



**COORDINACIÓN DE DESARROLLO
PROFESIONAL E INSTITUCIONAL**

SUBCOORDINACIÓN DE POSGRADO

T E S I S

**INFLUENCIA DE LA HIDROLOGÍA SUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEA EN
LA COBERTURA Y COMPOSICIÓN DE LOS HUMEDALES:
CASO DE ESTUDIO CUATRO CIENEGAS**

que para obtener el grado de
Doctor en
Ciencias y Tecnología del Agua

presenta
Oscar Adrián Leal Nares

Tutor: Dra. María del Pilar Saldaña Fabela

Jiutepec, Morelos

Mayo 2016

Con fundamento en los artículos 21 y 27 de la Ley Federal del Derecho de Autor y como titular de los derechos moral y patrimoniales de la obra titulada "Influencia de la hidrología superficial y subterránea en la cobertura y composición de los humedales: Caso de estudio Cuatro Ciénegas ", otorgo de manera gratuita y permanente al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, autorización para que fijen la obra en cualquier medio, incluido el electrónico, y la divulguen entre su personal, estudiantes o terceras personas, sin que pueda percibir por tal divulgación una contraprestación, siempre y cuando se otorguen los créditos correspondientes al autor de la obra.

Jiutepec, Morelos a 11 de mayo de 2016

OSCAR A. LEAL NARES

Firma

AGRADECIMIENTOS

Al Posgrado del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua y la Comisión Nacional del Agua, quienes a través del Fondo Sectorial de Investigación y Desarrollo Sobre el Agua (FSIDSA), me otorgaron las facilidades necesarias para cursar el Programa de Doctorado en Ciencias y Tecnología del Agua.

A la Fundación Telmex, que a través de su Programa Educativo me otorgó una beca para el apoyo de mis estudios (132049359).

A mi tutora, la Dra. María del Pilar Saldaña Fabela por sus consejos y palabras de aliento en los momentos más difíciles. A mis sinodales la Dra. Antonieta Gómez Balandra, el Dr. Manuel Martínez Morales, el Dr. Enrique Cesar Valdez y el Dr. Mauricio de la Maza Benignos, quienes aportaron su conocimiento para la culminación de este trabajo de investigación.

A mis colegas y amigos Antonio Moreno y Mario García por sus consejos y apoyo para la realización de esta tesis.

A la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas y Pronatura Noreste A.C. por brindarme las facilidades necesarias para la realización del trabajo de campo en Cuatro Ciénegas.

A todas aquellas personas, que estuvieron involucradas directa o indirectamente en la realización de este trabajo. Mi más profundo agradecimiento.

RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar la relación de la hidrología superficial y subterránea con la distribución y composición de los humedales e identificar los procesos que generan cambios en la hidrología y ecosistemas de Cuatro Ciénegas.

Las condiciones actuales de los humedales responden a la historia de su régimen hidrológico, la adaptación de sus comunidades biológicas y también a las modificaciones humanas realizadas al medio ambiente. Para identificar los cambios ocurridos en los últimos 25 años, se efectuó una clasificación digital de imágenes de satélite Landsat en cuatro diferentes fechas (1990, 2000, 2011 y 2015), adaptando un sistema clasificatorio de uso del suelo y humedales para la región. Se encontró que en el periodo comprendido entre 1990 y 2015 los humedales han disminuido un 10.5% de su cobertura, debido a una combinación de factores naturales y antropogénicos que están influenciados por la presencia de periodos de humedad o sequía.

Las propiedades de los humedales en Cuatro Ciénegas obedecen principalmente a las variaciones en la hidrología subterránea y a la distancia a ríos y cuerpos de agua; por consiguiente, responden de manera directa a las variaciones en la precipitación, la modificación de los ecosistemas fluviales, manantiales (pozas) y también a los aprovechamientos subterráneos y superficiales de la región.

Para evaluar la respuesta de los humedales a las variaciones climáticas, se relacionó estadísticamente su morfología con la precipitación y la temperatura, mediante el uso de métricas de fragmentación (área, variabilidad, tamaño, densidad, borde, forma). Los resultados revelaron que las lluvias inciden en los humedales con presencia de espejos de agua, mientras que la temperatura se correlaciona principalmente con los humedales que están compuestos por vegetación hidrófila.

Además, los efectos climáticos mostraron una relación más estrecha con la fragmentación del hábitat al considerar un periodo acumulado de 3 años (media móvil), indicando que estos ecosistemas son susceptibles a la presencia de periodos extensos de sequía. Se encontró que los efectos producidos por la sequía son acrecentados por los aprovechamientos subterráneos, lo que demuestra la fuerte relación que poseen los humedales de Cuatro Ciénegas con las variaciones piezométricas de los acuíferos. Los análisis a nivel de paisaje mostraron que los ecosistemas actualmente están más fragmentados, el tamaño de los parches es más pequeño y el efecto de

borde ha aumentado, además de haber una menor variabilidad en los fragmentos, en comparación con hace 25 años. Este proceso beneficia a las especies generalistas, lo cual tiene implicaciones ecológicas para las especies endémicas presentes que poseen un nicho ambiental más reducido. Los procesos de transformación del paisaje mostraron que el bosque espinoso constituye una de las coberturas vegetales que más han sido impactadas debido al aprovechamiento de mezquites en la región. Por otra parte, los ríos han mostrados signos de degradación propiciado por el dragado y la extracción de agua para las actividades agrícolas.

Los resultados mostraron la necesidad de ejecutar acciones que regulen los aprovechamientos de agua principalmente en periodos de sequía, con la finalidad de evitar un desequilibrio en los humedales, además de impulsar la restauración y el cuidado de los ecosistemas fluviales; ya que, se identificó que los ríos y las pozas constituyen ecosistemas claves para la conservación de las condiciones hidrológicas en la región, debido a que son el vínculo entre la hidrología subterránea y la superficial, por lo que su degradación puede derivar en la pérdida de humedales. Siendo importante elaborar estrategias para ajustar los volúmenes de extracción en periodos de sequía para no comprometer la estabilidad ecológica de los humedales.

PALABRAS CLAVE: Cuatro Ciénegas, Humedal, teledetección, clasificación digital de imágenes, fragmentación de hábitat, procesos de cambio y transformación del paisaje

FORMA DE CITAR EL DOCUMENTO

Leal- Nares, O.A. 2016. Influencia de la hidrología superficial y subterránea en la cobertura y composición de los humedales: Caso de estudio Cuatro Ciénegas. Tesis de doctorado. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. 164 pp

ABSTRACT

This study aimed to assess the relationship of surface and groundwater hydrology with the distribution and composition of wetlands and identify the processes that generate changes in hydrology and ecosystems Cuatro Ciénegas.

Current Conditions of wetlands respond to the history of its hydrological regime, the adaptation of its biological communities and also a Human Modifications to the environment. To identify changes in the last 25 years, it was made a classification of digital Landsat satellite images in four different dates (1999, 2000, 2011 and 2015), adapting a land use and wetlands classification system in the region. Which it was found in the period between 1990 and 2015 wetlands have diminished 10.5 % of its coverage, due to a combination of natural and anthropogenic factors that are influenced by the presence of humidity or drought periods.

The properties of wetlands in Cuatro Ciénegas are mainly due to variations in groundwater hydrology and distance to rivers and water bodies; therefore respond directly to changes in precipitation way, modification of river ecosystems, springs (ponds) and also underground and surface exploitation in the region.

To evaluate the response of wetlands to climate changes, it was statistically related morphology with precipitation and temperature, using fragmentation metrics (area, variability, size, density, edge, shape). The results revealed that the rains affect wetlands presence of water bodies, while the temperature is mainly correlated with wetlands that are composed of hydrophilic vegetation.

In addition, the climatic effects showed a closer relationship with habitat fragmentation when considering a rolling 3 year (moving average), indicating that these ecosystems are susceptible to the presence of extended periods of drought period. It was found that the effects of drought are exacerbated by underground exploitation, demonstrating the strong relationship wetlands have Cuatro Ciénegas with piezometric variations of aquifers. The landscape-level analysis showed that ecosystems are now more fragmented, the patch size is smaller and the edge effect has also had less variability in fragments, increased compared to 25 years ago. This process benefits generalist species, which has ecological implications for endemic species present that have a smaller environmental niche. The processes of landscape transformation showed that the spiny forest is one of the most degraded ecosystems that have been impacted due to the use of mesquite in the

region. Moreover, rivers have shown signs of degradation led by dredging and extraction of water for agricultural activities.

The results showed the need to implement actions to regulate the exploitation of water mainly in periods of drought, in order to avoid an imbalance in wetlands, in addition to promoting the restoration and care of river ecosystems; because, it was identified that rivers and ponds are key ecosystems for conservation of hydrological conditions in the region, because they are the link between groundwater hydrology and surface, so degradation can result in the loss of wetlands. It is important to develop strategies to adjust extraction volumes during periods of drought to avoid compromising the ecological stability of wetlands.

KEYWORDS: Cuatro Ciénegas, Wetland, remote sensing, digital image classification, habitat fragmentation, processes of change and transformation of the landscape.

ÍNDICE

| | | |
|--------|--|-----------|
| I. | INTRODUCCIÓN | 1 |
| II. | OBJETIVO GENERAL | 3 |
| 2.1. | Objetivos específicos | 3 |
| III. | HIPÓTESIS | 3 |
| IV. | MARCO DE REFERENCIA | 4 |
| 4.1. | Importancia ecológica de los humedales | 4 |
| 4.1.1. | Servicios ambientales que proporcionan los humedales | 5 |
| 4.2. | Impactos y amenazas actuales | 7 |
| 4.2.1. | Repercusiones de la sequía meteorológica | 9 |
| 4.3. | Influencia de la hidrología en la composición y estructura de los humedales | 10 |
| 4.3.1. | Adaptación de las comunidades hidrófilas | 11 |
| 4.3.2. | Procesos de fragmentación del hábitat | 14 |
| 4.3.3. | Relación de la hidrología subterránea con los humedales | 16 |
| 4.3.4. | Indicadores ambientales para la evaluación de humedales | 17 |
| 4.4. | Los inventarios de humedales y su aplicación | 19 |
| 4.4.1. | Estructura de los sistemas de clasificación de humedales | 22 |
| 4.5. | Aplicaciones de la teledetección en la evaluación de humedales | 24 |
| 4.5.1. | Principales plataformas de teledetección utilizadas en humedales | 26 |
| 4.5.2. | Clasificación digital de humedales | 27 |
| 4.5.3. | Herramientas de análisis temporal | 29 |
| 4.6. | Aspectos hidrológicos y legales del valle de Cuatro Ciénegas | 30 |
| V. | LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DEL ÁREA DE ESTUDIO | 36 |
| VI. | MÉTODOLÓGÍA | 38 |
| 6.1. | Delimitación del área de estudio | 38 |
| 6.2. | Sistematización de la información | 40 |
| 6.2.1. | Conformación de las bases de datos geoestadísticas | 40 |
| 6.2.2. | Análisis de la información climática | 42 |

| | |
|---|-----------|
| 6.1. Gestión y procesamiento de imágenes de satélite | 42 |
| 6.1.1. Obtención de Imágenes Landsat y Spot | 45 |
| 6.1. Levantamiento de información en campo | 46 |
| 6.2. Conformación del sistema de clasificación de tierras altas y humedales de Cuatro Ciénegas | 47 |
| 6.3. Clasificación digital de las imágenes de satélite | 49 |
| 6.3.1. Método no supervisado | 49 |
| 6.3.2. Método supervisado | 50 |
| 6.3.3. Método mixto | 51 |
| 6.3.1. Análisis de exactitud | 51 |
| 6.4. Análisis temporal | 52 |
| 6.4.1. Modelo de probabilidad de cambio | 53 |
| 6.5. Aprovechamientos superficiales y subterráneos concesionados | 53 |
| 6.6. Análisis geoestadístico | 54 |
| 6.6.1. Correlación espacial | 54 |
| 6.6.2. Métricas de fragmentación del hábitat | 54 |
| 6.6.3. Procesos de transformación del paisaje | 56 |
| VII. RESULTADOS | 57 |
| 7.1. Comportamiento de la precipitación y la temperatura | 58 |
| 7.2. Aprovechamiento de los recursos hídricos | 59 |
| 7.2.1. Concesiones para el aprovechamiento de aguas subterráneas | 61 |
| 7.2.2. Concesiones para el aprovechamiento de aguas superficiales | 64 |
| 7.2.1. Aprovechamientos en libre alumbramiento | 65 |
| 7.2.2. Aprovechamientos en el Área Natural Protegida | 67 |
| 7.3. Consideraciones del Balance Hídrico en el valle de Cuatro Ciénegas | 68 |
| 7.3.1. Análisis de la disponibilidad media anual del acuífero de Cuatro Ciénegas | 70 |
| 7.4. Piezometría del acuífero Cuatro Ciénegas | 71 |
| 7.4.1. Evolución de los niveles estáticos | 75 |
| 7.5. Identificación de manantiales | 77 |
| 7.6. Trabajo de verificación en campo | 79 |
| 7.7. Sistema de clasificación de uso del suelo y vegetación | 80 |
| 7.8. Sistema de clasificación de humedales | 81 |
| 7.8.1. Humedales del Sistema Lacustre | 83 |
| 7.8.2. Humedales del Sistema Palustre | 85 |

| | | |
|--------------|--|------------|
| 7.8.3. | Humedales del Sistema Fluvial | 85 |
| 7.8.4. | Especies acuáticas y subacuáticas de Cuatro Ciénegas | 88 |
| 7.9. | Clasificación digital de las imágenes de satélite | 90 |
| 7.10. | Análisis temporal de las coberturas | 93 |
| 7.10.1. | Procesos de cambio para el periodo de 1990 al 2000 | 94 |
| 7.10.2. | Procesos de cambio para el periodo de 2000 al 2011 | 95 |
| 7.10.3. | Procesos de cambio para el periodo de 2011 al 2015 | 97 |
| 7.10.4. | Procesos de cambio en un periodo de 25 años (1990 -2015) | 98 |
| 7.10.5. | Tasa anual de cambio por categoría | 100 |
| 7.10.1. | Transformaciones y permanencias | 101 |
| 7.11. | Factores relacionados con los cambios en la cobertura | 105 |
| 7.1. | Modelo predictivo de cambios para el año 2025 | 109 |
| 7.2. | Fragmentación del hábitat | 113 |
| 7.2.1. | Relación entre las variables climáticas y la morfología de los humedales | 116 |
| 7.3. | Procesos de transformación del paisaje | 122 |
| VIII. | DISCUSIÓN | 124 |
| IX. | CONCLUSIONES | 130 |
| X. | RECOMENDACIONES | 131 |
| XI. | LITERATURA CITADA | 133 |
| XII. | ANEXOS | 143 |

ÍNDICE DE CUADROS

| | | |
|--------------|---|----|
| Cuadro 4-1. | Ejemplos de servicios ambientales que proveen los humedales | 7 |
| Cuadro 4-2. | Métricas definidas para evaluar la fragmentación del hábitat según McGarical y Marks (1994) | 15 |
| Cuadro 4-3 | Categorías de indicadores utilizados en 16 métodos rápidos de evaluación de humedales. Números en paréntesis corresponden al número de trabajos revisados | 18 |
| Cuadro 4-4. | Comparativo de los sistemas de clasificación | 21 |
| Cuadro 4-5. | Comparación de las características de los satélites Landsat 7 y Landsat 8 | 27 |
| Cuadro 4-6. | Características del satélite Spot 5 | 27 |
| Cuadro 4-7. | Información general de los volúmenes aforados en los canales del valle de Cuatro Ciénegas | 31 |
| Cuadro 6-1. | Estaciones consideradas para el análisis climático | 42 |
| Cuadro 6-2. | Imágenes de satélite Landsat utilizadas para la clasificación | 45 |
| Cuadro 6-3. | Métricas utilizadas en el análisis de fragmentación de hábitat | 55 |
| Cuadro 7-1. | Concesiones inscritas en el Registro Público de Derechos del Agua (Incluye aprovechamientos subterráneos y superficiales) | 61 |
| Cuadro 7-2. | Aprovechamientos subterráneos inscritos en el Registro Público de Derechos del Agua | 62 |
| Cuadro 7-3. | Aprovechamientos superficiales inscritos en el Registro Público de Derechos del Agua | 64 |
| Cuadro 7-4. | Aprovechamientos en libre alumbramiento en el Registro Público de Derechos del Agua | 65 |
| Cuadro 7-5. | Aprovechamientos anuales pertenecientes al Registro Público de Derechos del Agua registrados para el ANP | 67 |
| Cuadro 7-6. | Cálculo de la disponibilidad media anual de Cuatro Ciénegas | 70 |
| Cuadro 7-7. | Profundidad al nivel estático en los pozos de observación para el mes de septiembre de 2014 | 74 |
| Cuadro 7-8. | Evolución la profundidad estática en pozos de observación (2008-2014) | 76 |
| Cuadro 7-9. | Equivalencias entre tipos de vegetación; se listan únicamente las que corresponden a las clases encontradas en el área de Cuatro Ciénegas, Coahuila | 82 |
| Cuadro 7-10. | Categorías para la clasificación de uso del suelo y vegetación | 82 |

| | | |
|--------------|---|-----|
| Cuadro 7-11. | Sistema clasificatorio para los humedales de Cuatro Ciénegas | 83 |
| Cuadro 7-12. | Listado de plantas acuáticas y subacuáticas registradas para Cuatro Ciénegas | 89 |
| Cuadro 7-13. | Superficie de hectáreas de tierras altas y humedales (1990-2015) | 91 |
| Cuadro 7-14. | Tasa anual de cambio anual por categoría | 100 |
| Cuadro 7-15. | Matriz de transformaciones y permanencias | 103 |
| Cuadro 7-16. | Factores utilizados para la elaboración de los modelos de transición | 106 |
| Cuadro 7-17. | Procesos de cambio y su relación con los factores naturales y humanos en el periodo 1990 - 2000 | 107 |
| Cuadro 7-18. | Procesos de cambio y su relación con los factores naturales y humanos en el periodo 2000 - 2011 | 108 |
| Cuadro 7-19. | Procesos de cambio y su relación con los factores naturales y humanos en el periodo 2011 - 2015 | 109 |
| Cuadro 7-20. | Procesos de cambio y su relación con los factores naturales y humanos en el periodo 1990 - 2015 | 110 |
| Cuadro 7-21. | Matriz de probabilidades de Markov para el año 2025 | 111 |
| Cuadro 7-22. | Métricas a nivel de paisaje utilizadas en el análisis | 113 |
| Cuadro 7-23. | Relación entre el área de cobertura de los humedales con las variables climáticas utilizando el coeficiente de determinación (r^2) | 117 |
| Cuadro 7-24. | Relación entre la variabilidad, tamaño y densidad de los fragmentos de los humedales con las variables climáticas, utilizando el coeficiente de determinación (r^2) | 119 |
| Cuadro 7-25. | Relación entre las características del borde de los fragmentos de los humedales con las variables climáticas, utilizando el coeficiente de determinación (r^2) | 120 |
| Cuadro 7-26. | Relación entre la forma de los fragmentos de los humedales con las variables climáticas, utilizando el coeficiente de determinación (r^2) | 122 |
| Cuadro 7-27. | Procesos de transformación del paisaje por periodo | 123 |
| Cuadro 8-1. | Influencia de los factores ambientales y humanos en los procesos de transición | 126 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | | |
|--------------|--|----|
| Figura 4-1. | Relación entre los componentes ecológicos y los servicios ecosistémicos | 6 |
| Figura 4-2. | Abundancia de una población a través de un gradiente ambiental | 12 |
| Figura 5-1. | Localización geográfica del valle de Cuatro Ciénegas | 37 |
| Figura 6-1. | Modelo Digital de Elevación utilizado en la modelación hidrológica | 39 |
| Figura 6-2. | Delimitación automática de subcuencas en ArcHydro | 41 |
| Figura 6-3. | Estaciones climáticas cercanas al valle de Cuatro Ciénegas | 43 |
| Figura 6-4. | Proceso de ortorrectificación de una imagen | 43 |
| Figura 6-5. | Asignación de puntos de control para la ortorrectificación | 44 |
| Figura 6-6. | Asignación de puntos de control para la ortorrectificación de imagen a imagen | 44 |
| Figura 6-7. | Cobertura de las imágenes Landsat para el área de estudio | 45 |
| Figura 6-8. | Cobertura de las imágenes SPOT 5 | 46 |
| Figura 6-9. | Levantamiento de información en campo | 47 |
| Figura 7-1. | Área de estudio | 57 |
| Figura 7-2. | Aspectos poblacionales del área de estudio | 58 |
| Figura 7-3. | Tendencia de la precipitación para el periodo 1923-2015 | 59 |
| Figura 7-4. | Tendencia de la temperatura para el periodo 1923-2015 | 60 |
| Figura 7-5. | Comportamiento temporal de las concesiones inscritas en el Registro Público de Derechos del Agua | 62 |
| Figura 7-6. | Localización geográfica de los títulos de concesión para el aprovechamiento de aguas subterráneas | 63 |
| Figura 7-7. | Comportamiento de los registros para aprovechamientos subterráneos | 63 |
| Figura 7-8. | Localización geográfica de los títulos de concesión para el aprovechamiento de aguas superficiales | 64 |
| Figura 7-9. | Comportamiento de los registros para aprovechamientos superficiales | 65 |
| Figura 7-10. | Localización geográfica de aprovechamientos en libre alumbramiento | 66 |
| Figura 7-11. | Comportamiento de los registros para aprovechamientos en libre alumbramiento | 66 |
| Figura 7-12. | Localización geográfica de los aprovechamientos en el Área Natural Protegida | 67 |

| | | |
|--------------|---|----|
| Figura 7-13. | Distribución de los pozos de monitoreo instalados en el año 1998 | 72 |
| Figura 7-14. | Distribución de los pozos de monitoreo instalados en el año 2007 | 73 |
| Figura 7-15. | Configuración de la profundidad al nivel estático para el mes de septiembre de 2014 | 74 |
| Figura 7-16. | Humedales palustres formados por los niveles someros del acuífero y la evaporación | 75 |
| Figura 7-17. | Comparación de la profundidad a nivel estático y la localización de los aprovechamientos subterráneos inscritos en el Registro Público de Derechos del Agua | 76 |
| Figura 7-18. | Evolución de la profundidad a nivel estático (2008- 2014) | 77 |
| Figura 7-19. | Base de datos geográfica indicando la presencia de manantiales | 78 |
| Figura 7-20. | Localización de manantiales que alimentan un sistema de humedales. A) Fotografía aérea; B) Imagen SPOT 5 | 79 |
| Figura 7-21. | Zonas de mayor y menor densidad de manantiales en el valle de Cuatro Ciénegas | 79 |
| Figura 7-22. | Puntos de verificación en campo | 80 |
| Figura 7-23. | Humedal lacustre permanente, subclase poza (L1Mp) | 84 |
| Figura 7-24. | Humedal lacustre temporal, subclase laguna (L2Da) | 84 |
| Figura 7-25. | Humedal palustre estacional, subclase vegetación emergente (Ple) | 85 |
| Figura 7-26. | Humedal palustre estacional, subclase llanura inundable (Pla) | 86 |
| Figura 7-27. | Humedal palustre estacional, subclase llanura húmeda (Plc) | 86 |
| Figura 7-28. | Humedal palustre estacional, subclase halófila inundable (PIh) | 87 |
| Figura 7-29. | Humedal fluvial permanente, subclase río (F1rl) | 87 |
| Figura 7-30. | Humedal fluvial intermitente, subclase canal artificial (F2c) | 88 |
| Figura 7-31. | Acercamiento de la clasificación digital de los humedales de Cuatro Ciénegas para el año 1990 | 91 |
| Figura 7-32. | Acercamiento de la clasificación digital de los humedales de Cuatro Ciénegas para el año 2000 | 92 |
| Figura 7-33. | Acercamiento de la clasificación digital de los humedales de Cuatro Ciénegas para el año 2011 | 92 |
| Figura 7-34. | Acercamiento de la clasificación digital de los humedales de Cuatro Ciénegas para el año 2015 | 93 |
| Figura 7-35. | Cambios presentes en el periodo 1990 – 2000 | 94 |

| | | |
|--------------|--|-----|
| Figura 7-36. | Mapa de procesos de cambio y permanencia de los humedales en el periodo de 1990 al 2000 | 95 |
| Figura 7-37. | Cambios presentes en el periodo 2000 – 2011 | 96 |
| Figura 7-38. | Mapa de procesos de cambio y permanencia de los humedales en el periodo de 2000 al 2011 | 96 |
| Figura 7-39. | Cambios presentes en el periodo 2011 – 2015 | 97 |
| Figura 7-40. | Mapa de procesos de cambio y permanencia de los humedales en el periodo de 2011 al 2015 | 98 |
| Figura 7-41. | Cambios globales en el periodo 1990 – 2015 | 99 |
| Figura 7-42. | Mapa de procesos de cambio y permanencia de los humedales en el periodo de 1990 al 2015 | 99 |
| Figura 7-43. | Dinámica temporal de las clases de Tierras Altas | 101 |
| Figura 7-44. | Dinámica temporal del sistema Lacustre | 102 |
| Figura 7-45. | Dinámica temporal del sistema Palustre | 102 |
| Figura 7-46. | Dinámica temporal del sistema Fluvial | 103 |
| Figura 7-47. | Diagrama de cadenas de probabilidad de Markov para el año 2025. | 112 |
| Figura 7-48. | Tendencia del número de fragmentos a nivel de paisaje | 114 |
| Figura 7-49. | Tendencia de la media del tamaño del parche | 114 |
| Figura 7-50. | Tendencia de la desviación estándar del tamaño del parche | 114 |
| Figura 7-51. | Tendencia del total del borde | 115 |
| Figura 7-52. | Tendencia del índice de forma media | 115 |
| Figura 7-53. | Tendencia del índice de Shannon | 116 |
| Figura 8-1. | Funcionamiento hidrológico del valle de Cuatro Ciénegas | 124 |
| Figura 8-2. | Áreas de pérdida y cambios en la composición de humedales y su relación con el sistema fluvial | 127 |

ÍNDICE DE ANEXOS

| | | |
|-----------|---|-----|
| Anexo 1. | Espaciomapa del área de estudio | 144 |
| Anexo 2. | Clasificación digital para el año 1990 | 145 |
| Anexo 3. | Clasificación digital para el año 2000 | 146 |
| Anexo 4. | Clasificación digital para el año 2011 | 147 |
| Anexo 5. | Clasificación digital para el año 2015 | 148 |
| Anexo 6. | Matriz de cambios de la superficie en hectáreas para el periodo 1990 - 2000 | 149 |
| Anexo 7. | Matriz de cambios de la superficie en hectáreas para el periodo 2000 - 2011 | 149 |
| Anexo 8. | Matriz de cambios de la superficie en hectáreas para el periodo 2011 - 2015 | 150 |
| Anexo 9. | Matriz de cambios de la superficie en hectáreas para el periodo 1990 - 2015 | 150 |
| Anexo 10. | Mapa de permanencias para el periodo 1990 – 2000 | 151 |
| Anexo 11. | Mapa de permanencias para el periodo 2000 – 2011 | 152 |
| Anexo 12. | Mapa de permanencias para el periodo 2011 – 2015 | 153 |
| Anexo 13. | Mapa de permanencias para el periodo 1990 – 2015 | 154 |
| Anexo 14. | Mapa de procesos de cambio para el periodo 1990 – 2000 | 155 |
| Anexo 15. | Mapa de procesos de cambio para el periodo 2000 – 2011 | 156 |
| Anexo 16. | Mapa de procesos de cambio para el periodo 2011 – 2015 | 157 |
| Anexo 17. | Mapa de procesos de cambio para el periodo 1990 – 2015 | 158 |
| Anexo 18. | Mapa de procesos de transformación del paisaje para el periodo 1990 - 2000 | 159 |
| Anexo 19. | Mapa de procesos de transformación del paisaje para el periodo 2000 - 2011 | 160 |
| Anexo 20. | Mapa de procesos de transformación del paisaje para el periodo 2011 - 2015 | 161 |
| Anexo 21. | Mapa de procesos de transformación del paisaje para el periodo 1990 - 2015 | 162 |

I. INTRODUCCIÓN

La región de Cuatro Ciénegas es un área de gran importancia ambiental en México, debido a la diversidad y composición de sus ecosistemas acuáticos: manantiales, canales, ríos, lagunas, estanques temporales y pantanos (Souza et al. 2004). Su historia evolutiva y características ambientales únicas han propiciado el desarrollo de 77 especies endémicas de peces, reptiles, algas y bacterias, lo que fue determinante para ser reconocida mundialmente por la comunidad científica y para su decreto como Reserva de la Biosfera en 1994 (Meyer 1973; INE- SEMARNAP 1999; Contreras y Ludlow 2003). Sin embargo, debido a la presencia de un clima de tipo desértico en donde la precipitación media anual no supera los 200 mm y la evaporación media anual es de 1,960 mm, existe una tendencia natural hacia la desertificación, por lo que el manejo hídrico constituye un reto importante para la conservación de sus ecosistemas (SEMARNAT-IMTA 2004; Madrigal y López-Caloca 2010).

Actualmente el desarrollo de actividades agrícolas y pecuarias en la región, requieren de la extracción de aproximadamente 30 millones de m³ anuales de agua, provenientes de fuentes subterráneas y superficiales que son conducidos por una red de canales naturales y artificiales dentro y fuera del valle, situación que ya ha detonado problemas sociales y ambientales.

Durante los últimos 50 años, las actividades económicas de la región y el crecimiento poblacional han originado presión sobre los recursos hídricos, propiciando alteraciones en la humedad del suelo, variaciones en los caudales de los ríos, cambios en los patrones de drenaje, la desaparición de lagunas temporales y cambios en los manantiales (conocidos de manera local como pozas) (Contreras-Balderas 1984).

La composición y la cobertura son aspectos de los humedales que han sido utilizados como indicadores de los cambios ocurridos en estos ecosistemas (*e.g.* modificaciones en la red hidrológica y extracción de agua), debido a que sus variaciones pueden ser cuantificadas mediante el análisis multitemporal con técnicas de Percepción Remota (Detenbeck 2002).

Los procesos de cambio generalmente implican la pérdida y fragmentación del hábitat afectando la geometría del paisaje, que son evaluados a través de métricas que describen los patrones espaciales y la configuración del paisaje (McGarigal et al. 2012). Estos procesos de fragmentación, pueden presentarse como respuesta a las variaciones naturales del medio ambiente y/o por las actividades humanas (Badii y Landeros 2007; Cagnolo y Valladares 2011).

El entendimiento de la respuesta de los humedales de Cuatro Ciénegas a las variaciones en los procesos hidrológicos, constituye una necesidad para establecer lineamientos que promuevan el desarrollo de políticas del aprovechamiento del agua encaminados a cubrir las necesidades para el desarrollo de las actividades productivas en la región y abastecer a la población asentada, sin comprometer la estabilidad de los ecosistemas. Por lo que se propone el siguiente objetivo de investigación:

II. OBJETIVO GENERAL

- Evaluar la relación entre la distribución de los humedales y el comportamiento de la hidrología superficial y subterránea en el valle de Cuatro Ciénegas

2.1. Objetivos específicos

1. Formular un sistema de clasificación jerárquico de humedales adaptado para la región de Cuatro Ciénegas.
2. Identificar la dinámica y los procesos de cambio en la cobertura y composición de los humedales.
3. Caracterizar los factores naturales y humanos que han afectado de manera directa e indirecta los humedales en los últimos 25 años y su relación con la hidrología
4. Realizar un análisis de los procesos en la transformación del paisaje

III. HIPÓTESIS

H₀. Los humedales de Cuatro Ciénegas permanecen sin cambios en su cobertura y composición de especies y no son afectados por modificaciones en el ciclo hidrológico.

H_a. La cobertura y composición de los humedales en Cuatro Ciénegas son indicadoras de los cambios en el ciclo hidrológico, producidos por las variaciones climáticas y las actividades productivas de la región.

IV. MARCO DE REFERENCIA

El término humedal agrupa un amplio número de hábitats con características en común, que son áreas que están inundadas con la frecuencia y duración suficiente para incidir en los procesos edáficos y su biota (Finlayson y Spiers 1999). De acuerdo a Cowardin *et al.* (1979), los humedales son terrenos de transición entre sistemas acuáticos y terrestres en donde el nivel freático se encuentra cercano a la superficie o cubierto por aguas someras, cumpliendo al menos uno de los siguientes atributos:

- a) Suelo cubierto predominantemente por plantas hidrófitas al menos de manera periódica.
- b) Sustrato con drenaje deficiente y con características hídricas.
- c) Sustrato saturado o cubierto con una lámina de agua somera durante alguna temporada del año

También los ecotonos o zonas de transición entre los sistemas acuáticos y terrestres, donde la lámina de agua está cercana a la superficie o la tierra está cubierta por agua superficial son considerados también humedales (Cowardin *et al.* 1979).

Los humedales son ecosistemas ecológicamente conectados, formando corredores biológicos que favorecen los mecanismos de dispersión entre las especies. Sin embargo, en las políticas de conservación tradicionales se les considera como sitios aislados, buscando únicamente la preservación de áreas consideradas de especial importancia (Amezaga *et al.* 2002).

Constituyen hábitats frágiles de alta productividad, considerados de gran relevancia para la conservación de gran cantidad de especies (Peñaranda 2008); extremadamente vulnerables a las variaciones climáticas y en los regímenes hidrológicos en términos de cantidad y calidad del agua (Baker *et al.* 2009).

4.1. Importancia ecológica de los humedales

Los humedales juegan un rol crítico para el mantenimiento y regulación del ciclo hidrológico, desempeñando funciones de mitigación de impactos, retención de sedimentos y recarga de acuíferos (Giraldo *et al.* 2007).

Proveen una gran cantidad de servicios ambientales a las poblaciones humanas y desde el punto de vista biológico son considerados como los ecosistemas más productivos, albergando una alta

biodiversidad (Dugan 1988; Mitsch y Gosselink 2000). Los humedales no constituyen sistemas aislados, por el contrario, son dinámicos, hábitats complejos con conexiones bióticas y abióticas a sus alrededores. Están delimitados por procesos naturales y por prácticas sociales, y su conservación debe ser bajo esquemas sostenibles (Amezaga et al. 2002).

Por parte de la comunidad internacional, se han realizado distintos esfuerzos institucionales para la conservación de los humedales, considerando aspectos legales, políticos, administrativos y económicos para mitigar su degradación. A nivel internacional se ha promovido su conservación mediante la *Convención de Humedales Ramsar*, firmada en la ciudad de Ramsar, Irán el 2 de febrero de 1971, entrada en vigor en 1975; que promueve la cooperación internacional enfocada a la conservación y el uso adecuado de los humedales y sus recursos (Ramsar 2011). Actualmente 168 países se han integrado a la Convención con 2,143 humedales con una superficie aproximada de 205,530,026 hectáreas (Ramsar 2013). En México se han incluido 139 sitios con una superficie aproximada de 8,833,094 ha, ubicándose como el sexto país en importancia a nivel internacional de acuerdo a su superficie (Ramsar 2013).

Desafortunadamente, el carácter de la convención Ramsar es más bien indicativo, por lo que la pertenencia no garantiza la protección de los humedales, siendo la responsabilidad de los países conservar y manejar adecuadamente estos ecosistemas.

Las características de los humedales están dadas por diversos factores físicos, biológicos y químicos y por sus componentes como el sustrato y las especies presentes. Las interacciones entre estos proporcionan ciertas funciones ecosistémicas, que son definidas como *“la capacidad que tienen los procesos de los ecosistemas para proveer bienes y servicios que satisfagan las necesidades humanas de manera directa o indirecta”* (De Groot et al. 2006) (Figura 4-1).

4.1.1. Servicios ambientales que proporcionan los humedales

En la actualidad el ser humano se ha interesado en el funcionamiento de los humedales, debido a los servicios ambientales (ecológicos, socioculturales y económicos) que estos proveen. No obstante, los esquemas de aprovechamiento de agua para el desarrollo de las actividades productivas afectan las condiciones hidrológicas originales, impactando las funciones de los humedales (McCartney y Acreman 2009).

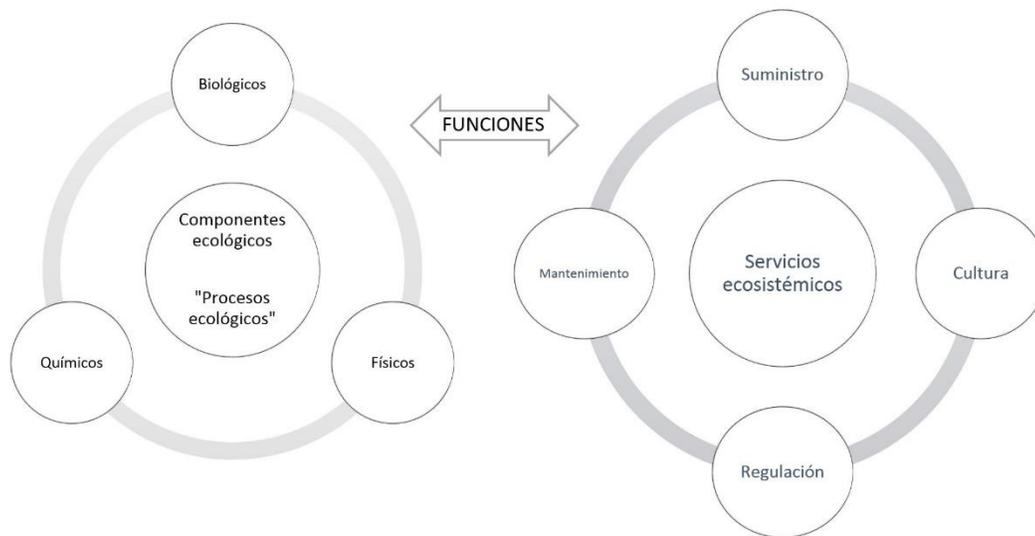


Figura 4-1. Relación entre los componentes ecológicos y los servicios ecosistémicos

Acharya (2000), menciona que los servicios hidrológicos que proveen los humedales pueden separarse en usos directos e indirectos. Los usos directos incluyen el suministro de agua y la obtención de recursos; mientras que los beneficios indirectos son derivados de sus funciones ambientales como la mitigación de inundaciones, la recarga de acuíferos, el abatimiento de nutrientes y la recreación, entre otros (Hansson et al. 2005; Stein et al. 2009). Algunos ejemplos de los servicios ambientales se presentan en el cuadro 4-1.

Los humedales constituyen ecosistemas especialmente frágiles a las variaciones climáticas, especialmente a los factores de precipitación y evapotranspiración, ya que los regímenes hidrológicos determinan sus características ambientales. Barker y Maltby (2009), mencionan que los cambios climáticos pueden acrecentar la susceptibilidad de los humedales a los impactos antropogénicos, por lo que entender las respuestas de estos a las fluctuaciones climáticas es importante para predecir impactos potenciales a futuro.

El agua que proveen los humedales es utilizada con diversos propósitos como el uso doméstico, agrícola e industrial, aunque el suministro de agua para las poblaciones es reconocido como el principal beneficio que proveen los humedales, especialmente en regiones áridas y semiáridas (McCartney y Acreman 2009). Los inventarios constituyen una poderosa herramienta para generar la información necesaria en el diseño de estrategias y políticas de manejo, que permitan obtener valoraciones económicas de los servicios ambientales.

Cuadro 4-1. Ejemplos de servicios ambientales que proveen los humedales

| Beneficios | Características |
|-----------------------------|---|
| Suministro | |
| Alimento | Carne, peces, fruta y granos |
| Agua | Agua para consumo humano, almacenamiento y para uso industrial y agrícola |
| Fibra | Madera y forraje |
| Combustible | Madera y hojas como combustible |
| Bioquímico | Disponibilidad de medicinas provenientes de plantas y animales |
| Material genético | Mantenimiento de la diversidad genética y mantenimiento del ecosistema |
| Regulación | |
| Clima | Regulación del clima local y regional |
| Agua | Regulación de la interacción del agua superficial y subterránea |
| Calidad del agua | Remoción de partículas suspendidas y exceso de nutrientes |
| Erosión | Retención de sólidos y sedimentos |
| Fenómenos meteorológicos | Control de inundaciones y deslaves; protección ante tormentas |
| Biota | Hábitat para polinizadores y predadores de plagas |
| Cultural | |
| Recreación | Actividades de recreación y deporte, valores espirituales y religiosos |
| Estético | Belleza, paz y conocimiento |
| Educación | Educación formal y no formal |
| Procesos ambientales | |
| Formación del suelo | Captura de sedimento y acumulación de materia orgánica |
| Reciclaje de nutrientes | Almacenamiento y procesamiento de nutrientes |

Fuente: (Barker y Maltby 2009).

4.2. Impactos y amenazas actuales

Anteriormente, el manejo de los humedales estaba asociado a su transformación para el desarrollo urbano, agrícola, industrial o turístico ya que se les consideraba áreas improductivas. Debido a esta tendencia a nivel mundial, se estima que el 50% de los humedales naturales presentan algún grado de alteración o se le considera en riesgo de desaparecer, esto a pesar de los acuerdos internacionales y políticas nacionales generadas para la conservación de estos ecosistemas (Liu et al. 2004). De acuerdo a Turner et al. (2000) las principales causas de la degradación de los humedales son: 1) el carácter público de los servicios y productos que generan; 2) conflictos de intereses entre usuarios y tomadores de decisiones; y 3) falta de articulación en las políticas públicas de distintas áreas (economía, medio ambiente, protección del medio ambiente, planificación territorial, gestión del agua). Estas causas a su vez, están relacionadas con deficiencias en la información para explicar las relaciones espaciales entre las aguas subterráneas, superficiales y la vegetación de los humedales.

La degradación de los humedales y sus especies impacta directamente en los servicios ambientales que estos desempeñan, como la recarga de acuíferos, el reciclaje de nutrientes, la retención de metales pesados y la prevención de inundaciones (Torbick et al. 2006).

Se estima que cerca de la mitad de los humedales a nivel mundial han sido destruidos o alterados como resultados de las actividades humanas; sin embargo, también las fluctuaciones climáticas y los ciclos de sequías tienen el potencial de modificar a largo plazo la dinámica de estos ecosistemas (Torbick et al. 2006; Stroh et al. 2008).

O'Connell (2003), menciona que los principales factores que han contribuido a la degradación de los humedales son los siguientes:

1. Cambios en el área (pérdida de hábitat)
2. Cambios en régimen hídrico
3. Cambios en la calidad del agua
4. Explotación no sostenible de los recursos
5. La introducción de especies exóticas

Entre las principales causas que se atribuyen a la degradación de los humedales durante el siglo XX son: el cambio de uso del suelo, la construcción de drenes agrícolas, la canalización de ríos y la extracción excesiva del agua subterránea (Cook et al. 2009). La extracción de grandes volúmenes de agua altera el régimen hidrológico de los humedales, produciendo cambios que afectan la flora y fauna asociada (McCartney y Acreman 2009).

Entre los problemas menos abordados relativos al conocimiento de los humedales, están la identificación de amenazas, cuantificación de impactos, la relación con los procesos de cambio de uso del suelo desde una perspectiva de cuenca hidrológica y la respuesta a la fragmentación del hábitat (Torbick et al. 2006).

Los humedales son sensibles a las variaciones climáticas, especialmente a los factores de precipitación y evapotranspiración, ya que los regímenes hidrológicos determinan sus características ambientales. Barker y Maltby (2009), mencionan que los cambios climáticos pueden acrecentar la susceptibilidad de los humedales a los impactos, por lo que entender las respuestas a las fluctuaciones climáticas es importante para predecir impactos potenciales a futuro.

4.2.1. Repercusiones de la sequía meteorológica

En épocas recientes las poblaciones humanas han desarrollado mecanismos de adaptación a periodos cortos de sequía, sin embargo, los periodos extensos de este fenómeno constituyen la principal preocupación para la seguridad alimentaria y el bienestar humano. Los periodos de sequía combinados con otros factores climáticos como lluvias extremas y patrones de crecimiento poblacional y agrícola no sostenibles pueden resultar en la degradación y desertificación; ésta última reconocida como uno de los mayores problemas de carácter económico, social y ambiental que concierne a países de todas las regiones del mundo (WMO 2006).

La sequía puede ser definida como una reducción significativa en los recursos hídricos durante un periodo prolongado de tiempo en un espacio geográfico extenso, acarreado consecuencias negativas en las actividades socioeconómicas y ambientales (Pérez y Barreiro-Hurle 2009). Marcos (2001), a través de un análisis de datos climáticos la define como una expresión de la desviación de la precipitación respecto a la media histórica registrada durante un periodo de tiempo determinado.

Este fenómeno meteorológico se presenta de manera normal y cíclica en todas las regiones climáticas. La sequía en sí misma no constituye un desastre, sino que sus consecuencias dependen de la vulnerabilidad de las poblaciones, la economía y el medio ambiente y su capacidad para recuperarse (WMO 2006). En México la sequía representa un fenómeno recurrente para algunas zonas como son el norte y el noroeste, ocasionando un mayor estrés para los acuíferos, pues son utilizados como única fuente de abastecimiento, haciendo necesario la identificación de zonas con alta vulnerabilidad (Conagua- Semarnat 2012).

De acuerdo a Escalante y Reyes (2012), en México se presentan episodios de sequía en promedio cada cuatro años con una permanencia de dos años. Se tienen registros extraordinarios en grandes extensiones del territorio nacional para los años 1957, 1969, 1982, 1997 y 2011, es decir cada catorce años.

La cuenca del río Bravo es una región hidrológica con alta variación en la disponibilidad del recurso hídrico. Ya que las variables climáticas la definen como una zona árida y semiárida, en donde la disponibilidad de agua constituye un problema ambiental y social, dado el crecimiento económico de la región y la competencia del agua por los usuarios, principalmente agrícolas. La disponibilidad del recurso hídrico en regiones áridas y semiáridas en condiciones de sequía puede acarrear

tensiones políticas afectando las relaciones entre naciones, situación que es más factible en las regiones con una alta variación en la disponibilidad del agua (Linares 2004).

Madrigal y López-Caloca (2010), mencionan que la región de Cuatro Ciénegas tiene una tendencia natural hacia la desertificación, por lo que las acciones antrópicas relacionadas con la extracción de agua y el aprovechamiento de mezquites en el valle, aunado a los periodos de sequía, pueden repercutir en el equilibrio de los ecosistemas.

4.3. Influencia de la hidrología en la composición y estructura de los humedales

Las características de los humedales dependen de su localización geográfica, el régimen hidrológico, la climatología y la topografía. Las variaciones estacionales y anuales en la hidrología inciden en la composición de la biota y en las condiciones químicas del agua, modificando el régimen de sedimentos y favoreciendo la presencia de especies adaptadas a las condiciones ambientales presentes, manteniendo generalmente una composición de especies única (Chipps et al. 2006; Murray-Hudson 2009; Walker 2005). Por consiguiente, las condiciones actuales de los humedales responden a la historia del régimen hidrológico y la adaptación de las comunidades biológicas al entorno.

Las variaciones hidrológicas y la topografía afectan los procesos ecológicos, la composición y estructura de los humedales, influyendo en la abundancia y dominancia de las plantas, especialmente en donde se establecen especies tolerantes a los gradientes de inundación (Magee y Kentula 2005; Murray-Hudson 2009). De manera que durante largos periodos de inundación los suelos presentan condiciones anaeróbicas que afectan la disponibilidad de nutrientes, promoviendo la presencia de vegetación nativa con raíces adaptadas a la baja disponibilidad de oxígeno (Murray-Hudson 2009).

Por otro lado, cuando la variabilidad de inundación es alta, los procesos de reciclaje de nutrientes y de materia orgánica tienden a ser acelerados, generando cambios en la composición y distribución de las especies. Estos cambios de profundidad en los humedales benefician a las especies exóticas que poseen mecanismos de adaptación a rangos de tolerancias ambientales más amplios y afectan de manera considerable a las especies vegetales nativas. Estas condiciones se presentan principalmente en humedales estacionales con temporadas de sequía marcadas y en aquellos con influencia de actividad agrícola y urbana (Magee y Kentula 2005).

Por lo anterior, el estudio de la composición florística se considera clave para el entendimiento de la ecología de los humedales (Murray-Hudson 2009). No obstante, existen diferencias conceptuales relacionadas con la vegetación de los humedales, ya que de acuerdo a Lot (2012), se consideran distintas formas de vida como epífitas, lianas, trepadoras, parásitas y algunos arbustos y árboles, que no corresponden en términos estrictos a vegetación acuática y subacuática. Por lo que se han adoptado tres categorías considerando el grado de dependencia de la inundación: a) acuáticas, b) subacuáticas, y c) tolerantes.

4.3.1. Adaptación de las comunidades hidrófilas

Desde el punto de vista de la ecología, los cambios temporales en la distribución y composición de las comunidades vegetales, son considerados fenómenos naturales condicionados por los factores ambientales presentes; por lo anterior, la respuesta de la vegetación a los periodos de sequía y humedad, representa un gran potencial en el estudio de los humedales (Campbell et al. 2014).

El desarrollo y la distribución de las especies está definida por condiciones ambientales extremas (altitud, posición, topografía, temperatura, humedad, precipitación, pH, salinidad, entre otros); en el caso particular de las plantas, su presencia se asocia principalmente a factores climáticos y edáficos (Chapman 1976; Hanson y Churchill 1961). El rango de tolerancia de los organismos a su entorno es definido como amplitud ecológica (Chapman 1976), perfil bioclimático o ecológico (Mitov y Stoyanov 2005).

El rango de tolerancia para cada factor ambiental está constituido por límites, más allá de estos las condiciones son consideradas extremas y los organismos no pueden permanecer o mantienen poblaciones con pocos individuos. Esto genera condiciones fisiológicas de estrés, ante las cuales los individuos sucumben fácilmente ante otros competidores, siendo la principal razón por la cual las especies no alcanzan su distribución potencial (Cox y Moore 1994); no obstante, las especies generalmente desarrollan mecanismos que les permiten la dispersión de su nicho en el espacio (Figura 4-2).

La presencia de las comunidades biológicas, puede ser explicada a partir del concepto de nicho ecológico multidimensional, que se define como la posición de una especie en una comunidad con relación a otras especies (Hutchinson 1957). Delimitado por la tolerancia fisiológica a un determinado rango de condiciones ambientales en las que una especie puede mantener sus

poblaciones sin migración, definido como un espacio-ambiental multidimensional (Soberón y Townsend 2011).

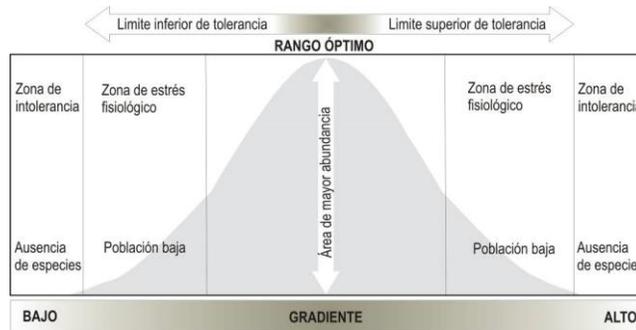


Figura 4-2. Abundancia de una población a través de un gradiente ambiental (Tomado de Cox y Moore 1994)

Asimismo, las áreas de distribución se encuentran rodeadas por zonas en las que las poblaciones no pueden mantenerse viables debido a diferentes condiciones físicas que limitan la supervivencia de las especies, conocidas como barreras biogeográficas. Factores como la cantidad de lluvia, la evaporación, la cantidad y disponibilidad del agua en el suelo, la intensidad de luz, son todos ellos factores limitantes para las plantas (Cox y Moore 1994). En la realidad, la distribución de una especie se encuentra aún más restringida, por la interacción de procesos de competencia, depredación y parasitismo (Hutchinson 1957; Magee y Kentula 2005).

Los humedales constituyen sistemas dinámicos, en los que los niveles de inundación afectan los nichos ecológicos, favoreciendo la dominancia de ciertas especies. De manera general, se ha identificado que las especies nativas tienen un nicho ecológico más reducido que las exóticas, que poseen una mayor resistencia por lo que pueden llegar a convertirse en plagas, propiciando cambios en las condiciones de los ecosistemas (Campbell et al. 2014; Elias-Gutierrez 2014; Magee y Kentula 2005).

Clements en 1904, propuso la teoría de sucesión ecológica para describir la secuencia de remplazo de las comunidades de plantas en un proceso unidireccional y determinístico, que involucra la convergencia de las comunidades hacia un estado de equilibrio llamado *climax* (Kandus 1995). Posteriormente, Margalef en 1968, consideró la sucesión como un proceso de auto organización, que conlleva una paulatina disminución de la influencia del ambiente y el aumento progresivo de las interacciones bióticas. El concepto de sucesión ecológica, explica la respuesta inicial de las

comunidades biológicas a las perturbaciones, resultado de la mezcla estocástica de perturbaciones y respuestas individuales de las especies (dispersión, establecimiento, supervivencia, reproducción) a lo largo de un paisaje espacialmente dinámico (Walker 2005).

La instalación y remplazo de las comunidades vegetales en las primeras etapas de sucesión dependen de la deposición de sedimentos, mientras que en etapas tardías existe una mayor influencia de los factores bióticos. También la composición de la vegetación y la acción de los herbívoros contribuyen de manera significativa en el recambio florístico y en la persistencia de algunas especies en el proceso de sucesión (Kandus 1995). El éxito de las especies en los procesos de sucesión tienen que ver con los atributos y propiedades de los ecosistemas, la capacidad para explotar los recursos disponibles y su tolerancia o resistencia ambiental, entre otros (Elias-Gutierrez 2014).

Factores como la topografía y la geomorfología controlan la velocidad del proceso de sucesión, mientras que el desarrollo de las comunidades está relacionado con los gradientes energéticos definidos por el régimen hidrológico, sin dejar de lado la importancia que tienen el flujo de energía, el balance de sedimentos y los ciclos biogeoquímicos.

Las comunidades vegetales de los humedales están adaptadas a las condiciones ambientales de igual manera que ocurre en las comunidades terrestres, permaneciendo en muchos casos en un estado de equilibrio dinámico con las fuerzas abióticas (Kandus 1995).

Debido a la relación que presentan los ciclos biológicos de las plantas hidrófilas y los humedales, estas especies son utilizadas para su identificación y caracterización. Según Mora-Olivo et al. (2013) en México se tienen registradas 240 plantas vasculares asociadas a humedales, de las cuales 50 especies nativas y dos introducidas se encuentran en el estado de Coahuila; sin embargo, existen diferencias con respecto a otros trabajos, ya que en el Listado Florístico del Programa de Manejo del Área de Protección de Flora y Fauna de Cuatro Ciénegas, se identifican 76 especies relacionadas a los hábitats acuáticos y lugares inundados permanentes (SEMARNAP 1999), cifra superior a las especies hidrófitas reportadas para la entidad.

4.3.2. Procesos de fragmentación del hábitat

Los paisajes exhiben determinados patrones espaciales que son el resultado de los procesos ecológicos que se generan en los ecosistemas; y a través de la caracterización de los patrones, se pueden determinar los procesos de transformación en el paisaje. Por lo tanto, el estudio de los cambios en los patrones espaciales implica la cuantificación e identificación de los procesos (Bogaert et al. 2004).

La ecología del paisaje se enfoca en conocer la influencia de los factores ambientales en la distribución de las especies y su influencia en los patrones ecológicos. Para caracterizar la heterogeneidad del paisaje se ha optado por medir la estructura del paisaje por el modelo parche – mosaico, el cual es una simplificación que facilita el diseño experimental y el análisis con herramientas y métodos establecidos (Cushman et al. 2010). La mayoría de los estudios de fragmentación de hábitat se enfocan en la riqueza y abundancia de especies, otros dirigen sus esfuerzos en el papel de los corredores biológicos, la conectividad del paisaje y los efectos de borde en los servicios ecosistémicos (Debinski y Holt 2000).

Algunas de las métricas utilizadas para evaluar los procesos de fragmentación del hábitat describen la composición del paisaje, mientras que otras se enfocan en la configuración espacial. La mayoría de las métricas pueden servir como índices de fragmentación, ya que miden la configuración de un parche en particular, aunque comúnmente pueden interpretarse de manera más amplia como una medida de la heterogeneidad del paisaje (McGarical y Marks 1994).

La evaluación de los cambios en las coberturas, se realiza a través de métricas que miden la estructura espacial de los parches, las clases o categorías de uso del suelo y el paisaje en su totalidad. Estos son calculados utilizando ecuaciones que proporcionan información de los patrones espaciales de los fragmentos y del paisaje con el uso de imágenes de percepción remota. Las métricas son definidas en tres escalas: 1) Parche: las métricas caracterizan los fragmentos y su contexto de manera individual; 2) Clase: las métricas evalúan de los fragmentos de manera agrupada por categorías (uso del suelo y vegetación); 3) Paisaje: las métricas representan la integración de todos los fragmentos o clases (McGarical y Marks 1994) (Cuadro 4-2).

Cuadro 4-2. Métricas definidas para evaluar la fragmentación del hábitat según McGarical y Marks (1994)

| Escala | Acrónimo | Métrica (unidades) |
|--|----------|---|
| Métricas de área | | |
| Parche | AREA | Área (ha) |
| Parche | LSIM | Índice de similitud del paisaje (%) |
| Clase | CA | Área de la clase (ha) |
| Clase | %LAND | Porcentaje del paisaje (%) |
| Clase/Paisaje | TA | Total del área del paisaje (ha) |
| Clase/Paisaje | LPI | Índice del parche mayor (%) |
| Densidad del parche, tamaño del parche y métricas de variabilidad | | |
| Clase/Paisaje | NP | Número de parches (#) |
| Clase/Paisaje | PD | Densidad de parches (#/100 ha) |
| Clase/Paisaje | MPS | Media del tamaño de los parches (ha) |
| Clase/Paisaje | PSSD | Desviación estándar del tamaño de los parches (ha) |
| Clase/Paisaje | PSCV | Coefficiente de variación del tamaño de los parches (%) |
| Métricas de borde | | |
| Parche | PERIM | Perímetro (m) |
| Parche | EDCON | Índice de contraste de borde (%) |
| Clase/Paisaje | TE | Total de borde (m) |
| Clase/Paisaje | ED | Densidad del borde (m/ha) |
| Clase/Paisaje | CWED | Densidad de borde ponderada por contraste (m/ha) |
| Clase/Paisaje | TECI | Índice del contraste total de bordes (%) |
| Clase/Paisaje | MECI | Media del contraste total de bordes (%) |
| Clase/Paisaje | AWMECI | Índice de contraste de borde media ponderada por área (%) |
| Métricas de forma | | |
| Parche | SHAPE | Índice de forma |
| Parche | FRACT | Dimensión fractal |
| Clase/Paisaje | LSI | Índice del forma del paisaje |
| Clase/Paisaje | MSI | Índice de forma media |
| Clase/Paisaje | AWMSI | Índice de forma media de área ponderada |
| Clase/Paisaje | DLFD | Dimensión fractal doble <i>log</i> |
| Clase/Paisaje | MPFD | Dimensión fractal media del parche |
| Clase/Paisaje | AWMPFD | Dimensión fractal media del área ponderada |
| Métricas del área núcleo | | |
| Parche | CORE | Área núcleo (ha) |
| Parche | NCORE | Numero de áreas núcleo (#) |
| Parche | CAI | Índice del área núcleo (%) |
| Clase/Paisaje | C%LAND | Porcentaje de área núcleo del paisaje (%) |
| Clase/Paisaje | TCA | Total del área núcleo (ha) |
| Clase/Paisaje | NCA | Número de áreas núcleo (#) |
| Clase/Paisaje | CAD | Densidad de áreas núcleo (#/100) |
| Métricas del área núcleo | | |
| Clase/Paisaje | MCA1 | Media del área núcleo por parche (ha) |
| Clase/Paisaje | CASD1 | Desviación estándar del área núcleo por parche (ha) |
| Clase/Paisaje | CACV1 | Coefficiente de variación del área núcleo por parche (ha) |
| Clase/Paisaje | MCA2 | Media del área núcleo disyunto (ha) |
| Clase/Paisaje | CASD2 | Desviación estándar del área núcleo disyunto (ha) |
| Clase/Paisaje | CACV2 | Coefficiente de variación del área núcleo disyunto (%) |
| Clase/Paisaje | TCAI | Índice del total del área núcleo (%) |
| Clase/Paisaje | MCAI | Índice de la media del área núcleo (%) |

Continúa cuadro 4-2

| Escala | Acrónimo | Métrica (unidades) |
|---|-----------------|---|
| Métricas del vecino más cercano | | |
| Parcela | NEAR | Distancia al vecino más cercano (m) |
| Parcela | PROXIM | Índice de proximidad |
| Clase/Paisaje | MNN | Distancia media al vecino más cercano (m) |
| Clase/Paisaje | NNSD | Desviación estándar al vecino más cercano (m) |
| Clase/Paisaje | NNCV | Coefficiente de variación al vecino más cercano (%) |
| Clase/Paisaje | MPI | Índice de proximidad media |
| Métricas de diversidad | | |
| Paisaje | SHDI | Índice de diversidad de Shannon |
| Paisaje | SIDI | Índice de diversidad de Simpson |
| Paisaje | MSIDI | Índice modificado de diversidad de Simpson |
| Paisaje | PR | Riqueza de parches (#) |
| Paisaje | PRD | Densidad de riqueza de parches (#/100) |
| Paisaje | RPR | Riqueza relativa de parches (%) |
| Paisaje | SHEI | Índice de equidad de Shannon |
| Paisaje | SIEI | Índice de equidad de Simpson |
| Paisaje | MSIEI | Índice modificado de equidad de Simpson |
| Índice de contagio y esparcimiento | | |
| Clase/Paisaje | IJI | Índice de esparcimiento y yuxtaposición (%) |
| Paisaje | CONTAG | Índice de contagio |

4.3.3. Relación de la hidrología subterránea con los humedales

Existe una marcada relación entre el suministro de agua subterránea y la integridad ecológica de los humedales y sus comunidades biológicas (Howard y Merrifield 2010), aportando los flujos que mantienen los niveles de agua y sus características químicas (Howard y Merrifield 2010; Mitsch y Gosselink 2000)

Las condiciones hidrológicas y climáticas determinan las particularidades de los humedales. En las regiones áridas o áreas con una marcada temporalidad en las lluvias, la retención de la humedad del suelo y la disponibilidad de agua subterránea son importantes durante los periodos extensos de sequía. Por lo que los humedales de las zonas áridas pueden ser extremadamente sensibles a las alteraciones hidrológicas que afectan los flujos de aguas superficiales y/o subterráneas (Amezaga et al. 2002).

En la mayoría de los humedales los patrones de drenaje provenientes de los mantos acuíferos proporcionan un control en las variaciones de las láminas de agua. Cuando existe un aumento de los niveles del agua subterránea estos se encuentran cercanos a los cuerpos de agua, aún en épocas de sequía. En contraste, cuando no existen flujos subterráneos los niveles de agua

decrecen rápidamente cuando la evapotranspiración es mayor que la evaporación (Gilvear y Bradley 2009).

Se ha observado que la extracción de agua ocasiona la degradación de los humedales, pero debido a la compleja dinámica entre la hidrología del subsuelo y la superficie, ha sido difícil cuantificar los efectos. Debido a lo anterior, se menciona que no existe una constante entre los volúmenes de extracción y las condiciones de los humedales, pues en algunos sitios se realizan grandes extracciones ocasionando un impacto mínimo, mientras que en otros existe una degradación significativa aún con cambios insignificantes en los niveles de agua en el subsuelo (McCartney y Acreman 2009).

La respuesta de los ecosistemas y sus especies a los cambios en el régimen hídrico es compleja, pues depende de la sensibilidad y capacidad de resiliencia del ambiente y su biota. Además existen otros factores que inciden indirectamente en la integridad de los humedales, como la lluvia, la sedimentación, el cambio climático y las políticas de manejo (Howard y Merrifield 2010).

Los humedales difieren considerablemente en la cantidad de agua proveniente de fuentes subterráneas que necesitan (Gilvear y Bradley 2009). Howard y Merrifield (2010), clasifican los ecosistemas que dependen de los flujos de agua subterránea en cuatro grupos:

1. Manantiales, cuya fuente proviene de aguas profunda y sus niveles varían con la temporalidad, dependiendo la profundidad, tamaño y fuente de agua que lo alimenta
2. Humedales, que se alimentan de flujos de agua someros
3. Ríos en los que el caudal base depende de las descargas de aguas subterráneas, especialmente importantes en climas áridos y semiáridos
4. Vegetación, que extrae la humedad presente en las capas del suelo.

4.3.4. Indicadores ambientales para la evaluación de humedales

Un indicador debe ser la expresión del ambiente y el funcionamiento de sus componentes biológico, físico y químico, que constituyen elementos que pueden ser fácilmente medibles incluso en épocas pasadas, para realizar estudios comparativos. Los componentes que definen las características de los humedales (ciclo hidrológico, sustrato y vegetación), constituyen elementos básicos para el desarrollo de metodologías de evaluación (Mitsch y Gosselink 2000).

Los indicadores están basados principalmente en los componentes (suelos, vegetación y propiedades del agua), impactos y/o amenazas (presencia de actividades agrícolas) y grupos biológicos (peces, macroinvertebrados, anfibios). El área de influencia y las propiedades de los humedales son aspectos considerados para el desarrollo de métodos rápidos (Fennessy et al. 2007); en el cuadro 4-3 se muestran 16 métodos rápidos comúnmente utilizados para la evaluación de los factores ecológicos (Fennessy et al. 2007).

Cuadro 4-3. Categorías de indicadores utilizados en 16 métodos rápidos de evaluación de humedales. Números en paréntesis corresponden al número de trabajos revisados

| Hidrología | Sustrato | Vegetación | Paisaje |
|---|-------------------------------|---------------------------------------|--|
| Alteraciones hidrológicas (14) | Tipo de suelo (4) | Número de clases de vegetación (12) | Uso del suelo colindante (14) |
| Hidroperiodo (9) | Impactos en el sustrato (2) | Tipos de comunidades (8) | Conectividad a otros humedales o corredores (8) |
| Restricciones de salida (8) | Cambios de coloración (1) | Dispersión de especies invasoras (8) | Extensión de tipos de vegetación en un buffer (7) |
| Calidad del agua (8) | Profundidad del horizonte (1) | Alteraciones en la vegetación (6) | Extensión de uso del suelo antropogénico en buffer (5) |
| Conectividad de agua superficial (7) | Color Munsell (1) | Valoración del hábitat (5) | Tamaño del humedal (5) |
| Potencial de almacenamiento (7) | Microtopografía (1) | Especies amenazadas (4) | Proporción del humedal y el tamaño de la cuenca (3) |
| Recarga o descarga de agua subterránea (4) | Composición del sedimento (1) | Restos leñosos (3) | Uso del suelo en la cuenca (3) |
| Fuente(s) de agua (3) | | Vegetación dominante (2) | Morfología del humedal (2) |
| Grado de fluctuación de los niveles de agua (3) | | Diversidad de especies de plantas (2) | Posición del humedal en la cuenca (1) |
| Profundidad máxima del agua (1) | | Área de agua abierta (1) | |

Fuente: (Fennessy et al. 2007)

De acuerdo a la DSE (2007), existen diferentes enfoques para la caracterización de los humedales, que varían dependiendo los objetivos del proyecto. Los enfoques pueden considerar la evaluación de todo el humedal o de grupos biológicos específicos:

- **Condición del humedal:** Técnicas basadas en las características y componentes que definen a los humedales.
- **Condición del humedal:** Técnicas basadas en los impactos y amenazas conocidas que dañan a los humedales
- **Condición del humedal:** Técnicas que miden los grupos biológicos como indicadores de la condición del humedal
- **Condición de los grupos biológicos:** Técnicas basadas en índices que miden el estado de los grupos biológicos de los humedales (e.g. peces y anfibios) o combinación de varios grupos.

Algunos subindicadores son: color, oxígeno disuelto, temperatura del agua, extensión de la inundación, diversidad de macroinvertebrados y composición de la comunidad, nutrientes (fosforo y nitrógeno), transparencia, vegetación y fitoplancton (DSE 2007). Campbell et al. (2014), realizaron la evaluación de las comunidades vegetales para medir la respuesta a los periodos de inundación de los humedales, utilizando cuatro niveles de agrupación taxonómica: especie, género, familia y grupos funcionales (asociaciones vegetales). Siendo este último, el que mejor explica la variabilidad espacial de la vegetación, ya que permite realizar generalizaciones de la composición y abundancia relativa de los grupos funcionales bajo diferentes periodos de inundación.

4.4. Los inventarios de humedales y su aplicación

Para implantar políticas de manejo que sean acordes con las características de los humedales en cada región, es necesario conocer su localización y composición, a través de la obtención de cartografía que apoye la toma de decisiones. Los inventarios de humedales están basados principalmente en el análisis de datos en campo, apoyados con fotografías aéreas, mapas topográficos y más recientemente con el uso de imágenes de satélite, así como información contenida en la literatura existente de inventarios forestales (Finlayson y Davidson 2001).

Distintas metodologías han sido desarrolladas para la detección de cuerpos de agua mediante el uso de sensores remotos, evaluando las características del espectro electromagnético para identificar: 1) extensión y distribución de los humedales; 2) tipo de humedales; 3) composición y cobertura; 4) identificación de humedales con características emergentes; y 4) características indicativas de su calidad (Chuvieco 2002; Finlayson y Spiers 1999; Ozesmi y Bauer 2002). Estas herramientas a su vez proporcionan información estadística cuantitativa de los cambios temporales en los humedales (sucesión ecológica) y el estatus de las condiciones de los humedales en distintos periodos de tiempo (Dahl 2006).

La mayor parte de los sistemas clasificatorios están basados en la descripción de la función (qué es lo que hacen), la estructura (cómo son) y la utilidad (cómo son manejados). Los sistemas de clasificación estructurales, son útiles para describir los tipos de humedales y su disposición en el espacio geográfico, por lo que son efectivos para la elaboración de inventarios y cartografía. Los funcionales, consideran el régimen hidrológico como un componente crítico del comportamiento de los humedales, sentando las bases para el establecimiento de alternativas de manejo. Las

clasificaciones que toman en cuenta la utilidad, están relacionados con el manejo y aprovechamiento (Brinson 2011).

Para desarrollar un sistema clasificatorio bajo un enfoque geográfico, es necesario diseñar una metodología que considere una determinada escala espacial (global, continental, regional y local) (Berlanga-Robles y Ruiz-Luna 2008; C. Finlayson y Davidson 2001).

En México se han realizado esfuerzos para contribuir al conocimiento de los humedales, sin embargo, aún no se cuenta con un inventario nacional que proporcione información completa para su manejo y conservación (Berlanga-Robles y Ruiz-Luna 2008), pues solo se han presentado estudios aislados que aportan un panorama parcial de la situación actual.

De acuerdo a estimaciones, en el país existen aproximadamente 3.3 millones de hectáreas que corresponden al 0.6% de los humedales a nivel mundial (Olmsted 1993), de las cuales 1.5 millones de hectáreas corresponden a humedales costeros y 1.8 millones a continentales, incluyendo artificiales (De la Lanza y García 2002).

Carrera et al. (2010) con base en trabajos de clasificación digital con imágenes Landsat han desarrollado a la fecha cartografía de humedales para distintas regiones del país (escala 1:100,000), obteniendo un total de 3.3 millones de hectáreas de humedales costeros y 2.2 millones de humedales continentales. El Instituto Nacional de Estadística y Geografía, obtuvo la cartografía de Humedales potenciales y Cuerpos de Agua (escala 1:250,000), sin embargo, la metodología utilizada se limita a localizar áreas que poseen el potencial para contener un humedal, por lo que no debe ser considerado un inventario. La Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, efectuó un inventario nacional de los manglares utilizando imágenes SPOT 5 (escala 1:50,000), para conocer la superficie y el estatus de conservación actual de estos ecosistemas (CONABIO 2009).

Debido a que no se cuenta con un inventario completo, tampoco se tienen detalles de la dinámica temporal y los impactos del cambio climático, por lo que es necesario realizar trabajos en los humedales prioritarios para evaluar la problemática ambiental de acuerdo a las necesidades específicas (Erwin 2009). De acuerdo a una revisión de los principales sistemas clasificatorios de humedales realizado por Berlanga-Robles y Ruiz-Luna (2008), la mayor parte de los trabajos han utilizado como referencia la Convención Ramsar (Ramsar 2012), la geomorfológica de Semeniuk y Semeniuk (1997) y de Cowardin et al. (1979) (Cuadro 4-4).

Cuadro 4-4. Comparativo de los sistemas de clasificación

| Característica | 1 | 2 | 3 | Observaciones |
|--|----|----|----|--|
| Objetividad (dentro de su estructura define a los tipos de humedales sin ambigüedades) | Si | No | Si | |
| Incluye a todos los tipos de humedales naturales | Si | Si | No | En 3 únicamente incluye humedales interiores, pero se están realizando modificaciones para incluir humedales marinos y costeros |
| Incluye humedales artificiales | No | Si | No | En 1 la acción humana sólo se considera como un modificador especial usado para describir. La esencia de la clasificación geomorfológica no permite la inclusión de humedales artificiales |
| Jerárquico | Si | No | No | En 2 la jerarquía no es explícita y existe una sola categoría (clase). En 3 únicamente la descripción de las formas primarias es sistemática y jerárquica |
| Genera traslape entre los tipos de humedales/clases | No | Si | No | |
| Genera divisiones innecesarias | Si | Si | No | |
| Es consistente: define claramente los atributos y criterios para clasifica | Si | No | Si | |
| Parte de una definición propia de humedal | Si | Si | No | En 3 se supone que asume la definición de Ramsar |
| Es abierta (se pueden incorporar categorías en diferentes niveles) | Si | Si | Si | En 2 es un proceso complicado porque se trata de reformas a acuerdos internacionales. 3 abierta sólo para humedales naturales |
| Visualiza a los humedales como ecosistemas | No | No | Si | En 1 sólo en algunas categorías superiores |
| Su estructura permite establecer fronteras artificiales dentro de los ecosistemas de humedales para fines de administración o manejo | Si | Si | Si | |
| Facilita el estudio de los humedales a nivel de paisaje | No | No | Si | En 1 únicamente en las categorías superiores |
| Los tipos de humedales o atributos principales para su clasificación se pueden captar con plataformas de percepción remota | Si | Si | Si | En 1 de manera parcial |
| Se requiere poco trabajo de campo para obtener datos de atributos fundamentales | No | Si | Si | En 1 se requiere de conocimientos especializados una vez que se rebasa el nivel de clase. Para 3 es necesario un buen conocimiento de las unidades primarias |
| Su aplicación en la realización de un inventario sería rápida y a bajo costo | Si | Si | No | No se cuenta con elementos suficientes para desarrollar la clasificación con criterios geomorfológicos, además de que no incluye todos los tipos de humedal en México |
| Facilita la comparación de humedales entre países y la colaboración internacional en la investigación y manejo de humedales | No | Si | No | A pesar de que la clasificación 1 ha tenido amplia aceptación a nivel internacional y es la base de la 2, ésta generalmente se toma con modificaciones lo que dificulta su uso para fines de comparación |

Fuente: (Berlanga-Robles and Ruiz-Luna 2008)

Sistema de clasificación de Cowardin et al. (1979)¹Sistema de clasificación de la Convención sobre humedales Ramsar (2012)²Sistema de clasificación geomorfológico de Semeniuk y Semeniuk (1995)³

El sistema clasificatorio de Cowardin et al. (1979), se utiliza con mayor frecuencia debido a su flexibilidad y claridad en la definición de las clases, lo que promueve la identificación y agrupación de los grupos funcionales independientemente de la escala utilizada (Berlanga-Robles y Ruiz-Luna 2008).

4.4.1. Estructura de los sistemas de clasificación de humedales

Los *sistemas* en los humedales se definen por sus características hidrológicas, geomorfológicas, químicas y/o biológicas. Las *clases* se delimitan por sus por formas dominantes de vegetación, fisiografía y composición del sustrato. Los cinco Sistemas los conforman: *Marino*, *Estuarino*, *Fluvial*, *Lacustre* y *Palustre* (Berlanga-Robles y Ruiz-Luna 2008).

El *sistema marino* se refiere al mar abierto que se extiende desde la plataforma continental hasta la línea costera, que corresponde al límite de influencia de las mareas. La distribución de plantas y animales en este sistema, es producto de la exposición a las olas, la naturaleza del sustrato, la amplitud de las mareas y la latitud (Cowardin et al. 1979; Carrera y de la Fuente 2003)

El *sistema estuarino*, consiste en hábitats de aguas profundas y humedales que están influenciados por las mareas, con variaciones en los periodos de inundación y donde la influencia marina puede ser ocasional o continua, comúnmente conocidos como estuarios y lagunas costeras. La salinidad de estos humedales puede en ocasiones ser mayor al agua de mar, producto de la evaporación. Este sistema es influenciado desde el punto de vista hidrológico por las mareas del océano, la precipitación, los escurrimientos, la evaporación y el viento (Cowardin et al. 1979).

Incluyen humedales dominados por plantas que crecen sobre o debajo de la superficie del agua. Entre los ecosistemas que conforman los sistemas estuarinos se encuentran los manglares constituidos principalmente por especies como el mangle rojo (*Rhizophora mangle*), el mangle blanco (*Laguncularia racemosa*), el mangle negro (*Avicennia germinans*) y el mangle botoncillo (*Conocarpus erectus*). También se tienen registros de *Rhizophora harrisoni* y *Avicennia bicolor*. Estos ecosistemas tienen una cobertura aproximada de 770 mil hectáreas en el país y son considerados de gran importancia ecológica debido a que brindan una gran variedad de servicios ambientales (CONABIO 2009).

El *sistema lacustre* incluye lagos y reservorios permanentemente inundados, lagos intermitentes y lagunas con influencia marítima con salinidades menores a 0.5 ‰. También áreas aisladas del sistema palustre son incluidas en esta clasificación (Cowardin et al. 1979).

Incluye humedales y hábitats de aguas profundas situados en depresiones topográficas o formados por el represamiento de ríos y canales, sin presencia de árboles, arbustos emergentes persistentes, musgos o líquenes emergentes que tengan una cobertura mayor al 30%, y con un área mayor a 8 hectáreas. En caso de ser menor a 8 ha, entonces deberá tener una profundidad mayor a 2 metros. Son ecosistemas que están rodeados por tierras altas o por humedales dominados por árboles, arbustos o plantas emergentes y áreas de inundación producto del represamiento de los canales o ríos.

La presencia de vegetación en este sistema está representada por comunidades de plantas flotantes que requieren agua superficial para su ciclo de vida como es el caso de: *Nympha* sp., *Najas* sp., *Potamogeton* sp. La vegetación emergente en estos hábitats no son persistentes, ejemplos de la composición florística presente en este sistema son: *Sagittaria* sp., *Echinodorus* sp., *Atriplex* sp (Carrera y de la Fuente 2003; Lot et al. 2013)

El *sistema palustre* en el sistema clasificatorio de Cowardin et al. (1979), incluyen humedales con vegetación dominada por árboles, arbustos, emergentes persistentes, musgos y líquenes emergentes; son conocidos comúnmente como marismas, pantanos y llanuras. También se incluyen pequeños cuerpos de agua permanente o intermitentes poco profundos. Los humedales palustres pueden estar geográficamente situados en los límites de los lagos, en canales de ríos o estuarios, en las llanuras de inundación de los ríos, en cuencas aisladas o en sitios con poca pendiente.

Para que los humedales sean considerados dentro del Sistema Palustre es necesario que su área sea menor a 8 hectáreas, que no exista la presencia de bordos, que la profundidad no sea mayor a 2 metros y que la salinidad sea menor a 0.5 ‰ (Cowardin et al. 1979).

La vegetación, constituye un aspecto muy importante en los humedales de tipo palustre, destacándose aquella de tipo emergente. Entre la clase emergente se ubican también importantes especies que son consideradas invasivas (*Typha* sp.) (Jones 2014). Dentro de la vegetación emergente persistente en los humedales del país se describen principalmente a *Cyperus* sp., *Scirpus* sp., *Juncus* sp., *Eleocharis* sp., *Carex* sp., *Sporobolus* sp., de las especies no persistentes se

describen *Sagittaria* sp., *Echinodorus* sp., *Juncus* sp., *Amaranthus* sp., *Atriplex* sp. (Carrera y de la Fuente 2003; Ramos Durón et al. 2004; Lot 2012)

El *sistema fluvial* corresponde a los humedales o hábitats de aguas profundas contenidas en un canal, con excepción de los humedales dominados por árboles, arbustos, emergentes persistentes, musgos o líquenes emergentes y los hábitats que contienen sales derivadas del agua de mar en concentraciones mayores a 0.5 ‰. Los canales son conductos naturales o creados artificialmente con movimiento de agua o que constituyen una conexión entre dos cuerpos de agua. Los límites de estos ecosistemas generalmente están definidos por tierras altas, por bordos o por humedales compuestos por vegetación emergente; en algunos ríos los límites están definidos por bancos de material depositados en los límites o por depresiones intermontanas. Cowardin et al. (1979), consideran a los manantiales que descargan en un canal como parte de los sistemas Fluviales.

El sistema fluvial es uno de los que mayor controversia presentan en su clasificación, ya que algunos autores consideran que todos los humedales que son formados a partir de los flujos de los ríos deben formar parte de los sistemas fluviales, debido a que estos ecosistemas son resultados de las inundaciones de los ríos; sin embargo, Cowardin et al. (1979), considera que las planicies de inundación corresponden a clases diferentes ya que únicamente son temporalmente afectados por los flujos excedentes de los ríos; por el contrario generalmente el agua subterránea es la que incide en los niveles de inundación de los lagos, las ciénegas y las marismas.

Este sistema incluye la vegetación de galería que se encuentra generalmente en las orillas de los ríos, generalmente compuesto por *Salix* sp., *Populus* sp., *Prosopis* sp., y *Tamarix* sp. (Carrera y de la Fuente 2003; Cook et al. 2009; Kovalchik y Clausnitzer 2004), así como la vegetación flotante que se distribuye en la superficie de los ríos.

4.5. Aplicaciones de la teledetección en la evaluación de humedales

La teledetección es definida como aquellas técnicas que permiten obtener información a distancia de los objetos sobre la superficie terrestre. Este término no se refiere únicamente a los procesos en la obtención de las imágenes, sino también a su procesamiento para una determinada aplicación. En las últimas décadas ha aumentado la disponibilidad de datos proveniente de distintos sensores remotos, favoreciendo las investigaciones científicas y las aplicaciones de estas técnicas (Chuvienco 2002).

La mayoría de los inventarios están basados en el levantamiento de información en campo, con el apoyo de fotografías aéreas y mapas topográficos; a partir de la década de 1970 se han utilizado técnicas de teledetección para el análisis espacial de los humedales mediante imágenes de satélite (Finlayson y Davidson 2001; Goward et al. 2001; Kristof y Wismiller 2009). Sin embargo, en muchos países el uso de estos insumos ha sido limitado debido a la disponibilidad y a los altos costos, principalmente en áreas extensas, terrenos inaccesibles o problemas con la cobertura de nubes.

No obstante, la disponibilidad actual de insumos para la teledetección son más variados y aportan un mayor detalle en las bandas del espectro, la temporalidad y a la capacidad de distinguir variaciones en la energía detectada, aspectos que son relevantes para clasificar cubiertas o establecer modelos de significado físico (Chuvienco 2002). La disponibilidad actual de sensores con productos de alta resolución y el desarrollo de nuevas metodologías de teledetección, han contribuido enormemente en la generación de productos cartográficos detallados para comprender las respuestas a los procesos antrópicos (Baker et al. 2007; Roeck et al. 2008; Davranche et al. 2010).

Los límites de los humedales presentan variaciones en el tiempo, propiciando cambios en su estructura y composición, los cuales pueden ser identificados y medidos mediante teledetección (Finlayson y Spiers 1999). La distribución y composición de los humedales obedece a las condiciones ambientales, mismas que son indicativas de su composición química y biológica. La teledetección tiene numerosas ventajas para el monitoreo, especialmente cuando se trata de áreas extensas, debido a que proporciona información relacionada con el uso del suelo de las áreas adyacentes, así como los cambios en distintos periodos de tiempo (Klemas 2011; Ozesmi y Bauer 2002).

Las herramientas de teledetección, generalmente están dirigidas a la identificación de grupos biológicos, las fluctuaciones de inundación y sus cambios temporales, facilitando la obtención de medidas cuantitativas de los humedales y sus áreas de influencia (Dahl 2006). Sin embargo, la delimitación de los humedales utilizando la composición florística varía entre los diferentes tipos de humedales (Grundling 2014).

El sustrato y el régimen hidrológico determinan las características de las comunidades vegetales de los humedales (Grundling 2014). Proporcionando firmas espectrales características en cada una

de las bandas de los sensores remotos, de acuerdo a su composición y condición ambiental. Sin embargo, en ocasiones existe dificultad para la separación de las clases, debido a la similitud de las firmas espectrales (Dahl 2006).

Se han desarrollado diferentes metodologías para la detección de cuerpos de agua y la evaluación de humedales: 1) extensión y distribución de los humedales; 2) tipo de humedales; 3) composición y cobertura; 4) identificación de humedales con características emergentes; y 4) características indicativas de su calidad (Finlayson y Spiers 1999; Ozesmi y Bauer 2002). Posteriormente, cuando la información es integrada en los Sistemas de Información Geográfica, es posible la obtención de inventarios, análisis de cambios y para el modelamiento y predicción de inundaciones (Finlayson y Spiers 1999).

Sin embargo, actualmente las herramientas de teledetección aún no son confiables para la evaluación de parámetros de la química del agua, salinidad, profundidad, sustrato y la composición de especies (Dahl 2006).

4.5.1. Principales plataformas de teledetección utilizadas en humedales

La altura y velocidad de las plataformas están calculadas para que se observe cada porción de la Tierra a una hora solar fija, características determinadas por la misión del satélite. Cuando el objetivo es tomar grandes superficies en una sola imagen para observar fenómenos globales y dinámicos como la nubosidad, entonces se trabaja con satélites geoestacionarios; por el contrario, si se requiere un mayor detalle en la observación se utilizan plataformas de órbitas más bajas (Chuvienco 2002). Debido a la diversificación en las tecnologías de teledetección, los sensores que actualmente han tenido una mayor aceptación en el ámbito científico son el Landsat y Spot.

El programa de Observación de la Tierra más antiguo es el Landsat, que comenzó el 23 de julio de 1972 con el Landsat 1 con un sensor multiespectral MSS, en 1982 aparecieron las imágenes Landsat con sensor TM (*Thematic Mapper*), en 1999 el programa Landsat 7 fue lanzado con un escáner ETM, y en febrero de 2013 Landsat 8 que cuenta con un generador operacional de imágenes OLI (*Operation Land Imager*) y el sensor infrarrojo térmico TIRS (*Thermal Infrared Sensor*), con el lanzamiento de este sensor se espera que diariamente sean adquiridas 400 escenas que serán archivadas por el USGS (Cuadro 4-5). Estas imágenes han sido ampliamente utilizadas con fines de mapeo de vegetación, uso del suelo, edafología, geología, temperatura de la superficie, entre otros (Bakker et al. 2001).

Cuadro 4-5. Comparación de las características de los satélites Landsat 7 y Landsat 8

| Landsat 7 TM | | | Landsat 8 OLI | | |
|---------------|-------------------------|----------------|-----------------|-------------------------|----------------|
| Banda | Ancho (μm) | Resolución (m) | Banda | Ancho (μm) | Resolución (m) |
| Banda 1 Azul | 0,45-0,52 | 30 | Banda 1 Costero | 0.43 - 0.45 | 30 |
| Banda 2 Verde | 0,52-0,60 | 30 | Banda 2 Azul | 0.45 - 0.51 | 30 |
| Banda 3 Rojo | 0,63-0,90 | 30 | Banda 3 Verde | 0.53 - 0.59 | 30 |
| Banda 4 NIR | 0,76-0,90 | 30 | Banda 4 Rojo | 0.64 - 0.67 | 30 |
| Banda 5 SWIR | 1,55-1,75 | 30 | Banda 5 NIR | 0.85 - 0.88 | 30 |
| Banda 6 SWIR | 10,40-12,50 | 30 | Banda 6 SWIR | 1.57 - 1.65 | 30 |
| Banda 7 TIR | 2,08-2,35 | 30/60 | Banda 7 SWIR | 2.11 - 2.29 | 30 |
| Banda 8 Pan | 0.52-0.90 | 15 | Banda 8 Pan | 0.50 - 0.68 | 15 |
| | | | Banda 9 Cirrus | 1.36 - 1.38 | 30 |
| | | | Banda 10 TIRS 1 | 10.6 - 11.19 | 100 |
| | | | Banda 11 TIRS 2 | 11.5 - 12.51 | 100 |

El sistema SPOT-1 (*Systeme Pour l'Observation de la Terre*) fue lanzado y desarrollado por la Agencia Espacial Francesa (CNES) en el año de 1986, con un sensor de tipo CCD que tenía la capacidad de tomar información pancromática de 10 metros de resolución, situación sin precedentes. En 1998 se desarrolló el programa SPOT-4 con un sensor HRVIR con bandas especiales para vegetación (Bakker et al. 2001). Para 2002 fue puesto en órbita el satélite SPOT-5, con la implementación del HRS (*High Resolution Stereoscopic*) que permite la optimización de Modelos Digitales de Elevación, además de resoluciones de 10 metros en sus bandas multiespectrales y 5 metros en la pancromática (Cuadro 4-6) (Fontannaz y Begni 2007).

Cuadro 4-6. Características del satélite Spot 5

| Banda | Ancho (μm) | Resolución (m) |
|----------------------------|-------------------------|----------------|
| Banda 1 Verde | 0.50 – 0.59 | 10 |
| Banda 2 Rojo | 0.61 – 0.68 | 10 |
| Banda 3 Infrarrojo cercano | 0.78 – 0.89 | 10 |
| Banda 4 Infrarrojo medio | 0.58 – 1.75 | 20 |
| Pancromática | 0.48 – 0.71 | 5 a 2.5 |

4.5.2. Clasificación digital de humedales

Las imágenes de satélite constituyen un insumo apropiado para el inventario y monitoreo de humedales, cuando los recursos económicos son limitados y existe poca información disponible. En los últimos años se han desarrollado diversas metodologías para al procesamiento digital de imágenes y la detección de cuerpos de agua para imágenes Landsat y SPOT (Ozesmi y Bauer 2002). Los sensores utilizados comúnmente en la identificación y clasificación de humedales son Landsat, Spot, AVHRR y LiDAR (Ozesmi y Bauer 2002; Baker *et al.* 2007; Frohn *et al.* 2009; Zhou *et al.* 2011).

Los métodos de clasificación pueden dividirse en tres categorías: supervisados, no supervisados e híbridos (una combinación de ambos). La principal característica de la clasificación supervisada es la identificación de píxeles *a priori* para conformar campos de entrenamiento a partir del cual se seleccionan las muestras para cada una de las categorías; en la clasificación no supervisada, se agrupan los píxeles con valores espectrales similares mediante un análisis estadístico de manera automática dentro de la imagen, quedando a criterio del usuario la labor de encontrar las correspondencias entre los grupos y las categorías de interés (Chuvienco 2002). En el método mixto se combinan el análisis supervisado y no supervisado aplicándolos separadamente sobre la misma imagen, en seguida se sintetizan las clases extraídas en ambos. Los métodos de clasificación requieren a menudo la selección de cuantiosos datos de buena calidad para el establecimiento de campos de entrenamiento (áreas homogéneas de información o cobertura), utilizados para la clasificación supervisada y no supervisada. Sin embargo, esta labor es complicada particularmente en el uso de imágenes históricas (Lu et al. 2004).

De acuerdo a una revisión realizada en varios trabajos por Ozesmi y Bauer (2002) encontraron que en la clasificación de humedales es más frecuente el uso de la clasificación no supervisada. Algunos procesos como la obtención de índices de vegetación, la aplicación de métodos de postclasificación, el modelamiento espacial y la integración de datos SIG, son frecuentemente utilizados para mejorar los resultados (Lu et al. 2004).

Existen dificultades para lograr separar las diferentes clases presentes en los humedales, principalmente con la agricultura y algunos tipos de vegetación, debido a la similitud de sus firmas espectrales que son una medida de respuesta a las características en las bandas del sensor. De manera general, se puede decir que los humedales temporal o permanentemente inundados son los que representan mayor facilidad para ser detectados debido a su condición espectral, por lo que es recomendable utilizar imágenes en fechas con niveles máximos de inundación. Según Ozesmi y Bauer (2002), las limitantes de la clasificación digital en los inventarios de humedales son los siguientes: 1) la fluctuación de los niveles de agua, que ocasionan cambios en la respuesta espectral de la vegetación; 2) áreas afectadas por incendios, que pueden ser confundidas espectralmente con cuerpos de agua; 3) las variaciones en el patrón de crecimiento y distribución de la vegetación emergente.

Las superficies acuáticas absorben o transmiten la mayor parte de la radiación óptica que reciben. Su mayor reflectividad se presenta en el espectro azul, reduciéndose paulatinamente hacia el

infrarrojo cercano y medio (Chuvieco 2002), tomando en cuenta esto, se han desarrollado algoritmos que ayudan a la identificación de humedad mediante el uso de bandas infrarrojas como el Índice Diferencial Normalizado del Agua (NDWI) (McFeeters 1996; Han-Qiu 2005; Baodong et al. 2008) y el Índice Diferencial Normalizado de los estanques o charcas (NDPI) (Lacaux et al. 2007); también para efectos de monitorear la condición de la vegetación acuática es de utilidad el Índice de Vegetación Normalizado (NDVI) (Manju et al. 2005).

4.5.3. Herramientas de análisis temporal

Los ecosistemas se encuentran en constante cambio, estos pueden ser catalogados como conversión cuando existe un remplazo de un tipo de cobertura por otro y modificación cuando existen cambios que inciden en la composición de las coberturas. Los cambios son propiciados por prácticas de manejo y fuerzas sociales, políticas y económicas que controlan los usos del suelo (Rosete et al. 2008)

Una de las aportaciones más importantes de la teledetección en el estudio del medio ambiente, es la capacidad de analizar datos multitemporales, que han demostrado un gran potencial para detectar y cartografiar los cambios en los ecosistemas, independientemente de los agentes causales (Chuvieco 2002; Coppin et al. 2004; Lu et al. 2004). De acuerdo a Rosete et al. (2008), el proceso de análisis de cambio implica: 1) detección e interpretación cartográfica y digital del cambio; 2) análisis de los patrones de cambio de cobertura; y 3) análisis de las causas del cambio.

Existen dos criterios para la evaluación multitemporal, el primero se centra en los valores de reflectividad y las texturas de la imagen, incluye los métodos de álgebra de mapas, transformaciones matemáticas, post-clasificación y modelación (multicriterio y autómatas celulares); el segundo se basa en la temporalidad de la información, incluyendo el análisis bitemporal (dos fechas), multitemporal (varias fechas o series de tiempo) y la predicción de cambios a futuro (Chuvieco 2002; Jiménez-Moreno et al. 2011).

El estudio multitemporal provee un análisis cualitativo y/o cuantitativo de las imágenes, con un número variable de fechas, empleando técnicas estadísticas para la evaluación de series de tiempo, correlación, perfiles de tiempo, desviación de la imagen y análisis de vectores de cambio entre dos series (Jiménez-Moreno et al. 2011). Entre las técnicas más comúnmente utilizadas para la evaluación multitemporal están el análisis de componentes principales y la comparación post-clasificación; en la actualidad se han desarrollado otras metodologías, como el estudio de firmas

espectrales, redes neurales artificiales y la integración de datos geoestadísticos en los sistemas de información geográfica, cuyo uso se extiende rápidamente. Un ejemplo de la aplicación de métodos estadísticos para medir los cambios en diferentes fechas a partir del cálculo de asociación es el índice Kappa, que permite estimar el grado de acuerdo entre filas y columnas de una matriz, indicando el cambio entre las dos fechas (Chuvieco 2002; Lu et al. 2004).

Como parte del análisis multitemporal, el desarrollo de metodologías para la predicción de cambios a futuro constituye una herramienta de mucha utilidad, ya que estos determinan la probabilidad de cambio bajo escenarios tendenciales. Entre las técnicas utilizadas están las cadenas de Markov, autómatas celulares y el análisis multicriterio (Magnussen et al. 2004; Rosete et al. 2008; Jiménez-Moreno et al. 2011).

Existen diferentes enfoques metodológicos específicos para evaluar y detectar cambios en zonas áridas mediante el uso de imágenes de satélite (Zhou et al. 2011). La disponibilidad temporal de las imágenes de satélite favorece su aplicación en la evaluación de los procesos de cambio; esta temporalidad es de utilidad también para la separación de clases, tomando en cuenta estados fenológicos de las plantas (Townsend y Walsh 2001). Además, mediante el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se han desarrollado modelos predictivos utilizando técnicas geoestadísticas, detectando los factores que afectan la estructura y función de los humedales (Mironga 2004; Roeck et al. 2008).

4.6. Aspectos hidrológicos y legales del valle de Cuatro Ciénegas

La región de Cuatro Ciénegas se localiza en una de las regiones áridas del país; sin embargo, aunque las lluvias son escasas, existe abundante agua subterránea que emerge a la superficie a través de manantiales.

El valle se encuentra enclavado en la región geohidrológica llamada Cuatro Ciénegas- San Miguel, en el que se localizan dos mantos acuíferos. Corresponde a la región hidrológica Bravo-Conchos formando parte de la cuenca de la Presa Falcón- Río Salado y la subcuenca del Río Salado-Nadadores (SEMARNAT-IMTA 2004). Es una cuenca endorreica con un drenaje de tipo dendrítico y los arroyos que se generan en las sierras desaparecen al infiltrarse en los márgenes del valle. Wolaver (2008), menciona la presencia de aproximadamente 300-500 manantiales, que están distribuidos principalmente en las zonas adyacentes a la Sierra de San Marcos y Pinos, con

profundidades que van desde uno hasta diez metros, con diámetros que llegan a alcanzar hasta 200 metros.

De acuerdo a Nuñez (2006) los acuíferos del valle se encuentran actualmente sobreexplotados debido a las actividades económicas de la región y al crecimiento poblacional, que durante los últimos 50 años han originado una importante presión sobre los recursos hídricos; propiciando alteraciones en la humedad del suelo, cambios en los patrones de drenaje y en algunos casos extremos la desaparición de humedales (Contreras-Balderas 1984).

Contreras-Balderas (1984) menciona que, a partir de la década de 1960 han existido importantes modificaciones en la hidrología por la apertura de canales. De manera particular, el agua de la poza la Becerra ha sido conducida fuera del valle de Cuatro Ciénegas por medio de un canal construido de 1961- 1964, causando la desecación de los humedales asociados al Arroyo la Becerra. También el Río Mezquites, cuyo afluente drenaba anteriormente en una laguna temporal, en la actualidad fluye fuera del valle a través de canales artificiales (SEMARNAT-IMTA 2004).

Los flujos de los canales presentan variaciones estacionales y anuales debidas principalmente a las fluctuaciones en los periodos de precipitación y los niveles en las pozas. Existen diversas fuentes que reportan datos de aforos de los canales, que en conjunto aportan un caudal aproximado de 1,736 a 3,155 litros por segundo (54 – 99.5 millones de m³ por año) (Cuadro 4-7).

Cuadro 4-7. Información general de los volúmenes aforados en los canales del valle de Cuatro Ciénegas.

| Canal | Año de construcción | PROFAUNA (1998), IMTA (2004) | CNA/Lesser (2001) | CONANP (2003-2006) | CNA/Coah (1973-2006) | Superficie de riego (ha) |
|-----------------|---------------------|------------------------------|-------------------|----------------------------|----------------------|--------------------------|
| Santa Tecla | 1966 | 220-320 | 328 | 280 | 328-400 | 600 |
| Saca Salada | 1902 | 800-1,300 | 1736 | 1600 | 1,247-1,736 | 1,500 |
| La Becerra | 1966 | 580-645 | 600 | Salida-760 Agrícola-600 | 600-768 | 400-500 |
| El Venado | 1969 | 66-98 | 62 | s/d | s/d | 100 |
| Pozas Azules | | 30-80 | 80 | s/d | s/d | 100 |
| El Agua Grande | | s/d | s/d | s/d | s/d | s/d |
| Julio Arredondo | | 40-60 | 250 | 220 | s/d | s/d |

*Volúmenes presentados en litros por segundo (l/s)

Un volumen de 17.8 millones de m³ se utilizan para el riego de parcelas al interior del valle de Cuatro Ciénegas, mientras que 81.7 se exportan a Lamadrid, Sacramento, San Buenaventura y Nadadores, a través de los canales Saca Salada y Santa Tecla (CONAGUA 2009). Se estima que 31.8

millones de m³ son destinados a la agricultura, de los cuales 14.0 son de origen subterráneo y 17.8 superficial, que se conducen por medio de los canales mencionados (DOF 2008).

La diferencia entre el caudal brotante y el entregado a través de los canales, corresponde al agua vertida a los humedales adyacentes, así como a las pérdidas en la conducción en la red de canales, los cuales sostienen la vegetación hidrófila y alimentan el acuífero por infiltración.

La recarga del acuífero de Cuatro Ciénegas se lleva a cabo por la infiltración del agua de lluvia, principalmente sobre los flancos de las sierras en los afloramientos de calizas y los escurrimientos superficiales a lo largo de los arroyos.

En el área existen dos unidades acuíferas, uno de características granulares y uno calizo. El acuífero granular está conformado por materiales aluviales y lacustres de baja permeabilidad y transmisividad, abarcando prácticamente toda la superficie de los valles con un espesor de 20 a 40 metros, limitado inferior y lateralmente por rocas sedimentarias poco permeables de origen marino cuya recarga está originada por la infiltración de escurrimientos superficiales en los flancos de las montañas y los bordes de los valles con un volumen estimado de 10- 15 millones de m³ al año (SARH 1980). El acuífero calizo se caracteriza por la heterogeneidad de sus rocas carbonatadas que son atacadas por disolución, por lo que su transmisividad es alta y sus caudales van desde unos cuantos litros hasta varios metros cúbicos por segundo. La descarga de los acuíferos calizos es el origen de los manantiales que se localizan en los flancos de las montañas y en los valles donde el relleno es muy delgado, se estima que su descarga anual es de aproximadamente 4.8 millones de m³.

Sin embargo, el régimen de recarga y descarga natural ha sido modificado, debido a la construcción de canales que conducen la mayor parte del agua obtenida en las pozas, hacia el exterior del valle lo que ha provocado la desecación de humedales y el abatimiento de los niveles freáticos.

De acuerdo a la definición de la Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento (DOF 2013a), los humedales son las zonas de transición entre los sistemas acuáticos y terrestres que constituyen áreas de inundación temporal o permanente, sujetas o no a la influencia de mareas, como pantanos, ciénegas y marismas, cuyos límites los constituyen el tipo de vegetación hidrófila de presencia permanente o estacional; las áreas en donde el suelo es predominantemente hídrico y las áreas lacustres o de suelos permanentemente húmedos por la descarga natural del acuífero.

Debido a la problemática hídrica en Cuatro Ciénegas es importante considerar los aspectos legales en torno a los aprovechamientos de la región, para identificar las políticas que inciden directamente en el aprovechamiento y conservación de los recursos hídricos.

El sustento legal para el aprovechamiento de los recursos hídricos en el país tiene su base en el Artículo 27, párrafo 5 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, en donde se enuncia lo siguiente: *...“Las aguas del subsuelo pueden ser libremente alumbradas mediante obras artificiales y apropiarse por el dueño del terreno, pero cuando lo exija el interés público o se afecten otros aprovechamientos, el Ejecutivo Federal podrá reglamentar su extracción y utilización y aún establecer zonas vedadas, al igual que para las demás aguas de propiedad nacional. Cualesquiera otras aguas no incluidas en la enumeración anterior, se considerarán como parte integrante de la propiedad de los terrenos por los que corran o en los que se encuentren sus depósitos, pero si se localizaren en dos o más predios, el aprovechamiento de estas aguas se considerará de utilidad pública, y quedará sujeto a las disposiciones que dicten los Estados”* (DOF 2013b).

Por su parte en la Ley de Aguas Nacionales publicada el 1 de diciembre de 1992 (DOF 2013a) se establecen los Derechos de Explotación, Uso o Aprovechamiento de Aguas Nacionales, en los siguientes artículos:

Artículo 16. *La presente Ley establece las reglas y condiciones para el otorgamiento de las concesiones para explotación, uso o aprovechamiento de las aguas nacionales, en cumplimiento a lo dispuesto en el Párrafo Sexto del Artículo 27 Constitucional.*

Son aguas nacionales las que se enuncian en el Párrafo Quinto del Artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.

El régimen de propiedad nacional de las aguas subsistirá aun cuando las aguas, mediante la construcción de obras, sean desviadas del cauce o vaso originales, se impida su afluencia a ellos o sean objeto de tratamiento.

Las aguas residuales provenientes del uso de las aguas nacionales, también tendrán el mismo carácter, cuando se descarguen en cuerpos receptores de propiedad nacional, aun cuando sean objeto de tratamiento.

Artículo 17. *Es libre la explotación, uso y aprovechamiento de las aguas nacionales superficiales por medios manuales para uso doméstico conforme a la fracción LVI del Artículo 3 de esta Ley, siempre que no se desvíen de su cauce ni se produzca una alteración en su calidad o una disminución significativa en su caudal, en los términos de la reglamentación aplicable.*

No se requerirá concesión para la extracción de aguas marinas interiores y del mar territorial, para su explotación, uso o aprovechamiento, salvo aquellas que tengan como fin la desalinización, las cuales serán objeto de concesión.

Artículo 18. *Las aguas nacionales del subsuelo podrán ser libremente alumbradas mediante obras artificiales, salvo cuando por causas de interés o utilidad pública el Titular del Ejecutivo Federal establezca zona reglamentada, de veda o de reserva o bien suspenda o limite provisionalmente el libre alumbramiento mediante Acuerdos de carácter general.*

Para el establecimiento de zonas reglamentadas de veda o reserva, el Ejecutivo Federal, a iniciativa de “la Comisión” que se apoyará en las propuestas que elaboren los Organismos de Cuenca, publicará la declaratoria que se expida cuando se comprueben condiciones de sobreexplotación para acuíferos y unidades hidrogeológicas específicas, cuidando de deslindar cuando así se requiera, la aplicación de las disposiciones que se establezcan para acuíferos superiores, en relación con otras unidades hidrogeológicas que contengan acuíferos inferiores, acuíclados y acuitardos, existentes en la misma zona geográfica a distintas profundidades, en función de sus zonas de recarga y descarga, estratos geológicos que las contengan, condiciones de flujo y almacenamiento y comportamiento en relación con su uso y aprovechamiento. Para ello, “la Comisión” deberá realizar, por sí o con el apoyo de terceros cuando resulte conveniente, los estudios y evaluaciones suficientes con el objeto de sustentar los deslindamientos referidos y promover el mejor aprovechamiento de las fuentes de aguas del subsuelo.

Conforme a las disposiciones del presente Artículo y Ley, se expedirán el reglamento para la extracción y para la explotación, uso o aprovechamiento de las aguas nacionales de los acuíferos correspondientes, incluyendo el establecimiento de zonas reglamentadas, así como los decretos para el establecimiento, modificación o supresión de zonas de veda o declaratorias de reserva que se requieran.

Los acuerdos de carácter general a que se refiere el presente artículo se expedirán en los siguientes casos:

- I. *Cuando de los estudios de disponibilidad de aguas nacionales arrojen que no existe disponibilidad del recurso hídrico o que la que existe es limitada;*
- II. *Cuando de los datos contenidos en los estudios técnicos para el establecimiento de zonas reglamentadas, de veda o de reserva se desprenda la necesidad de suspender o limitar el libre alumbramiento de las aguas del subsuelo;*
- III. *Cuando existan razones técnicas justificadas en estudios específicos de las que se desprenda la necesidad de suspender o limitar el libre alumbramiento de las aguas del subsuelo; y*
- IV. *Cuando de los estudios técnicos específicos que realice o valide “la Comisión” se desprenda la existencia de conos de abatimiento, interferencia de volumen o cualquier otro supuesto que pueda ocasionar afectaciones a terceros.*

Independientemente de lo anterior, la explotación, uso o aprovechamiento de las aguas del subsuelo causará las contribuciones fiscales que señale la Ley de la materia. En las declaraciones fiscales correspondientes, el concesionario o asignatario deberá señalar que su aprovechamiento se encuentra inscrito en el Registro Público de Derechos de Agua, en los términos de la presente Ley.

Debido a la problemática ambiental en Cuatro Ciénegas, en el Diario Oficial de la Federación (DOF 2013c) se promulgó el decreto en donde se establece como Zona Reglamentada al Acuífero Cuatro Ciénegas, en donde se suspende el libre alumbramiento y sólo se permitirán los aprovechamientos que cuenten con título de concesión. Conforme al **Artículo 3** de este acuerdo en donde se menciona lo siguiente: *El volumen disponible de aguas nacionales susceptible de otorgarse en concesión o asignación en el acuífero Cuatro Ciénegas, clave 0528, es de hasta 11.084782 millones de metros cúbicos anuales, mismo que habrá de modificarse conforme a los actos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua.*

V. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DEL ÁREA DE ESTUDIO

El valle de Cuatro Ciénegas se localiza en el Estado de Coahuila a 80 km de la ciudad de Monclova, entre las coordenadas 26°56'00" Norte y 102°03'00" Oeste. Con una cota de 700 msnm y rodeado en su porción norte por la Sierra de la Madera con una elevación superior a los 3,000 msnm; al oeste por la Sierra de la Fragua con 1,800 msnm; y en el sureste por la Sierra de San Marcos con una elevación de 2,500 msnm (Figura 5-1).

El valle de Cuatro Ciénegas, se decretó como Área Natural Protegida bajo la categoría de Área de Protección de Flora y Fauna (APFF) en el año de 1994 (INE- SEMARNAP 1999), para poder efectuar acciones dirigidas a la conservación y disminuir los impactos y amenazas presentes en la zona. En 1995 fue uno de los primeros sitios en México en pertenecer a la lista de Humedales de Importancia Internacional de la Convención Ramsar (Ramsar 2011).

La zona cuenta también con un estudio de ordenamiento ecológico, en el que se elaboró la caracterización del medio biótico, abiótico y socioeconómico, así como una proyección a futuro de la problemática ambiental detectada (DOF 1997). Como parte de las actividades productivas que se llevan a cabo en la zona destacan la agricultura y la ganadería, los cuales son pilares de la economía regional.

La agricultura de riego desarrolla en zonas planas en donde el suelo no presenta altas concentraciones salinas, aunque en los alrededores de la cabecera municipal se cultivan terrenos de temporal. Se ha observado un incremento en el cultivo de forrajes que requieren una mayor cantidad de agua, que a su vez ocasionan una disminución en la diversidad de productos y variedades vegetales que se encuentran adaptadas a las condiciones ambientales de la región (DOF 1997).

La ganadería se desarrolla de manera extensiva aprovechando la vegetación nativa, se compone principalmente de bovinos, sin embargo, el ganado caprino es el que ha ocasionado mayores alteraciones en la vegetación debido a sus hábitos alimenticios contribuyendo al establecimiento de bosques monoespecíficos de mezquites (*Prosopis* sp.) (DOF 1997).

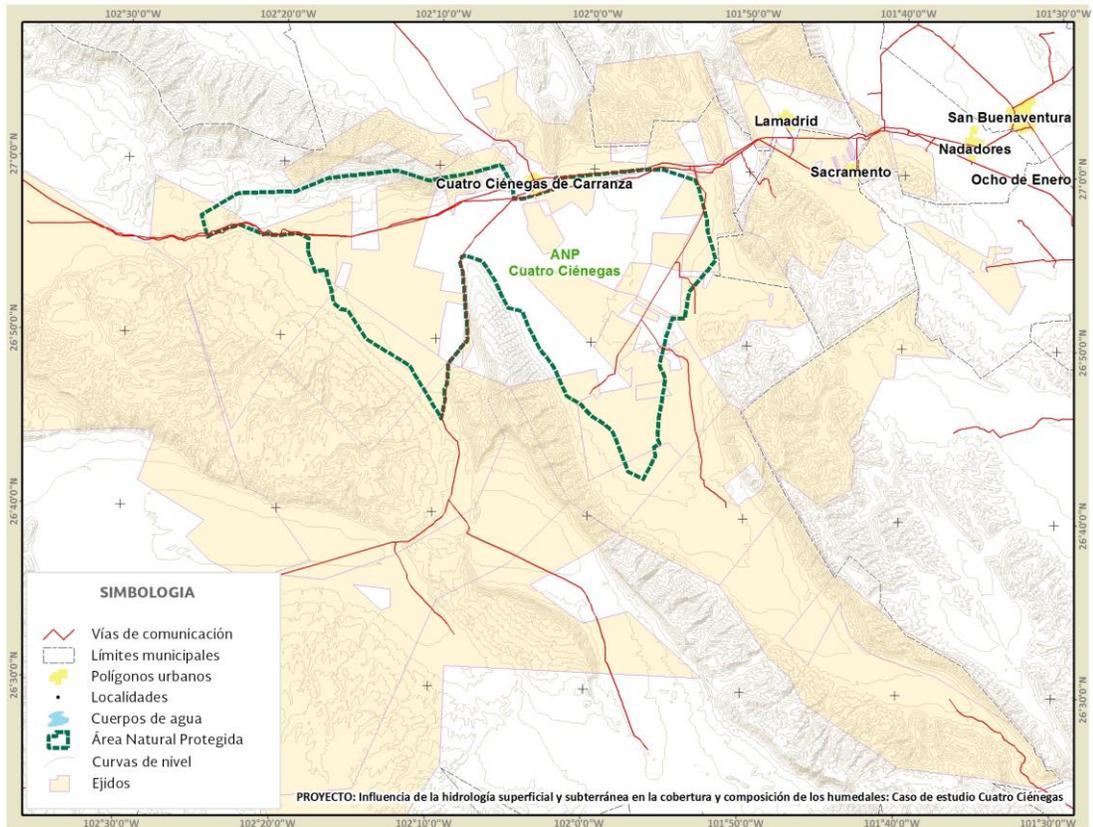


Figura 5-1. Localización geográfica del valle de Cuatro Ciénegas

La actividad forestal está dirigida al aprovechamiento de especies leñosas que componen los matorrales xerófilos y los bosques de encinos y coníferas; sin embargo, no se tienen datos relativos a la alteración que estas actividades pudieran estar causando en el entorno.

En la zona se aprovechan especies no maderables con fines alimenticios, ornamentales, medicinales y para la obtención de subproductos para la industria. Un caso concreto es la extracción de la candelilla (*Euphorbia antisiphilitica*), utilizada para la obtención de cera para la industria.

VI. METODOLOGÍA

La planificación hídrica utiliza distintas fuentes de información para conocer las condiciones hídricas de una región. En este sentido, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son ampliamente utilizados como una herramienta para la planificación y gestión, debido a que permiten almacenar y analizar datos que son empleados en estudios y modelos hidrológicos (Rivera et al. 2012).

6.1. Delimitación del área de estudio

Existen diversas delimitaciones oficiales del valle de Cuatro Ciénegas que toman en cuenta criterios administrativos, hidrológicos y ambientales. El polígono del decreto para el Área de Protección de Flora y Fauna por la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, está basado en criterios ambientales y sociales (INE- SEMARNAP 1999). Por otro lado, los límites de los acuíferos fueron establecidos por la Comisión Nacional del Agua como unidad territorial básica para la gestión integrada de los recursos hídricos conforme a lo dispuesto por la Ley de Aguas Nacionales, cuyos límites están basados en el Marco Geoestadístico Municipal del año 2000 y las cartas topográficas de INEGI escala 1:250,000 (DOF 2013a). Existen varias versiones de cuencas hidrológicas para el país, pero el trabajo con mayor detalle espacial fue obtenido recientemente por el INEGI para el Simulador de Flujos de Aguas de Cuencas Hidrológicas (SIATL) (INEGI 2010).

Debido a los objetivos del presente proyecto, ninguna de las delimitaciones oficiales antes mencionadas contiene las características para ser utilizada como referencia, por lo que fue necesario realizar una delimitación basada en la hidrología superficial, subterránea, aprovechamientos, actividades productivas y la diversidad biológica.

Debido a que la forma de la superficie determina el movimiento del agua, el modelo hidrológico puede ser definido como una simplificación o abstracción de un sistema natural del flujo del agua y sus componentes en una porción de terreno (Mendoza et al. 2002). La delimitación del área de estudio se fundamentó en el enfoque de cuenca hidrológica, ya que es considerada la unidad de gestión para los recursos hídricos. Esto fue llevado a cabo a través del software ArcHydro para ArcGis®, herramienta desarrollada para elaborar modelos hidrológicos que efectúan análisis geoespacial, y está diseñado para trabajar con variables topológicas de los Modelos Digitales de Elevación (ESRI 2009) (Figura 6-1).

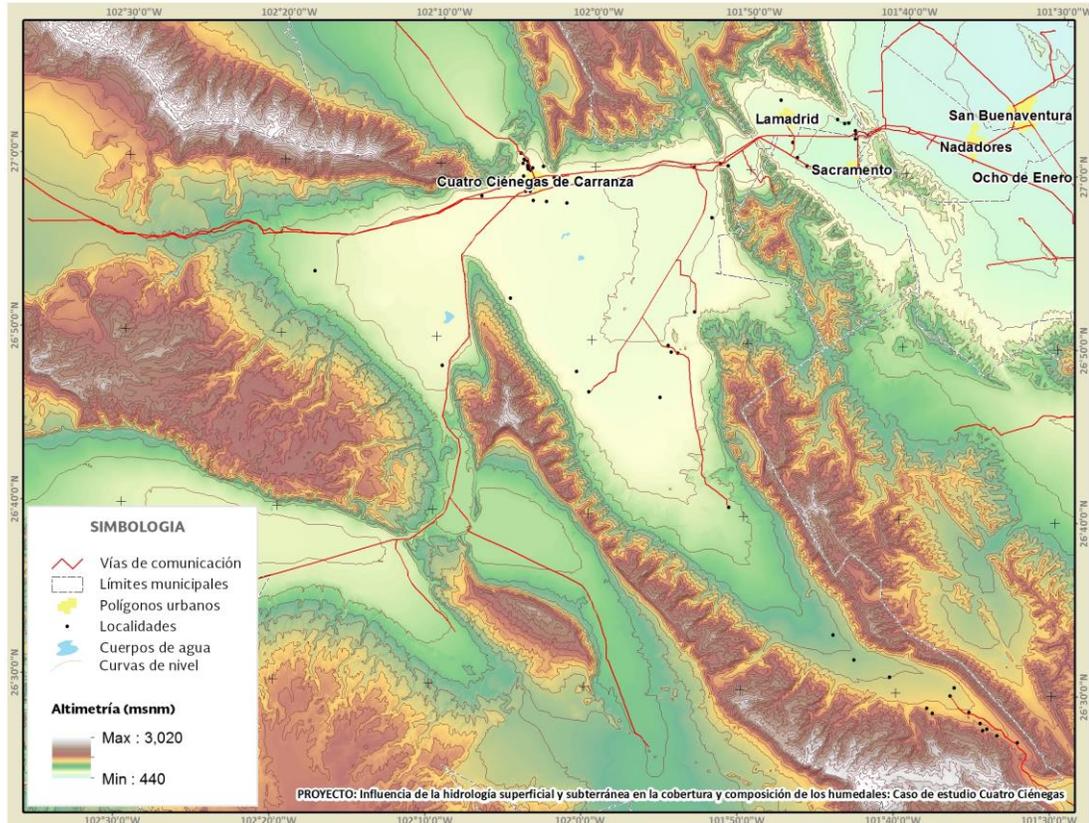


Figura 6-1. Modelo Digital de Elevación utilizado en la modelación hidrológica

Entre las principales características de esta herramienta, se encuentra la generación de patrones de drenaje y la delimitación de cuencas, redes y series de tiempo a partir de modelos digitales de elevación y de información hidroclimática (ESRI 2009; Kraemer y Panda 2009; Martínez-Martínez y Campos- Aranda 2010).

Se utilizó el Modelo Digital de Elevación (MDE) con una resolución de 1:50,000 del Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM 3.0) (INEGI 2013). A partir del cual se hizo una depuración y agrupamiento manual de los límites de las subcuencas de captación y los puntos de drenaje utilizando un criterio hidrológico (Bratt y Booth 2000).

En la delimitación del área de estudio se utilizaron las cartas topográficas digitales de INEGI escala 1:50,000 (G13B48, G13B49, G14A41, G14A42, G13B58, G13B59, G14A51, G14A 52, G13B68 G13B69, G14A61, G14A62, G13B78, G13B79, G14A71, G14A72), que fueron corregidas debido a errores topológicos (ITC 2005).

La delimitación se realizó considerando la morfología del terreno, que es la que determina el movimiento del agua en la superficie. El comportamiento hidrológico de las cuencas depende de diversos factores como el relieve, la pendiente, la edafología, la geología y los ecosistemas presentes, estos aspectos son los responsables de la cantidad y calidad del agua que produce cada cuenca. Las herramientas utilizadas para el modelamiento hidrológico proveen métodos que permiten conocer las características hidrológicas de la superficie (McCoy y Johnston 2001), por lo que un modelo hidrológico puede ser definido como una simplificación o abstracción de un sistema natural y sus componentes en una porción de terreno (Mendoza *et al.* 2002).

Los Sistemas de Información Geográfica, han aportado elementos para el modelamiento espacial de datos que son utilizados para la planificación y la gestión hídrica, utilizando como insumo los Modelos Digitales de Elevación para la delimitación de cuencas, redes de drenaje y direcciones de escurrimientos.

Los Modelos Digitales de Elevación (MDE) fueron generados con las extensiones *Spatial Analyst* y *3D Analyst* de ArcGis®, a partir de una Red de Triángulos Irregulares (TIN, por sus siglas en inglés *Triangulated Irregular Network*) utilizados para generar valores de altitud. Los TIN fueron convertidos posteriormente a una matriz raster por un proceso de interpolación y el uso de estadísticas de celda (Bratt y Booth 2000; McCoy y Johnston 2001) (Figura 6-2).

6.2. Sistematización de la información

Se trabajó con bases de datos geográficas y estadísticas provenientes de distintas fuentes oficiales nacionales e internacionales, por lo que fue necesaria la estandarización para generar resultados de calidad.

6.2.1. Conformación de las bases de datos geoestadísticas

Los trabajos de estandarización y depuración de las bases de datos estadísticas fueron orientados a definir los campos de interés. La información fue adquirida por las vías oficiales o descargada a través de los portales WEB de las instituciones gubernamentales e integradas y procesadas en un SIG mediante el uso de metodologías geoestadísticas. En este sentido, el presente trabajo aporta un valor agregado con elementos de análisis geográfico, sin generar criterios que permitan evaluar la veracidad de los datos adquiridos.

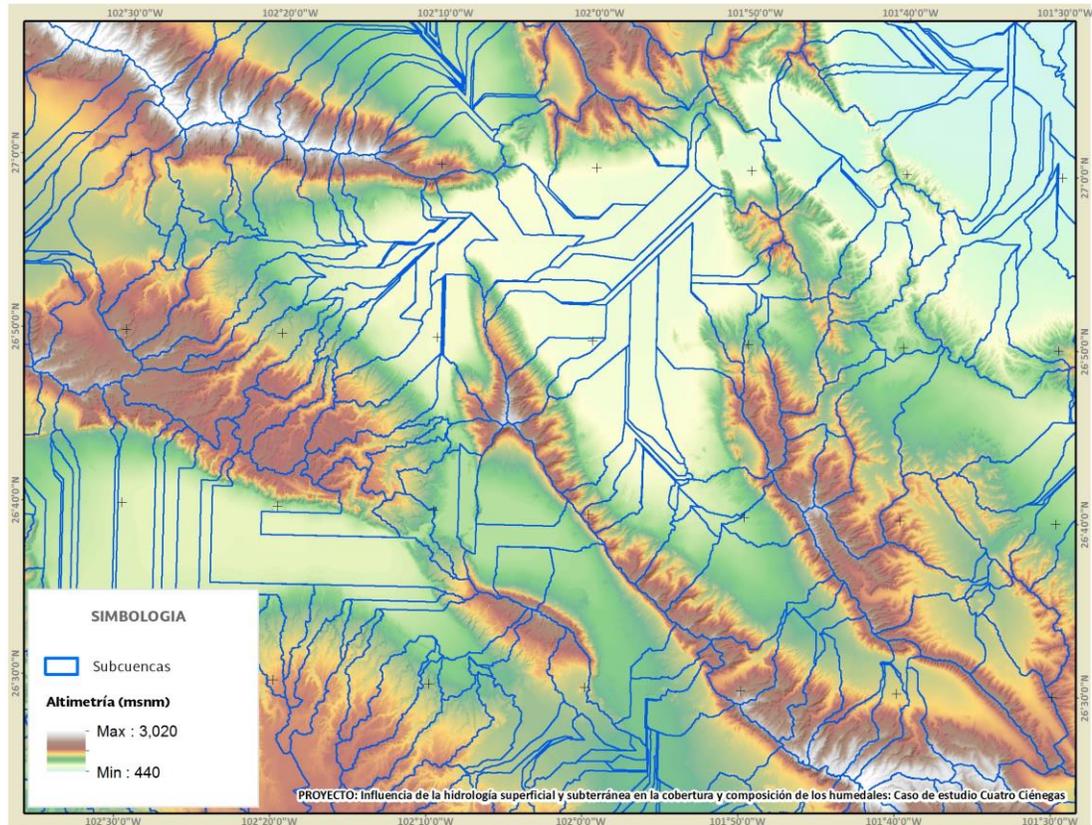


Figura 6-2. Delimitación automática de subcuencas en ArcHydro

La información para el área de Cuatro Ciénegas ha sido elaborada bajo diferentes estándares de calidad, escalas de trabajo y distintos periodos de actualización. En el caso de los insumos de teledetección disponibles, existen plataformas actuales capaces de generar productos en múltiples resoluciones espaciales y espectrales. Por lo que es necesario considerar los objetivos de la investigación para elegir las imágenes adecuadas (Chuvieco 2002).

Para el presente trabajo, se utilizaron insumos que proporcionan elementos para trabajar bajo dos diferentes escalas. Las imágenes Landsat proporcionadas por la USGS (U.S. Geological Survey) con una resolución de 1: 100,000. Mientras que las Spot 5 fueron obtenidas ante convenio con la ERMEXS (1:50,000) como un insumo que permite identificar rasgos a un mayor detalle.

Las bases de datos fueron sistematizadas de manera previa para equiparar los formatos y referencias espaciales, con el propósito de facilitar el procesamiento en el ambiente SIG. La información vectorial del área fue estandarizada de acuerdo a un área mínima cartografiable de 3 milímetros (Leal-Nares et al. 2012), con una Proyección UTM con Datum WGS84 para la zona 14.

6.2.2. Análisis de la información climática

La información meteorológica está distribuida de manera dispersa, obedeciendo principalmente a criterios agrícolas, propiciando que la mayoría de las veces no existan datos disponibles en los sitios de interés (Mendoza et al. 2002).

Para la integración de los datos climáticos, se utilizó la información del Servicio Meteorológico Nacional y del Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC 3 v2) (IMTA 2013), conformando series de información hasta el año 2015 de acuerdo a la disponibilidad de estaciones. De manera preliminar se identificaron 17 estaciones cercanas al área de estudio, sin embargo, al revisar los registros solo siete de ellas permanecen en funcionamiento y cuentan con registros de precipitación y temperatura superiores a 20 años (Cuadro 6-1).

Cuadro 6-1. Estaciones consideradas para el análisis climático

| Estaciones | Clave | Latitud | Longitud | Altitud |
|-------------------------|--------|---------|----------|---------|
| Cuatro Ciénegas (SMN) | 005044 | 26.986 | -102.067 | 740 |
| El Gato | 005163 | 27.229 | -101.726 | 640 |
| El Márquez | 005167 | 26.641 | 101.358 | 860 |
| Lamadrid | 005155 | 27.046 | -101.793 | 640 |
| Ocampo | 005022 | 27.312 | -102.396 | 1050 |
| Sacramento | 005171 | 27.004 | -101.724 | 580 |
| San Francisco Nadadores | 005164 | 27.142 | -101.652 | 500 |

Se estimaron los promedios anuales de temperatura y los acumulados en la precipitación de las siete estaciones y se obtuvieron los tipos climáticos, tomando como referencia los criterios de García (2004) (Figura 6-3). Se tomó como referencia la información de la estación meteorológica *Cuatro Ciénegas (SMN)*, ya que aunque se detectaron inconsistencias y falta de registros, es la que posee datos más extensos (80 años). A partir de estos, se estimaron las medias móviles para la precipitación y temperatura con un tiempo de 3 años y las tendencias con una curva polinómica de cuarto grado (Quintela et al. 1989; García et al. 2002).

6.1. Gestión y procesamiento de imágenes de satélite

La elección de fechas para la gestión de imágenes de satélite Landsat fue determinada a partir de los análisis de los climogramas de la estación *Cuatro Ciénegas (SMN)*. Los años fueron elegidos con base en las tendencias mostradas por la media móvil de 3 años, en donde se aprecian periodos húmedos y secos.

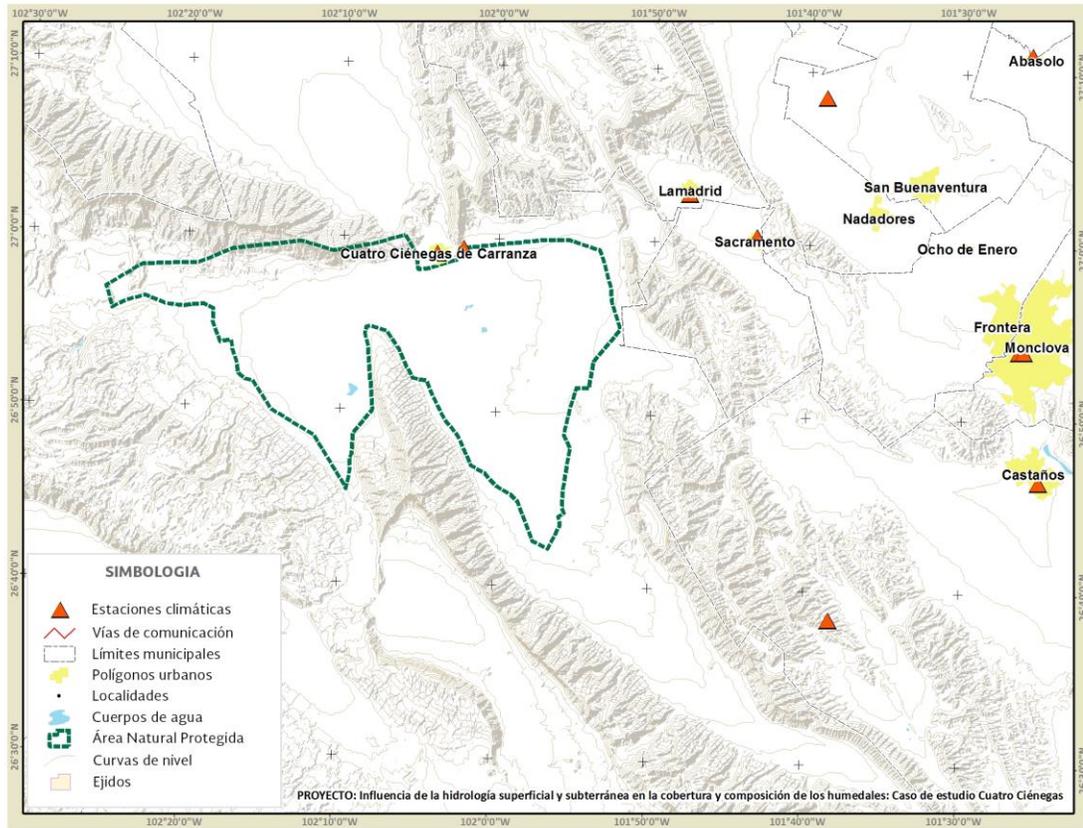


Figura 6-3. Estaciones climáticas cercanas al valle de Cuatro Ciénegas

Los productos de los sensores remotos son afectados por distorsiones, principalmente por la geometría, el ángulo de toma de la imagen y la inestabilidad del sensor y otros aspectos como la rotación, la curvatura de la Tierra y la orografía, entre otros (Chuvienco 2002). La corrección es un proceso que se lleva a cabo de manera rutinaria en la teledetección, generando resultados de calidad variable, dependiendo los insumos y el método utilizado (Figura 6-4).

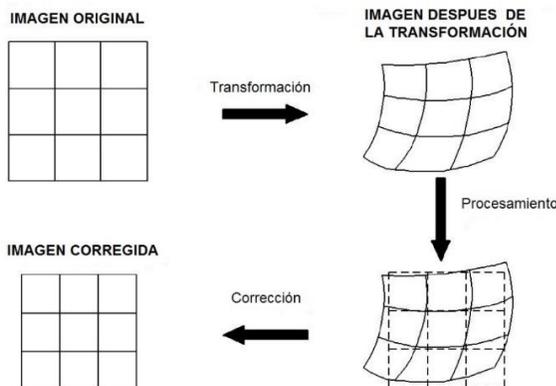


Figura 6-4. Proceso de ortorrectificación de una imagen

En la corrección geométrica las imágenes se ajustan a un nuevo espacio de referencia, (Proyección UTM zona 14, Datum WGS 84). Existen dos procedimientos para realizar la corrección utilizando en ambos puntos de apoyo: la rectificación y la ortorrectificación. Cuartero y Felicísimo (2003), sugieren utilizar Modelos Digitales de Elevación en la corrección geométrica, para ajustar imágenes utilizadas en estudios multitemporales o que provienen de diversos sensores. Y también se pueden utilizar mapas topográficos y ortofotos para disponer de un número elevado de puntos de control (Figura 6-5).

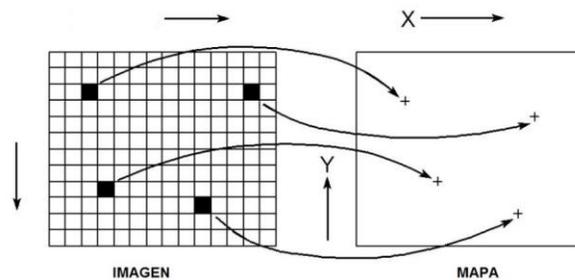


Figura 6-5. Asignación de puntos de control para la ortorrectificación

El proceso de ortorrectificación puede ser efectuado también utilizando una imagen de las mismas características como referencia (*imagen maestra*), identificando rasgos para asignar valores a la nueva imagen (*imagen esclava*) (ITC 2001). Este método se utilizó para corregir las bandas multiespectrales con el uso de imágenes pancromáticas de mayor resolución, y posteriormente realizar una fusión de ambas (Figura 6-6).

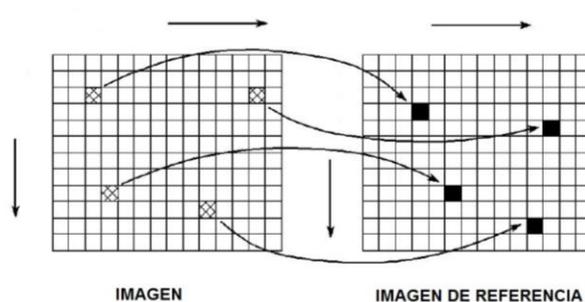


Figura 6-6. Asignación de puntos de control para la ortorrectificación de imagen a imagen

6.1.1. Obtención de Imágenes Landsat y Spot

Para dar cubrimiento al área de estudio se seleccionaron dos escenas de la plataforma Landsat TM (*Path/Row*: 29/41 y 29/42) (Figura 6-7). Los periodos de tiempo se eligieron tomando en cuenta el climograma y la media móvil de la precipitación que muestra el comportamiento acumulado en 3 años (Quintela et al. 1989) de la estación climática *Cuatro Ciénegas (SMN)*, así como la disponibilidad de imágenes de archivo en el USGS (*U.S. Geological Survey*) (Cuadro 6-2). Utilizando este criterio, se eligieron cuatro fechas para un periodo total de 25 años, considerando 1990 y 2015 para periodos húmedos y los años 2000 y 2011 para los secos.

Cuadro 6-2. Imágenes de satélite Landsat utilizadas para la clasificación

| Path/Row | Imagen | Sensor | Fecha de adquisición | Periodo |
|----------|-----------------------|---------------|----------------------|---------|
| 29/41 | LC80290412015087LGN00 | Landsat 8 OLI | 28/03/2015 | Húmedo |
| 29/42 | LC80290422015087LGN00 | Landsat 8 OLI | 28/03/2015 | Húmedo |
| 29/41 | LT50290412011268EDC00 | Landsat 5 TM | 25/10/2011 | Seco |
| 29/42 | LT50290422011300EDC00 | Landsat 5 TM | 27/10/2011 | Seco |
| 29/41 | LE70290412000070EDC00 | Landsat 4 TM | 10/03/2000 | Seco |
| 29/42 | LE70290422000070EDC00 | Landsat 4 TM | 10/03/2000 | Seco |
| 29/41 | LT50290411990114XXX02 | Landsat 4 TM | 24/04/1990 | Húmedo |
| 29/42 | LT50290421990114XXX03 | Landsat 4 TM | 24/04/1990 | Húmedo |

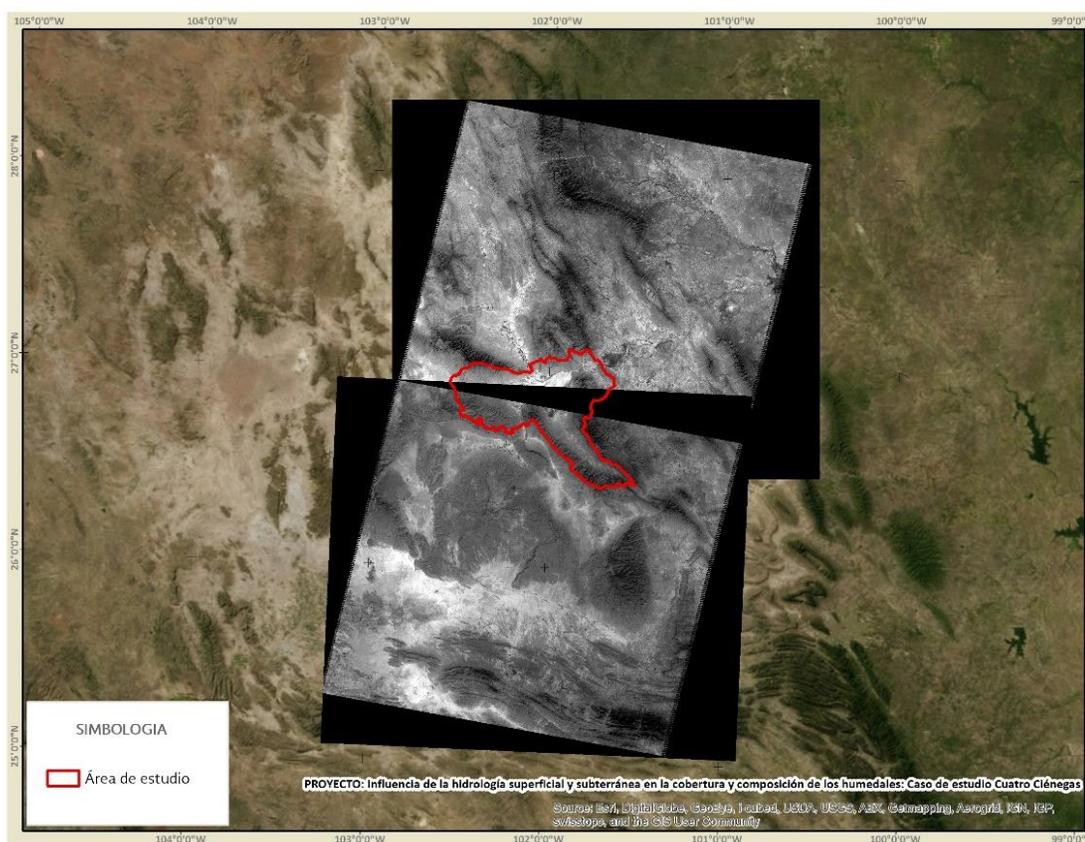


Figura 6-7. Cobertura de las imágenes Landsat para el área de estudio

Las dos imágenes Spot 5 que cubren el área de humedales del valle de Cuatro Ciénegas, fueron obtenidas con un convenio realizado ante la ERMEXS, de acuerdo a la disponibilidad de imágenes de archivo. Estas fueron solicitadas para obtener información actualizada con una mayor resolución espacial, y generar una base de datos de la localización de las pozas. El análisis temporal no fue realizado con estos insumos, debido a que el archivo cuenta con una disponibilidad máxima de 10 años (Figura 6-8). Estas imágenes fueron corregidas mediante el proceso de ortorrectificación con el Modelo Digital de Elevación de INEGI, debido a las distorsiones geométricas que presentan de origen.

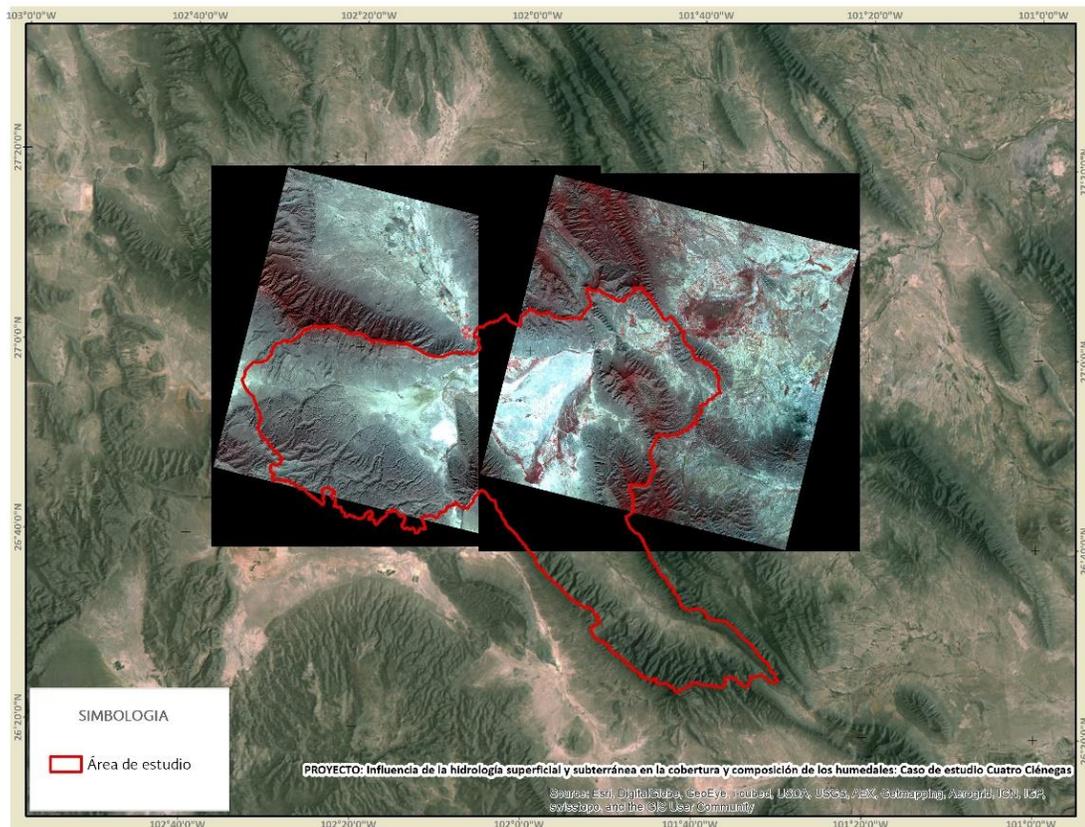


Figura 6-8. Cobertura de las imágenes SPOT 5

6.1. Levantamiento de información en campo

Los métodos empleados regularmente para el levantamiento de información en campo son: aleatorio simple, aleatorio estratificado, sistemático, sistemático no alineado, por conglomerados (Chuvienco 2002).

Se realizaron tres visitas de verificación en diferentes épocas del año, seleccionando áreas representativas para obtener la documentación fotográfica y la información base para la clasificación de los humedales, utilizando el método de muestreo preferencial o representativo, basado en suposiciones *a priori* de las propiedades de las coberturas vegetales; este método se utiliza cuando el investigador requiere cubrir una variación ambiental compleja que refleje condiciones ambientales distintas (Matteucci y Colma 1982; Leal-Nares et al. 2012).

Para las visitas en campo, se elaboraron espaciomapas para identificar las trayectorias de los recorridos y los sitios de interés (ver anexo 1), además de proyectos de trabajo en Sistemas de Información Geográfica tipo PAD para el registro de información (Figura 6-9); seleccionando previamente áreas de interés (AOI) con la ayuda de clasificaciones no supervisadas.



Figura 6-9. Levantamiento de información en campo

6.2. Conformación del sistema de clasificación de tierras altas y humedales de Cuatro Ciénegas

Existen diversos sistemas clasificatorios para los tipos de vegetación en México, considerando principalmente la fisonomía y la forma de vida de sus especies dominantes (biotipo) (Miranda y Hernández 1963).

Para definir las clases de uso del suelo y vegetación, se consideró el sistema de clasificación de Rzedowski (2006) y el trabajo de clasificación realizado por Vela (2000) para la región de Cuatro

Ciénegas. Posteriormente, las coberturas fueron homologadas de acuerdo a las equivalencias de los tipos de vegetación mencionados en el trabajo de Rzedowski (2006).

El sistema de clasificación de humedales se basó en las propuestas de Cowardin et al. (1979) y Berlanga-Robles y Ruiz-Luna (2008), adaptado a las condiciones particulares de la región de Cuatro Ciénegas.

El sistema se diseñó a través de un arreglo jerárquico considerando las propiedades hidrológicas y geomorfológicas de la zona, favoreciendo su aplicación bajo diferentes escalas de trabajo. Cabe mencionar que también se tomaron en cuenta atributos relacionados con la función, estructura y uso, con un importante componente florístico (Brinson 2011).

Debido a que el sistema de clasificación se enfocó en la descripción de los humedales de Cuatro Ciénegas y su relación con la hidrología superficial y subterránea, únicamente se consideran los sistemas epicontinentales presentes (Lacustre, Palustre y Fluvial).

Se utilizó la información del Programa de Manejo del Área de Protección de Flora y Fauna de Cuatro Ciénegas (INE- SEMARNAP 1999) como referencia de la vegetación acuática y subacuática de la región de Cuatro Ciénegas, los listados florísticos de Coahuila (Villareal 2001), los trabajos realizados para la flora riparia de los ríos Sabinas y San Rodrigo en Coahuila (Villarreal et al. 2006), los listados de las monocotiledóneas acuáticas y subacuáticas de México (Lot 2012), y los trabajos de las plantas vasculares acuáticas estrictas y su conservación en México (Mora-Olivo et al. 2013). De manera complementaria, se gestionaron las bases de datos de flora y fauna de la Red Mundial de Información sobre Biodiversidad (REMIB) proporcionados por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), para cotejar las especies y sus puntos de localización geográfica, con base en sus coordenadas de muestreo.

También se realizaron visitas e identificación de ejemplares al herbario de la Universidad Autónoma de Nuevo León y la verificación de los nombres científicos de las especies a través de la revisión de bases de datos de herbarios internacionales en línea (NWFS 2014; USDA 2014).

Posteriormente, se realizó la agrupación en formas de vida de las especies acuáticas y subacuáticas según los criterios utilizados por la USDA (2014): obligatorias, facultativas, facultativas – obligatorias, obligatorias – facultativas, tierras altas, facultativas de humedales y facultativas de tierras altas.

6.3. Clasificación digital de las imágenes de satélite

La clasificación consiste en agrupar objetos con respuestas espectrales similares y relacionarlos con la cobertura o superficie de la Tierra, para la extracción de información temática a partir de imágenes de satélite de manera semiautomática, este proceso puede realizarse a partir de imágenes de una sola banda, o en imágenes que poseen varias bandas (*clasificación multispectral*) (ITC 2001).

La clasificación de imágenes de satélite constituye una herramienta muy útil para obtener inventarios de los recursos naturales, ampliamente utilizados para la caracterización y cuantificación de humedales bajo distintos enfoques (Ozesmi y Bauer 2002; Manju et al. 2005; Frohn et al. 2009). La clasificación se puede realizar de manera manual y automática (supervisada y no supervisada, respectivamente), o utilizar una combinación de ambas técnicas.

En el caso particular de la clasificación de humedales a partir de imágenes Landsat 4 se utilizaron composiciones de bandas (4:5:2) para identificar las características de los cuerpos de agua y la vegetación asociada de acuerdo a su respuesta espectral (Carrera et al. 2010) y para las imágenes Landsat 8 se emplearon composiciones de las bandas (5:6:4).

6.3.1. Método no supervisado

Este método está dirigido a definir las clases espectrales presentes en una imagen, no implica un conocimiento del área de estudio, por lo que la intervención humana se centra más en la interpretación que en los resultados. En la primera fase del proyecto se utilizaron métodos no supervisados dirigidos a apoyar los trabajos de campo, en el cual se agrupan las clases espectrales similares de manera automática (Klemas 2011; Razimul 2014).

Este método utiliza la similitud espectral de los píxeles para formar una serie de agrupaciones o conglomerados (*clusters*). El algoritmo utilizado para la agrupación fue el *Isodata*, que lleva a cabo las siguientes fases (Chuvieco 2002):

1. Se señalan centros de clases, de acuerdo al número y forma indicados por el usuario.
2. Se asignan todos los píxeles de la imagen al centro de clase más próximo, utilizando el criterio de distancia mínima de similitud.
3. Se calculan de nuevo los centros de clase, teniendo en cuenta los valores de todos los píxeles que fueron incorporados en la fase anterior.

4. Se reordenan los centros de clase en función de los parámetros de control indicados por el usuario (distancia mínima entre grupos, tamaño mínimo de un grupo, varianza máxima y número de grupos).
5. Se vuelven a asignar todos los píxeles de la imagen al centro más cercano.
6. Sí el número de píxeles que han cambiado de categoría es inferior al señalado por el usuario se termina el proceso; en caso contrario se retorna a la fase 3.

6.3.2. Método supervisado

El método supervisado requiere del conocimiento de la zona de estudio y de una gran cantidad de puntos de muestreo, ya que considera las áreas con características de respuesta visual y espectral representativas para cada tipo de cobertura, los cuales son conocidos como campos de entrenamiento (*training fields*) (Lu et al. 2004).

Los métodos utilizados para realizar la asignación de los píxeles a cada una de las clases seleccionadas previamente se dividen en métodos paramétricos: a) máxima probabilidad en donde el píxel se asigna a la clase con la mayor probabilidad de pertenencia. Y métodos no paramétricos a) mínima distancia, por el cual cada píxel se asigna a la clase más cercana; b) paralelepípedos, en donde el usuario señala umbrales de dispersión asociados a cada clase.

En el caso del presente proyecto, se utilizó un método no paramétrico de máxima probabilidad, en donde cada clase se ajusta a una distribución normal, lo que permite describir cada categoría en función de probabilidad, a partir de su vector de medias y matriz de varianza-covarianza (Chuvieco 2002; Zhang et al. 2011; Ghobadi et al. 2012).

Para mejorar los resultados obtenidos se suelen utilizar a menudo los índices de vegetación (NDVI), métodos de clasificación avanzados, modelamiento e integración de bases de datos y algoritmos que ayudan a detectar la presencia de agua como son el Índice Diferencial Normalizado del Agua (NDWI) (McFeeters 1996; Han-Qiu 2005; Baodong et al. 2008) y el Índice Diferencial Normalizado de los estanques o charcas (NDPI) (Lacaux et al. 2007).

Para la conformación de los campos de entrenamiento para la clasificación de uso del suelo y vegetación y humedales, se utilizaron como referencia los puntos de muestreo realizados por Vela (2000), los inventarios de especies de la REMIB y los registros en campo.

6.3.3. Método mixto

La clasificación híbrida o métodos mixtos difieren de la clasificación digital convencional debido a que se emplea el análisis no supervisado para guiar al supervisado, realizando la operación por regiones separadas, obteniendo imágenes segmentadas. Se utilizan los parámetros estadísticos de cada región para clasificar los segmentos de manera individual, seleccionando áreas de entrenamiento en la etapa de clasificación supervisada (Barros et al. 2000). Por lo tanto, esta metodología se considera una combinación de técnicas para generar mejores resultados (Murray-Hudson 2009).

La segmentación de la imagen facilita la separación de firmas espectrales, ofreciendo una mayor precisión en la imagen clasificada (Zhang et al. 2011). Por lo anterior, la obtención de la cobertura de uso del suelo y vegetación se llevó a cabo de manera independiente de la clasificación de humedales, las cuales fueron integradas posteriormente.

6.3.1. Análisis de exactitud

El análisis de exactitud consiste en comparar una muestra de puntos de referencia tomados en campo con los resultados obtenidos de una clasificación. Esto implica seleccionar una serie de muestras independientes que no fueron utilizadas para la selección de áreas de entrenamiento, midiendo estadísticamente las diferencias entre la imagen y la realidad.

El error puede estimarse mediante una matriz de confusión que asocia la proporción de píxeles o polígonos correctamente clasificados, para calcular la precisión y probabilidad de error de omisión y comisión (Stehman 1999). Esta tabla recoge los conflictos que se presentan entre categorías, en donde las columnas indican las clases de referencia y las filas corresponden a las categorías clasificadas; la diagonal en la matriz expresa el número de puntos de verificación en donde se produce un acuerdo entre las dos fuentes (mapa- realidad), mientras que los valores marginales suponen errores de asignación. En resumen, la relación entre el número de puntos correctamente asignados y el total expresa la fiabilidad global del resultado, posteriormente los valores erróneos pueden ser utilizados para corregir las estimaciones de superficie para cada tipo de cobertura.

La fiabilidad de los resultados se determinó mediante la elaboración de una matriz de confusión en el *software* ArcGis (Jennes y Wynne 2007; Wentao et al. 2014), que mide la diferencia entre el acuerdo mapa- realidad observado (Chuvienco 2002).

6.4. Análisis temporal

Los estudios de detección de cambios pueden ser aplicados a una gran variedad de disciplinas; su objeto es el de analizar los rasgos en determinado territorio que han sido modificados a través del tiempo. Para llevar a cabo este proceso se compararon las imágenes previamente clasificadas generando una tabla temporal de cambios, en donde se presentan las transiciones que se han producido entre las dos fechas. En las celdas diagonales de la matriz se presentan las coberturas sin cambio, mientras que en el resto de la tabla se detectan los cambios ocurridos; por lo que en esta tabla no solo se observan las zonas estables y dinámicas, sino también la cobertura original y la actual, indicando la tendencia del cambio en la zona de estudio (Townsend y Walsh 2001).

Debido a que únicamente se pueden comparar dos imágenes con la técnica de coincidencia espacial, se tomó como referencia la imagen con una mayor antigüedad para identificar y cuantificar los cambios en las coberturas de los humedales (Rosete 2008). La tasa de cambio fue estimada con el módulo *Land Change Modeler* de Idrisi Selva 17.02, obteniendo las estadísticas de ganancia, pérdida y cambio neto de superficie por cada clase, así como los mapas de persistencias y cambios.

La tasa de cambio anual corresponde al porcentaje de superficie que cambia anualmente por cada categoría clasificada y se calculó utilizando la siguiente ecuación (Chuvienco 2002):

$$Tc = -1[(A_2/A_1)^{1/n} - 1] * 100$$

En donde:

Tc= tasa de cambio anual (porcentaje)

A₁= Superficie a la fecha 1

A₂ Superficie a la fecha 2

n= Número de años entre las dos fechas

6.4.1. Modelo de probabilidad de cambio

La estimación del cambio se realizó a través de un modelo Markoviano, en el que se asume que las probabilidades de transición son independientes al desarrollo histórico de cada sistema analizado y dependen de su estado actual (Rosete 2008).

Asumiendo que los procesos de cambio de uso del suelo y vegetación son estocásticos y las categorías utilizadas son los estados de una cadena expresada como:

$$a_{ij} = \frac{P_i^{(t+1)}}{P_j^{(t)}}$$

En donde:

A_{ij} = Probabilidad de cambio

P_j = Superficie total de estado j en un tiempo precedente (t)

P_i = Superficie total del estado j que se transformó en el estado i al tiempo siguiente ($t+1$)

6.5. Aprovechamientos superficiales y subterráneos concesionados

Se realizó un análisis de los aprovechamientos inscritos en las bases de datos del Registro Público de Derechos del Agua de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA 2014), cuyas coordenadas geográficas corresponden a la zona de estudio.

Se determinó el número de aprovechamientos, localización, uso, año de registro y volumen concesionado. De manera complementaria, se revisaron los resultados de los censos de aprovechamiento obtenidos por Lesser y Asociados (2001) y de SEMARNAT-IMTA (2004).

Posteriormente, se efectuó un análisis geoestadístico de los aprovechamientos subterráneos, superficiales y registros en libre alumbramiento, mediante el uso de interpoladores locales de tipo *Inverse Distance Weighting* (IDW) (Leal 2009). Este método asume que la variable mapeada decrece conforme la distancia es mayor a la muestra, estimando los valores de cada pixel a partir del promedio de las celdas vecinas (McCoy y Johnston 2001). Los años de registro de los aprovechamientos fueron utilizados para un análisis temporal considerando los volúmenes concesionados y su localización geográfica.

6.6. Análisis geoestadístico

La geoestadística supone de manera implícita que las variables geográficas están correlacionadas y por lo tanto existe una dependencia espacial (Moral 2004). Esta herramienta facilita el análisis de los patrones de distribución espacial de las variables ecológicas en espacio y tiempo, haciendo posible la creación de mapas que pueden combinarse para analizar las interacciones entre los factores presentes.

En el trabajo geoestadístico se llevaron a cabo tres etapas:

- a) *Análisis exploratorio de los datos*, se estudiaron los datos muestrales sin tener en cuenta la distribución geográfica, se comprobó la consistencia de los datos y se eliminaron los registros erróneos
- b) *Análisis estructural*, Se realizó el estudio de la continuidad espacial de las variables a través de variogramas o funciones que explican la variabilidad espacial.
- c) *Predicción*, Se realizaron estimaciones de las variables en los puntos no muestrales, considerando la correlación espacial

6.6.1. Correlación espacial

Se efectuó la correlación de variables ambientales y antropogénicas con los procesos de cambio para un periodo de 25 años (1990 -2015). En este proceso se utilizó el Módulo *Land Change Modeler* de Idrisi Selva 17.02, que evalúa la relación de cada factor con los cambios ocurridos en un periodo de tiempo por medio del estadístico *V de Cramer*; en donde, un valor alto es indicativo de que la variable tiene un alto potencial de explicación (Johnson 2000).

Posteriormente, se utilizaron algoritmos de redes neurales (*MLP- Multilayer perceptron*), que a través de un proceso de aprendizaje dinámico puede evaluar la relación que poseen múltiples variables a la vez, utilizando el estadístico RMS (*Root Mean Square*). El procedimiento inicia con un aprendizaje inicial que se va reduciendo progresivamente en las iteraciones hasta que el proceso de aprendizaje alcanza su máximo.

6.6.2. Métricas de fragmentación del hábitat

El análisis de fragmentación del hábitat fue realizado con la extensión *Patch Analyst* para ArcGis 10.2 (Rempel et al. 2012). Con esta herramienta se obtuvieron las métricas a nivel de fragmento, clase y paisaje. Los cálculos realizados a nivel de fragmento se obtuvieron por unidad,

posteriormente los fragmentos que representan la misma categoría fueron agrupados a nivel de clase; por último, a nivel de paisaje se agruparon los fragmentos y las clases para generar información sobre el grado de heterogeneidad. A su vez, las métricas fueron divididas en tipos de índices del paisaje: área, variabilidad, borde, forma, contagio y diversidad (McGarigal et al. 2012).

En el análisis se seleccionaron las métricas recomendadas por Moreno (2014) para evaluar la complejidad y heterogeneidad proporcionando datos de la composición, complejidad y conectividad del paisaje (McGarigal y Marks 1994; Kelly et al. 2011) (Cuadro 6-3).

Cuadro 6-3. Métricas utilizadas en el análisis de fragmentación de hábitat

| Tipo | Métrica (Unidades) | Acrónimo | Descripción |
|---------------------------------|---|----------|--|
| Área | Área total del paisaje (ha) | TLA | Define la extensión total del paisaje |
| | Área de la clase (ha) | CA | Es una medida de la composición del paisaje; se refiere a la suma de las áreas de los fragmentos de cada clase |
| Variabilidad, tamaño y densidad | Número de parches (#) | NP | Número total de fragmentos por paisaje o por clase. El número de parches puede afectar los procesos ecológicos |
| | Media del tamaño del parche (ha) | MPS | Se refiere al promedio del tamaño de los fragmentos de una clase o paisaje. Proporciona información de la tendencia hacia la reducción en el tamaño de hábitat. |
| | Desviación estándar del tamaño del parche (ha) | PSSD | Es una medida de la variación absoluta que se encuentra en función del tamaño medio del parche y la diferencia del tamaño entre los parches. |
| Borde | Total del borde (m) | TE | Corresponde a la medida de la longitud total de los fragmentos a nivel de clase o paisaje. |
| | Media del borde del parche (m) | MPE | Se refiere al promedio del total de borde por fragmento a nivel de clase o paisaje |
| Forma | Índice de forma media | MSI | Es una medida promedio de la forma del parche, tomando en cuenta la proporción perímetro-área a nivel de clase o paisaje |
| | Media de la dimensión fractal del parche | MPFD | Es una medida de la complejidad de la forma del parche. Tomando valores cercanos a uno cuando el fragmento tiene perímetros simples (cuadrados o círculos), y se aproxima a dos cuando la forma es compleja |
| | Área ponderada de la dimensión fractal media del parche | AWMPFD | Mide la complejidad de los fragmentos ajustada por el tamaño de su forma. Tiene la particularidad de evaluar la complejidad del fragmento independientemente de su tamaño. Tomando valores cercanos a uno cuando el fragmento tiene perímetros simples (cuadrados o círculos), y se aproxima a dos cuando la forma es compleja |
| Diversidad | Índice de diversidad de Shannon | SDI | Se utiliza a nivel de paisaje proporcionando información de la diversidad relativa de los fragmentos. Toma valores cercanos a cero cuando la diversidad es pequeña, misma que se va incrementando cuando el número de fragmentos crece |
| | Índice de equidad de Shannon | SEI | Es una medida de la distribución y abundancia de los fragmentos. Toma valores cercanos a cero cuando la diversidad es pequeña, misma que se va incrementando cuando el número de fragmentos crece |

6.6.3. Procesos de transformación del paisaje

Para entender las implicaciones de los disturbios en la dinámica espacial y temporal de los ecosistemas, se evaluó la relación entre los patrones del paisaje y los procesos ecológicos, contrastando los cambios en el número y forma de los parches para cada una de las clases en dos periodos de tiempo distintos. El proceso se llevó a cabo utilizando las imágenes clasificadas en el módulo *Landscape Pattern and Change Process Analysis* de Idrisi Selva 17.02.

Los resultados se obtuvieron en forma de mapas donde a cada clase le fue asignada la categoría de cambio experimentada en los Sistemas de Información Geográfica (Bogaert et al. 2004; Moreno 2014):

- *Deformación*: la forma está cambiando
- *Cambio*: la posición está cambiando
- *Perforación*: el número de parches es constante pero el área está decreciendo
- *Encogimiento*: el área y perímetro están decreciendo, pero el número de parches es constante
- *Aumento*: el número de parches es constante pero el área está creciendo
- *Desgaste*: el número de parches y el área están decreciendo
- *Unión o agregación*: el número de parches está decreciendo, pero el área es constante o está creciendo
- *Creación*: el número de parches y el área están creciendo
- *Disección*: el número de parches está creciendo, pero el área está decreciendo
- *Fragmentación*: el número de parches está creciendo y el área está decreciendo fuertemente

Los procesos de desgaste, disección, fragmentación, perforación y encogimiento son indicadores de degradación del ecosistema; mientras que la unión, creación y el aumento implican la aparición de nuevas unidades. La deformación y el cambio se consideran neutrales desde la perspectiva del área (Bogaert et al. 2004).

VII. RESULTADOS

Como resultado del modelo hidrológico, se delimitó un área de estudio de 3,677 km²; integrando completamente el *Área de Protección de Flora y Fauna* (APFF) de Cuatro Ciénegas y parcialmente el acuífero Cuatro Ciénegas obtenido por la Comisión Nacional del Agua (Figura 7-1), así como los centros de población de Cuatro Ciénegas, Sacramento y Lamadrid, quienes ejercen mayor presión sobre los recursos hídricos debido a sus actividades productivas. También se obtuvo la red de drenaje, aunque debido a que las variaciones en la topografía en el valle de Cuatro Ciénegas son mínimas, la resolución espacial (1:50,000) no permite la obtención de resultados confiables, por lo que no fue utilizada.

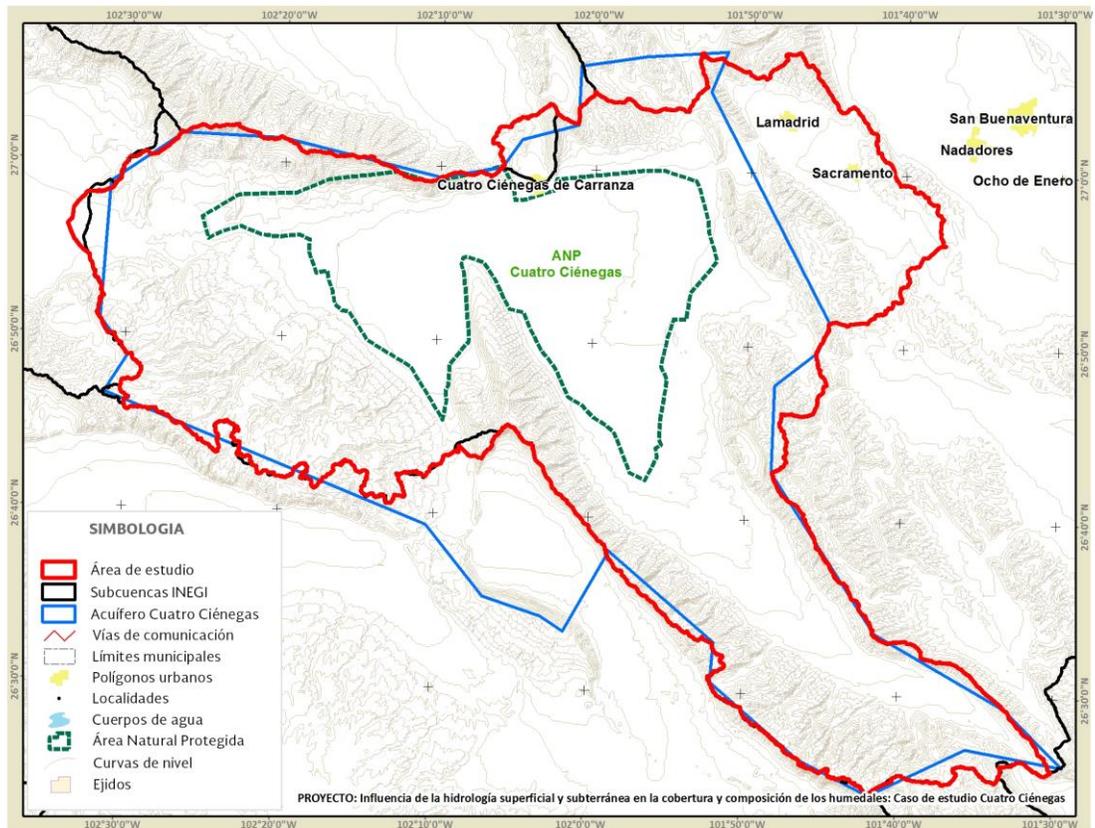


Figura 7-1. Área de estudio

El área de estudio incluyó parcialmente siete municipios de Coahuila: Cuatro Ciénegas, Sacramento, Lamadrid y en menor proporción Nadadores, Ocampo, Frontera y Castaños. Un total de 36 ejidos registrados en el Registro Agrario Nacional (RAN) y 71 comunidades. Según el Censo de Población y Vivienda 2010 (INEGI 2011), la población asentada es de 15,421 habitantes que en

Cabe señalar que las variaciones en la precipitación son extremas en la región, pudiéndose registrar una diferencia de más de 300 mm de un año a otro. En el análisis de tendencia se utilizó la media móvil de 3 años, remarcando de manera gráfica los periodos húmedos y secos que sirvieron para seleccionar las fechas del análisis temporal en los humedales (Figura 7-3). De manera general se observa un ciclo con tendencia a la baja en el comportamiento de la precipitación.

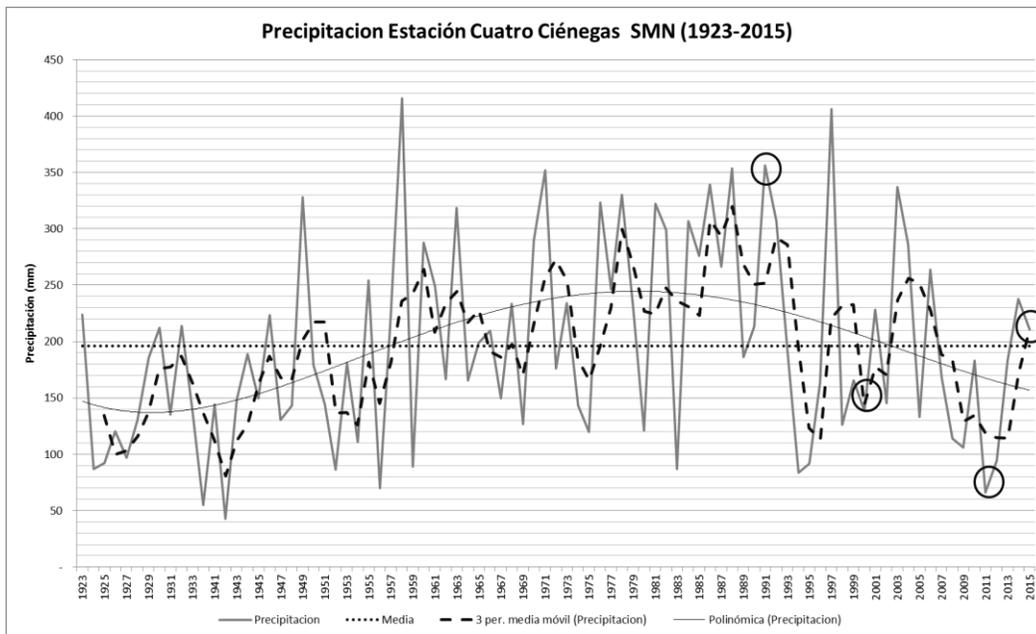


Figura 7-3. Tendencia de la precipitación para el periodo 1923-2015. (Los círculos indican las fechas representativas utilizadas para la gestión de imágenes de satélite)

También se analizaron los datos de temperatura, registrándose el promedio más elevado para el año de 2008 con 25.08°C y el valor más bajo para 1954 con 14.4°C (González et al. 2003). El promedio de la temperatura para la región es de 17.01°C y se observa en la gráfica una tendencia al aumento en años recientes (Figura 7-4).

7.2. Aprovechamiento de los recursos hídricos

Para llevar a cabo el estudio se solicitaron las bases de datos del Registro Público de Derechos del Agua (REPGA) correspondientes a los títulos inscritos para el aprovechamiento de agua subterránea, superficial y aquellos que se encuentran en libre alumbramiento, para el último

trimestre del 2014. Cabe hacer mención que las bases de datos presentan inconsistencias, ya que en algunos casos pueden existir diferencias entre las coordenadas geográficas registradas y la localización real; debido a esto se adoptó un criterio geográfico, considerando únicamente los registros que están contenidos en el área de estudio. Es importante remarcar, que con base en censos realizados por SEMARNAT-IMTA (2004) se identificaron 71 aprovechamientos, de los cuales únicamente 44 se encontraban activos, por lo que los registros contenidos en el REPDA únicamente constituyen una referencia de las concesiones otorgadas, que pueden diferir en la realidad.

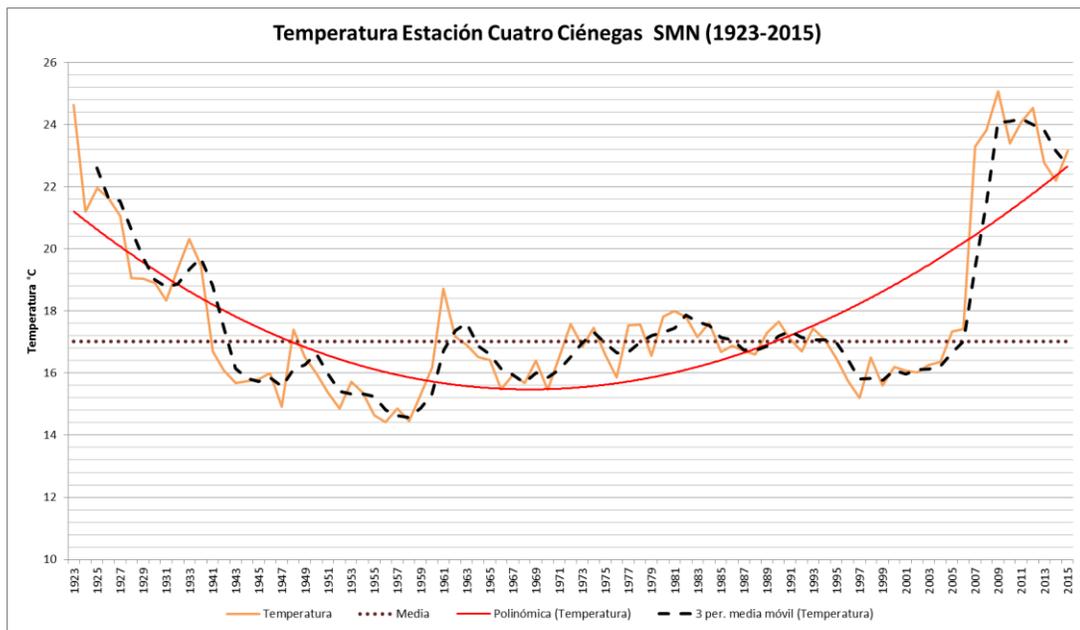


Figura 7-4. Tendencia de la temperatura para el periodo 1923-2015

En el valle de Cuatro Ciénegas, es evidente la relación que existe entre las fuentes superficiales y subterráneas disponibles. Esto es debido a que el agua superficial que alimenta a los humedales de la región proviene de fuentes subterráneas. Sin embargo, en términos prácticos estas se analizaron de manera separada debido a los aspectos administrativos y las diferencias en los métodos de extracción.

Se identificó que la mayor parte del volumen concesionado es a través de fuentes superficiales con 18.35 millones de m³, mientras que los registros subterráneos alcanzan 12.9 Mm³, incluyendo los de libre alumbramiento, para un volumen anual de 31.36 Mm³ contenidos en 237 registros, siendo el uso principal la agricultura con 21.13 Mm³ (Cuadro 7-1).

Cuadro 7-1. Concesiones inscritas en el Registro Público de Derechos del Agua (Incluye aprovechamientos subterráneos, superficiales y en libre alumbramiento)

| Uso | Títulos | Volumen (m ³) |
|------------------------|------------|---------------------------|
| Agrícola | 121 | 21,132,228 |
| Conservación ecológica | 1 | 9,460,800 |
| Público urbano | 68 | 330,054 |
| Múltiples | 3 | 161,082 |
| Pecuario | 32 | 116,513 |
| Sin información | 1 | 90,000 |
| Diferentes usos | 2 | 71,886 |
| Doméstico | 9 | 3,075 |
| TOTAL | 237 | 31,365,638 |

Al analizar la tendencia de los años con mayores registros en el Registro Público de Derechos del Agua, se observó que el primer esfuerzo por parte de la Comisión Nacional del Agua para la regulación y administración del recurso hídrico fue en 1994, efectuando a nivel nacional una campaña de titulación de los aprovechamientos en el país, convocando a los usuarios a presentar la documentación para demostrar el uso y/o explotación de los mismos. A partir de dicho año, hubo periodos importantes de registro como se muestra en la figura 7-6, siendo el más notorio el año 2013. Este incremento responde al Decreto en donde se establece Zona Reglamentada al Acuífero Cuatro Ciénegas publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF 2013c), que suspende el libre alumbramiento en la región, permitiendo únicamente aprovechamientos que cuentan con título de concesión.

Conforme al **Artículo 3** de este acuerdo se menciona lo siguiente: *El volumen disponible de aguas nacionales susceptible de otorgarse en concesión o asignación en el acuífero Cuatro Ciénegas, clave 0528, es de hasta 11.084782 millones de metros cúbicos anuales, mismo que habrá de modificarse conforme a los actos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua.*

7.2.1. Concesiones para el aprovechamiento de aguas subterráneas

En el área de estudio se contabilizaron 178 puntos de extracciones subterráneas, localizados principalmente en las poblaciones de Cuatro Ciénegas, Lamadrid y Sacramento (Figura 7-5), con un volumen de 12.12 millones de m³ de agua, destinados en su mayoría a la agricultura (Cuadro 7-2). En trabajos anteriores se registraron 71 aprovechamientos en el valle de Cuatro Ciénegas, de los cuales 34 pozos se encontraron en operación y 37 fuera de servicio, estimando una extracción de

15.1 millones de m³ al año, principalmente para uso agrícola, doméstico y público urbano (Lesser y Asociados 2001; SEMARNAT-IMTA 2004); el contraste de las cifras demuestra que es necesario realizar campañas periódicas para verificar los volúmenes que se extraen de los aprovechamientos, ya que estas cifras difieren de lo registrado en la Comisión Nacional del Agua (Figura 7-6).

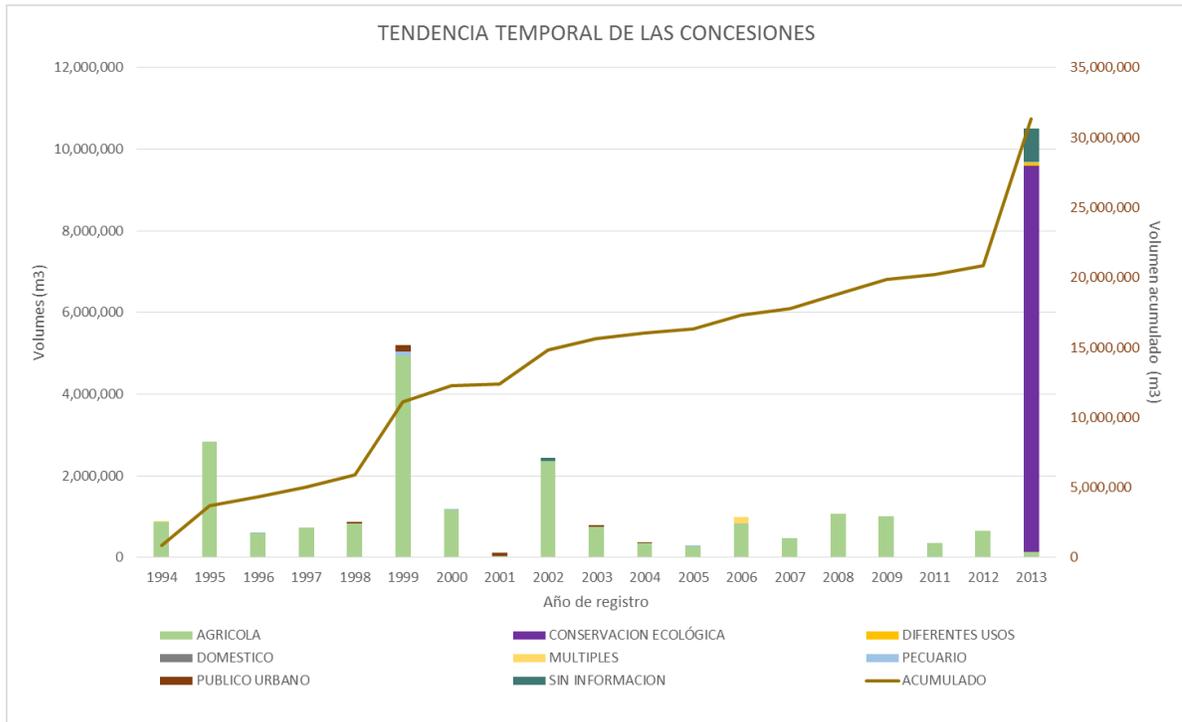


Figura 7-5. Comportamiento temporal de las concesiones inscritas en el Registro Público de Derechos del Agua

En la figura 7-7 se puede observar los volúmenes concesionados anualmente y los acumulados al presente, además del uso registrado.

Cuadro 7-2. Aprovechamientos subterráneos inscritos en el Registro Público de Derechos del Agua

| Uso | Títulos | Volumen (m ³) |
|-----------------|------------|---------------------------|
| Agrícola | 98 | 11,582,223 |
| Público urbano | 59 | 257,554 |
| Múltiples | 3 | 161,082 |
| Sin información | 1 | 90,000 |
| Pecuario | 8 | 25,356 |
| Doméstico | 9 | 3,075 |
| TOTAL | 178 | 12,119,290 |

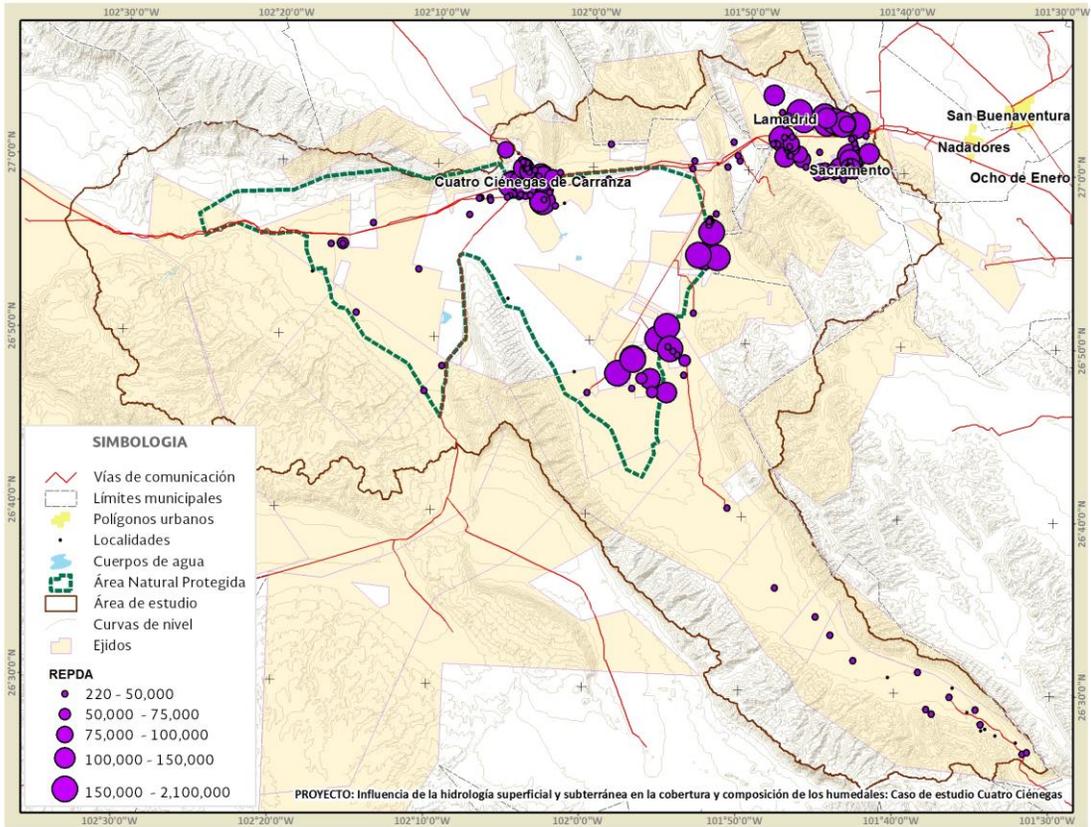


Figura 7-6. Localización geográfica de los títulos de concesión para el aprovechamiento de aguas subterráneas

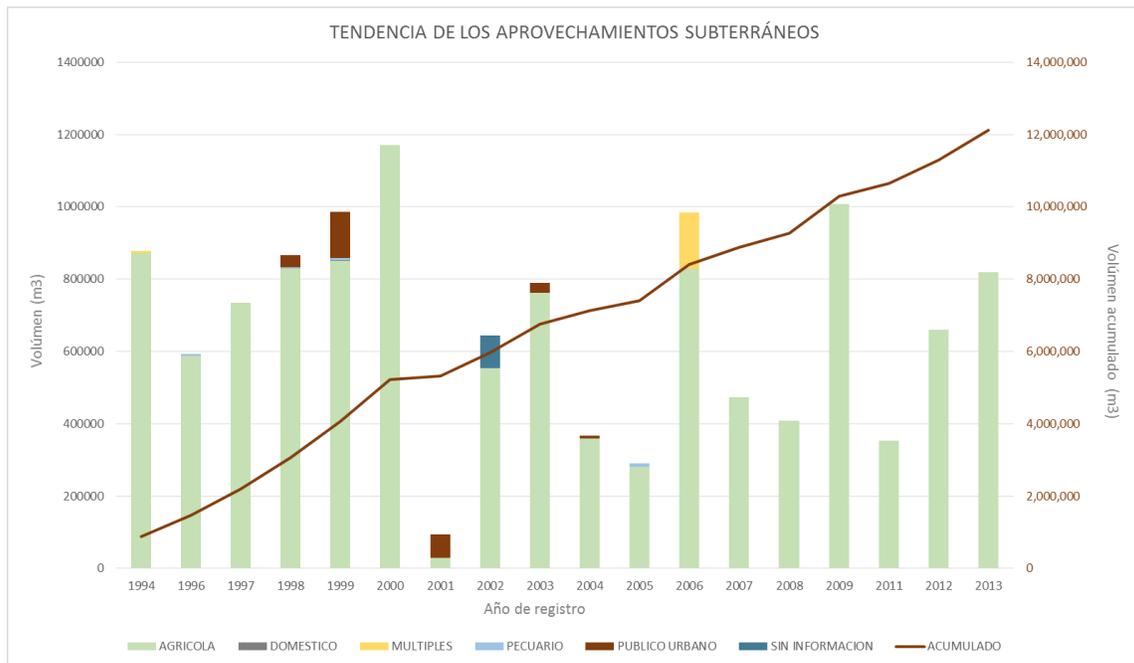


Figura 7-7. Comportamiento de los registros para aprovechamientos subterráneos

7.2.2. Concesiones para el aprovechamiento de aguas superficiales

En lo que respecta a los aprovechamientos superficiales, se tienen inscritos 42 títulos que amparan un volumen de 18.35 Mm³ de agua (Figura 7-8). La mayor parte del volumen (9.4 Mm³) esta concesionado para fines de conservación ecológica a Pronatura Noreste A.C. El segundo uso en orden de importancia se destina a las actividades agrícolas, cuyos volúmenes son distribuidos mayoritariamente a través de los canales Santa Tecla y Saca Salada (Cuadro 7-3).

Cuadro 7-3. Aprovechamientos superficiales inscritos en el Registro Público de Derechos del Agua

| Uso | Títulos | Volumen (m ³) |
|------------------------|-----------|---------------------------|
| Conservación ecológica | 1 | 9,460,800 |
| Agrícola | 9 | 8,746,675 |
| Pecuario | 23 | 78,017 |
| Público urbano | 9 | 72,500 |
| TOTAL | 42 | 18,357,992 |

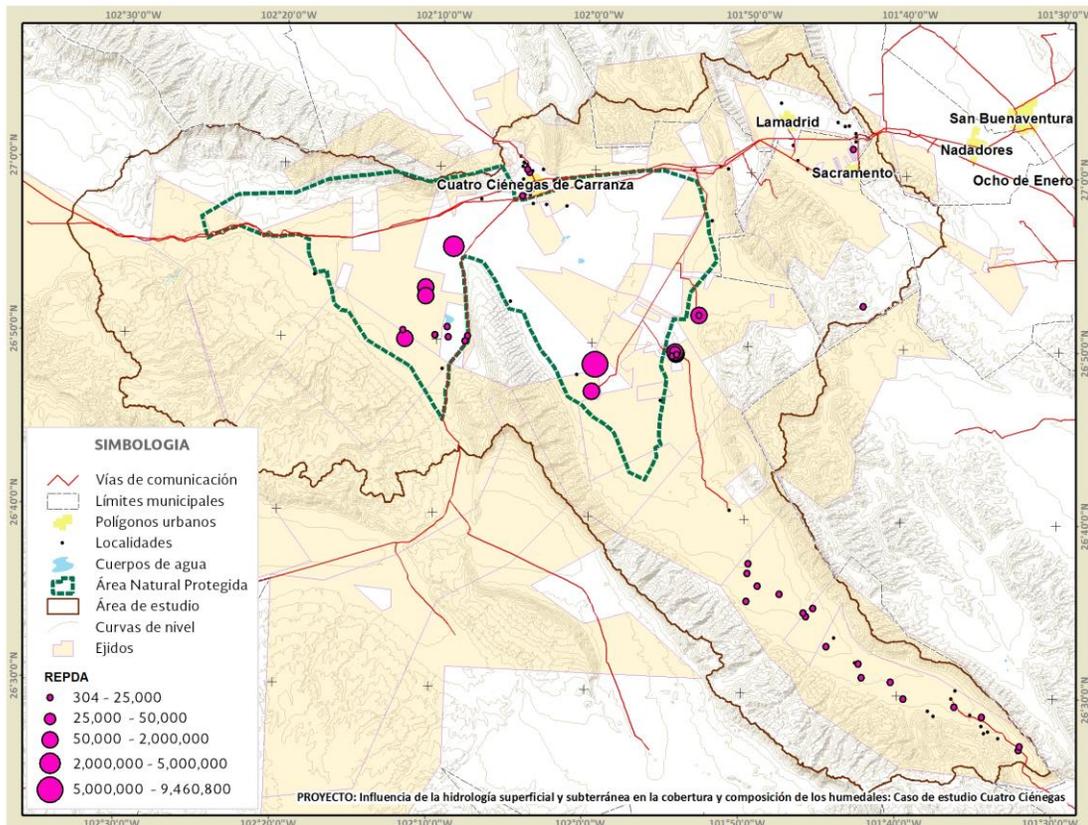


Figura 7-8. Localización geográfica de los títulos de concesión para el aprovechamiento de aguas superficiales

En la figura 7-9, se puede observar la tendencia de los registros para el aprovechamiento de las aguas superficiales a partir del año 1995.

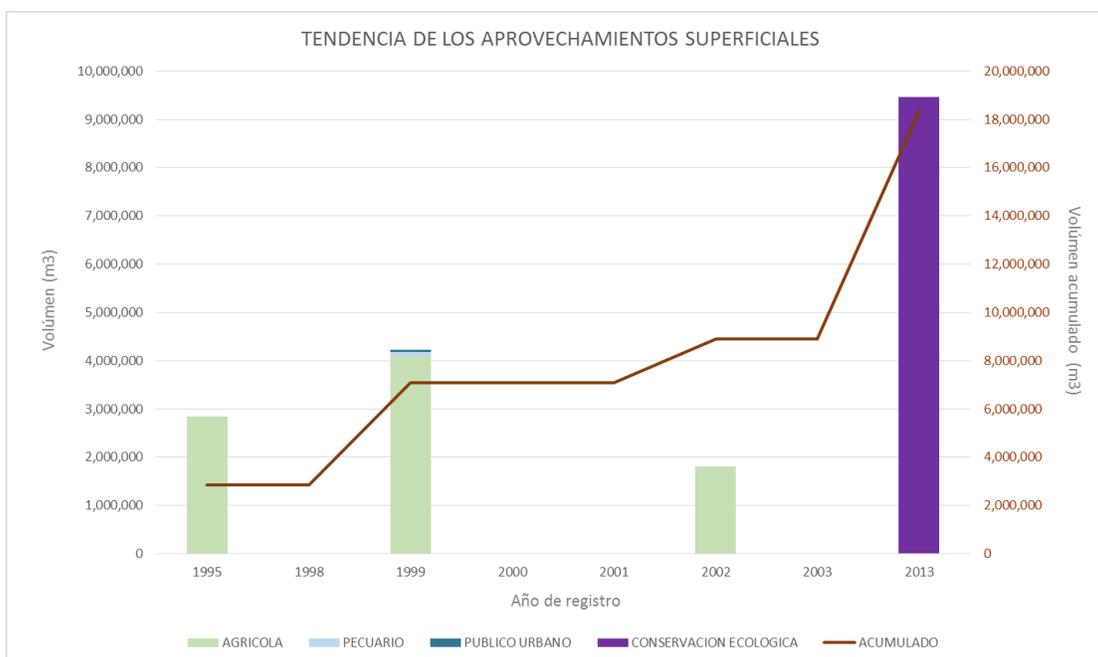


Figura 7-9. Comportamiento de los registros para aprovechamientos superficiales

7.2.1. Aprovechamientos en libre alumbramiento

Aunque en el acuífero Cuatro Ciénegas ya no existe el libre alumbramiento, aún se presentan registros que por diversas causas no han sido actualizados, los cuales se contabilizaron debido a que su regularización puede aportar al aumento de volúmenes de extracción subterránea. En esta base de datos se registró un volumen de 888,356 m³ (Cuadro 7-4), localizados en su mayoría en áreas agrícolas cercanas a las poblaciones de Sacramento y Lamadrid (Figura 7-10), utilizados en su mayoría con fines agrícolas (Figura 7-11).

Cuadro 7-4. Aprovechamientos en libre alumbramiento en el Registro Público de Derechos del Agua

| Uso | Registros | Volumen (m ³) |
|-----------------|-----------|---------------------------|
| Agrícola | 14 | 803,330 |
| Diferentes usos | 2 | 71,886 |
| Pecuario | 1 | 13,140 |
| TOTAL | 17 | 888,356 |

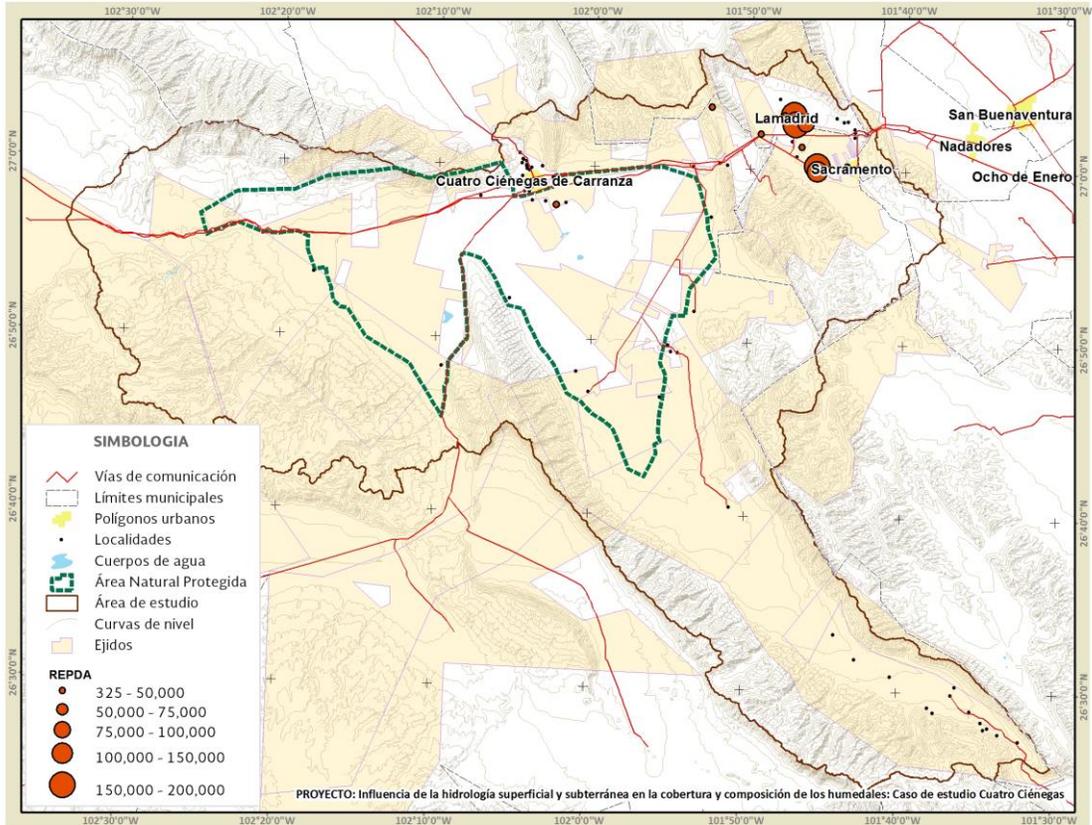


Figura 7-10. Localización geográfica de aprovechamientos en libre alumbramiento

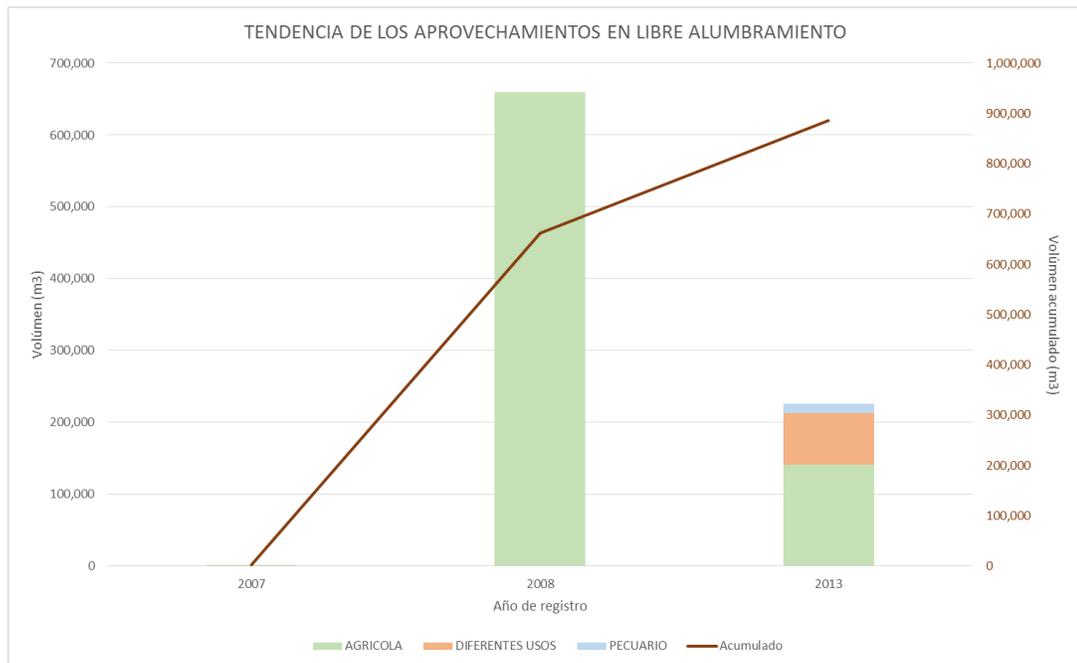


Figura 7-11. Comportamiento de los registros para aprovechamientos en libre alumbramiento

7.2.2. Aprovechamientos en el Área Natural Protegida

En el Área Natural Protegida de Cuatro Ciénegas, se registraron 48 concesiones con un volumen aproximado de 19.5 millones de m³, de los cuales 16.5 Mm³ corresponden a fuentes superficiales y 2.9 Mm³ a subterráneas, principalmente destinados al sector agropecuario (Cuadro 7-5), estos representan el 62.2% del volumen concesionado para el área de estudio (Figura 7-12).

Cuadro 7-5. Aprovechamientos anuales pertenecientes al Registro Público de Derechos del Agua registrados para el ANP

| Uso | Títulos | Volumen (m ³) |
|----------------|-----------|---------------------------|
| Agrícola | 26 | 9,963,775 |
| Pecuario | 11 | 9,519,145 |
| Público urbano | 11 | 28,875 |
| TOTAL | 35 | 19,511,795 |

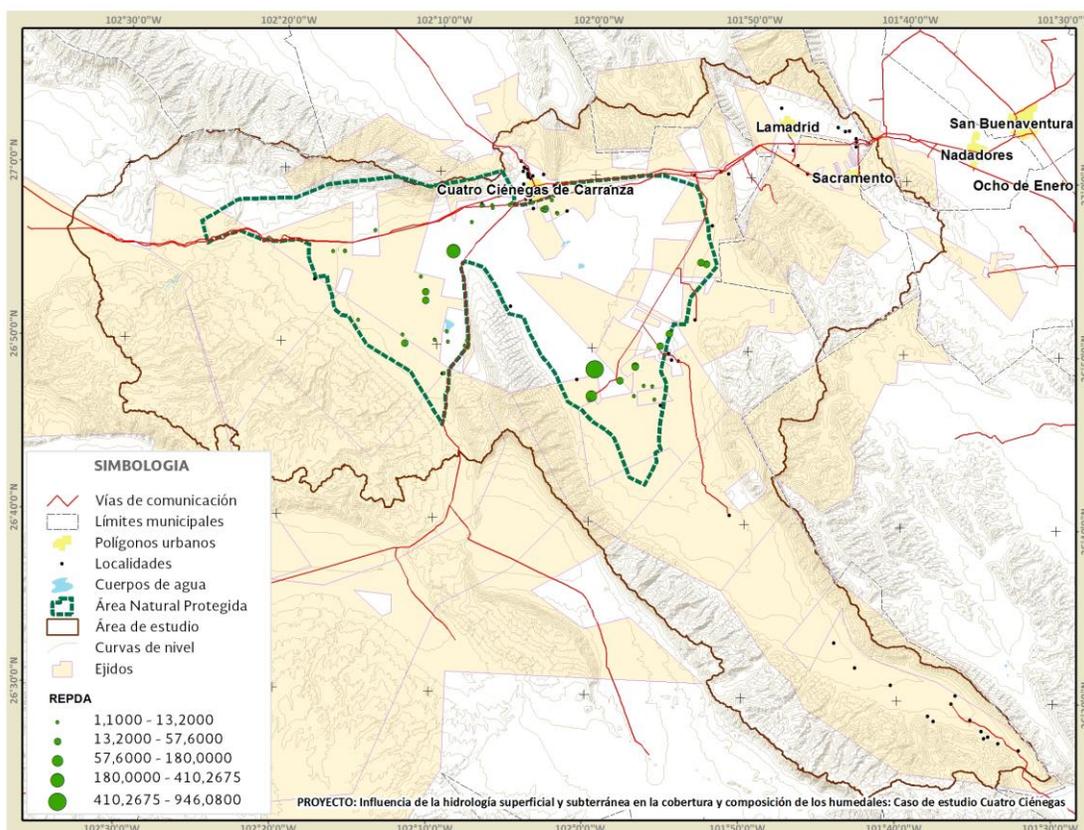


Figura 7-12. Localización geográfica de los aprovechamientos en el Área Natural Protegida

7.3. Consideraciones del Balance Hídrico en el valle de Cuatro Ciénegas

Se realizó una revisión de los trabajos enfocados a calcular la recarga del acuífero, que constituye la principal fuente de agua para los humedales en Cuatro Ciénegas. Proporcionando información relativa al balance hidrológico y la disponibilidad media anual.

La capacidad de captación y el comportamiento hidrológico de una cuenca depende de las características fisiográficas y las variaciones climáticas. Considerando que la disponibilidad del agua depende de la capacidad de la cuenca para captar y retener el agua, el uso de métodos para estimar el balance hídrico se ha hecho más recurrente (Santillan et al. 2013).

Los principales componentes del balance hídrico son la precipitación, la evapotranspiración, además de la escorrentía superficial y subsuperficial. Este cálculo proporciona el entendimiento de los procesos hidrológicos y de la química del agua en los humedales y ayuda a medir los efectos de las alteraciones hidrológicas naturales o antrópicas. El valle de Cuatro Ciénegas es considerado una cuenca endorreica en donde la recarga del acuífero se realiza mediante la infiltración de lluvia, principalmente sobre los flancos de las sierras, en los afloramientos de calizas acuíferas y de los escurrimientos superficiales a lo largo de los arroyos.

En el área hay dos unidades acuíferas, uno de características granulares y otro calizo. El acuífero granular está formado por materiales aluviales y lacustres de baja permeabilidad y transmisividad, abarcando toda la superficie del valle con un espesor de 20 a 40 metros, limitado inferior y lateralmente por rocas sedimentarias poco permeables de origen marino, su recarga se origina por la infiltración de escurrimientos superficiales en los flancos de las montañas y los bordes de los valles, con volúmenes estimados de 10- 15 millones de m³ al año.

El acuífero calizo se caracteriza por su heterogeneidad en las rocas carbonatadas que son atacadas por disolución, con una transmisividad alta y caudales que van desde unos cuantos litros hasta varios metros cúbicos por segundo; estos son el origen de los manantiales que se localizan en los flancos de las montañas y en los valles donde el relleno es muy delgado (SARH 1980).

La estimación de la descarga anual de los manantiales de Cuatro Ciénegas, es un tema controversial debido a las diferencias que existen en las distintas investigaciones realizadas. Lesser y Asociados (2001) estimaron 53 Mm³ anuales, posteriormente Wolaver (2008) calculó un

volumen de 35 Mm³ y en el DOF (2008) se menciona una descarga de 99.5 Mm³ anuales provenientes de las pozas.

Wolaver (2008), utilizó el método químico del ion cloruro para estimar la recarga para el flanco sureste de la Sierra de San Marcos y Pinos (Carrica 2002; Wolaver et al. 2008). Es una técnica indirecta considerada apropiada para el balance en las regiones semiáridas, la cual requiere información de las concentraciones de cloruro del agua de lluvia y de la cuantificación y distribución espacial de la precipitación.

Debido a la falta de información de las concentraciones del ion cloruro en el agua de lluvia en México, se utilizó información del *Big Bend National Park*, localizado en Texas, USA a una distancia de 300 km, mientras que las concentraciones de cloruro en las pozas fueron obtenidas de trabajos previos. El escurrimiento superficial fue medido únicamente en los canales Saca Salada y Santa Tecla por considerarlos las descargas más importantes de los manantiales, mencionando que estimar de manera individual las pozas que descargan en lagunas de evaporación no sería práctico.

A partir de las variables mencionadas, se calculó un volumen de recarga para el flanco sureste de la Sierra de San Marcos y Pinos de 6.2 Mm³ anuales y para los flancos oeste y norte de 2.9 Mm³ y 1.3 Mm³ para el Río Cañón (Wolaver y Diehl 2011). Es decir, se estima una recarga anual de 10.4 Mm³ para la zona que proporciona la captación de agua para los manantiales.

En el estudio en donde se da a conocer el balance hídrico del acuífero de Cuatro Ciénegas (DOF 2008); la descarga total del acuífero fue estimada a través de la descarga de las pozas, la evapotranspiración en áreas con niveles freáticos someros, la extracción de captaciones y el flujo subterráneo hacia fuera del valle, mientras que el cambio de almacenamiento fue cuantificado a partir de los niveles de agua en el monitoreo de la red piezométrica.

De acuerdo a este análisis, la descarga del acuífero es de 145.2 Mm³ anuales, compuesto por 99.5 Mm³ de las pozas, 30.6 Mm³ de evapotranspiración y 15.1 Mm³ por la extracción artificial; se considera que la salida del flujo subterráneo a través del estrechamiento del valle no es significativa, por lo que no fue tomado en cuenta. El cambio de almacenamiento del acuífero fue calculado multiplicando el coeficiente de almacenamiento por el volumen drenado o saturado durante el periodo del balance, con un valor negativo de -2.3 Mm³.

La estimación de la recarga para el acuífero de Cuatro Ciénegas fue de 142.9 millones de metros cúbicos anuales tomando en consideración: a) infiltración del agua de lluvia; b) infiltración de escurrimientos en los flancos montañosos; c) la infiltración en la red de canales; d) retornos de agua en la zona urbana y tierras agrícolas; y d) la aportación procedente de la zona de Ocampo (CONAGUA 2009).

7.3.1. Análisis de la disponibilidad media anual del acuífero de Cuatro Ciénegas

La disponibilidad de agua permite satisfacer las demandas de la población de los sectores productivos y las necesidades de la población. En México la Disponibilidad Media Anual se calcula conforme a la NOM-011-CNA-2000 (DOF 2002), mediante la siguiente expresión:

$$\text{Disponibilidad media anual} = \text{Recarga total} - \text{Descarga natural comprometida} - \text{Volumen concesionado}$$

Con el objetivo de comparar la disponibilidad media anual del acuífero (DOF 2008), se actualizó el volumen concesionado del REPDA considerando los aprovechamientos localizados en el acuífero, y posteriormente se integraron los resultados obtenidos por Wolaver (2008) (Cuadro 7-6).

Cuadro 7-6. Cálculo de la disponibilidad media anual de Cuatro Ciénegas

| Fuente | Año REPDA | Recarga total (Mm ³) | Descarga natural comprometida (Mm ³) | Volumen subterráneo concesionado (Mm ³) | Disponibilidad media anual |
|--------------|-----------|----------------------------------|--|---|----------------------------|
| DOF 2008 | 2002 | 142.97 | 130.17 | 1.9 | 10.89 |
| DOF 2008 | 2006 | 142.97 | 130.17 | 3.035 | 9.76 |
| DOF 2008 | 2014 | 142.97 | 130.17 | 6.8 | 6.0 |
| Wolaver 2008 | 2014 | 10.4 | 65.7 | 6.8 | -62.1 |

La disponibilidad fue estimada para el acuífero de Cuatro Ciénegas en el periodo (1998- 2000) considerando las siguientes variables (DOF 2008):

1. *La recarga total del acuífero* (142.9 Mm³).
2. *La descarga natural comprometida*. Que considera el caudal medio brotante de las pozas (99.5 Mm³), que sirve de sustento a los ecosistemas y alimenta la red de canales que conduce agua a las zonas agrícolas fuera del valle; y la evapotranspiración en áreas aledañas a las pozas, canales, cuerpos y cursos de agua, (30.7 Mm³) que sustenta a cuerpos de agua y humedales de menor extensión.

3. *Volumen concesionado*. Inscrito en el Registro Público de Derechos del Agua para el acuífero de Cuatro Ciénegas en el año 2002 (1.9 Mm³), 2006 (3.035 Mm³) y 2014 (6.8 Mm³).

En el trabajo de Wolaver (2008), no se calculó la disponibilidad media anual, por lo que algunas de las variables necesarias en la ecuación fueron complementadas con la información del DOF (2008) como sigue:

1. *La recarga total del acuífero* (10.4 Mm³).
2. *La descarga natural comprometida*. Que considera el caudal medio brotante de las pozas (35.0 Mm³), que sirve de sustento a los ecosistemas y alimenta la red de canales que conduce agua a las zonas agrícolas fuera del valle; y la evapotranspiración en áreas aledañas a las pozas, canales, cuerpos y cursos de agua, (30.7 Mm³) que sustenta a cuerpos de agua y humedales de menor extensión; este último tomado del (DOF 2008).
3. *Volumen concesionado*. Inscrito en el Registro Público de Derechos del Agua para el Acuífero Cuatro Ciénegas en el año 2014 (6.8 Mm³).

De acuerdo a los resultados existe un decremento en el volumen de la disponibilidad media anual, que actualmente corresponde a 6.0 Mm³. Por otro lado, aplicando la misma metodología con los datos obtenidos por Wolaver (2008), se obtuvo un déficit de 62.1 Mm³. Sin embargo, estas discrepancias pueden ser atribuidas a diferencias en el área geográfica y los objetivos del estudio.

7.4. Piezometría del acuífero Cuatro Ciénegas

El modelo conceptual del acuífero de Cuatro Ciénegas, se compone por dos sistemas de flujo subterráneo que circulan a través de medios hidrogeológicos distintos (SEMARNAT-IMTA 2004). El superior está constituido por sedimentos finos compuestos por formaciones evaporíticas, limos y arcillas; mientras que el inferior constituye un acuífero semiconfinado caracterizado por rocas calizas fracturadas.

De acuerdo a estudios realizados, se ha determinado que el comportamiento del nivel estático en el acuífero tiene una respuesta rápida a los eventos de precipitación, siendo indicativo de un acuífero confinado que responde a un incremento en la presión hidrostática; por lo que cualquier actividad de almacenamiento, bombeo, evapotranspiración puede causar un cambio en el nivel de agua subterránea (Ortíz y Gutierrez 2012).

En tanto que el flujo de agua subterránea muestra un comportamiento diferente en ambos flancos la Sierra de San Marcos; en su porción poniente tiene una dirección que se dirige al oriente del

acuífero, mientras que en la porción oriente la dirección es principalmente concéntrica (Paredes 2011; Ortiz y Gutierrez 2012).

Los niveles estáticos del acuífero son considerados someros, variando de los 0 a 50 metros, en el que los valores más cercanos al nivel del terreno se presentan en sitios cercanos a las pozas, por lo que existe una alta fragilidad ante los efectos de la evapotranspiración. Paredes (2011), menciona que en la mayor parte del valle las profundidades oscilan entre los 2 y 20 metros de profundidad.

La medición de los niveles estáticos del acuífero de Cuatro Ciénegas se inició en el año 1998 colocando doce pozos distribuidos en la porción oriental del valle (SEMARNAT-IMTA 2004) (Figura 7-13). Posteriormente, en el año 2007 el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua realizó la perforación de once pozos más con una profundidad de 30 metros, como parte del proyecto “Estimación del balance y disponibilidad del acuífero de Cuatro Ciénegas” (Ortiz y Gutierrez 2012) (Figura 7-14), estableciendo una red que actualmente se mantiene recopilando datos. Sin embargo, no se tiene continuidad en las mediciones de los pozos realizados en 1998, lo que conlleva a tener series de datos discontinuas.

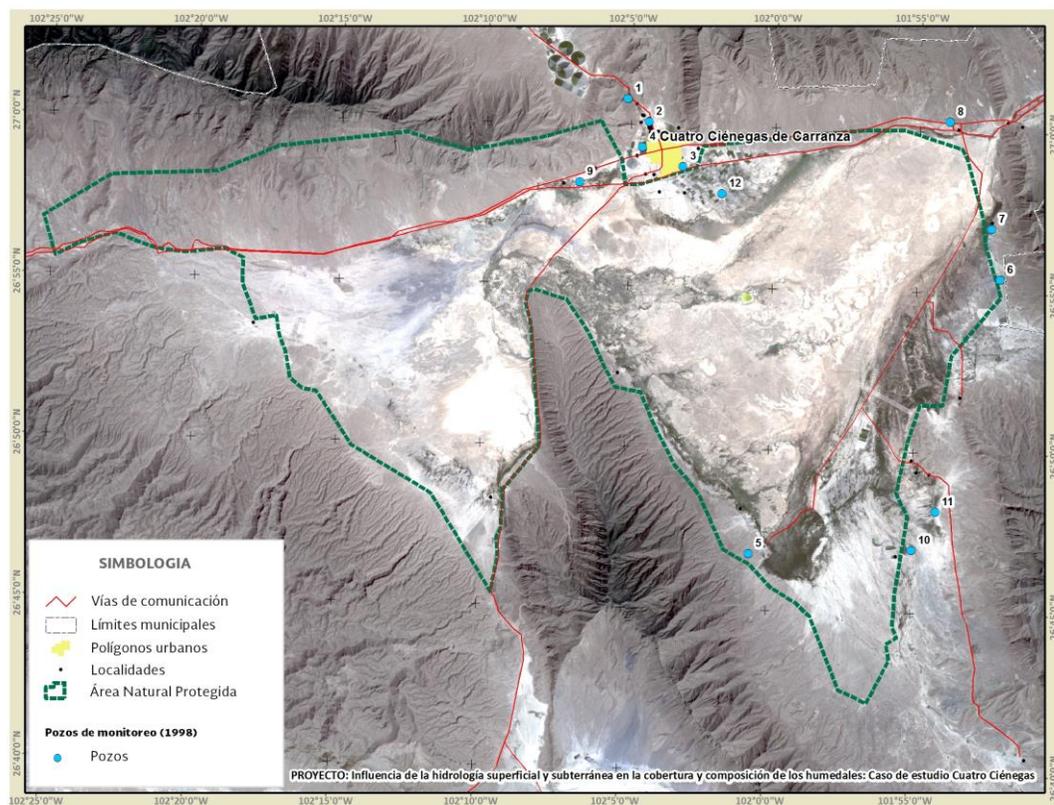


Figura 7-13. Distribución de los pozos de monitoreo instalados en el año 1998 (SEMARNAT-IMTA 2004)

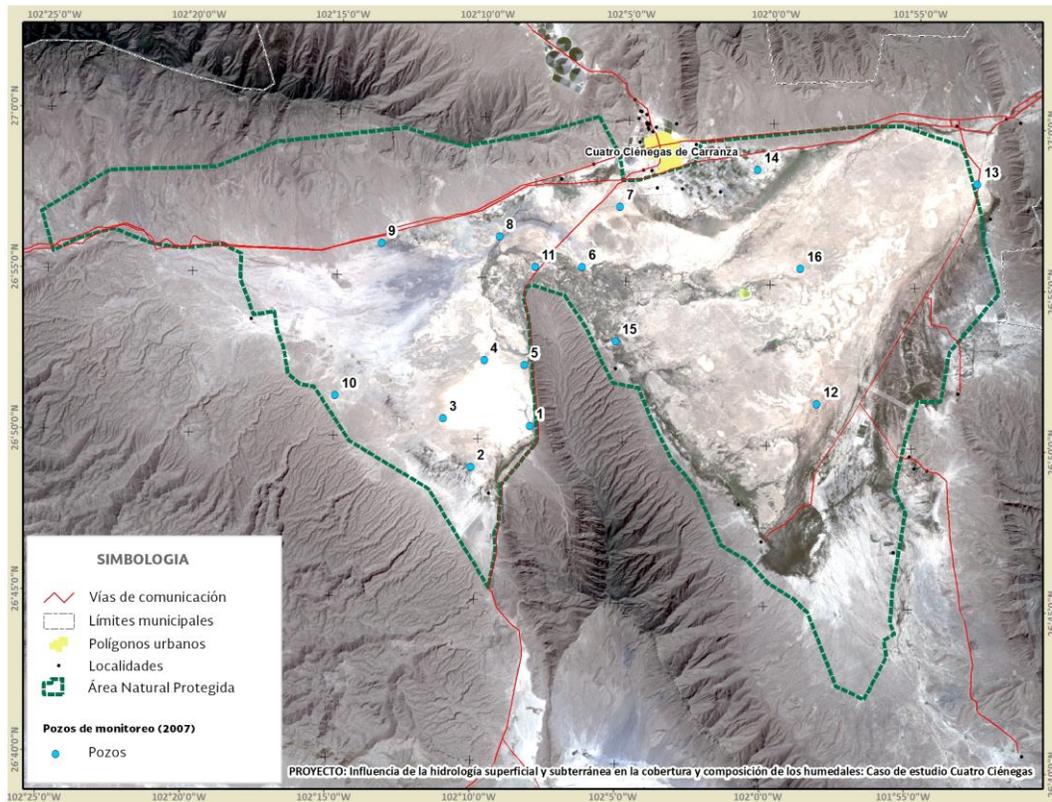


Figura 7-14. Distribución de los pozos de monitoreo instalados en el año 2007 (Ortíz y Gutierrez 2012)

El análisis espacial se obtuvo con datos de la profundidad del nivel estático obtenidos para el periodo de septiembre de 2014, en donde se registraron valores que fluctúan desde los 0.05 hasta los 8.43 metros (Cuadro 7-7). A partir de estos datos, se generó la configuración del terreno con la herramienta *Spatial Analyst* del software ArcGis, obteniendo líneas equipotenciales representativas de la profundidad al nivel estático del acuífero para el mes de septiembre de 2014 (Figura 7-15).

La zona con la cota más cercana al terreno (Pozo 6), corresponde a la región de la mayor extensión de humedales en el valle, que además coincide con la formación de pequeñas lagunas salinas (palustre llanura húmeda), formadas por los niveles someros del acuífero y la alta evaporación en la región (Figura 7-16). Esta condición, a su vez mantiene la humedad en los suelos para el desarrollo de humedales emergente en las áreas colindantes al río Mezquites. Con base en la configuración del terreno, se observó que la profundidad del nivel estático en la porción oriente del valle presenta valores que van desde 1.65 metros en los flancos de la Sierra de San Marcos y Pinos, hasta los 7.41 en el Ejido El Venado. Por otro lado, las partes más someras de la zona poniente corresponden a las áreas en donde se encuentran los humedales de la Poza Churince, con profundidades de 2.31 metros, hasta llegar a los 7.67 metros de profundidad (Figura 7-15).

Cuadro 7-7. Profundidad al nivel estático en los pozos de observación para el mes de septiembre de 2014

| Pozo | Profundidad al nivel estático (m) |
|------|-----------------------------------|
| 1 | 2.31 |
| 2 | 8.43 |
| 3 | 6.62 |
| 4 | 2.29 |
| 5 | 3.22 |
| 6 | -0.05 |
| 7 | 6.02 |
| 8 | 3.68 |
| 9 | 7.67 |
| 10 | - |
| 11 | - |
| 12 | 7.41 |
| 13 | 6.60 |
| 14 | 2.53 |
| 15 | 1.63 |
| 16 | 4.95 |

*Datos proporcionados a través de reportes técnicos realizados conjuntamente por personal del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua y la Dirección Local en Coahuila de la Comisión Nacional del Agua

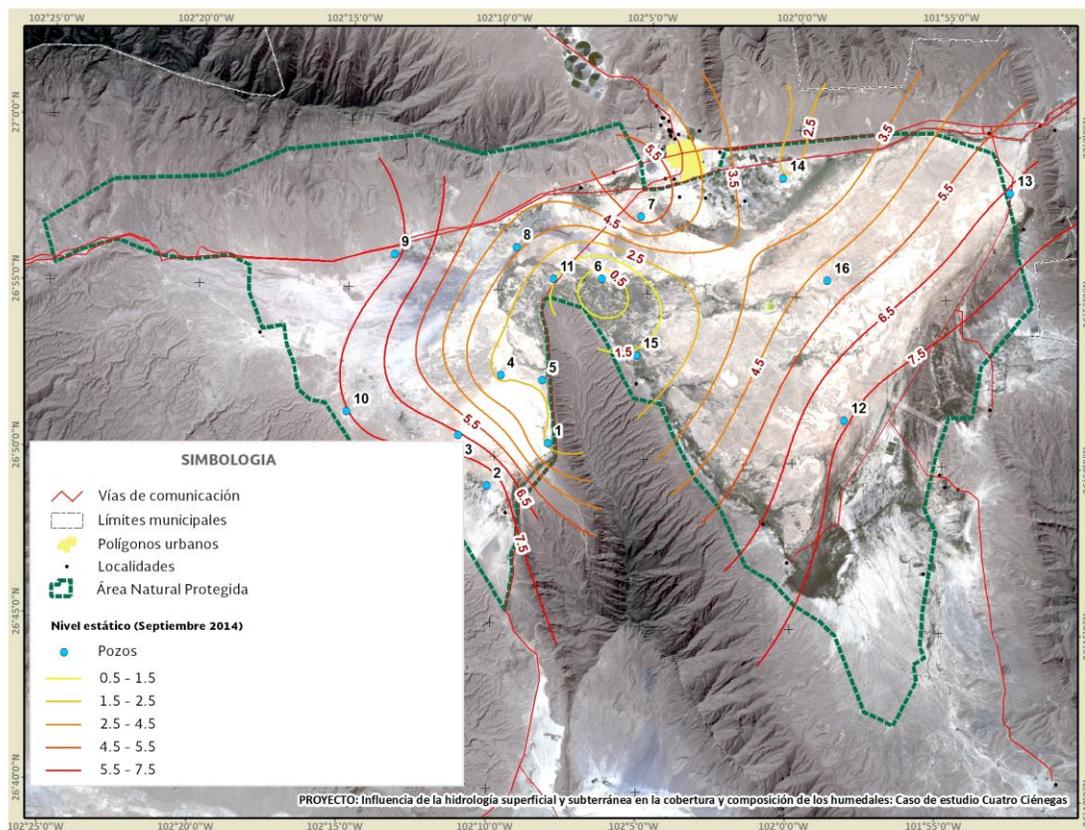


Figura 7-15. Configuración de la profundidad al nivel estático para el mes de septiembre de 2014



Figura 7-16. Humedales palustres formados por los niveles someros del acuífero y la evaporación

También se representó un aumento en la profundidad de los niveles estáticos en la cabecera municipal de Cuatro Ciénegas y las áreas de cultivo aledañas, lo cual pudiera deberse a los aprovechamientos subterráneos cercanos (Figura 7-17).

7.4.1. Evolución de los niveles estáticos

En el análisis temporal de los niveles estáticos, la información registrada en los años 1998, 2001 y 2004 no fue utilizada (SEMARNAT-IMTA 2004), debido a que los pozos están localizados en sitios diferentes a los actuales, mostrando discrepancias en los valores.

Debido a lo anterior, se consideraron únicamente los datos de los pozos que presentaban una continuidad de sus mediciones en el periodo de tiempo comprendido entre 2008 y 2014, (Cuadro 7-8). De acuerdo a los datos, se apreció un decremento generalizado de los niveles del acuífero que van desde los 0.04 hasta los 0.96 metros, observándose únicamente en el pozo 5 un incremento de 0.23 metros (Figura 7-18).

En la figura 7-19 se observa un incremento en los niveles registrados para el mes de octubre de 2010, producto de las lluvias extraordinarias ocasionadas por el huracán Alex en el mes de junio del mismo año. De acuerdo a los registros, la respuesta a los niveles de agua en los pozos

muestran ascensos y descensos que corresponde a las fluctuaciones estacionales (Ortíz y Gutierrez 2012).

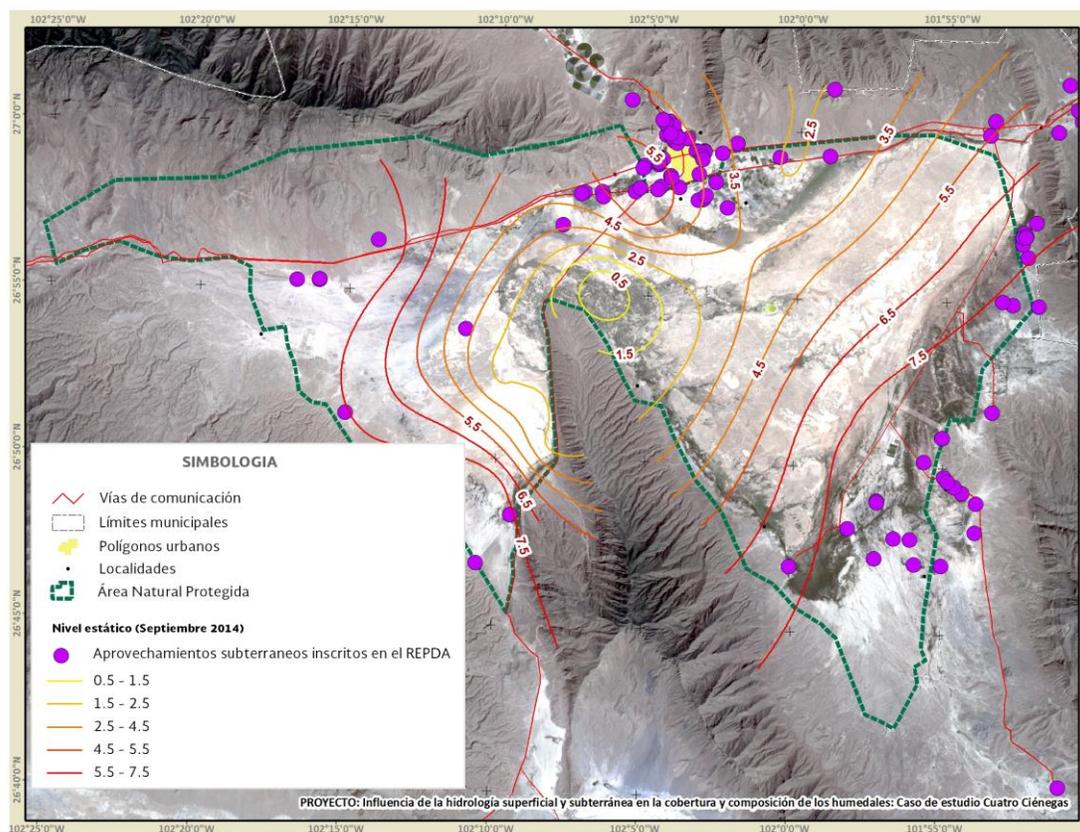


Figura 7-17. Comparación de la profundidad a nivel estático y la localización de los aprovechamientos subterráneos inscritos en el Registro Público de Derechos del Agua

Cuadro 7-8. Evolución la profundidad estática en pozos de observación (2008-2014)

| Pozo | oct08 | ene09 | nov09 | may10 | oct10 | mar11 | may11 | nov11 | oct12 | sep13 | mar14 | sep14 | Evolución 2008-2014 |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------------------|
| Pozo 1 | 1.97 | 1.90 | 1.99 | 1.87 | 1.82 | 1.96 | 2.26 | 1.61 | 2.45 | | 1.81 | 2.31 | -0.34 |
| Pozo 2 | 7.47 | 7.36 | 7.57 | 7.47 | 7.63 | 7.60 | 7.85 | 7.18 | 8.05 | 8.19 | 8.00 | 8.43 | -0.96 |
| Pozo 3 | 6.33 | 6.38 | 6.41 | 6.37 | 6.19 | 6.30 | 6.41 | 6.49 | 6.49 | 6.55 | 6.58 | 6.62 | -0.29 |
| Pozo 4 | 2.08 | 1.99 | 1.99 | 2.02 | 1.94 | 2.08 | 2.15 | 2.22 | 2.22 | 2.15 | 2.16 | 2.29 | -0.21 |
| Pozo 5 | 3.45 | | | 3.28 | 2.83 | 3.14 | 3.98 | 3.46 | 3.46 | | 2.78 | 3.22 | 0.23 |
| Pozo 6 | | | -0.15 | -0.11 | -0.17 | -0.23 | -0.07 | -0.49 | -0.49 | 0.03 | | 0.05 | -0.20 |
| Pozo 7 | 5.60 | | 6.11 | 6.21 | 5.83 | 5.87 | 5.91 | 5.70 | 5.70 | 5.64 | 5.79 | 6.02 | -0.42 |
| Pozo 8 | 3.64 | 3.48 | 3.28 | 3.10 | 2.65 | 2.98 | 3.27 | 3.65 | 3.65 | 3.13 | 3.08 | 3.68 | -0.04 |
| Pozo 9 | 7.15 | 7.13 | 7.25 | | 7.22 | 7.30 | 7.31 | 7.48 | 7.48 | 7.55 | 7.52 | 7.67 | -0.52 |

*Valores en metros

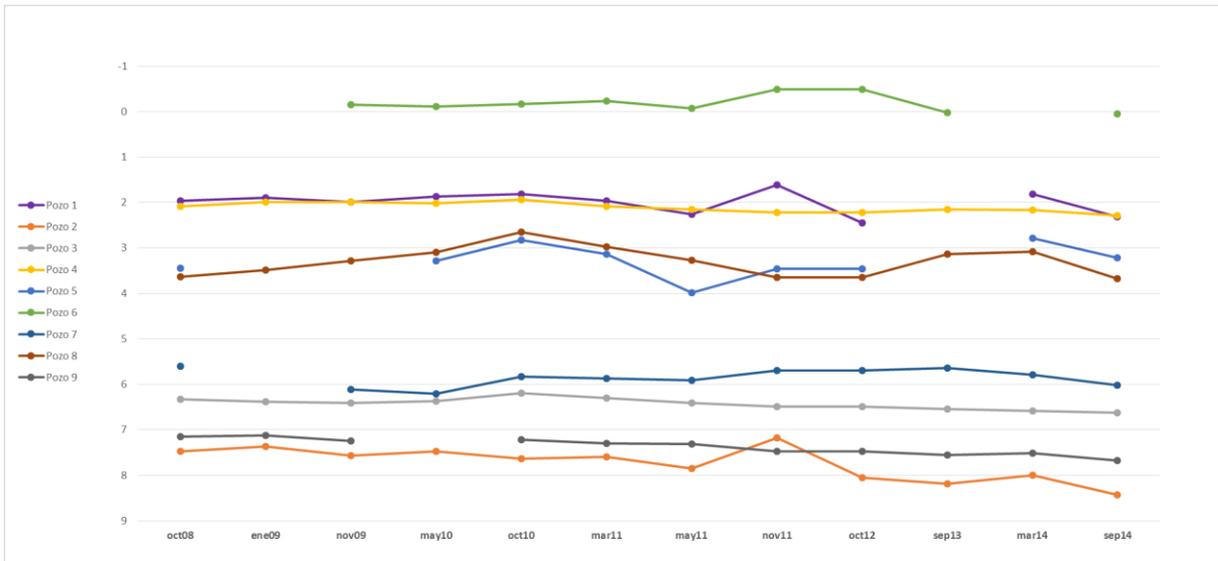


Figura 7-18. Evolución de la profundidad a nivel estático (2008- 2014)

7.5. Identificación de manantiales

En la literatura se menciona la presencia de 200 a 500 manantiales en Cuatro Ciénegas (RAMSAR 2002; Wolaver 2008), que van del orden de unos cuantos centímetros hasta 18 metros de diámetro, con un flujo permanente y en ocasiones se presentan de manera temporal, lo que ha dificultado su localización y estudio. Estos manantiales, están interconectados a través de un complejo sistema de drenaje que además dificulta conocer las aportaciones y salidas para efectuar un cálculo de los volúmenes que aportan.

En la actualidad, no se tiene una base de datos de la distribución de los manantiales de la región y por ende, tampoco se cuentan con implementos de medición que permitan el monitoreo de las condiciones hidrológicas y sus variaciones (Paredes 2011).

Debido a lo anterior, se llevó a cabo la identificación visual mediante el uso de técnicas de Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica, utilizando fotografías aéreas de alta resolución espacial de los servidores de ESRI para ArcGis, y compuestos híbridos de 2.5 metros de resolución en falso color natural de las imágenes SPOT con fecha del 1 de enero de 2012, además de contar con el apoyo visual de las imágenes de Google Earth. La temporada de mayor humedad

en la región es la inercial, por lo que la imagen SPOT proporciona los elementos necesarios para la identificación de pozas temporales.

Mediante la identificación visual se registraron 2,164 manantiales, cuya presencia está relacionada con las pozas, ríos, pantanos y lagunas en el Área Natural Protegida (Figura 7-19). También se identificó que las lagunas de mayor dimensión son alimentadas por varios manantiales, que a su vez conforman sistemas de humedales interconectados (Figura 7-20). Esta base de datos fue integrada para encausar futuras exploraciones, que a través de un trabajo de campo detallado puedan constituir un censo de los manantiales para la región.

Una vez obtenida la base de datos, se generó una matriz raster para identificar las áreas con mayor densidad de manantiales, que potencialmente puedan aportar mayores volúmenes de agua a los ecosistemas y que a su vez se relacionen con la presencia de zonas de mayor diversidad biológica (Figura 7-21).

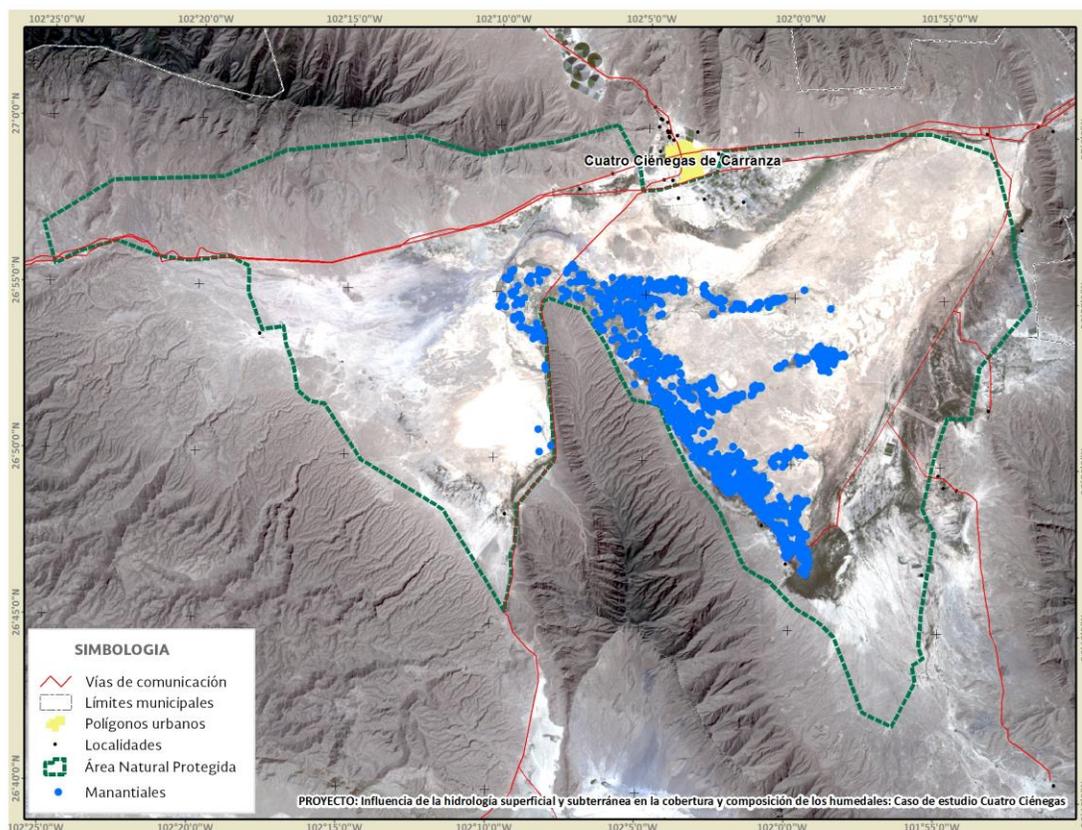


Figura 7-19. Base de datos geográfica indicando la presencia de manantiales

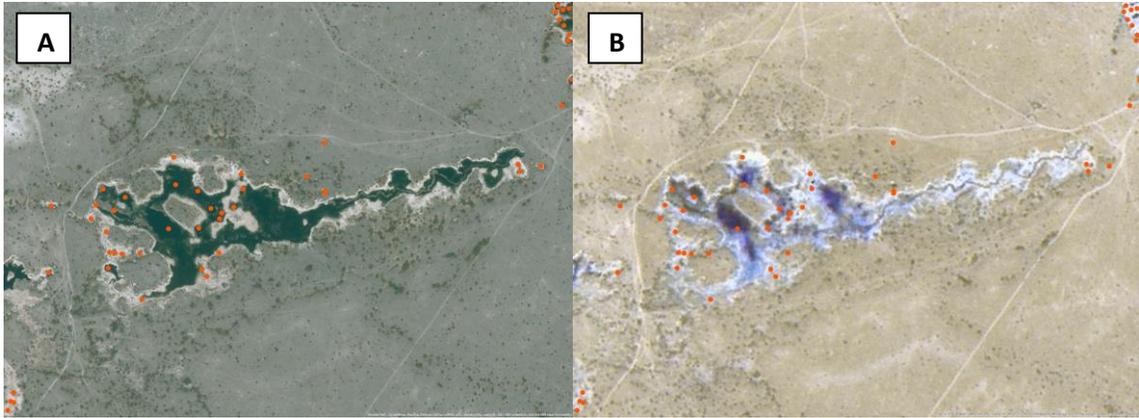


Figura 7-20. Localización de manantiales que alimentan un sistema de humedales. A) Fotografía aérea; B) Imagen SPOT 5

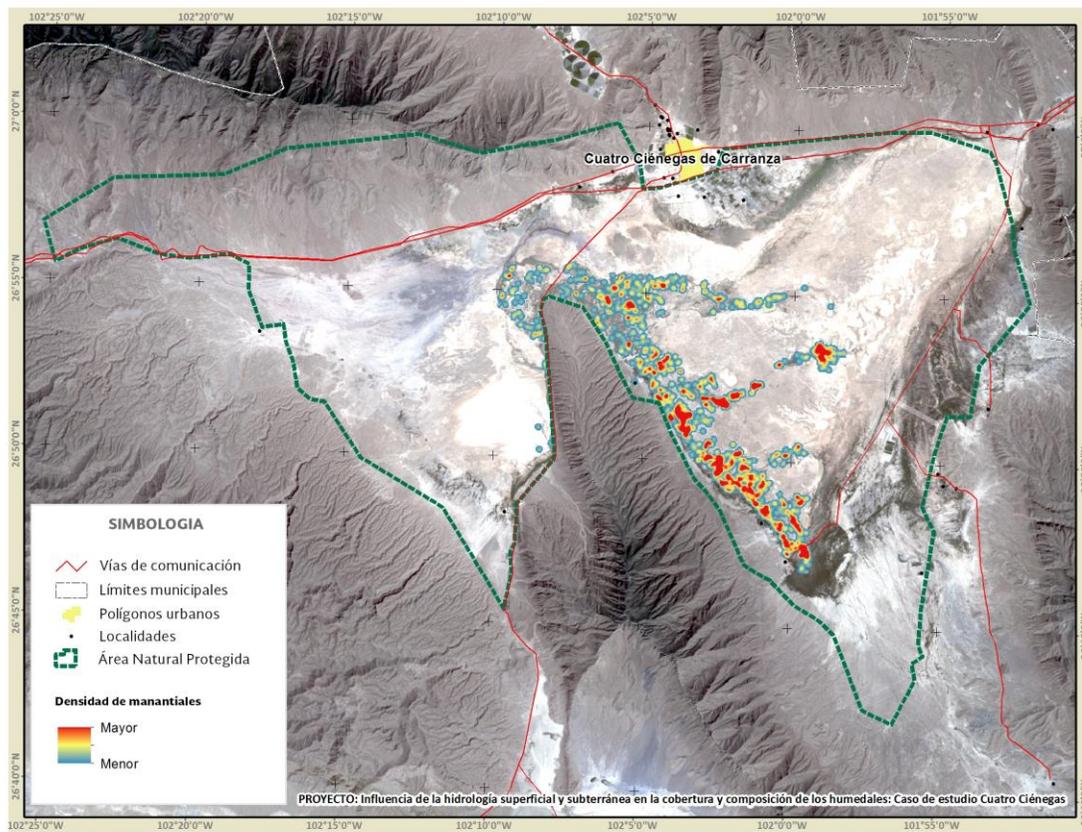


Figura 7-21. Zonas de mayor y menor densidad de manantiales en el valle de Cuatro Ciénegas

7.6. Trabajo de verificación en campo

Se obtuvieron 168 puntos de verificación en campo, para conseguir una muestra representativa de los humedales y su distribución (Figura 7-22). Un aspecto determinante para el registro de

información fue la restricción de acceso en algunos sitios, los cuales fueron registrados a distancia, como es el caso de la Poza La Becerra y la Laguna de Playitas. De la totalidad de puntos, 81 sitios corresponden a tierras altas y 87 a humedales.

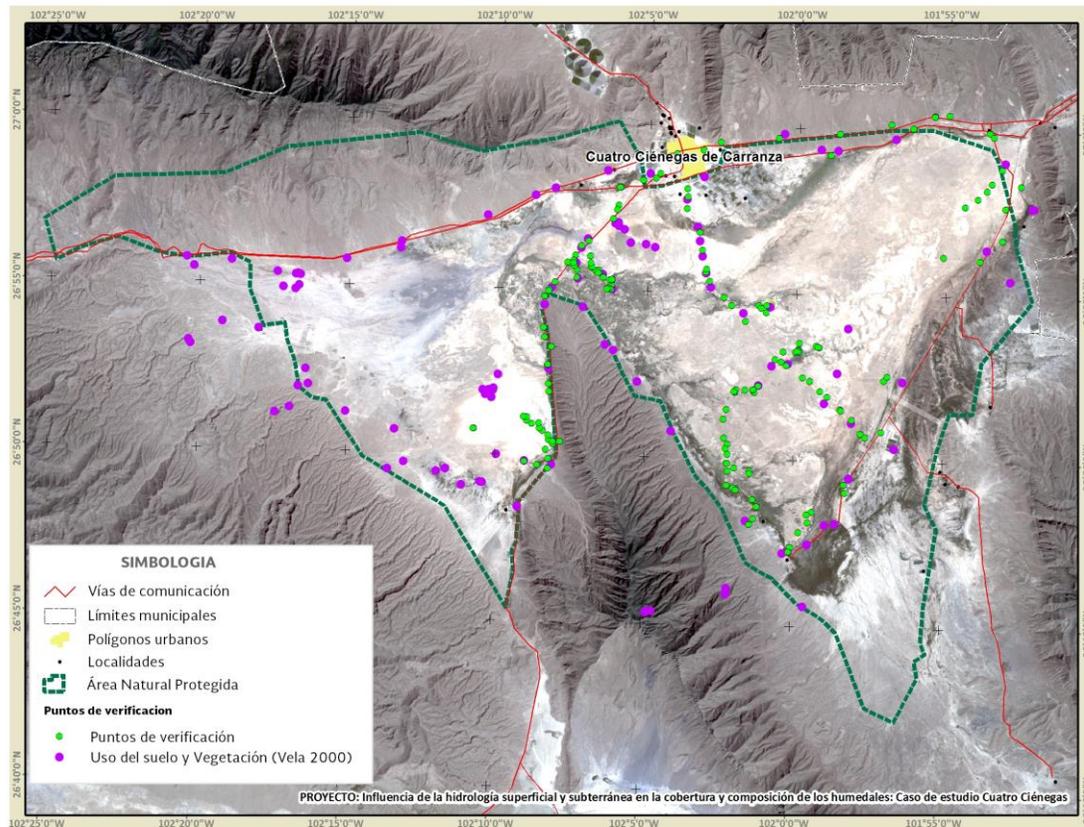


Figura 7-22. Puntos de verificación en campo

De manera adicional, se utilizó la base de datos de puntos de vegetación y uso del suelo de Vela (2000) compuesto por 94 registros. Sin embargo, antes de utilizar la información las categorías fueron homologadas al sistema clasificatorio utilizado en el trabajo (Cuadro 7-9).

7.7. Sistema de clasificación de uso del suelo y vegetación

La vegetación de zonas áridas ocupa una superficie de 95 millones de hectáreas en México, que corresponden al 48.2% del territorio nacional, de los cuales el 28% son áridos y el 20% semiáridos. Estos ecosistemas están compuestos principalmente por pastizales, matorrales y bosques bajos espinosos, localizados en su mayoría en Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, Zacatecas, San Luis Potosí, Durango y Tamaulipas y en menor representatividad en las entidades de Sonora y Baja California (González-Medrano 2003).

El esquema de clasificación fue diseñado para describir las características de los humedales de Cuatro Ciénegas; por lo que algunas de las clases utilizadas para clasificar las coberturas de uso del suelo y vegetación corresponden a una generalización de los trabajos realizados por los botánicos contemporáneos en México (Miranda y Hernández 1963; González-Medrano 2003; Rzedowski 2006). Para definir las clases se realizó una revisión de los principales trabajos relacionados con la descripción y clasificación de los tipos de vegetación en México (Miranda y Hernández 1963; González-Medrano 2003; Rzedowski 2006; INEGI 2009).

La propuesta de Rzedowski (2006) fue la base para formar el esquema de clasificación; se decidió adoptar esta nomenclatura por su sencillez en los conceptos y su fácil aplicación en la cartografía. Se agruparon en la clase *Vegetación de Tierras Altas* al Matorral xerófilo, Bosque de *Quercus* y Bosque de coníferas, debido a que el objetivo del presente trabajo es la evaluación de los humedales y el análisis de estas categorías por separado no aportaban elementos importantes para el análisis. En el cuadro 7-9 se presentan las equivalencias aproximadas entre algunos tipos de vegetación para México.

Algunas comunidades vegetales no encontraron acomodo en las categorías descritas por Rzedowski (2006), siendo agrupadas con el nombre de "*otros tipos de vegetación*". Entre estos casos, se describe la vegetación halófila cuya característica es el alto contenido de sales en los suelos, dominados principalmente por formas herbáceas, arbustivas y en ocasiones arbóreas. Entre las comunidades halófilas se pueden encontrar pastizales halófilos, matorrales xerófilos (mezquitales) y vegetación acuática y subacuática. Esta categoría se consideró como una clase aparte, debido a la relación que mantiene con los procesos de transición de los humedales y las tierras altas.

Adicionalmente se incluyeron las siguientes clases de uso del suelo: agricultura (agricultura de riego, temporal y terrenos en descanso), área sin vegetación aparente y asentamientos humanos (Cuadro 7-10).

7.8. Sistema de clasificación de humedales

Los criterios utilizados para el diseño de un sistema de clasificación de humedales frecuentemente dependen de su aplicación. Por lo anterior, en aquellos en los que el manejo constituye una importancia especial debido a la extracción de agua, se utilizan como elementos descriptivos la hidrología y morfología. Debido a la importancia de las clases palustres en los humedales de

Cuatro Ciénegas, se realizaron adaptaciones para definir las clases y subclases del sistema clasificatorio, basadas principalmente en la morfología del terreno y la fisionomía de la vegetación.

Cuadro 7-9. Equivalencias entre tipos de vegetación; se listan únicamente las que corresponden a las clases encontradas en el área de Cuatro Ciénegas, Coahuila

| Miranda y Hernández (1963) | Rzedowski (1966) | Vela (2000) | Rzedowski (2006) | Categorías empleadas |
|---|--|---|-----------------------------------|--|
| Selva baja subperennifolia (en parte), selva baja espinosa perennifolia, selva baja espinosa caducifolia | Bosque espinoso, mezquital extra - desértico | Mezquital | Bosque espinoso | Bosque espinoso |
| Matorral espinoso con espinas laterales; cardonales; techeras, etc.; izotales; nopaleras; matorral espinoso con espinas terminales; matorral inerme parvifolio; magueyales, lechuguillales, guapillales, etc.; chaparrales; vegetación de desiertos áridos arenosos | Matorral desértico micrófilo, matorral desértico rosetófilo, matorral crasicaule, matorral submontano, encinar arbustivo | Matorral submontano, matorral desértico rosetófilo, matorral desértico micrófilo, chaparral | Matorral xerófilo | Vegetación de tierras altas |
| Encinares | Encinar y pinar (en parte) | Bosque de encino | Bosque de <i>Quercus</i> | Vegetación de tierras altas |
| Pinares, bosque de abetos u oyameles | Encinar y pinar (en parte), piñonar | Bosque de pino | Bosque de coníferas | Vegetación de tierras altas |
| Agrupaciones de halófitos | | Vegetación halófito Pastizal halófito | Otros tipos de vegetación | Vegetación halófila (no incluye vegetación halófila inundable) |
| Manglares, tular, carrizales, popal | | | Vegetación acuática y subacuática | <i>Esquema de clasificación de humedales</i> |

Fuente: Rzedowski (2006)

Cuadro 7-10. Categorías para la clasificación de uso del suelo y vegetación

| Clases de uso del suelo y vegetación | Clave |
|---|--------------|
| Agricultura | Ag |
| Áreas urbanas | Au |
| Bosque espinoso | Be |
| Vegetación de tierras altas | Vta |
| Vegetación halófila | Vh |
| Área sin vegetación aparente | Asva |

El arreglo jerárquico se compuso de tres sistemas, correspondientes a los niveles más altos en la clasificación (lacustre, palustre y fluvial); los subsistemas son indicativos del régimen hidrológico (permanente, estacional e intermitente); la descripción de las clases toma en cuenta la forma del terreno; y finalmente, la subclase define el tipo de humedal toman en cuenta las implicaciones biológicas. Algunas de las clases que fueron observadas en campo y consideradas en el Sistema Clasificador de Humedales, no pudieron ser representadas en la clasificación digital debido a la escala de las imágenes Landsat (1:100,000). No obstante, el sistema clasificador proporciona las bases necesarias para estudios posteriores que requieran de un mayor detalle utilizando insumos de percepción remota a mayor resolución espacial (Cuadro 7-11).

Cuadro 7-11. Sistema clasificador para los humedales de Cuatro Ciéneas

| Sistema | Subsistema | Clase | Subclase | Clave |
|------------|--------------|--------------------|----------------------------|-------|
| Lacustre | Permanente | Dolina | Poza | L1Mp |
| | Estacional | Depresión | Laguna | L2Da |
| Palustre | Estacional | Planicie | Llanura inundable | Pla |
| | | | Vegetación emergente | Ple |
| | | | Halófilo inundable | Plh |
| | | | Llanura húmeda | Plc |
| Fluvial | Permanente | Lecho de corriente | Río | F1rl |
| | | | <i>*Arbustivo forestal</i> | F1rf |
| | | | <i>*Humedal emergente</i> | F1re |
| | Estacional | Lecho de corriente | <i>*Arroyo</i> | F2al |
| | Intermitente | Lecho de corriente | Canal artificial | F2c |
| Artificial | | | Almacenamiento de agua | Ar |

*Humedales que debido a sus características de tamaño y/o distribución no fueron considerados en la clasificación. Sin embargo, fueron observados en los trabajos de campo.

A continuación se describen las clases de humedales presentes en el valle de Cuatro Ciéneas, de acuerdo al sistema de clasificación de humedales adaptado de Cowardin et al. 1979 y Berlanga-Robles y Ruiz-Luna 2008.

7.8.1. Humedales del Sistema Lacustre

El sistema lacustre se conformó por manantiales conocidos localmente como pozas, cuyos volúmenes de agua son originados por la descarga de los acuíferos calizos en los flancos de las montañas y en áreas donde el relleno de los valles es muy delgado, así como cuerpos de agua mayores a 8 hectáreas situados en depresiones topográficas sin la presencia de árboles, arbustos o

emergentes persistente. Estos humedales responden rápidamente a fluctuaciones en la hidrología subterránea y superficial derivado de los periodos de lluvia y del aprovechamiento de agua en la región, por lo que algunos humedales de este tipo tienden a evaporarse en años secos. Se consideraron los subsistemas permanente y estacional, cuyas características describen las variaciones espacio-temporales (Figuras 7-23 y 7-24).



Figura 7-23. Humedal lacustre permanente, subclase poza (L1Mp)



Figura 7-24. Humedal lacustre temporal, subclase laguna (L2Da)

7.8.2. Humedales del Sistema Palustre

El sistema palustre incluyó los humedales conformados por árboles, arbustos, emergentes persistentes, líquenes o musgos, además de cuerpos de agua menores a 8 hectáreas; generalmente estos ecosistemas dependen de la humedad del suelo, por lo que la vegetación palustre se distribuye en zonas adyacentes a los ríos y lagos. En el valle de Cuatro Ciénegas, la zona de mayor extensión se le localiza en las áreas adyacentes a las pozas, la poza la becerra y los ríos Mezquites y el Garabatal (Figura 7-25).



Figura 7-25. Humedal palustre estacional, subclase vegetación emergente (Ple)

Se observó que estos humedales mantienen su composición gracias a los niveles freáticos someros del acuífero granular, que es alimentado por la infiltración de escurrimientos superficiales (Figura 7-26 y 7-27). Como parte del sistema palustre se consideró la vegetación halófila inundable que presenta variaciones temporales en la humedad (Figura 7-28).

7.8.3. Humedales del Sistema Fluvial

Son humedales que permanecen contenidos en un canal natural o artificial, presentando movimiento continuo de agua y pueden formar una conexión entre dos cuerpos de agua. Algunos investigadores clasifican las zonas de inundación de los ríos como parte del sistema fluvial; sin embargo, en el presente trabajo estas áreas son consideradas como humedales palustres, que temporalmente pueden estar inundados debido a sus características topográficas. Los ríos más

importantes en la región son el río Mezquites y el Garabatal, los cuales son alimentados por manantiales (Figura 7-29).



Figura 7-26. Humedal palustre estacional, subclase llanura inundable (Pla)



Figura 7-27. Humedal palustre estacional, subclase llanura húmeda (Plc)



Figura 7-28. Humedal palustre estacional, subclase halófila inundable (PIh)

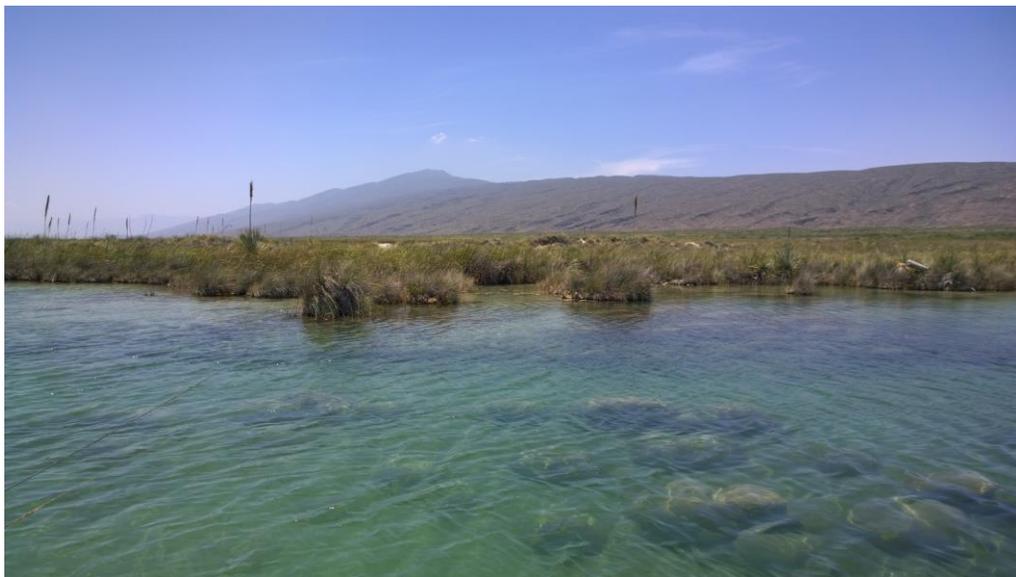


Figura 7-29. Humedal fluvial permanente, subclase río (F1rl)

Algunos ríos y canales presentan en las orillas comunidades de mezquites, que son considerados de acuerdo al sistema clasificatorio como Arbustivo forestal (F1rf); de igual manera existen manchones de vegetación emergente al interior de los ríos considerado como Fluvial humedal emergente (F1re). Sin embargo, estas coberturas no fueron representadas en la clasificación

debido a su tamaño, por lo que fueron agrupadas en otras clases, situación similar a los arroyos estacionales (F2a1).

El impacto de los humedales fluviales en la región, está relacionado con la canalización del agua de las pozas al exterior del valle para uso agrícola, conducido a través de los canales Santa Tecla, la Becerra y Saca Salada (Figura 7-30). Esto ha modificado la morfología de los escurrimientos naturales, la humedad del suelo y la infiltración para la recarga de los acuíferos.



Figura 7-30. Humedal fluvial intermitente, subclase canal artificial (F2c)

7.8.4. Especies acuáticas y subacuáticas de Cuatro Ciénegas

Se revisaron los listados de especies acuáticas y subacuáticas reportados para la región (INE-SEMARNAP 1999; Villareal 2001; Villareal-Quintanilla y Encina-Domínguez 2005; Villareal et al. 2006). Los listados se cotejaron y se efectuó una actualización de la nomenclatura con información de herbarios nacionales e internacionales (The Plant List 2013). Se identificaron 77 especies vegetales pertenecientes a 30 Familias (Ramos Durón et al. 2004; Lot 2012; Lot et al. 2013) (Cuadro 7-12).

Se caracterizó también la forma de vida de cada una de las plantas acuáticas y subacuáticas, ya que por sus características pueden ser obligatorias o facultativas a la presencia de humedad. Se encontró que 14 son facultativas (pueden presentarse indistintamente en humedales o tierras altas), 5 facultativas de tierras altas (principalmente de tierras altas), 17 facultativas de humedales (principalmente de humedales), 22 Obligatorias de humedales, 3 obligatorias- facultativas de humedales, 9 facultativas-obligatorias de humedales y 7 no fueron determinadas (The Plant List 2013) (Cuadro 7-12).

Cuadro 7-12. Listado de plantas acuáticas y subacuáticas registradas para Cuatro Ciénegas

| Familia | Género | Especie | Variedad (subsp.) | Forma de vida |
|------------------|----------------------|----------------------------------|--------------------------|----------------------|
| Adiantaceae | <i>Adiantum</i> | <i>Adiantum capillus-veneris</i> | | FACW |
| Saururaceae | <i>Anemopsis</i> | <i>Anemopsis californica</i> | | OBL-FAC |
| Nymphaeaceae | <i>Nymphaea</i> | <i>Nymphaea ampla</i> | | OBL |
| Urticaceae | <i>Parietaria</i> | <i>Parietaria floridana</i> | | FAC |
| Salicaceae | <i>Salix</i> | <i>Salix nigra</i> | | FAC |
| Primulaceae | <i>Anagallis</i> | <i>Anagallis arvensis</i> | | FAC-OBL |
| | <i>Samolus</i> | <i>Samolus ebracteatus</i> | <i>var. coahuilensis</i> | FACW |
| Fabaceae | <i>Melilotus</i> | <i>Melilotus albus</i> | | FAC |
| Onagraceae | <i>Ludwigia</i> | <i>Ludwigia octovalvis</i> | <i>ssp. octovalvis</i> | FACW |
| | <i>Ludwigia</i> | <i>Ludwigia repens</i> | | ND |
| | <i>Oenothera</i> | <i>Oenothera kunthiana</i> | | FAC-OBL |
| Polygalaceae | <i>Polygala</i> | <i>Polygala turgida</i> | | ND |
| Gentianaceae | <i>Eustoma</i> | <i>Eustoma exaltatum</i> | | OBL |
| | <i>Sabatia</i> | <i>Sabatia tuberculosa</i> | | OBL |
| Asclepiadaceae | <i>Sarcostemma</i> | <i>Sarcostemma cynanchoides</i> | <i>var. cynanchiodes</i> | FAC |
| Solanaceae | <i>Petunia</i> | <i>Petunia parviflora</i> | | ND |
| Convolvulaceae | <i>Cressa</i> | <i>Cressa depressa</i> | | OBL-FAC |
| Convolvulaceae | <i>Imomoea</i> | <i>Imomoea sagittata</i> | | FAC-OBL |
| Boraginaceae | <i>Heliotropium</i> | <i>Heliotropium curassavicum</i> | <i>var. curassavicum</i> | ND |
| Verbenaceae | <i>Phyla</i> | <i>Phyla nodiflora</i> | <i>var. nodiflora</i> | FACW |
| | <i>Phyla</i> | <i>Phyla nodiflora</i> | <i>var. reptans</i> | FAC-OBL |
| | <i>Phyla</i> | <i>Phyla strigulosa</i> | | FACW |
| | <i>Marrubium</i> | <i>Marrubium vulgare</i> | | OBL-FAC |
| | <i>Mentha</i> | <i>Mentha rotundifolia</i> | | FACW |
| Plataginaceae | <i>Plantago</i> | <i>Plantago major</i> | | FACW |
| | <i>Plantago</i> | <i>Plantago rhodosperma</i> | | FACW |
| Oleaceae | <i>Fraxinus</i> | <i>Fraxinus berlandieriana</i> | | FACTA |
| Scrophulariaceae | <i>Bacopa</i> | <i>Bacopa monnieri</i> | | FACTA |
| Acanthaceae | <i>Ruellia</i> | <i>Ruellia nudiflora</i> | <i>var. nudiflora</i> | FAC |
| Lentibulariaceae | <i>Utricularia</i> | <i>Utricularia obtusa</i> | | FAC |
| | <i>Utricularia</i> | <i>Utricularia vulgaris</i> | | FAC |
| Asteraceae | <i>Aster</i> | <i>Aster subulatus</i> | | OBL |
| | <i>Bacharis</i> | <i>Bacharis salicifolia</i> | | FAC |
| | <i>Bacharis</i> | <i>Bacharis texana</i> | | OBL |
| | <i>Calyptocarpus</i> | <i>Calyptocarpus vialis</i> | | OBL |
| | <i>Cirsium</i> | <i>Cirsium coahuilense</i> | | OBL |
| | <i>Flaveria</i> | <i>Flaveria chloraefolia</i> | | FACW |
| | <i>Flaveria</i> | <i>Flaveria palmeri</i> | | FACW |
| | <i>Flaveria</i> | <i>Flaveria trinervia</i> | | FAC |
| | <i>Pluchea</i> | <i>Pluchea odorata</i> | | FACW |
| | <i>Solidago</i> | <i>Solidago altissima</i> | | FACW |

Continúa cuadro 7-12

| Familia | Género | Especie | Variiedad (subsp.) | Forma de vida |
|---------------------------|---------------------|----------------------------------|----------------------------|---------------|
| | <i>Verbesina</i> | <i>Verbesina encelioides</i> | | ND |
| | <i>Xanthium</i> | <i>Xanthium strumarium</i> | | FAC |
| Potamogetonaceae | <i>Potamogeton</i> | <i>Potamogeton nodosus</i> | | FAC-OBL |
| Ruppiaceae | <i>Ruppia</i> | <i>Ruppia maritima</i> | | FACTA |
| | <i>Najas</i> | <i>Najas guadalupensis</i> | | FACTA |
| | <i>Najas</i> | <i>Najas marina</i> | | FAC |
| Zannichelliaceae | <i>Zanichellia</i> | <i>Zanichellia palustris</i> | | OBL |
| Juncaceae | <i>Juncus</i> | <i>Juncus torreyi</i> | | OBL |
| Juncaceae (Cyperaceae) | <i>Carex</i> | <i>Carex pringlei</i> | | OBL |
| | <i>Cladium</i> | <i>Cladium jamaicense</i> | | OBL |
| | <i>Cyperus</i> | <i>Cyperus odoratus</i> | | OBL |
| | <i>Dichromena</i> | <i>Dichromena colorata</i> | | FACW |
| | <i>Eleocharis</i> | <i>Eleocharis caribaea</i> | | FACW |
| | <i>Eleocharis</i> | <i>Eleocharis cellulosa</i> | | OBL |
| | <i>Eleocharis</i> | <i>Eleocharis montevidensis</i> | | FAC-OBL |
| | <i>Eleocharis</i> | <i>Eleocharis rostellata</i> | | FACW |
| | <i>Fimbristylis</i> | <i>Fimbristylis thermalis</i> | | FACW |
| | <i>Fuirena</i> | <i>Fuirena simplex</i> | | OBL |
| | <i>Schoenus</i> | <i>Schoenus nigricans</i> | <i>var. plurisquamatus</i> | FACW |
| | <i>Scirpus</i> | <i>Scirpus americanus</i> | | OBL |
| | <i>Scirpus</i> | <i>Scirpus maritimus</i> | <i>var. paludosus</i> | OBL |
| Poaceae | <i>Agrostis</i> | <i>Agrostis semiverticillata</i> | | OBL |
| | <i>Cenchrus</i> | <i>Cenchrus incertus</i> | | OBL |
| | <i>Cynodon</i> | <i>Cynodon dactylon</i> | | OBL |
| | <i>Eragrostis</i> | <i>Eragrostis barrelieri</i> | | OBL |
| | <i>Leptoloma</i> | <i>Leptoloma cognatum</i> | | FAC-OBL |
| | <i>Muhlenbergia</i> | <i>Muhlenbergia asperifolia</i> | | ND |
| | <i>Phragmites</i> | <i>Phragmites australis</i> | | FAC |
| | <i>Setaria</i> | <i>Setaria geniculata</i> | | ND |
| | <i>Spartina</i> | <i>Spartina spartinae</i> | | FACTA |
| Typhaceae | <i>Typha</i> | <i>Typha dominguensis</i> | | FAC |
| Pontederiaceae | <i>Eichhornia</i> | <i>Eichhornia crassipes</i> | | FAC-OBL |

OBL= Obligatorias, **FAC**= facultativa, **FAC-OBL**= Facultativas- obligatorias, **OBL-FAC**= Obligatorias-facultativas, **TA**= Tierras Altas, **FACTA**= Facultativas de tierras altas, **FACW**= Facultativas de humedales

7.9. Clasificación digital de las imágenes de satélite

Se clasificaron 3,677.5 km² obteniendo una exactitud del modelo de 86.4% de acuerdo a la matriz de confusión elaborada con 76 puntos de referencia (Figuras 7-31 a 7-34) (ver anexos 2 a 5). De acuerdo a los datos obtenidos en las clasificaciones, aproximadamente el 95% del territorio corresponde a tierras altas y solo el 5% son humedales, los cuales han disminuido su superficie en los últimos 25 años (Cuadro 7-13).

Cuadro 7-13. Superficie de hectáreas de tierras altas y humedales (1990-2015)

| Clase/Subclase | | 1990 | 2000 | 2011 | 2015 |
|----------------------|------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Tierras Altas | | | | | |
| Ag | Agricultura | 15,366.2 | 15,140.1 | 15,365.0 | 15,944.7 |
| Au | Áreas urbanas | 514.3 | 552.7 | 654.8 | 654.8 |
| Be | Bosque espinoso | 10,475.4 | 10,127.6 | 9,092.3 | 8,966.3 |
| Vta | Vegetación de tierras altas | 289,214.0 | 289,108.0 | 290,009.0 | 289,624.0 |
| Vh | Vegetación halófila | 23,070.4 | 23,972.3 | 26,478.0 | 25,884.8 |
| Asva | Área sin vegetación aparente | 10,863.3 | 11,069.7 | 10,298.6 | 10,358.8 |
| Total | | 349,503.6 | 349,970.4 | 351,897.7 | 351,433.3 |
| Humedales | | | | | |
| L1Mp | Poza | 98.3 | 78.0 | 69.9 | 107.2 |
| L2Da | Laguna | 242.9 | 31.7 | 23.3 | 503.5 |
| Pla | Llanura inundable | 50.3 | 16.7 | 25.4 | 65.9 |
| Ple | Vegetación emergente | 5,287.8 | 5,449.1 | 5,979.3 | 5,344.4 |
| Plh | Halófilo inundable | 5,125.3 | 6,260.4 | 4,322.8 | 4,712.5 |
| Plc | Llanura húmeda | 5,992.6 | 4,427.6 | 3,899.3 | 4,074.4 |
| F1rl | Río | 588.7 | 603.0 | 594.1 | 574.0 |
| F2c | Canal artificial | 848.7 | 883.2 | 912.2 | 908.8 |
| Ar | Almacenamiento de agua | 12.4 | 30.0 | 26.6 | 26.6 |
| Total | | 18,247.0 | 17,779.8 | 15,852.8 | 16,317.2 |

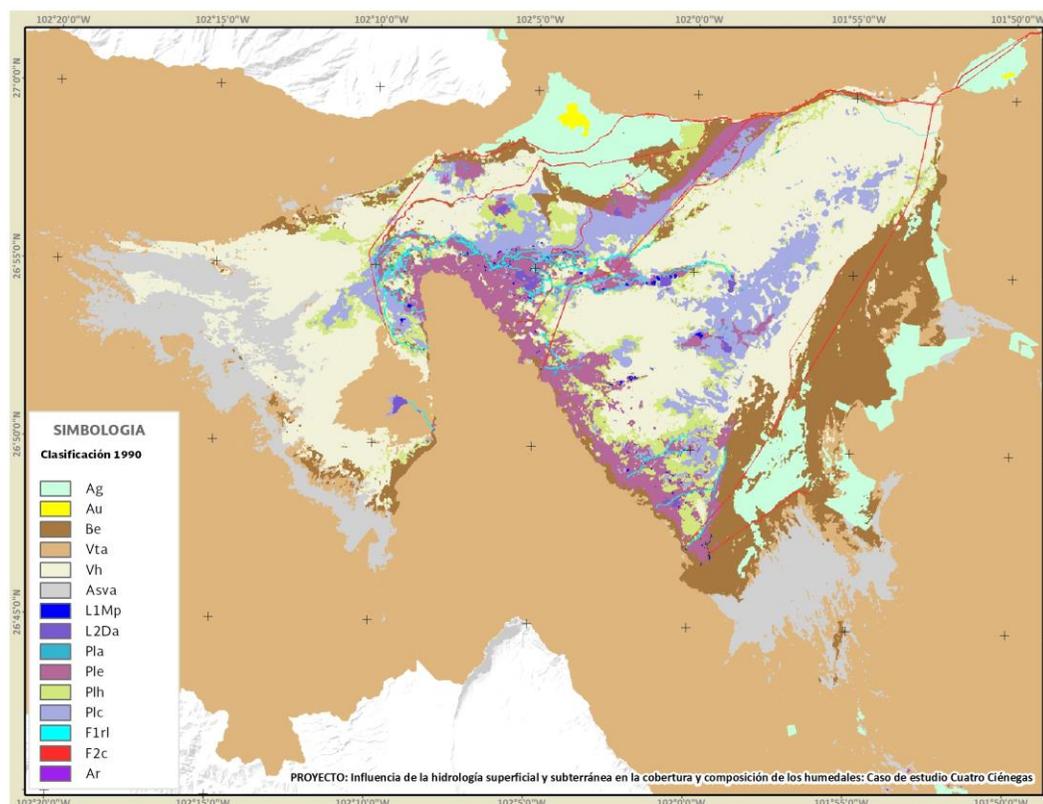


Figura 7-31. Acercamiento de la clasificación digital de los humedales de Cuatro Ciénegas para el año 1990

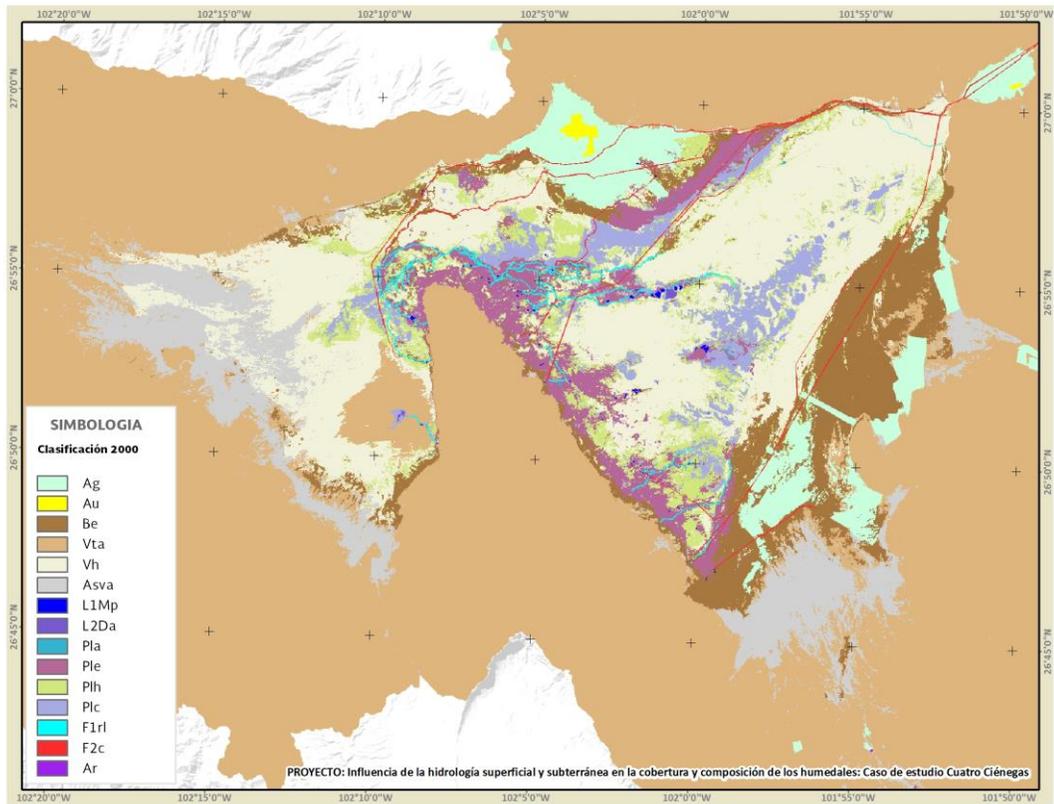


Figura 7-32. Acercamiento de la clasificación digital de los humedales de Cuatro Ciénegas para el año 2000

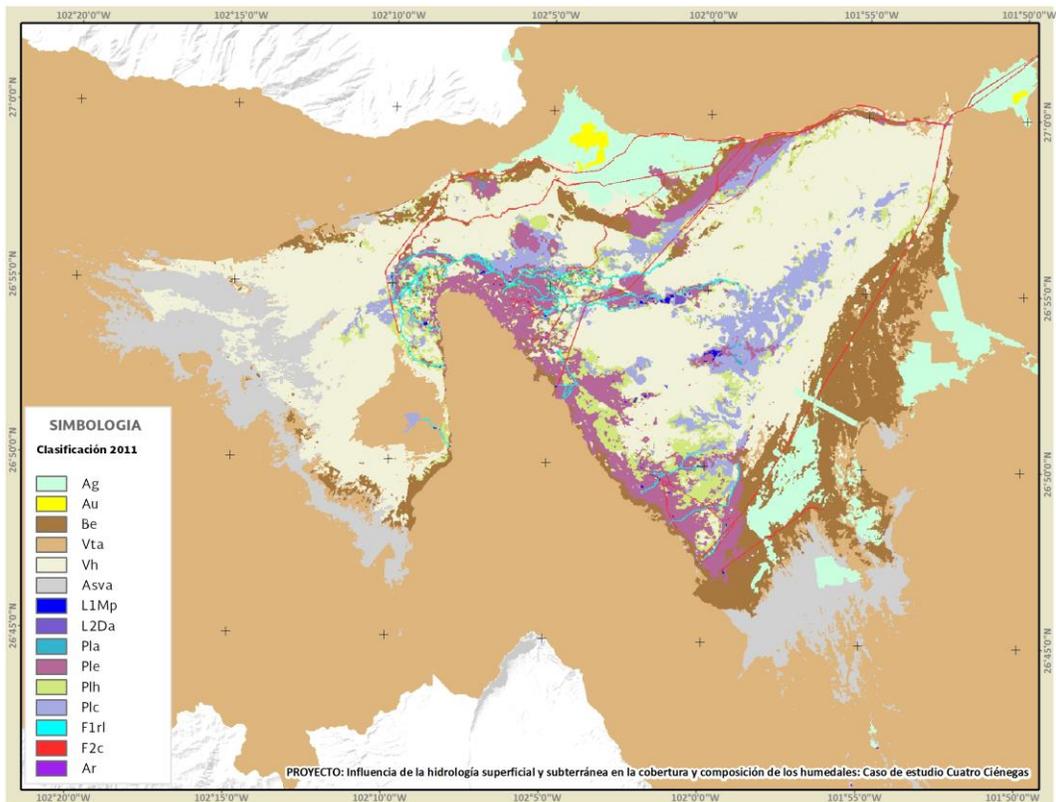


Figura 7-33. Acercamiento de la clasificación digital de los humedales de Cuatro Ciénegas para el año 2011

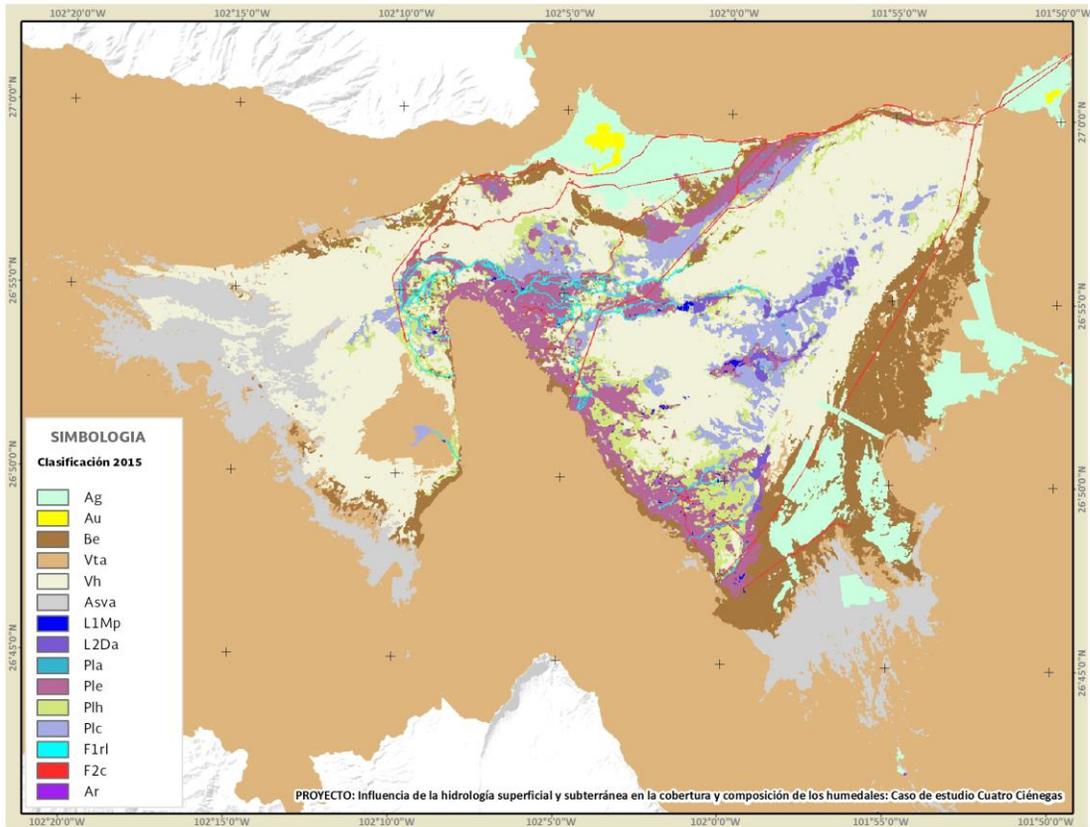


Figura 7-34. Acercamiento de la clasificación digital de los humedales de Cuatro Ciénegas para el año 2015

7.10. Análisis temporal de las coberturas

Las imágenes clasificadas fueron comparadas en pares para estimar las pérdidas, ganancias, cambio neto y la tasa de cambio anual correspondiente cada periodo. Las superficies difieren entre las fechas debido a que la clasificación se efectuó en formato raster y las transformaciones ocasionan distorsiones generando diferencias en las superficies. Sin embargo, los cambios no son significativos a la escala de trabajo utilizada.

Una vez realizadas las clasificaciones, se procesaron en el módulo *Land Change Modeler* de Idrisi Selva 17.02 para obtener las estadísticas de los periodos: 1990 – 2000, 2000 – 2011, 2011 – 2015 y el global 1990 – 2015.

De acuerdo al climograma elaborado con datos de la estación Cuatro Ciénegas, el cambio ocurrido de 1990 al 2000, corresponde a la transición de un año húmedo a otro seco (considerando la media estadística de la precipitación).

La transición del 2000 al 2011, representa el cambio de un periodo seco a otro con menor rango de precipitación. Mientras que en la comparación del año 2011 al 2015 se analizan los cambios de un periodo seco a uno húmedo (ver figura 7-4).

7.10.1. Procesos de cambio para el periodo de 1990 al 2000

En las gráficas generadas de la comparación entre ambas fechas, se observa que la superficie neta de las clases de bosque espinoso (Be) y agrícola (Ag) presentaron un decremento; mientras que la superficie de las áreas urbanas (Au) y la vegetación halófila (Vh) se incrementaron (ver anexo 6).

En los humedales, hubo un incremento en la superficie de las categorías vegetación emergente (Ple), halófilo inundable (Plh) y en los canales artificiales (F2c). Por otro lado, se presentó un declive en la cobertura de las lagunas (L2Da) y la llanura húmeda (Plc) (Figura 7-35).

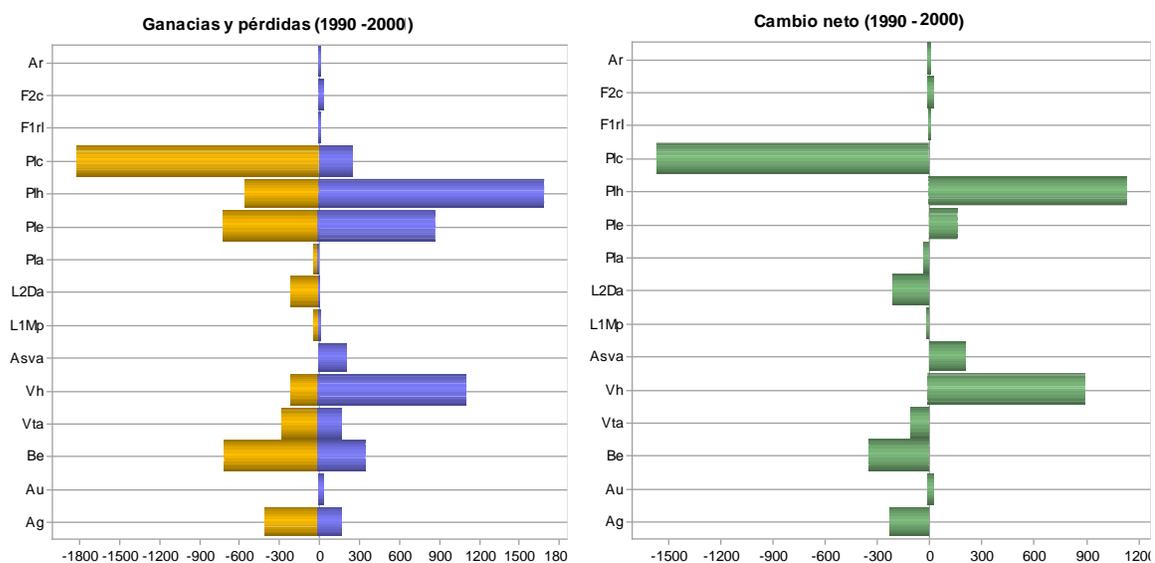


Figura 7-35. Cambios presentes en el periodo 1990 – 2000 (Valores negativos indican pérdida y positivos ganancia de superficie en Hectáreas)

Se efectuó la comparación espacial de ambas fechas resaltando las permanencias, ganancias y pérdidas de los humedales con respecto a las tierras altas, con la finalidad de identificar geográficamente los procesos de cambio más significativos. Los cuales ocurrieron en la zona norte del valle de Cuatro Ciénegas para este periodo (Figura 7-36).

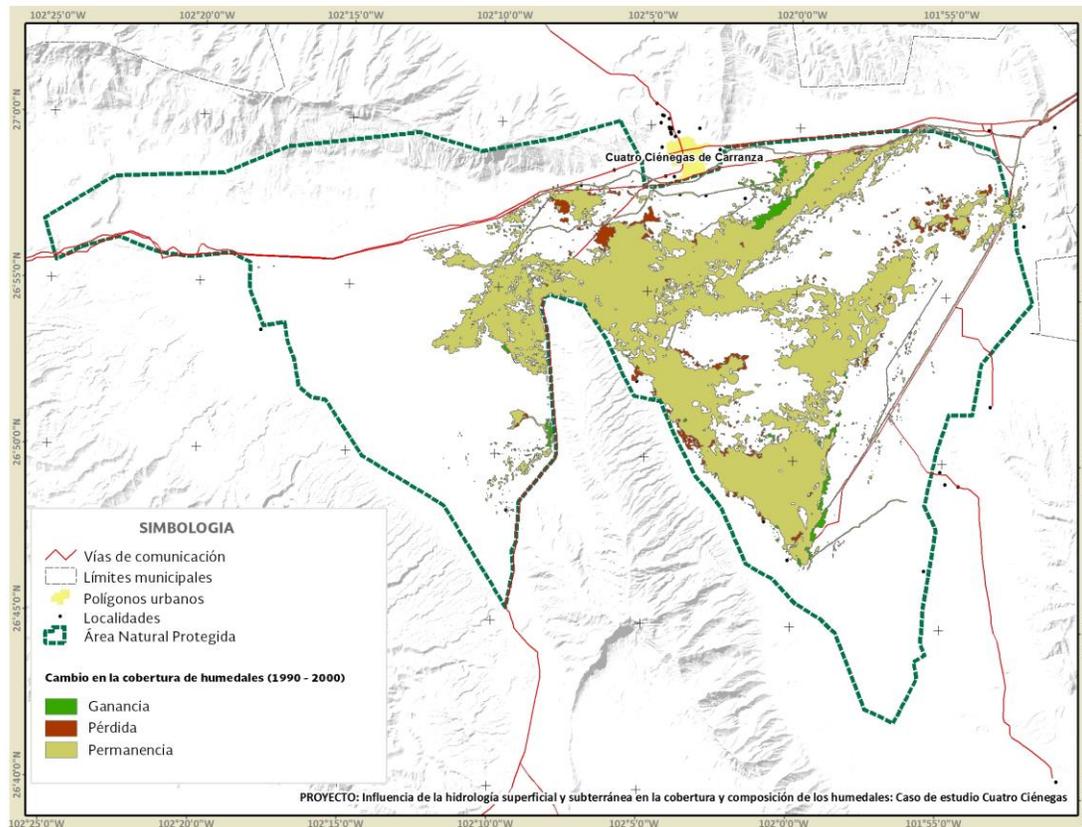


Figura 7-36. Mapa de procesos de cambio y permanencia de los humedales en el periodo de 1990 al 2000

7.10.2. Procesos de cambio para el periodo de 2000 al 2011

Este periodo muestra a la evolución de un año seco (143.4 mm) hacia otro con registros de lluvia menores (66 mm). En las clases uso del suelo y vegetación se observaron incrementos en la superficie agrícola (Ag), zonas urbanas (Au) y la vegetación halófila (Vh) (Figura 7-37). En los humedales se identificó la misma tendencia del periodo 1990 - 2000, con ganancias en la vegetación emergente (Ple), así como pérdidas en la llanura húmeda (Plc) y la vegetación halófila inundable (Plh) (ver anexo 7).

Al generar el análisis espacial de los humedales para ambas fechas, se observa que la zona que presenta cambios más notorios es la porción norte y poniente del valle (Figura 7-38).

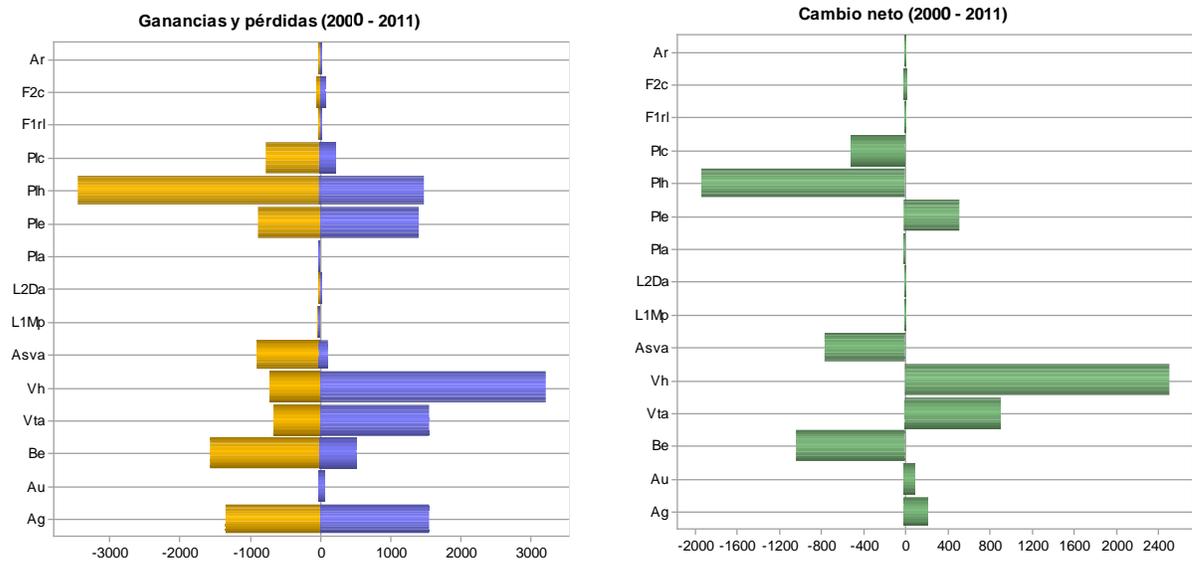


Figura 7-37. Cambios presentes en el periodo 2000 – 2011 (Valores negativos indican pérdida y positivos ganancia de superficie en Hectáreas)

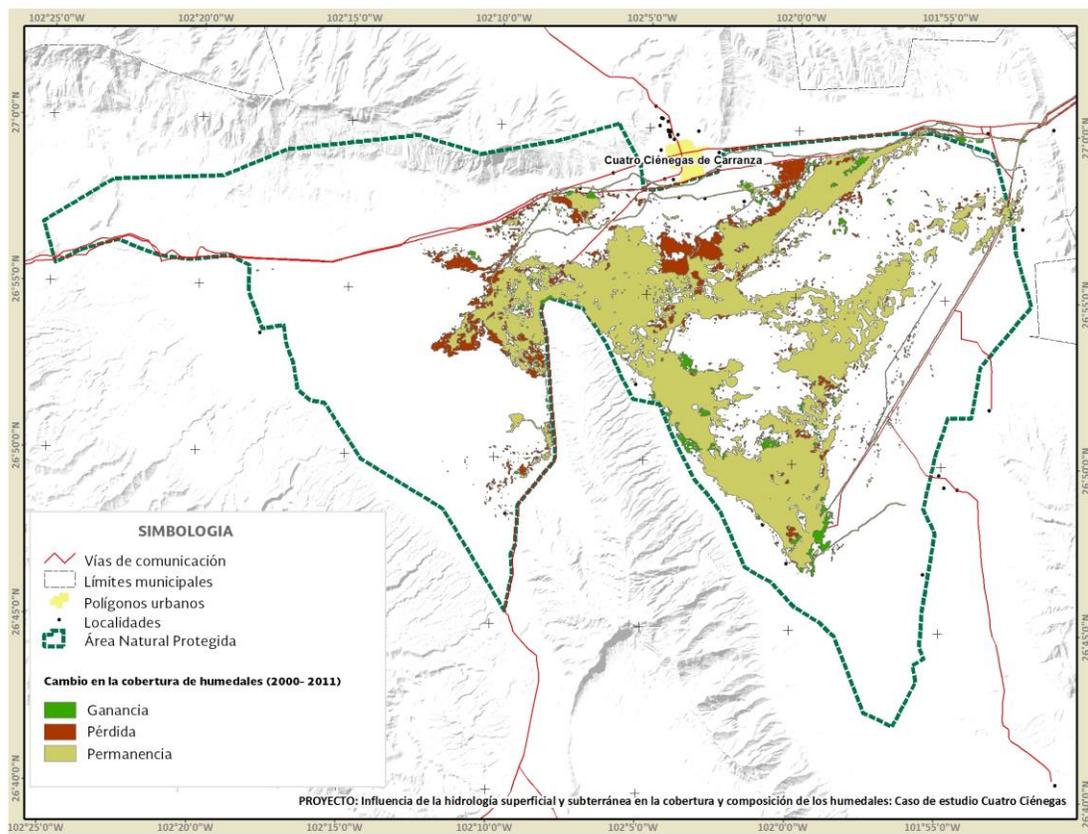


Figura 7-38. Mapa de procesos de cambio y permanencia de los humedales en el periodo de 2000 al 2011

7.10.3. Procesos de cambio para el periodo de 2011 al 2015

Este periodo mostró un comportamiento diferente en la dinámica de los humedales que se refleja en su composición, ya que corresponde a la transición de un año seco a otro con mayor humedad. Se presenta la recuperación de las actividades agrícolas (Ag), pérdida en el bosque espinoso (Be) y vegetación halófila (Vh) (Figura 7-39).

Las clases del sistema lacustre registraron ganancias que no habían sido observados en los periodos previos; destacando las lagunas (L2Da) con un cambio neto de casi 500 hectáreas, además de un incremento en la superficie de inundación de las pozas (L1Mp) (ver anexo 8).

En los humedales palustres, decreció la vegetación emergente (Ple), por otro lado, aumentó la superficie de la llanura inundable (Pla), el halófilo inundable (Plh) y la llanura húmeda (Plc). También hubo un decremento en la superficie de los ríos (F1rl) al extenderse las áreas de inundación.

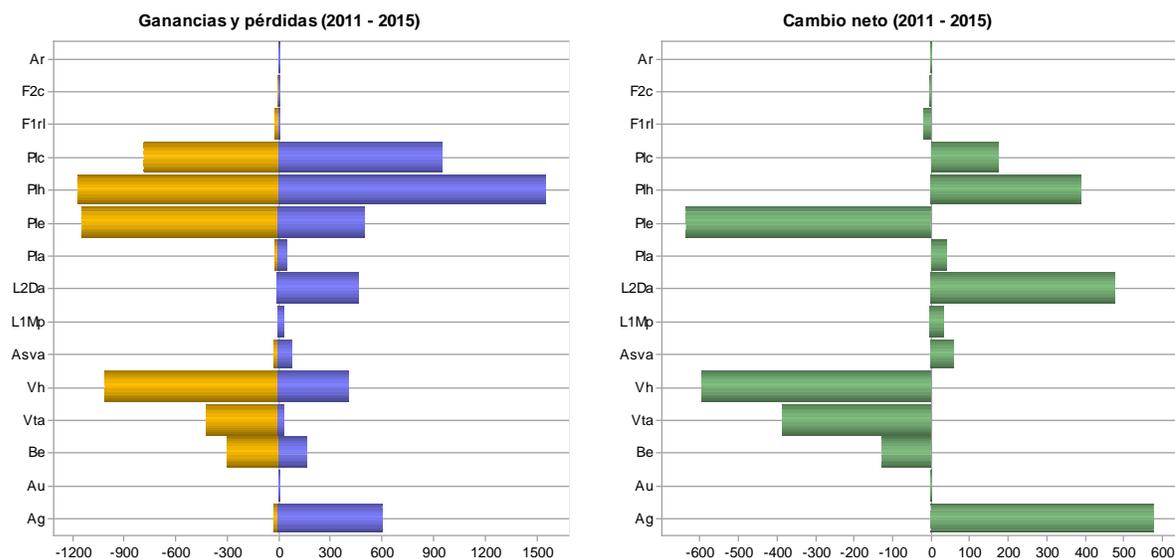


Figura 7-39. Cambios presentes en el periodo 2011 – 2015 (Valores negativos indican pérdida y positivos ganancia de superficie en Hectáreas)

En la representación geográfica de los procesos de cambio en la cobertura de los humedales para este periodo las pérdidas y ganancias muestran pocas variaciones (Figura 7-40).

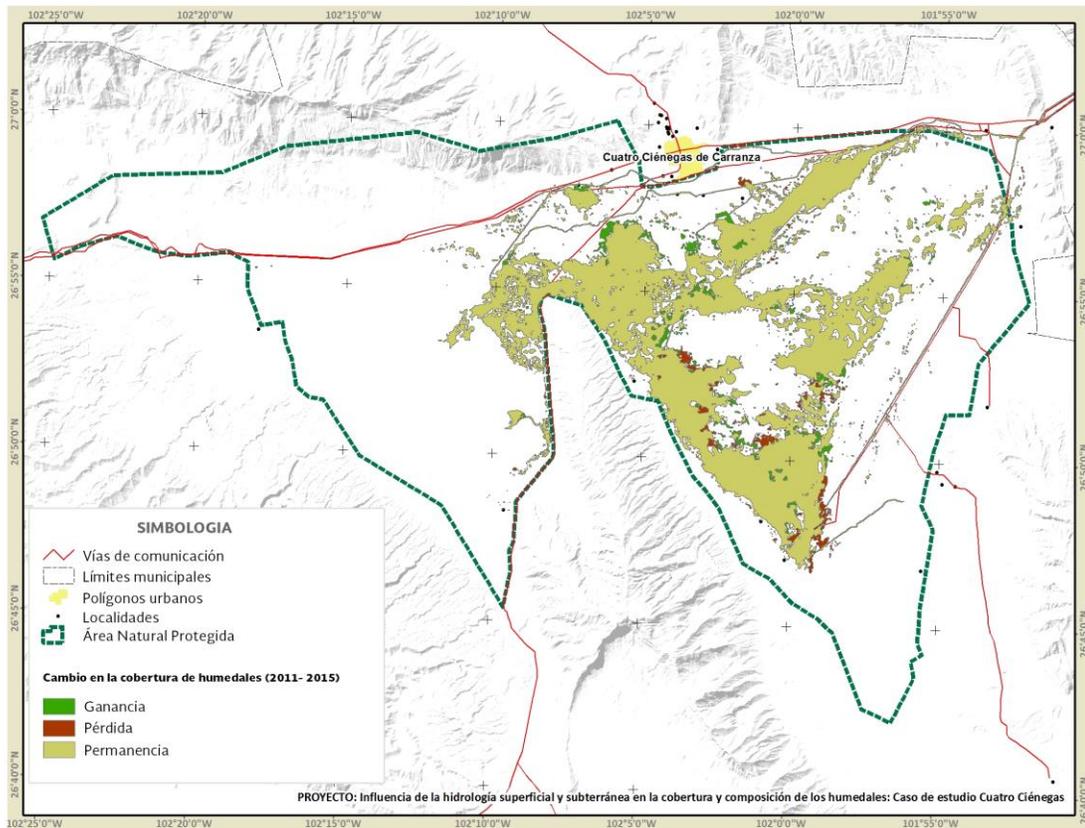


Figura 7-40. Mapa de procesos de cambio y permanencia de los humedales en el periodo de 2011 al 2015

7.10.4. Procesos de cambio en un periodo de 25 años (1990 -2015)

El cambio global se obtuvo al comparar la imagen del año 1990 con el 2015, presentándose en ambas fechas precipitaciones acumuladas por encima de la media. Se observaron incrementos en la superficie agrícola (Ag), áreas urbanas (Au) y la vegetación halófila (Vh); también la vegetación de tierras altas (Vta) muestra un incremento en su cobertura, abarcando la vegetación secundaria y los estados de sucesión del bosque espinoso (Be), este último con un cambio neto negativo de aproximadamente 1,500 hectáreas (ver anexo 9). Las disminuciones de superficie más relevantes en los humedales se presentaron en la llanura húmeda (Plc) y la vegetación halófila inundable (Plh). Por otro lado, se identificó un incremento en las clases que relacionadas con las áreas de inundación como las lagunas (L2Da) y la llanura inundable (Pla) y también en la vegetación emergente (Ple) (Figura 7-41). En el análisis geográfico se observó que los humedales desaparecidos en los últimos 25 años, se localizan principalmente en la zona norte y occidental del valle (Figura 7-42).

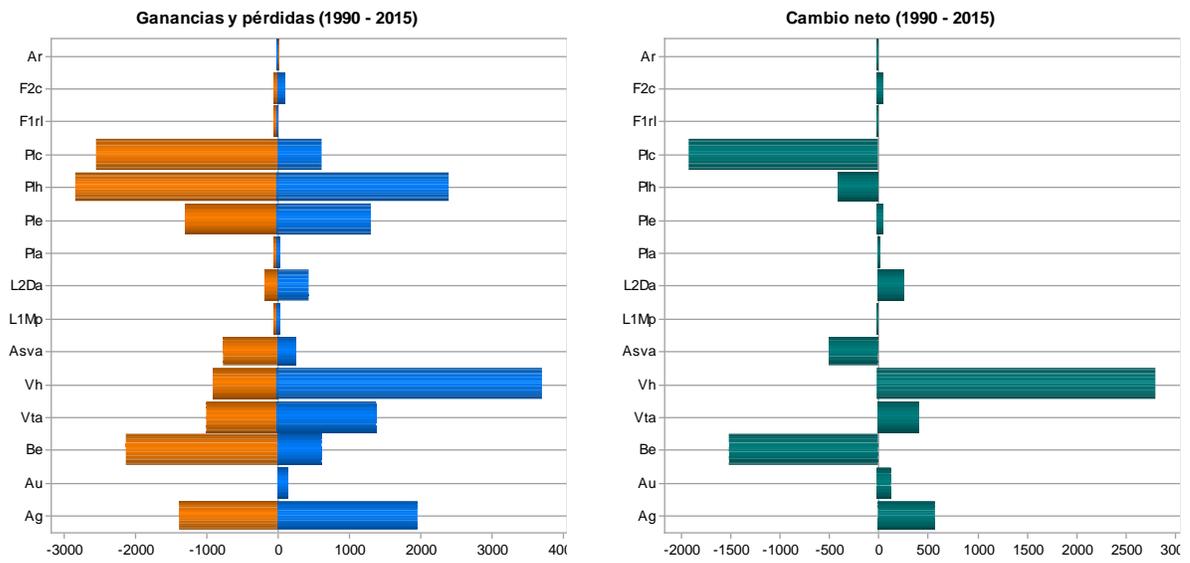


Figura 7-41. Cambios globales en el periodo 1990 – 2015 (Valores negativos indican pérdida y positivos ganancia de superficie en Hectáreas)

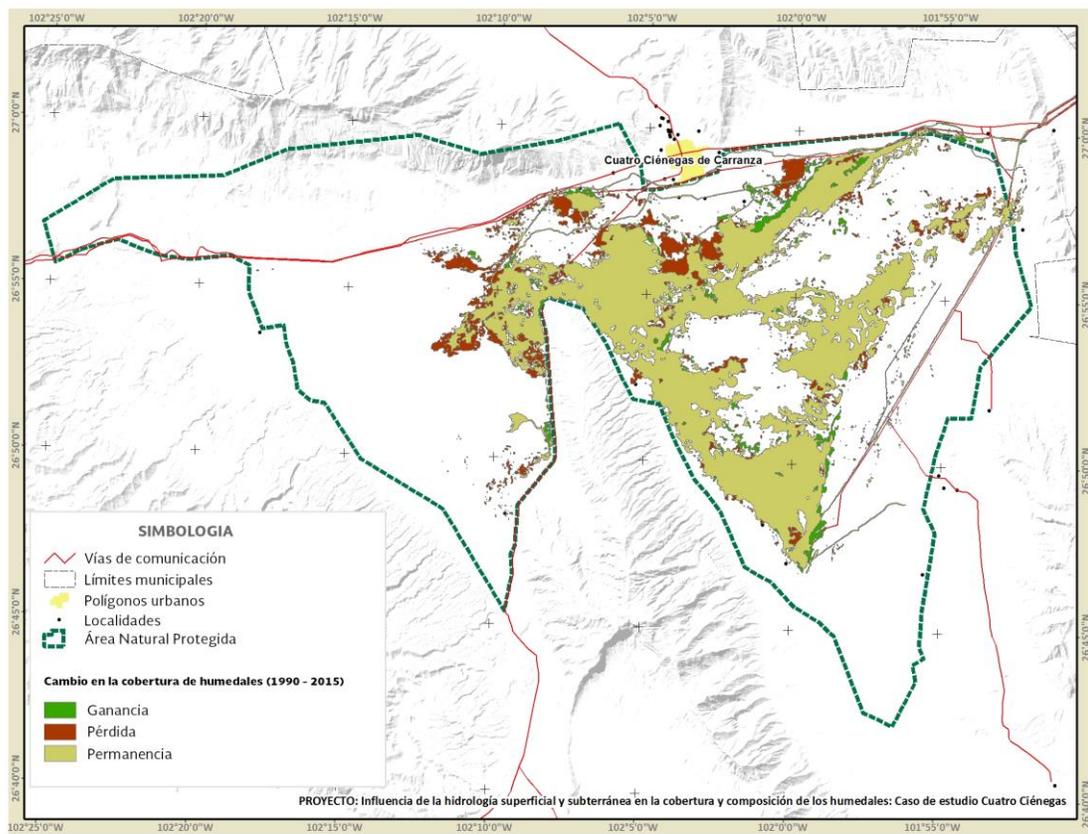


Figura 7-42. Mapa de procesos de cambio y permanencia de los humedales en el periodo de 1990 al 2015

7.10.5. Tasa anual de cambio por categoría

Se registró una ganancia anual de las tierras altas del 0.02% y una pérdida en la superficie de los humedales del 0.42% en los últimos 25 años (1990 – 2015). Particularmente, las áreas urbanas han tenido un aumento superior al 1% y las áreas agrícolas han crecido un 0.15% al año. Por otro lado, el bosque espinoso ha decrecido anualmente 0.58% (Cuadro 7-6).

En el caso de los humedales, se presentan variaciones entre los distintos periodos analizados, que responden a diferentes factores ambientales. Destacando la superficie de las lagunas (L2Da), con un promedio de crecimiento anual de 4.29%, al igual que la clase llanura inundable (Pla) que se extendió el 1.24%, así como la pérdida del 0.10% de la clase río (F1rl) en el periodo (1990 – 2015) (Cuadro 7-14).

Cuadro 7-14. Tasa anual de cambio anual por categoría

| Clase/ Subclase | | 1990-2000 | 2000-2011 | 2011-2015 | Global 1990-2015 |
|----------------------|------------------------------|--------------|--------------|--------------|---------------------|
| Tierras Altas | | | | | |
| Ag | Agricultura | -0.15 | 0.14 | 0.94 | 0.15 |
| Au | Áreas urbanas | 0.75 | 1.68 | 0.00 | 1.09 |
| Be | Bosque espinoso | -0.33 | -0.93 | -0.35 | -0.58 |
| Vta | Vegetación de Tierras Altas | 0.00 | 0.03 | -0.03 | 0.01 |
| Vh | Vegetación halófila | 0.39 | 0.95 | -0.56 | 0.49 |
| Asva | Área sin vegetación aparente | 0.19 | -0.63 | 0.15 | -0.19 |
| TOTAL | | 0.01 | 0.05 | -0.03 | 0.02 |
| Humedales | | | | | |
| L1Mp | Poza | -2.06 | -0.94 | 13.32 | 0.36 |
| L2Da | Laguna | -8.70 | -2.40 | 514.96 | 4.29 |
| Pla | Llanura inundable | -6.67 | 4.69 | 39.89 | 1.24 |
| Ple | Vegetación Emergente | 0.31 | 0.88 | -2.65 | 0.04 |
| Plh | Halófilo inundable | 2.21 | -2.81 | 2.25 | -0.32 |
| Plc | Llanura húmeda | -2.61 | -1.08 | 1.12 | -1.28 |
| F1rl | Río | 0.24 | -0.13 | -0.84 | -0.10 |
| F2c | Canal artificial | 0.41 | 0.30 | -0.09 | 0.28 |
| Ar | Almacenamiento de agua | 14.13 | -1.04 | 0.00 | 4.55 |
| TOTAL | | -0.26 | -0.99 | 0.73 | -0.42 |

*Valores en porcentaje negativos indican pérdidas y positivos ganancia

Se realizaron gráficas para identificar las tendencias temporales para cada categoría, considerando de manera independiente las tierras altas, mientras que los humedales fueron agrupados de acuerdo a su régimen hidrológico (Figura 7-43).



Figura 7-43. Dinámica temporal de las clases de Tierras Altas (Superficie en Hectáreas)

En el sistema lacustre se observa un decremento en la superficie en los años secos (2000 – 2011), posteriormente para el año 2015 existe un aumento significativo, especialmente en las Lagunas (L2Da) (Figura 7-44). Los humedales palustres muestran tendencias de ganancias en sus clases llanura inundable (Pla) y llanura húmeda (Plc) y de pérdida en la vegetación emergente (Ple) y halófila inundable (Plh) (Figura 7-45).

En el caso del sistema fluvial, existe una disminución en la superficie de los ríos y un aumento en los canales, indicativo de las modificaciones que han tenido estos humedales en la región (Figura 7-46).

7.10.1. Transformaciones y permanencias

Para estudiar los cambios temporales y su relación con los factores naturales y humanos, se definieron los procesos de transformación a través de una matriz; en donde la línea superior corresponde a la fecha base (T1) y la columna izquierda es la fecha de comparación posterior (T2) (Cuadro 7-15).

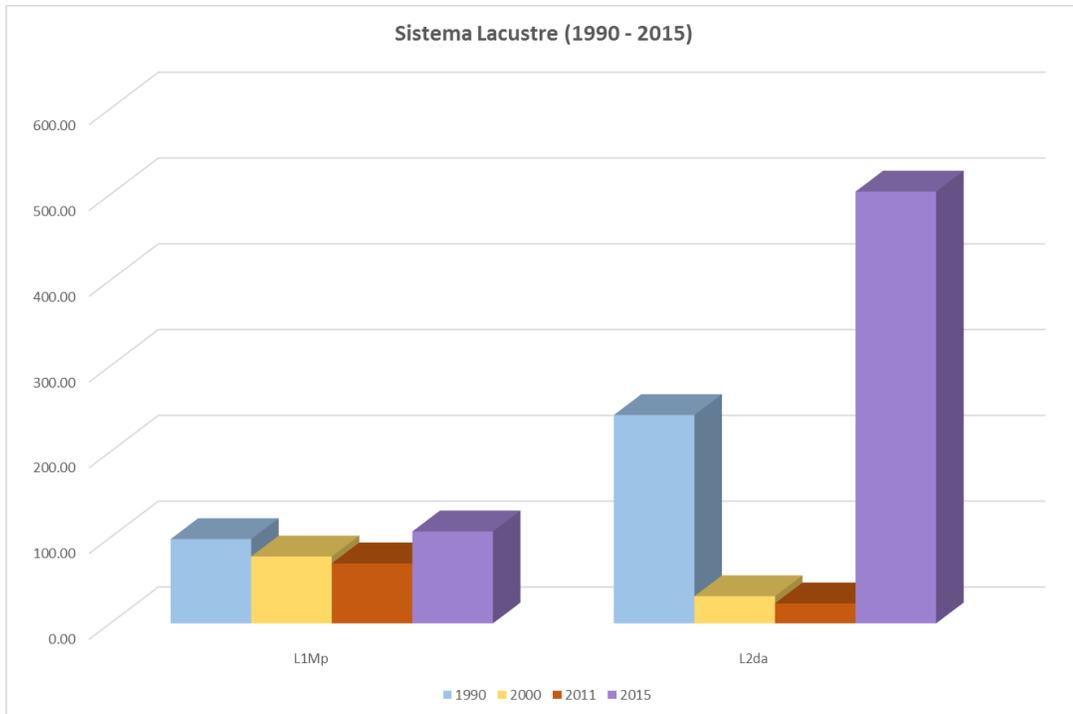


Figura 7-44. Dinámica temporal del sistema Lacustre (Superficie en Hectáreas)

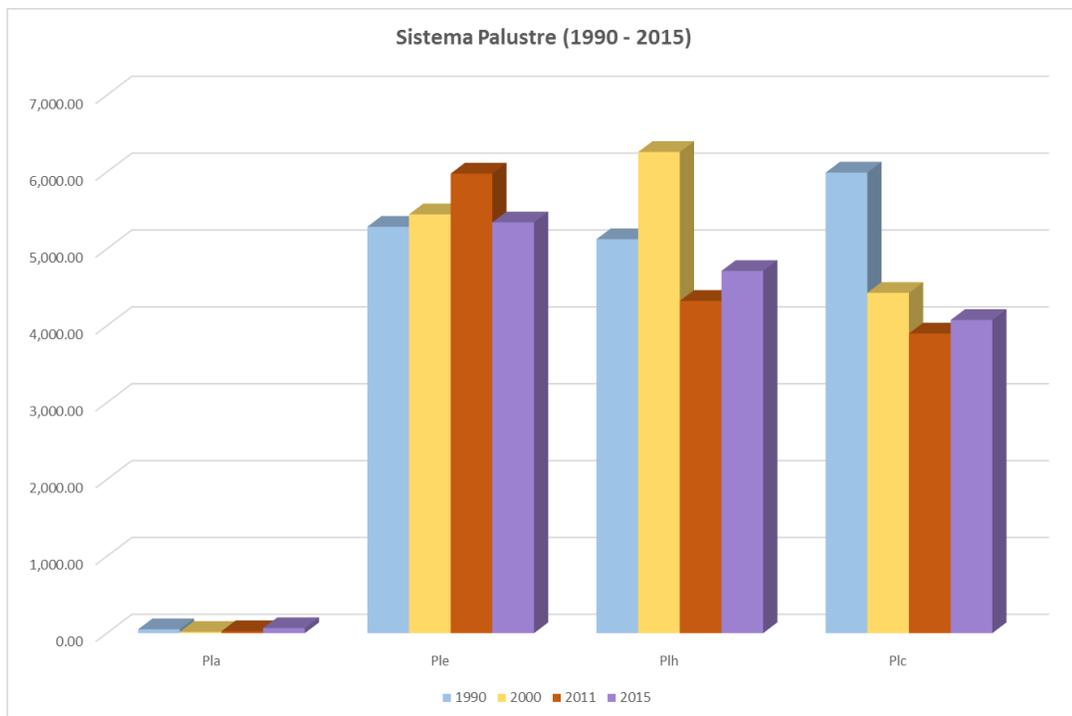


Figura 7-45. Dinámica temporal del sistema Palustre (Superficie en Hectáreas)

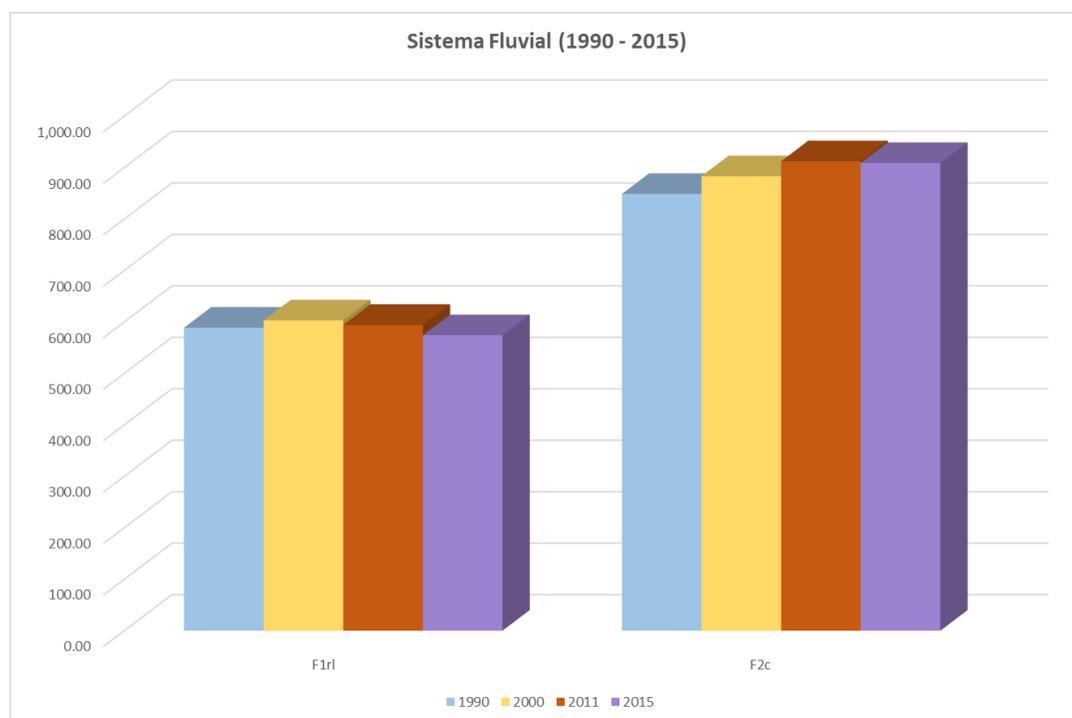


Figura 7-46. Dinámica temporal del sistema Fluvial (Superficie en Hectáreas)

Cuadro 7-15. Matriz de transformaciones y permanencias

| T2 / T1 | Ag | Ar | Asva | Au | Be | F1rl | F2c | L1Mp | L2Da | Pla | Plc | Ple | Plh | Vh | Vta |
|-------------|------|-------|------|----|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Ag | SA | H2Or- | A+ | ID | D1 | H- | H2Or- | H2O- | H2O- | H2O- | H- | H- | H- | A+ | D1 |
| Ar | H2Or | SR | H2Or | ID | H2Or | H2Or | SR | H2Or |
| Asva | A- | H2Or- | SS | ID | D1 | H- | H2Or- | H2O- | H2O- | H2O- | H- | H- | H- | D2 | D2 |
| Au | A- | H2Or- | D1 | SZ | D1 | H- | H2Or- | H2O- | H2O- | H2O- | H- | H- | H- | D1 | D1 |
| Be | R1 | H2Or- | R1 | ID | SB | H- | H2Or- | H2O- | H2O- | H2O- | H- | H- | H- | R1 | R1 |
| F1rl | ID | H+ | H2O+ | ID | H2O+ | SF | H+ | H2O- | H2O- | H2O- | H2O+ | H2O+ | H2O+ | H2O+ | H2O+ |
| F2c | H2Or | SR | H2Or | ID | H2Or | H2Or | SR | H2Or |
| L1Mp | ID | ID | ID | ID | H2O+ | H2O+ | ID | SL | HL | ID | H2O+ | H2O+ | H2O+ | H2O+ | H2O+ |
| L2Da | ID | H+ | H2O+ | ID | H2O+ | H2O+ | H+ | HL | SL | H2O+ | H2O+ | H2O+ | H2O+ | H2O+ | H2O+ |
| Pla | H+ | H+ | H2O+ | ID | H2O+ | H2O+ | H+ | L-P | L-P | SP | H2O+ | H2O+ | H2O+ | H2O+ | H2O+ |
| Plc | H+ | H+ | H+ | ID | H+ | H2O- | H+ | H2O- | H2O- | H2O- | SP | HP | HP | H+ | H+ |
| Ple | H+ | H+ | H+ | ID | H+ | H2O- | H+ | H2O- | H2O- | H2O- | HP | SP | HP | H+ | H+ |
| Plh | H+ | H+ | H+ | ID | H+ | H2O- | H+ | H2O- | H2O- | H2O- | HP | HP | SP | H+ | H+ |
| Vh | R1 | H2Or- | R1 | ID | D1 | H- | H2Or- | H2O- | H2O- | H2O- | H- | H- | H- | SV | D2 |
| Vta | R1 | H2Or- | R1 | ID | D2 | H- | H2Or- | H2O- | H2O- | H2O- | H- | H- | H- | R1 | ST |

L1Mp: Poza, L2Da: Laguna, Pla: Llanura inundable, Ple: Vegetación emergente, Plh: Halófilo inundable, Plc: Llanura húmeda, F1rl: Río, F2c: Canal artificial, Ar: Almacenamiento de agua.

La matriz describe las combinaciones entre cambios y permanencias, de manera que identifica los procesos para agruparlos y generar modelos explicativos (Moreno y García 2012) (ver anexos 10 al 17). Cabe señalar que no todas las transiciones son posibles o no se presentaron al realizar el estudio. A continuación, se describen de los procesos de transformación y permanencia utilizados en el estudio:

Permanencia de coberturas

- SA. Permanencia de zonas agrícolas
- ST. Permanencia de Tierras Altas
- SZ. Permanencia de Zonas Urbanas
- SB. Permanencia de Bosque Espinoso
- SS. Permanencia de Áreas sin Vegetación Aparente
- SV. Permanencia de Vegetación Halófila
- SL. Permanencia de humedales Lacustres
- SP. Permanencia de humedales Palustres
- SF. Permanencia de humedales Fluviales
- SR. Permanencia de humedales artificiales

Deterioro de la vegetación y/o suelo

- D1. Deforestación: de bosque o matorral a agricultura, pastizal halófilo, área sin vegetación aparente o áreas urbanas
- D2. Degradación Forestal: de vegetación primaria a vegetación secundaria (Incluyendo cambio de bosque espinoso a matorral desértico y vegetación secundaria)

Recuperación de la vegetación y/o suelo

- R1. Repoblación Forestal: de agricultura o pastizal a bosque o matorral

Deterioro y mejoramiento de la agricultura

- A+. Aumento y/o mejoramiento de las condiciones agrícolas: Se agrupan, 1) pastizales que pasan a ser zonas agrícolas y áreas sin vegetación aparente que pasan a ser ocupadas por la agricultura
- A-. Degradación de la condición agrícola: 1) agricultura que pasa a ser pastizal, área sin vegetación aparente o zonas urbanas

Cobertura y composición de los humedales

- H2O+. Aumento del espejo de cuerpo de agua
- H2O-. Desección del espejo del cuerpo de agua
- HL. Cambio de cobertura entre clases lacustres
- HP-. Cambio de cobertura entre clases palustres
- P-L. Cambio de composición de humedales palustres a lacustres
- L-P. Cambio de composición de humedales lacustres a palustres
- H+. Formación de humedales: de pastizales halófilos, vegetación de tierras altas, áreas agrícolas y humedales artificiales a humedales naturales
- H-. Pérdida de humedales: de humedales a tierras altas, áreas agrícolas y áreas urbanas
- H2Or. Creación de humedales artificiales: incluye canales y presones
- H2Or-. Desaparición de humedales artificiales: incluye canales y presones

7.11. Factores relacionados con los cambios en la cobertura

Con el objetivo de evaluar cuantitativamente la correlación espacial de los factores se utilizó la *V de Cramer*, a través del módulo *Transition Potentials* de Idrisi Selva 17.02.

Para explicar los cambios en las coberturas para cada serie de tiempo, se elaboraron modelos de transición, considerando diez factores antropogénicos y cinco naturales (Cuadro 7-16). Los modelos fueron evaluados con el “Panel de Prueba y Selección de Variables Conductoras y de Lugar” de Idrisi Selva 17.02, el cual genera una medida estadística cuantitativa usando la *V de Cramer*, brindando una evaluación del poder explicativo de la variable. Los procesos fueron divididos para identificar más claramente la influencia de las variables en: 1) los que están

relacionados con el uso del suelo y vegetación de tierras altas; y 2) los vinculados a cambios en los humedales (ver apartado 7.11.6).

Al respecto, Moreno y García (2012) mencionan que las variables con valores mayores a 0.15 pueden ser consideradas útiles para incluirse en los modelos; sin embargo, en el presente trabajo la inclusión de algunas variables con valores menores a este umbral, mejoraron considerablemente los modelos de transición. El método utilizado para encontrar las variables que tienen una mayor relación con las transiciones consistió en prueba y error, descartando los cambios menores a 10 hectáreas.

Una vez que las variables del modelo fueron definidas, las transiciones para cada periodo se elaboraron utilizando algoritmos de redes neurales en el módulo *Multi-Layer Perceptron*.

Cuadro 7-16. Factores utilizados para la elaboración de los modelos de transición

| Factores | Tipo |
|--------------------------------|---------------------|
| Antropogénicos | |
| Agricultura | Distancia |
| Canales | Distancia |
| Localidades | Distancia |
| Caminos | Distancia |
| Aprovechamientos subterráneos | Volumen y distancia |
| Aprovechamientos superficiales | Volumen y distancia |
| Ejidos | Presencia/Ausencia |
| Propiedad federal | Presencia/Ausencia |
| Propiedad privada | Presencia/Ausencia |
| Parcelas | Presencia/Ausencia |
| Naturales | |
| Pendiente | Valor |
| Piezometría | Valor |
| Cuerpos de agua | Distancia |
| Pozas | Densidad |
| Rios | Distancia |

De manera general, se observó que los factores de tipo antropogénico inciden en los procesos de cambio de uso del suelo y la vegetación de tierras altas, obteniendo altos valores de exactitud. En los procesos relacionados con los humedales, hubo una mayor variabilidad en los factores, con una relación más marcada con los factores naturales y las variaciones en los niveles piezométricos, fenómeno que se vincula con los aprovechamientos subterráneos y superficiales.

Se identificó que existen otros factores que intervienen en la distribución y composición de los humedales, como los procesos ecológicos que influyen en la composición y abundancia de las comunidades vegetales, los cuales no fueron considerados en la metodología.

En el periodo comprendido entre los años 1990 y 2000, la agricultura y los canales artificiales mostraron influencia en la deforestación y degradación forestal, mientras que la pérdida de zonas agrícolas se relacionó con la distancia a caminos; por otro lado, la repoblación forestal se efectuó principalmente en terrenos ejidales (Cuadro 7-17).

Cuadro 7-17. Procesos de cambio y su relación con los factores naturales y humanos en el periodo 1990 - 2000

| Factores | Periodo 1990 – 2000 | | | | | | | | | |
|--------------------------------|---------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | D1 | D2 | R1 | A- | H2O+ | H2O- | HP | H+ | H- | H2Or |
| Agricultura | 78.53 | 49.55 | 26.61 | | | 10.12 | | 12.54 | 14.29 | 68.47 |
| Canales | 31.86 | 69.17 | | | | 14.22 | | | 15.55 | |
| Localidades | 33.08 | 34.81 | 20.55 | 31.75 | 61.21 | 12.29 | | | 19.53 | 52.7 |
| Caminos | 32.01 | 43.94 | 12.69 | 31.75 | | | | | 19.71 | 49.55 |
| Aprovechamientos subterráneos | | | | 47.94 | | 10.6 | 15.51 | 19.36 | | |
| Aprovechamientos superficiales | | | | | | 18.55 | 14.99 | | | |
| Ejidos | | | 16.76 | | | | | | 14.29 | |
| Propiedad federal | | | | | | | | | | |
| Propiedad privada | | | | | | | | | | |
| Parcelas | | | | | | | | | | |
| Pendiente | 33.08 | 48.73 | 18.18 | 31.75 | 50.86 | 11.08 | 11.47 | 12.43 | 14.29 | 52.7 |
| Piezometría | | | 28.79 | 31.75 | 54.31 | 11.08 | 15.4 | | 18.44 | |
| Cuerpos de agua | | | | | 77.59 | 21.45 | | 18.92 | 16.46 | |
| Pozas | | | | | | | | 8.25 | 16.64 | |
| Rios | | | | | 65.52 | 26.75 | 15.81 | 8.69 | 17.54 | 65.77 |
| Exactitud del modelo | 85.56 | 85.17 | 71.97 | 93.33 | 88.79 | 67.95 | 28.47 | 68.21 | 42.68 | 80.63 |

*Las celdas sombreadas indican el factor con mayor grado de influencia en el proceso de transición. Valores en porcentaje.

La cercanía de cuerpos de agua mostró ser un factor determinante en la formación de nuevas áreas de inundación (88.79%); por otra parte, la creación de humedales, la disminución en los espejos de agua y los cambios en la composición se correlacionó con los aprovechamientos subterráneos. No obstante, las exactitudes demuestran que existen factores externos que influyen en estos procesos y que no fueron tomados en cuenta en los modelos.

En el periodo del año 2000 al 2011, fue más estrecha la relación de las actividades agrícolas con las transiciones en las categorías de uso del suelo y vegetación; a su vez, los humedales tuvieron una correspondencia con los factores naturales. Los procesos de ganancia y pérdida en los humedales

se asociaron con los aprovechamientos subterráneos y la distancia a ríos y las áreas de inundación con los cuerpos de agua (Cuadro 7-18).

Cuadro 7-18. Procesos de cambio y su relación con los factores naturales y humanos en el periodo 2000 - 2011

| Factores | Periodo 2000 – 2011 | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|---------------------|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|-----------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | D1 | D2 | R1 | A+ | A- | H2O+ | H2O- | HP | H+ | H- | H2Or | H2Or- |
| Agricultura | 24.94 | 32.07 | 20.73 | 52.81 | | | 49.33 | | | 9.15 | 23.81 | 43.87 |
| Canales | 35.17 | 32.07 | 25.54 | 30.2 | 31.28 | | 49.33 | | | 10.68 | | 56.75 |
| Localidades | 13.37 | 18.73 | 11.88 | 26.1 | 33.73 | 30 | 49.33 | | 11.23 | 9.74 | 11.51 | 53.37 |
| Caminos | 31.91 | 24.65 | 13.78 | 26.1 | 47.2 | | | | | 10.33 | 26.19 | 43.25 |
| Aprovechamientos subterráneos | | | | 25.64 | 36.33 | | 38 | 16.52 | 14.07 | | | |
| Aprovechamientos superficiales | | | | 26.1 | | | 49.33 | 16.34 | | | | |
| Ejidos | | | | | | | | | | 11.85 | | |
| Propiedad federal | | | | | | | | | | | | |
| Propiedad privada | | | | | | | | | | | | |
| Parcelas | | | | | | | | | | | | |
| Pendiente | 17.42 | 23.32 | 12.01 | 26.1 | 32.62 | 35.45 | 49.33 | 11.72 | 13.13 | 7.98 | 35.32 | 33.44 |
| Piezometría | | | 8.98 | | 50.83 | 35.45 | 49.33 | 17.14 | 11.1 | 11.62 | | |
| Cuerpos de agua | | | | | | 65.91 | 92 | | 22.6 | 11.62 | | |
| Pozas | | | | | | | | | | 12.21 | | |
| Rios | | 20.23 | | | | 45.91 | 49.33 | 17.14 | 12.86 | 19.25 | 42.46 | 35.28 |
| Exactitud del modelo | 79.89 | 61.31 | 56.01 | 90.9 | 89.05 | 89.09 | 86 | 25.22 | 55.62 | 59.39 | 72.62 | 82.52 |

*Las celdas sombreadas indican el factor con mayor grado de influencia en el proceso de transición. Valores en porcentaje.

Del 2011 al 2015 nuevamente la agricultura fue detonante en los cambios de las categorías de uso del suelo y vegetación. En los humedales, los principales cambios estuvieron relacionados con los aprovechamientos subterráneos y superficiales en la zona; además, el aumento en el espejo de agua se relacionó con la distancia a cuerpos de agua (Cuadro 7-19).

En el análisis global de 25 años (1990 – 2015), se confirmaron las tendencias mostradas en los periodos analizados con anterioridad; reiterando que los procesos agrícolas son un factor detonante de los cambios en la vegetación natural de tierras altas en la región.

Los humedales que mostraron una crecida en las áreas de inundación están influenciados por la cercanía de otros cuerpos de agua y manantiales; por su parte, aquellos que disminuyeron su espejo dependen de su distancia a los ríos.

Cuadro 7-19. Procesos de cambio y su relación con los factores naturales y humanos en el periodo 2011 - 2015

| Factores | Periodo 2011 – 2015 | | | | H2O+ | HP | H+ | H- |
|--------------------------------|---------------------|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | D1 | D2 | R1 | A+ | | | | |
| Agricultura | 43.24 | 47.05 | 52.86 | 55.93 | | | 23.03 | 13.2 |
| Canales | 45.49 | 74.65 | 24.57 | 29.3 | | | 16.01 | 13.2 |
| Localidades | 12.07 | 51.06 | 24.29 | 24.21 | 11.65 | | 16.67 | 14.11 |
| Caminos | 29.55 | 75.12 | 24.29 | 24.21 | | | | 14.57 |
| Aprovechamientos subterráneos | | | | 23.73 | 11.28 | 13.82 | 15.35 | 23.22 |
| Aprovechamientos superficiales | | | | 24.46 | 10.34 | 12.84 | 23.03 | |
| Ejidos | | | | | | | | 13.51 |
| Propiedad federal | | | | | | | | |
| Propiedad privada | 28.21 | | | | | | | |
| Parcelas | | | | | | | | |
| Pendiente | 35.94 | 51.06 | 24.29 | 24.21 | 9.21 | 11.13 | 16.01 | 13.51 |
| Piezometría | | | 50 | | 8.27 | 18.25 | | 10.32 |
| Cuerpos de agua | | | | | 14.29 | | 24.78 | 13.66 |
| Pozas | | | | | 11.28 | | | 16.24 |
| Rios | | 76.53 | | | 9.4 | 16.67 | 22.37 | 15.63 |
| Exactitud del modelo | 92.63 | 93.16 | 95.14 | 93.7 | 71.05 | 20.53 | 41.89 | 47.65 |

*Las celdas sombreadas indican el factor con mayor grado de influencia en el proceso de transición. Valores en porcentaje.

La aparición de nuevas áreas de humedales y los cambios de composición en las clases palustres mostraron una correlación con los aprovechamientos subterráneos. La desaparición de humedales expuso también una dependencia con la cercanía a ríos (Cuadro 7-20).

La aparición de nuevos humedales artificiales depende de la cercanía de infraestructura existente, lo que es un factor a considerar en caso de efectuar obras de restauración y conservación de los humedales.

7.1. Modelo predictivo de cambios para el año 2025

Las probabilidades de transición se utilizan para modelar los cambios de uso del suelo y vegetación, como un proceso Markoviano aleatorio que se encuentra condicionado por el estado inicial. De manera que la matriz pueda utilizarse para proyectar la estructura del paisaje a futuro, o modelos de escenarios de paisaje alternativos (Rosete et al. 2008).

Cuadro 7-20. Procesos de cambio y su relación con los factores naturales y humanos en el periodo 1990 - 2015

| Periodo 1990 – 2015 | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Factores | D1 | D2 | R1 | A+ | A- | H2O+ | H2O- | HP | H+ | H- | H2Or | H2Or- |
| Agricultura | 22.37 | 32.08 | 23.62 | 53.05 | | | 13.21 | | 17.59 | 8.24 | 18.73 | 39.38 |
| Canales | 31.92 | 29.28 | 17.45 | 28.32 | | | | | 9.56 | 9.22 | 48.21 | 55.69 |
| Localidades | 17.41 | 15.34 | 11.28 | 24.79 | 33.33 | | 9.43 | | 11.22 | 9.64 | 17.91 | 50.46 |
| Caminos | 16.69 | 21.67 | 9.4 | 24.79 | 44.08 | 8.81 | | | 9.28 | 12.71 | 20.66 | 48.62 |
| Aprovechamientos subterráneos | | | | 24.79 | 33.1 | 16.08 | 15.33 | 13.61 | 15.37 | 12.71 | | |
| Aprovechamientos superficiales | | | | 24.79 | | 14.54 | 15.8 | 15.29 | | | 17.63 | |
| Ejidos | 18.74 | 14 | | | | | | | | 9.22 | | |
| Propiedad federal | | | | | | | | | | | | |
| Propiedad privada | 15.48 | | | | 33.1 | | | | | | | |
| Parcelas | | | | | | | | | | | | |
| Pendiente | 16.69 | 20.6 | 11.54 | 24.79 | 33.1 | 8.81 | 9.2 | 10.94 | 7.76 | 9.22 | 20.66 | 32.31 |
| Piezometría | | | 7.05 | | 50.94 | 8.81 | 18.63 | 15.49 | 8.59 | 8.38 | | |
| Cuerpos de agua | | | | | | 20.7 | 26.18 | | 13.43 | 11.87 | | |
| Pozas | | | | | | 11.01 | | | 8.31 | 10.47 | | |
| Rios | | 15.29 | | | | 15.2 | 20.99 | 15.02 | 8.73 | 17.18 | 27.82 | 30.77 |
| Exactitud del modelo | 84.16 | 71.72 | 65.64 | 94.25 | 92.62 | 67.18 | 74.76 | 21.49 | 59.56 | 52.65 | 72.73 | 73.85 |

*Las celdas sombreadas indican el factor con mayor grado de influencia en el proceso de transición. Valores en porcentaje.

Para establecer un escenario del año 2025, se calcularon las cadenas de probabilidad de Markov, utilizando las clasificaciones de 1990 y 2015 (Cuadro 7-13). La matriz de transiciones se conforma a nivel de renglón, de manera que la suma de probabilidades de cambio es igual a cien por ciento; sin embargo, en la matriz se agruparon los valores en un solo decimal, por lo que la suma pudiera no reflejar el porcentaje antes mencionado.

La matriz Markoviana mostró que existe una mayor probabilidad de permanencia en las clases de uso del suelo y vegetación con relación a las categorías de humedales. Esto indica una alta dinámica de transición en estos ecosistemas, que es un aspecto a tomar en cuenta para el diseño de estrategias de conservación de los humedales (Cuadro 7-21).

Las transiciones presentes en el área de estudio tienen una relación compleja, la cual es ilustrada con un diagrama de cadenas de Markov (Figura 7-47). La categoría de uso del suelo y vegetación, con un menor valor de persistencia fue el Bosque espinoso (90.9%), con transiciones hacia áreas agrícolas (1.9%), vegetación de tierras altas (3.0%), vegetación halófila (1.9%) y vegetación emergente de humedales (1.9%), entre otros.

Cuadro 7-21. Matriz de probabilidades de Markov para el año 2025

| Clases | Uso del suelo | | | | | | Humedales | | | | | | | | | |
|---------------|---------------|------|------|------|------|------|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | Ag | Au | Be | Vta | Vh | Asva | L1Mp | L2Da | Pla | Ple | Plh | Plc | F1rl | F2c | Ar | |
| Uso del suelo | Ag | 96.2 | 0.3 | 0.8 | 1.2 | 1.1 | 0.3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Au | 0 | 99.9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Be | 1.9 | 0 | 90.9 | 3.0 | 1.9 | 0 | 0 | 0.1 | 0 | 1.9 | 0.3 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Vta | 0.1 | 0 | 0 | 99.9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Vh | 0.1 | 0 | 0.2 | 0.3 | 98.2 | 0.1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.0 | 0.1 | 0 | 0 | 0 |
| | Asva | 2.7 | 0 | 0 | 0.2 | 0.1 | 97.1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Humedales | L1Mp | 0 | 0 | 3.8 | 0 | 0 | 0 | 69.3 | 4.6 | 1.7 | 17.4 | 2.8 | 0 | 0.3 | 0.3 | 0 |
| | L2Da | 0 | 0 | 0 | 0.9 | 0 | 0 | 0.5 | 47.1 | 0 | 33.0 | 0 | 14.8 | 3.6 | 0 | 0 |
| | Pla | 0 | 0 | 0.2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 29.3 | 24.3 | 25.9 | 0 | 19.4 | 1.0 | 0 | 0 |
| | Ple | 0 | 0 | 1.3 | 0 | 0 | 0 | 0.4 | 1.4 | 0.4 | 87.4 | 8.5 | 0 | 0 | 0.5 | 0 |
| | Plh | 2.2 | 0 | 0.1 | 0 | 21.7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5.4 | 63.9 | 6.5 | 0 | 0.1 | 0 |
| | Plc | 0 | 0 | 0 | 0 | 4.1 | 0 | 0 | 4.4 | 0.4 | 0.8 | 14.8 | 75.4 | 0 | 0 | 0 |
| | F1rl | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.9 | 0 | 0.4 | 0.8 | 0.1 | 0.6 | 0.1 | 0 | 97.0 | 0.1 | 0 |
| | F2c | 0.1 | 0 | 1.1 | 0.1 | 0.8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.3 | 0 | 0 | 97.6 | 0 |
| | Ar | 3.9 | 0 | 0 | 9.1 | 0 | 0.3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 86.7 |

L1Mp: Poza, L2Da: Laguna, Pla: Llanura inundable, Ple: Vegetación emergente, Plh: Halófilo inundable, Plc: Llanura húmeda, F1rl: Río, F2c: Canal artificial, Ar: Almacenamiento de agua.

*Valores expresados en porcentaje, los resultados por clase se obtienen a través de la suma de los renglones. Celdas sombreadas indican permanencia

De acuerdo al modelo de probabilidad de Markov, las clases de humedales con mayor dinámica son las áreas de inundación, clasificadas como lagunas (L2Da) y llanura inundable (Pla) con una permanencia del 47.1% y 24.3% respectivamente; además las pozas (L1Mp) con un 69.3%.

Las clases de humedales palustres a excepción de la llanura inundable (Plc), tienen probabilidades de permanencia que van de 63.9 y 87.4%, principalmente con transiciones hacia otros humedales lacustres y palustres. La clase de uso del suelo que tiene una mayor incidencia en la transición de estos humedales es la vegetación halófila (Vh), resaltando la importancia de la conservación de estos ecosistemas para mantener las condiciones hidrológicas de los humedales.

Las clases relacionadas con el sistema fluvial tienen probabilidades de permanencia más altas, indicando que están sujetos a pequeños cambios con relación a su área. No obstante, este valor no refleja de impacto que puedan ocasionar las modificaciones en estos ecosistemas. El modelo de probabilidades de Markov, muestra que los ríos (F1rl) son los que tienen mayor relación con otros humedales, situación similar a la que exhiben las pozas (L1Mp) (Cuadro 7-22).

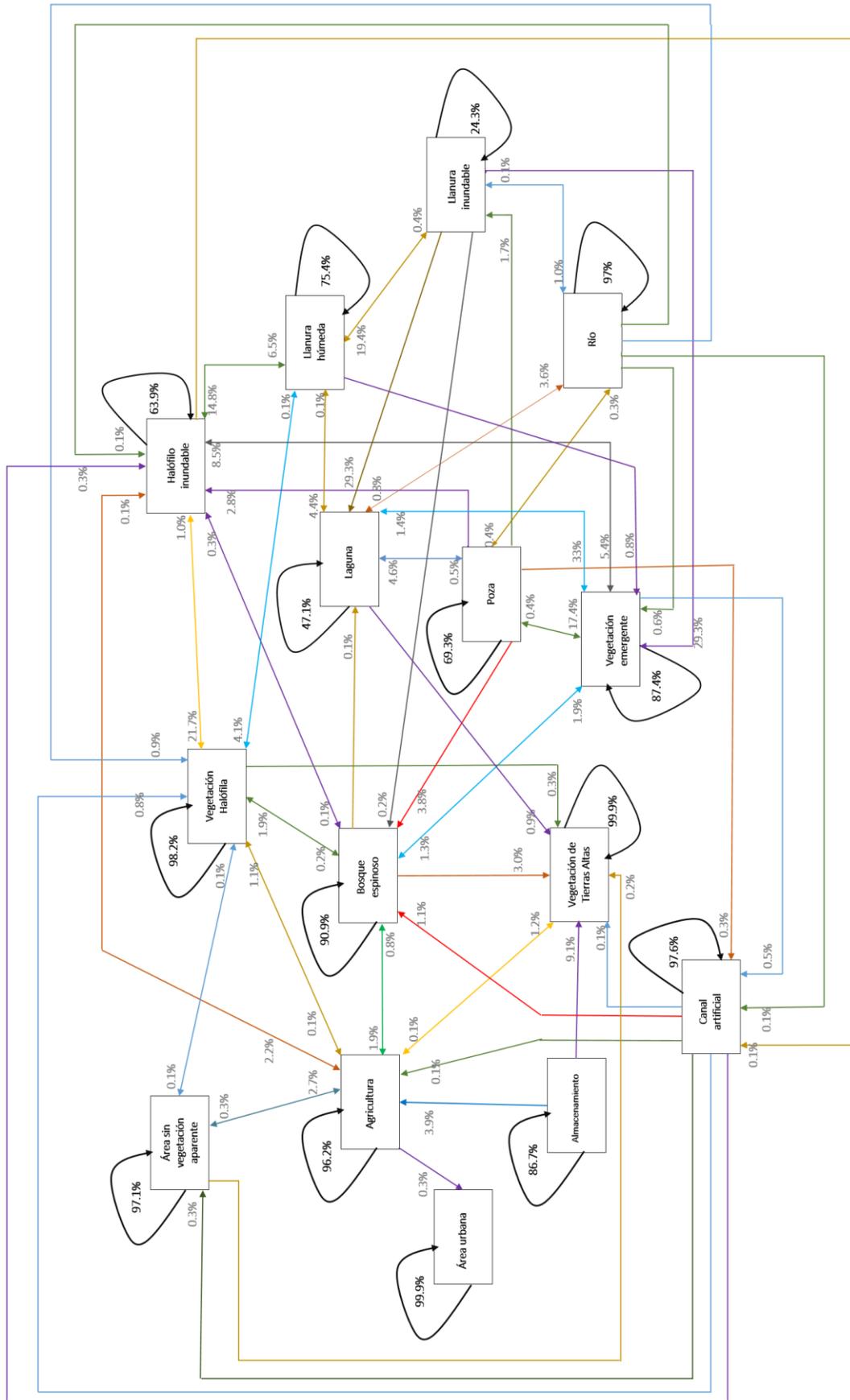


Figura 7-47. Diagrama de cadenas de probabilidad de Markov para el año 2025. Se muestran valores de probabilidad de persistencia y cambio en porcentaje

7.2. Fragmentación del hábitat

Las métricas de fragmentación fueron calculadas a nivel de paisaje y clase para detectar las tendencias relacionadas con el área, variabilidad, tamaño, densidad, borde, forma y diversidad de los humedales. Se realizó una selección de las métricas a nivel de paisaje para obtener información de la configuración del paisaje del área de estudio, eliminando aquellas que eran redundantes o mostraban poca variabilidad en los datos (Cuadro 7-22).

Cuadro 7-22. Métricas a nivel de paisaje utilizadas en el análisis

| Métrica | Unidades | 1990 | 2000 | 2011 | 2015 |
|---------|----------|------------|------------|------------|------------|
| NP | (#) | 8,625 | 8,673 | 8,856 | 8,999 |
| MPS | (ha) | 42.64 | 42.40 | 41.53 | 40.87 |
| PSSD | (ha) | 3,098.64 | 3,089.99 | 3,066.99 | 3,039.81 |
| TE | (m) | 10,379,160 | 10,562,820 | 10,711,200 | 10,834,920 |
| MSI | | 1.45 | 1.46 | 1.46 | 1.46 |
| SDI | | 0.93 | 0.93 | 0.91 | 0.92 |

NP: Número de parches, *MPS*: Media del tamaño del parche, *PSSD*: Desviación estándar del tamaño del parche, *TE*: Total del borde, *MSI*: Índice de forma media, *SDI*: Índice de diversidad de Shannon.

Las métricas de variabilidad, tamaño y densidad del parche, mostraron una tendencia al alza en el número de fragmentos (NP) (Figura 7-48), disminuyendo en la variabilidad y el tamaño medio de los parches (MPS) (Figura 7-49), y la desviación estándar del tamaño del parche (PSSD) (Figura 7-50). A su vez, el total del borde (TE) de los fragmentos ha aumentado, aspecto relacionado con la presencia de mayor cantidad de parches en el área (Figura 7-51).

Los índices de forma describen la relación entre el área y el perímetro del parche. El índice de forma media (MSI) es una medida de la complejidad en la forma de los fragmentos, incrementándose cuando los parches poseen una morfología irregular. En el área de estudio hubo un incremento en la complejidad de la forma de los fragmentos si comparamos la fecha inicial (1990) con la más reciente (2015); no obstante, las variaciones en los datos obtenidos son muy pequeños por lo que no se puede considerar una tendencia (Figura 7-52).

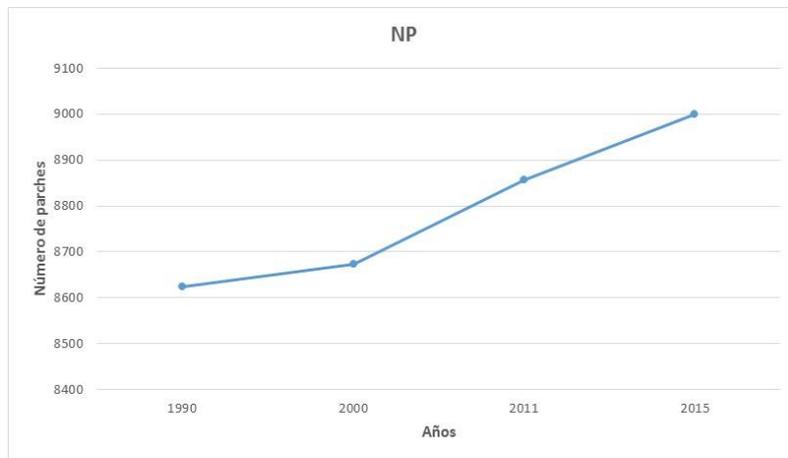


Figura 7-48. Tendencia del número de fragmentos a nivel de paisaje

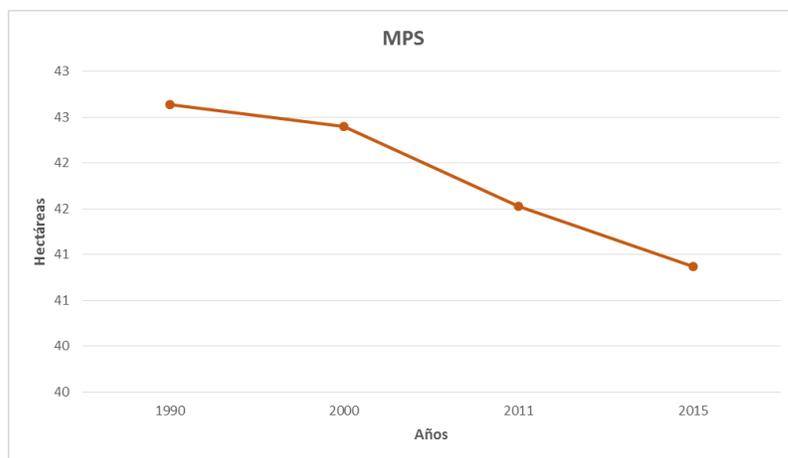


Figura 7-49. Tendencia de la media del tamaño del parche

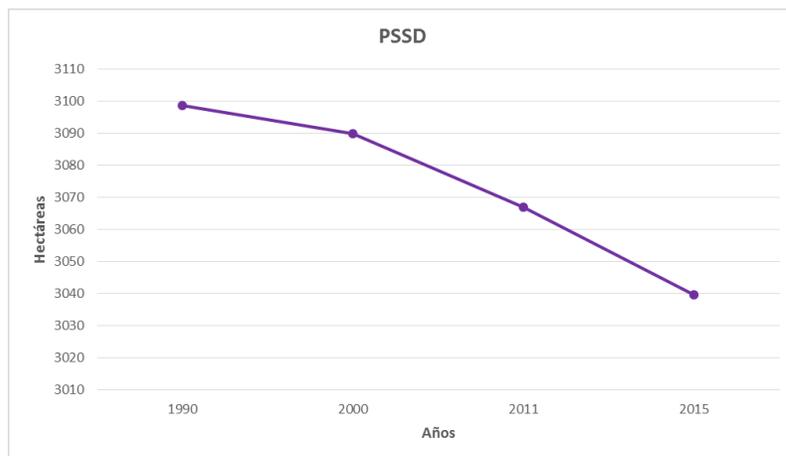


Figura 7-50. Tendencia de la desviación estándar del tamaño del parche

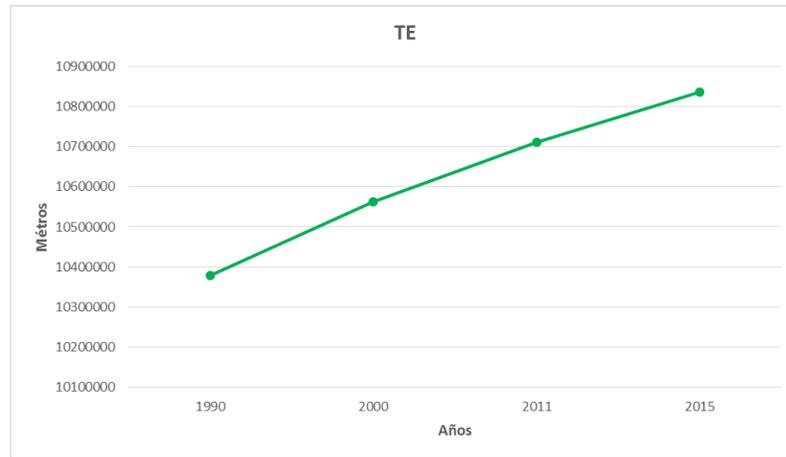


Figura 7-51. Tendencia del total del borde

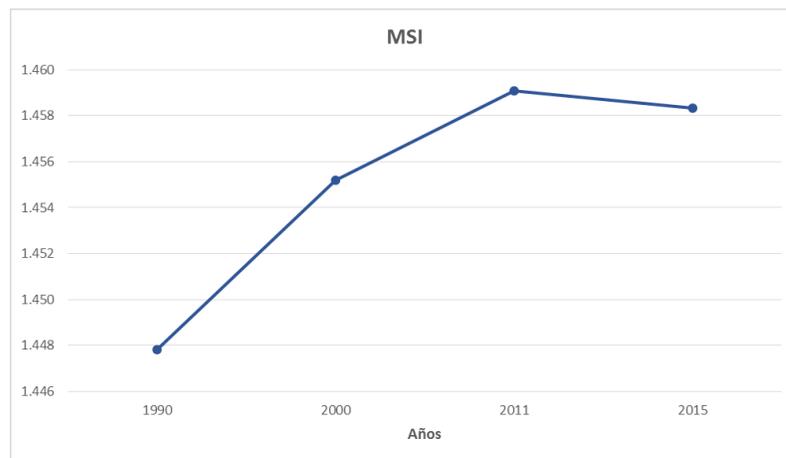


Figura 7-52. Tendencia del índice de forma media

La diversidad paisajística es un indicador de la heterogeneidad de los fragmentos, obtenido a través del índice de diversidad de Shannon (SDI), que proporciona un valor relativo para comparar distintos paisajes o un mismo paisaje en fechas diferentes (McGarigal y Marks 1994) (Figura 7-53). Los valores generados por el índice de Shannon mostraron que el año con mayor diversidad paisajística fue 1990, disminuyendo gradualmente hasta el 2011, tendencia que se revierte al presentarse nuevamente un incremento en 2015, por lo que su variación parece estar relacionada con los periodos de humedad.

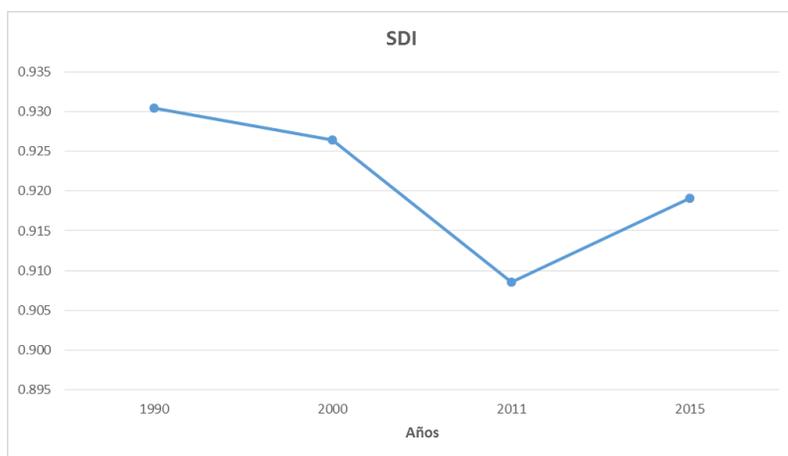


Figura 7-53. Tendencia del índice de Shannon

7.2.1. Relación entre las variables climáticas y la morfología de los humedales

Para evaluar la influencia de las variables climáticas en los humedales, se utilizaron las métricas de fragmentación a través del coeficiente de correlación de *Pearson*, que constituye una medida de relación lineal entre dos variables; en donde si el coeficiente es cercano a uno existe una relación estrecha y cuando presenta valores cercanos a cero es baja (Leal- Nares et al. 2010).

Los factores climáticos fueron considerados como las variables independientes (X), en tanto que las métricas de fragmentación para cada clase de humedal se tomaron como dependientes (Y). Se incluyeron los datos anuales y las medias móviles en un periodo de tres años para relacionar los factores climáticos con los cambios en el área, tamaño, borde y forma de los fragmentos. En el análisis se incluyó la vegetación halófila (Vh), debido a que mostró una relación con la dinámica de transición en los humedales de Cuatro Ciénegas.

Métricas de área

De acuerdo a la correlación lineal, las fluctuaciones en la precipitación están relacionadas con los niveles de las pozas en un 89%; lo cual coincide con los reportes de Ortíz y Gutierrez (2012), quienes mencionan que los cambios estacionales en la precipitación influyen en la evolución de los niveles piezométricos y a su vez, en los gastos producidos en las pozas (Cuadro 7-15).

Cuadro 7-23. Relación entre el área de cobertura de los humedales con las variables climáticas utilizando el coeficiente de determinación (r^2)

| Año | 1990 | 2000 | 2011 | 2015 | Coeficiente de determinación (r^2) | | | |
|---------------------------|------------------|-----------|-----------|-----------|--|-------------|-------------|-------------|
| Precipitación (mm) | | | | | | | | |
| Anual | 213.50 | 138.50 | 66.20 | 210.60 | | | | |
| Media Móvil | 251.00 | 143.43 | 118.47 | 210.39 | | | | |
| Temperatura (°C) | | | | | | | | |
| Anual | 17.66 | 16.20 | 24.08 | 23.16 | Precipitación | | Temperatura | |
| Media Móvil | 17.03 | 15.85 | 23.93 | 23.35 | Anual | Media móvil | Anual | Media móvil |
| Clase | Área (Ha) | | | | | | | |
| L1Mp | 98.28 | 78.03 | 69.93 | 107.19 | 0.89 | 0.77 | 0.00 | 0.00 |
| L2Da | 242.91 | 31.68 | 23.31 | 503.46 | 0.64 | 0.50 | 0.09 | 0.09 |
| Pla | 50.31 | 16.74 | 25.38 | 65.88 | 0.61 | 0.63 | 0.10 | 0.11 |
| Ple | 5,287.77 | 5,449.14 | 5,979.33 | 5,344.38 | -0.89 | -0.67 | 0.32 | 0.30 |
| Plh | 5,125.32 | 6,260.40 | 4,322.79 | 4,712.49 | 0.02 | 0.00 | -0.80 | -0.77 |
| Plc | 5,992.56 | 4,427.64 | 3,899.25 | 4,074.39 | 0.34 | 0.57 | -0.40 | -0.43 |
| F1rl | 588.69 | 603.00 | 594.09 | 574.02 | -0.36 | -0.34 | -0.31 | -0.32 |
| F2c | 848.70 | 883.17 | 912.15 | 908.82 | -0.27 | -0.41 | 0.63 | 0.66 |
| Vh | 23,070.40 | 23,972.30 | 26,478.00 | 25,884.80 | -0.27 | -0.31 | 0.85 | 0.87 |

L1Mp: Poza, L2Da: Laguna, Pla: Llanura inundable, Ple: Vegetación emergente, Plh: Halófilo inundable, Plc: Llanura húmeda, F1rl: Río, F2c: Canal artificial, Ar: Almacenamiento de agua.

*Valores negativos indican una correlación inversa; media móvil de 3 años

Las lagunas (L2Da) y llanura inundable (Pla) presentan una relación superior al 60% con la precipitación; sin embargo, este valor es indicativo de que hay otros factores que inciden en su distribución. La vegetación emergente (Ple) mostró una ecuación negativa con la precipitación, esto se debe a que el incremento en los niveles de ríos, pozas y lagunas inundan las áreas ocupadas por este ecosistema, propiciando cambios en su distribución.

La correlación negativa de la vegetación halófila inundable (-80%) sugiere que en años con temperaturas más bajas se presenta un incremento en su área; mientras que la Vegetación halófila posee una relación positiva con la media móvil (87%), por lo que la transición hacia esta cobertura no se realiza de manera inmediata, presentándose gradualmente por la disminución en los niveles freáticos someros en el valle y como la pérdida de humedad del suelo por efecto de la evapotranspiración (DOF 2008).

Métricas de variabilidad, tamaño y densidad

El número de parches (NP) presentes en el paisaje, fue la métrica que mostró una mayor relación con las variables climáticas. En las clases que describen la presencia de humedad e inundación en los humedales como las pozas (L1Mp), lagunas (L2Da), llanura inundable (Pla) y llanura húmeda (Plc), hubo una correlación estrecha con la media móvil de la precipitación, lo que demuestra que la humedad actúa de manera acumulada, aumentando el número de fragmentos de estas categorías en años con mayores registros de precipitación (Cuadro 7-24).

Otros humedales como la vegetación emergente (Ple), la vegetación halófila inundable (Plh), la vegetación halófila (Vh) y los ríos (F1rl) tuvieron correspondencia con la temperatura. La vegetación emergente y la vegetación halófila obtuvieron una relación positiva, en donde a mayor temperatura se generan una mayor cantidad de fragmentos; por otra parte, los parches compuestos por vegetación halófila inundable (Plh) tienden a disminuir con relación a este factor.

En cuanto a la media del tamaño del parche (MPS), la precipitación solo mostró relación estrecha con la llanura inundable (Pla), que en su caso es negativa debido a que la lluvia tiende a agrupar las zonas inundadas formando áreas más extensas que son clasificadas bajo otra categoría.

El valor positivo de determinación de las lagunas (L2Da) con la temperatura, indicó que se genera una disminución en el tamaño de los parches por efecto de la desecación de estos ecosistemas, de igual forma que los ríos (F1rl), los canales artificiales (F2c) y la vegetación halófila inundable (Plh). Los humedales emergentes (Ple) y la vegetación halófila (Vh), se comportan de manera opuesta, aumentando la media del tamaño de los fragmentos cuando la temperatura registra valores más altos.

La desviación estándar del tamaño del parche (PSSD), mostró valores que hacen referencia a que la variabilidad del tamaño del fragmento se comporta inversamente a la temperatura en la vegetación emergente (Ple) y la vegetación Halófila inundable (Plh), lo que se traduce en parches más homogéneos. Mientras que en los ríos (F1rl), los canales artificiales (F2c) y la vegetación halófila (Vh), el aumento de la temperatura provoca una mayor variabilidad en los fragmentos.

Cuadro 7-24. Relación entre la variabilidad, tamaño y densidad de los fragmentos de los humedales con las variables climáticas, utilizando el coeficiente de determinación (r^2)

| Año | 1990 | 2000 | 2011 | 2015 | | | | |
|---------------------------|--|--------|--------|--------|--|--------------------|--------------------|--------------------|
| Precipitación (mm) | | | | | | | | |
| Anual | 213.50 | 138.50 | 66.20 | 210.60 | | | | |
| Media Móvil | 251.00 | 143.43 | 118.47 | 210.39 | | | | |
| Temperatura (°C) | | | | | Coeficiente de determinación (r^2) | | | |
| Anual | 17.66 | 16.20 | 24.08 | 23.16 | Precipitación | | Temperatura | |
| Media Móvil | 17.03 | 15.85 | 23.93 | 23.35 | Anual | Media móvil | Anual | Media móvil |
| Clase | (NP) Número de parches (#) | | | | | | | |
| L1Mp | 225 | 120 | 116 | 146 | 0.52 | 0.82 | -0.12 | -0.14 |
| L2Da | 18 | 3 | 1 | 18 | 0.88 | 0.91 | 0.00 | 0.00 |
| Pla | 44 | 10 | 12 | 65 | 0.70 | 0.64 | 0.06 | 0.06 |
| Ple | 660 | 679 | 1,016 | 858 | -0.39 | -0.31 | 0.87 | 0.86 |
| Plh | 2,314 | 2,460 | 2,595 | 2,669 | -0.08 | -0.19 | -0.66 | -0.70 |
| Plc | 1,035 | 770 | 655 | 929 | 0.92 | 0.98 | -0.11 | -0.11 |
| F1rl | 162 | 148 | 64 | 71 | -0.16 | -0.18 | -0.93 | -0.94 |
| F2c | 532 | 581 | 446 | 447 | 0.02 | 0.00 | -0.96 | -0.96 |
| Vh | 1,014 | 1,088 | 992 | 944 | -0.27 | -0.31 | 0.85 | 0.87 |
| Clase | (MPS) Media del tamaño del parche (ha) | | | | | | | |
| L1Mp | 0.44 | 0.65 | 0.60 | 0.73 | -0.01 | -0.17 | 0.17 | 0.21 |
| L2Da | 13.49 | 10.56 | 23.31 | 27.97 | 0.00 | 0.00 | 0.89 | 0.91 |
| Pla | 1.14 | 1.67 | 2.12 | 1.01 | -0.98 | -0.83 | 0.03 | 0.03 |
| Ple | 8.01 | 8.03 | 5.89 | 6.23 | 0.16 | 0.14 | -0.97 | -0.98 |
| Plh | 2.21 | 2.54 | 1.67 | 1.77 | 0.05 | 0.01 | -0.96 | -0.94 |
| Plc | 5.79 | 5.75 | 5.95 | 4.39 | -0.34 | -0.14 | -0.14 | -0.17 |
| F1rl | 3.63 | 4.07 | 9.28 | 8.08 | -0.22 | -0.21 | 0.94 | 0.95 |
| F2c | 1.60 | 1.52 | 2.05 | 2.03 | -0.07 | -0.05 | 0.99 | 0.99 |
| Vh | 22.15 | 22.03 | 26.69 | 27.42 | -0.02 | -0.02 | 0.95 | 0.97 |
| Clase | (PSSD) Desviación estándar del tamaño del parche (ha) | | | | | | | |
| L1Mp | 0.79 | 1.08 | 1.21 | 2.02 | 0.04 | 0.00 | 0.40 | 0.45 |
| L2Da | 17.55 | 9.59 | 0.00 | 48.33 | 0.59 | 0.36 | 0.04 | 0.06 |
| Pla | 1.35 | 1.10 | 1.66 | 0.84 | -0.48 | -0.15 | 0.02 | 0.01 |
| Ple | 73.17 | 63.87 | 44.98 | 45.66 | 0.18 | 0.25 | -0.82 | -0.85 |
| Plh | 14.46 | 15.94 | 10.67 | 10.59 | 0.03 | -0.01 | -0.98 | -0.98 |
| Plc | 56.93 | 54.23 | 51.16 | 31.60 | -0.10 | -0.01 | -0.38 | -0.43 |
| F1rl | 16.01 | 18.73 | 27.35 | 25.59 | -0.25 | -0.28 | 0.87 | 0.89 |
| F2c | 6.15 | 5.91 | 6.63 | 6.62 | -0.03 | -0.01 | 0.97 | 0.97 |
| Vh | 352.34 | 352.87 | 488.17 | 493.32 | -0.08 | -0.08 | 0.96 | 0.97 |

L1Mp: Poza, L2Da: Laguna, Pla: Llanura inundable, Ple: Vegetación emergente, Plh: Halófilo inundable, Plc: Llanura húmeda, F1rl: Río, F2c: Canal artificial, Ar: Almacenamiento de agua.

*Valores negativos indican una correlación inversa; media móvil de 3 años

Métricas de borde

Las métricas de borde permiten conocer la amplitud del ecotono en los ecosistemas, lo que es importante para temas de manejo de especies endémicas, ya que el hábitat de borde favorece la presencia de especies generalistas y restringe las especialistas (McGarigal 2001). Se observó de manera general una relación positiva de la presencia de humedad y el aumento del borde en los humedales que están relacionados con la presencia de áreas de inundación (L2Da, Pla, Plc). Mientras que el borde de la vegetación emergente (Ple) y la vegetación halófila (Vh) indicaron incrementos con la temperatura. El borde de los ríos (F1rl), también tiende a ser más uniforme cuando la temperatura aumenta, lo que puede ocasionar que su área sea confinada a zonas más reducidas (Cuadro 7-25).

Cuadro 7-25. Relación entre las características del borde de los fragmentos de los humedales con las variables climáticas, utilizando el coeficiente de determinación (r^2)

| Año | 1990 | 2000 | 2011 | 2015 | | | | |
|---------------------------|---|-----------|-----------|-----------|---|--------------------|--------------------|--------------------|
| Precipitación (mm) | | | | | | | | |
| Anual | 213.50 | 138.50 | 66.20 | 210.60 | | | | |
| Media Móvil | 251.00 | 143.43 | 118.47 | 210.39 | | | | |
| Temperatura (°C) | | | | | Coficiente de determinación (r^2) | | | |
| Anual | 17.66 | 16.20 | 24.08 | 23.16 | Precipitación | | Temperatura | |
| Media Móvil | 17.03 | 15.85 | 23.93 | 23.35 | Anual | Media móvil | Anual | Media móvil |
| Clase | (TE) Total del borde (m) | | | | | | | |
| L1Mp | 60,060 | 41,040 | 37,680 | 52,500 | 0.84 | 0.99 | -0.05 | -0.06 |
| L2Da | 36,600 | 4,800 | 2,460 | 71,580 | 0.66 | 0.54 | 0.06 | 0.08 |
| Pla | 21,660 | 6,840 | 9,060 | 31,800 | 0.64 | 0.59 | 0.09 | 0.10 |
| Ple | 807,240 | 780,360 | 989,460 | 896,940 | -0.32 | -0.19 | 0.90 | 0.88 |
| Plh | 1,452,480 | 1,685,640 | 1,456,200 | 1,562,220 | 0.00 | -0.08 | -0.22 | -0.18 |
| Plc | 915,840 | 725,040 | 662,580 | 762,120 | 0.66 | 0.87 | -0.24 | -0.26 |
| F1rl | 272,040 | 277,140 | 264,120 | 256,260 | -0.01 | 0.00 | -0.80 | -0.82 |
| F2c | 461,640 | 483,960 | 486,600 | 485,040 | -0.33 | -0.62 | 0.26 | 0.29 |
| Vh | 1,613,820 | 1,657,440 | 1,688,400 | 1,692,480 | -0.19 | -0.35 | 0.60 | 0.64 |
| Clase | (MPE) Media del borde del parche (m) | | | | | | | |
| L1Mp | 266.93 | 342.00 | 324.83 | 359.59 | 0.04 | -0.25 | 0.14 | 0.18 |
| L2Da | 2,033.33 | 1,600.00 | 2,460.00 | 3,976.67 | 0.11 | 0.06 | 0.54 | 0.58 |
| Pla | 492.27 | 684.00 | 755.00 | 489.23 | -0.95 | -0.91 | 0.01 | 0.01 |
| Ple | 1,223.09 | 1,149.28 | 973.88 | 1,045.38 | 0.39 | 0.42 | -0.79 | -0.81 |
| Plh | 627.69 | 685.22 | 561.16 | 585.32 | 0.05 | 0.00 | -0.90 | -0.87 |
| Plc | 884.87 | 941.61 | 1,011.57 | 820.37 | -0.88 | -0.64 | 0.00 | 0.00 |
| F1rl | 1,679.26 | 1,872.57 | 4,126.88 | 3,609.30 | 0.22 | -0.21 | 0.94 | 0.95 |
| F2c | 867.74 | 832.98 | 1,091.03 | 1,085.10 | -0.07 | -0.06 | 0.99 | 0.99 |
| Vh | 1,591.54 | 1,523.38 | 1,702.02 | 1,792.88 | 0.00 | 0.00 | 0.83 | 0.85 |

L1Mp: Poza, L2Da: Laguna, Pla: Llanura inundable, Ple: Vegetación Emergente, Plh: Halófilo inundable, Plc: Llanura húmeda, F1rl: Río, F2c: Canal artificial, Ar: Almacenamiento de agua.

La media del borde del parche (MPE) mostró una correspondencia negativa de la precipitación con la llanura inundable (Pla) y la llanura húmeda (Plc). A su vez, la temperatura tiene un marcado efecto en la disminución de la media del borde de los fragmentos de la vegetación emergente (Ple) y la vegetación halófila inundable (Plh). Contrariamente a los valores presentados por los ríos (F1rl), canales artificiales (F2c) y la vegetación halófila (Vh) que registran un aumento con la temperatura.

Métricas de forma

Estos índices describen la forma de los fragmentos con relación al área y su perímetro, por lo que son utilizados como indicadores de modificaciones humanas a las coberturas (McGarigal et al. 2012). Estas métricas están altamente influenciadas por la escala de trabajo y la resolución de las imágenes utilizadas en la clasificación (Debinski y Holt 2000).

La forma de los fragmentos ha presentado variaciones mínimas en los periodos de tiempo analizados. El índice de la Media de la Dimensión Fractal del Fragmento (MPFD), mostró una disminución en la complejidad de la forma en la vegetación emergente (Ple) con relación a la cantidad de lluvia; por el contrario las lagunas (L2Da), la llanura inundable (Pla) y la vegetación halófila inundable (Plh) mantienen formas más complejas con precipitaciones abundantes (Cuadro 7-26). Se observó que el aumento de la temperatura genera formas más regulares en la llanura húmeda (Plc), mientras que los ríos (F1rl) y la vegetación halófila (Vh) tienden a formas irregulares con una mayor temperatura.

El área ponderada de la dimensión fractal media del parche (AWMPFD) proporciona una medición de la forma de los parches ajustada respecto a su tamaño, tomando valores cercanos a uno cuando las formas tienen perímetros simples (circulares o cuadrados) y se aproxima a dos cuando las formas son complejas (McGarigal y Marks 1994).

Los valores del AWMPFD, tienen pequeñas variaciones con relación a la precipitación. Las formas de los fragmentos de las lagunas (L2Da), la llanura inundable (Pla) y la vegetación halófila inundable, fueron más complejas con lluvias abundantes; por otro lado, los periodos secos propiciaron formas con perímetros más simples en los parches de la llanura húmeda (Plc) y los ríos (F1rl). Al igual que valores elevados de la temperatura favorecen fragmentos con bordes simples en los canales artificiales (F2c) y la vegetación halófila (Vh).

Cuadro 7-26. Relación entre la forma de los fragmentos de los humedales con las variables climáticas, utilizando el coeficiente de determinación (r^2)

| Año | 1990 | 2000 | 2011 | 2015 | | | | |
|---------------------------|---|--------|--------|--------|--|--------------------|--------------------|--------------------|
| Precipitación (mm) | | | | | | | | |
| Anual | 213.50 | 138.50 | 66.20 | 210.60 | | | | |
| Media Móvil | 251.00 | 143.43 | 118.47 | 210.39 | | | | |
| Temperatura (°C) | | | | | Coeficiente de determinación (r^2) | | | |
| Anual | 17.66 | 16.20 | 24.08 | 23.16 | Precipitación | | Temperatura | |
| Media Móvil | 17.03 | 15.85 | 23.93 | 23.35 | Anual | Media móvil | Anual | Media móvil |
| Clase | (MPFD) Media de la dimensión fractal del parche | | | | | | | |
| L1Mp | 1.3883 | 1.3763 | 1.3821 | 1.3719 | 0.00 | 0.07 | -0.06 | -0.09 |
| L2Da | 1.3420 | 1.3358 | 1.2635 | 1.3450 | 0.82 | 0.54 | -0.33 | -0.30 |
| Pla | 1.3680 | 1.3552 | 1.3545 | 1.3653 | 0.83 | 0.96 | 0.00 | 0.00 |
| Ple | 1.3822 | 1.3825 | 1.3841 | 1.3823 | -0.85 | -0.61 | 0.36 | 0.34 |
| Plh | 1.3851 | 1.3846 | 1.3843 | 1.3853 | 0.92 | 0.77 | 0.00 | 0.00 |
| Plc | 1.3804 | 1.3814 | 1.3779 | 1.3796 | 0.28 | 0.11 | -0.81 | -0.77 |
| F1rl | 1.4075 | 1.4077 | 1.4247 | 1.4224 | -0.15 | -0.14 | 0.97 | 0.98 |
| F2c | 1.4070 | 1.4068 | 1.4127 | 1.4125 | -0.10 | 0.09 | 0.97 | 0.99 |
| Vh | 1.3769 | 1.3782 | 1.3749 | 1.3743 | 0.00 | 0.00 | -0.92 | -0.92 |
| Clase | (AWMPFD) Área ponderada de la dimensión fractal media del parche | | | | | | | |
| L1Mp | 1.3653 | 1.3549 | 1.3619 | 1.3627 | 0.15 | 0.41 | 0.17 | 0.14 |
| L2Da | 1.3166 | 1.2868 | 1.2635 | 1.3617 | 0.77 | 0.55 | 0.00 | 0.01 |
| Pla | 1.3499 | 1.3522 | 1.3427 | 1.3552 | 0.64 | 0.28 | 0.11 | 0.09 |
| Ple | 1.3969 | 1.3829 | 1.3811 | 1.3843 | 0.46 | 0.75 | -0.21 | -0.24 |
| Plh | 1.3893 | 1.3881 | 1.3873 | 1.3905 | 0.82 | 0.63 | 0.00 | 0.00 |
| Plc | 1.3737 | 1.3869 | 1.3859 | 1.3800 | -0.64 | -0.92 | 0.02 | 0.02 |
| F1rl | 1.5093 | 1.5151 | 1.5154 | 1.5130 | -0.61 | -0.89 | 0.10 | 0.11 |
| F2c | 1.4863 | 1.4851 | 1.4873 | 1.4874 | 0.00 | 0.00 | 0.87 | 0.85 |
| Vh | 1.3865 | 1.3881 | 1.3923 | 1.3973 | 0.00 | -0.01 | 0.67 | 0.72 |

L1Mp: Poza, L2Da: Laguna, Pla: Llanura inundable, Ple: Vegetación emergente, Plh: Halófilo inundable, Plc: Llanura húmeda, F1rl: Río, F2c: Canal artificial, Ar: Almacenamiento de agua.

*Valores negativos indican una correlación inversa; media móvil de 3 años

7.3. Procesos de transformación del paisaje

Los procesos de transformación del paisaje miden patrones de cambio en el área y el número de parches presentes. En las categorías de uso del suelo y vegetación, las clases agricultura, áreas urbanas y vegetación de tierras altas tuvieron un aumento, por otra parte, el bosque espinoso mostró disección debido a la apertura de áreas para la agricultura.

Los resultados obtenidos en los humedales presentaron variaciones en los procesos, dependiendo si el periodo comparado correspondía al cambio de un año húmedo a otro seco o viceversa.

Los patrones observados muestran de manera general que las transiciones ocurridas en las clases de humedales responden a variaciones climáticas, a través de procesos de unión, creación y aumento, principalmente en aquellos que tienen correlación con las variables climáticas (Cuadro 7-27). El proceso de transformación en los ríos (F1rl) indica que en un periodo de 25 años el área ha decrecido (desgaste), situación que puede explicar la pérdida de humedales en la porción oriental del valle, si tomamos en cuenta que en los modelos de transición la pérdida de humedales se relacionó con la distancia de los ríos (Cuadro 7-25) (ver anexos 18 al 21).

Cuadro 7-27. Procesos de transformación del paisaje por periodo

| Clase/Subclase | 1990 - 2000 | 2000 - 2011 | 2011 - 2015 | 1990 - 2015 |
|--|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Ag Agricultura | Dissección | Creación | Unión | Creación |
| Au Áreas urbanas | Aumento | Aumento | Aumento | Aumento |
| Be Bosque espinoso | Dissección | Dissección | Desgaste | Dissección |
| Vta Vegetación de tierras altas | Dissección | Creación | Desgaste | Creación |
| Vh Vegetación halófila | Creación | Unión | Desgaste | Unión |
| Asva Área sin vegetación aparente | Creación | Desgaste | Creación | Dissección |
| L1Mp Poza | Desgaste | Desgaste | Creación | Unión |
| L2Da Laguna | Desgaste | Desgaste | Creación | Aumento |
| Pla Llanura inundable | Desgaste | Desgaste | Creación | Creación |
| Ple Vegetación emergente | Creación | Creación | Desgaste | Creación |
| Plh Halófilo inundable | Creación | Dissección | Creación | Dissección |
| Plc Llanura húmeda | Desgaste | Desgaste | Creación | Desgaste |
| F1rl Río | Unión | Desgaste | Dissección | Desgaste |
| F2c Canal artificial | Creación | Unión | Dissección | Unión |
| Ar Almacenamiento de agua | Creación | Desgaste | Cambio | Creación |

VIII. DISCUSIÓN

El valle de Cuatro Ciénegas corresponde a una cuenca endorreica localizada en un ambiente seco desértico, en donde la evaporación supera la precipitación; por lo que el entendimiento de los procesos hidrológicos, constituye un reto importante para lograr un equilibrio entre el desarrollo de las actividades productivas y la conservación de los ecosistemas que mantienen una composición de especies única.

De acuerdo a estimaciones para obtener la disponibilidad hídrica, la recarga del acuífero es de 142 millones de m^3 y la descarga natural que se efectúa a través de las pozas situadas en los flancos de la Sierra de San Marcos y Pinos en 99.5 Mm^3 (DOF 2008). Actualmente en el interior del valle se aprovechan 17.8 millones de m^3 de agua en la agricultura y 81.7 Mm^3 se exportan a través de los canales Santa Tecla, La Becerra y Saca Salada para uso agrícola. Por otro lado, las concesiones de agua subterráneas del Acuífero de Cuatro Ciénegas, se localizan principalmente en áreas agrícolas con un volumen de aprovechamiento de 6.8 Mm^3 (Figura 8-1).

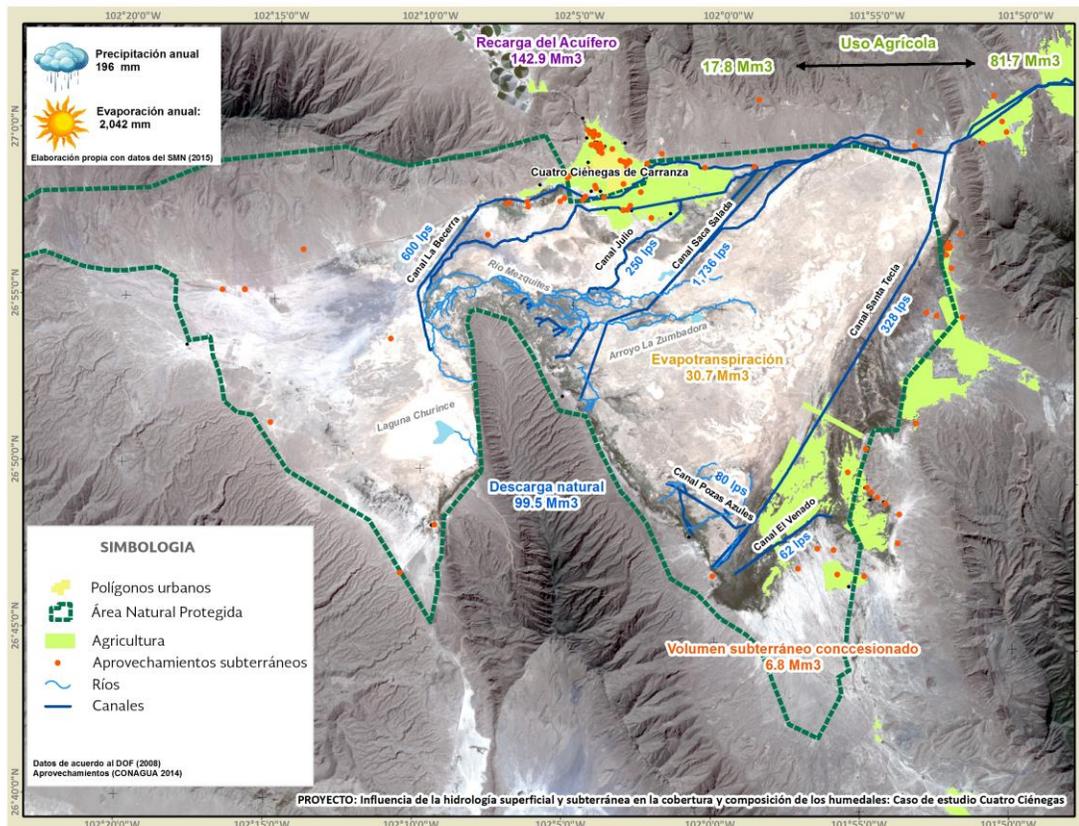


Figura 8-1. Funcionamiento hidrológico del Valle de Cuatro Ciénegas

Aunque la degradación ambiental en Cuatro Ciénegas ha sido atribuida principalmente al desarrollo de actividades humanas, la contaminación y la sobreexplotación de los acuíferos (Souza et al. 2006; Torres-Vera et al. 2012), los estudios actuales no han aportado información de los cambios ocurridos en los humedales y su relación con las variaciones en la hidrología. Por lo anterior, en el presente trabajo se adaptó un sistema clasificatorio considerando los aspectos hidrológicos y morfológicos de los humedales para evaluar los cambios en el valle de Cuatro Ciénegas, mediante el uso de imágenes de Satélite para diferentes fechas (1990, 2001, 2011 y 2015).

Los resultados mostraron que, en los últimos 25 años la cobertura de uso del suelo que ha registrado una mayor degradación es el bosque espinoso (14.5%), debido al aprovechamiento de mezquites en el valle y a la apertura de áreas para el desarrollo de actividades agrícolas cercanas al Canal Santa Tecla. Por otra parte, las áreas urbanas (27.25%) registraron la mayor expansión, reflejo del crecimiento poblacional, lo que a su vez ha conllevado a incrementar el aprovechamiento de agua subterránea para uso doméstico y público urbano.

Durante el periodo de análisis, los humedales disminuyeron su superficie en un 10.5%, principalmente en zonas cercanas al río Mezquites. Los humedales que fueron mayormente afectados son la llanura húmeda (32%), la vegetación halófila inundable (8%) y los ríos (2.5%). Otras coberturas aumentaron debido al efecto de las lluvias en años recientes como las pozas (9%), las lagunas (107%) y la llanura inundable (30%). También la red de canales artificiales aumentó su cobertura en un 7% por efectos de las actividades agrícolas.

Los procesos de transformación y permanencia fueron relacionados con los cambios en las coberturas, seleccionando diez factores antropogénicos y cinco naturales, que fueron analizados a través de algoritmos de redes neurales. Mostrando que la distribución de la red de canales y las actividades relacionadas con la agricultura son los factores detonantes en las transiciones de las tierras altas.

Los procesos que propician cambios en los humedales generalmente son complejos por lo que están influenciados por una combinación de factores naturales y humanos. Sin embargo, los aprovechamientos subterráneos y las variaciones en la piezometría son los factores relacionados con la hidrología subterránea que mostraron una relación más estrecha con las variaciones en los humedales; en tanto que la distancia a ríos y cuerpos de agua y los aprovechamientos superficiales

son los elementos de la hidrología superficial que tienen una mayor relación con los cambios en estos ecosistemas.

La identificación de los procesos de cambio en diferentes fechas generó información que permite conocer la respuesta de los humedales en presencia de periodos de sequía y humedad, además de conocer la manera en que estos influyen en su distribución espacial (Cuadro 8-1).

Cuadro 8-1. Influencia de los factores ambientales y humanos en los procesos de transición

| Factor / Proceso | H+ | H2O+ | H- | H2O- | HP |
|--|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|
| Factores relacionados con la hidrología subterránea | | | | | |
| Aprovechamientos subterráneos | S | | | S/P | S/P |
| Piezometría | | | | | S |
| Factores relacionados con la hidrología superficial | | | | | |
| Aprovechamientos superficiales | P | | | | |
| Cuerpos de agua | | S/P | | | |
| Ríos | | | S/P | S/P | |

H+: Formación de humedales, **H-**: Pérdida de humedales, **H2O+**: Aumento en el área de inundación, **H2O-**: Disminución en el área de inundación, **HP**: Cambio en la composición.

S: Corresponde a la transición hacia un periodo seco

P: Corresponde a la transición hacia un periodo húmedo

La formación de humedales es un proceso natural que involucra mecanismos de sucesión ecológica, pero que también puede ser inducido con la finalidad de recuperar áreas degradadas. En este sentido, las variaciones en la hidrología subterránea influyen en la formación de humedales principalmente durante periodos de sequía, esto se debe a que los niveles someros de los acuíferos mantienen las condiciones de humedad en el suelo. Por el contrario, cuando las precipitaciones son abundantes, la hidrología superficial incide en la formación de nuevos humedales. Por consiguiente, para promover la formación de humedales, es necesario regular los volúmenes de extracción de los aprovechamientos subterráneos en periodos de sequía; en tanto que, en periodos húmedos se considera conveniente un aprovechamiento moderado a través de los canales y pozas.

Las condiciones que se presentan en los cuerpos de agua están determinadas principalmente por la estacionalidad de la precipitación y la temperatura, además de la cercanía con otros cuerpos de agua. Esto se debe a una relación estrecha con los niveles estáticos de los acuíferos y la presencia de manantiales (pozas), así como con los movimientos superficiales del agua.

Se identificó que los procesos que involucran la pérdida de humedales en Cuatro Ciénegas en periodos de sequía y humedad se relacionan con la presencia de los ríos, debido a que estos ecosistemas mantienen la humedad del suelo y favorecen la recarga de los mantos acuíferos. En este sentido, Contreras-Balderas (1984) menciona que la dinámica hidrológica fue modificada desde la década de 1960 por la construcción de canales, que impactaron las condiciones originales de los ríos y causaron la desecación de los humedales asociados al arroyo La Becerra; situación que coincide con los resultados obtenidos en la presente investigación.

Con relación a lo anterior, se detectaron las zonas que han registrado la pérdida de humedales en los últimos 25 años, en donde se puede observar que los cambios más importantes han ocurrido en zonas aledañas a los ríos y canales artificiales (Figura 8-2). Por lo tanto, la conservación de los ecosistemas fluviales constituye una acción importante para evitar la degradación de los humedales.

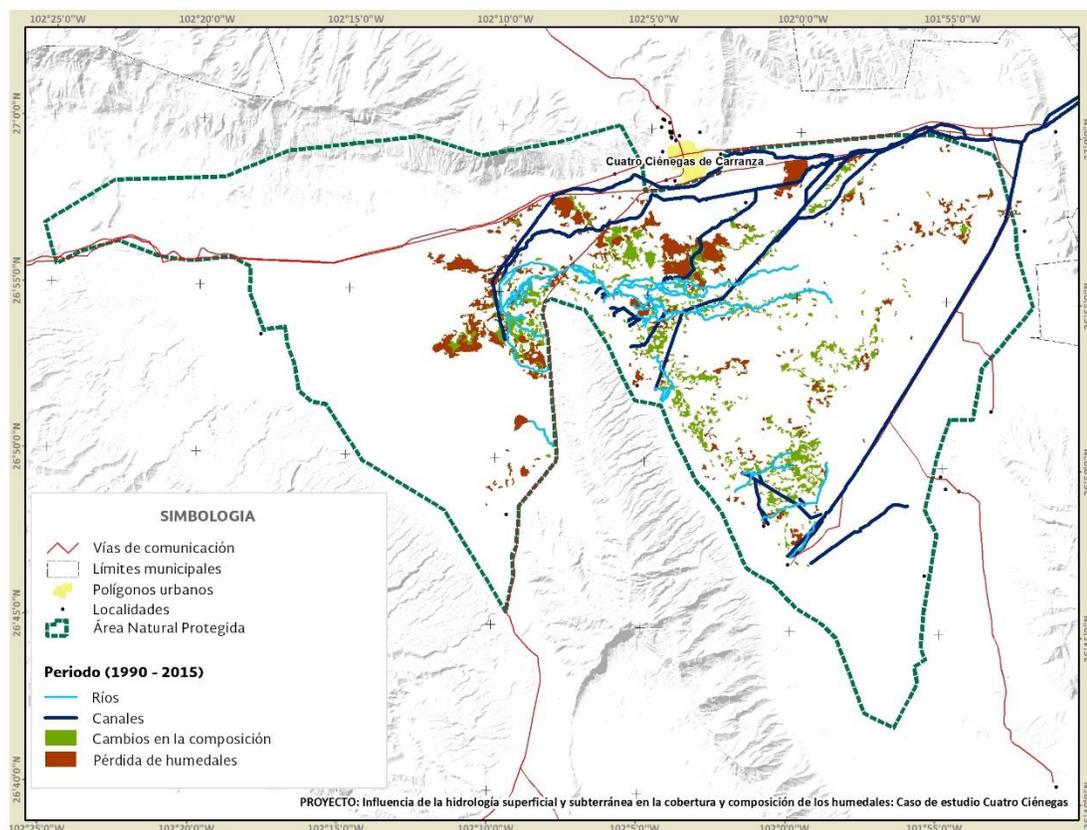


Figura 8-2. Áreas de pérdida y cambios en la composición de humedales y su relación con el sistema fluvial. Los procesos que influyen en la desecación de cuerpos de agua, se relacionan con los factores climáticos (temperatura y precipitación), las variaciones en los niveles estáticos de los acuíferos y

la cercanía a los ríos. Por lo que la sobreexplotación de los mantos acuíferos y/o la modificación de los ríos pueden incidir en la desecación de los cuerpos de agua. Un ejemplo actual de este proceso de desecación es la Laguna Churince, ubicada en la porción occidental del valle.

Los procesos que influyen en la composición de especies de los humedales se relacionan con distintas variables ambientales, humanas y ecológicas, por lo que es difícil asociarlo a un solo factor. En este sentido, algunos autores mencionan que la abundancia y dominancia de las plantas en los humedales responden principalmente a factores relacionados con la hidrología y la topografía (Magee y Kentula 2005), ya que las áreas inundables afectan la disponibilidad de nutrientes en las plantas, favoreciendo la presencia de especies nativas con adaptaciones a la baja disponibilidad de oxígeno. Por otro lado, cuando la variabilidad de las lluvias es alta, existen cambios continuos en la composición de las especies, favoreciendo a las que poseen rangos de tolerancia más amplios.

Los resultados obtenidos indicaron una correspondencia entre la composición de especies y las variaciones en los niveles freáticos; lo que sugiere que la vegetación hidrófila tiene una estrecha relación con la hidrología subterránea, aportando la humedad necesaria al suelo para el desarrollo de las comunidades vegetales. Debido a esto, la sobreexplotación de los acuíferos puede generar cambios en los mecanismos de sucesión, favoreciendo la distribución de especies exóticas.

El análisis del modelo de Markov, mostró las probabilidades de permanencia para el año 2025 para cada una de las categorías analizadas, registrando un porcentaje mayor en las clases de uso del suelo y vegetación con relación a los humedales, lo que es indicativo de la dinámica de transición de los humedales de Cuatro Ciénegas. El modelo Markoviano expuso también que los ríos y las pozas son las categorías que tienen un mayor número de relaciones en las probabilidades de transición con otros humedales, por lo que son considerados en el presente trabajo como ecosistemas claves en los procesos hidrológicos.

Las variaciones climáticas tienen una estrecha relación con el comportamiento de los humedales. Sin embargo, no se ha documentado la respuesta morfológica de los humedales a los factores climáticos, especialmente en zonas áridas y semiáridas en donde los periodos de sequía son más marcados.

Para evaluar la respuesta de los humedales a los factores climáticos, se utilizaron las métricas de fragmentación del paisaje (área, variabilidad, tamaño, densidad, borde y forma), como indicadoras

de la respuesta a las variaciones en la precipitación y temperatura, a través de estadísticos de correlación. Las métricas del paisaje presentaron correspondencias más altas cuando se utilizó una media móvil estadística de 3 años, lo que sugiere que existe un efecto de retención de la humedad en el suelo, influenciado por los niveles freáticos someros y la evapotranspiración.

Se identificó que de manera general la media del tamaño de los parches está condicionado por la temperatura, mientras que la complejidad en la forma se ve incrementada cuando la precipitación y temperatura son mayores. La extensión de las áreas de inundación presentó correspondencia directa con la precipitación; por otro lado, la vegetación hidrófila responde a las variaciones en la temperatura.

Los análisis a nivel de paisaje mostraron que los ecosistemas actualmente están más fragmentados, el tamaño de los parches es más pequeño y el efecto de borde ha aumentado, además de haber una menor variabilidad en los fragmentos, en comparación con hace 25 años. Este proceso beneficia a las especies generalistas, lo cual tiene implicaciones ecológicas para las especies endémicas presentes que poseen un nicho ambiental más reducido.

Los análisis de los procesos de transformación en el paisaje resaltaron que los ríos han sufrido un desgaste, con relación al área que ocupan y el número de fragmentos en los últimos 25 años, ocasionado por la construcción de canales agrícolas que han modificado la morfología original de los ríos.

Los resultados de este estudio, proporcionan información para entender la respuesta de los humedales a las condiciones climáticas, y su relación que con la hidrología superficial y subterránea. Además de identificar los procesos ambientales y humanos que modifican la cobertura y distribución de estos ecosistemas en Cuatro Ciénegas.

También se identificó que los ríos y las pozas constituyen ecosistemas claves para la conservación de las condiciones hidrológicas en la región, debido a que son el vínculo entre la hidrología subterránea y la superficial, por lo que su degradación puede derivar en la pérdida de humedales.

IX. CONCLUSIONES

Las características endémicas de los humedales en Cuatro Ciénegas obedecen a su estrecha relación con los acuíferos, ya que el origen del agua que alimenta estos ecosistemas, deriva de descargas subterráneas producidas a través de manantiales (pozas) localizados en los flancos de las montañas. Esta dependencia origina que estos humedales sean altamente susceptibles a modificaciones en la hidrología subterránea.

Las técnicas de percepción remota y el diseño de un sistema de clasificación de humedales adaptado para la región, proporcionaron los elementos necesarios para evaluar los cambios ocurridos en los últimos 25 años e identificar los procesos de transición de las coberturas de uso del suelo y humedales en Cuatro Ciénegas.

Los procesos de cambio relacionados con las actividades humanas que mostraron una mayor relación con los cambios en los humedales son la agricultura y los aprovechamientos de agua; en tanto que, los factores ambientales que tuvieron una mejor respuesta fueron la cercanía a ríos y cuerpos de agua, así como las variaciones en los niveles estáticos de los acuíferos.

Los humedales presentan cambios en su morfología debido a las variaciones climáticas, que pueden ser medidos a través de métricas de fragmentación de hábitat (área, variabilidad, tamaño, densidad, borde y forma en los fragmentos). Esta relación mostró dependencias más estrechas cuando se utilizó una media móvil estadística de 3 años, lo que indica que la presencia de humedad acumulada en el suelo es un elemento determinante en la cobertura y composición de los humedales.

Las variaciones en la temperatura y la precipitación inciden principalmente la composición y forma de los humedales, mientras que los aspectos hidrológicos afectan su distribución. No obstante, las condiciones climáticas pueden generar efectos aditivos a las modificaciones en la hidrología, incrementando los efectos de degradación.

Los humedales de Cuatro Ciénegas son sensibles a variaciones en los niveles estáticos de los acuíferos y a la modificación de las condiciones hidrológicas de los ríos y las pozas; ya que estos generan cambios en la cantidad de agua disponible y en la humedad suelo. Por lo anterior, la composición y distribución de los humedales pueden constituirse como indicadores de cambios en los procesos hidrológicos.

X. RECOMENDACIONES

Se emiten las siguientes recomendaciones derivadas de los resultados obtenidos, con el objetivo de mejorar las estrategias de manejo en el valle de Cuatro Ciénegas, tomando en cuenta que existe una relación estrecha entre la hidrología y las condiciones ecológicas de los humedales:

- Establecer una red de medición en las pozas para conocer los volúmenes de descarga y sus variaciones temporales
- Realizar estudios que proporcionen información relacionada con el caudal ecológico de los ríos y pozas.
- Elaborar estrategias para ajustar los volúmenes de extracción en periodos de sequía para no comprometer la estabilidad ecológica de los humedales
- Obtener información precisa de la topografía del valle de Cuatro Ciénegas, a través de sensores de alta resolución espacial Lidar, para generar modelos que muestren detalladamente el movimiento del agua superficial
- Localizar las extracciones de agua subterránea en áreas alejadas de la influencia de los humedales, considerando los niveles piezométricos de los acuíferos.
- Incluir en la red piezométrica actual, los sitios establecidos en trabajos anteriores (SEMARNAT-IMTA 2004), con la finalidad de obtener una comparativa durante un mayor número de años en los acuíferos.
- Comparar los datos de los volúmenes concesionados vs. volúmenes de extracción de las concesiones para generar esquemas de recuperación de volúmenes de agua.
- Evitar la modificación y el dragado de los ríos y pozas.
- La extracción de agua en las pozas y ríos debe realizarse considerando únicamente los volúmenes excedentes conforme al nivel del terreno, mediante el diseño de infraestructura que favorezca la recarga de los acuíferos y la recuperación de los humedales, especialmente en periodos con bajas precipitaciones.

- Generar esquemas para mejorar la eficiencia en el uso del agua en la agricultura, tomando en cuenta horarios de riego, tecnificación, cultivos adaptados a regiones desérticas e incentivos en el uso de energía eléctrica, entre otros.
- Promover esquemas de pago de servicios ambientales a los usuarios del agua, para que puedan generarse cuotas que favorezcan el buen uso del recurso hídrico, cuyo fondo pueda ser invertido en la implementación de actividades de restauración.

XI. LITERATURA CITADA

- Acharya, G. 2000. "The Values of Wetlands : Landscape and Institutional Approaches to Valuing the Hidden Hydrological Services of Wetland Ecosystems." *Ecological Economics* 35: 63–74.
- Amezaga, J., L. Santamaría, y A. Green. 2002. "Biotic Wetland Connectivity — Supporting a New Approach for Wetland Policy." *Acta Oecologica* 23: 213–22.
- Badii, M., y J. Landeros. 2007. "Cuantificación de la Fragmentación del Paisaje y su relación con la sustentabilidad." *Daena* 2 (1): 26–38.
- Baker, C., R. Lawrence, C. Montagne, y D. Patten. 2007. "Change Detection of Wetland Ecosystems Using Landsat Imagery and Change Vector Analysis." *Wetlands* 27 (3): 610–19.
- Baker, C., J. Thompson, y M. Simpson. 2009. "Hydrological Dynamics I: Surface Waters, Flood and Sediment Dynamics." In *The Wetlands Handbook*, Editores: T. Barker y E. Maltby, 120–68. Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd.
- Bakker, W., B. Gorte, J. Horn, L. Janssen, C. Pohl, A. Prakash, C. Reeves, M. Weir, y T. Woldai. 2001. *Principles of Remote Sensing*. Editores: L. Janssen y G. Huurneman. Enschede, Netherlands, Netherlands: The International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences.
- Baodong, M., W. Lixin, y L. Shanjun. 2008. "Remote Sensing Detection for Subsidence-Resulted Water Body and Solid-Waste Dump in Coal Mine: Yanzhou Being a Case." *Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 27: 86.
- Barker, T., y E. Maltby. 2009. "Using Wetland Functioning." In *The Wetlands Handbook*, Editores: E. Maltby y T. Barker, 349–56. Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd.
- Barros, H, O. Pereira, y K. Geus. 2000. "Segmentation and Classification of Landsat-TM Images to Monitor the Soil Use." *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 33 (7): 1065–72.
- Berlanga-Robles, C., y A. Ruiz-Luna. 2008. "Esquema de clasificación de los humedales de México Classification System of the Wetlands of Mexico." *Investigaciones Geográficas*, no. 66: 25–46.
- Bocco, G., M. Bravo, y M. Mendoza. 2002. "Spatial Prediction in Hydrology: Status and Implications in the Estimation of Hydrological Processes for Applied Research." *Progress in Physical Geography* 26 (3): 319–38.
- Bogaert, J., R. Ceulemans, y D. Salvador-Van. 2004. "Decision Tree Algorithm for Detection of Spatial Processes in Landscape Transformation." *Environmental Management* 33 (1): 62–73.
- Bratt, S., y B. Booth. 2000. *Using ArcGIS 3D Analyst*. Environmental Systems Research Institute (ESRI). Redlands, CA, USA: ESRI.
- Brinson, M. 2011. "Wetlands: A Multidisciplinary Perspective." In *Wetlands, Integrating Multidisciplinary Concepts*, Editor: A. LePage. Springer.
- Cagnolo, L., y G. Valladares. 2011. "Fragmentación del Hábitat y desensamble de Redes Tróficas" *Ecosistemas* 20 (2): 68–78.
- Campbell, C., C. Johns, y D. Nielsen. 2014. "The Value of Plant Functional Groups in Demonstrating and Communicating Vegetation Responses to Environmental Flows." *Freshwater Biology*, no. 59: 858–69.

- Carrera, E., y G. de la Fuente. 2003. *Inventario y clasificación de Humedales en México: Parte I*. 1st ed. Garza García, N.L.: Ducks Unlimited de México A.C.
- Carrera, E., G. de la Fuente, A. Moreno, y O. Leal- Nares. 2010. "Inventario y Clasificación de Humedales en México." En: *V Simposio Internacional SELPER*, 9. Guanajuato, México: Sociedad Latinoamericana en Percepción Remota y Sistemas de Información Espacial.
- Carrica, C. 2002. "Estimación de la recarga natural al Acuífero de la cuenca superior del arroyo Napostá Grande, Argentina." *Groundwater and Human Development*, No. 1: 980–88.
- Chapman, S. 1976. *Methods in Plant Ecology*. New York, New York, USA: Blackwell Scientific Publications.
- Chipps, S., D. Hubbard, K. Werlin, N. Haugerud, K. Powell, J. Thompson, y T. Johnson. 2006. "Association between Wetland Disturbance and Biological Attributes in Floodplain Wetlands." *Wetlands* 26 (2): 497–508.
- Chuvieco, E. 2002. *Teledetección Ambiental*. 1st ed. Barcelona, ES, España: Ariel S.A.
- CONABIO. 2009. *Manglares de México : Extensión y Distribución*. 2a Ed. México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- CONAGUA. 2009. *Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea: Acuífero (0528) Cuatrociénegas*. México, D.F.
- . 2014. *Registros de aprovechamientos en el valle de Cuatro Ciénegas, Coahuila*. Registro Público de Derechos del Agua (REPDRA). Monterrey, México.
- Conagua- Semarnat. 2012. *Análisis espacial de las regiones más vulnerables ante las sequías en México*. México.
- Contreras, S. y Ana L. 2003. "*Hemichromis guttatus* Günther, 1862 (Pisces: Cichlidae), Nueva Introducción en México, en Cuatro Ciénegas, Coahuila." *Vertebrata Mexicana*, no. 12: 1–5.
- Contreras-Balderas, S. 1984. "Environmental Impacts Cuatro Cienegas, Coahuila, México: A Commentary." *Journal of the Arizona-Nevada Academy of Science*, no. 19: 85–88.
- Cook, H., S. Bonnett, y L. Pons. 2009. "Wetland and Floodplain Soils : Their Characteristics , Management and Future." In *The Wetlands Handbook*, Editores: E. Maltby y T. Barker. Oxford, UK.
- Coppin, P., I. Jonckheere, K. Nackaerts, B. Muys, y E. Lambin. 2004. "Digital Change Detection Methods in Ecosystem Monitoring: A Review." *International Journal of Remote Sensing* 25 (9): 1565–96.
- Cowardin, L., V. Carter, F. Golet, y E. Laroe. 1979. *Classification of Wetlands and Deepwater Habitats of the United States*. Washington, D.C.
- Cox, B., y D. Moore. 1994. *Biogeography, an ecological and evolutionary approach*. Oxford, UK: Blackwell Scientific Publications.
- Cuartero, A, y A. Felicísimo. 2003. "Rectificación y Ortorrectificación de Imágenes de Satélite: Análisis comparativo y discusión." *Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, no. 3: 45–57.
- Cushman, S., K. Gutzweiler, y J. Evans. 2010. "The Gradient Paradigm: A Conceptual and Analytical

- Framework for Landscape Ecology.” In *Spatial Complexity, Informatics, and Wildlife Conservation*, Editores: F. Huettmann y S. Cushman, 193–221. Springer.
- Dahl, T. 2006. “Remote Sensing as a tool for monitoring wetland habitat change.” Onalaska, Winsconsin: U.S. Fish and Wildlife Service.
- Davranche, A., A. Lefebvre, y B. Pulin. 2010. “Wetland monitoring using classification trees and SPOT-5 Seasonal Time Series.” *Remote Sensing of Environment* 114: 552–62.
- De Groot, R., M. Stuij, M. Finlayson, y N. Davidson. 2006. *Valuing Wetlands*. Gland, Switzerland.
- De la Lanza, G., y J. García. 2002. *Lagos y Presas de México*. 1st ed. México: AGT Editor, S.A.
- Debinski, Di., y R. Holt. 2000. “A Survey and Overview of Habitat Fragmentation Experiments.” *Conservation Biology* 14 (2): 342–55.
- Detenbeck, N. 2002. *Methods for Evaluating Wetland Condition: Wetlands Classification*. Edited by U.S. EPA. Washington, D.C.: U.S., Environmental Protection Agency.
- DOF. 1997. “Ordenamiento Ecológico de la Región de Cuatro Ciénegas, Coahuila.” *Diario Oficial de La Federación*, August.
- . 2002. “Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000, Conservación del recurso agua que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales.” *Diario Oficial de La Federación*, April 17.
- . 2008. “Acuerdo por el que se dan a conocer los estudios técnicos del Acuífero 0528 Cuatrociénegas y se modifican los límites y planos de localización que respecto del mismo se dieron a conocer en el acuerdo por el que se dan a conocer los límites de 188 Acuífero.” *Diario Oficial de La Federación*, June.
- . 2013a. “Ley de Aguas Nacionales.” *Diario Oficial de La Federación*, June 7.
- . 2013b. “Constitución Política de los Estados Mexicanos.” *Diario Oficial de La Federación*, July 19.
- . 2013c. “Decreto por el que se establece como zona reglamentada aquella que ocupa el Acuífero denominado Cuatro ciénegas, ubicado en el estado de Coahuila.” *Diario Oficial de La Federación*, September 2.
- DSE. 2007. *Index of Wetland Condition: Review of Wetland Assessment Methods*. Victoria, Canada: Victoria Department of Sustainability and Environment.
- Dugan, P. 1988. *Wetland Conservation and Sustainable Development: Toward an Environmental Sound Management and Sustainable Utilization of the World’s Wetland Resources*. Gland, Suiza.
- Elias-Gutierrez, M. 2014. *Especies Acuáticas Invasoras de México*. Editores: R. Mendoza y P. Koleff. México, D.F., México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Erwin, K. 2009. “Wetlands and Global Climate Change: The Role of Wetland Restoration in a Changing World.” *Wetlands Ecol .Management* 17: 71–84.
- Escalante, C., y L. Reyes. 2012. “Análisis de sequía meteorológica en el Norte de México.” *En: XXII Congreso Nacional de Hidráulica*. Acapulco, Gro.: Facultad de Ingeniería de la UNAM.
- ESRI. 2009. *Arc Hydro Tools - Tutorial*. Redlands, CA, USA.

- Fennessy, M., A. Jacobs, y M. Kentula. 2007. "An evaluation of rapid methods for assessing the ecological condition of wetlands." *The Society of Wetland Scientists* 27 (3): 543–60.
- Finlayson, C, y N Davidson. 2001. *Wetland Inventory, Assessment and Monitoring: Practical Techniques and Identification of Major Issues*. Editores: C. Finlayson, N. Davidson, y N. Stevenson. Dakar, Senegal, Australia: Environment Australia.
- Finlayson, M., y A. Spiers. 1999. *A Compendium of Information for Managing and Monitoring Wetlands in Tropical Australia*. Canberra, Australia: Supervision Scientist Report 148, Supervising Scientist.
- Fontannaz, D., y G. Begni. 2007. "Article a new Generation Satellite : Spot 5 in Orbit." *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 7 (September 2002): 30–32.
- Frohn, R., M. Reif, Ch. Lane, y B. Autrey. 2009. "Satellite Remote Sensing of Isolated Wetlands Using Object-Oriented Classification of Landsat-7 Data." *Wetlands* 29 (3): 931–41.
- García, E. 2004. *Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köepen*. Mexico, D.F., México.
- García, M., P. Leva, M. Zbrun, M. Veles, J. Gandolfo, y S. Valorta. 2002. "Tendencias de índices meteorológicos y biometeorológicos." *Revista FAVE - Ciencias Agrarias* 1 (1): 27–36.
- Ghobadi, Y., B. Pradhan, K. Kabiri, S. Pirasteh, H. Shafri, y G. Sayyad. 2012. "Use of Multi-Temporal Remote Sensing Data and GIS for Wetland Change Monitoring and Degradation." *En: Colloquium on Humanities, Science and Engineering Research*, Editor: K. Kinabalu, 103–8. Sabah, Malaysia.
- Gilvear, D. y C. Bradley. 2009. "Hydrological Dynamics II : Groundwater and Hydrological Connectivity." In *The Wetlands Handbook*, Editores: E. Maltby y T. Barker. Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd.
- González-Medrano, F. 2003. *Las Comunidades Vegetales de México*. México, D.F.: INE- SEMARNAT.
- Goward, S., J. Masek, D. Williams, J. Irons, y R. Thompson. 2001. "The Landsat 7 Mission Terrestrial Research and Applications for the 21st Century." *Remote Sensing of Environment* 78: 3–12.
- Grundling, A. 2014. "Remote Sensing and Biophysical Monitoring of Vegetation, Terrain Attributes and Hydrology to Map, Characterise and Classify Wetlands of the Maputaland Coastal Plain, KwaZulu-Natal, South Africa." Canada: University of Waterloo.
- Han-Qiu, Xu. 2005. "A Study on Information Extraction of Water Body with the Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI)." *Journal of Remote Sensing* 9 (5): 589–95.
- Hanson, H., y D. Churchill. 1961. *The Plant Community*. Reinhold Publishing Corp. New York, New York, USA: Reinhold Publishing Corp.
- Hansson, L., C. Bronmark, N. Anders, y K. Abjornsson. 2005. "Conflicting Demands on Wetland Ecosystem Services: Nutrient Retention, Biodiversity or Both?" *Freshwater Biology* 50 (4): 705–14.
- Howard, J., y M. Merrifield. 2010. "Mapping Groundwater Dependent Ecosystems in California." *PloS One* 5 (6).
- Hutchinson, G. 1957. "Concluding Remarks." *Cold Spring Harbor Sym. Quant. Biol.*, no. 22: 415–27.

- IMTA. 2013. "Eric 3.2." Jiutepec, Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- INE- SEMARNAP. 1999. *Programa de Manejo Del Área de Protección de Flora y Fauna Cuatrociénegas*. 1st ed. México.
- INEGI. 2009. *Guía para la Interpretación de Cartografía Uso Del Suelo y Vegetación. Serie III*. 1st ed. Aguascalientes, Ags.: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- . 2010. "Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas2.0." http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/SIATL/.
- . 2011. "Censo de Población Y Vivienda 2010." <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/ccpv/cpv2010/Default.aspx>.
- . 2013. "Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0." <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/continuoelevaciones.aspx>.
- ITC. 2001. *Ilwis 3.0 Academic: Users Guide*. Enschede, Netherlands: International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC).
- . 2005. *ILWIS 3.3 Integrated Land and Water Information System, GIS Software*. Enschede, The Netherlands.
- Jennes, J., y J. Wynne. 2007. *Cohen's Kappa and Classification Table Metrics 2.1a: An ArcView 3x Extension for Accuracy Assessment of Spatially-Explicit Models*.
- Jiménez-Moreno, M., M. González-Guillen, M. Escalona-Maurice, J. Valdez-Lazalde, y C. Aguirre-Salado. 2011. "Comparación de métodos espaciales para detectar cambios en el uso del suelo urbano." *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales Y Del Ambiente* 17 (3): 389–406.
- Johnson, E. 2000. *Métodos Multivariados Aplicados al Análisis de Datos*. Editado por International Thomson Publishing. México.
- Jones, R. 2014. "Modeling to Improve Vegetation-Based Wetland Biological Assessment." USA: Utah State University.
- Kandus, P. 1995. "El Concepto de Sucesión Vegetal y su Aplicación en Sistemas de Humedales Deltaicos." *En: Tópicos sobre humedales Subtropicales y Templados de Sudamerica*, 162–77. Buenos Aires, Argentina: Universidad de Buenos Aires.
- Kelly, M., K. Tuxen, y D. Stralberg. 2011. "Mapping Changes to Vegetation Pattern in a Restoring Wetland: Finding pattern metrics that are consistent across spatial scale and time." *Ecological Indicators* 11 (2): 263–73. doi:10.1016/j.ecolind.2010.05.003.
- Klemas, V. 2011. "Remote Sensing of Wetlands: Case Studies Comparing Practical Techniques." *Journal of Coastal Research* 27 (3): 418–27.
- Kovalchik, B., y R. Clausnitzer. 2004. *Classification and Management of Aquatic, Riparian, and Wetland Sites on the National Forests of Eastern Washington: Series Description*. General Te. Portland, OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station.
- Kraemer, C., y S. Panda. 2009. "Automatic ArcHydro for Watershed Delineation." In *Proceedings of the 2009 Georgia Water Resources Conference*, 27–29. Georgia: University of Georgia.

- Kristof, S., y R. Wismiller. 2009. "Mapping Wetlands from their Spectral Properties Recorded by ERTS System." In *LARS Symposia*. Laboratory for Applications of Remote Sensing.
- Lacaux, J., Y. Tourre, C. Vignolles, J. Nidione, y M. Lafaye. 2007. "Classification of Ponds from High-Spatial Resolution Remote Sensing: Application to Rift Valley Fever Epidemics in Senegal." *Remote Sensing of Environment* 106: 66–74.
- Leal- Nares, Oscar, Manuel Mendoza, y Eleazar Carranza. 2010. "Análisis y Modelamiento Espacial de Información Climática en la Cuenca de Cuitzeo, México." *Investigaciones Geográficas*, no. 72: 49–67.
- Leal, O. 2009. "Aspectos Ecológicos y Patrones de Distribución de *Pinus Martinezii* Larsen en la Cuenca del Lago de Cuitzeo, México: Un Modelo de Distribución Potencial Aplicado a la Conservación." México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Leal-Nares, O., M. Mendoza, D. Pérez-Salicrup, D. Geneletti, E. López-Granados, y E. Carranza. 2012. "Distribución Potencial del *Pinus Martinezii*: Un Modelo Espacial Basado en Conocimiento Ecológico y Análisis Multicriterio." *Revista Mexicana de Biodiversidad*, no. 83: 1152–70.
- Lesser y Asociados. 2001. *Estudio de Evaluación Hidrogeológica e Isotópica en el Valle del Hundido, Coahuila*. Saltillo, Coah.
- Linares, M. 2004. "La Sequía en la Cuenca del río Bravo : Principios de Política." *Gaceta Ecológica* 70. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales: 57–66.
- Liu, H., S. Zhang, Z. Li, X. Lu, y Q. Yang. 2004. "Impacts on Wetlands of Large-Scale Land-Use Changes by Agricultural Development: The Small Sanjiang Plain, China." *Ambio* 33 (6): 306–10.
- Lot, A. 2012. "Las Monocotiledóneas Acuáticas y Subacuáticas de México." *Acta Botánica Mexicana* 148: 135–48.
- Lot, A., F. Medina, y F. Chiang. 2013. *Plantas Acuáticas Mexicanas: Una Contribución a la Flora de México*. Mexico, D.F., México.
- Lu, D., P. Mausel, E. Brondízio, y E. Moran. 2004. "Change Detection Techniques." *International Journal of Remote Sensing* 25 (12): 2365–2401.
- Madrigal, J., y A. López-Caloca. 2010. "Modelo de desertificación utilizando imágenes multiespectrales en Cuatrociénegas, Coahuila, México." In *XIV Simposio Internacional SELPER*, 1–10. Guanajuato, México.
- Magee, Teresa K., y Mary E. Kentula. 2005. "Response of Wetland Plant Species to Hydrologic Conditions." *Wetlands Ecology and Management* 13 (2): 163–81.
- Magnussen, S., P. Boudewyn, y M. Wulder. 2004. "Contextual Classification of Landsat TM Images to Forest Inventory Cover Types." *International Journal of Remote Sensing* 25 (12): 2421–40.
- Manju, G., V. Chowdary, Y. Srivastava, S. Selvamani, A. Jeyaram, y S. Adiga. 2005. "Mapping and Characterization of Inland Wetlands Using Remote Sensing and GIS." *Journal of the Indian Society of Remote Sensing* 33 (1): 51–61.
- Marcos, O. 2001. "Sequía: Definiciones, Tipologías y Métodos de Cuantificación." *Investigaciones Geográficas (Esp.)*, No. 26: 59–80.

- Martinez-Martinez, S., y D. Campos- Aranda. 2010. "Algoritmos para estimar características físicas en cuencas rurales y su aplicación en el calibrado del método racional, en la Región Hidrológica No. 12 Parcial (Río Santiago)." *Agrociencia*, no. 44: 393–408.
- Matteucci, S., y A. Colma. 1982. *Metodología para el Estudio de la Vegetación*. Washington, D.C.: Secretaría general de los Estados Americanos- Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico.
- McCartney, M., y M. Acreman. 2009. "Wetlands and Water Resources." In *The Wetlands Handbook*, Editores: Maltby E. y Barker T., 357–81. Blackwell Publishing Ltd.
- McCoy, J., y K. Johnston. 2001. *Using ArcGis Spatial Analyst*. Redlands, CA, USA: Environmental Systems Research Institute (ESRI).
- McFeeters, S. 1996. "The Use of Normalized Difference Water Index (NDWI) in the Delineation of Open Water Features." *International Journal of Remote Sensing* 17 (7): 1425–32.
- McGarigal, K. 2001. "Landscape Metrics for Categorical Map Patterns." Lecture notes.
- McGarigal, K., S. Cushman, y E. Ene. 2012. "FRAGSTATS v4: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical and Continuous Maps." *Computer Software Program Produced by the Authors at the University of Massachusetts, Amherst*.
- McGarigal, K., y B. Marks. 1994. "FRAGSTATS: Spatial Pattern Analysis Program for Quantifying Landscape Structure." *General Technical Report PNW-GTR-351. US. 97331* (503): 134.
- Mendoza, M., G. Bocco, y M. Bravo. 2002. "Evaluación de la Calidad espacial e temporal de Estaciones Meteorológicas. El Caso de La Cuenca de Cuitzeo." *Serie Varia*. Instituto de Geografía-UNAM, 80–107.
- Meyer, E. 1973. "Late Quaternary Paleoecology of the Cuatrocienegas Basin." *Ecology* 54 (5): 982–95.
- Miranda, F., y E. Hernández. 1963. "Los Tipos de Vegetación de México y su Clasificación." *Boletín de La Sociedad Mexicana de México* 28: 29–162.
- Mironga, J. 2004. "Geographic Information Systems (GIS) and Remote Sensing in the Management of Shallow Tropical Lakes." *Applied Ecology and Environmental Research* 2 (1): 83–103.
- Mitov, P., y I Stoyanov. 2005. "Ecological Profiles of Harvestmen (Arachnida, Opiliones) From Vitosha Mountain (Bulgaria): A Mixed Modelling Approach Using Gams." *The Journal of Arachnology*, no. 33: 256–68.
- Mitsch, W., y J. Gosselink. 2000. "The Value of Wetlands : Importance of Scale and Landscape Setting." *Ecological Economics* 35 (200): 25–33.
- Molina, N., C. Piza, y A. Wills. 2007. "Evaluación Del Comportamiento Hídrico de La Ciénaga de Cachimbero , Implementando un Modelo de Balances de Flujo." *Revista Facultad de Ingeniería* 39: 56–68.
- Moral, F. 2004. "Aplicación de La Geoestadística En Las Ciencias Ambientales." *Ecosistemas* 13 (1): 78–86.
- Mora-Olivo, A., J. Villaseñor, y M. Martinez. 2013. "Las Plantas Vasculares Acuáticas Estrictas y su Conservación en México." *Acta Botanica Mexicana* 63: 27–63.

- Moreno, A. 2014. "Ecología del paisaje y cambio del uso del suelo y vegetación en la Sierra de San Antonio Peña Nevada, Zaragoza, Nuevo León." Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Moreno, A., y M. García. 2012. "Cambio de uso del suelo y captura de carbono en la Sierra Madre Oriental." *En: Biodiversidad y Desarrollo Rural en la Sierra Madre Oriental de Nuevo León*, Primera Ed. Monterrey, México: Especies, Sociedad y Hábitat A.C.
- Murray-Hudson, M. 2009. "Floodplain Vegetation Responses to Flood Regime in the Seasonal Okavango Delta, Botswana." University of Florida.
- Núñez, J. 2006. "Analysis and Proposal of a Sustainable Development Strategy for the Valley of Cuatro Ciénegas, Based on Principles of Urban Planning and Urban Governance." Sweden: Kungliga Tekniska Högskolan.
- NWFS. 2014. "Go Botany." *New England Wild Flower Society*.
- O'Connell, M. 2003. "Detecting, Measuring and Reversing Changes to Wetlands." *Wetlands Ecology and Management* 11 (6): 397–401.
- Olmsted, I. 1993. "Wetlands of México." In *Wetlands of the World I: Inventory, Ecology and Management*, edited by D Whigham, D. Dykyjová, and S. Hejný, 637–78. Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Ortíz, G., y C. Gutierrez. 2012. "Evolución de la profundidad del nivel estático en la porción poniente del Acuífero Cuatrociénegas, Coahuila, México." In *XXII Congreso Nacional de Hidráulica*, 5. Acapulco, Gro.
- Ozesmi, S., y M. Bauer. 2002. "Satellite Remote Sensing of Wetlands." *Wetlands Ecology and Management* 381: 381–402.
- Paredes, A. 2011. "Simulación de la operación de la poza la becerra con fines de preservación de humedales, flora y fauna del valle de Cuatro Ciénegas." México: Colegio de Posgraduados.
- Peñaranda, M. 2008. "Los humedales y el ordenamiento territorial en el marco del nuevo paradigma de desarrollo sostenible." *Tecnología En Marcha* 21 (1): 228–52.
- Pérez, L., and J. Barreiro-Hurle. 2009. "Assessing the Socio-Economic Impacts of Drought in the Ebro River Basin." *Spanish Journal of Agricultural Research* 7 (2): 269–80.
- Quintela, R., J. Forte, y O. Scarpatti. 1989. "Modification of the Water Resources Characteristics of the Argentine's Pampean Subhumid-Dry Region." *En: 12 Conference Agricultural and Forest Meteorology and Ninth Conference Biometeorology and Aerobiology*, 330–35. Charleston: American Meteorology Society.
- Ramos Durón, F., A. Quiroz Flores, J. García Armora, y A. Lot Helgueras. 2004. *Manual de Hidrobotánica*. Mexico, D.F., México: AGT Editor, S.A.
- RAMSAR. 2002. *Ficha Informativa de Cuatro Ciénegas*. México.
- Ramsar. 2011. *The List of Wetlands of International Importance*. Iran.
- . 2012. "Classification System for Wetland Type." *The Ramsar Convention Definition Of "wetland" and Classification System for Wetland Type*.
- . 2013. *The List of Wetlands of International Importance*. Iran.
- Razimul, K. 2014. "Trends of Permanent Wetland Change in Detailed Area Plan of Dhaka."

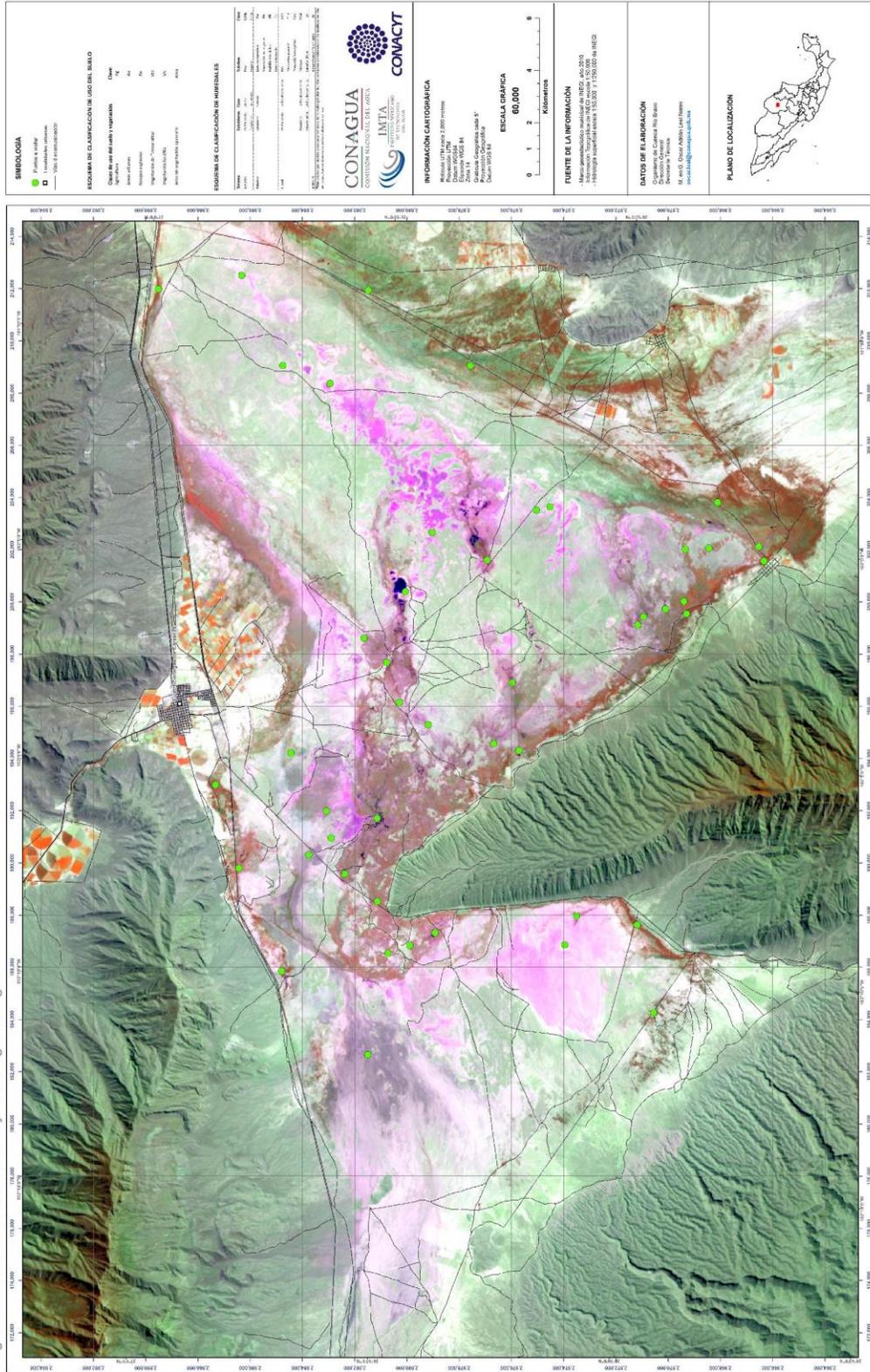
- American Journal of Water Resources* 2 (5): 106–9.
- Rempel, R., D. Kaukinen, and A. Carr. 2012. "Patch Analyst and Patch Grid." Thunder Bay, Ontario: Ontario Ministry of natural Resources, Centre for Northern Forest Ecosystem Research.
- Rivera, J., B. Ruiz, C. Patiño, y J. Velázquez. 2012. "Implementación del Modelo de Datos ArcHydro en la Región Hidrológica No. 12 Río Santiago." In *XXII Congreso Nacional de Hidráulica*, 7. Acapulco, Gro.
- Roeck, E., N. Verhoest, M. Miya, H. Lievens, O. Batelaan, A. Thomas, y L. Brendonck. 2008. "Remote Sensing and Wetland Ecology: A South African Case Study." *Sensors* 8: 3542–56.
- Rosete, F. 2008. "Modelos Predictivos de Cambio de Uso del Suelo en la Península de Baja California, México." México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Rosete, F., J. Pérez, y G. Bocco. 2008. "Cambio de Uso del Suelo y Vegetación en la Península de Baja California, México." *Investigaciones Geográficas*, no. 67: 39–58.
- Rzedowski, J. 2006. *Resumen Histórico de los estudios sobre la vegetación de México. Vegetación de México*. Vol. 19.
- Santillan, E., G. Dávila, J. Anda, y J. Díaz. 2013. "Estimación del balance hídrico mediante variables climáticas, en la cuenca del río Cazonés, Veracruz, México." *Ambiente y Agua* 8 (3): 104–17.
- SARH. 1980. *Estudio Geohidrológico Preliminar en la Zona Cuatrociénegas-Ocampo, Coahuila*. Editado por ININSA. Coahuila.
- SEMARNAT-IMTA. 2004. *La Integración y Análisis de Información Piezométrica y Propuesta de Instrumentación de los Acuíferos El Hundido y Cuatrociénegas, Coah.* Morelos, México.
- Semeniuk, V., y C. Semeniuk. 1997. "A Geomorphic Approach to Global Classification for Natural Inland Wetlands and Rationalization of the System Used by the Ramsar Convention- a Discussion." *Wetlands Ecology and Management*, no. 5: 145–58.
- Soberón, J., y A. Townsend. 2011. "Ecological Niche Shifts and Environmental Space Anisotropy: Una Nota Precautoria." *Revista Mexicana de Biodiversidad* 82: 1348–55.
- Souza, V., A. Escalante, L. Espinoza, A. Valera, A. Cruz, L. Eguiarte, F. García, y J. Elser. 2004. "Cuatro Ciénegas: Un Laboratorio Natural de Astrobiología." *Ciencias*, September.
- Souza, V., L. Espinosa-Asuar, A. Escalante, L. Eguiarte, J. Farmer, L. Forney, L. Lloret. 2006. "An Endangered Oasis of Aquatic Microbial Biodiversity in the Chihuahuan Desert." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 103 (17): 6565–70.
- Stehman, S. 1999. "Basic Probability Sampling Designs for Thematic Map Accuracy Assessment." *International Journal of Remote Sensing* 20 (12): 2423–41.
- Stein, E., A. Fetscher, R. Clark, A. Wiskind, J. Grenier, M. Sutula, J. Collins, y C. Grosso. 2009. "Validation of a Wetland Rapid Assessment Method: Use of EPA's Level 1-2-3 Framework for Method Testing and Refinement." *Wetlands* 29 (2): 648–65.
- Stroh, C., D. Steven, y G. Guntenspergen. 2008. "Effect of Climate Fluctuations on Long-Term Vegetation Dynamics in Carolina Bay Wetlands." *Wetlands* 28 (1): 17–27.
- The Plant List. 2013. "The Plant List." <http://www.theplantlist.org>.
- Torbick, N., J. Qi, Ga. Roloff, y R. Stevenson. 2006. "Investigating Impacts of Land-Use Land Cover

- Change on Wetlands in the Muskegon River Watershed, Michigan, USA." *Wetlands* 26 (4): 1103–13.
- Torres-Vera, M., D. Reyes-Chavez, y R. Prol-Ledesma. 2012. "Change Analysis (1977 – 2000) in the area covered by the hot and cold pools in Cuatro Ciénegas, Coahuila, México." *Journal of the Arizona-Nevada Academy of Science* 44 (1). The Arizona-Nevada Academy of Science: 59–68.
- Townsend, P., y S. Walsh. 2001. "Remote Sensing of Forested Wetlands: Application of Multitemporal and Multispectral Satellite Imagery to Determine Plant Community Composition and Structure in Southeastern USA." *Plant Ecology*, no. 157: 129–49.
- Turner, R., J. Van den Bergh, T. Soderqvist, A. Barendregt, J. Van der Straaten, E. Maltby, y E. Van Ierland. 2000. "Ecological-Economic Analysis of Wetlands: Scientific Integration for Management and Policy." *Ecological Economics* 35: 7–23.
- USDA. 2014. "Plants Database." *Natural Resources Conservation Service*. <http://plants.usda.gov/core/wetlandSearch>.
- Vela, M. 2000. "Distribución vegetal en el área de protección de flora y fauna de Cuatrociénegas, Coahuila, México." México: Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey.
- Villareal, J. 2001. *Listados florísticos de México: flora de Coahuila*. México, D.F., México: Instituto de Biología.
- Villarreal, Q., P. Carranza, E. Estrada, y A. Rodríguez. 2006. "Flora Riparia de Los Ríos Sabinas Y San Rodrigo, Coahuila, México." *Acta Botánica Mexicana*, no. 75: 1–20.
- Villarreal-Quintanilla, J., y J. Encina-Domínguez. 2005. "Plantas Vasculares Endémicas de Coahuila Y Algunas Áreas Adyacentes, México." *Acta Botánica Mexicana*, no. 70. Instituto de Ecología A.C.: 1–46.
- Walker, L. 2005. "Margalef y la Sucesión Ecológica." *Ecosistemas* 1 (1942): 1–13.
- Wentao, Z., W. Bingfang, J. Hongbo, y L. Hua. 2014. "Texture Classification of Vegetation Cover in High Altitude Wetlands Zone." In *35th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, edited by IOP Publishing, 17:6. Conf. Series: Earth and Environmental Science. doi:10.1088/1755-1315/17/1/012083.
- WMO. 2006. *Drought Monitoring and Early Warning : Concepts , Progress and Future Challenges*. Kenya.
- Wolaver, B. 2008. "Hydrogeology of the Cuatrociénegas Basin , Coahuila , Mexico : An Integrative Approach to Arid Karst Aquifer Delineation." The University of Texas at Austin.
- Wolaver, B., y T. Diehl. 2011. "Control of Regional Structural Styles and Faulting on Northeast Mexico Spring Distribution." *Environmental Earth Sciences* 62 (7): 1535–49.
- Wolaver, B., J. Sharp, J. Rodríguez, y J. Flores. 2008. "Delineation of Regional Arid Karstic Aquifers: An Integrative Data Approach." *Ground Water* 46 (3): 396–413.
- Zhang, Y., D. Lu, B. Yang, C. Sun, y M. Sun. 2011. "Coastal Wetland Vegetation Classification with a Landsat Thematic Mapper Image." *International Journal of Remote Sensing* 32 (2): 545–61.
- Zhou, Qi., B. Li, y Y. Chen. 2011. "Remote Sensing Change Detection and Process Analysis of Long-Term Land Use Change and Human Impacts." *Ambio* 40 (7): 807–18.

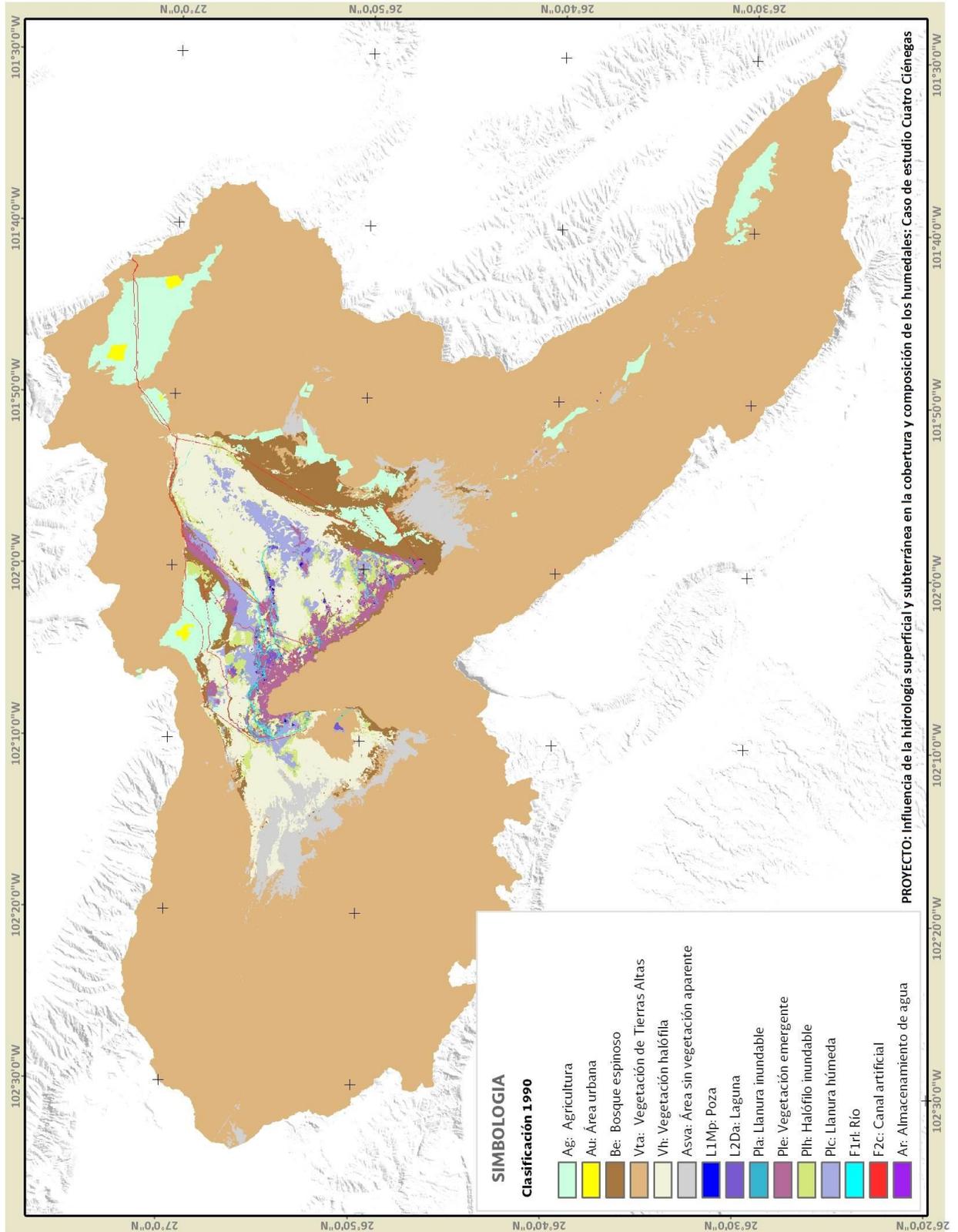
XII. ANEXOS

Anexo 1. Espaciomapa del área de estudio

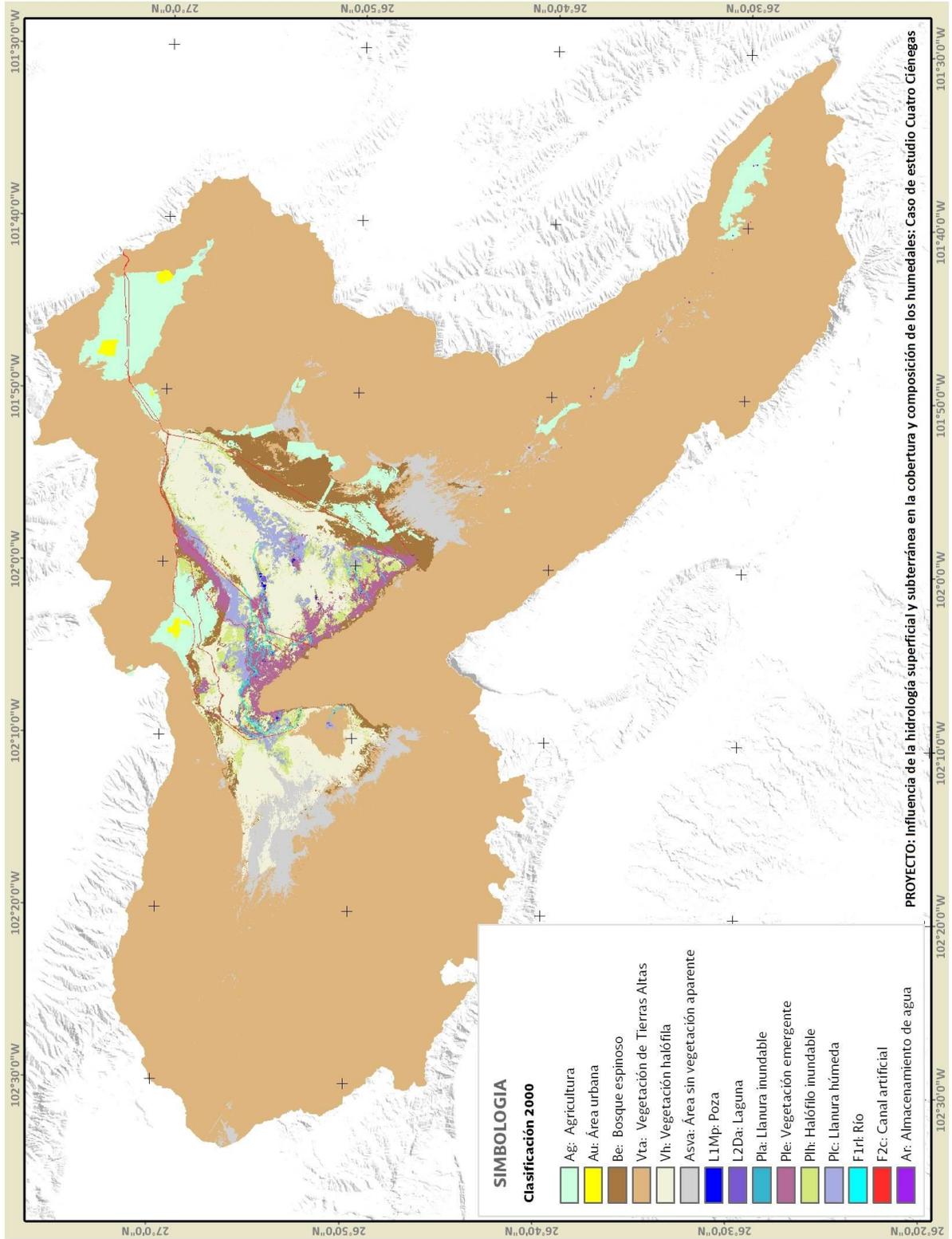
PROYECTO: Influencia de la hidrología superficial y subterránea en la cobertura y composición de los humedales: Caso de estudio Cuatro Ciénegas
 Programa de Doctorado en Ciencias y Tecnología del Agua



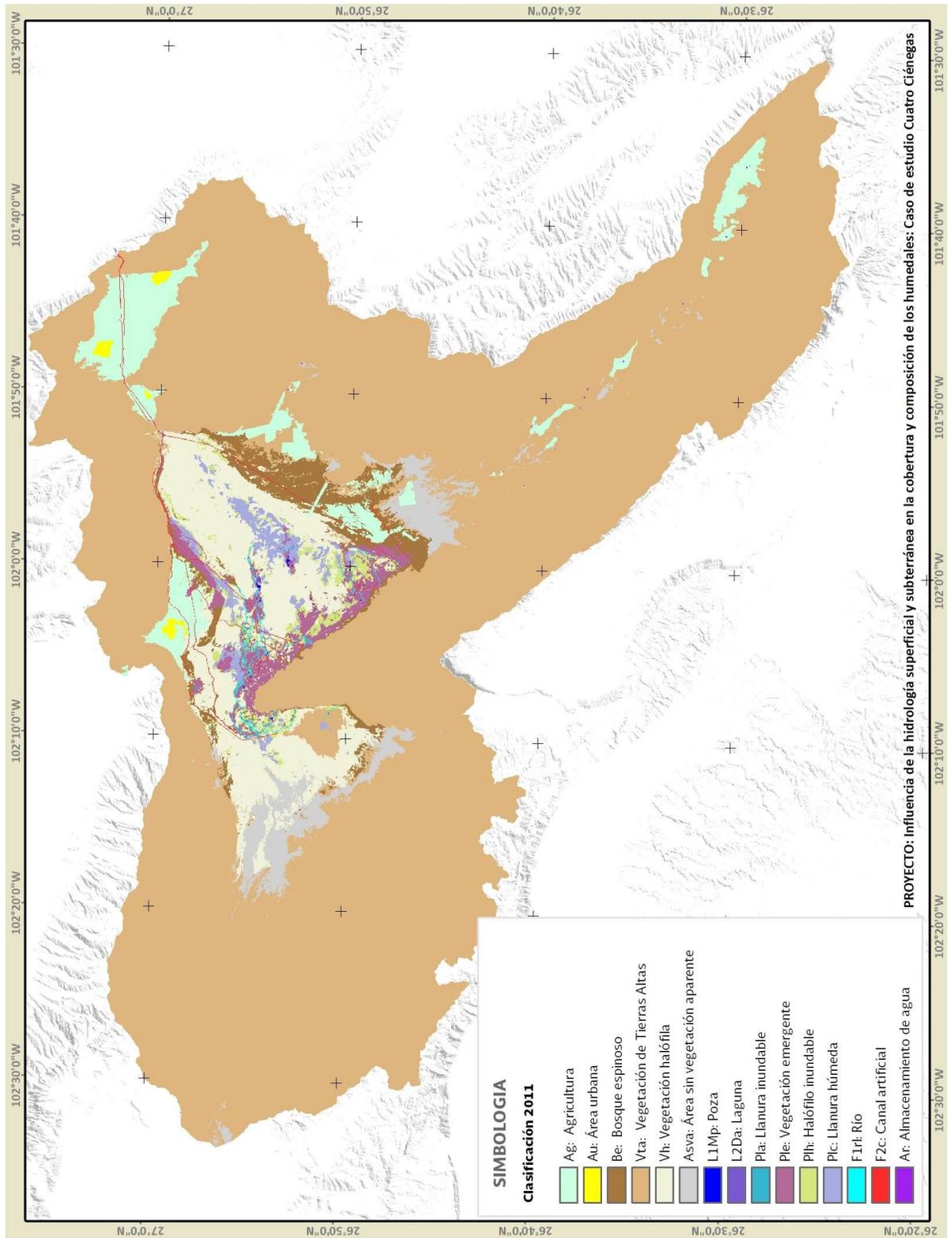
Anexo 2. Clasificación digital para el año 1990



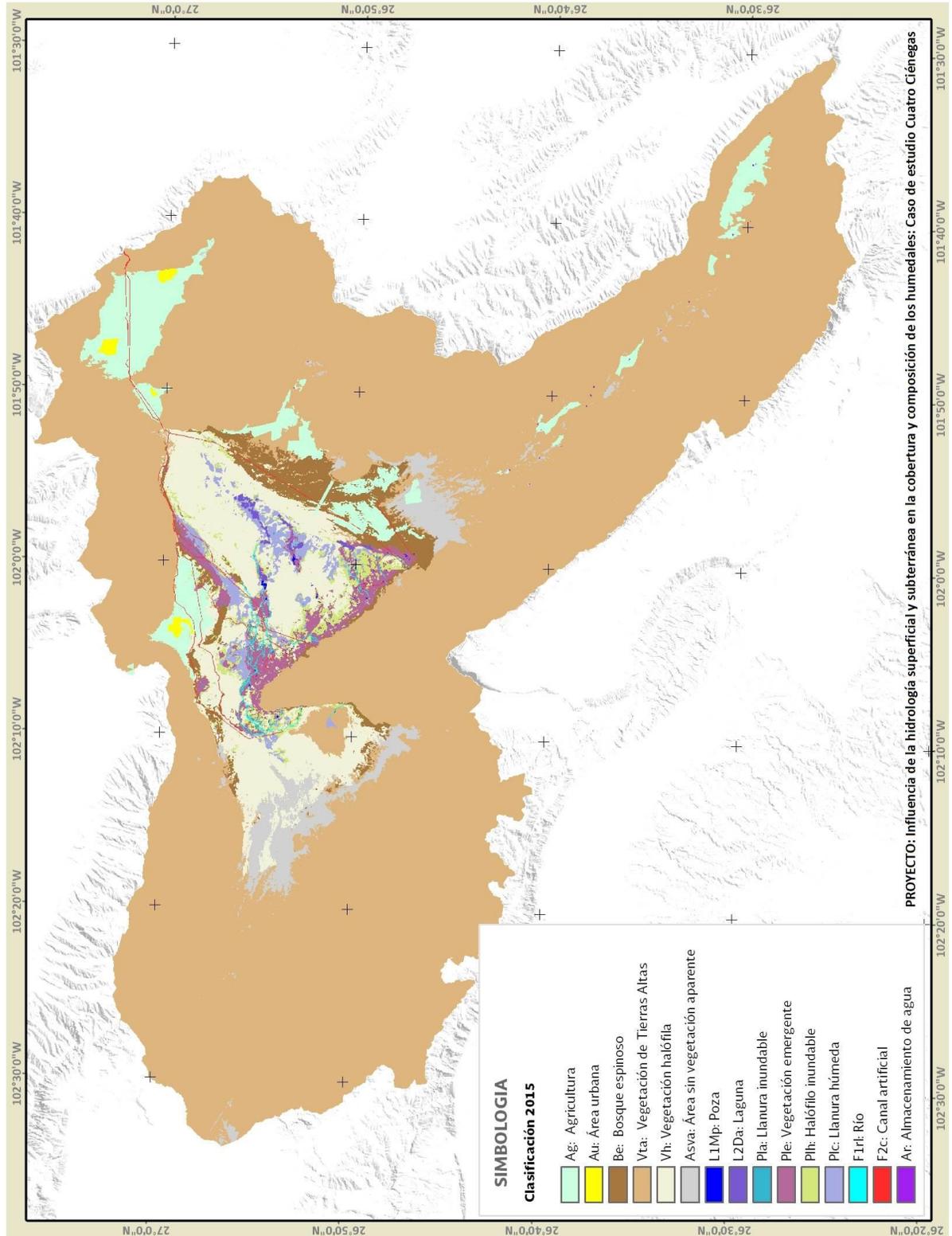
Anexo 3. Clasificación digital para el año 2000



Anexo 4. Clasificación digital para el año 2011



Anexo 5. Clasificación digital para el año 2015



Anexo 6. Matriz de cambios de la superficie en hectáreas para el periodo 1990 - 2000

| 2000 / 1990 | Ag | Ar | Asva | Au | Be | F1rl | F2c | L1Mp | L2Da | Pla | Plc | Ple | Plh | Vh | Vta | Total 2000 |
|-------------------|-----------------|-------------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|--------------|-------------|--------------|-------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|------------------|----------------|
| Ag | 14,959.4 | 1.0 | | 0.7 | 168.9 | | | | | | 0.1 | 0.2 | 3.5 | | 6.3 | 15,140.1 |
| Ar | 9.2 | 11.4 | 0.1 | | | | | | | | | | | | 9.3 | 30.0 |
| Asva | 88.1 | | 10,861.5 | | | | | | | | | | 0.1 | 0.1 | 120.0 | 11,069.7 |
| Au | 39.2 | | | 513.5 | | | | | | | | | | | | 552.7 |
| Be | 33.8 | | | | 9,768.3 | | | 6.8 | 4.0 | 1.9 | 13.1 | 183.0 | 8.3 | 84.2 | 24.1 | 10,127.6 |
| F1rl | | | | | | 586.2 | | | 12.9 | | | 3.8 | 0.1 | 0.1 | | 603.0 |
| F2c | | | | | 1.3 | 0.4 | 848.7 | | | | 2.0 | 21.3 | 9.5 | | | 883.2 |
| L1Mp | 1.1 | | | | 0.9 | 0.2 | | 58.7 | 1.9 | | 2.3 | 10.5 | 1.7 | 0.7 | 0.1 | 78.0 |
| L2Da | | | | | | | | | 31.1 | | | 0.4 | 0.2 | | | 31.7 |
| Pla | | | | | 1.9 | | | | 5.9 | 7.7 | | 0.4 | 0.9 | | | 16.7 |
| Plc | | | | | 8.7 | | | 3.4 | 60.3 | 16.8 | 4,173.5 | 72.7 | 82.5 | 0.7 | 8.9 | 4,427.6 |
| Ple | 15.0 | | | | 300.2 | 1.9 | | 23.7 | 109.5 | 22.7 | 210.0 | 4,568.9 | 176.2 | 19.2 | 1.9 | 5,449.1 |
| Plh | 26.7 | | | | 43.0 | | | 5.0 | 4.1 | 1.1 | 1,080.4 | 374.0 | 4,571.3 | 105.5 | 49.3 | 6,260.4 |
| Vh | 37.2 | | 0.8 | | 178.7 | 0.1 | | 0.5 | 2.3 | 0.2 | 509.3 | 47.6 | 271.4 | 22,859.4 | 65.0 | 23,972.3 |
| Vta | 156.6 | | 1.1 | | 3.4 | | | 0.3 | 10.9 | | 1.3 | 4.6 | 0.7 | 0.5 | 288,928.5 | 289,107.8 |
| Total 1990 | 15,366.2 | 12.4 | 10,863.5 | 514.3 | 10,475.4 | 588.7 | 848.7 | 98.3 | 242.9 | 50.3 | 5,992.6 | 5,287.8 | 5,125.3 | 23,070.4 | 289,213.3 | 367,750 |

L1Mp: Poza, L2Da: Laguna, Pla: Llanura inundable, Ple: Vegetación Emergente, Plh: Halófilo inundable, Plc: Llanura húmeda, F1rl: Río, F2c: Canal artificial, Ar: Almacenamiento de agua.

*Valores de superficie en hectáreas. Celdas sombreadas indican permanencias. Columnas 1990, renglones 2000.

Anexo 7. Matriz de cambios de la superficie en hectáreas para el periodo 2000 - 2011

| 2011 / 2000 | Ag | Ar | Asva | Au | Be | F1rl | F2c | L1Mp | L2Da | Pla | Plc | Ple | Plh | Vh | Vta | Total 2011 |
|-------------------|-----------------|-------------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|------------------|----------------|
| Ag | 13,805.6 | 4.2 | 729.4 | | 113.7 | | 1.6 | 1.1 | | | | 1.8 | 202.1 | 31.0 | 474.6 | 15,365.0 |
| Ar | 1.5 | 19.4 | 1.3 | | | | | | | | | | | | 4.3 | 26.6 |
| Asva | 85.4 | 0.1 | 10,165.0 | | 0.4 | | | | | | | | 0.1 | 41.6 | 6.3 | 10,298.8 |
| Au | 77.2 | | | 552.2 | | | | | | | | | | | 25.4 | 654.8 |
| Be | 298.2 | | 0.6 | | 8,557.7 | 1.1 | 21.2 | 3.2 | | 0.5 | 0.8 | 158.3 | 29.3 | 8.5 | 12.9 | 9,092.3 |
| F1rl | | | | | | 582.3 | | 1.4 | | 0.3 | | 9.9 | | 0.3 | | 594.1 |
| F2c | 0.1 | | 0.8 | | 5.2 | 1.5 | 832.5 | 0.7 | | | 0.2 | 53.8 | 5.0 | 1.2 | 11.1 | 912.1 |
| L1Mp | | | | | 0.5 | 1.4 | 0.1 | 51.1 | | | 0.3 | 15.1 | 1.3 | 0.2 | | 69.9 |
| L2Da | | | | | | | | | 23.2 | | | 0.1 | | | | 23.3 |
| Pla | | | | | 0.2 | | | | | 9.1 | 0.9 | 14.1 | 1.1 | | | 25.4 |
| Plc | | | | | 0.4 | 1.0 | | 4.7 | 8.3 | 2.2 | 3,652.3 | 22.9 | 192.0 | 15.3 | 0.4 | 3,899.3 |
| Ple | 1.2 | | 4.2 | | 384.8 | 1.3 | 0.9 | 13.3 | 0.2 | 2.9 | 60.7 | 4,576.9 | 851.9 | 13.7 | 67.5 | 5,979.3 |
| Plh | 9.5 | | 0.1 | | 47.3 | 1.8 | 4.1 | 1.6 | | 1.6 | 453.2 | 554.7 | 2,814.4 | 417.4 | 17.1 | 4,322.8 |
| Vh | 396.6 | | 29.0 | | 279.8 | 12.6 | 19.8 | 0.9 | | 0.3 | 259.2 | 40.5 | 2,145.0 | 23,259.4 | 34.9 | 26,478.0 |
| Vta | 464.9 | 6.2 | 139.4 | 0.5 | 737.8 | | 3.0 | | | | | 1.2 | 18.3 | 183.8 | 288,454.3 | 290,009.2 |
| Total 2000 | 15,140.1 | 30.0 | 11,069.7 | 552.7 | 10,127.6 | 603.0 | 883.2 | 78.0 | 31.7 | 16.7 | 4,427.6 | 5,449.1 | 6,260.4 | 23,972.3 | 289,108.7 | 367,750 |

L1Mp: Poza, L2Da: Laguna, Pla: Llanura inundable, Ple: Vegetación Emergente, Plh: Halófilo inundable, Plc: Llanura húmeda, F1rl: Río, F2c: Canal artificial, Ar: Almacenamiento de agua.

*Valores de superficie en hectáreas. Celdas sombreadas indican permanencias. Columnas 2000, renglones 2011.

Anexo 8. Matriz de cambios de la superficie en hectáreas para el periodo 2011 - 2015

| 2011 / 2015 | Ag | Ar | Asva | Au | Be | F1rl | F2c | L1Mp | L2Da | Pla | Plc | Ple | Plh | Vh | Vta | Total 2015 |
|-------------------|-----------------|-------------|-----------------|--------------|----------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|------------------|----------------|
| Ag | 15,334.8 | | 19.5 | 0.2 | 197.2 | | 0.1 | | | | | 19.2 | 1.8 | 44.5 | 327.4 | 15,944.7 |
| Ar | | 26.6 | | | | | | | | | | | | | | 26.6 |
| Asva | 0.1 | | 10,274.9 | | | | | | | | | 0.1 | 1.0 | 8.1 | 74.6 | 10,358.7 |
| Au | 0.1 | | | 654.7 | | | | | | | | | | | | 654.8 |
| Be | 0.5 | | 0.4 | | 8,796.7 | | | | | | | 160.0 | 1.9 | 3.0 | 3.9 | 8,966.3 |
| F1rl | | | | | | 573.6 | 0.2 | | | | | | | 0.3 | | 574.0 |
| F2c | | | | | | | 908.8 | | | | | | | | | 908.8 |
| L1Mp | | | | | 1.2 | 3.0 | 0.8 | 64.1 | 0.1 | | 1.9 | 31.1 | 4.7 | 0.5 | | 107.2 |
| L2Da | | | | | 10.0 | 7.1 | | 2.3 | 23.2 | 15.4 | 353.1 | 74.7 | 10.1 | 7.7 | | 503.5 |
| Pla | | | | | 3.6 | 0.6 | | 0.4 | | 7.4 | 25.3 | 26.0 | 2.5 | 0.1 | | 65.9 |
| Plc | | | | | 0.9 | | | 0.7 | | | 3,119.8 | 166.1 | 474.3 | 304.7 | 7.9 | 4,074.4 |
| Ple | | | | | 68.2 | 9.4 | 2.3 | 2.4 | 2.6 | 73.7 | 4,834.8 | 305.4 | 45.0 | 0.6 | | 5,344.4 |
| Plh | 0.2 | | | | 12.1 | 0.5 | | 0.1 | | | 310.7 | 645.1 | 3,156.5 | 579.6 | 7.8 | 4,712.5 |
| Vh | 26.8 | | 0.5 | | 1.4 | | | | | | 14.9 | 15.8 | 355.2 | 25,469.4 | 1.0 | 25,884.8 |
| Vta | 2.5 | | 3.6 | | 1.1 | | | | | | | 6.6 | 9.5 | 15.3 | 289,585.9 | 289,624.4 |
| Total 2011 | 15,365.0 | 26.6 | 10,298.8 | 654.8 | 9,092.3 | 594.1 | 912.1 | 69.9 | 23.3 | 25.4 | 3,899.3 | 5,979.3 | 4,322.8 | 26,478.0 | 290,009.2 | 367,750 |

L1Mp: Poza, L2Da: Laguna, Pla: Llanura inundable, Ple: Vegetación Emergente, Plh: Halófilo inundable, Plc: Llanura húmeda, F1rl: Río, F2c: Canal artificial, Ar: Almacenamiento de agua.

*Valores de superficie en hectáreas. Celdas sombreadas indican permanencias. Columnas 2011, renglones 2015.

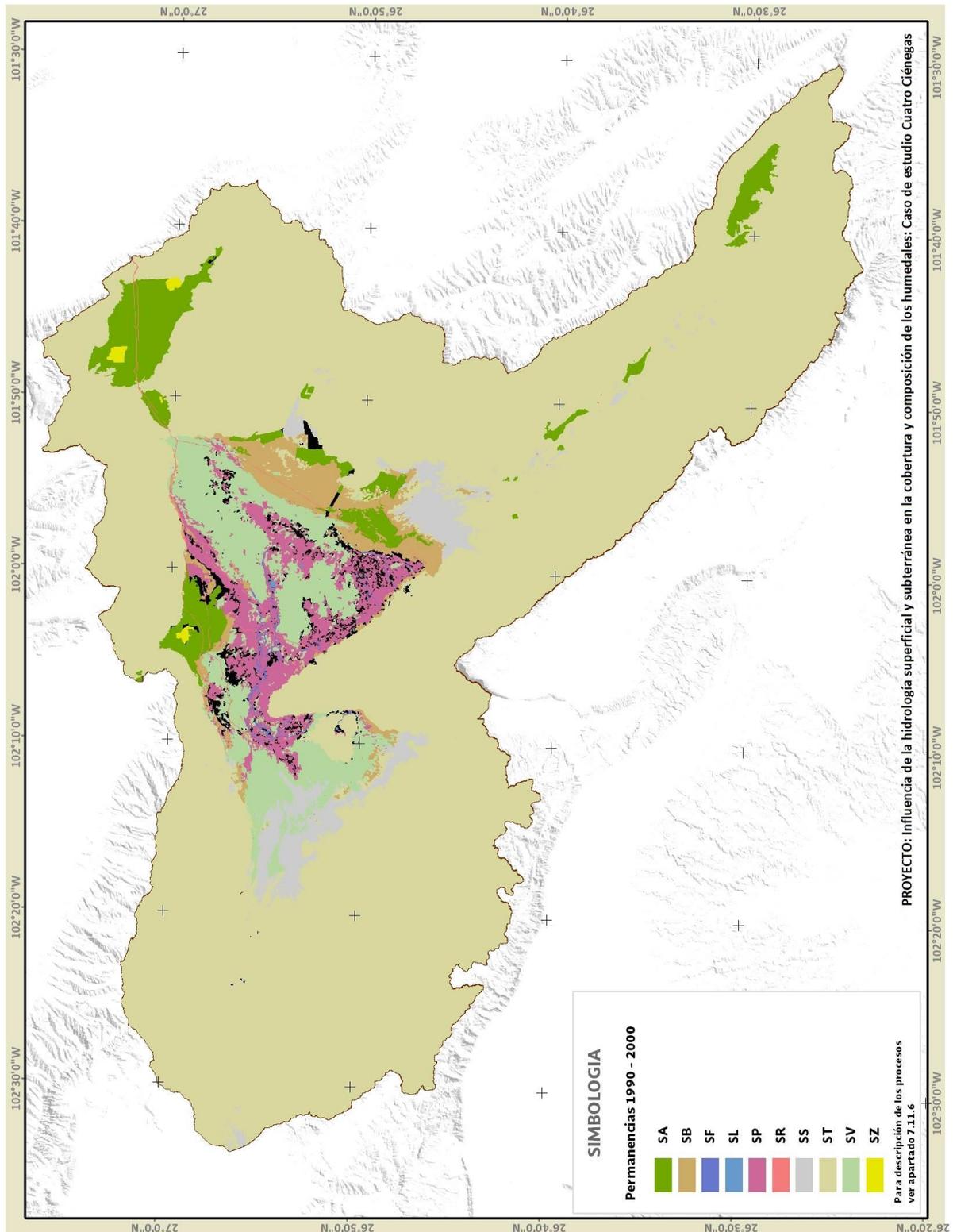
Anexo 9. Matriz de cambios de la superficie en hectáreas para el periodo 1990 - 2015

| 1990 / 2015 | Ag | Ar | Asva | Au | Be | F1rl | F2c | L1Mp | L2Da | Pla | Plc | Ple | Plh | Vh | Vta | Total 2015 |
|-------------------|-----------------|-------------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|--------------|-------------|--------------|-------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|------------------|----------------|
| Ag | 13,985.0 | 1.0 | 681.0 | 0.3 | 423.4 | | 2.1 | | | | | 3.3 | 176.0 | 64.4 | 608.1 | 15,944.7 |
| Ar | 7.7 | 8.9 | 1.4 | | | | | | | | | | | | | 26.6 |
| Asva | 105.4 | 0.1 | 10,101.3 | | 0.2 | | | | | | 0.3 | | 0.3 | 46.7 | 104.5 | 10,358.7 |
| Au | 115.8 | | | 513.5 | | | | | | | | | | | | 654.8 |
| Be | 267.4 | | 1.4 | | 8,348.5 | 1.1 | 21.5 | 6.4 | 2.7 | 0.5 | 10.4 | 166.4 | 26.6 | 90.8 | 22.6 | 8,966.3 |
| F1rl | | | | | 0.2 | 545.8 | | 0.9 | 12.7 | 1.2 | | 12.9 | 0.1 | 0.4 | | 574.0 |
| F2c | 0.1 | | 0.8 | | 8.8 | 1.8 | 797.8 | 0.7 | | | 2.7 | 68.6 | 15.2 | 1.2 | 11.1 | 908.8 |
| L1Mp | | | | | 2.7 | 3.6 | 0.2 | 47.4 | 1.8 | | 5.1 | 41.0 | 4.8 | 0.5 | 0.1 | 107.2 |
| L2Da | | | | | 15.2 | 6.9 | | 5.0 | 71.1 | 10.9 | 275.9 | 110.2 | 5.2 | 3.1 | | 503.5 |
| Pla | | | | | 2.7 | 0.6 | | 1.4 | 0.5 | 6.6 | 23.3 | 28.4 | 2.3 | | | 65.9 |
| Plc | 2.1 | | 1.7 | | 10.0 | 1.7 | | 1.0 | 39.3 | 10.4 | 3,446.3 | 73.6 | 393.9 | 89.6 | 4.8 | 4,074.4 |
| Ple | 1.2 | | 0.2 | | 396.0 | 12.4 | 0.1 | 28.4 | 101.6 | 17.9 | 305.9 | 4,006.2 | 393.1 | 40.1 | 41.3 | 5,344.4 |
| Plh | 26.2 | | 1.1 | | 93.6 | 2.4 | 4.9 | 6.2 | 8.0 | 2.6 | 1,078.1 | 734.6 | 2,296.3 | 390.3 | 68.2 | 4,712.5 |
| Vh | 414.4 | | 27.2 | | 466.8 | 12.3 | 19.4 | 0.5 | 2.0 | 0.3 | 843.6 | 36.8 | 1,805.4 | 22,158.8 | 97.4 | 25,884.8 |
| Vta | 441.1 | 2.4 | 47.4 | 0.5 | 707.3 | | 2.8 | 0.2 | 3.2 | | 1.0 | 5.8 | 6.1 | 184.6 | 288,221.5 | 289,623.8 |
| Total 1990 | 15,366.2 | 12.4 | 10,863.5 | 514.3 | 10,475.4 | 588.7 | 848.7 | 98.3 | 242.9 | 50.3 | 5,992.6 | 5,287.8 | 5,125.3 | 23,070.4 | 289,213.5 | 367,750 |

L1Mp: Poza, L2Da: Laguna, Pla: Llanura inundable, Ple: Vegetación Emergente, Plh: Halófilo inundable, Plc: Llanura húmeda, F1rl: Río, F2c: Canal artificial, Ar: Almacenamiento de agua.

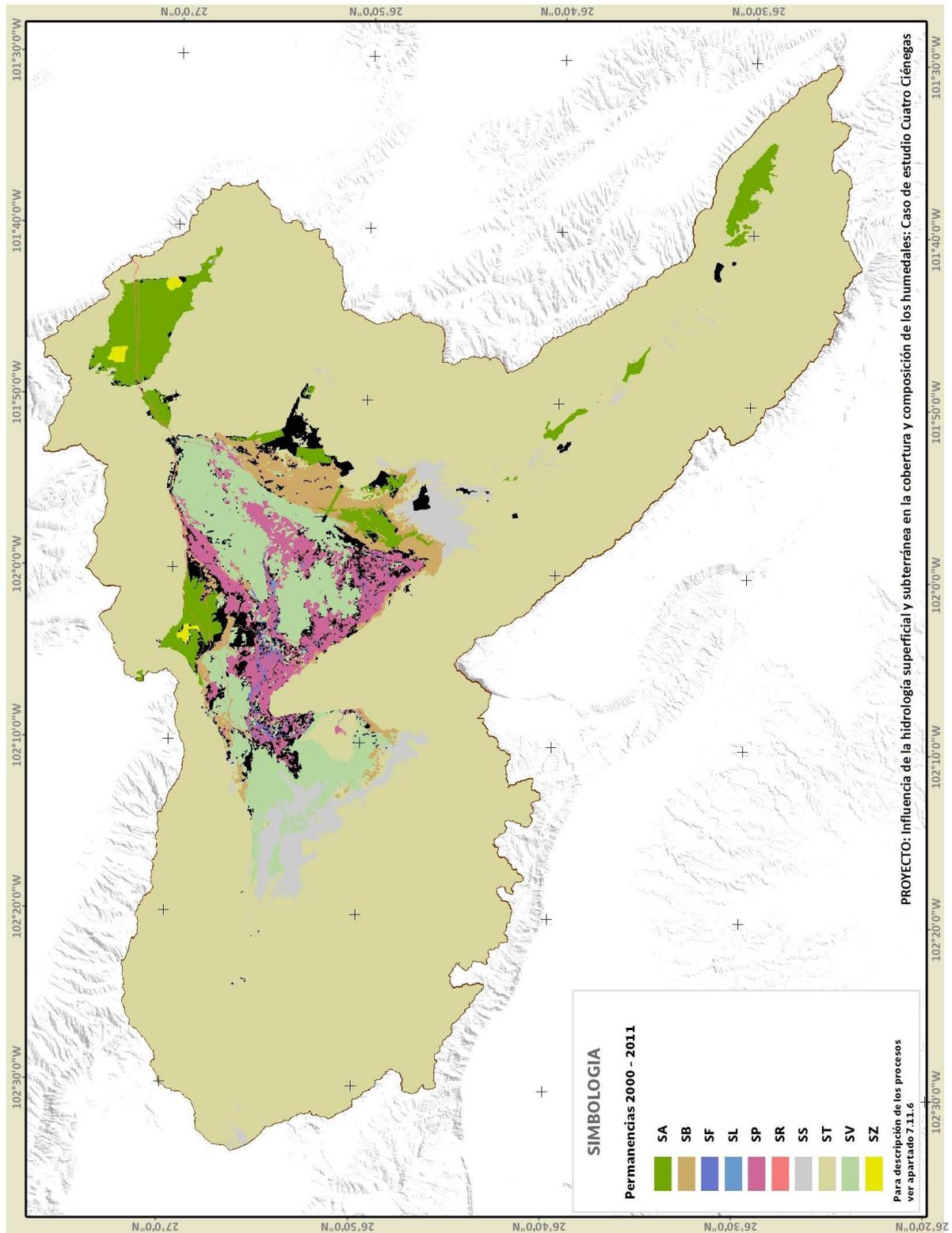
*Valores de superficie en hectáreas. Celdas sombreadas indican permanencias. Columnas 1990, renglones 2015.

Anexo 10. Mapa de permanencias para el periodo 1990 – 2000. (Áreas en color negro indican áreas con cambios)



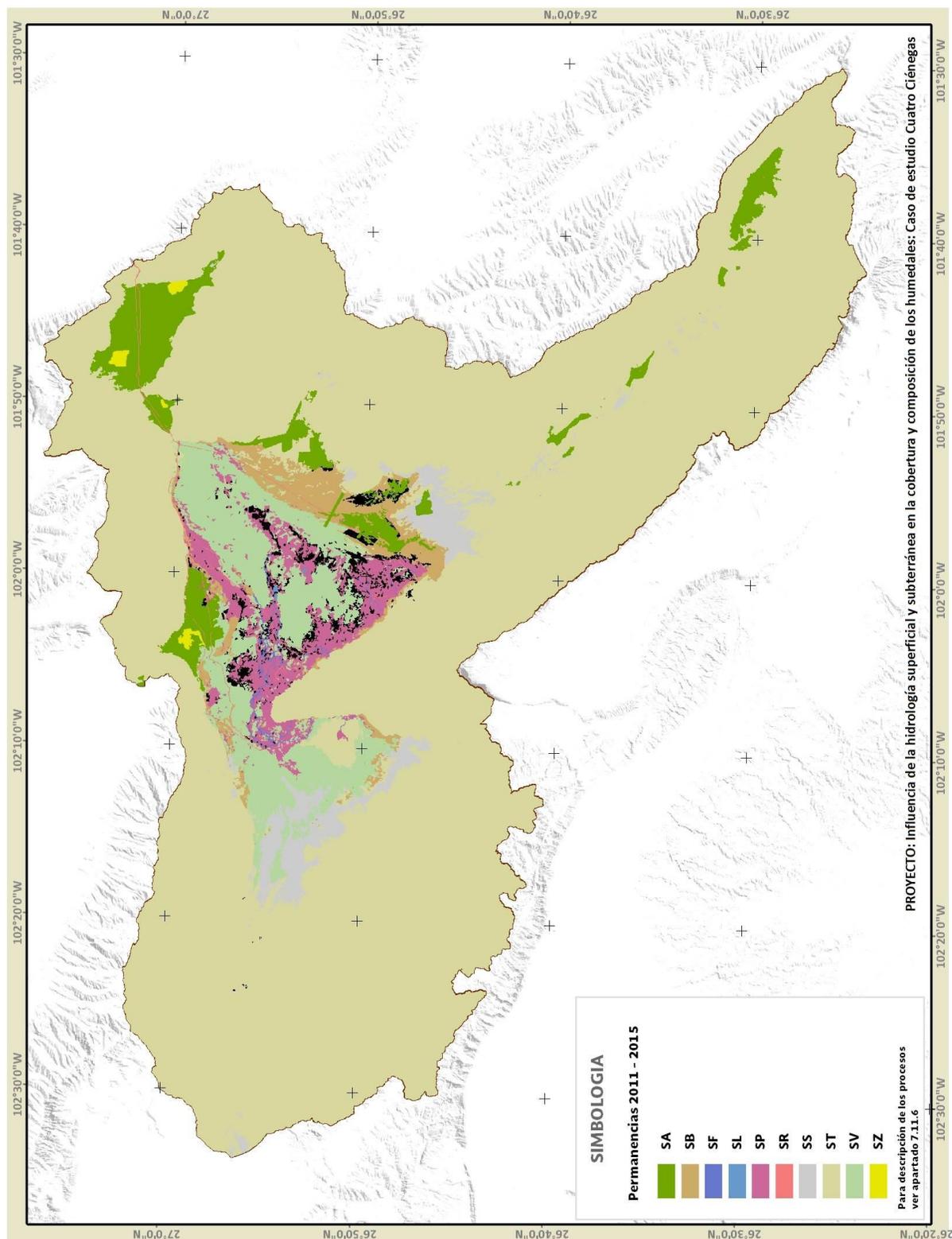
*Ver descripción en el apartado 7.11.7 Transformaciones y permanencias; pp. 112

Anexo 11. Mapa de permanencias para el periodo 2000 – 2011. (Áreas en color negro indican áreas con cambios)



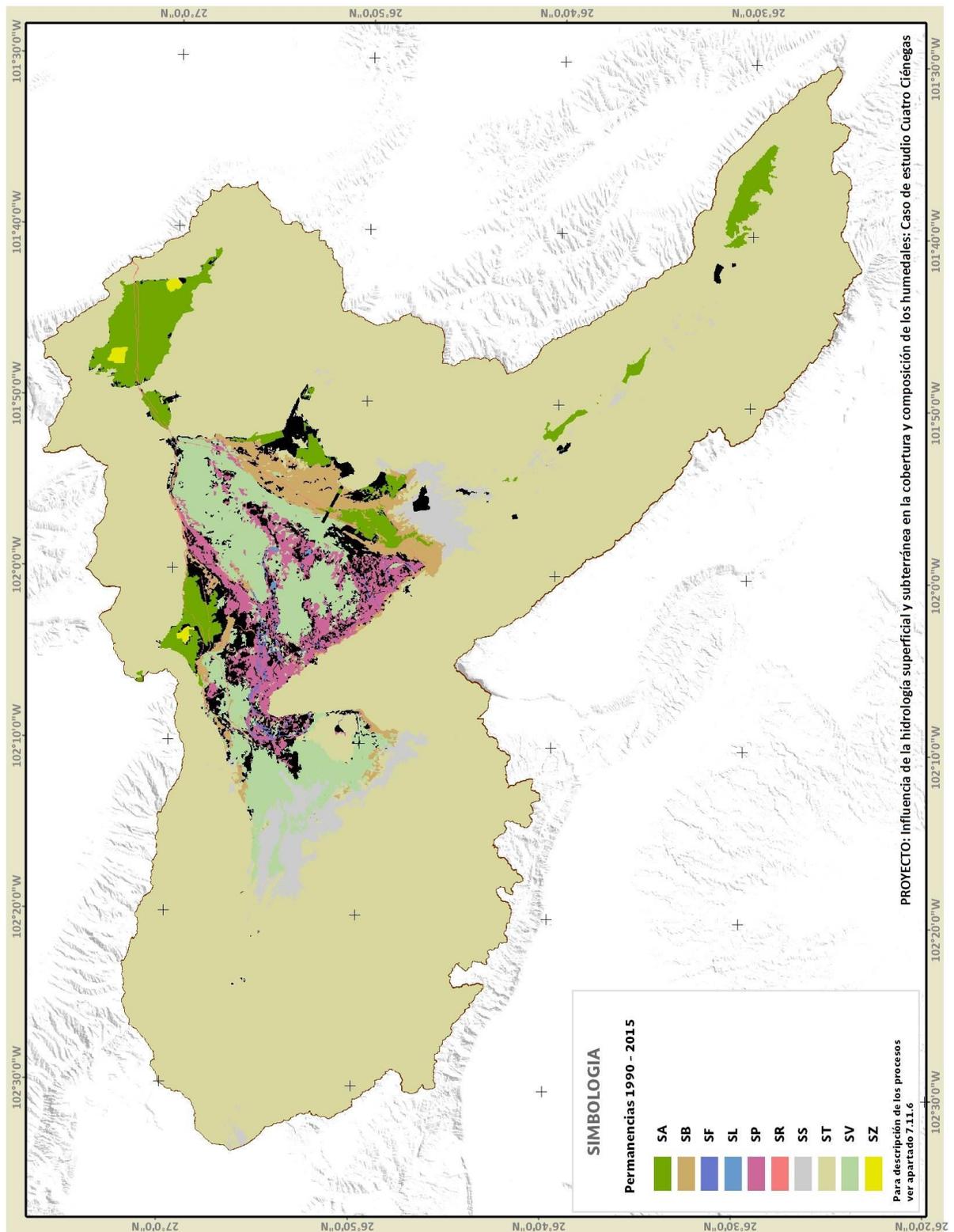
*Ver descripción en el apartado 7.11.7 Transformaciones y permanencias; pp. 112

Anexo 12. Mapa de permanencias para el periodo 2011 – 2015. (Áreas en color negro indican áreas con cambios)



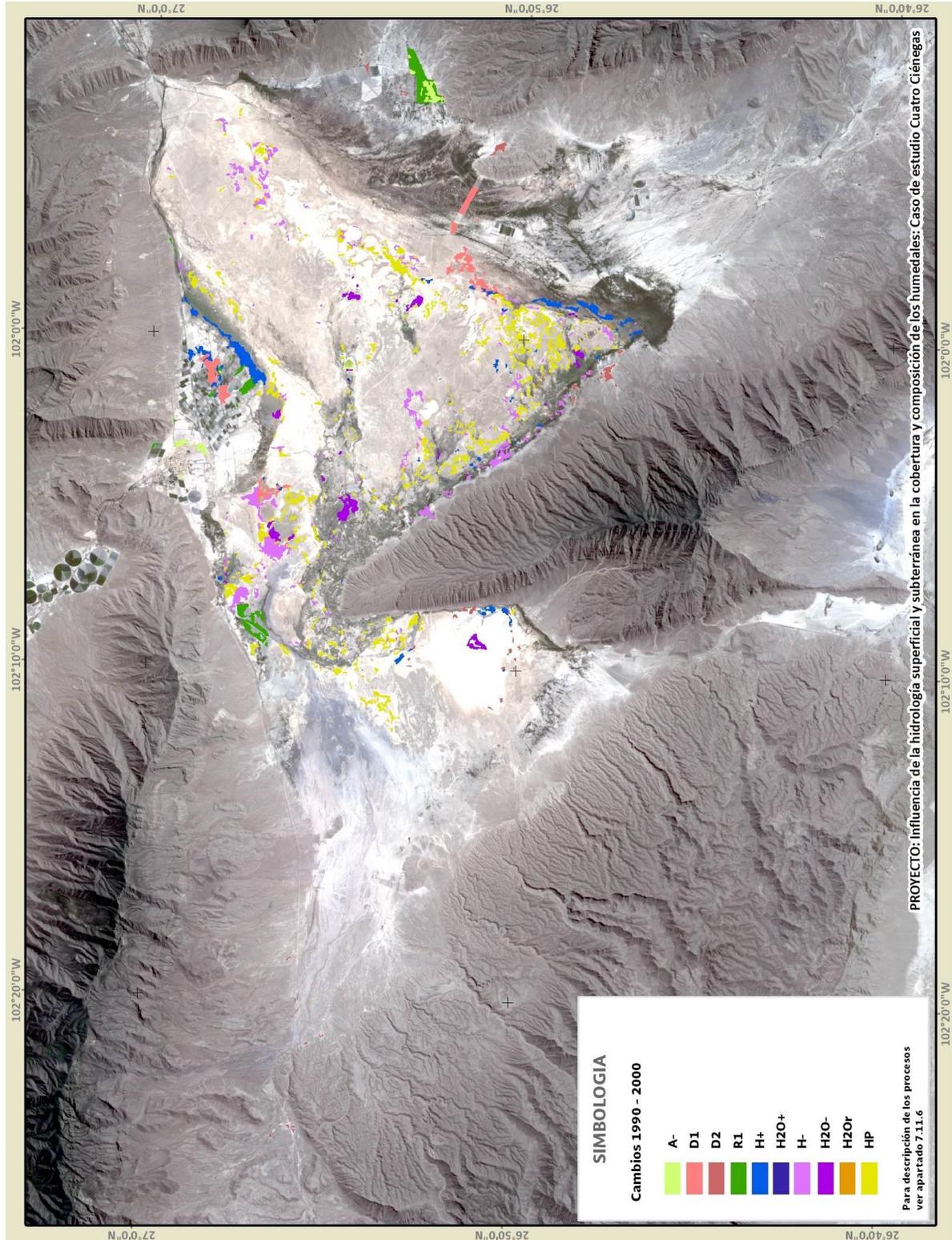
*Ver descripción en el apartado 7.11.7 Transformaciones y permanencias; pp. 112

Anexo 13. Mapa de permanencias para el periodo 1990 – 2015. (Áreas en color negro indican áreas con cambios)



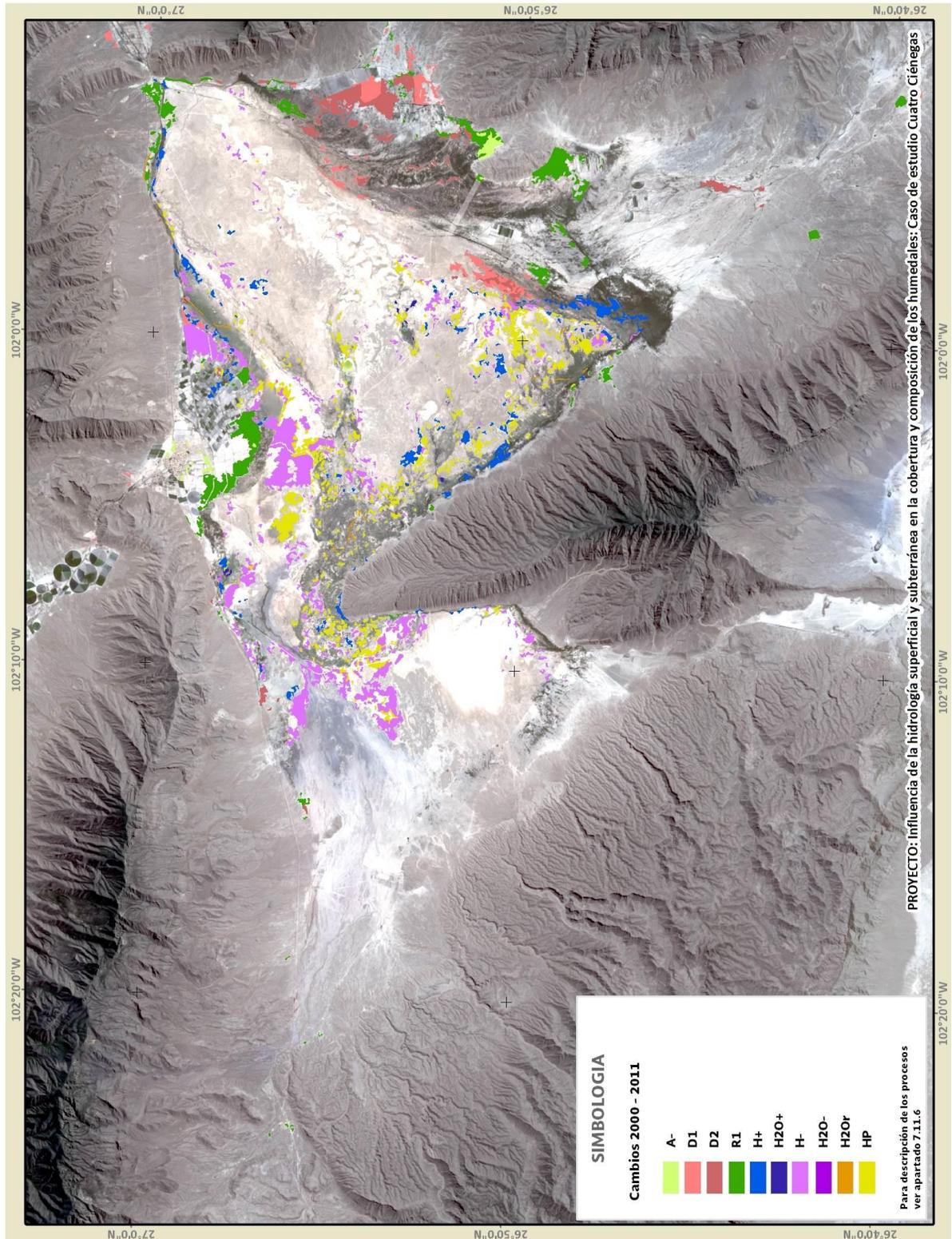
*Ver descripción en el apartado 7.11.7 Transformaciones y permanencias; pp. 112

Anexo 14. Mapa de procesos de cambio para el periodo 1990 – 2000



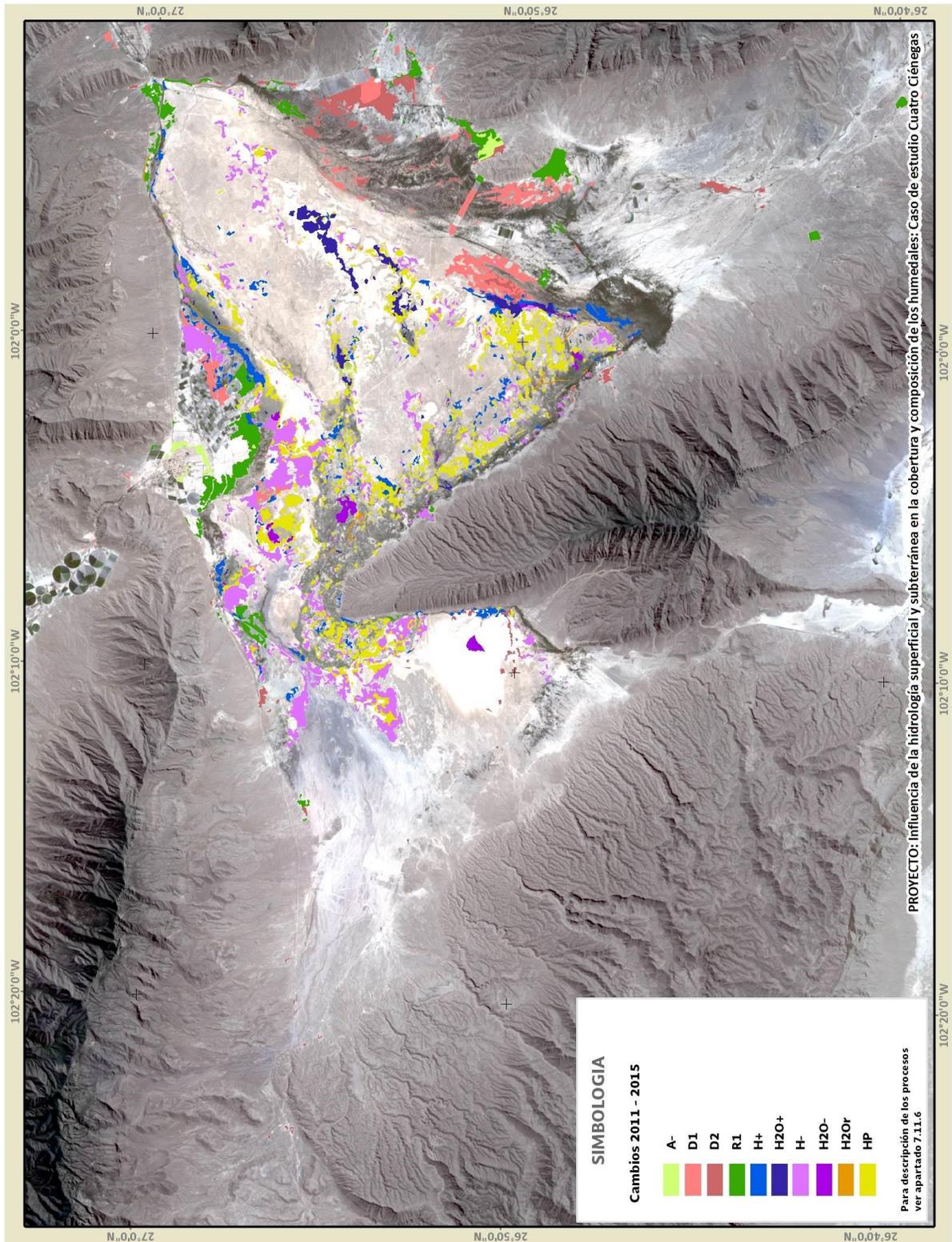
*Ver descripción en el apartado 7.11.7 Transformaciones y permanencias; pp. 112

Anexo 15. Mapa de procesos de cambio para el periodo 2000 – 2011



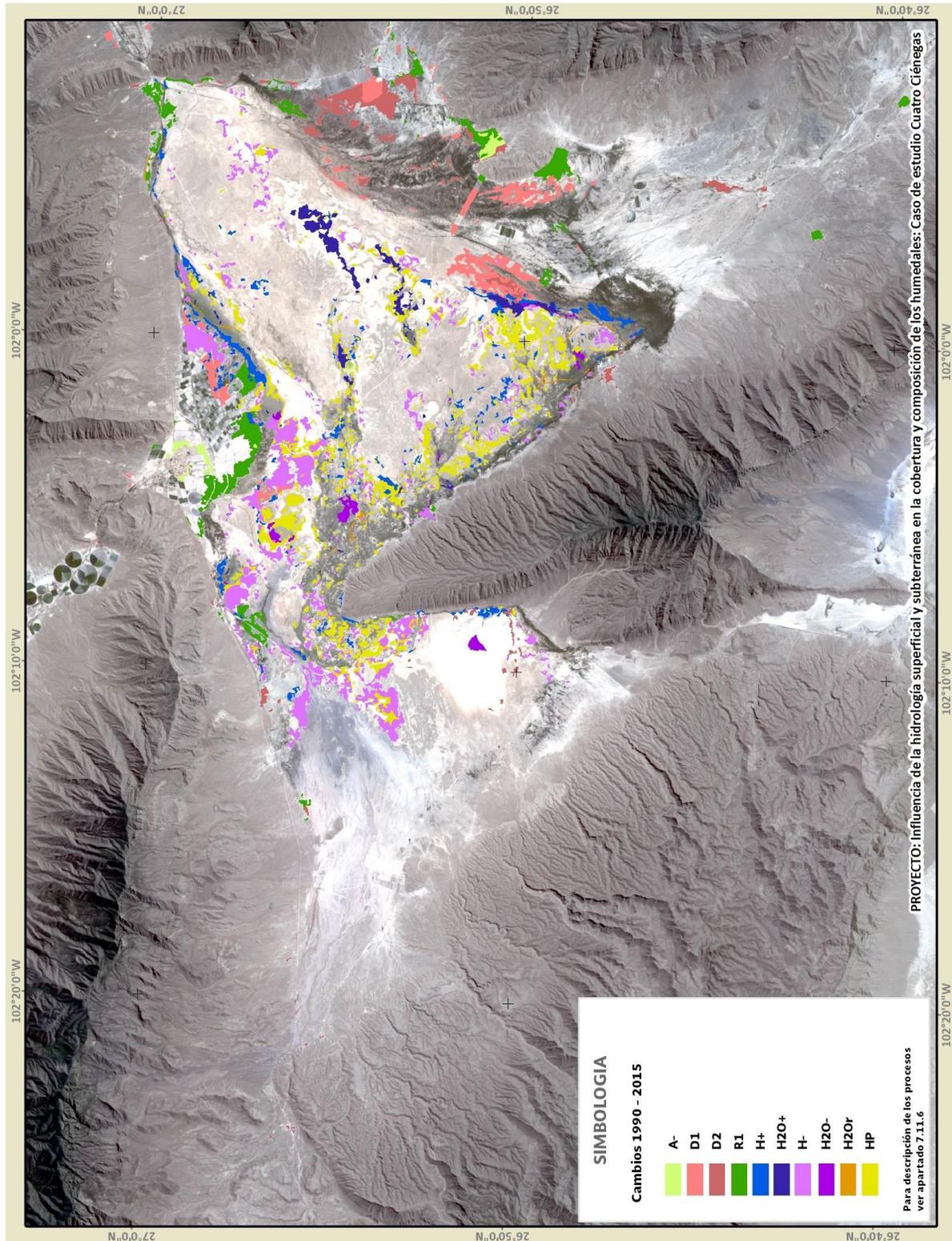
*Ver descripción en el apartado 7.11.7 *Transformaciones y permanencias*; pp. 112

Anexo 16. Mapa de procesos de cambio para el periodo 2011 – 2015



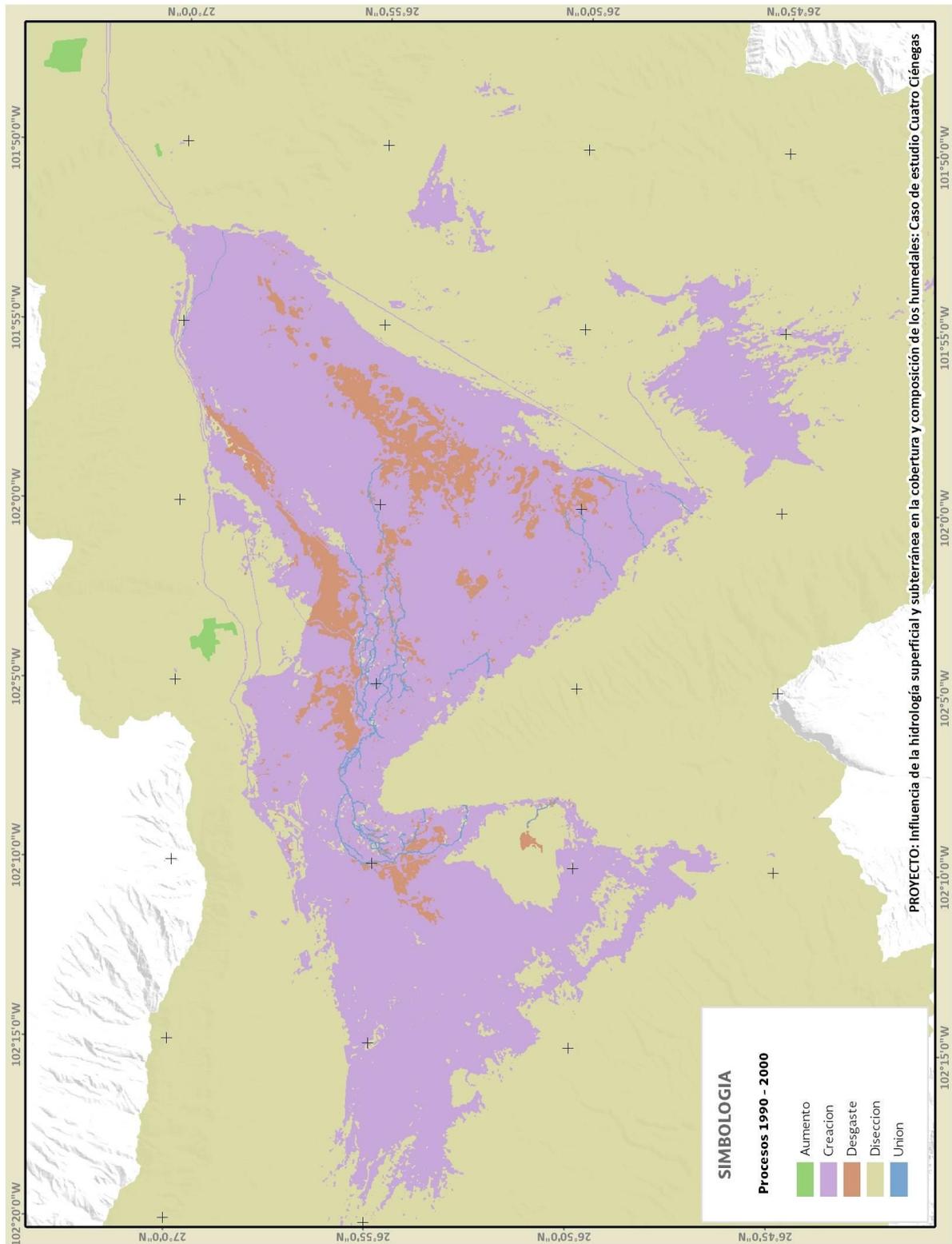
*Ver descripción en el apartado 7.11.7 Transformaciones y permanencias; pp. 112

Anexo 17. Mapa de procesos de cambio para el periodo 1990 – 2015

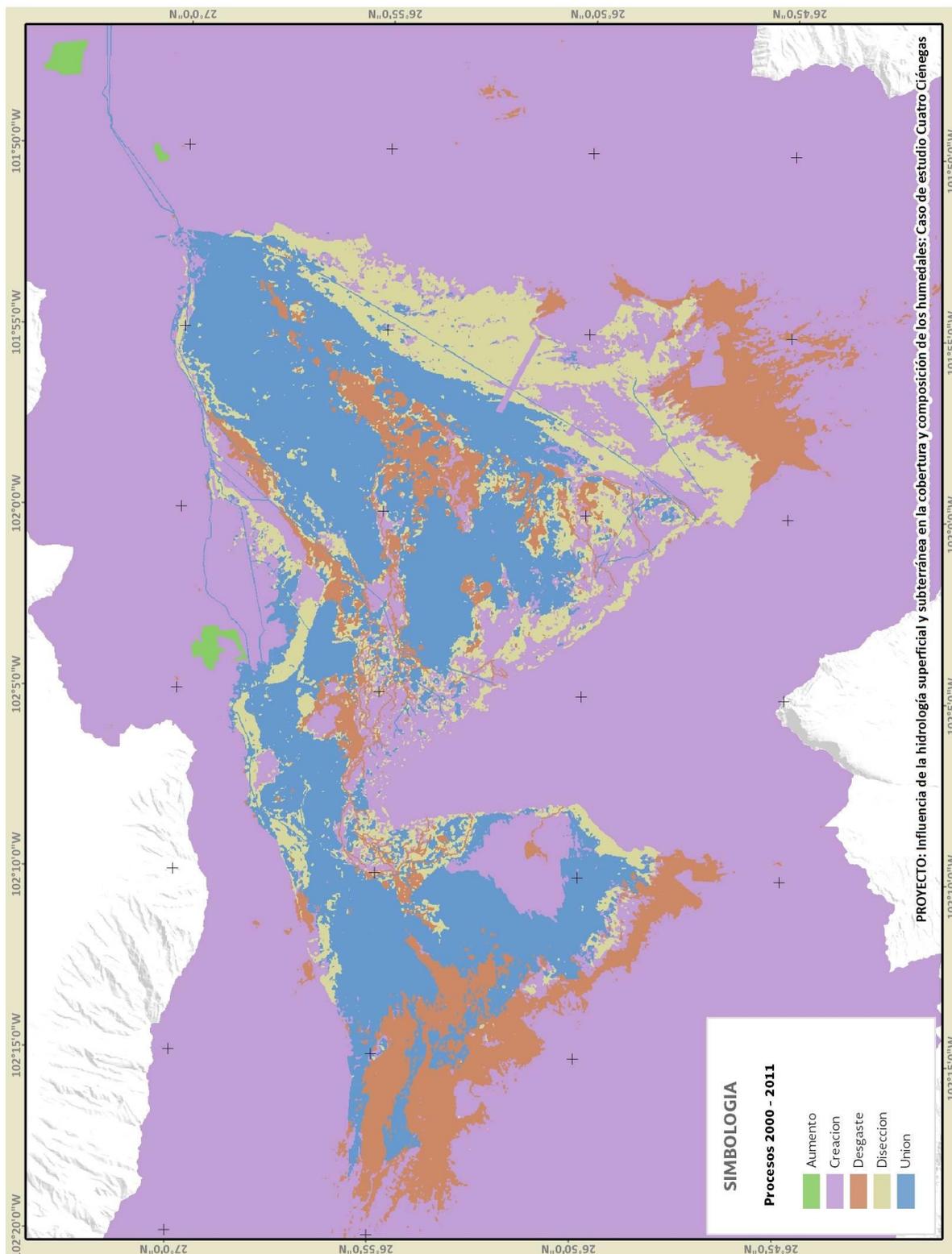


*Ver descripción en el apartado 7.11.7 Transformaciones y permanencias; pp. 112

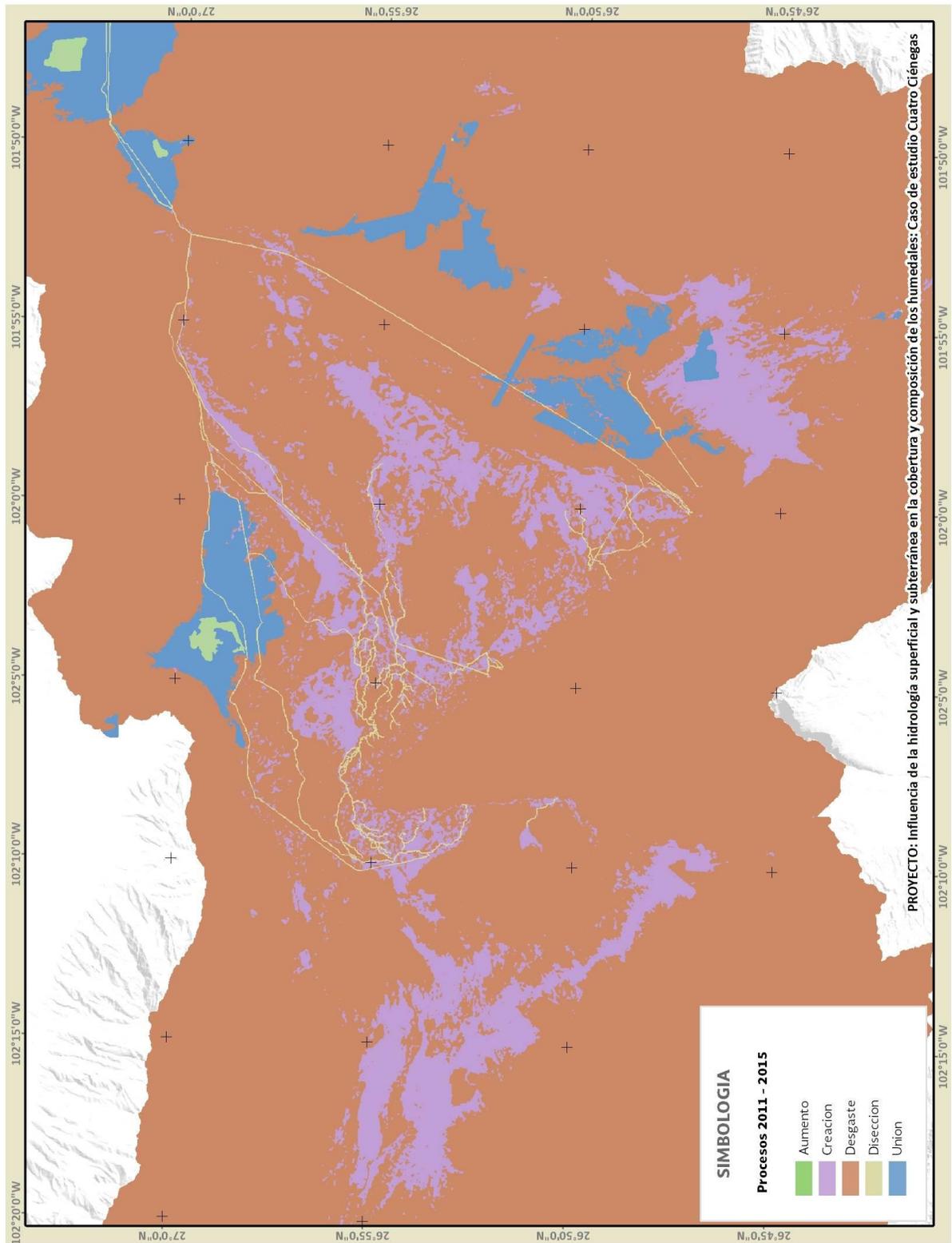
Anexo 18. Mapa de procesos de transformación del paisaje para el periodo 1990 – 2000



Anexo 19. Mapa de procesos de transformación del paisaje para el periodo 2000 – 2011



Anexo 20. Mapa de procesos de transformación del paisaje para el periodo 2011 - 2015



Anexo 21. Mapa de procesos de transformación del paisaje para el periodo 1990 - 2015

