "x" imagen satelital

se ubica en la posición c:25 y r:12 (columna y renglón); pero ese mismo pixel en la imagen "y" se ubica en la posición c:32 y r:14.

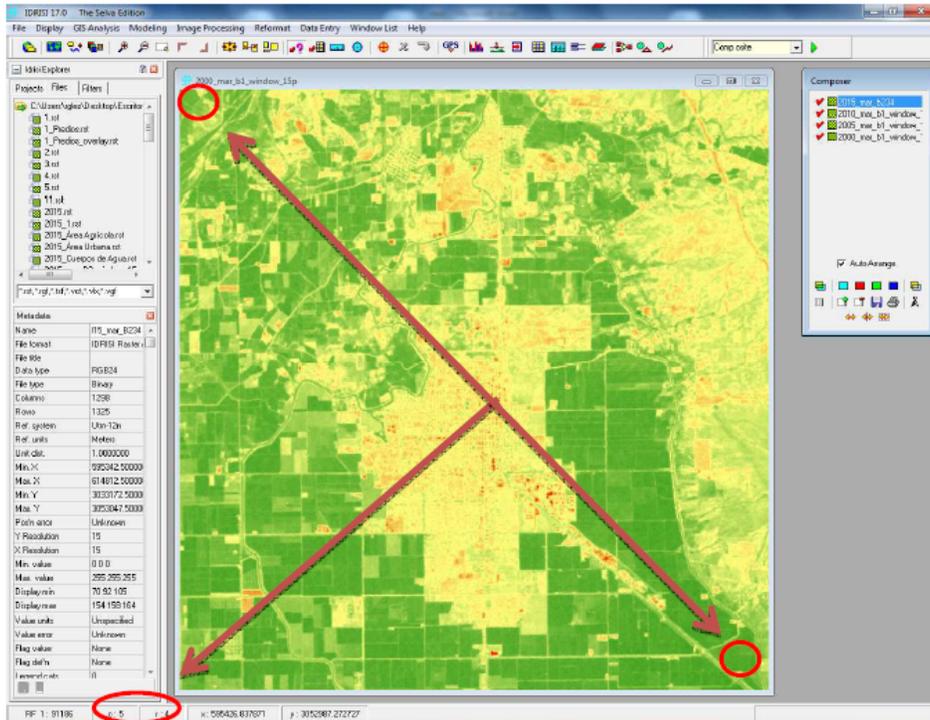


Ilustración 6. Impresión de pantalla del "Cursor Inquiry Mode" necesario para obtener datos de cada imagen.

Imágenes recortadas para cada banda de cada año.

El siguiente paso es realizar un recorte de la imagen con la herramienta "Window" (Escribirlo en el buscador de Idrisi). En "Filename" insertar cualquier banda de un set de datos, por ejemplo la banda 1. Asegurarse que está activada la opción Row/Column positions. Agregar la información obtenida del "Cursor Inquiry Mode". Debe de utilizarse la información respectiva de cada imagen. Guardar las imágenes con el nombre de "----_mar_B-_window" para cada banda de cada año de análisis. Realizar la misma acción para cada una de las bandas (ver Ilustración 7).

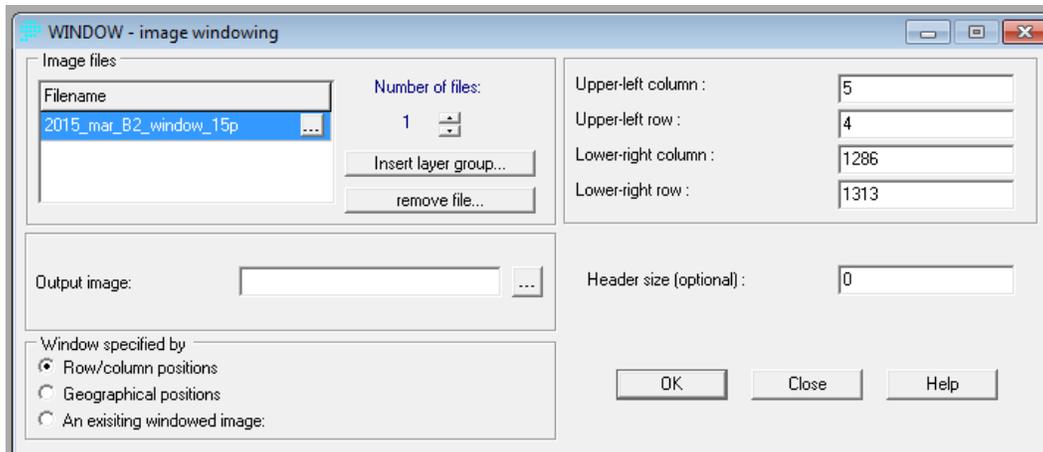


Ilustración 7. Impresión de pantalla de la herramienta "Window" utilizada para recortar imágenes.

Reescalamiento y agrupamiento de imágenes.

El siguiente punto se realiza cuando hay diferencias en las resoluciones de las imágenes. Es necesario realizar un reescalamiento entre las imágenes para que sus resoluciones sean las mismas. Por ejemplo, las imágenes de 1972 a 1982 tienen una resolución de 60x60 metros de pixel, mientras que de 1982 en adelante son de 30x30 metros. En este caso, es necesario realizar un reescalamiento y así evitar un conflicto en el análisis de imágenes y errores generados por el software.

El reescalamiento se realiza con la herramienta "Project" (Escribirlo en el buscador de Idrisi). Asegurarse que esté activada la opción "Raster". En "input file name" se inserta la imagen que se desea reescalar, por ejemplo la imagen banda 1 de 1975. Una vez agregada, la casilla de "Input reference system" se llena automáticamente con la información geográfica contenida dentro de la misma imagen. Darle nombre en "Output file name" y seleccionar de preferencia el mismo sistema de coordenadas. Seleccionar la opción "Bilinear" en "Resample type". Oprimir el botón "Output reference information". Activar la casilla "Copy from existing file" y agregar la imagen guía que se desee. Por ejemplo la imagen banda 1 de 1995 (Ver Ilustración 8). Una vez realizado el paso anterior, sólo es cuestión de agregar la siguiente banda que se desea reescalar, darle un nombre y asegurarse que se encuentren en el mismo sistema de referencia geográfica.

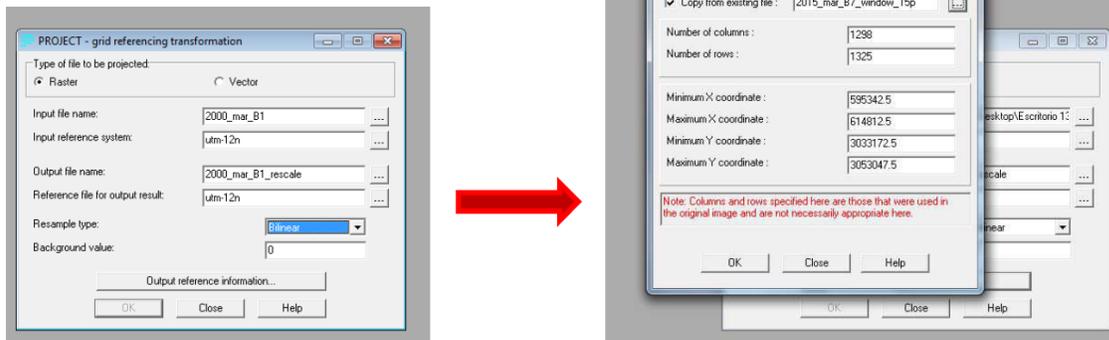


Ilustración 8. Impresión de pantalla de la operación de re-escalamiento utilizando la herramienta "Project" de Idrisi.

Clasificación no supervisada de cada una de las imágenes.

Existen dos enfoques generales en la clasificación de imágenes: supervisado y no supervisado. En el caso de la clasificación supervisada, el software IDRISI delinea tipos de cubierta terrestre específicos sobre datos estadísticos de caracterización, los cuales son obtenidos de ejemplos conocidos en la imagen. Dichos ejemplos son conocidos como puntos de entrenamiento. En la clasificación no supervisada se utiliza una herramienta que agrupa los tipos de cobertura terrestre más comunes. La clasificación no supervisada no requiere de información detallada de cada clase de interés, en su lugar utiliza los datos disponibles y los divide en grupos espectrales naturales presentes en cada imagen. En esta clasificación, el analista entonces debe de proporcionar las interpretaciones de los tipos de cobertura resultantes a través de visitas verdaderas a las regiones para validar la clasificación.

En este trabajo se realizó una clasificación no supervisada de cada una de las imágenes. Para realizar esta operación es necesario contar con el polígono de la mancha urbana más reciente que se tenga disponible, en nuestro caso de estudio se utilizó la mancha de 2015 obtenida del Gobierno Municipal. Además, se obtuvo la cobertura ejidal en shapefile y se infirió que el resto del área correspondía a pequeña propiedad. Conociendo el área de la mancha urbana del año más reciente, se partió en retroceso, utilizando dicho polígono como una máscara y utilizando la herramienta "Cluster" en IDRISI (Escribirlo en el buscador de Idrisi).

Para realizar el "Clustering" se deben establecer las bandas de las imágenes satelitales a utilizar, y se selecciona la opción "Set maximum number of clusters" para caracterizar el área mediante un número determinado de clasificadores. Darle nombre en "Output image". Una vez realizado el paso anterior, en la imagen generada se seleccionará los "Clusters" que sean parte de la mancha urbana. Consecutivamente se realizará un "Reclass" para crear un único polígono. De esta manera, se utilizará este nuevo polígono para caracterizar la mancha urbana anterior al año con el que se trabajó. Y así sucesivamente hasta llegar a la última imagen que se desea analizar. Por último, se

realizará un "Overlay" para unir las diferentes coberturas de suelo a evaluar. Una vez obtenido las coberturas de suelo.

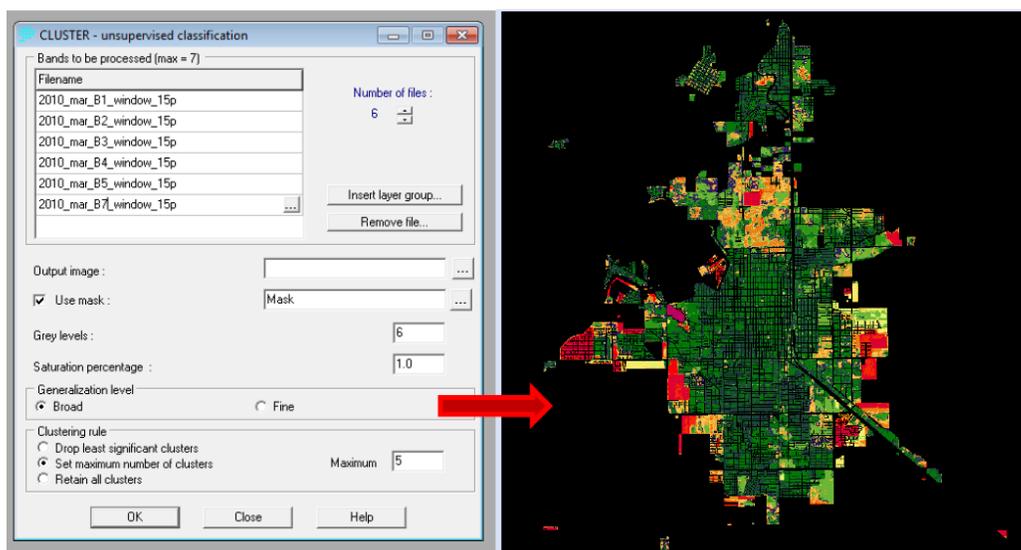


Ilustración 9. Impresión de pantalla de la herramienta "Cluster" para realizar la clasificación no supervisada.

Resultados de la clasificación no supervisada.

En nuestro caso de estudio, se realizó una clasificación no supervisada para la distinción entre la mancha urbana de suelo desnudo y zonas agrícolas utilizando 5 clasificaciones (Cuerpos de agua, áreas con vegetación (verdes dentro de la mancha urbana o de agricultura). Esto dio como resultado la imagen del crecimiento de la mancha urbana como se muestra en la Ilustración 9. Este proceso se repitió para cada uno de los años históricos en los que se obtuvieron imágenes las cuales pudieron ser comparadas entre sí como se muestra en la Ilustración 10.

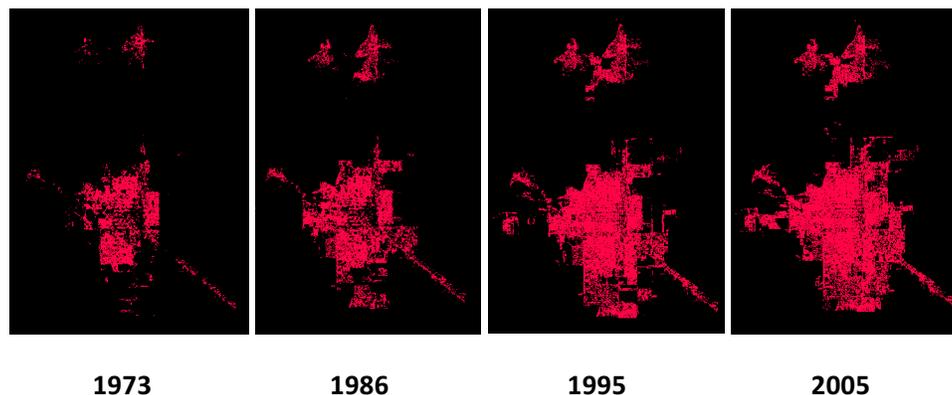


Ilustración 10. Crecimiento de la mancha urbana de Cd. Obregón desde 1973 a 2005 en formato raster.

Las imágenes Cluster ya reclasificadas (Ilustración 10) fueron transferidas al software ArcGIS 10.2.1 para obtener un polígono definido y con líneas más nítidas (Ilustración 11, véase ANÁLISIS DE IMÁGENES EN ARCMAP 10.2.1).

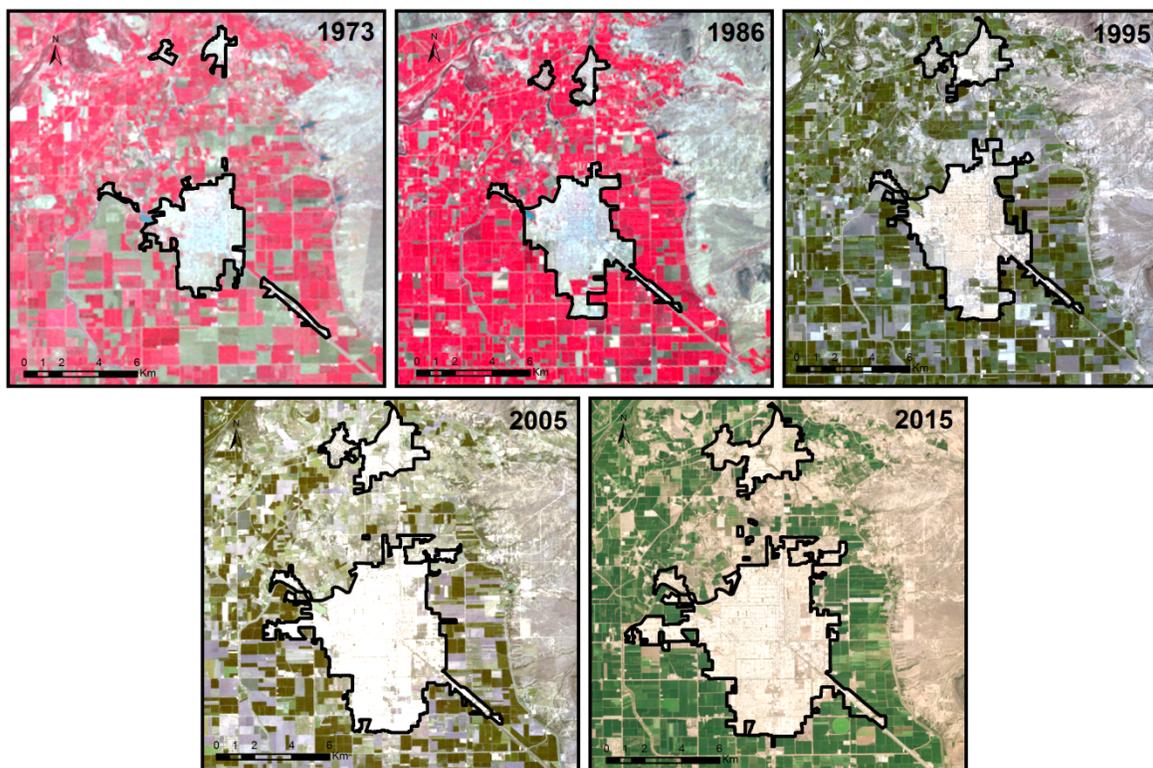


Ilustración 11. Evolución histórica de la mancha urbana en Cd. Obregón (1973 a 2015) utilizando archivos vectoriales e imágenes de reflectancia de fondo.

Análisis de datos y generación del modelo de predicción

Análisis de datos de crecimiento de la mancha urbana

Una vez generados los polígonos de las manchas urbanas históricas para los períodos de tiempo establecidos, a partir de los productos generados con el análisis de imágenes en ArcGIS e Idrisi, se realizaron los siguientes análisis de superficie. Los datos de extensión territorial mostrados en la Tabla 5 se obtuvieron a partir del cálculo geométrico de superficie utilizando ArcGIS. El cálculo del incremento anual se llevó a cabo con la Ecuación 1.

$$r = \left(\frac{S_t}{S_0}\right)^{1/n}$$

Ecuación 1. Tasa de crecimiento.

Donde S_t es igual a la superficie al final del periodo, S_0 es la superficie al inicio del periodo de análisis, n es el número de años que comprende el análisis y r es la tasa de crecimiento.

Tabla 2. Datos finales obtenidos de Idrisi y ArcMap para realizar el análisis de crecimiento.

Año	Superficie (ha)	Período	Crecimiento superficial en el período (ha)	Factor de crecimiento anual en el período
1973	2570.08	1973	0	0
1986	4488.91	1973 - 1986	1918.83	1.0438
1995	5605.66	1986 - 1995	1116.75	1.0249
2005	6417.17	1995 - 2005	811.51	1.0136
2015	7265.09	2005 – 2015	847.92	1.0124

Fuente: elaboración propia.

El significado de 1.0438 es que la tasa de crecimiento de la ciudad de 1973 a 1986 fue al ritmo de 4.38% anual durante 13 años. En la Tabla 6 se muestra el crecimiento superficial y el crecimiento acumulado. Ciudad Obregón ha crecido un total de 4695.01 hectáreas de 1973 a 2015.

Tabla 3. Crecimiento superficial acumulado entre 1973 y 2015.

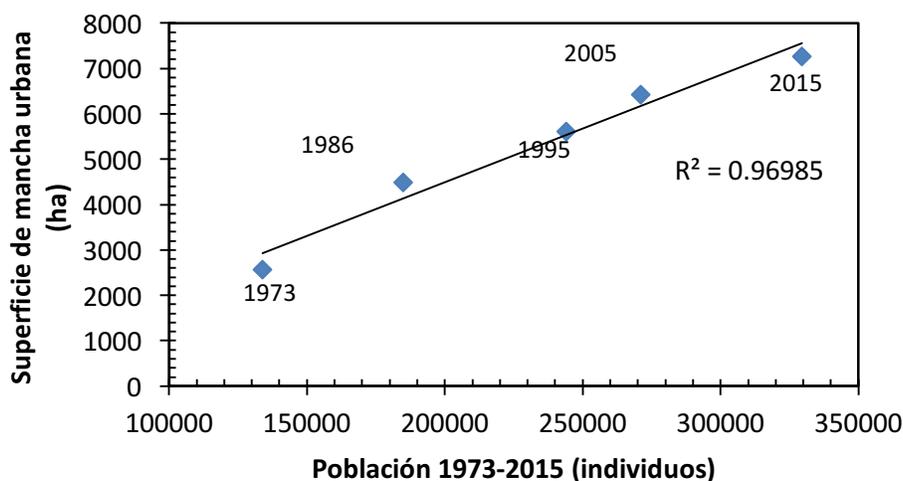
Año	Superficie (ha)	Período	Incremento en superficie (ha)	Incremento en superficie acumulado (ha)
1973	2570.08	1973	-	-
1986	4488.91	1973 - 1986	1918.83	1918.83
1995	5605.66	1986 - 1995	1116.75	3035.58
2005	6417.17	2005 - 1995	811.51	3847.09
2015	7265.09	2015 - 2005	847.92	4695.01

Fuente: elaboración propia.

Modelo matemático de crecimiento urbano para Cd. Obregón

Utilizando datos de censo de población disponibles en la página de INEGI de la ciudad para los periodos de estudio es posible relacionar la población y la superficie de la ciudad (Ver Ilustración 12). En este estudio se utilizó software Statgraphics plus 5.1 para analizar la tendencia de las variables población y crecimiento superficial de mancha urbana y con eso encontrar la ecuación matemática que representa dicha tendencia (ver Ecuación 2). Conociendo los datos de población por periodo de estudio y conociendo la superficie de la mancha urbana, se realiza el cálculo en el paquete estadístico para determinar el grado de correlación entre el crecimiento urbano y el crecimiento de la población (siendo ésta última la variable independiente).

Ilustración 12. Relación entre el crecimiento poblacional respecto al crecimiento de la mancha urbana de Cd. Obregón en el periodo de 1973 al 2015.



Ecuación 2. Modelo lineal de predicción del tamaño de mancha urbana.

$$MU = 0.0237(P) - 236.84 \quad R^2 = 0.97$$

Donde:

MU = Superficie de mancha urbana en hectáreas

P = Población de individuos en Cd. Obregón

El p -valor para la relación de población y superficie de mancha urbana es menor de 0.01, se puede afirmar que hay relación estadísticamente significativa entre ambas variables para una $\alpha = 0.01$.

Igualmente, se puede obtener una relación entre la tenencia de tierra, de esta manera, se puede analizar el crecimiento poblacional con respecto al área de zonas ejidales engullidas y el crecimiento sobre pequeña propiedad. Esto se muestra en la Ilustración 13. En este caso el modelo matemático que mejor representa este crecimiento ya no es lineal, sino que tiene un comportamiento polinómico (cuadrático).

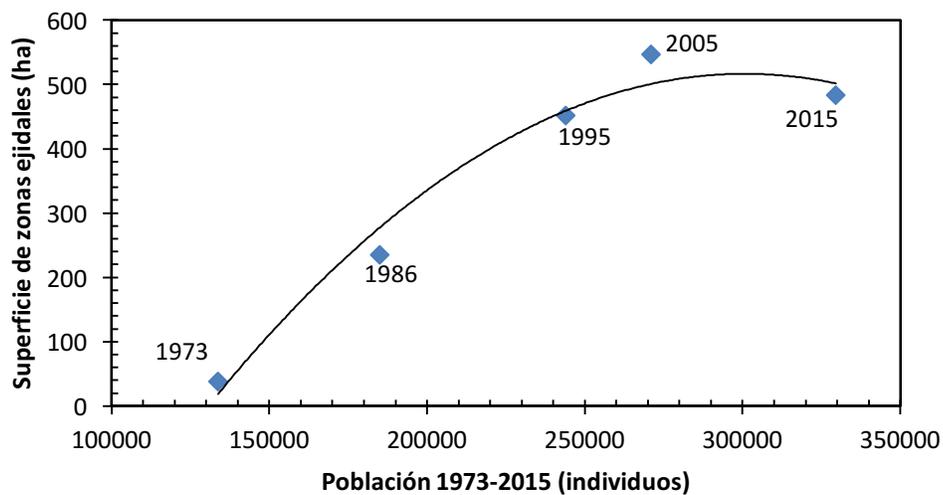


Ilustración 13. Relación de crecimiento entre zonas ejidales con respecto a la población durante el periodo de 1973 a 2015.

Ecuación 3. Modelo matemático de la relación del crecimiento ejidal y la población.

$$CZ = a(P^2) + b(P) + c \quad R^2 = 0.97$$

Donde:

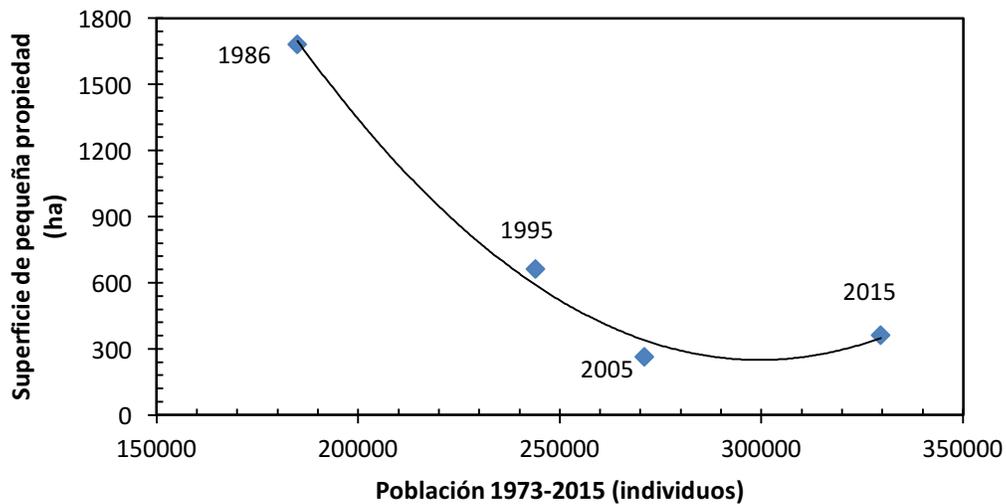
$$a = -2 \times 10^{-8}; b = 0.0107; c = -1097.8$$

CZ = Superficie de crecimiento sobre zonas ejidales en hectáreas

P = Población de individuos en Cd. Obregón

Como se observa en la Ilustración 13, la tendencia de crecimiento sobre zonas ejidales fue de manera lineal hasta el año 2005, sin embargo, el decrecimiento del período 2005-2015 hace que el coeficiente de correlación para un ajuste exponencial sea más bajo que el de un ajuste polinómico.

Ilustración 13. Relación del crecimiento de la pequeña propiedad respecto a la población durante el período 1973-2015.



Ecuación 14. Modelo matemático de la relación de pequeña propiedad con respecto a la población.

$$CP = a(P^2) + b(P) + c \quad R^2 = 0.99$$

Donde:

$$a = 1 \times 10^{-7}; b = -0.0667; c = +10151$$

CP = Superficie de crecimiento sobre pequeña propiedad

P = Población de individuos en Cd. Obregón

En la Ilustración 14, se muestra que la tendencia de crecimiento sobre pequeña propiedad fue decreciendo, ya que se cambió la tendencia de crecer sobre pequeña propiedad a crecer sobre zonas ejidales, el ajuste que arroja un coeficiente de correlación más alto fue un polinómico.

Por otra parte, la Ilustración 13, muestra el crecimiento sobre zonas ejidales y pequeña propiedad de manera visual. El área de crecimiento puede ser calculada usando las capas descritas en el apartado "análisis de imágenes en ArcMap 10.1".

Es importante analizar que la razón de cambio del crecimiento sobre pequeña propiedad fue disminuyendo ya que las políticas relacionadas a la tenencia de tierras cambiaron a partir del año 1994.

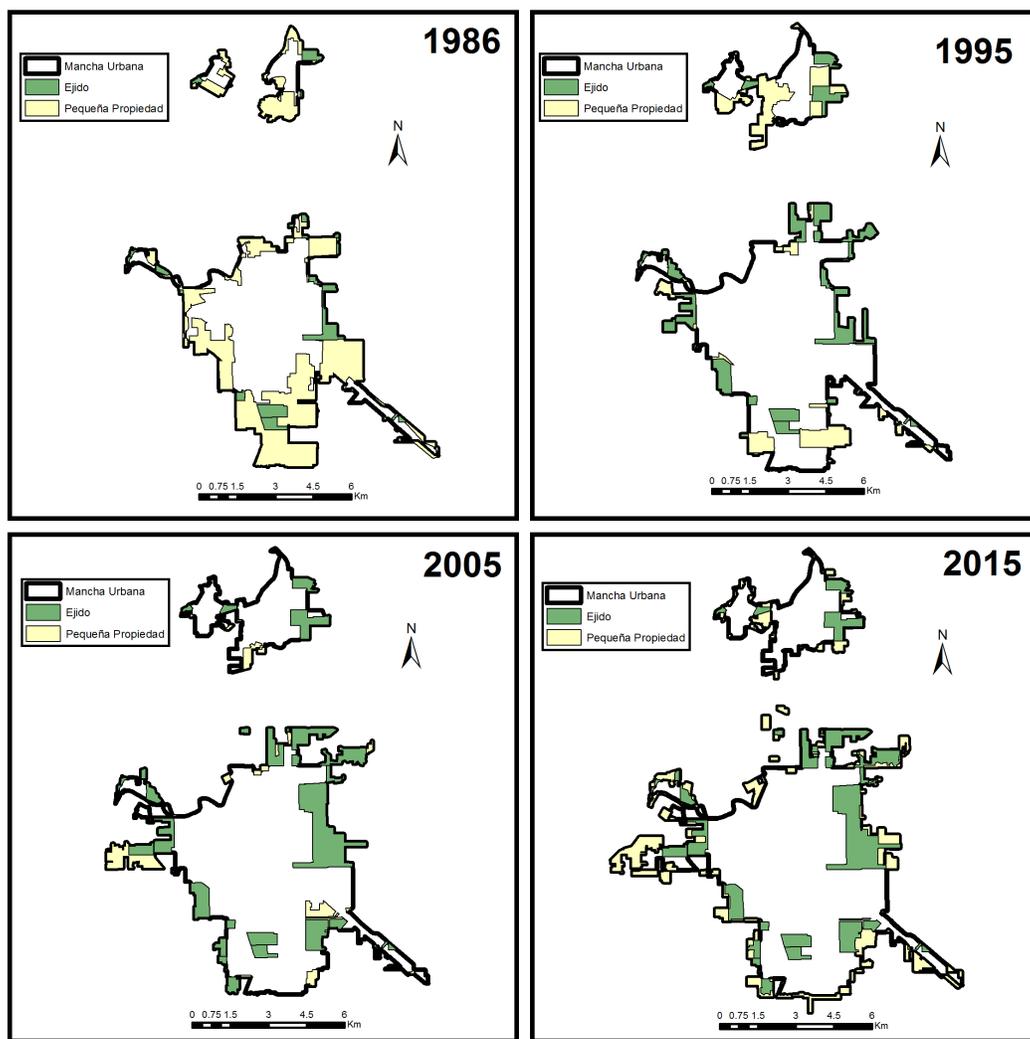


Ilustración 14. Crecimiento urbano de Cd. Obregón en relación a la tenencia de la tierra adherida a la mancha urbana durante el periodo histórico de 1973 a 2015.

Proyecciones del crecimiento urbano al año 2050

La proyección de crecimiento urbano se realizó utilizando el módulo Land Change Modeler (LCM) de IDRISI. Dicho modulo ejecuta un análisis de cambio de uso de suelo a lo largo de un período de tiempo. Para esto se utilizaron los polígonos del año inicial (1973) y año final (2015) del análisis. De esta manera LCM realiza un análisis histórico de la conversión que ha sufrido el uso de suelo. En el caso de estudio presentado aquí se analizó el cambio que tuvieron las pequeñas propiedades durante ese periodo. A continuación, se describen los pasos para implementar el LCM:

1. Abrir la herramienta Land Change Modeler, que se encuentra situada a la izquierda del buscador de IDRISI (Ilustración 13). Se desplegará una ventana de dicha herramienta situada en la viñeta "Change Analysis". En su apartado "LCM Project Parameters" se debe de generar y dar nombre a un nuevo proyecto.

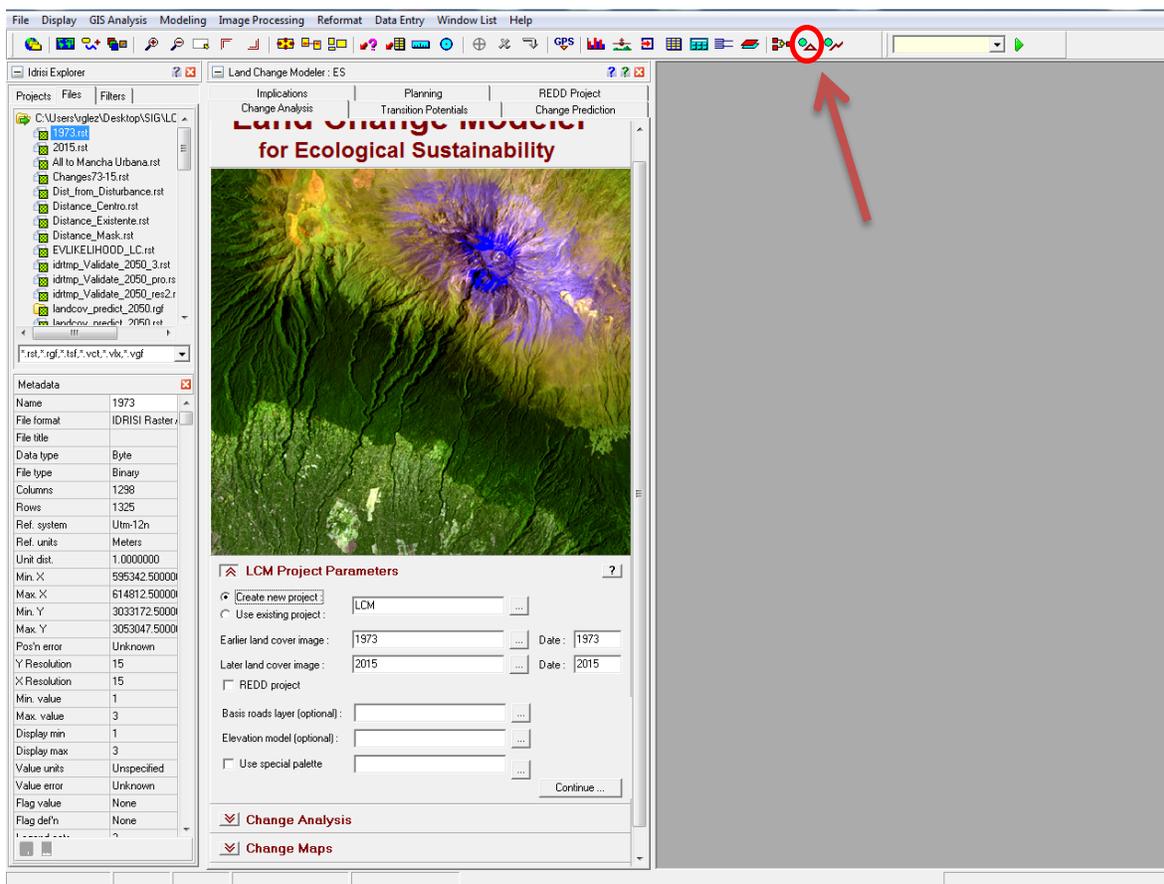


Ilustración 15. Impresión de pantalla para abrir el módulo "Land Change Modeler (LCM)" de Idrisi.

En "Earlier land cover image" se debe de introducir una imagen raster de cobertura de suelo de la fecha inicial del periodo de estudio, y una fecha posterior en "Later land cover image". La introducción de imágenes raster en las casillas de "Basis roads layer" y "Elevation model" son opcionales. Dar "Continue".

- Se abrirán los apartados de "Change Analysis" y "Change Maps" (Ilustración 14). En el primero de ellos se obtiene información gráfica y numérica con respecto a los cambios que hubo en las coberturas de suelo sobre la serie de tiempo en estudio. En el segundo apartado es donde se pueden obtener mapas al respecto. Para el caso en particular, se requiere conocer las coberturas que cambiaron a Mancha Urbana; por lo que se debe de ir a "Map the transition from" e introducir "All" a "Mancha Urbana", darle un nombre y oprimir el botón "Create Map". Este mapa es necesario para continuar con el procedimiento, sin embargo, se requiere como una imagen Booleana, es decir, se debe de realizar un "Reclass" para generar una única clasificación.

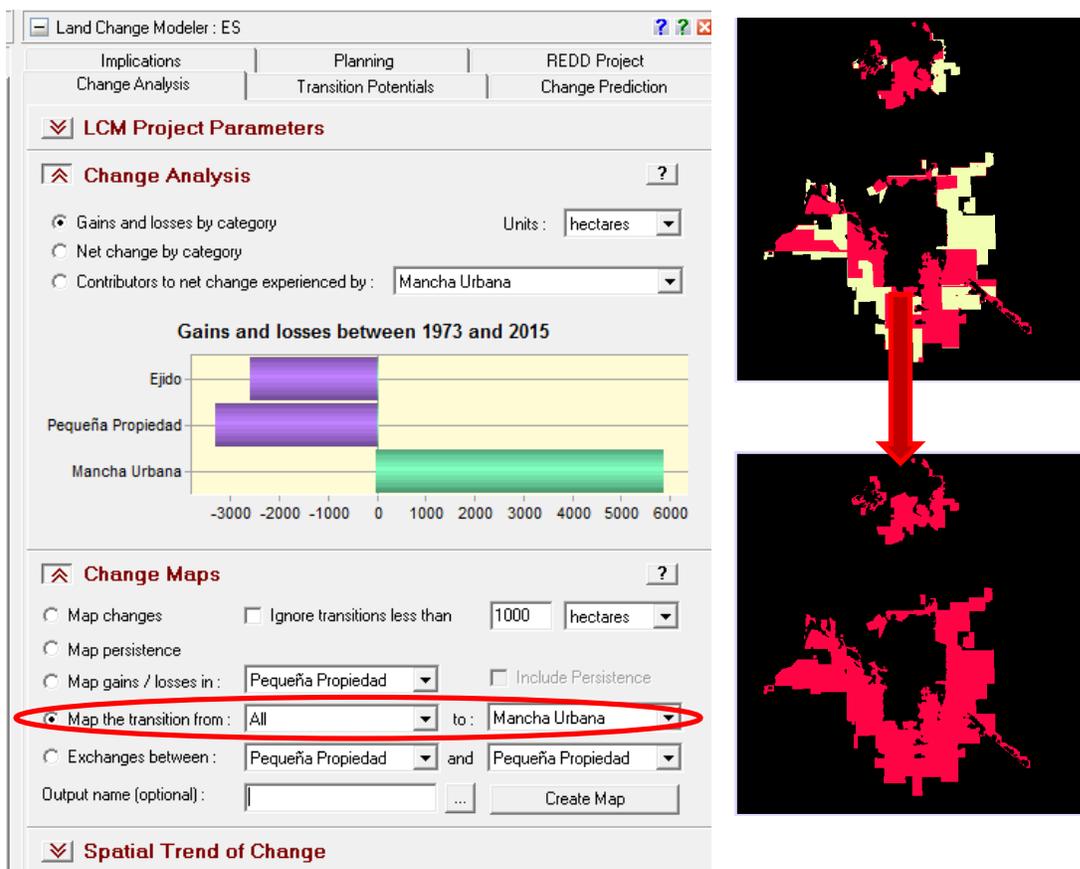


Ilustración 16. Impresión de pantalla y resultados de realizar el "Change Analysis y Change Maps" en el módulo LCM de Idrisi.

- El siguiente procedimiento consiste en realizar un análisis de tendencias espaciales, el cual se realiza con la herramienta "Spatial Trend of Change" (Ilustración 15). Dicha herramienta genera un mapa que ayuda a observar de qué manera espacial han variado las tendencias de cambio, donde los colores violetas y rojizos advierten un mayor cambio a través del periodo de estudio. Si se desea, se puede sobreponer transparentemente el raster de la mancha urbana inicial y así observar los lugares con mayor cambio.

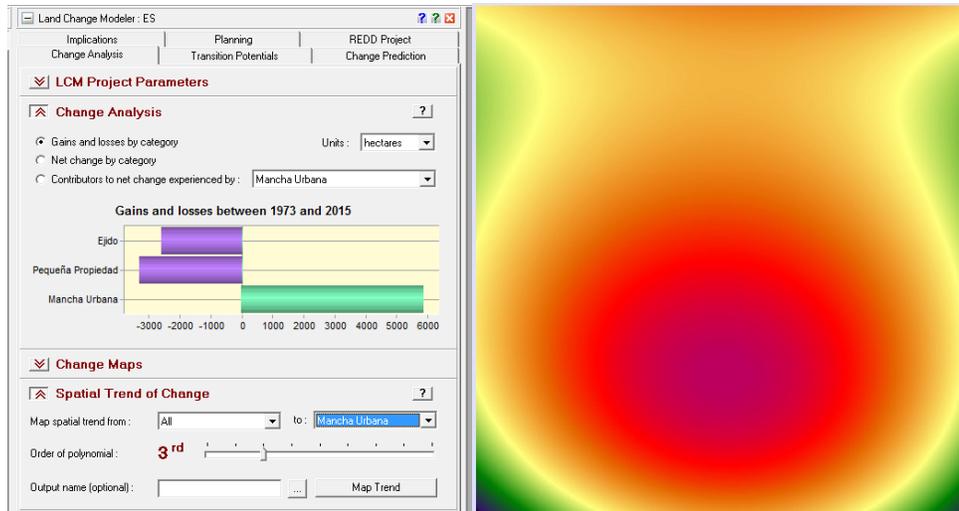


Ilustración 17. Impresión de pantalla de la herramienta "Spatial Trend of Change" del módulo LCM de Idrisi e imagen raster de tendencias de cambio.

4. El siguiente paso es definir los nombres de las coberturas y sub-coberturas que se utilizarán. Esto se realiza en la pestaña de "Transition Potentials" (Ver ilustración 16). En el apartado "Transition Sub-Models: Status", aparecerán las diferentes coberturas de suelo con las que se están trabajando. Únicamente se deben de considerar las coberturas que cambiaron a mancha urbana, dejándolas con la pestaña "yes". Así mismo, en el "Sub-Model Name", es sugerible cambiarlo a "Disturbance" cada casilla, ya que el cambio que ha ocurrido se puede considerar un disturbio, y de esta manera se asegura un único sub-modelo.

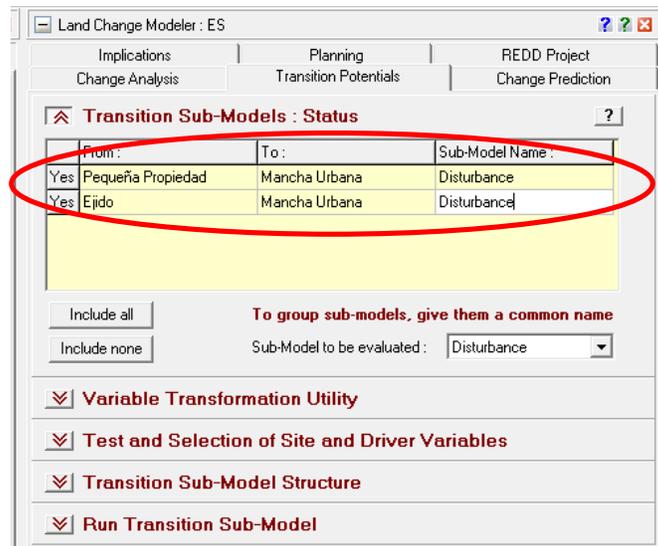


Ilustración 18. Impresión de pantalla de la pestaña de "Transition potentials" del módulo LCM de Idrisi.

5. En la pestaña de “Variable Transformation Utility” (Ilustración 17) se puede obtener una imagen raster donde se indique la probabilidad que tiene la cobertura de suelo a cambiar, en este caso, a mancha urbana. En “Transformation Type” dejar “Evidence Likelihood”. En “Transition or land cover layer name”, insertar la imagen Booleana obtenida en el punto 2. En “Input variable name” colocar la cobertura de suelo con la fecha inicial, y asegurarse que se encuentre marcada la casilla “Categorical”. Por último, darle un nombre y oprimir el botón ok para obtener el mapa.

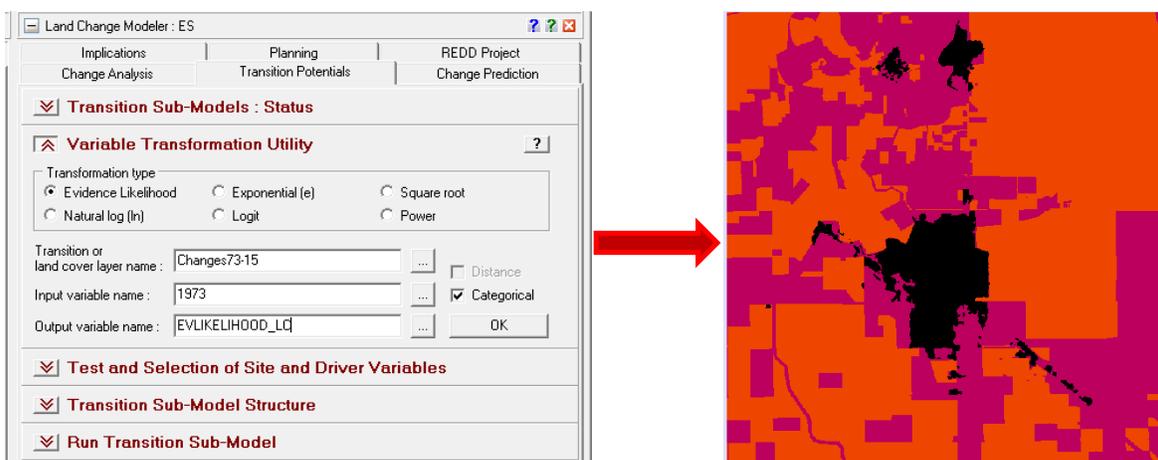


Ilustración 19. Impresión de pantalla de la pestaña "Variable Transformation Utility" del módulo LCM de Idrisi e imagen raster de probabilidades de cambio a urbano.

6. Con las siguientes pestañas, “Test and Selection of Site and Driver Variables” (Ilustración 18) y “Transition Sub-Model Structure” (ilustración 19), se alimenta al LCM con la información que requiere para hacer una corrida. Con el primero de ellos observas qué variables explican mejor el cambio de cobertura que está sucediendo sobre el área de interés. Dichas variables, se agregan al modelo mediante el botón “Add to Model”. Una vez agregado, automáticamente se despliega la variable en el segundo apartado en mención.

NOTA: Para el caso en particular de Cd. Obregón, las variables utilizadas fueron la distancia de la zona de disturbio, obtenida a partir de la mancha urbana del año más reciente y la herramienta “Distance” de IDRISI. También se utilizó la distancia desde el centro de la ciudad, obtenido a partir de un punto del centro de la ciudad y la herramienta antes mencionada. Finalmente, se utilizó la imagen obtenida en el punto 5. Cabe señalar que la variable de distancia de la zona de disturbio fue dinámica con base en la cobertura de suelo a mancha urbana.

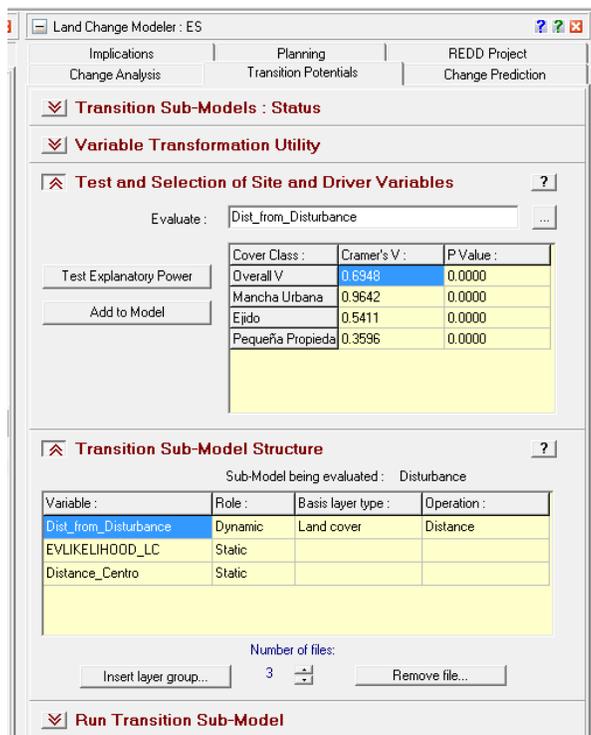


Ilustración 20. Impresión de pantalla de la pestaña de “Test and Selection of Site and Driver Variables” y “Transition Sub-Model Structure” del módulo LCM de Idrisi.

- Una vez que se seleccionaron las variables, en la pestaña “Run Transition Sub-Model” (Ilustración 19) se oprime el botón de “Run Sub-Model” para iniciar con el entrenamiento y prueba del modelo. Durante el proceso se pueden generar errores de reconocimiento, por lo que un “Stop” y de nuevo un “Run Sub-Model” será más que suficiente. El proceso dura varios minutos, dependiendo de la capacidad de memoria RAM del ordenador que se esté utilizando.

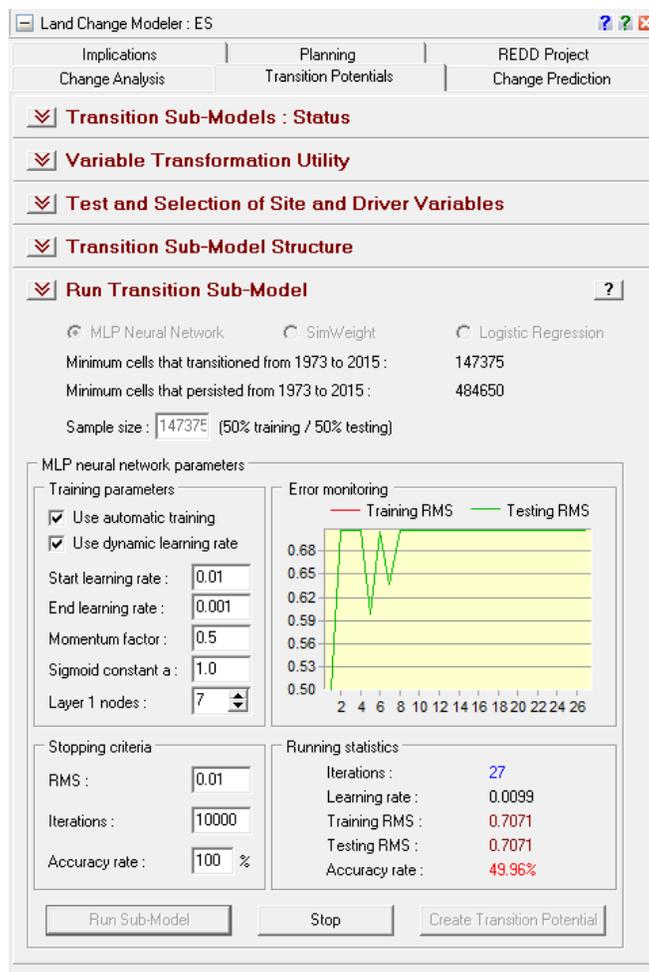


Ilustración 21. Impresión de pantalla de la pestaña “Run Transition Sub-Model” del módulo LCM de Idrisi.

- Para iniciar con la predicción de la dirección de crecimiento de la mancha urbana, se debe de posicionar en la pestaña de “Change Prediction”. En el apartado de “Change Demand Modeling” se debe de precisar al año que se desea hacer la predicción (Ilustración 20).

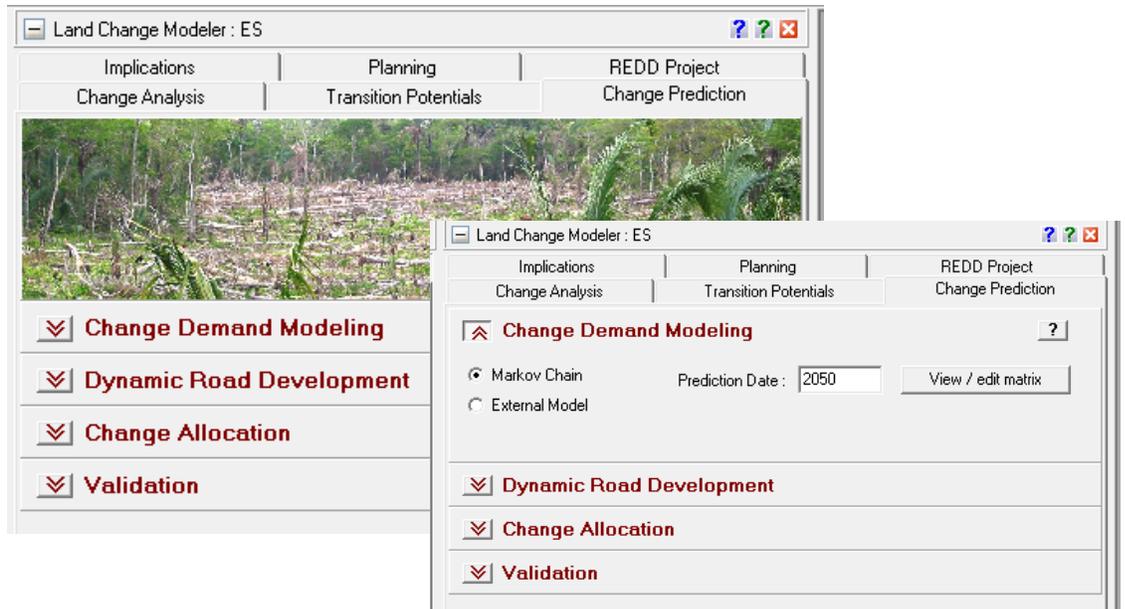


Ilustración 22. Impresión de pantalla de la pestaña de “Change Prediction” y recuadro para modificar parámetros de la pestaña de “Change Demand Modeling” del módulo LCM de Idrisi.

9. Si se desea aplicar una restricción al modelo, esto se puede especificar en la pestaña de “Planning”, apartado de “Constraints and Incentives” (Ilustración 21) y en su viñeta de “Constraints/Incentives Map” se introduce la imagen raster que servirá como restricción.

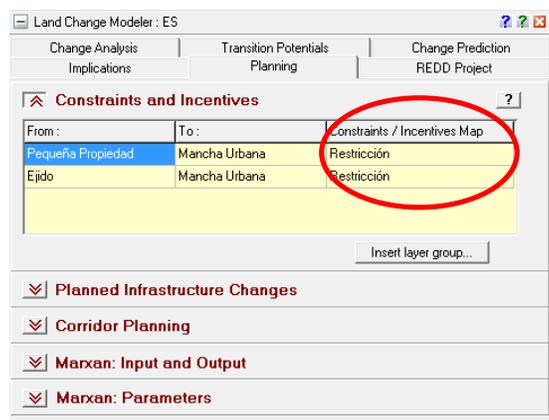


Ilustración 23. Impresión de pantalla en la pestaña de “Planning”, apartado de “Constraints and Incentives” del módulo LCM de Idrisi.

10. En “Change Prediction” en su apartado “Change Allocation” (Ilustración 22) se activa la casilla de “Zoning-Constraints/Incentives” en el entendido de que exista una restricción agregada en el punto 9. Si se desea generar un video de la secuencia y avance de la mancha urbana, se debe de asegurar de que la casilla de “Create AVI video” esté activada. Así mismo, es recomendable aumentar el número de pasos de cálculo en “Recalculate Stages” con la finalidad de que el modelo realice varias veces el mismo procedimiento hasta que esté completamente seguro de su resultado. Por último, se oprime el botón “Run Model” para generar el modelo. La imagen tardará dependiendo del número de variables y pasos de cálculo con los que se haya “alimentado” al modelo.

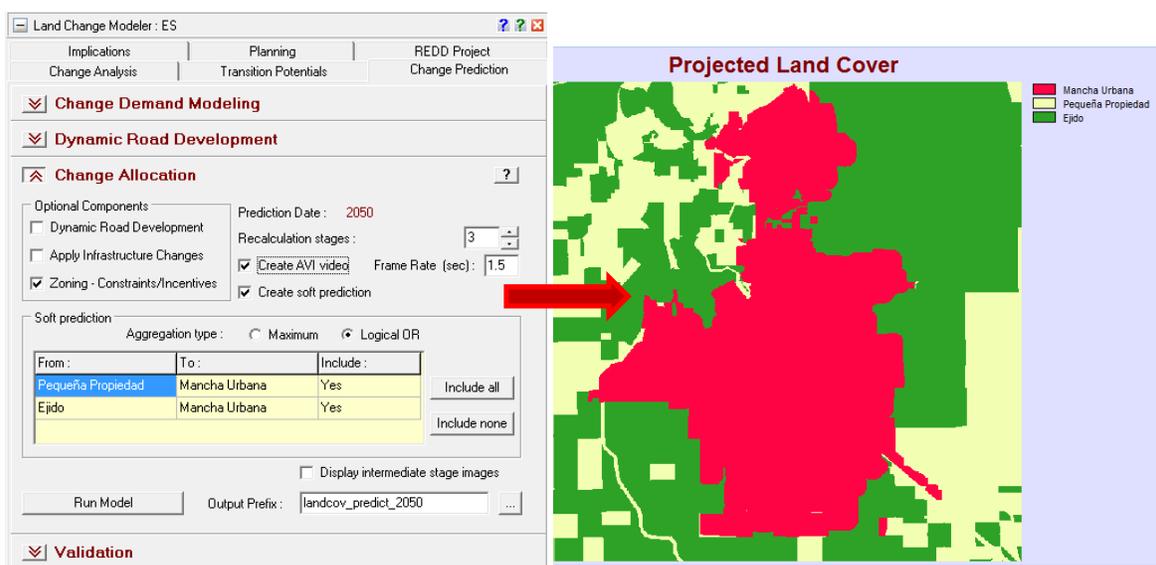


Ilustración 24. Impresión de pantalla de 10 de la pestaña “Change Prediction” en su apartado “Change Allocation” donde se activa la casilla de “Zoning-Constraints/Incentives” y también se activa la opción de grabar y crear un video de la evolución de la mancha urbana e imagen raster del resultado como cobertura de suelo pronosticada.

11. Por último, si se desea y se tiene una imagen para comparación, en el apartado de “Validate” (ver Ilustración 23) se valida la veracidad de la proyección realizada. Únicamente se necesita la imagen raster del año futuro con el que se esté trabajando. En el caso particular, se obtuvo el polígono de la proyección de la mancha urbana de Desarrollo Urbano del Ayuntamiento de Cajeme la cual se convirtió a raster y se utilizó para realizar la validación.

Las falsas alarmas (color amarillo) representan áreas donde el modelo predijo que avanzaría la mancha urbana pero que de acuerdo a la imagen futura real no existe dicho cambio. Los fallos (color rojo) con el número cero representan áreas que tanto el modelo como la imagen real concuerdan que no existe avance de la mancha urbana. En cambio, los fallos con el número uno representan áreas donde el modelo no predijo un avance pero que realmente si existen de acuerdo con la imagen de raster real. Los aciertos (color

verde) representan áreas donde tanto el modelo como la imagen real raster concuerdan que existe avance de la mancha urbana en esa dirección.

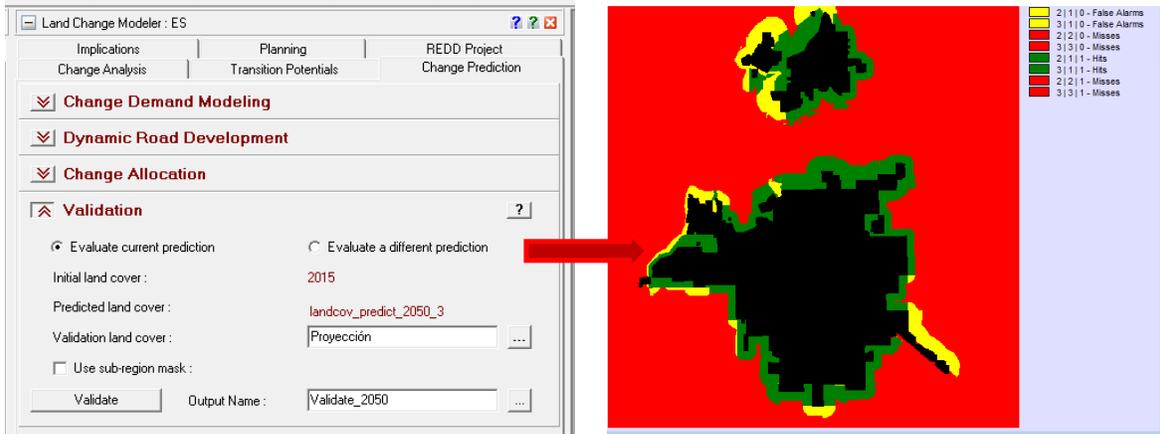


Ilustración 25. Impresión de pantalla de la pestaña de “Validate” del módulo LCM de Idrisi e imagen raster de falsas alarmas, fallos y aciertos.

Validación en campo de la clasificación no supervisada y de las proyecciones del crecimiento urbano

La validación del modelo de crecimiento urbano al 2050 se llevó a cabo en 3 etapas:

- 1) Realizando entrevistas a los propietarios de los predios que se encuentran en la periferia de la ciudad para conocer la susceptibilidad que tienen estos terrenos a ser vendidos en un futuro.
- 2) Identificando las propiedades que pertenecen al sector privado y se encuentran a nombre de empresas de construcción y desarrollo urbano.
- 3) Realizando verificaciones en campo sobre el uso actual de las propiedades.

En la Ilustración 24 se pueden observar los territorios que conforman la periferia de la ciudad. Los terrenos que están destinados a urbanización son aquellos cuyos propietarios son compañías constructoras o de desarrollo urbano. A su vez, las propiedades ejidales son las que aparecen a nombre de una comunidad ejidal. Los puntos de verificación identifican las zonas donde se comprobó el uso actual de las propiedades mediante visitas a campo. Las zonas marcadas de color verde, son puntos de verificación en los que además los propietarios accedieron a contestar el instrumento de validación propuesto para este trabajo (ANEXO I).

Durante las visitas a campo se encontró que existen zonas que actualmente ya se encuentran semi-urbanizadas, el polígono rayado de la Ilustración 27 muestra terrenos que ya están amanzanados y forman parte de la mancha urbana actual y que además, cuentan con servicios públicos como pavimento, alumbrado público y alcantarillado. Sin embargo, la mayoría de las propiedades de la zona indicada son lotes en venta, mientras que otra proporción se encuentra actualmente en proceso de urbanización (construcción de viviendas) y otra parte permanece aún como tierras de cultivo activas.

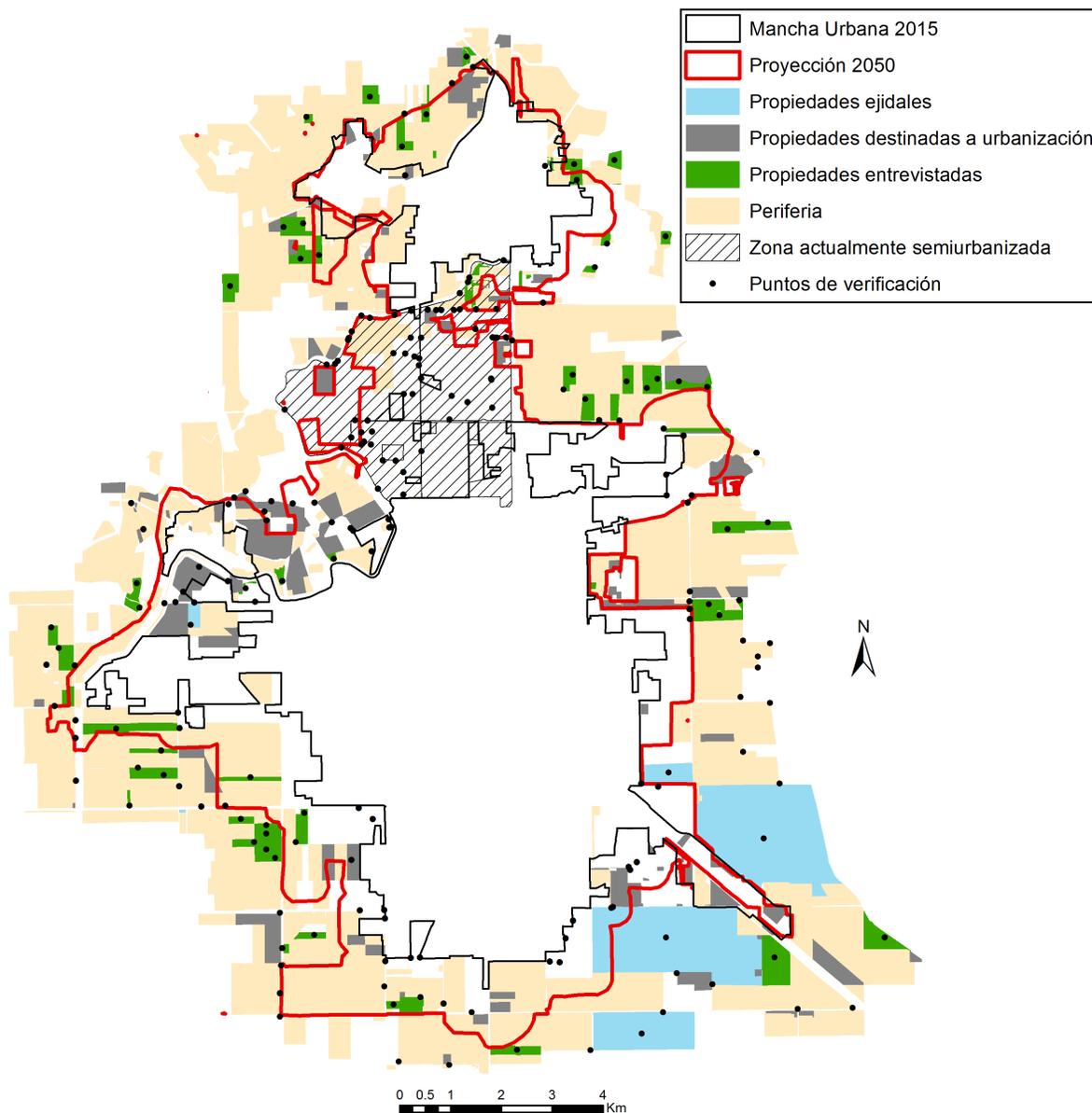


Ilustración 26. Características de la periferia de la mancha urbana y la ubicación de los sitios de verificación para la validación de la clasificación no supervisada.

La validación se realizó tomando como base de análisis 7,645 ha de periferia, de las cuáles 939 ha fueron puntos de verificación donde los propietarios contestaron el instrumento de validación. De ahí, 946 ha están asociadas a empresas de desarrollo urbano y 1078 ha pertenecen a comunidades ejidales.

Se llevaron a cabo un total de 48 entrevistas (ANEXO II). Los resultados muestran que 70.83 % son propietarios del género masculino y 29.17 % del género femenino. De los cuales sólo el 41.67 % son agricultores. Los propietarios entrevistados tienen una edad promedio de 58 años y han sido dueños de sus terrenos un promedio de 18 años. El 62.50 % de las propiedades son usadas como

tierras agrícolas, el 20.83 % son lotes baldíos o terrenos en venta, en el 14.58 % actualmente existe infraestructura instalada y sólo el 2.08 % de los predios son usados como vivienda.

El objetivo de las entrevistas fue conocer la susceptibilidad de las tierras periféricas a ser vendidas. De acuerdo a la opinión de los propietarios, actualmente el 89.58 % de las propiedades son susceptibles a venderse, la gran mayoría pediría ciertas condiciones económicas para venderlas mientras una minoría no está segura de cuáles serían las condiciones bajo las cuales vendería su predio, solo un 10.42 % de los entrevistados considero que bajo ninguna circunstancia vendería sus tierras.

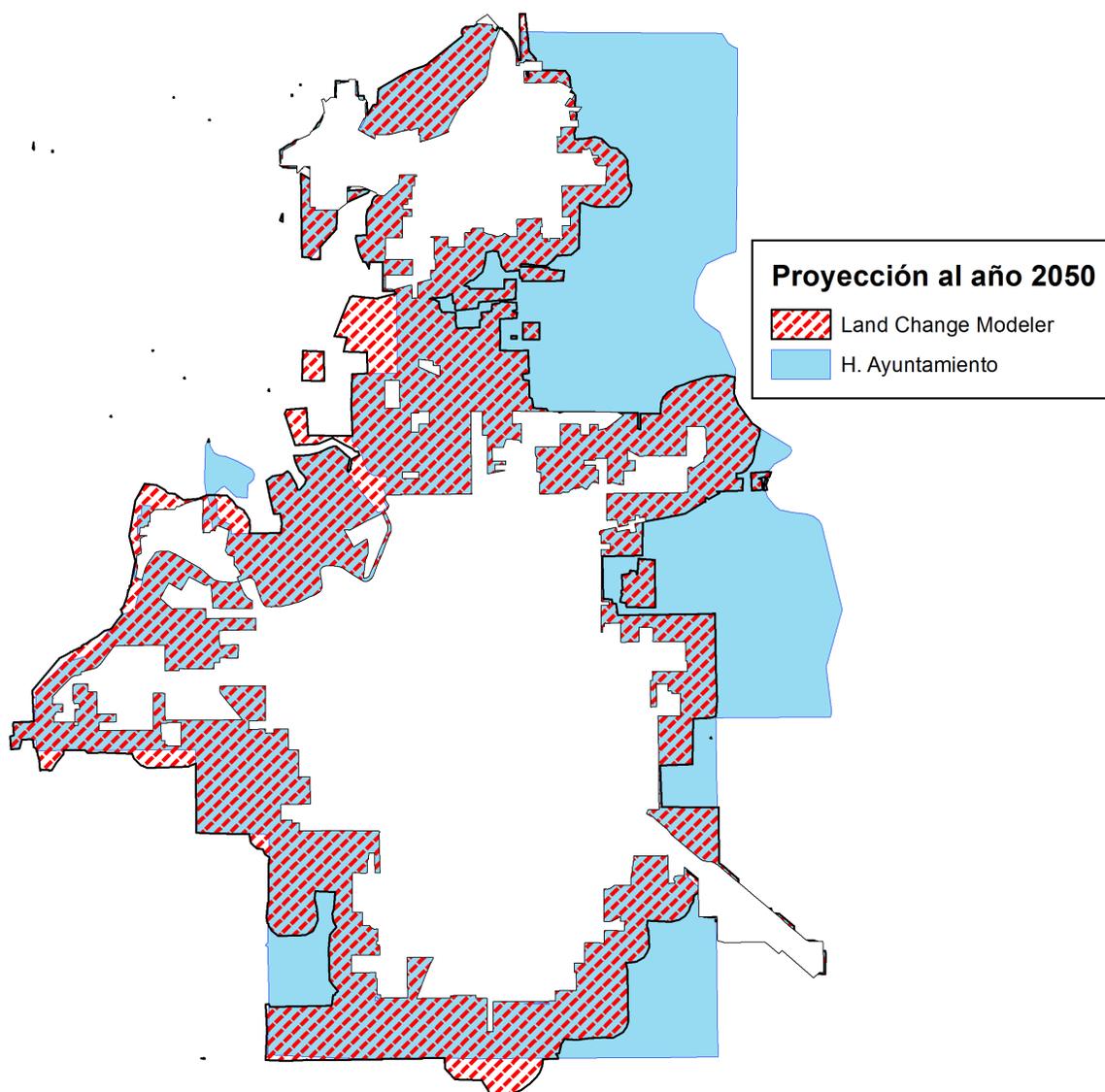


Ilustración 27. Comparación entre la proyección oficial del H. Ayuntamiento de Cajeme y las proyecciones generadas utilizando el Land Change Modeler de IDRISI.

La proyección final realizada con LCM se encuentra subestimada por 3,489 ha en relación a la proyección realizada mediante el Plan de Desarrollo Urbano del Centro de Población de Cd. Obregón (ver Ilustración 25). De acuerdo a la proyección oficial del municipio, Cd. Obregón se extenderá en mayor parte hacia el noreste, formando una mancha urbana de aproximadamente 16,273 ha, mientras que LCM proyecta 12,784 ha de mancha urbana para el 2050. La Ilustración 29 muestra la comparación de las zonas agrícolas que serán engullidas por la ciudad en el año 2050, según LCM y el Plan de Desarrollo.

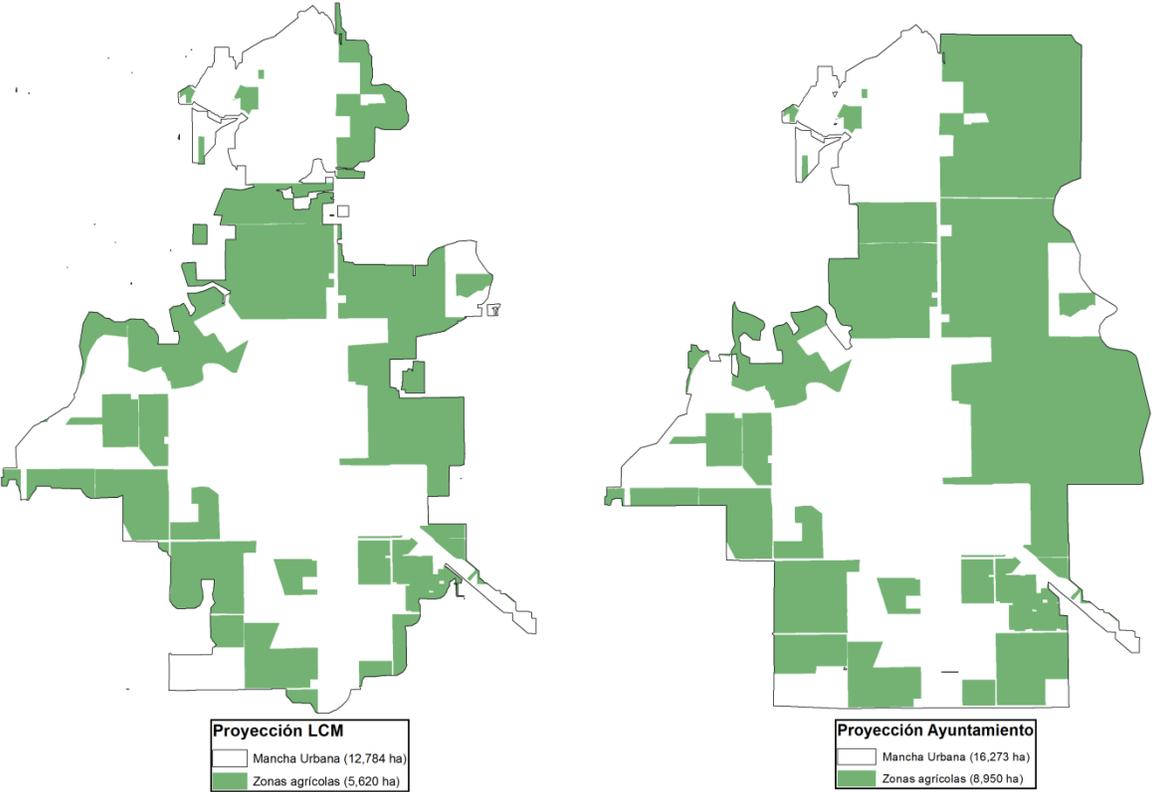


Ilustración 28. Comparación entre las proyecciones al año 2050 en relación a la extensión de la mancha urbana sobre zonas agrícolas.

Análisis de Imágenes en ArcMap 10.1

El software IDRISI Selva ® genera imágenes Raster (.rst) identificando (a groso modo) elementos considerados “mancha urbana” (mediante clasificación supervisada y clasificación no supervisada). A partir de estas imágenes, el software ArcMap 10.1 ® (ESRI, 2014), permite realizar cálculos más detallados de las áreas y límites del crecimiento urbano a lo largo del periodo de estudio y genera polígonos (.shp) para realizar operaciones con otras capas de información (previamente obtenidas de las agencias de gobierno, mediante investigación de campo e investigación bibliográfica) para cuantificar la superficie de Ejidos y Pequeñas Propiedades que han cambiado en Cd. Obregón desde 1973 hasta 2015.

A continuación, se explica paso a paso cómo generar los polígonos partiendo de los raster de IDRISI. Existen dos casos particulares con los que podemos encontrarnos: 1) cuando no se cuenta con una capa de cuadras o manzanas para nuestro sitio de estudio y 2) cuando se cuenta con la capa de cuadras o manzanas oficial de catastro.

Generación de polígonos sin la capa de cuadras

1. Ejecutar Arc Map 10.1 desde Inicio (Ilustración 30).

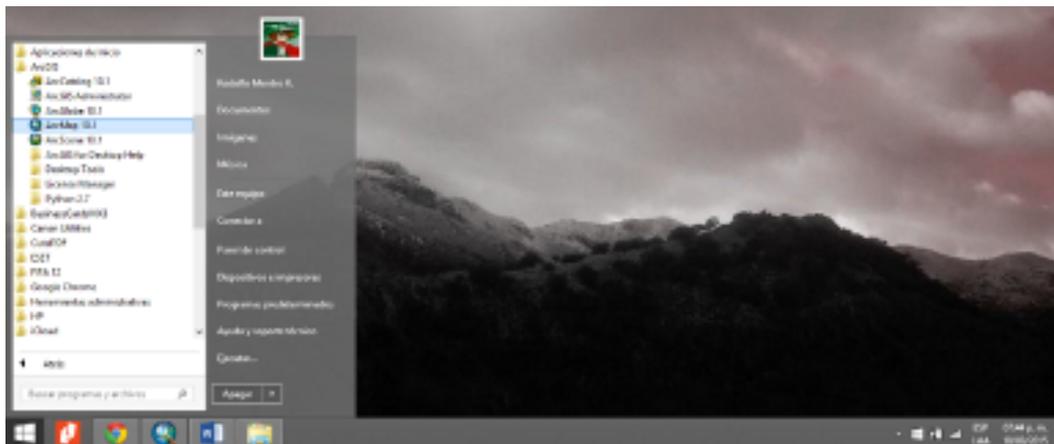


Ilustración 29. Impresión de pantalla del lanzamiento del software ArcMap 10.1 desde la barra de herramientas.

1. Agregar la imagen .rst elegida mediante el comando **Add data**. Dicha imagen proviene del procesamiento de imágenes realizado en Idrisi (ver pasos anteriores).
2. Es necesario convertir la imagen de formato raster a formato polígono. Esto se lleva a cabo mediante la herramienta que se encuentra dentro del Arc toolbox y elegir **Conversion tools < From Raster < Raster to polygon < Darle nombre y ubicación** (Ilustración 31).

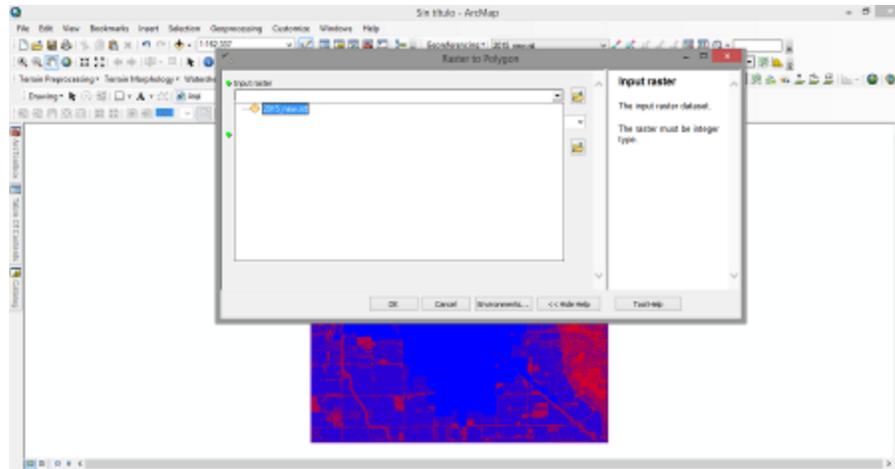


Ilustración 30. Impresión de pantalla de la herramienta de "Raster to polygon" en ArcToolbox.

3. El resultado de la conversión será un archivo vectorial (*.shp) como el que se muestra en la Ilustración 32.

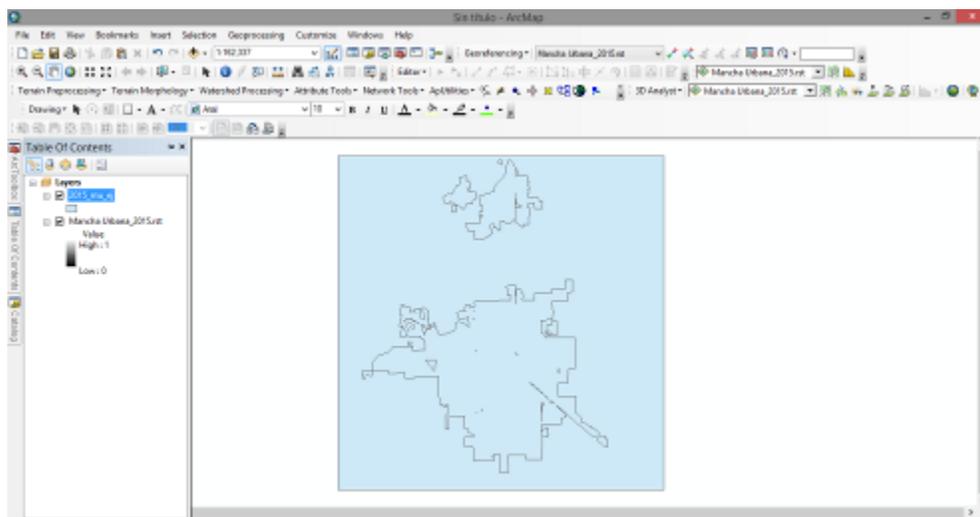


Ilustración 31. Impresión de pantalla del resultado de la conversión de "Raster to polygon".

- Para asegurar que la imagen .rst ha sido convertida exitosamente a un polígono se revisa la tabla de atributos (Ilustración 33) y se observa la columna GRIDCODE, donde se identifican valores 0 (cero) y 1 (uno). Para abrir la tabla de atributos, se sigue el procedimiento: Click derecho sobre la capa del nuevo polígono creado y se elige **Open Attribute Table**.

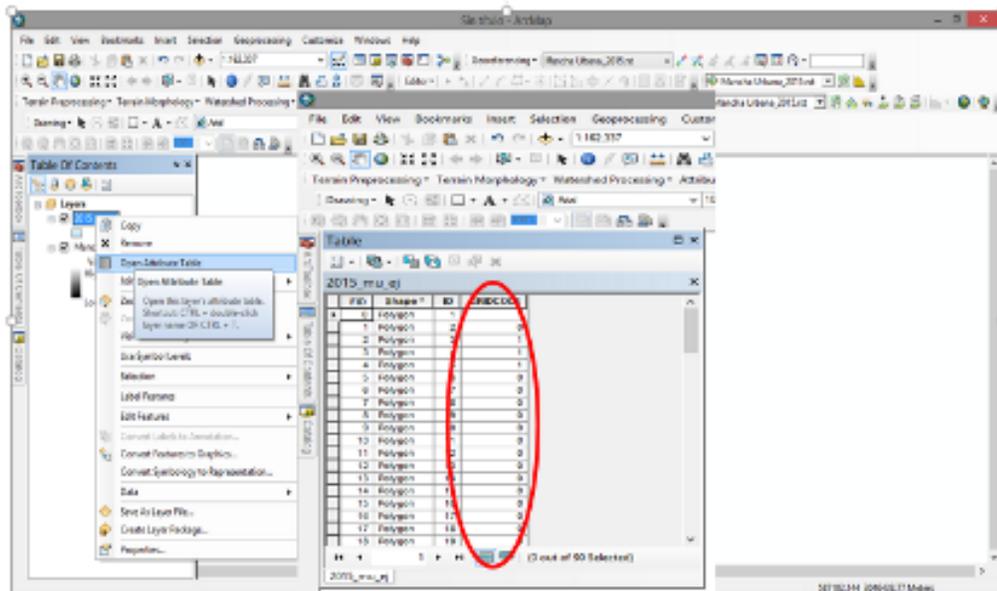


Ilustración 32. Impresión de pantalla de la verificación de la tabla de atributos del archivo vectorial que se obtuvo de la imagen raster.

- Tal como se observa, son muchos polígonos con el mismo valor; entonces es posible realizar el siguiente comando para agrupar todos los polígonos que tienen el mismo valor. Elegir el comando del ArcToolbox, **Geoprocessing < Dissolve**. En la ventana emergente, seleccionar la opción GRIDCODE (esto permitirá que todos los polígonos con el mismo valor (de GRIDCODE) se agrupen en un atributo). Para asegurarse del ajuste en la tabla de atributos, se repite el paso número 5 hasta que se observan tan solo dos polígonos y dos valores de atributos, para nuestro caso (Ilustración 34).

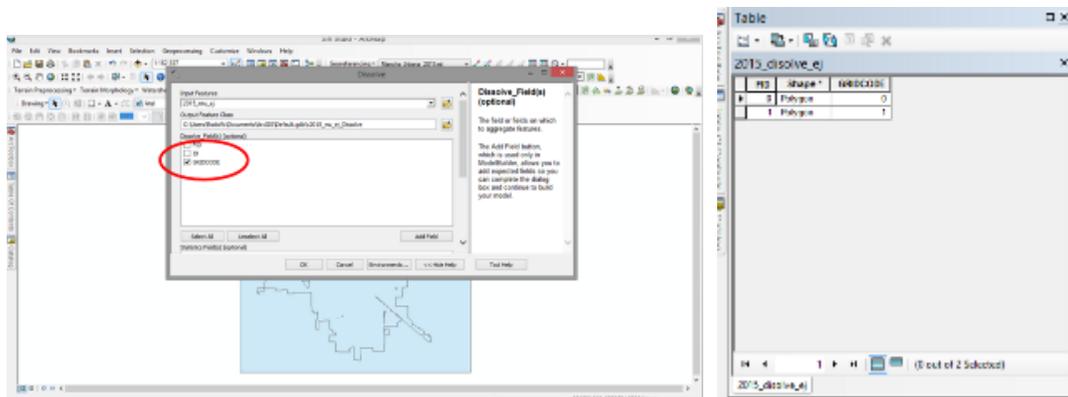


Ilustración 33. Impresión de pantalla de la verificación del agrupamiento de polígonos en el archivo vectorial.

- Como se desea extraer tan solo la categoría con valor de 1, se elige el comando **Editor < Start editing** (asegurarse que sea la única capa con posibilidades de edición) y se da un click en cualquier parte fuera del polígono que pueda ser considerada mancha urbana.

Dado que se seleccionan polígonos con valores de 0 (cero), presionar la tecla ***Supr*** en el teclado y la imagen en el software debe verse como en la Ilustración 35 (asegurarse que todas las demás capas que estén cargadas en el Data Frame estén apagadas).

Elegir la ruta **Editor < Save edits < Stop editing**. De esta forma, los polígonos restantes tienen atributos con valor 1. El resultado de este procedimiento corresponde a un polígono (de hecho, por el momento existen varios polígonos dentro de la mancha urbana que tienen el valor de 0 {cero} y es necesario que el área de esos polígonos se consideren dentro del área total de la ciudad) considerado como terrenos de la ciudad y con valores de atributos de 1.

Para calcular la superficie del polígono, en la última capa generada (con la herramienta **Dissolve**), dar doble click sobre el nombre y seguir la siguiente ruta: **Symbology < Features < Symbol (recuadro de color) < Hollow < Outline width < 2 < Outline color < Red < Ok < Aplicar < Aceptar**. Así, se tiene el contorno del polígono considerado como mancha urbana (Ilustración 35).

Utilizando la herramienta **Zoom In** permite acercar el alcance del ojo al polígono y se identifica que dentro del polígono más grande existen otros polígonos más pequeños que no se consideran como mancha urbana porque su valor es de 0 (cero, Ilustración 36). Para integrar estos polígonos a la mancha urbana, se siguen los siguientes pasos:

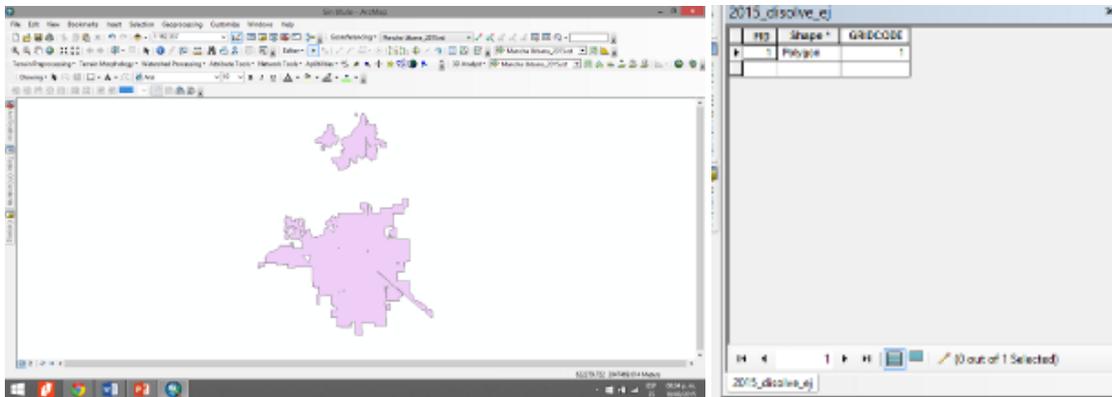


Ilustración 34. Impresión de pantalla del polígono urbano resultante de la operación "Dissolve".

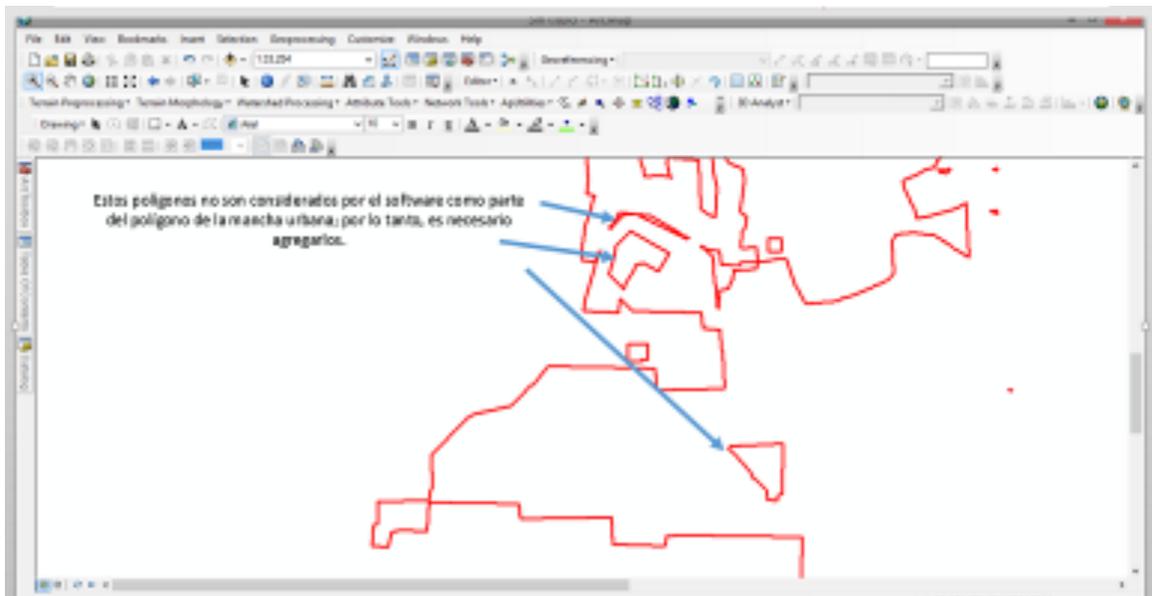


Ilustración 35. Impresión de pantalla de los polígonos internos que representan "áreas verdes" dentro de la mancha urbana.

7. Elegir la siguiente ruta: **Seleccionar la capa a editar** < **Editor**< **Edit vertices** < (del menú desplegado) < **Delete vertex** e iniciar a borrar los polígonos más pequeños que no se consideran como mancha urbana porque su valor es de 0 (Ilustración 37). Este proceso se repite dentro de todo el polígono de la mancha urbana hasta que se haya “limpiado” todos los polígonos internos que no forman parte de la frontera de la mancha urbana (ver Ilustración 38 para el resultado final).

Para calcular la superficie que abarca toda la mancha urbana, dentro de la misma tabla de atributos se selecciona **Table options** < **Add field** < **Name: Superficie** < **Type: Double** < **Ok**. Enseguida, se abre una sesión de edición con la ruta **Editor** < **Start editing** < **Seleccionar capa resultado de dissolve** < **Ok**. Copiar los datos y pegar en una hoja de Excel.

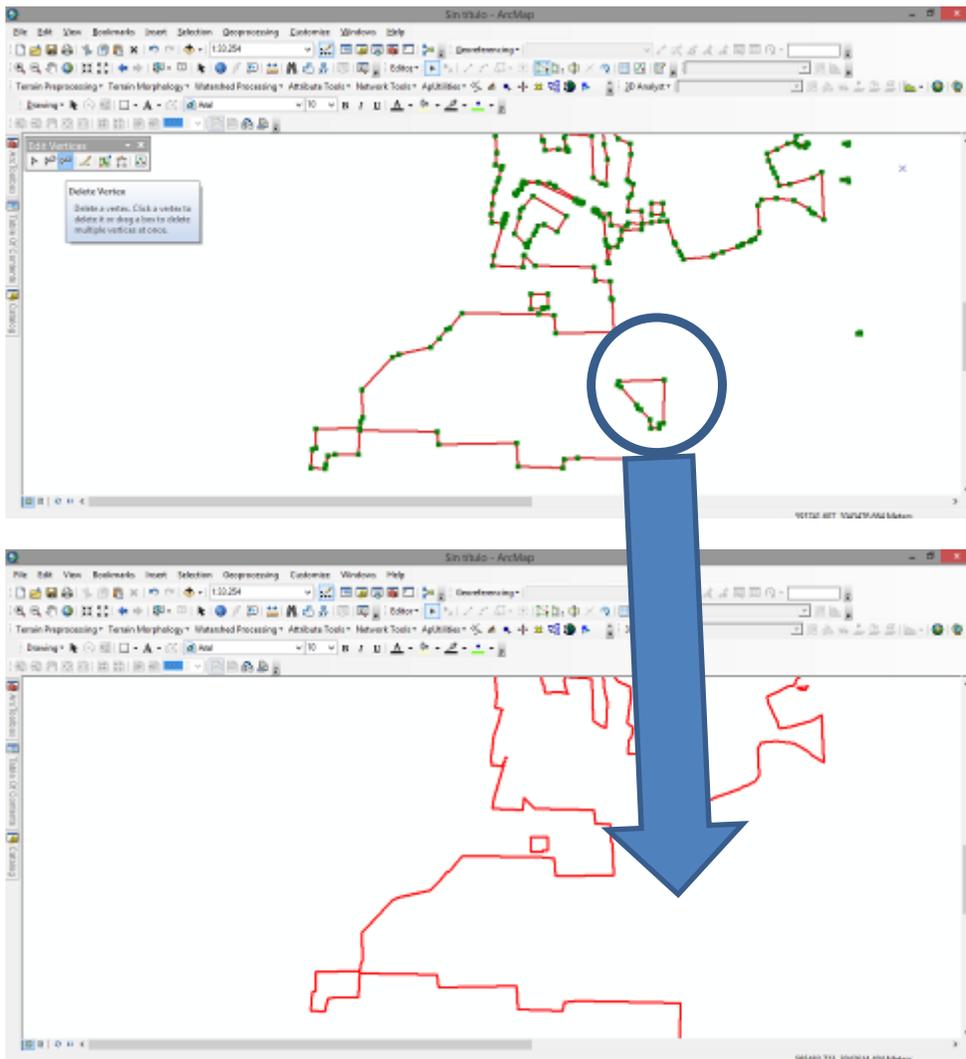


Ilustración 36. Impresión de pantalla de la operación de editar vértices para borrar polígonos dentro de la mancha urbana.

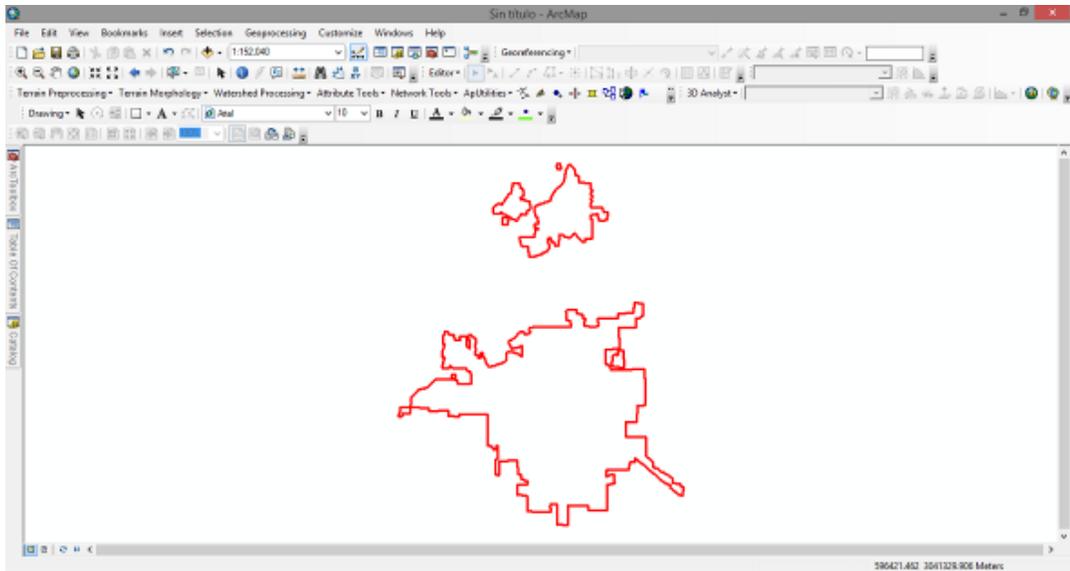


Ilustración 37. Resultado final del polígono de la mancha urbana en ArcMap después de haber realizado el procedimiento de borrado de todos los polígonos internos.

8. Como siguiente paso, se realiza la intersección de la mancha urbana con la capa de ejidos (obtenido previamente). Asegurar que la proyección, el Datum y las coordenadas geográficas de ambas capas sean iguales (de preferencia WGS 84 UTM Zona 12 N). La imagen con ambas capas se presenta en la Ilustración 36.

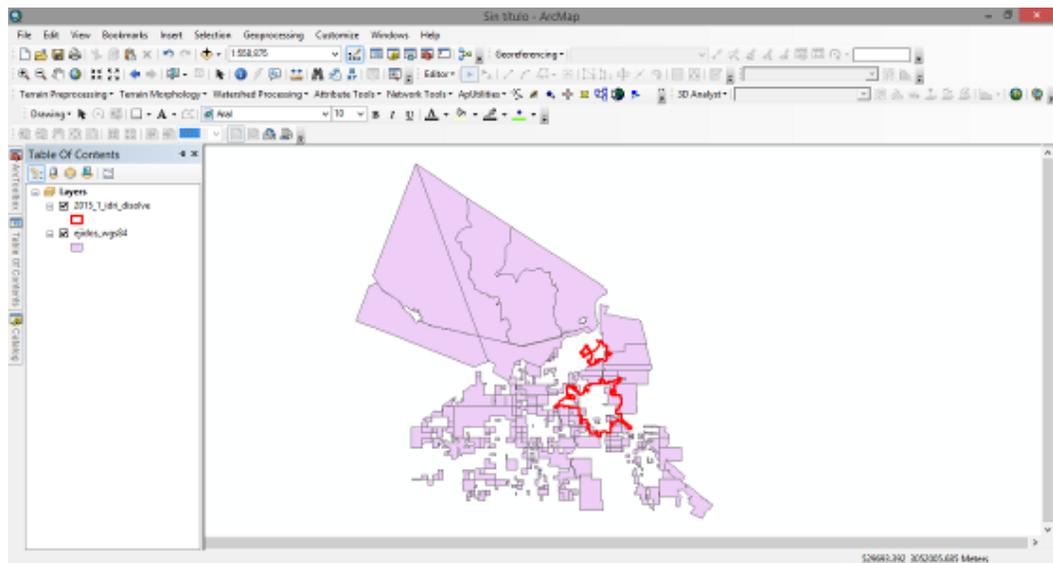


Ilustración 38. Imagen con la capa de mancha urbana final (fuente propia) y la capa de ejidos obtenida de INEGI o de las agencias de gobierno local.

9. Realizar la operación en ArcToolbox **Geoprocessing < Intersect** Lo que debe dar los resultados mostrados en la Ilustración 40. Como se observa en la imagen, las líneas verdes indican los límites ejidales, las líneas rojas indican los límites de la mancha urbana (2015) y las áreas coloreadas de morado muestran la intersección de los límites de la ciudad y los ejidos. Esta es la forma para cuantificar la superficie que la ciudad ha expandido sus límites hacia los ejidos.

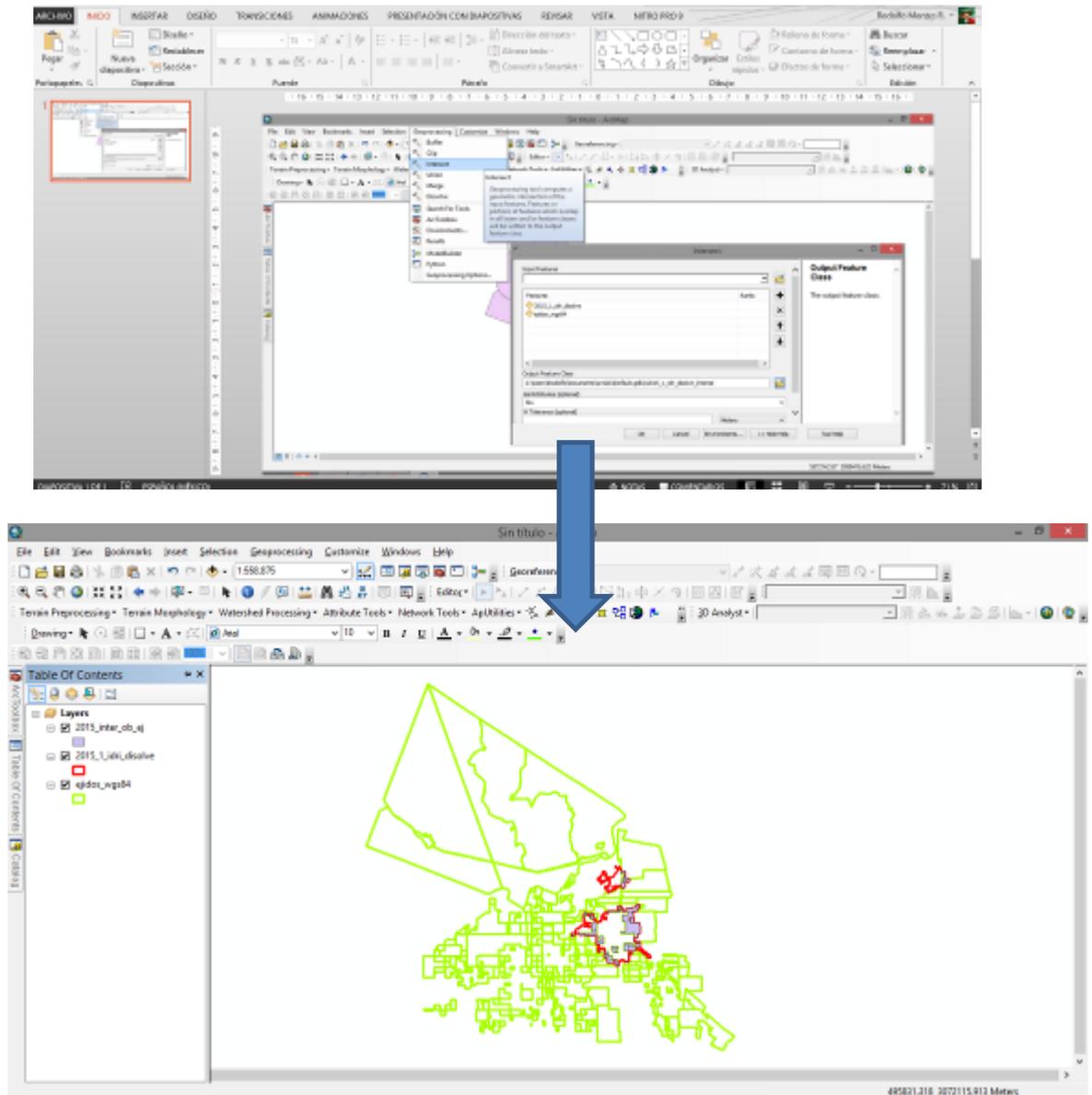


Ilustración 39. Impresión de pantalla de la operación de Geoprocessing "Intersect" y su resultado después de intersectar las capas de mancha urbana y ejidos.

10. Para poder conocer los datos de la superficie que la ciudad ha crecido hacia los ejidos, se despliega la tabla de atributos de la capa creada por **Intersect**. Los atributos específicos para este proyecto son: Nombre del ejido y superficie. En el caso del primer atributo, la tabla lo genera. El resultado se muestra en la Ilustración 41.

FID	Shape	FID_ejidos	NOMBRE	CVA_EJID
10	Polygon	64	TEPEYAC	288
11	Polygon	68	TEPEYAC	288
12	Polygon	69	PROVERNEGA	276
13	Polygon	70	PROVERNEGA	276
14	Polygon	71	CAJEME	230
15	Polygon	73	TEPEYAC	280
16	Polygon	84	EL RODEO	281
17	Polygon	86	EL RODEO	281
18	Polygon	88	EL RODEO	281
19	Polygon	98	EL RODEO	281
20	Polygon	91	EL RODEO	281
21	Polygon	96	CAJEME	270
22	Polygon	88	GRANDE PESQUERA	286
23	Polygon	100	ROBLES CASTILLO GRUPO COLECTIVISTA	280
24	Polygon	118	GRAL. RICARDO TOPETE	279
25	Polygon	112	GRAL. RICARDO TOPETE	279
26	Polygon	114	EL RODEO	281
27	Polygon	131	M.C.P.E. IGNACIO SOTO	256
28	Polygon	137	GUADALUPE VICTORIA (CAMPO 6)	250

Ilustración 40. Tabla de atributos de la capa Intersectada que muestra los nombres de los ejidos que se encuentran dentro de la mancha urbana.

Como el atributo de superficie no existe, es necesario crearlo. Para ello, se sigue la ruta (dentro de la misma tabla de atributos): **Table options < Add field < Name: Superficie < Type: Double < Ok**. Enseguida, se abre una sesión de edición con la ruta **Editor < Start editing < Seleccionar capa resultado de intersect < Ok**.

En la tabla de atributos se elige la columna con el encabezado **Superficie** y con la opción del click derecho elegir la opción **Calculate geometry**. Tal como se observa en la Ilustración 42 y seguir la ruta **Area < Use coordinate system of the data source < Units: Hectareas (ha) < Ok**.

Una vez realizado este procedimiento, todos los polígonos resultantes de la intersección de los límites de la ciudad y los límites de los ejidos muestran la superficie total. De esta forma, se seleccionan con la ruta **Open Attribute Table < Table options < Select All** y se copian en una hoja de cálculo (Excel) del paquete Microsoft ©.

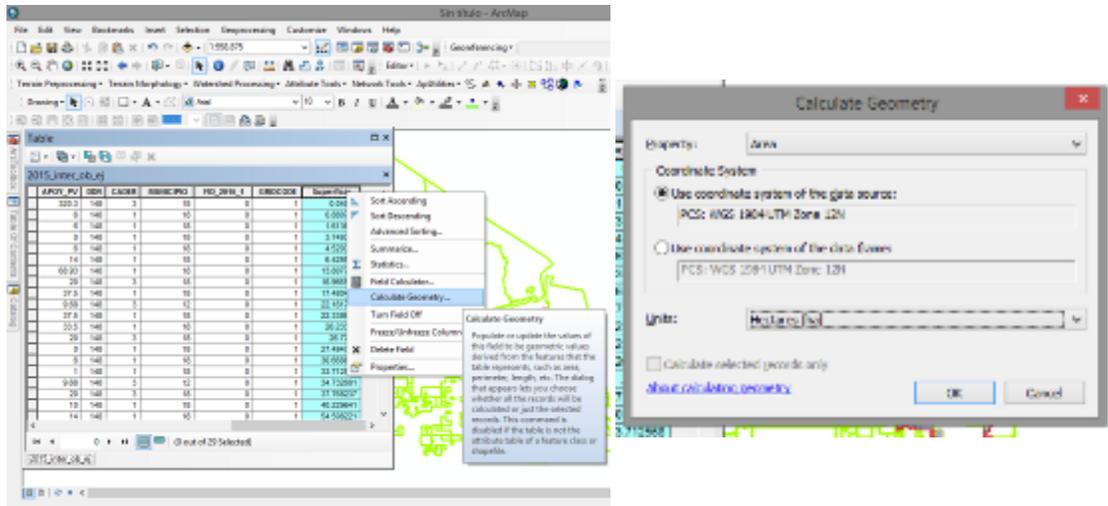


Ilustración 41. Procedimiento para calcular las áreas de vectores (polígonos) en Arcmap.

Generación de polígonos utilizando la capa de cuadradas

1. Primero necesitamos generar los archivos ASCII de nuestros mapas reclasificados para enviarlos a ArcGIS. Para esto nos dirigimos a IDRISI y seguimos la siguiente ruta **File < Export < Software Specific-Formats < ESRI Formats < ARCRASTER**. (Ilustración 43)

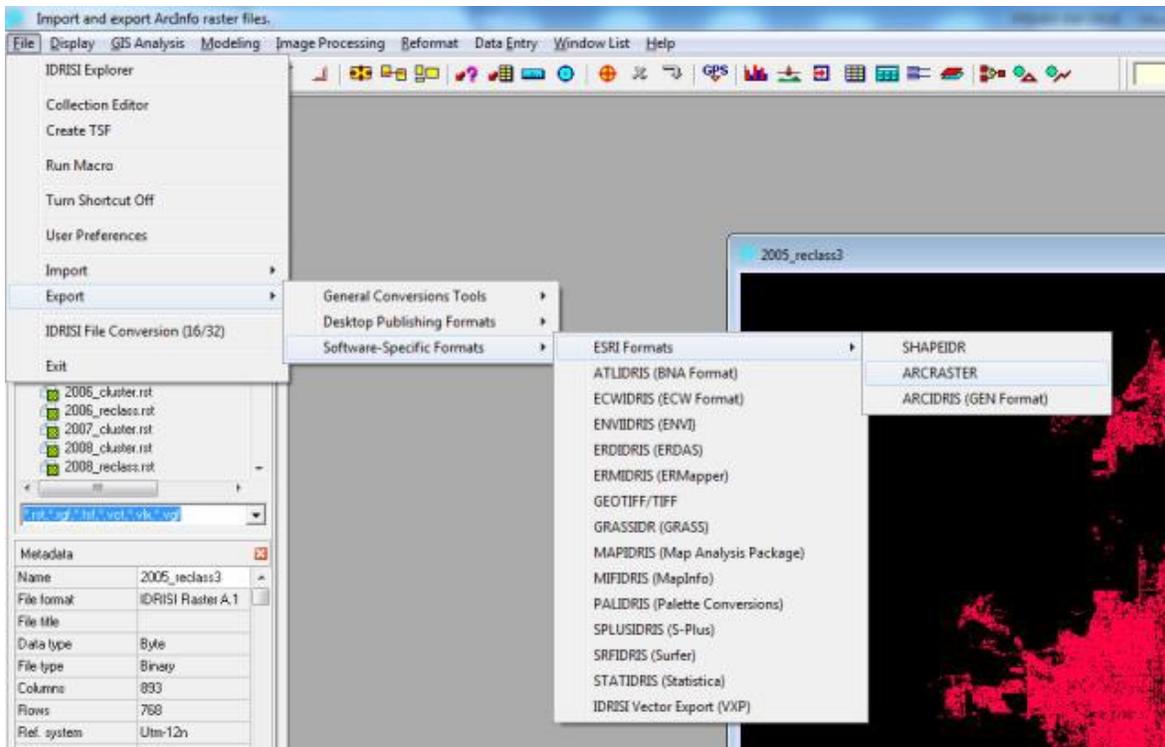


Ilustración 42. Exportación Imagen reclasificada en formato ESRI-ArcRaster.

- Una vez en la herramienta, seleccionar la opción “Idrisi to Arc Info raster ASCII format”, en “Input File” y se agrega el raster de reclasificación generado a partir de la clasificación no supervisada y se le da un nombre al archivo de salida en “Output file”. Esto generará un archivo de texto en la ubicación seleccionada (Ilustración 44).

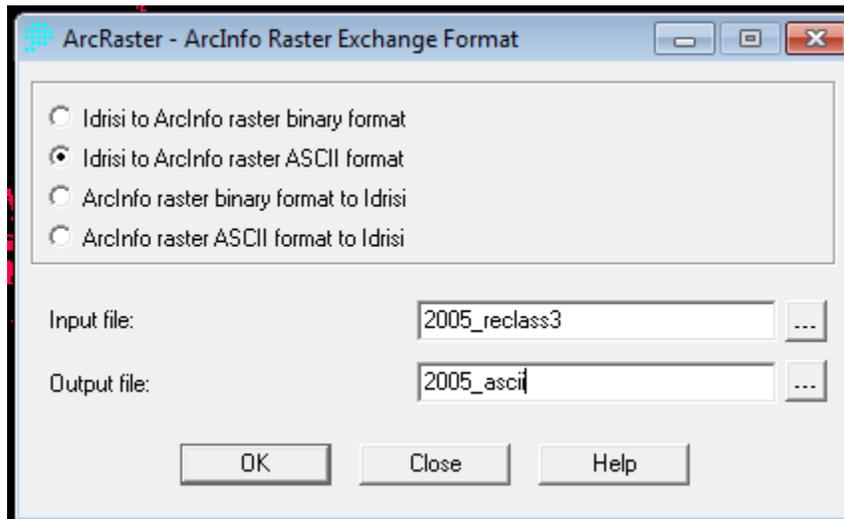


Ilustración 43. Exportación de una imagen reclasificada en formato raster de IDRISI a ArcGIS (ASCII).

- Una vez generado el archivo de texto se ejecuta ArcGIS 10.2.1 y se inicia un nuevo proyecto.
- En el menú ArcToolbox, se debe seguir la siguiente ruta: **Conversion Tools < To Raster < ASCII to Raster**, y cargar el archivo de texto generado en el punto 2 (Ilustración 45).

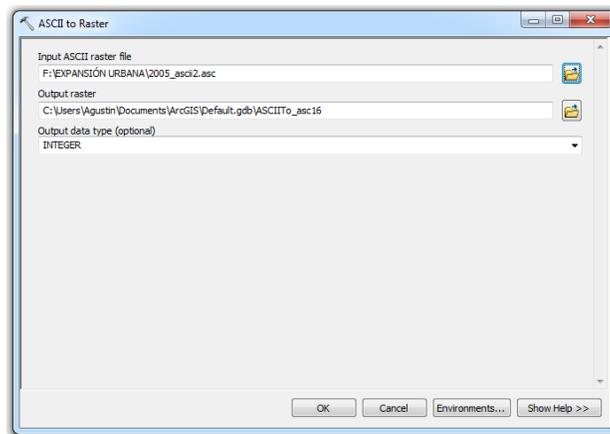


Ilustración 44. Herramienta para importar archivos ASCII a ArcMap.

Del punto 4 se obtiene un mapa de píxeles como el de la *Ilustración 46*.

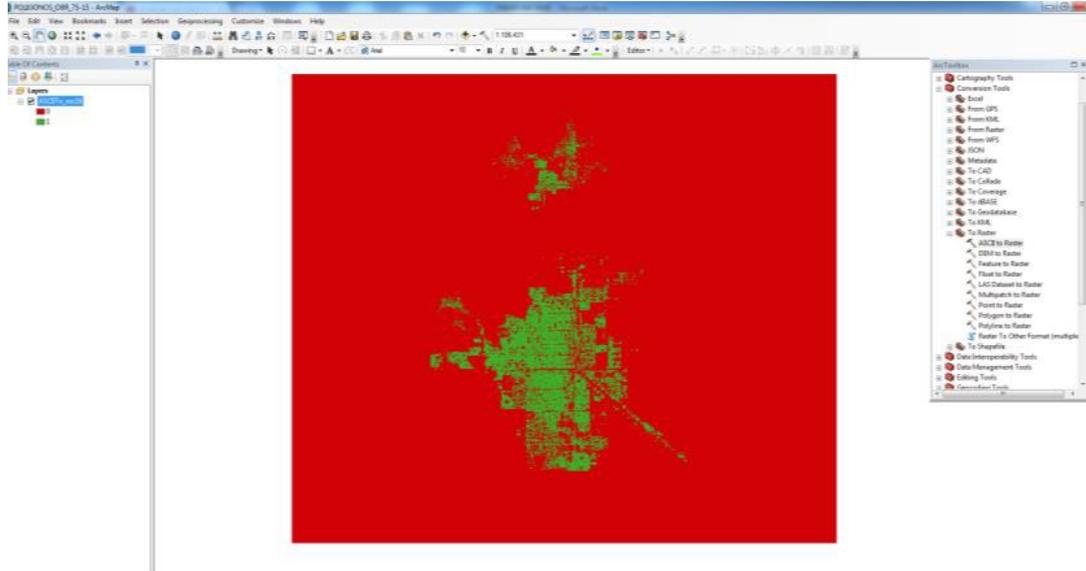


Ilustración 45. Imagen raster de píxeles de la mancha urbana de Cd. Obregón.

5. El siguiente paso consiste en extraer los píxeles que representan la mancha urbana, en el caso particular de la *Ilustración 46*, los de color verde. Para ello, se sigue la ruta **Conversion Tools < Raster to Polygon** y se selecciona el raster que se desea convertir a polígono. Se obtendrá una figura como la de la *Ilustración 47*:

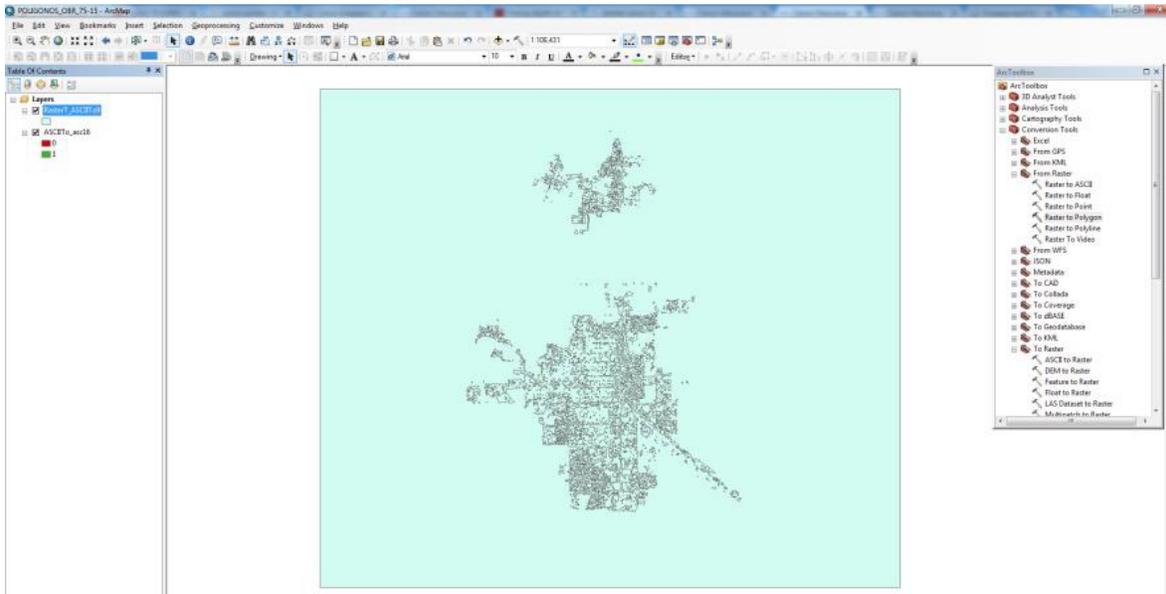


Ilustración 46. Imagen raster importada de IDRISI a ArcGIS.

- Lo siguiente consiste en extraer solamente el polígono de la mancha urbana. Para esto seleccionamos en la barra de tareas “select features” y arrastrando el mouse seleccionamos lo que abarca la mancha urbana, esto logra que se seleccionen todos los polígonos pequeños que conforman la mancha urbana y todo el fondo que es el cuadro del raster. Solo se requieren los polígonos pequeños por lo que hay que quitar la selección del fondo, para esto mantenemos presionada la tecla “shift” de nuestro teclado y damos clic en cualquier parte del fondo, con esto se logra quitar la selección del fondo (Ilustración 48).

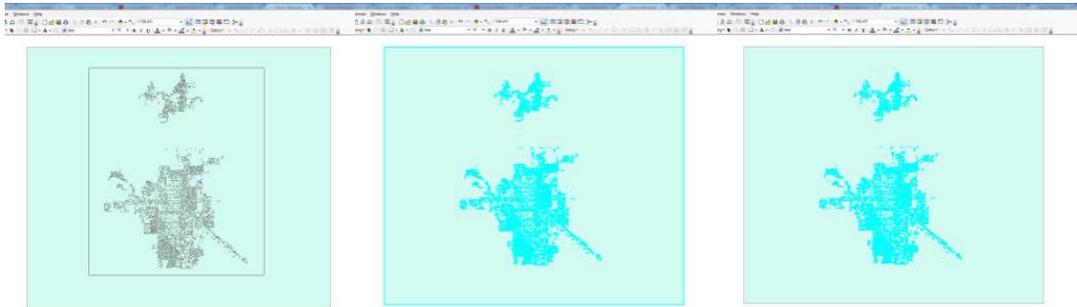


Ilustración 47. Selección y extracción de pixeles de la mancha urbana.

Una vez seleccionados los polígonos pequeños nos dirigimos a la tabla de contenidos y damos clic derecho sobre el archivo de nuestro polígono, luego nos dirigimos a **Data < Export data**.

- Seguido, confirmamos que en el apartado Export se encuentre seleccionada la opción “Selected features”, damos un nombre al archivo de salida y luego Ok (Ilustración 49).

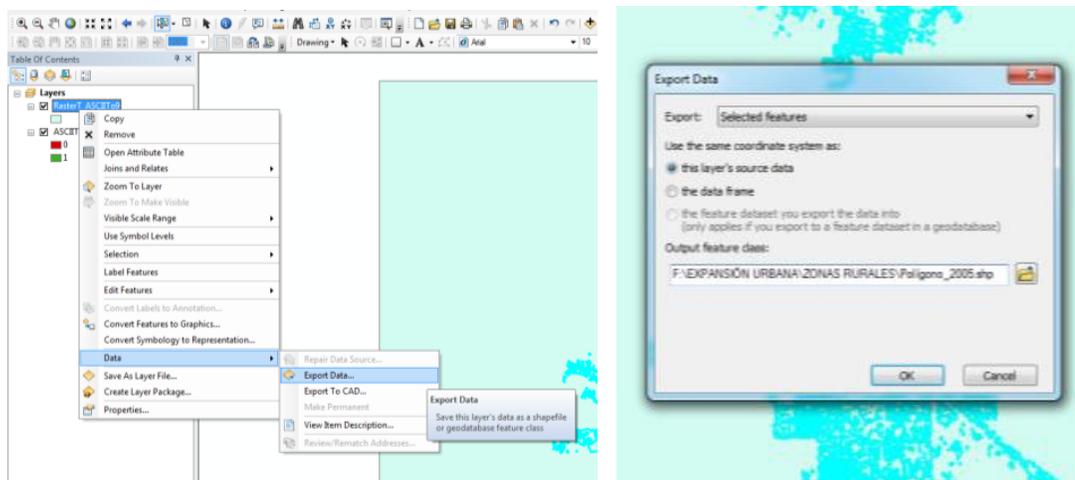


Ilustración 48. Exportación de pixeles a formato shapefile.

Del procedimiento mostrado en la *Ilustración 49*, resulta un polígono como el de la *Ilustración 50*.

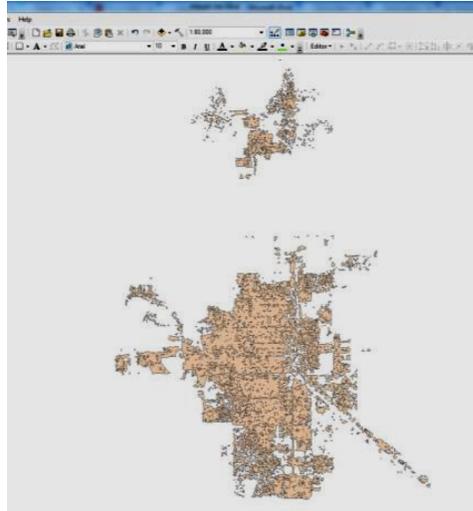


Ilustración 49. Polígono de píxeles de la mancha urbana de Cd. Obregón.

8. Después de haber extraído el polígono de la mancha urbana, agregamos la capa de cuadras o manzanas oficial de la ciudad. De modo que el polígono del paso anterior quedará sobrepuesto en la capa de cuadras (si la capa de cuadras aparece por encima del polígono de píxeles, hay que cambiar de posición las capas en la tabla de contenido, el polígono de píxeles debe estar arriba del de la capa de cuadras), como se muestra en la Ilustración 51.

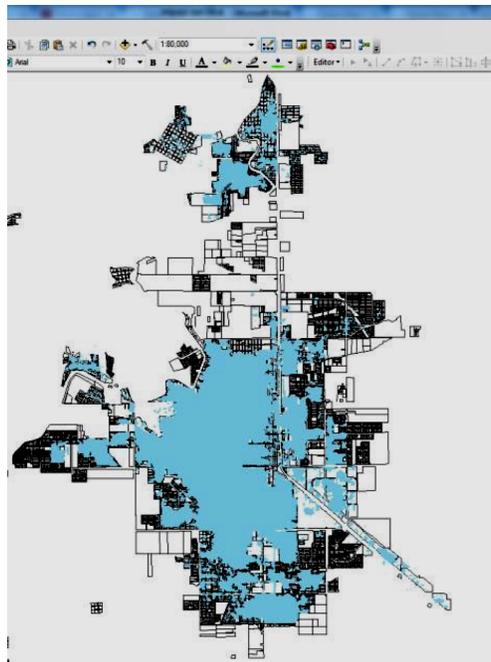


Ilustración 50. Sobreposición del mapa de píxeles y la capa de cuadras.

9. Lo siguiente será ir a **Editor < Start Editing** y seleccionar la capa de cuadras. Esto nos permitirá seleccionar las cuadras que no están dentro de los píxeles e ir borrándolas con la tecla “Suprimir”.

De esta manera, tendremos solo las cuadras que formaban parte de la mancha urbana y podremos generar un polígono a partir de las cuadras oficiales de la Dirección de Catastro.

Cabe mencionar que ambas metodologías para determinar los polígonos de Cd. Obregón para las diferentes fechas de estudio, dan como resultado polígonos de diferente superficie. A continuación se muestran las superficies obtenidas utilizando los polígonos generados sin utilizar la capa de cuadras y los generados a partir de la capa de cuadras.

Tabla 4. Comparación entre las superficies calculadas con los polígonos generados sin y con capa de cuadras.

Año	Superficie de mancha urbana (ha)	
	Sin capa de cuadras	Con capa de cuadras
1973	2562.48	2570.08
1973 - 1986	4352.76	4488.91
1986 - 1995	4923.12	5605.66
1995 - 2005	6709.19	6417.17
2005 - 2015	8483.71	7265.09

Fuente: elaboración propia.

Ambos métodos muestran resultados semejantes y sirven para generar los polígonos que son la piedra angular del presente estudio.

Caracterización del tipo de tenencia

A partir de un archivo raster con dos atributos: área de tenencia ejidal y área de tenencia en pequeña propiedad, es posible realizar el análisis de la cantidad de área que es mancha urbana por tipo de propiedad (Ilustración 52).

Para determinarlo, es necesario realizar el siguiente procedimiento: **ArcToolbox < Conversion tools < From Raster < Raster to Polygon.**

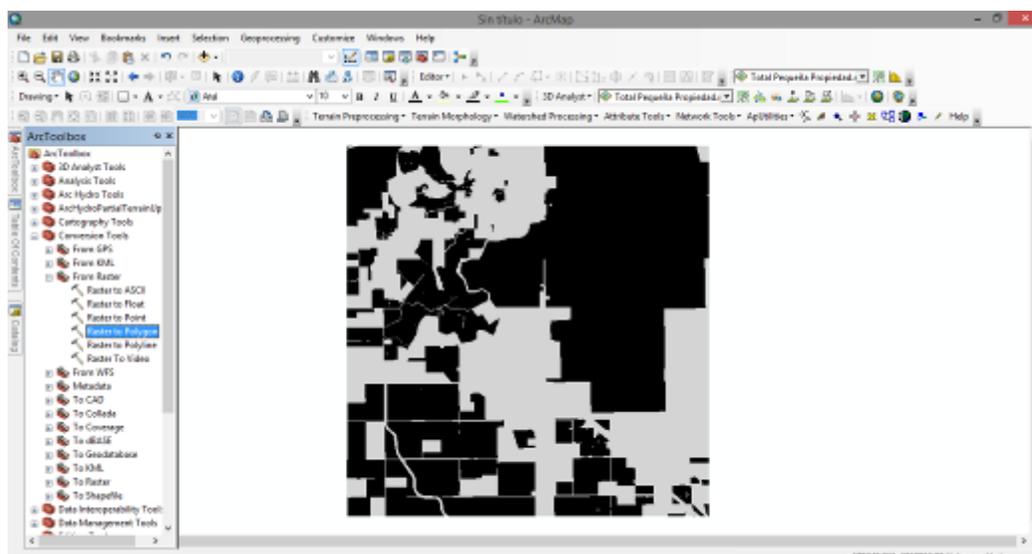


Ilustración 51. Raster de zonas ejidales y pequeña propiedad en ArcGIS.

Como resultado, se obtiene la imagen que se muestra en la Ilustración 53:

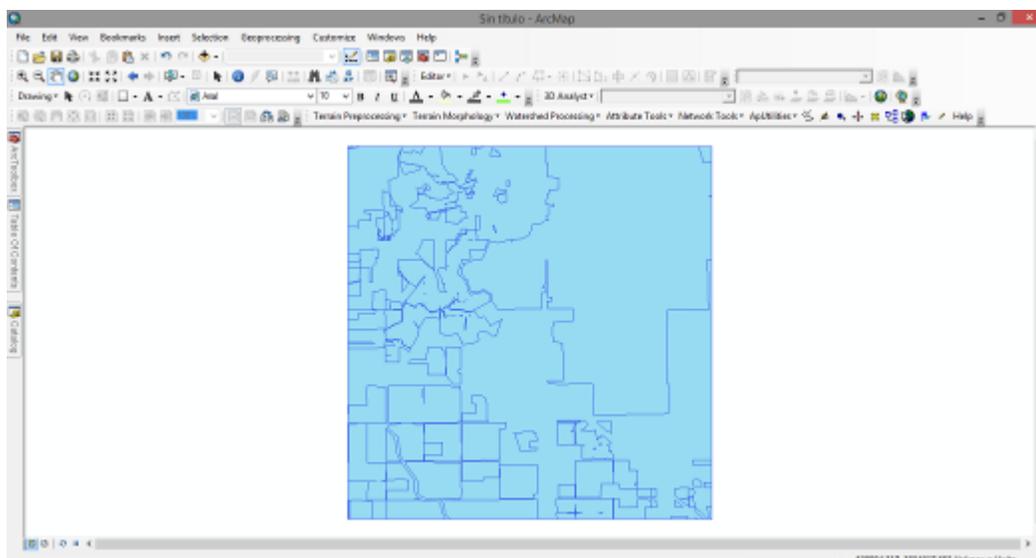


Ilustración 52. Conversión raster a polígonos de zonas ejidales y pequeña propiedad.

Ahora bien, para conocer el tipo de tenencia sobre la ciudad (es necesario en la tabla de atributos agregar una columna más con el siguiente procedimiento: **Capa de la ciudad < Open attribute table < Add field < Name: Atributo < Text < Ok < Field calculator < Ciudad**, es necesario entonces agregar la capa de los ejidos y la capa de los límites de la ciudad, que previamente se ha calculado. En función de esto, el resultado es similar a la Ilustración 54:

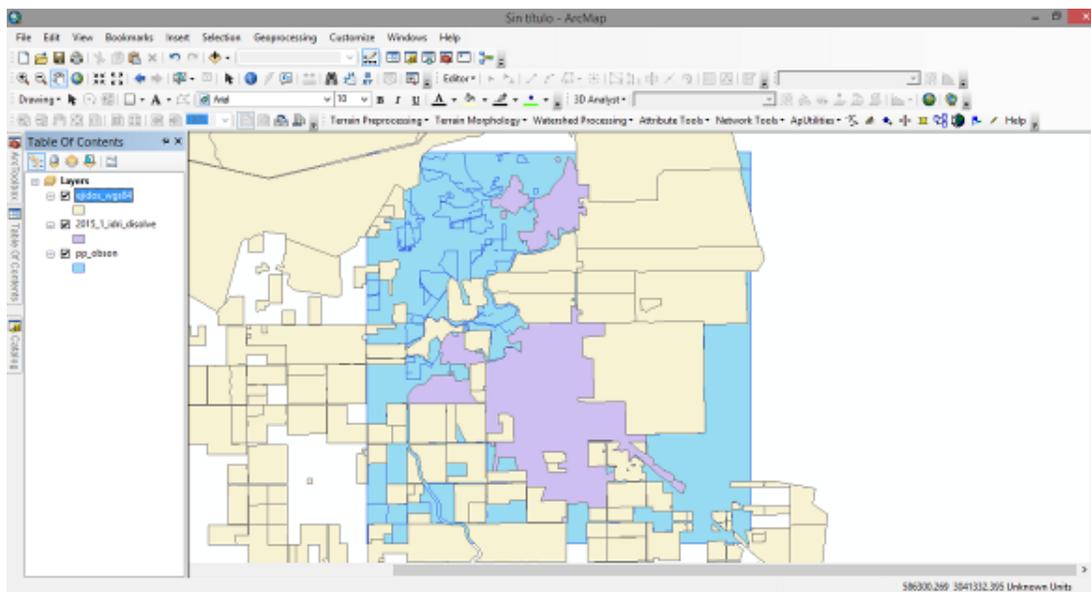


Ilustración 53. Sobreposición de capas de mancha urbana, pequeña propiedad y zonas ejidales.

Como siguiente paso, es necesario integrar en una sola clase el tipo de tenencia de tierra. Para ello, se realiza el siguiente procedimiento: **Geoprocessing < Dissolve < Gridcode**, como se muestra en la Ilustración 55.

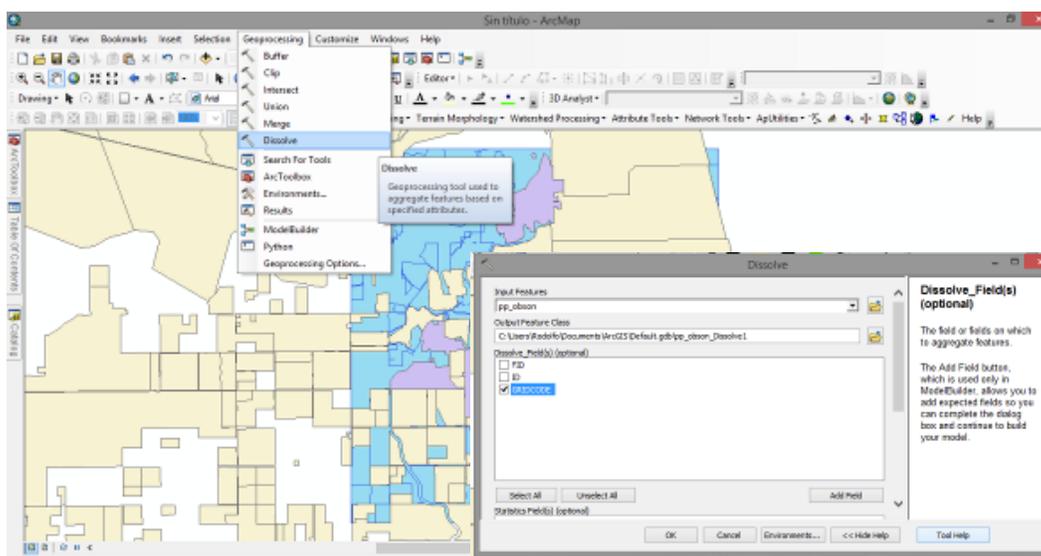


Ilustración 54. Procedimiento para integración de las capas.

En la ventana emergente, seleccionar GRIDCODE y presiona “Ok”.

Enseguida, se abre una sesión de edición para eliminar el área ejidal y que la capa solo tenga el atributo de pequeña propiedad. Se sigue la ruta: **Editor < Start editing < Identificar qué valor corresponde a tenencia ejidal (0 o 1, cero o uno) < Suprimir.**

Para identificar el tipo de tenencia sobre la cual se desarrolla la mancha urbana, se realiza el siguiente procedimiento: **Geoprocessing < Union** (Ilustración 56)

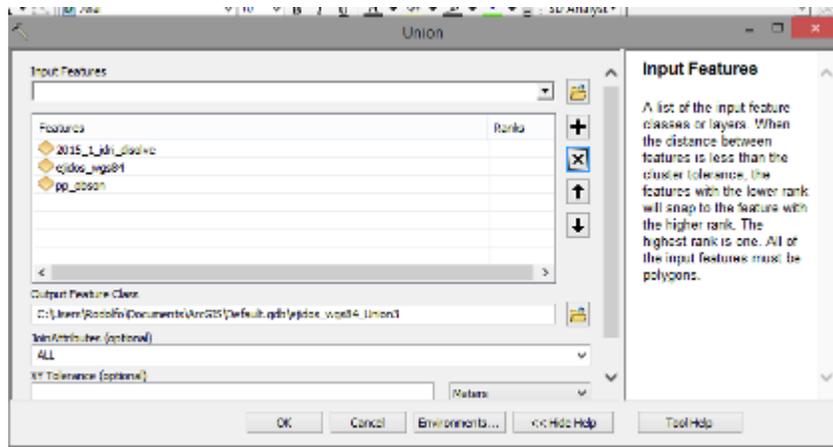


Ilustración 55. Función “unión” para identificar tipo de tenencia.

Después de realizar esta acción, el resultado será parecido a la Ilustración 57:

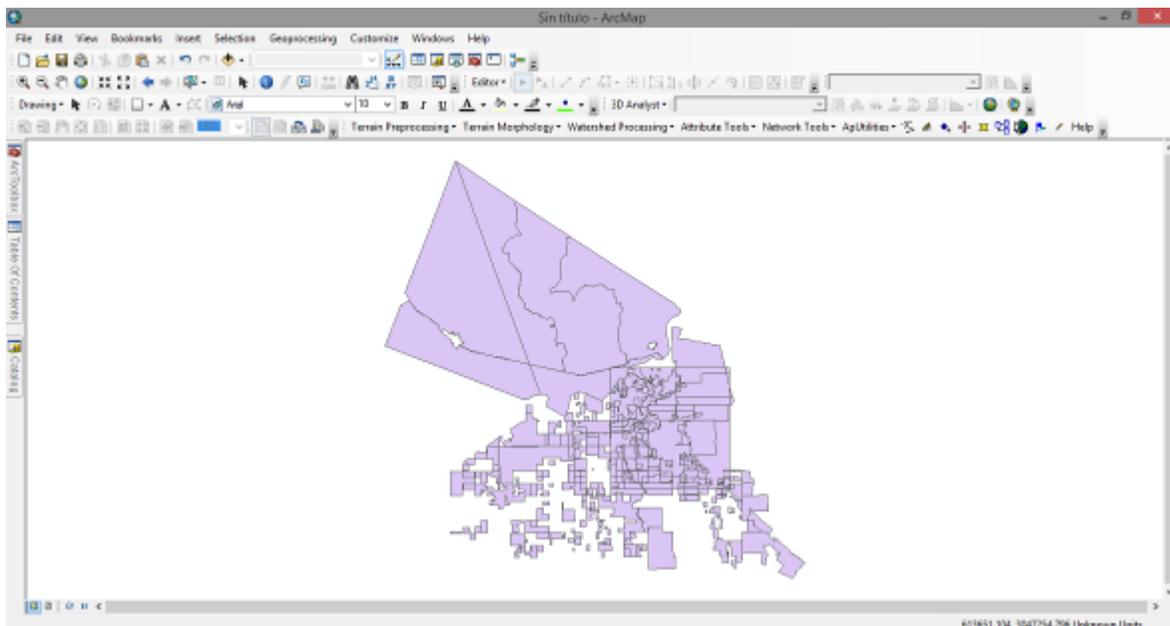


Ilustración 56. Unión de capas de mancha urbana y zonas ejidales.

Después, es necesario realizar el siguiente procedimiento para identificar el tipo de tenencia (Ilustración 58): **Open attribute table < Select < Select by attributes <Attribute< = <Get Unique Values < Ciudad < Apply.**

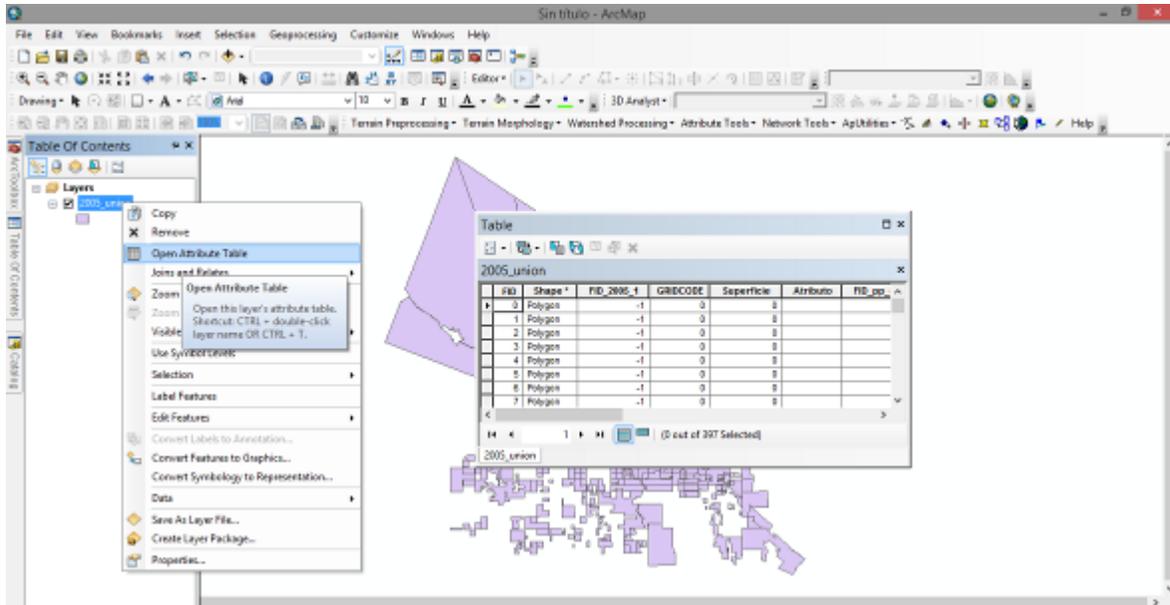


Ilustración 57. Identificar tipo de tenencia “pequeña propiedad” usando la tabla de atributos.

Una vez aplicado el procedimiento, se sigue la siguiente ruta para tener las zonas ejidales sobrepuestas en la mancha urbana (Ilustración 59): **ArcToolbox < Analysis tools < Extract < Select.**

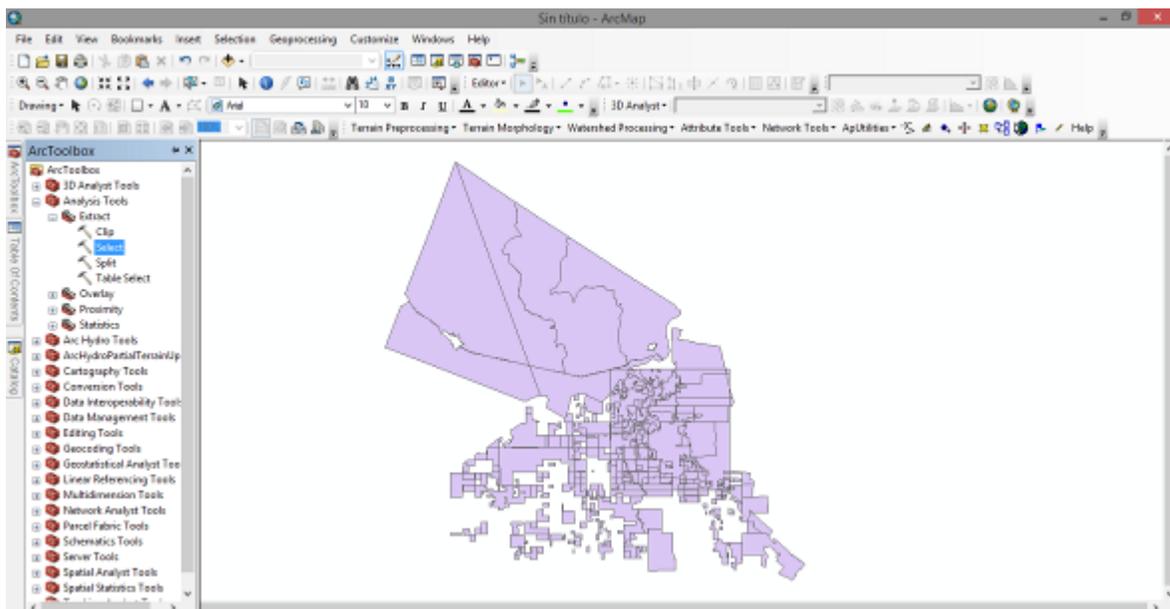


Ilustración 58. Sobreposición de zonas ejidales con la mancha urbana.

El resultado deberá ser semejante a la Ilustración 60.

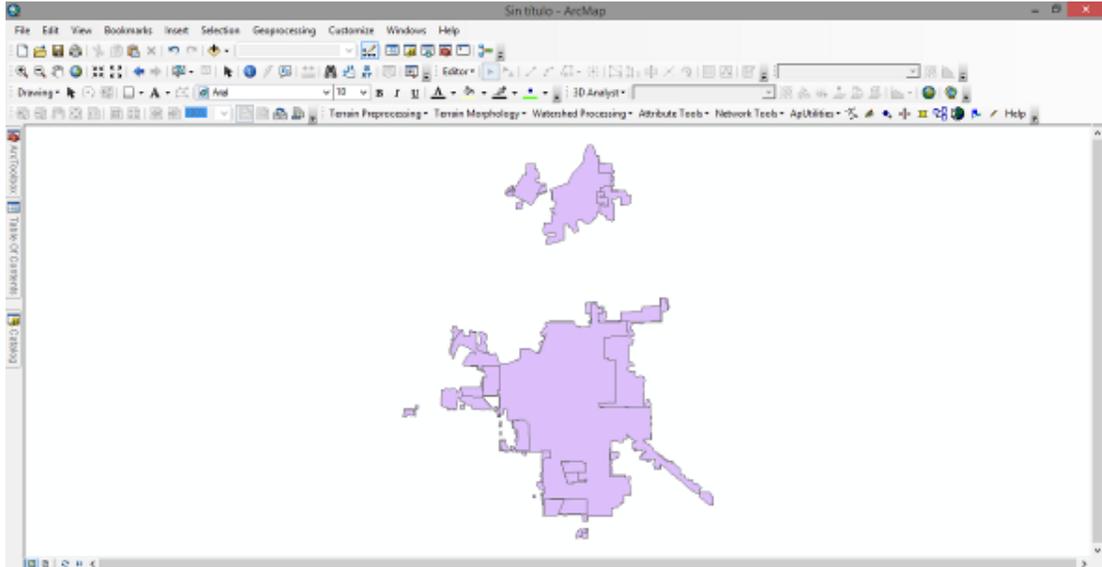


Ilustración 59. Imagen de extracción de zonas ejidales.

Luego, se realiza el procedimiento **Geoprocessing < Dissolve < Tenencia** para identificar el tipo de tenencia sobre la cual se ha desarrollado la mancha urbana. Recordar que el incremento de la mancha urbana se estudia a partir del año 1973, por lo tanto, dentro de esta imagen del 2015, existe área que ya era ciudad en 1973. Por lo tanto, es necesario realizar una extracción de la superficie inicial. Para ello, se realiza el siguiente procedimiento: **ArcToolBox < Analysis tools < Overlay < Symmetrical Difference**. Considerar que es necesario tener la capa inicial. El resultado se muestra en la Ilustración 61.

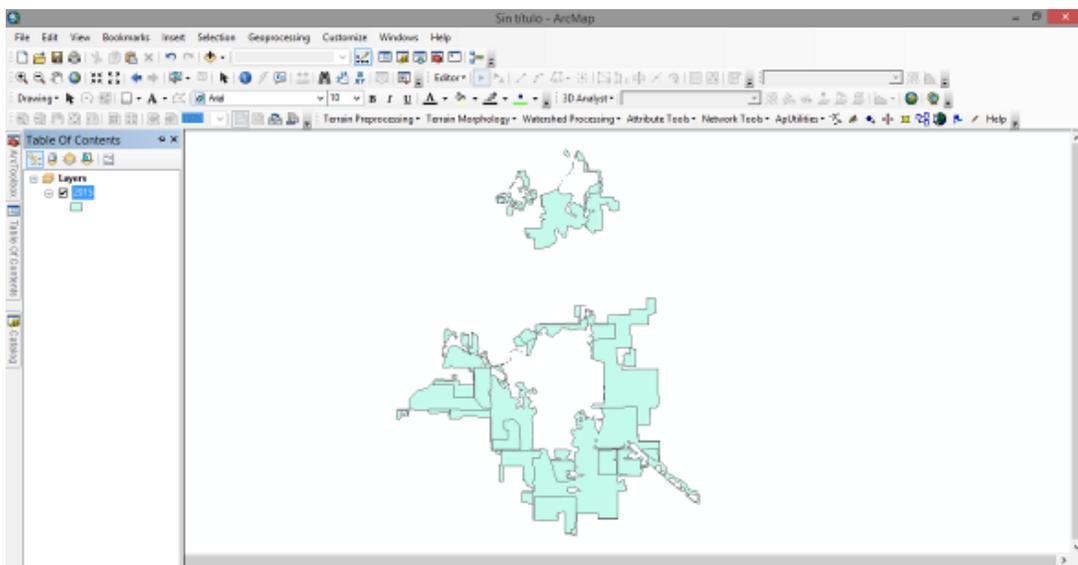


Ilustración 60. Sobreposición de capas de tenencia.

Luego, para discriminar los tipos de cobertura, seguir la ruta (Ilustración 62): **Nombre de la Capa < Properties < Simbology < Categories < Tenencia < Add all values < Aplicar < Aceptar**.

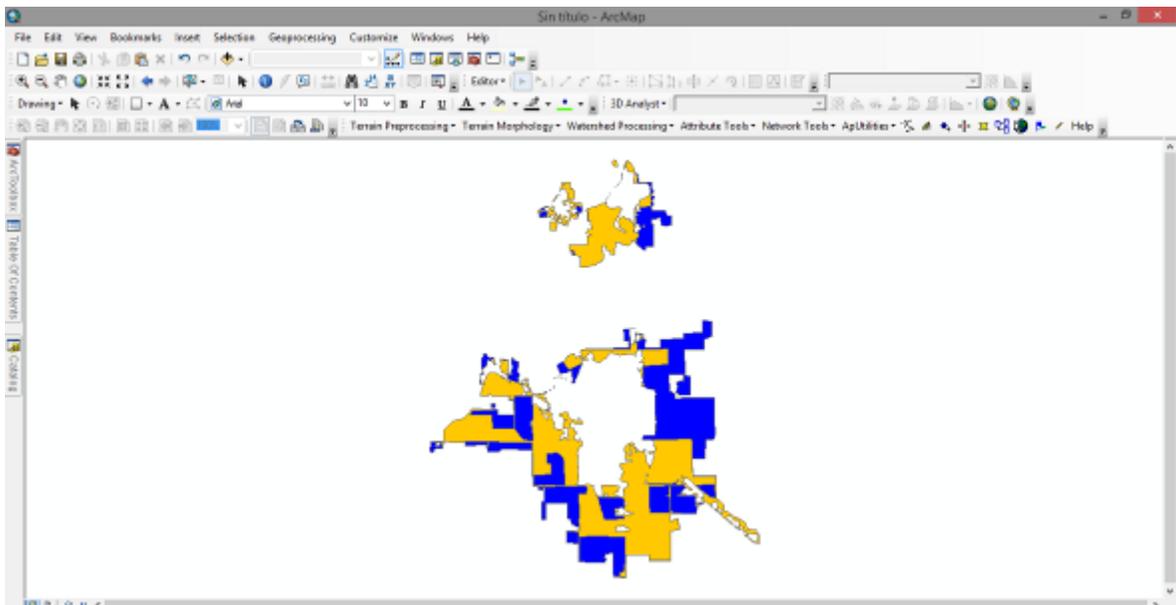


Ilustración 61. Polígonos de tenencia de tierra.

Finalmente, abrir la tabla de atributos y agregar un campo con el encabezado de Superficie y calcular el área por tipo de tenencia, como se muestra en la Ilustración 63.

 A screenshot of the 'Table' window in ArcMap. The window title is 'Table' and it shows a table with the following data:

FID	Shape	Union	Área
0	Polygon	Ejido	2604.193315
1	Polygon	PP	3317.862183

 The table is displayed in a window with a standard toolbar and a status bar at the bottom indicating '(0 out of 2 Selected)'.

Ilustración 62. Área de zonas ejidales y pequeña propiedad.

Bibliografía

Anas, A., Arnott, R., Small, K. A. (1998). Urban spatial structure. *J Econ Lit* 36:1426–1464

Davis, K. (1972). *World urbanization 1950–1970 vol. (2): Analysis of trends, relationship, and development*. Institute of International Studies, University of California, Berkeley, CA

Eastman, R. J. (2012). *IDRISI Selva: Guía para SIG y procesamiento de imágenes*. Clark University Press. 321 páginas.

ESRI (2014). *ArcGIS Desktop: Release 10.2* Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute.

Parés-Ramos IK, Gould WA, Mitchell Aide T (2008). Agricultural abandonment, suburban growth, and forest expansion in Puerto Rico between 1991 and 2000. *Ecol Soc* 13(2):1 (online), <http://www.ecologyandsociety.org/vol13/iss2/art1/>

United Nations Population Division (2008). *World urbanization prospects: the 2007 revision*. United Nations, New York.

INEGI (2015). *Áreas geo estadísticas a nivel básico (AGEB)*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geoestadistica/>

ANEXO I. INSTRUMENTO DE VALIDACIÓN

Protocolo de confidencialidad

¡Hola! mi nombre es _____, trabajo para el ITSON en el Departamento de Ciencias del Agua. Estamos trabajando junto con el municipio de Cajeme a través del Departamento de Catastro y de Planeación Urbana para realizar un estudio de la expansión urbana de Cd. Obregón. En este estudio estamos realizando proyecciones del crecimiento de la ciudad usando imágenes satelitales. Para verificar que dichas imágenes sean correctas estamos realizando una encuesta a los propietarios de terrenos que se encuentran en las periferias de la ciudad.

Para nosotros es muy importante su opinión, los resultados de este trabajo son totalmente anónimos y serán parte de un reporte para CONACYT y el Municipio de Cajeme sin mencionar nombres de personas. Dicho reporte estará disponible al público en la página de internet del H. Ayuntamiento a finales de este año.

La encuesta es muy breve, estaría dispuesto a darme 15 minutos de su tiempo (SÍ o NO)

(Si contesta que SÍ) Para facilitar la captura de información de la encuesta, quisiera también pedirle permiso para grabar nuestra conversación. Esto es para asegurarme de que no se me olvide ningún detalle de sus respuestas.

Al finalizar la entrevista

Muchas gracias por su tiempo, le recuerdo que los resultados de este trabajo son totalmente anónimos y en ningún momento se publicarán sus datos personales, su nombre y teléfono es información completamente confidencial, el único interés de parte de nosotros es conocer la opinión del ciudadano con respecto a la planeación. Por mi parte es todo, le agradezco su disposición y que pase un muy buen día (buenas noches).

ENCUESTA SOBRE EXPANSIÓN URBANA

FOLIO

Nombre del encuestador: _____ Fecha: _____

Hora de inicio: _____ Hora de término: _____

Edad del propietario: ____ años

Género: Masculino FemeninoEducación: Primaria Secundaria Preparatoria Universidad Otros

¿A qué se dedica? (trabajo actual):

1. ¿Cuál es el uso actual que le da al terreno?
 - a) Uso agrícola
 - b) Vivienda
 - c) Bien inmueble
 - d) Construcción, especificar (vivienda, plaza comercial, almacenes, etc.)

e) Otro uso

2. ¿Cuántos años ha sido dueño de esta propiedad?
3. ¿Hacia dónde considera usted que la ciudad ha crecido más (rumbos)?
4. Como ciudadano del municipio de Cajeme, en su opinión, ¿considera que el crecimiento de la ciudad ha sido planeado de forma adecuada? ¿Por qué?
5. ¿Qué tan importante considera lo siguiente para planear el rumbo hacia donde deberá crecer la ciudad?

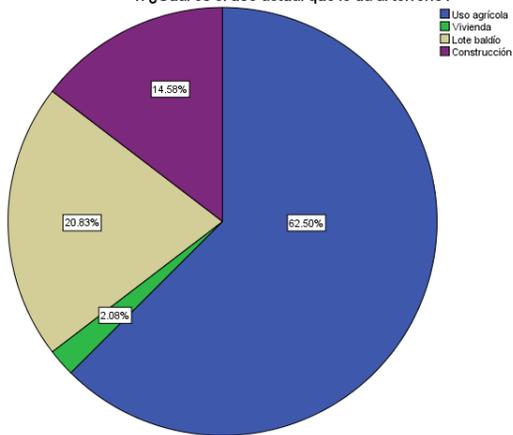
	No es importante = 1	Poco importante = 2	Más o menos importante = 3	Importante = 4	Extremadamente importante = 5
a. acceso a vías de transporte (carreteras, boulevard, avenidas)					
b. acceso a agua potable y alcantarillado					
c. acceso a electricidad					
d. cercanía a lugares de recreación familiar					
e. cercanía a instituciones de todos los niveles de educación					
f. cercanía a oficinas de servicios de auxilio (cruz roja, bomberos)					

6. En las últimas 4 décadas, se han urbanizado casi 1700 hectáreas que originalmente eran destinadas a uso agrícola. ¿Está de acuerdo que la ciudad siga creciendo y se usen tierras de agricultura para la urbanización?
7. En su opinión, ¿A qué se debe que los agricultores estén vendiendo sus tierras?
8. ¿Bajo qué condiciones estaría dispuesto a vender su propiedad?
9. En los próximos 50 años hay estudios que predicen que Ciudad Obregón crecerá hacia la zona Norte (entre Villa California y Villa Bonita o hacia Hornos). Si su predio se viera rodeado de fraccionamientos y centros comerciales (urbanización), ¿se sentiría presionado a vender sus tierras? ¿Por qué?
10. En el futuro lejano, cuando usted haya heredado sus tierras. ¿Qué le gustaría que se hiciera con ellas?
11. ¿Es usted dueño de algún otro terreno cercano a las orillas de la zona urbana (periferia de Cd. Obregón)? **Sí** ¿Qué tiene pensado hacer con esos terrenos? **No** (pasa a la siguiente pregunta).
12. ¿Considera que la agricultura deba crecer en el futuro en el municipio de Cajeme?
13. ¿Considera que la agricultura deba crecer en el futuro en Sonora?

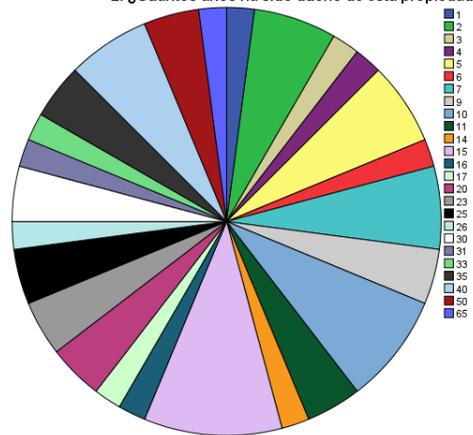
¡MUCHAS GRACIAS POR SU TIEMPO!

ANEXO II. RESULTADOS DE LAS ENCUESTAS

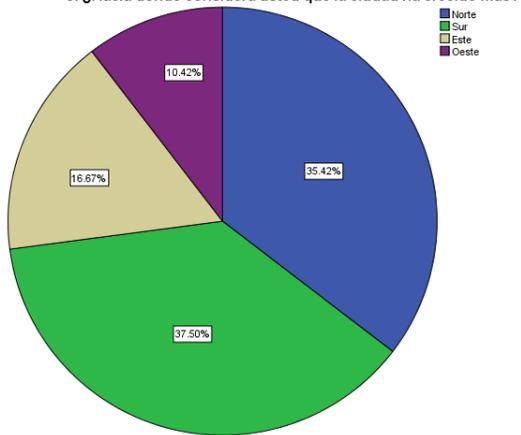
1. ¿Cuál es el uso actual que le da al terreno?



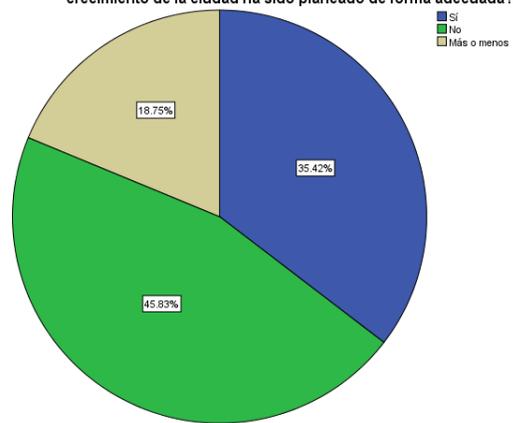
2. ¿Cuántos años ha sido dueño de esta propiedad?



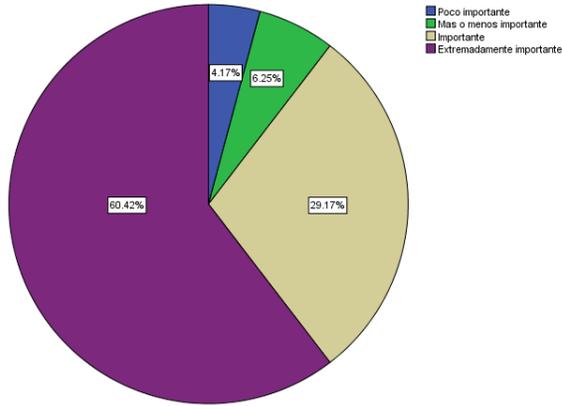
3. ¿Hacia dónde considera usted que la ciudad ha crecido más?



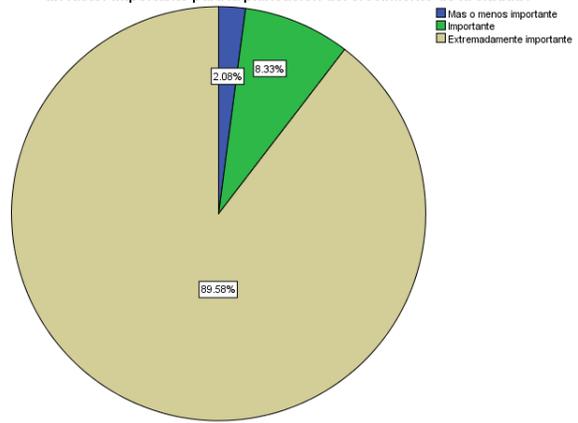
4. Como ciudadano del municipio de Cajeme, en su opinión, ¿considera que el crecimiento de la ciudad ha sido planeado de forma adecuada?



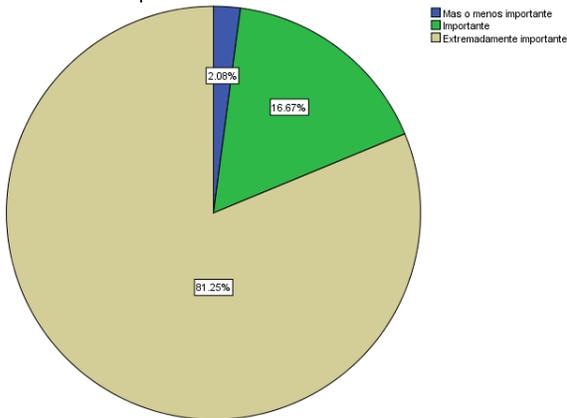
5. ¿Considera que el acceso a vías de transporte (carreteras, bulevares, avenidas) sea un factor importante para la planeación del crecimiento de la ciudad?



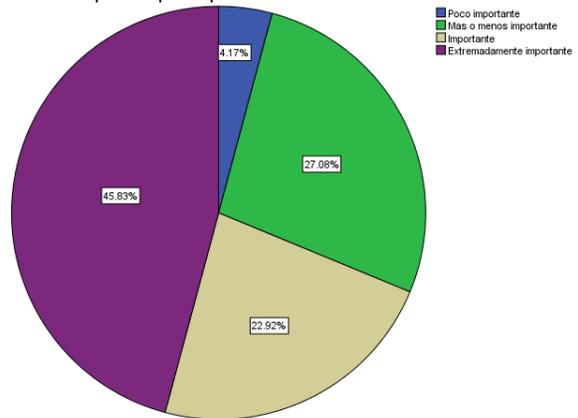
5. ¿Considera que el acceso a los servicios de agua potable y alcantarillado sea un factor importante para la planeación del crecimiento de la ciudad?



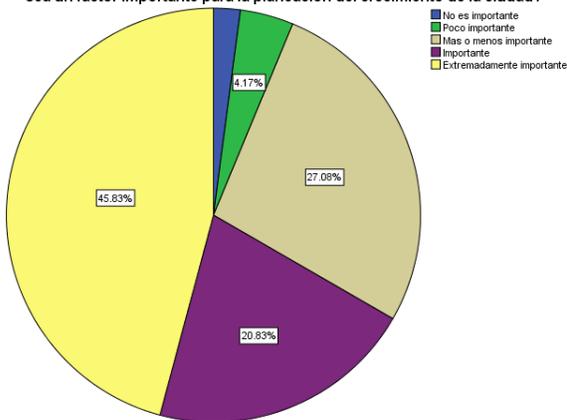
5. ¿Considera que el acceso a electricidad sea un factor importante para la planeación del crecimiento de la ciudad?



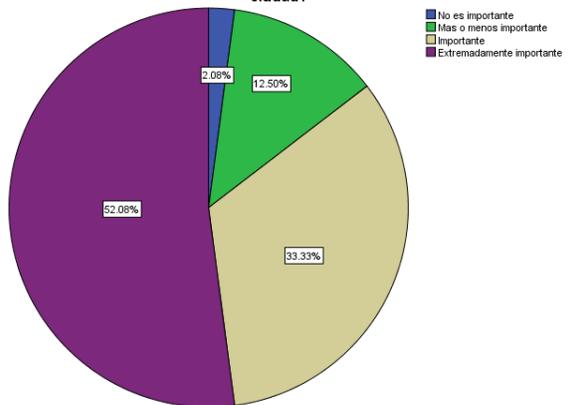
5. ¿Considera que la cercanía a lugares de recreación familiar sea un factor importante para la planeación del crecimiento de la ciudad?



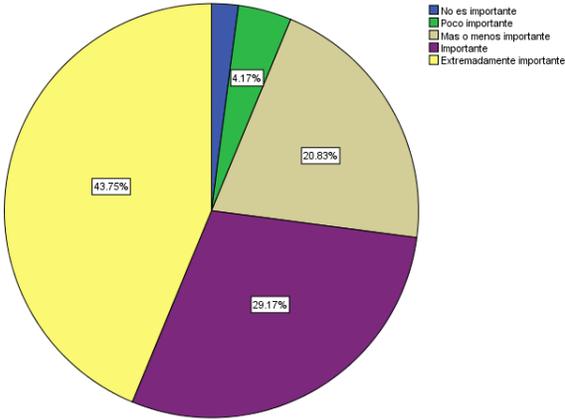
5. ¿Considera que la cercanía a instituciones de todos los niveles de educación sea un factor importante para la planeación del crecimiento de la ciudad?



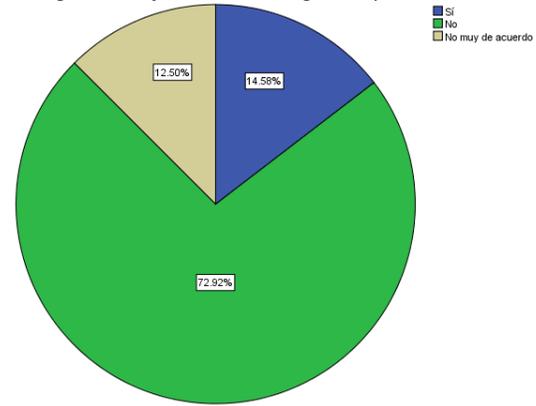
5. ¿Considera que la cercanía a oficinas de servicios de auxilio (cruz roja, bomberos) sea un factor importante para la planeación del crecimiento de la ciudad?



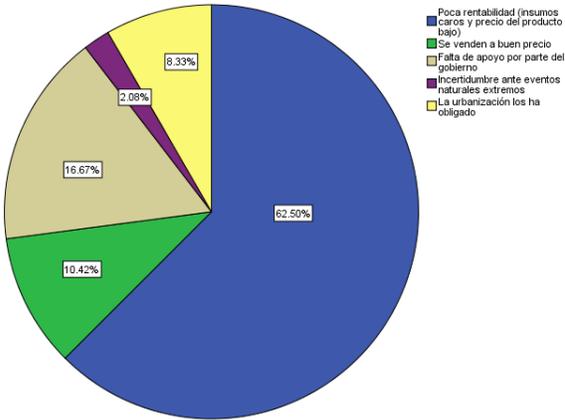
5. ¿Considera que la cercanía a oficinas de seguridad pública (policía) sea un factor importante para la planeación del crecimiento de la ciudad?



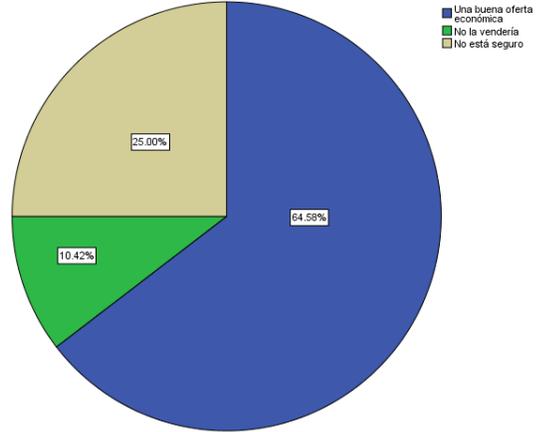
6. En las últimas 4 décadas, se han urbanizado casi 1700 hectáreas que originalmente eran destinadas a uso agrícola. ¿Está de acuerdo que la ciudad siga creciendo y se usen tierras de agricultura para la urbanización?



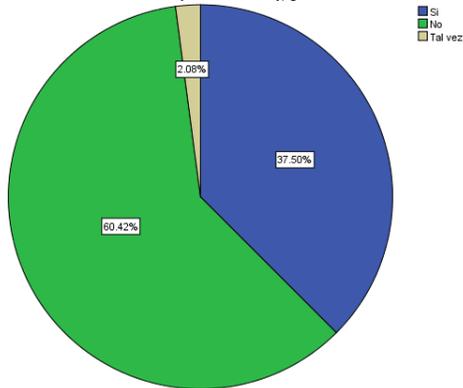
7. En su opinión, ¿A qué se debe que los agricultores estén vendiendo sus tierras?



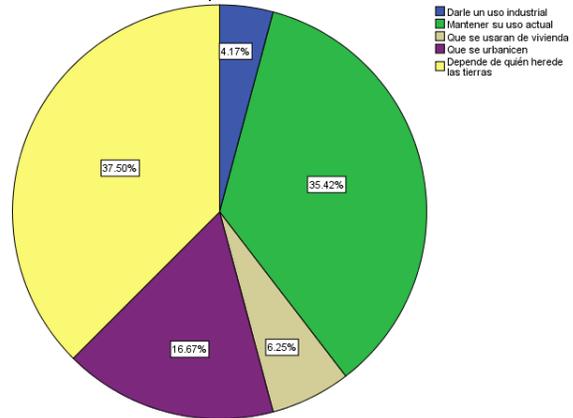
8. ¿Bajo qué condiciones estaría dispuesto a vender su propiedad?



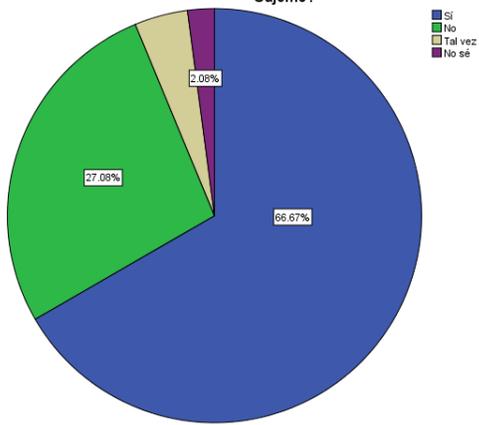
9. En los próximos 50 años hay estudios que predicen que Ciudad Obregón crecerá hacia la zona Norte (entre Villa California y Villa Bonita o hacia Hornos). Si su predio se viera rodeado de fraccionamientos y centros comerciales (urbanización), ¿se sentirá



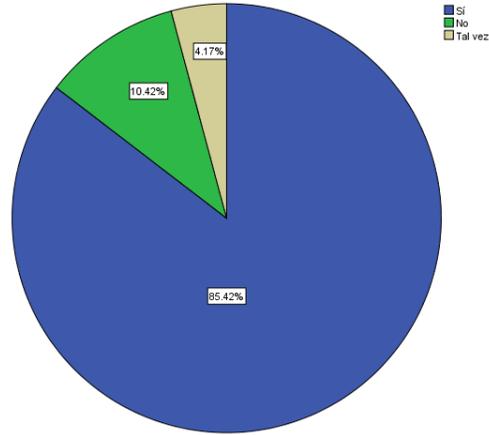
10. En el futuro lejano, cuando usted haya heredado sus tierras. ¿Qué le gustaría que se hiciera con ellas?



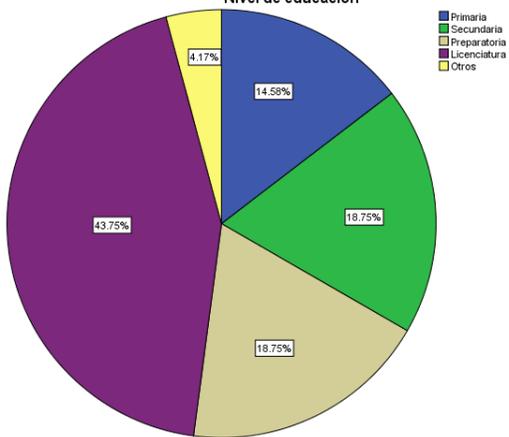
12. ¿Considera que la agricultura deba crecer en el futuro en el municipio de Cajeme?



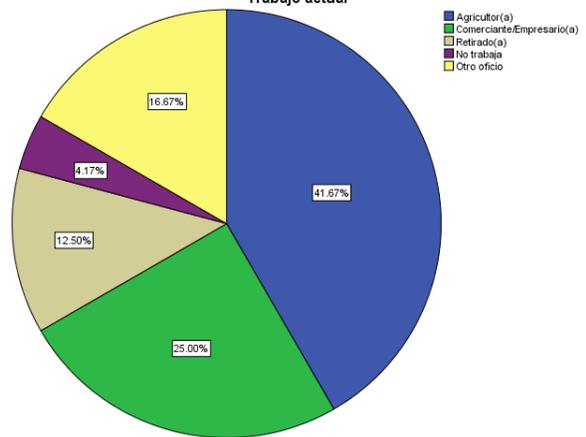
13. ¿Considera que la agricultura deba crecer en el futuro en Sonora?



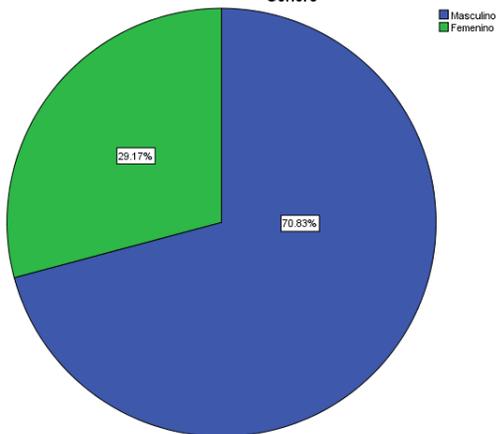
Nivel de educación



Trabajo actual



Género





La obra “*Determinación del crecimiento urbano a través de imágenes satelitales: caso de estudio Cd. Obregón y su relación con la pérdida de tierras agrícolas en el Valle del Yaqui*”, se terminó de editar el 30 de octubre en el Instituto Tecnológico de Sonora, en Cd. Obregón, Sonora, México.

Fue puesto en línea para su disposición en el sitio www.itson.mx

El trabajo presentado aquí surgió como material que se generó para la Asociación Mexicana de Institutos Municipales de Planeación Urbana. El caso de estudio que se presenta aquí es para una ciudad en el noroeste de México (Cd. Obregón, Sonora). Sin embargo, nuestra intención es que los lectores puedan seguir las instrucciones aquí presentadas para realizar este tipo de análisis en cualquier ciudad del Mundo. Además, los materiales mostrados aquí tienen la intención de que sean utilizados en diferentes cursos Universitarios. En particular en los cursos de Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica (SIG) que forman parte del programa de posgrado de recursos naturales del Instituto Tecnológico de Sonora. Es importante que el lector de este libro este familiarizado con conceptos básicos de SIG, así como tener experiencia manejando los softwares IDRISI Selva y ArcMap los cuales se utilizaron para cuantificar el crecimiento de áreas urbanas.

En el presente documento se presentan los pasos detallados para la clasificación, predicción y validación del avance de una mancha urbana a través del tiempo. Se intentó, a la medida posible, que el texto fuera como una guía para que los análisis aquí presentados se puedan aplicar en cualquier parte del mundo.

