

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA
CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS**



Maestría en Manejo de Ecosistemas de Zonas Áridas

**Análisis Retrospectivo de los Humedales del Delta del Río Colorado por medio de sensores
remotos y su relación con el flujo a través de la frontera México-E.U.A.**

TESIS

**Que para obtener el grado de
Maestro en Ciencias
Presenta**

María de Lourdes Mexicano Vargas



Ensenada, Baja California, México

Marzo 2004

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE CIENCIAS

Análisis Retrospectivo de los Humedales del Delta del Río Colorado por medio de Sensores Remotos y su relación con el flujo a través de la frontera México-E.U.A.

TESIS

Que para obtener el grado de
Maestro en Ciencias

Maestría en Manejo de Ecosistemas de Zonas Áridas

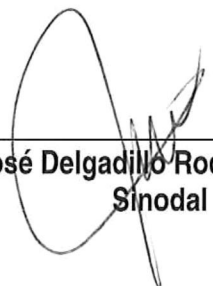
Presenta

María de Lourdes Mexicano Vargas

Aprobado por:



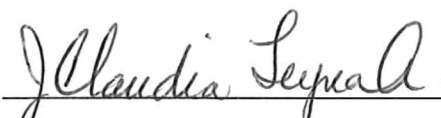
M.C. Alejandro Hinojosa Corona
Director de Tesis



Dr. José Delgadillo Rodríguez
Sinodal



M.C. María Concepción Arredondo García
Sinodal



M.C. Juana Claudia Leyva Aguilera
Sinodal

DEDICATORIA

Con todo mi amor a Mariana y Mark Christian, por darme el apoyo y las palabras de ánimo justas para hacerme desear terminar una meta más.

AGRADECIMIENTOS

Gracias al M.C. Alejandro Hinojosa Corona, mi director de tesis, por la oportunidad de colaborar en el proyecto del cual se derivó la presente tesis.

A mis sinodales Dr. José Delgadillo Rodrigues, M.C. Concepción Arredondo García y M.C. Claudia Leyva Aguilera por sus comentarios y sugerencias para la elaboración de esta tesis.

A la doctora Ileana Espejel por su apoyo económico para poner a mi disposición asesoría durante una semana del 14 al 18 de octubre del 2002 por parte del personal de la Universidad de California en Santa Bárbara.

A la doctora Leal Mertes por su apoyo económico y su asesoría durante la visita de una semana del 14 al 18 de octubre del 2002, al Department of Geography en la University of California, Santa Barbara.

A mis queridos compañeros del grupo de Manejo de Zona Costera de la Facultad de Ciencias Marinas, por permitirme elaborar con ellos lo que fue en gran parte mi mapa base.

A los doctores Ed Glenn y Pamela Nagler de la Universidad de Arizona por la fotografía aérea que nos proporcionaron para la identificación de las comunidades vegetales.

A la maestra Evarista Arellano por su valiosa asesoría en la interpretación estadística de los datos en la presente tesis.

Al oceanólogo Octavio Meillón por su ayuda logística durante el trabajo de campo y sus fotografías.

A Mari Carmen de Ciencias de la tierra por su apoyo moral durante mi estancia en CICESE.

Al USFWS por su apoyo económico parcial durante el primer año de la estancia en la maestría.

A UC-MEXUS-Conacyt proyecto, por su apoyo económico durante un año de estancia en la maestría.

A CICESE por el uso de sus instalaciones.

Resumen

Los humedales son hábitats de gran importancia por los procesos hidrológicos y ecológicos que en ellos ocurren, por la diversidad biológica que sustentan y en muchos casos son críticos para especies amenazadas. Desde inicios del siglo XX, las aguas del río Colorado han sido progresivamente sometidas a un control que por un lado ha permitido el florecimiento de la economía en una zona desértica pero por otro, ha abatido el suministro de agua a los humedales del delta, con su consecuente deterioro. Eventos de variabilidad climática como "el niño" han inducido precipitaciones y deshielos anormales en las partes altas de la cuenca, forzando la liberación controlada de agua de las presas, aumentando drásticamente el caudal que llega a las comunidades vegetales contiguas al río Colorado, situación que ocurría anualmente antes de la construcción de la primera gran presa en 1934. La descarga de agua salobre por drenes agrícolas como el canal Welton-Mohawk, ha dado como resultado la formación de la ciénega de Santa Clara, este efecto secundario ha tenido un impacto positivo sobre los ecosistemas en esa área.

Se realizó un análisis de 1972 a 2002 en la zona de influencia del río Colorado, en la parte mexicana del delta, con énfasis en eventos de inundación por medio de imágenes satelitales Landsat MSS, TM y ETM. Se realizó una búsqueda en el catálogo de Landsat, colectando 250 imágenes muestra, de las cuales se seleccionaron 157 con las que se integró un total de 63 escenas que dan una estimación de la dinámica del delta del río Colorado durante 30 años. Con estas escenas geo-referenciadas, se estimó la extensión de áreas inundadas, y su variación en el tiempo. Se llevó a cabo una regresión entre los promedios anuales de las áreas inundadas medidas contra los promedios anuales de flujo del río Colorado de EUA a México, obteniendo un coeficiente de correlación (r) de 0.912088. Las áreas de inundación están en su gran mayoría dentro de lo esperado con un límite de confianza del 95%, excepto en los eventos extremos como la inundación de 1984. La Laguna Salada solo se inunda cuando el flujo del río Colorado es importante y persistente como en los años ochenta.

La inspección de las imágenes muestra, nos asistió en la selección de aquellas que mostraran la máxima inundación (1984), un período de sequía con bajo flujo (1990) y una perspectiva reciente 2002. Con las imágenes de primavera de los tres escenarios, a resolución espacial de 30m., se calcularon áreas inundadas por medio de la segmentación del histograma aplicando diferentes umbrales ajustados por inspección visual en compuestos de falso color. Se obtuvo un máximo de 2499.16 Km² en 1984, para 1990 y 2002 se estimaron superficies de 125.66 Km² y 91.15 Km² respectivamente.

Asimismo, se calculó índices de vegetación normalizada NDVI para los tres escenarios, sobre la zona susceptible a inundación agrupando el índice en 7 intervalos. Las estimaciones de cobertura vegetal (NDVI) disminuyeron como cantidad total de 1990 a 2002, sin embargo la proporción entre los porcentajes en los intervalos no se mantuvo constante, el intervalo de 0.1 a 0.2 en el cuál se observaron extensas comunidades de pino salado se estimó con un aumento en área en esos mismos años.

Finalmente se integró jerárquicamente la distribución espacial de los 7 intervalos de NDVI sobre las áreas inundadas para obtener una perspectiva combinada que también incorpora las zonas que obtuvieron NDVI < 0, que se interpreta como suelos con escasa o nula vegetación.

Se puede considerar que el problema de la escasez de agua en el delta del río Colorado tiene influencia directa sobre las comunidades vegetales como humedales y zonas riparias, con un flujo por debajo de lo que fue la condición original antes de las presas. Es prioritario evitar que disminuya aún más el aporte de agua a las zonas de humedal del delta del río Colorado.

Abstract

Wetlands are very important habitats because of the hydrological and ecological processes that take place in them, for the biological diversity they sustain and in many cases they are critical for threatened species. Since the beginning of the 20th Century the Colorado River has been progressively tamed in a way that allowed the economy to flourish in a desert but on the other side had a detrimental effect on the delta wetlands by drastically reducing the flow. Anomalous climatic events like "the niño" induced abnormal snowmelts and higher precipitations in the high basin creating the need to allow excess water in the dams to run off thus raising the amount of water delivered to the delta wetlands. The discharge of agricultural drainage of the Welton-Mohawk irrigation district, with higher salinity water to the Gulf of California had a positive effect, creating the Santa Clara marsh in the mid seventies.

An analysis using satellite Landsat images from 1972 through 2002 of the Mexican portion of Colorado river delta was performed, with emphasis on flood events; 250 image previews were collected, from which 157 were selected to integrate 63 scenes that provide a dynamic picture of the Colorado delta river over 30 years. A regression with the annual averages of inundated areas and annual water flow data from E.U. to Mexico was made with a correlation coefficient of 0.912088. The expected flooded areas are within the 95% limit confidence level, except for the abnormal events like the 1984. Laguna Salada only gets inundated when the water flow is well above the average like in the 84's years.

The analysis of the Landsat image previews catalogue assisted us in selecting the images that showed the maximum flooding (1984), a drought period with low flow (1990), and a recent perspective (2002). Spring Landsat TM images of those years, with 30m resolution, helped us estimate flooded areas using the histogram segmentation technique applied on band 5 of TM sensor with different visually adjusted thresholds over false color composites. We obtained a maximum flooded area of 2499.16 Km² on 1984, 125.66 Km² for 1990 and 91.15 Km² for 2002.

Also, we calculated the normalized difference vegetation index (NDVI) for the three scenarios, on the area susceptible to flooding in the lower delta, grouping the index on 7 ranges. The extent of zones with NDVI values greater than zero dropped from 1990 to 2002 and the relative distribution of percentages between NDVI range groups changed, with an augmented proportion in the 0.1-0.2 range, where we observed extensive salt cedar (*Tamarix ramossissima*).

Finally, we made overlaid the spatial distribution of NDVI range groups over the estimated flooded areas to obtain a combined perspective that includes the land with NDVI<0, interpreted as land with scarce or null vegetation cover.

We conclude that the drastic flow reduction of the Colorado River to the lower delta has a direct effect on the vegetation communities and riparian areas, compared to original condition before the dams construction. It's necessary to look for alternatives sources of water to maintain the wetland ecosystems on the delta.

INDICE	
INDICE DE TABLAS.....	I
INDICE DE FIGURAS.....	II
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. ANTECEDENTES.....	3
II.1 Las Variaciones en el flujo del Río Colorado a través de la frontera México-E.U.A.....	3
II.2 Los humedales del delta del río Colorado.....	8
II.2.1 La zona de estudio	8
II.2.3 La conservación de los humedales del Delta del Río Colorado.	11
II.3. Uso de Sensores Remotos.....	14
II.3.1 Terminología y conceptos generales.....	14
II.3.2 Reflectancia espectral de la vegetación	15
II.3.3 Índices de vegetación.....	17
II.3.4 Programa Landsat.....	18
II.3.5 Imágenes Landsat que cubren el delta del Colorado.....	21
II.3.6 Técnicas de Procesamiento de Imágenes de satélite.....	23
III. OBJETIVOS.....	24
IV. Metodología.....	25
IV.1 Geo-Referencia.....	26
IV.2 Búsqueda de imágenes del Delta del Colorado en los archivos Landsat.....	29
IV.3 Delimitación de zonas inundadas.....	31
IV.3.1 Correlación de áreas inundadas y flujo del río Colorado de EUA a México de 1972 a 1998...	33
IV.4 Mapa de los humedales durante condiciones de inundación extensiva y sequía extrem.....	33
IV.5 Estimaciones de áreas inundadas en condiciones de inundación extrema (1984), sequía (1990), y escenario actual (2002).....	35
IV.6 Estimaciones cuantitativas de cobertura de vegetación por medio de Índices de Vegetación (NDVI).....	37
IV.7 Trabajo de corroboración de campo.....	38
V. RESULTADOS.....	40
V.1 Imágenes Procesadas.....	40
V.2 Eventos de inundación 1972-2002.....	42
V.2.1 Estadística de eventos de Inundación.....	46
V.2.2 Estimación de área inundada en años de inundación extensiva (1984), sequía prolongada (1990), y escenario actual (2002).....	47
V.3 Estimaciones de cobertura vegetal por medio de NDVI.....	48
V.4 Estimaciones de NDVI combinado con cantidad de área de no-vegetación é inundadas.....	58
VI. DISCUSION.....	61
VI.1 Variaciones de áreas de inundación.....	61
VI.2. Estimación de área inundada en años de inundación extensiva (1984), sequía prolongada (1990), y escenario actual (2002).....	62
VI.3 Estimación de cobertura vegetal por medio de NDVI y su categorización en intervalos.....	62
VI.4 Interés en Conservación.....	64
VII. CONCLUSIONES.....	68
VIII. RECOMENDACIONES.....	69
IX. BIBLIOGRAFIA.....	70

INDICE DE TABLAS

Tabla I. Cuotas de agua del Río Colorado. Tomado de CILA-CONAGUA, 1999.....	4
Tabla II. Período de Cobertura de satélites Landsat.....	19
Tabla III: Bandas espectrales; su resolución y su aplicación, de los sensores en los satélites Landsat.....	20
Tabla IV. Lista de imágenes Landsat TM para escenario de Inundación en el delta del río Colorado.....	34

Tabla V. Lista de imágenes Landsat TM para escenario de Sequía en el delta del río Colorado.....	34
Tabla VI. Orden de pedido de Landsat para escenario 2002.....	35
Tabla VII. Clasificación de cubierta vegetal y su correspondiente intervalo de NDVI.....	37
Tabla VIII. Porcentajes de Inundación con tres umbrales para definición de agua.....	48
Tabla IX. Totales de cobertura vegetal en Km2 para los intervalos de NDVI durante 1984, 1990 y 2002.....	50
Tabla. X Reporte de áreas en KM2 por tipo de cobertura clasificada en 7 intervalos.....	59

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Presas en el río Colorado.....	5
Figura 2. Flujo del río Colorado de E.U. a México en m ³ /seg de 1904 a 1998.....	7
Figura 3. Ubicación de la zona de estudio sobre un mosaico de imágenes Landsat TM.....	10
Figura 4. Curvas de reflectancia típica de materiales comunes en la superficie terrestre.....	16
Figura 5. Coordenadas en pase/renglón de las imágenes Landsat.....	22
Figura 6. Secuencia metodológica.....	27
Figura 7. Claves de mapas topográficos, escala 1:50,000 del INEGI.....	28
Figura 8. Serie de tiempo de 1970 a 1998 del flujo del río Colorado de EUA a México en m ³ /seg.....	30
Figura 9. Área de estudio, indicada en azul sobre la imagen de mayo de 1990.....	32
Figura 10. Fotografía de comunidades vegetales observadas en las visitas al campo en diferentes localidades.....	39
Figura 11. Ejemplo de cada uno de los tipos de escena donde se delimitaron las zonas de inundación.....	41
Figura 12. Mosaico de imágenes MSS de 1973-07-15y16.....	43
Figura 13. Mosaico de imágenes TM de abril de 1985-03.....	44
Figura 14. Áreas inundadas de 1972 a 2002.....	45
Figura 15. Gráfica de dos ejes para mostrar la relación entre la cantidad.....	46
Figura 16. Gráfica con los 245 datos de área durante 30 años.....	47
Figura 17. Porcentajes de áreas sin ninguna cobertura y áreas con cobertura.....	51
Figura 18. Porcentajes de intervalos de NDVI para los años con.....	52
Figura 19. Distribución de los intervalos de índices de vegetación NDVI.....	54
Figura 20. Distribución de intervalos de NDVI en la confluencia del río Colorado.....	55
Figura 21. Intervalos de NDVI de las comunidades vegetales en la Ciénega.....	56
Figura 22. Intervalos de NDVI de las comunidades vegetales en.....	57
Figura 23. Porcentajes de cobertura en la zona de estudio agrupadas en clases NDVI ≥ 0	60
Anexo 1.....	72
Anexo 2.....	73

I. INTRODUCCIÓN

El Convenio de Ramsar¹ es el convenio internacional más antiguo del mundo en la esfera de la conservación. Las negociaciones empezaron en 1971 en la ciudad iraní que le ha dado el nombre, y el Convenio de Ramsar obliga hoy en día a sus 92 países miembros a designar y proteger humedales de importancia internacional y a fomentar su "utilización racional". En la actualidad, su ámbito de aplicación se extiende a cerca de 800 zonas.

Bajo el Convenio, los países que suscriben tienen la obligación de desarrollar políticas nacionales para la conservación del ambiente en sus políticas de uso de la tierra. Tales políticas implican concientizar a las comunidades sobre la importancia de los humedales y la necesidad de conservarlos, muy especialmente a aquellas que conviven con ellos (UICN, 1999).

El manejo de los humedales implica la necesidad de desarrollar su uso racional y sustentable, el cual ha sido definido como *"la utilización sostenible que otorga beneficios a la humanidad de una manera compatible con el mantenimiento de las propiedades naturales del ecosistema"*. Esta utilización sustentable de los humedales debe desarrollarse a través de un enfoque integrado que considere los distintos ecosistemas asociados. Para el caso de los humedales continentales, resulta esencial referirse a las cuencas hidrográficas como unidades ambientales. Asimismo éstas influyen fuertemente a las zonas costeras marinas donde desembocan.²

El artículo 1° del Convenio de Ramsar define una zona húmeda o humedal como cualquier extensión de marisma, pantano o turbera, o superficie cubierta de aguas, sean estas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de aguas marinas cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros. Generalmente se les identifica como áreas que se inundan temporalmente, donde la capa freática aflora en la superficie o en suelos de baja permeabilidad cubiertos por agua poco profunda. Todos los humedales comparten una propiedad primordial: *el agua juega un rol fundamental en el ecosistema, en la determinación de la estructura y las funciones ecológicas del humedal.*

^{1,2}. Convenio Ramsar. http://ramsar.org/wwd2001_index.htm

La protección y preservación de los recursos de agua dulce es una meta explícitamente considerada en la Agenda 21, reconocida por UNCED en Río de Janeiro en 1992. La carencia de agua dulce en zonas áridas puede darse hasta un punto para satisfacer la demanda de usos públicos, industriales ó agricultura, de tal forma que sea un uso sustentable del recurso (OECD, 1993).

Esta predominancia del agua determina que los humedales tengan características diferentes de los ecosistemas terrestres, una de ellas es que suelen presentar una gran variabilidad tanto en el tiempo como en el espacio. Esto tiene efectos muy importantes sobre la diversidad biológica que habita en los humedales que debe desarrollar adaptaciones para sobrevivir a estos cambios que pueden llegar a ser muy extremos, por ejemplo, ciclos hidrológicos de gran amplitud con períodos de gran sequía y períodos de gran inundación

Entre los procesos hidrológicos que se desarrollan en los humedales se encuentran la recarga de acuíferos, cuando el agua acumulada en el humedal desciende hasta las capas subterráneas. Las funciones ecológicas que desarrollan los humedales favorecen la mitigación de las inundaciones y de la erosión costera. Además, a través de la retención, transformación y/o remoción de sedimentos, nutrientes y contaminantes juegan un papel fundamental en los ciclos de la materia y en la calidad de las aguas.

Diversas actividades humanas requieren de los recursos naturales provistos por los humedales y dependen por lo tanto del mantenimiento de sus condiciones ecológicas. Dichas actividades incluyen la pesca, la agricultura, la actividad forestal, el manejo de vida silvestre, el pastoreo, el transporte, la recreación y el turismo. Uno de los aspectos fundamentales por los que en los últimos años se ha volcado mayor atención en la conservación de los humedales es su importancia para el abastecimiento de agua dulce con fines domésticos, agrícolas o industriales. Los humedales del delta se han establecido ó mantenido por el manejo que se le ha dado a la corriente de agua.

El Río Colorado al igual que la mayoría de lo grandes ríos en el mundo, ha sido manipulado para el uso humano, se le ha construido presas para mantener grandes reservorios de agua, la generación de energía eléctrica y como zonas de recreo, se ha desviado y regulado el flujo de su cauce hacia el delta del Golfo de California. Todo esto ha alterado el entorno natural de las zonas contiguas (Zamora et al., 2001).

Los humedales nativos que anteriormente se encontraban en el delta del río Colorado casi han desaparecido y sólo quedan la ciénega de Santa Clara y el Río Hardy, los cuales son muy importantes como

hábitat natural de fauna y flora y necesitan agua en cantidades constantes para soportarlos, porque es necesario garantizar una cantidad de agua para mantener esos hábitats naturales.

Los ecosistemas riparios del suroeste de estados Unidos y noroeste de México han experimentado un cambio en la composición de sus comunidades vegetales, originalmente estaban dominadas por bosques de galería de árboles nativos como (*Populus fremontii*) y álamo (*Salix gooddingii*) y especies como *Baccharis salicifolia*, han sido reemplazadas por una especie exótica, tolerante a la salinidad, el pino salado (*Tamarix ramosissima*) Vandersande et al. (2001).

II. ANTECEDENTES

II.1 Las Variaciones en el flujo del Río Colorado a través de la frontera México-E.U.A

El río Colorado se origina en las montañas de Wyoming y Colorado, fluye a través de 2300 Km hacia el Golfo de California y el Mar del Salton, cruzando siete estados en los Estados Unidos y dos en México. Durante los últimos cien años el libre flujo del río Colorado ha sido bloqueado por la construcción de diez grandes presas (Figura 1). A principio de la década de los treinta la construcción de la presa Hoover ocasionó la primera interrupción del libre flujo de la corriente, durante seis años. En 1963 el flujo volvió a ser interrumpido debido a la construcción y llenado de la presa Glen Canyon (DOI, 1996).³

Las cuotas de uso de agua han sido establecidas por el Bureau of Reclamation Office de los Estados Unidos y la Comisión Internacional de Límites y Agua de México (CILA). La disponibilidad anual de agua del Río Colorado, estimada en 20,353 millones de m³, ha sido repartida entre las Cuencas Alta, Baja y México. La Cuenca Alta incluye los estados de Colorado, Wyoming, Utah y Nuevo México. La Cuenca Baja los estados de California, Arizona, Nevada y México. La asignación de cuotas de agua para cada estado en los Estados Unidos y para México que representa 90 y 10% respectivamente se presenta en la tabla I.

³ http://water.usgs.gov/wid/FS_089-96/FS_089-96.html

Tabla I. Cuotas de agua del Río Colorado. Tomado de CILA-CONAGUA, 1999.

	Millones de metros cúbicos	Porcentajes (%)	Millones de Acres pie
Cuenca Alta			
Colorado	4,687	23.02	3.80
Wyoming	2,122	10.42	1.72
Utah	1,394	6.84	1.13
Nuevo Mexico	1,048	5.14	0.85
Subtotal	9,251	45.45	7.50
Cuenca Baja			
California	5,427	26.66	4.4
Arizona	3,454	16.97	2.8
Nevada	370	1.81	0.3
Subtotal	9,251	45.45	7.5
México	1,851	9.09	1.5
Gran Total	20,353	100	16.5

Los principales usuarios de agua del sur de California han llevado a cabo negociaciones activas para reasignar las cuotas de agua del río Colorado al estado y reducir la dependencia de California sobre los "excedentes" de agua, de modo que el estado opere con su cuota legal asignada de 5.4 mil millones de m³ (4.4 millones de acres/pie). El 31 de diciembre de 2002 el distrito de Riego del Valle Imperial (Imperial Irrigation District o IID) de California solicito concesiones adicionales, el resultado fue que el acuerdo no se firmó y se determinó que el IID estaba desperdiciando agua (Cornelius et al., 2003).

La decisión del departamento de Interior de los Estados Unidos (DOI) de reducir el suministro de agua a California tiene también consecuencia al renovar el interés por el funcionamiento de la Planta Desalinizadora de Yuma, Arizona. El DOI esta ahora abogando por la operación de la Planta Desalinizadora de Yuma en un esfuerzo para mejorar el almacenamiento de agua río arriba, controlar la salinidad e incrementar al máximo el uso de agua de Estados Unidos mediante la reducción de desvíos al canal de aguas residuales a los humedales de la Ciénega de santa Clara.

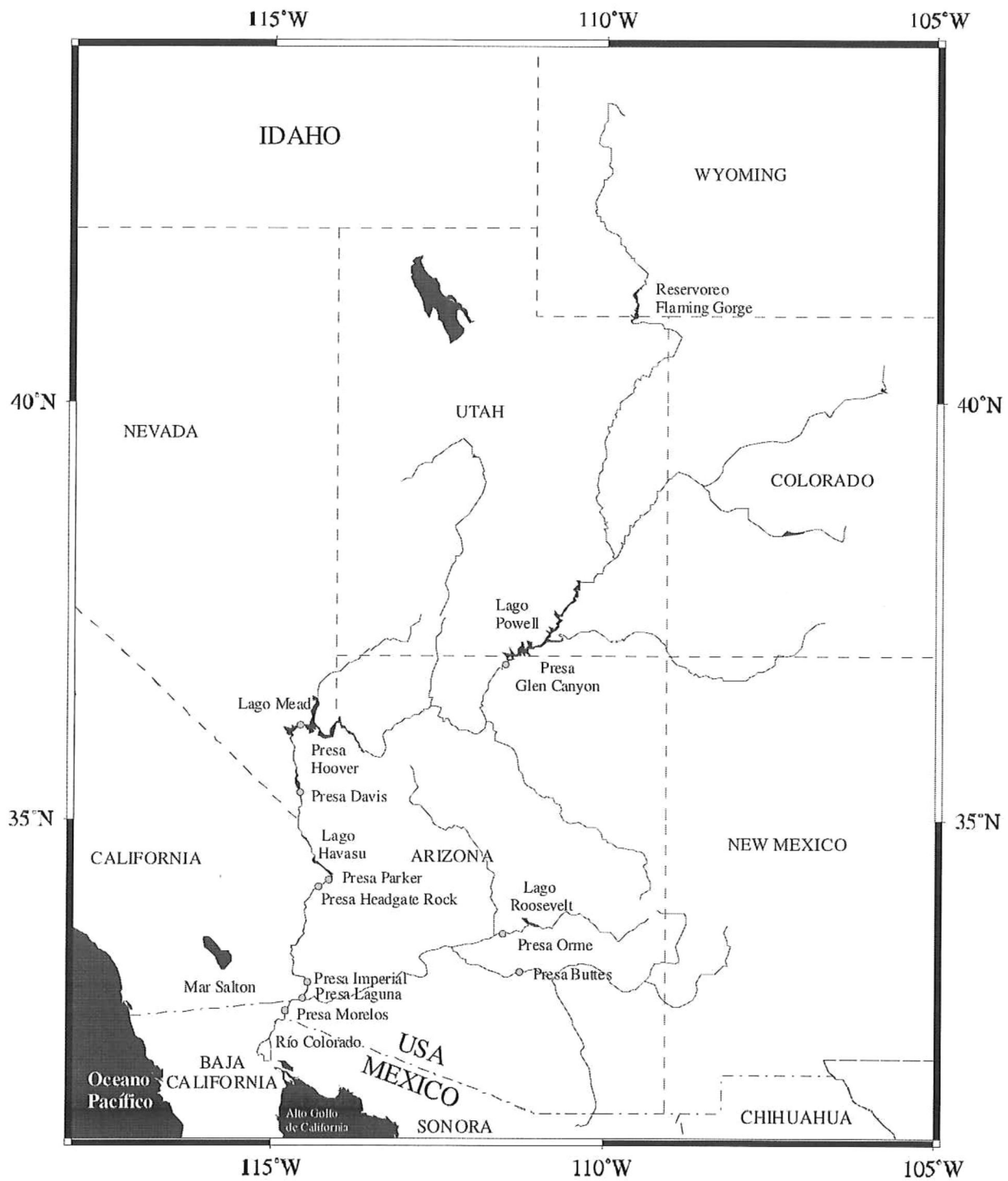


Figura 1. Presas en el río Colorado.

Los registros de flujo del río Colorado a través de la frontera de E.U.-México de 1904 a 1934, antes de la construcción de presas, muestran un ciclo anual con un máximo en junio y un mínimo en diciembre (Lavín y Sánchez 1999). Las descargas máximas de verano debieron tener un impacto significativo en las planicies del Delta del Colorado, nutriendo los humedales con agua de baja salinidad y con altos niveles de sedimentos suspendidos, lo cuál permitía el florecimiento de los ecosistemas en la zona del delta (Figura 2).

El desvío de agua para riego del Valle Imperial ha disminuido aún más el flujo hacia el Delta. En 1905, un rompimiento en una puerta de irrigación permitió que la totalidad del cauce del río Colorado se desbordara a la depresión del Salton, dando origen al Mar del Salton.

El Mar del Salton es un lago terminal y no tiene salida aparte de la evaporación, acumulando depósitos de sales, nutrientes y otros componente; tiene una salinidad de 44 partes por millón (ppm), 25% más alto que el mar (35 ppm). La entrega del 25% del flujo del río Colorado al Valle Imperial asegura la viabilidad de la agricultura y como efecto secundario han ocasionado que el tamaño y nivel del Salton ha aumentado en los últimos 70 años, por los flujos de los drenes agrícolas.

Desde 1935, el ciclo anual natural ha sido interrumpido y las descargas actuales son despreciables comparadas a los registros pasados. Las excepciones a éste fenómeno han sido las descargas controladas de las presas debido a deshielos anormales ó a lluvias excesivas en las cuencas alta y baja del río Colorado. Uno de estos eventos ocurrió de 1984-1985, el cuál inundó grandes extensiones en el Delta, incluida la Laguna Salada que al igual que la depresión del Salton, está bajo el nivel del mar y se inunda cuando el flujo del río Colorado es abundante y persistente, desbordándose a través de un pasaje entre la Sierra Cucapá (El Mayor) y Sierra Las Pintas.

La hidrología de la inundación es el estudio de las fuentes de agua que contribuyen a la inundación de una planicie al alcance de un río, sus patrones de inundación tienen implicación sobre la distribución de sedimento, derrame de contaminantes, planicies inundadas y riesgo de inundaciones. Estos patrones tienen variaciones espaciales a lo largo del cauce del río, dependiendo en la geomorfología y variaciones temporales de la magnitud y duración de flujo (Mertes, 2000).

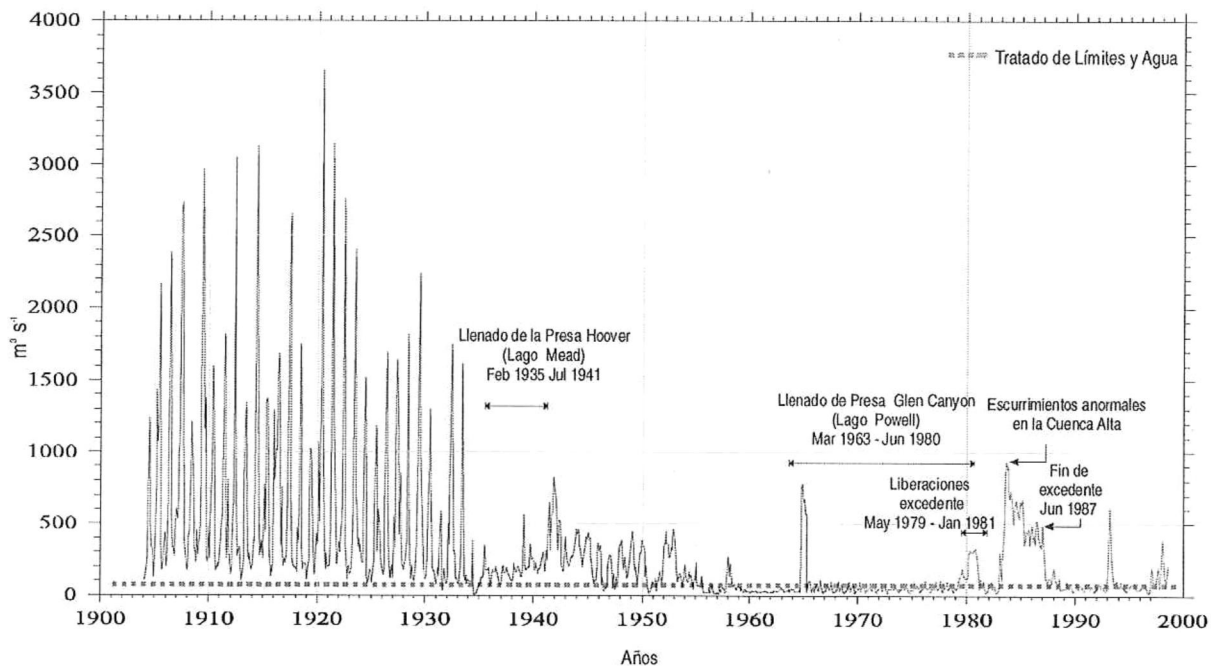


Figura 2. Flujo del río Colorado de E.U. a México en m^3/seg de 1904 a 1998. La interrupción del ciclo anual se inició en 1935 con la construcción de la presa Hoover (Fuente CILA-CONAGUA, 1999).

Se han utilizado evidencias de macro fauna y estimaciones de isótopos para reconstruir la zona de influencia del agua dulce en fechas anteriores a la desviación para riego en agricultura y uso doméstico (Rodríguez et al., 2001). El agua de mar y el agua dulce tienen diferentes composiciones de isótopos de oxígeno, y las diferencias en éstas pueden ser utilizadas para estimar la contribución de agua dulce en estuarios (Andreasson et al., 1999).

El flujo libre de un río ayuda a mantener la biodiversidad, no sólo por crear nichos temporales de regeneración, sino por crear microhábitats que varían espacialmente en relación a la fuente de agua, cantidad de iluminación disponible y propiedades del suelo. Esos microhábitats varían en profundidad, textura, y contenido de nutrientes, y soportan diferentes comunidades vegetales (Marks, 1950; en Stromberg, 2001).

Los patrones hidrológicos en tiempo y espacio son influenciados por la topografía, tipo de suelo y vegetación, y a su vez la forma en que el flujo de una corriente pasa a través de una planicie inundable resulta en una variabilidad en las comunidades vegetales contiguas (Mertes et al., 1995).

Otra zona afectada por la desviación del flujo es el valle de Mexicali, donde la falta de agua y de inversión han incrementado la salinización del suelo y reducido las cosechas. En las porciones sureñas como el campo Mosqueda, los agricultores han abandonado sus tierras a causa de las altas concentraciones de sal; en algunos casos se han dedicado a actividades de acuacultura.

II.2 Los humedales del delta del río Colorado.

II.2.1 La zona de estudio

La ciénega de Santa Clara (figura 3) es el humedal más grande del río Colorado, la distribución de las especies y el tamaño del área cubierta de vegetación esta relacionada principalmente con la salinidad y profundidad del agua. Los patrones de vegetación son dominados por *Typha dominguensis* (tule), además de ocho hidrófitos subdominantes, también se documentaron un total de 24 especies. En el lado este de Santa Clara, se encuentran una serie de pozos y lagunas llamadas El Doctor al igual que un poblado cercano. En El Doctor se documentaron 29 especies. La mayor diversidad de especies en este sitio, puede ser atribuido a la salinidad: la menor salinidad encontrada en Santa Clara fue de 3ppt en cambio en el Doctor varía entre 1-2 ppt y presenta géneros menos tolerantes como *Baccharis*, *Eleocharis*, *Pluchea* y *Rumex* además de especies más tolerantes a la salinidad (Zengel et al., 1995).

El pino salado (*Tamarix*) ha reemplazado a especies nativas como *P. fremontii* y *S. goodingii*, siendo la especie más abundante en el delta del río Colorado, con 40% de cobertura, seguida por *S. goodingii* (10-9%) y *Pluchea sericea* (10-3%). La pérdida de estas especies nativas ha llevado al colapso del hábitat para numerosas especies de plantas, pájaros, mamíferos y reptiles, de las cuales 45 especies en la parte baja del río Colorado están enlistadas como sensitivas, amenazadas o en peligro de extinción de acuerdo a (Zamora, 2001).

El pino salado consume una enorme cantidad de agua, un solo árbol puede transpirar 1.1355 m³ de agua por día; como comparación 4046.86 m² de *Populus fremontii* consumen 223.250 m³ de agua al año; mientras que la misma área de pino salado consume 343.461 m³ de agua por año. Por otro lado *Tamarix* es una planta que no consumen la mayoría de los animales; ya que no le gusta al ganado doméstico ni a los animales silvestres. Asimismo, el pino salado secreta el exceso de sal en el agua que absorbe a través de sus hojas, y ésta se deposita

en el sustrato , haciendo aún más salino el suelo, lo cuál elimina las plantas nativas no-tolerantes a altos niveles altos de salinidad (Colorado Water Conservation, 2003).

Los efectos combinados de cambios en condiciones físicas y vegetación en hábitats riparios han puesto en peligro muchas especies que dependen de ellos, el willow flycatcher (*Empidonax traillii*), Yuma clapper rail (*Rallus longirostris*), y el Bell's vireo (*Vireo bellii pusillus*), así como grandes cantidades de peces están en peligro o se han extinto. La restauración de hábitat para especies en peligro ha sido un impulso para proyectos de este tipo en el suroeste de Estados Unidos; otras metas expresadas por los manejadores de las reservas de Nature Conservancy, y Refugios Nacionales de Vida Silvestre incluyen incrementar la abundancia de especies vegetales nativas de las áreas riparias para modificar la dominancia de plantas exóticas a nativas; para mejorar el hábitat silvestre y el atractivo recreacional, y reducir el tamaño de grandes liberaciones de agua debidas a construcción de caminos y urbanización (Stromberg, 2001). El mismo autor considera como efectos de origen de la pérdida de hábitat ripario; la modificación de los regimenes fluviales naturales, cambio de regimenes de pastoreo, y conversión directa a uso agrícola y urbano. Los cambios que recomienda en su conclusión son: restauración del flujo natural de los ríos, recarga de aguas subterráneas, reducción de las tasas de extracción, reciclamiento de aguas municipales, restauración de regimenes de pastoreo y de fuegos programados, reducción en la dependencia de la demanda de energía generada por agua y la eliminación de presas seleccionadas.

Galindo Bect et al. (2000), analizaron la respuesta de la pesquería de camarón a pulsos de agua dulce en el Alto Golfo de California a través de las descargas de camarón de barcos de arrastre registrados en San Felipe de 1977 a 1995, y establecieron una relación significativa entre las capturas totales y el flujo de agua dulce del río Colorado hacia el Golfo de California.

También se han hecho cálculos sobre conchas de moluscos en la desembocadura del río Colorado (Kowalewski, 2000), y se ha estimado en conchas datadas de 950-1950 al menos, que había con un cálculo conservador una población de moluscos de $\sim 6 \times 10^9$ con una densidad de población de $\sim 50/m^2$. En contraste en el presente se calculó un decremento de $\sim 94\%$ en la densidad de la población de moluscos, con una abundancia de $(3/m^2$ en 1999-2000).

El Bureau of Reclamation de los Estados Unidos seleccionó a *Typha domingensis* (tule) como la mejor especie indicadora para predecir los efectos del flujo de la Planta Desaladora en Yuma. Sánchez et al. (2001), describen un mapa de distribución de tular (*T. domingensis*) en la Ciénega de Santa Clara utilizando la firma espectral de la especie a partir de imágenes de satélite, combinados con posicionadores geográficos y espectrometría. Utilizaron una técnica de subpixel para resolver el problema que presenta la heterogeneidad de las comunidades vegetales en un humedal, con esto midieron las áreas definidas como compuestas de especie dominante tule.

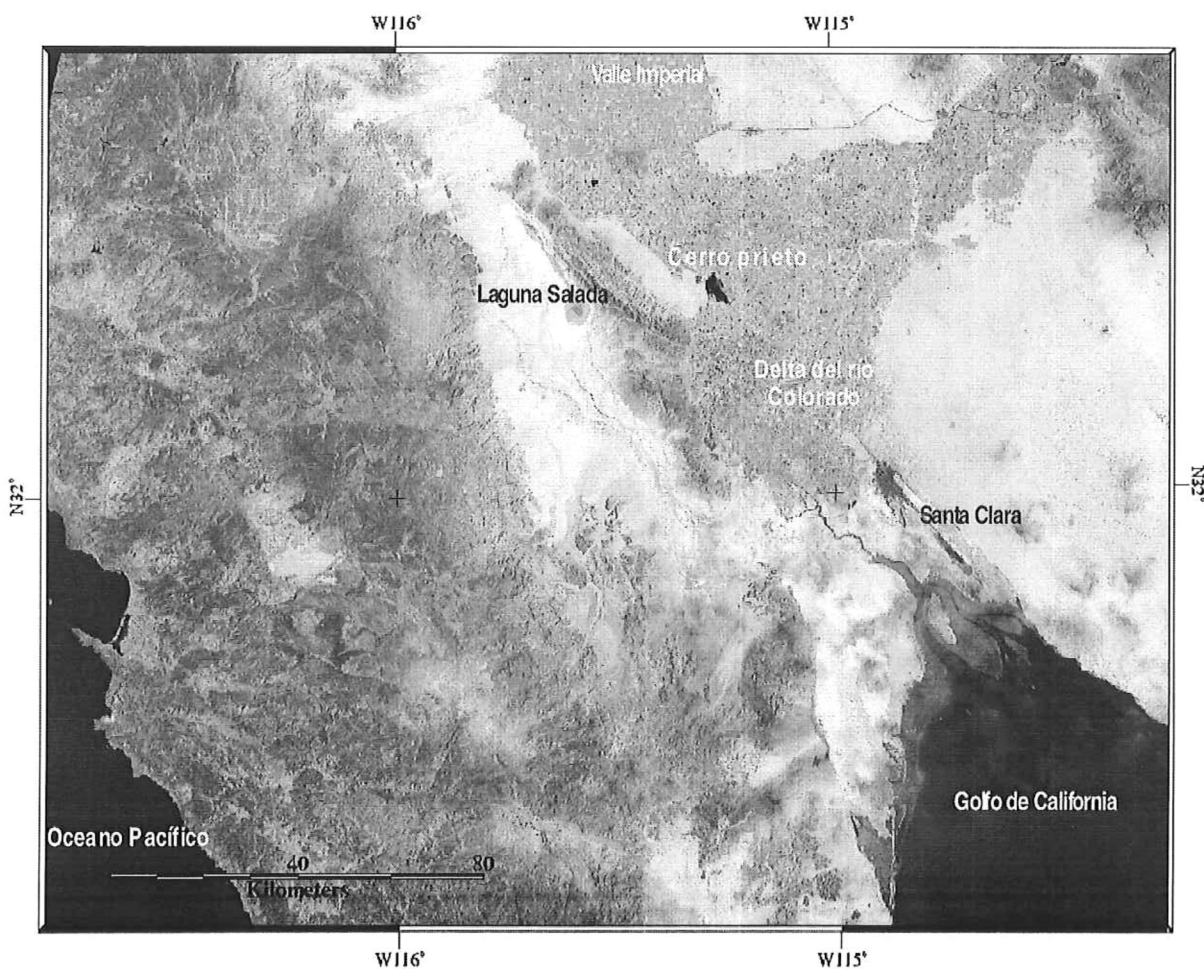


Figura 3. Ubicación de la zona de estudio sobre un mosaico de imágenes Landsat TM de mayo de 1990, con el humedal de Ciénega Santa Clara y laguna Salada.

Zamora (2001), encontró que para que se diera la regeneración de árboles nativos era más importante que hubiese aporte de agua varios años seguidos, independiente de la cantidad de agua. Obtuvieron índices de vegetación (NDVI) a partir de imágenes DyCam y cinco imágenes satélite TM de años anteriores para estimar cobertura vegetal y correlacionarla con el flujo. Encontraron que la correlación más robusta era entre la cobertura vegetal y el número de años anteriores con flujo del río Colorado de Estados Unidos a México irrelevante de la cantidad de agua. Concluyeron que un volumen de agua de $3 \times 10^9 \text{ m}^3$ liberado a un tasa de 80-120 m^3/seg entre febrero a abril de 1997, es suficiente para hacer que el río inunde la planicie y el agua llegue al Golfo de California y a la Laguna Salada. También concluyeron que esta liberación de flujo es suficiente para germinar renuevos de nuevos árboles en un período de tres meses. Cabe hacer notar que la cantidad estimada $3 \times 10^9 \text{ m}^3$ es mayor en un 62% a la cuota anual de México.

II.2.3 La conservación de los humedales del Delta del Río Colorado.

Existen una serie de acuerdos internacionales, éstos tratados y leyes son indispensables para hacer cumplir los principios y reglas ambientales en todo el mundo. No sólo porque establecen normas a nivel mundial, sino porque el mero hecho de que existan a nivel internacional es con frecuencia suficiente para que los gobiernos se conviertan en signatarios ó promulguen sus propias leyes.

De México hasta Panamá existen miles de humedales y todos son importantes, 25 de ellos han sido declarados "Humedales de Importancia Internacional" o "Sitios Ramsar" por la Convención Internacional sobre Humedales. El gobierno de México es signatario de la Convención Ramsar y por tanto incluye siete sitios designados como humedales de importancia internacional con un área de 1, 157,121 hectáreas de superficie. Estos sitios se encuentran bajo diferentes esquemas de administración que incluyen parques nacionales, reservas forestales, reservas especiales y refugios de vida silvestre.

En México se publicó en el Diario Oficial de la Federación la Norma Oficial Mexicana bajo la denominación PROY-NOM-022-SEMARNAT-2003, con fecha jueves 10 de abril del 2003, donde se establecieron las especificaciones de manejo para la conservación de los humedales costeros. En dicha Norma la Secretaría de

Medio Ambiente y Recursos Naturales a través de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en materia de impacto ambiental establece que para la realización de obras o actividades que puedan causar desequilibrio ecológico o rebasar los límites y condiciones para proteger el ambiente y preservar y restaurar los ecosistemas, se requiere una autorización de la SEMARNAT.

La situación actual en el delta del río Colorado es producto de una serie de políticas aplicadas desde el Colorado River Compact en 1922, donde la distribución de agua del río se repartió entre la cuenca alta y cuenca baja. El tratado con México respecto a la utilización de las aguas del río Colorado, Tijuana y el río Grande, del 3 de febrero de 1944, asignó a México el 9% del agua del río Colorado, lo cuál corresponde a 1,851 millones de m³. En 1964 se firmó otro compromiso acerca de la calidad de agua que Estados Unidos debe entregar a México, signado en la minuta 242 del tratado de 1944.

En estos tratados se le da la más alta prioridad a usos consuntivos del agua, y la prioridad más baja a el “beneficio público” entendido como el mantener un flujo del río suficiente para mantener peces, vida silvestre y hábitats; hasta la fecha las leyes del río Colorado no contemplan destinar agua para mantener la salud ecológica de la zona riparia del delta del río Colorado y parte alta de Golfo de California (Glenn, et al. 1999).

En 1987 se implementó el Plan de Recuperación para la Alta Cuenca del Río Colorado en E.U.A. para proteger y mejorar la aportación al flujo, restaurar hábitat, y reducir los efectos adversos de las especies de peces exóticos. En la Cuenca Baja, en 1994 los usuarios de agua de los distritos de riego y condados de EUA, implementaron el Programa de Conservación de Multi-especies del bajo Colorado (MSCP) para mitigar el impacto del desarrollo en el hábitat de especies en peligro de extinción y amenazadas. En 1996, el Bureau of Reclamation liberó una cantidad de agua almacenada en un esfuerzo de redistribuir sedimentos en el gran cañón y reconstruir playas erosionadas. Todos estos esfuerzos sugieren una creciente conciencia de la importancia de la salud ecológica y muestran el deseo de los usuarios del agua y sus representantes de modificar las prácticas de manejo (Glenn, 1999).

Por otra parte el delta del río Colorado fue reconocido como parte de la Red de Reservas de Aves del Hemisferio Oeste desde 1992. En 1994, México se unió a Canadá y Estados Unidos en el Plan Americano de

Manejo de Aves Acuáticas, y en 1996, los humedales del Delta del Colorado se enlistaron como parte de la Convención Ramsar de Humedales (Glenn, 1999).

En junio 10 de 1993 fue decretada la Reserva de la Biósfera Alto Golfo y Delta del Río Colorado con una superficie de 934,756-25-00 ha ubicadas en aguas de jurisdicción federal del Golfo de California y los Municipios de Mexicali, Baja California y San Luis Río Colorado y Puerto Peñasco, Sonora. Tiene una zona núcleo denominada "Delta del Río Colorado" con una superficie de 164,779-75-00 ha y una zona de amortiguamiento con una superficie de 769,976-50-00 ha. Con este decreto, la reserva quedó incluida dentro del Sistema Nacional de Áreas Naturales Protegidas (SINAP).

El Programa de Manejo de la Reserva fue oficialmente presentado en 1995 é instrumentado con los Programas Operativos Anuales de 1996 y 2000, es administrada y manejada por la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas de la SEMARNAT. En 1996 se inició operación de la estación de campo del Golfo de Santa Clara en coordinación con el Gobierno del Estado de Sonora. La Comisión es una instancia desconcentrada de la Secretaría establecida en junio 5 del año 2000 y regida bajo el Reglamento Interno de la SEMARNAT, 2000.

En diciembre del año 2000 se firmó de la Declaración Conjunta DOI-SEMARNAP para ampliar la cooperación en el Delta del Río Colorado y la Minuta Conceptual 306 de la Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA/IWBC). El 11 de septiembre del 2001 en la ciudad de Mexicali, B.C., se celebró el Simposio Binacional sobre el delta del Río Colorado en el cual se presentaron los aspectos legales y técnicos del manejo del agua en México y Estados Unidos, así como los resultados de estudios recientes sobre las condiciones actuales del delta y su biodiversidad así como actividades de difusión, protección, conservación y restauración (CILA/IWBC, 2001).⁴

⁴ www.ibwc/simposio

II.3. Uso de Sensores Remotos

II.3.1 Terminología y conceptos generales

Los sistemas de sensores remotos están compuestos por el sensor y la plataforma que lo sustenta. Tienen como misión captar la energía procedente de las cubiertas terrestres, codificarlas y grabarlas ó enviarlas al sistema de recepción, la capacidad y potencialidad de un sensor se describe a través de cuatro aspectos importantes:

a) Resolución espacial - tradicionalmente conocida como la mínima distancia entre dos objetos que un sensor puede distinguir en el terreno. Se la expresa en metros (resolución terrestre) o en radianes (resolución del sensor) (Novo, 1989). La resolución espacial mide la menor separación angular o lineal entre dos objetos. Cuando un sistema posee una resolución de 30 metros, como el mapeador temático de Landsat (TM), significa que objetos distanciados entre si menos que 30 metros, en general, no serán distinguidos por el sistema. Así, entre mayor resolución espacial del sistema menor la dimensión del píxel, y mayor el espacio requerido para almacenar la información, mayor su poder de distinguir entre objetos muy cercanos.

b) Resolución temporal - es el intervalo de tiempo que toma el satélite al observar una misma área del terreno, la repetitividad de la observación en el tiempo. La resolución temporal se refiere a la periodicidad con que el sistema sensor adquiere imágenes de la misma porción de la superficie terrestre. La secuencia temporal de los sistemas espaciales varía de acuerdo con los objetivos fijados para el sensor. Los satélites meteorológicos son obligados a ofrecer información en períodos cortos de tiempo, pues se dedican a observar un fenómeno muy dinámico, por esta razón su resolución temporal es de 30 minutos (Meteosat, GOES, etc) o de 12 horas como la del satélite NOAA. Los satélites de recursos naturales ofrecen una periodicidad mucho menor, pues no están colectando informaciones de fenómenos tan dinámicos como los meteorológicos. Así, la resolución temporal de estos satélites está entre los 16 días del LANDSAT y los 31 del ERS. (Chuvioco, 1996)

c) Resolución espectral - indica el número y ancho de las bandas espectrales que el sensor puede discriminar. Así un sensor será tanto más sensible cuanto mayor sea el número de bandas de que el disponga, debido a que esto facilita la caracterización espectral de las distintas coberturas. Una alta resolución espectral es obtenida cuando las bandas de un sistema sensor son estrechas y/o cuando se utiliza un mayor número de bandas espectrales. Entre los sensores remotos, los más habituales en teledetección son los exploradores o rastreadores

de barrido (scanners) y consisten de un espejo móvil que oscila perpendicularmente a la dirección de la trayectoria, lo cual les permite explorar una franja del terreno a ambos lados de la traza del satélite. La radiancia recibida por éste componente óptico se dirige a detectores que la amplifican y convierten a una señal eléctrica. Ésta, a su vez, se transforma a un valor numérico, que puede almacenarse a bordo o transmitirse a la red de antenas receptoras (Chuvieco, 1996).

Una imagen multiespectral contiene información acerca de atmósfera, iluminación y una cierta calibración; así como información acerca de las propiedades de los materiales en la superficie de la tierra. En adición a ello, cada pixel puede incluir información en una mezcla de materiales en la superficie de la tierra (Mertes et al. 1995). Para extraer información acerca de los materiales de la superficie de la tierra se debe tomar en cuenta esas distorsiones, lo cuál es posible utilizando la técnica de análisis multiespectral.

II.3.2 Reflectancia espectral de la vegetación

Existen diversas técnicas para estudiar cualitativa y cuantitativamente el estado de la vegetación a partir de medidas espectrales obtenidas por satélites. La curva de reflectancia de la vegetación verde y sana, siempre manifiesta la configuración de "picos y valles" ilustrada en la figura 4. Los valles en la porción visible del espectro son determinados por los pigmentos en las hojas de la planta. La clorofila por ejemplo, absorbe energía en las bandas de longitudes de onda centradas a cerca de 0.45 y 0.65 μm . Así, nuestros ojos perciben la vegetación sana en color verde, dada la alta absorción de la energía del color azul y rojo por las hojas vegetales, y muy alta reflexión del color verde. Si una planta es sujeta a un estrés que interrumpa su crecimiento y productividad, puede decrecer ó cesar la producción de clorofila. El resultado es menor absorción de la clorofila en las bandas azul y rojo, y frecuentemente la reflectancia del rojo se incrementa hasta tal punto que vemos la planta virar a amarillo (combinación de verde y rojo).

En la porción visible a la región del infrarrojo reflectivo del espectro, vemos que la zona cercana al 0.7 μm , la reflectancia de la vegetación sana se incrementa dramáticamente. En el intervalo de 0.7 a 1.3 μm , una hoja de planta refleja cerca del 50% de la energía incidente. La reflectancia de la planta en el intervalo de 0.7 a 1.3 μm

resulta principalmente de la estructura interna de las hojas de las plantas. Ya que la estructura es variable entre las especies y edades de las plantas, las mediciones de la reflectancia frecuentemente permiten discriminar especies ó estados físicos de las plantas, aunque parezcan ser las mismas en la porción visible del espectro.

La baja reflectancia de 1.4, 1.9 y 2.7 μm es porque el agua de la hoja absorbe fuertemente a éstas longitudes de onda, las cuáles son conocidas como bandas de absorción de agua. La reflectancia de la hoja es inversamente proporcional al contenido de humedad en la hoja. Así mismo, el estrés altera la reflectancia en ésta región infrarroja y los sensores que operan en ella son usados frecuentemente para la detección del estrés en las plantas.

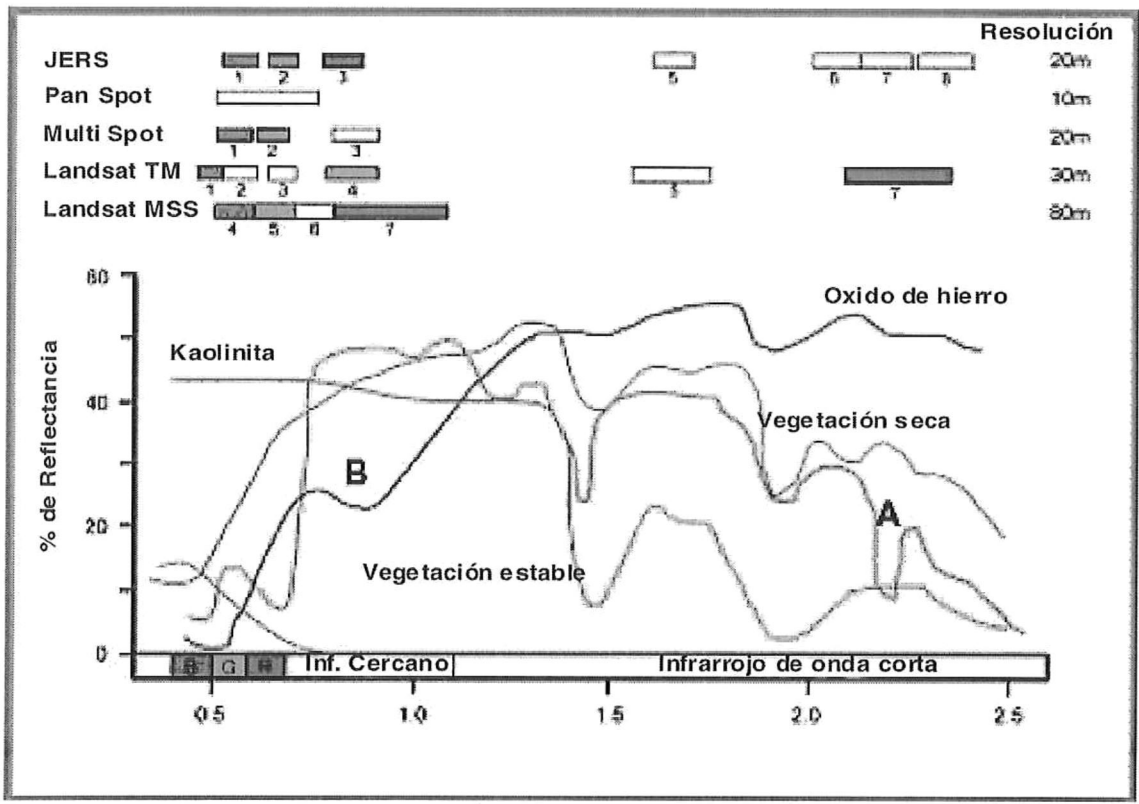


Figura 4. Curvas de reflectancia típica de materiales comunes en la superficie terrestre, ventanas espectrales y resolución espacial de distintos sensores en satélites de observación de la tierra

II.3.3 Índices de vegetación.

Con el fin de reducir el número de dimensiones propias de las medidas multiespectrales a una sola dimensión, se han definido los índices de vegetación (PACES, 2002)⁵. Los índices de vegetación son combinaciones de bandas espectrales, cuya función es realzar la contribución de la vegetación en función de la respuesta espectral de una superficie y atenuar la de otros factores como suelo, iluminación, atmósfera, etc.

Basándose en la diferencia de reflectancia que la vegetación verde muestra en la banda visible (V) 20% y en el infrarrojo cercano (I) 60%, se ha definido el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) como una relación de la forma

$$NDVI = \frac{I - V}{I + V}$$

El intervalo de valores obtenido del NDVI, varía entre (-1) y (+1). Solo los valores positivos corresponden a zonas con vegetación. Los valores negativos, generados por una mayor reflectancia en el visible que en el infrarrojo, pertenecen a nubes, nieve, agua, zonas de suelo desnudo y rocas. En este intervalo de valores de NDVI, valores cercanos a cero significa que hay poca o nula vegetación y un valor cercano a uno (0.8-0.9) indica que hay una alta densidad de hojas verdes. El valor del NDVI puede variar en función del uso de suelo, estación fenológica, situación hídrica del territorio y ambiente climático de la zona (NASA, biblioteca de, 2003).

Además del NDVI, existen otros índices de vegetación para estimar cobertura de vegetación, entre ellos: Índice de Vegetación Corregido a Suelo (SAVI), y el Índice de Vegetación Realzado (EVI). Con éstos tres índices Nagler (2001) llevó a cabo un estudio en la zona del delta del río Colorado para comparar cada uno de ellos contra porcentaje de cobertura vegetal y encontró que la correlación más robusta se daba entre NDVI y porcentaje de cobertura vegetal.

Por otra parte, los últimos veinte años, los investigadores de NASA y NOAA en E.U. han estado monitoreando las causas y efectos de la sequía en el mundo, para tratar de ver que es, que la causa, si está aumentando y volviéndose más severa, y tratar de monitorear sus causas y efectos.

⁵ <http://paces.geo.utep.edu/welcome.shtml>

Muchos de los desastres naturales son de corta duración, en cambio la sequía es un fenómeno lento y gradual, y en casos severos puede durar muchos años. La sequía se puede definir como un período extendido de varios años de deficiencia en la precipitación relativo a la precipitación promedio de una región.

Los impactos de la sequía se pueden medir de diferentes formas como niveles de agua en presas, reducción de flujo de ríos, o pérdidas de cosecha. La absorción y reflexión de radiación fotosintética sobre un período de tiempo puede ser utilizado para caracterizar la salud de la vegetación en una región, en relación al promedio.

La diferencia entre el NDVI promedio de un mes en un año particular y el NDVI promedio del mismo mes durante 20 años es llamado anomalía. En la mayoría de los climas, el crecimiento de la vegetación está limitado por la disponibilidad de agua, entonces la densidad relativa de la vegetación es un buen indicador de sequía (NASA, 2003).

II.3.4 Programa Landsat.

El programa que más ha tomado sistemáticamente imágenes multiespectrales de la tierra desde el espacio son los satélites Landsat. El primero de ellos fue puesto en órbita el 23 de julio de 1972, se han adquirido más de tres millones de imágenes almacenadas en "National Satellite Land Remote Sensing Data Archive" (NSLRDA) y en EROS Data Centre (EDC), Sioux falls, Dakota del Sur (Sheffner, 1994). Los períodos de cobertura de éstos satélites se pueden ver en la tabla II; la disponibilidad de las imágenes es en base a éstas fechas.

El Sistema Barredor de Imágenes Multiespectral (Multi-Spectral Scanner, MSS) fue colocado a bordo del LANDSAT por insistencia de los investigadores del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, que querían probar un sistema multiespectral para estudios agrícolas. Este sensor es un equipo de barrido óptico electrónico, que opera en cuatro bandas del espectro electromagnético, dos en el visible y dos en el infrarrojo cercano. La escena terrestre observada por este sensor representaba un área de 185x185 Km. Con una resolución espacial de 80 x 80 m. En el LANDSAT 3, fue agregado un canal en la faja del infrarrojo termal, cuya resolución era de 240m, que captaba la radiación emitida por los objetos terrestres.

Tabla II. Período de Cobertura de satélites Landsat. *The Landsat-4 ya no recoge datos, pero no ha sido desactivado. **Landsat-5 adquiere datos sobre pedido. ***El Landsat7 ETM+ es similar al a los instrumentos del Landsat 6, el cuál falló a obtener órbita

Lanzamiento	Lanzamiento	Desactivado	Sensor
Landsat 1	07/23/72	01/06/78	MSS
Landsat 2	01/22/75	02/25/82	MSS
Landsat 3	03/05/78	03/31/83	MSS
Landsat 4*	07/16/82	-----	MSS, TM
Landsat 5**	03/01/84	-----	MSS, TM
Landsat 6	10/05/93	Falló en lanzamiento	
Landsat 7***	15/03/1999	-----	ETM+

El Sistema Thematic Mapper - TM - tal como su antecesor, el MSS, es un sensor de barrido multiespectral⁶, concebido para proporcionar una resolución espacial más fina, mejor discriminación espectral entre los objetos de la superficie terrestre, mayor fidelidad geométrica y mayor precisión radiométrica en relación al sensor MSS. Opera simultáneamente en siete bandas espectrales, siendo tres en el visible, una en el infrarrojo próximo, dos en el infrarrojo medio y una en el infrarrojo termal. Tiene una resolución espacial de 30 metros en las bandas del visible e infrarrojo reflejado y 120 metros en la banda del infrarrojo termal. La escena terrestre registrada por este sensor es también de 185 Km. por lado.

El Sistema ETM+ (Enhanced Thematic Mapper) es un sensor de barrido multiespectral de ocho bandas⁷, capaz de proveer información de alta resolución de la superficie de la tierra. Puede detectar radiación espectralmente filtrada en las bandas visible, infrarrojo cercano, infrarrojo de onda corta, é infrarrojo termal.

Landsat-7 ETM+ es un escáner multiespectral que ofrece varias ventajas sobre satélites Landsat anteriores. Primero, una banda (banda 8) pancromática de mejor resolución espacial (15 m). Segundo, la banda 6, la banda termal, ofrece una resolución mejorada a 60m y provee imágenes térmicas en dos modos de ganancia, alta y baja. La selección de ganancia es para maximizar la resolución radiométrica 8 bits sin saturar los detectores⁸.

⁶<http://samadhi.jpl.nasa.gov/msl/QuickLooks/landsat6QL.html>

⁷ <http://ls7pm3.gsfc.nasa.gov/scenes/Default.html>

⁸ <http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/las/handbook/handbook.htmls/chapter6/chapter6.html#section6.4>

Las ocho bandas con que cuenta el Landsat-7 ETM+ son utilizadas para diferenciar entre diferentes materiales sobre la superficie terrestre por medio de su firma espectral. Una relación de las características espectrales y espaciales de los sensores de la familia de satélites Landsat se presenta en la Tabla III. En esta también se incluye la aplicación de las ventanas espectrales (NASA, 2003).

Tabla III: Bandas espectrales; su resolución y su aplicación, de los sensores en los satélites Landsat. Información recopilada del Programa Earth Resources Technology Satellite (ERTS), USGS, 2003

BANDAS ESPECTRALES	Resolución espectral μm y resolución espacial nominal (m)			APLICACIÓN
	MSS	TM	ETM	
1 azul		0.45-0.52 (30)	0.45-0.52 (30)	mapeo de aguas costeras diferenciación entre suelo y vegetación, diferenciación entre vegetación conífera y decídua
2 verde	.5-.6 (80)	0.52-0.6 (30)	0.52-0.6 (30)	uso del suelo, vegetación, áreas urbanas, calidad del agua, mapeamiento de vegetación.
3 rojo	.6-.7 (80)	0.63-0.90 (30)	0.63-0.90 (30)	absorción de la clorofila diferenciación de especies vegetales, áreas urbanas, uso del suelo, agricultura, calidad de agua.
8 PAN Visible	N/A	N/A	0.52-0.9 (15)	aumento de resolución, agricultura, forestación, cambio del uso de la tierra, desertificación, recursos hídricos, geología, silvicultura
4 Infrarrojo cercano	.7-.8 (80)	.76-.90 (30)	.76-.90 (30)	delineamiento de cuerpos de agua mapeamiento geológico, mapeamiento geomorfológico, agricultura, áreas de incendios, áreas húmedas
5 infrarrojo medio SWI	.8-1.1 (80)	1.55-1.7 (30)	1.55-1.7 (30)	uso del suelo, agricultura, vegetación, medidas de humedad de la vegetación diferenciación entre nubes y nieve
7 infrarrojo medio SWI	N/A	2.08-2.3 (30)	2.08-2.35 (30)	identificación de minerales mapeamiento hidrotermal
6 ₁ infrarrojo térmico	10.4-12.6 (240)	10.4-12. (120)	10.4-12. (60)	mapeamiento de stress térmico en plantas, corrientes marinas, propiedades termales del suelo, mapeamientos térmicos.
6 ₂ infrarrojo térmico	N/A	N/A	10.4-12. (60)	mapeo de stress térmico en plantas, corrientes marinas, propiedades termales del suelo, mapeamientos térmicos.

II.3.5 Imágenes Landsat que cubren el delta del Colorado

Los datos de los satélites Landsat son recolectados continuamente en una órbita casi vertical polar cuando el satélite se mueve de norte a sur, los datos son divididos en forma arbitraria en escenas con 24 segundos de separación, las cuáles corresponden aproximadamente a 160 Km.

La designación compuesta por el número de la órbita y el número del renglón, es conocida como Sistema Mundial de Referencia (World Reference System, WRS), y es utilizado para localizar la imagen del área de estudio. En el WRS, el número de la órbita se refiere a la órbita base a que pertenece la escena del área de estudio, y el número del renglón es asociado a una latitud de referencia.

Los renglones han sido posicionados en tal forma que el renglón sesenta coincide con el ecuador, éste sistema de referencia es diferente para los Landsat 1-3 y Landsat 4-7 a causa de la diferencia en altitud y ángulo de inclinación de los satélites, esto afecta el espaciamiento de las órbitas, Landsat 1-3 tiene 251 órbitas y landsat 4-7 tiene 233 órbitas. La designación de los renglones es similar para cada grupo de satélites (Sheffner, 1994).

Se conoce como WRS1 el Sistema asignado a satélites Landsat 1-3 y WRS2 el sistema asignado a los Landsat 4-7. Las coordenadas de pase/renglón cambian para la zona del delta del río Colorado como se ilustra en la figura 5. Como se puede ver, la zona del delta es mejor cubierta en escenas individuales en el sistema WRS1.

En el sistema WRS1, el delta del río Colorado es cubierto por los pases 41 y 42, mientras que el WRS2 son los pases 38 y 39. Los renglones 37 y 38 son los mismos en ambos sistemas. Es posible obtener imágenes de la misma fecha a lo largo de la misma órbita (pase).

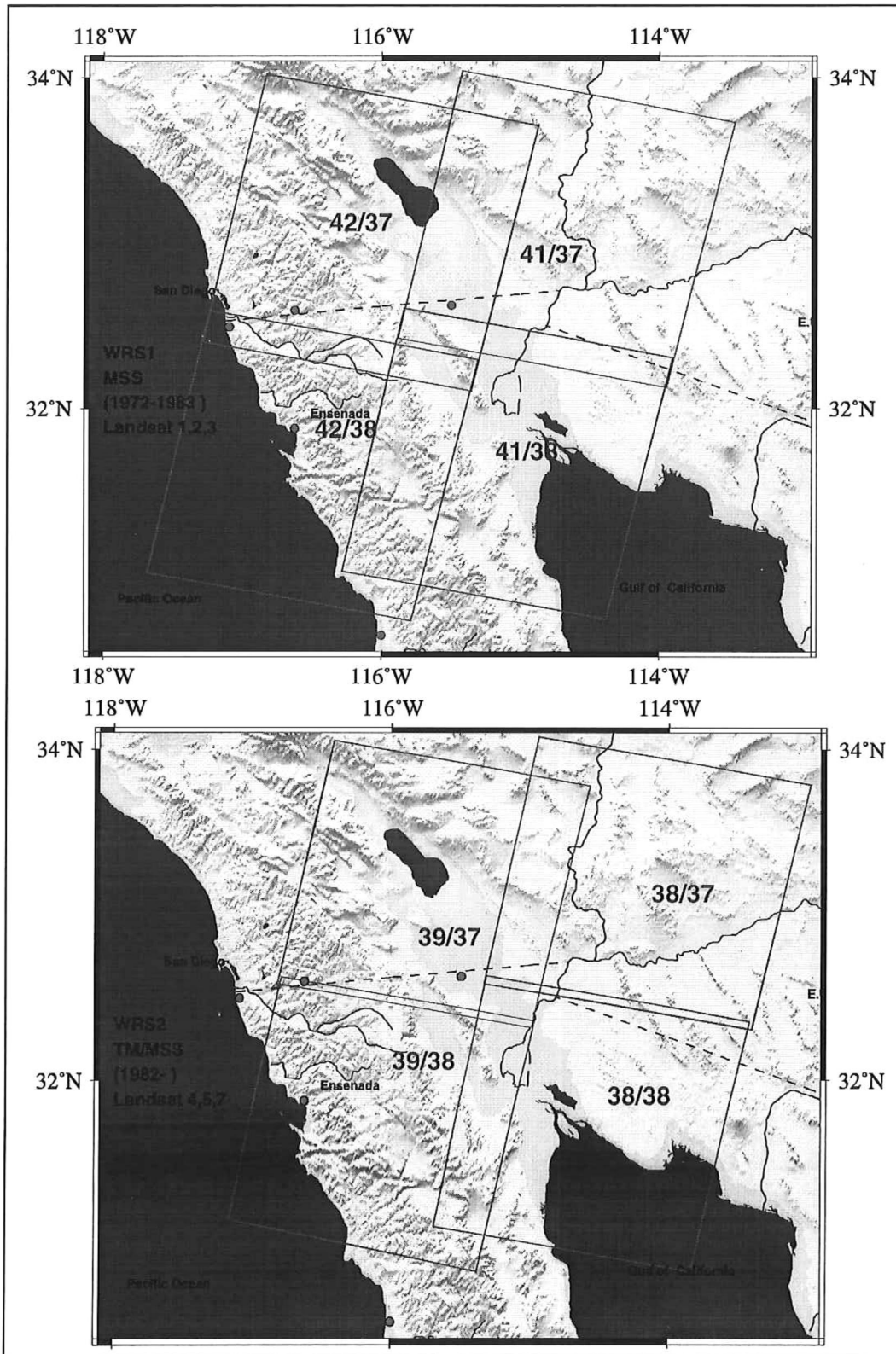


Figura 5. Coordenadas en pase/renglón de las imágenes Landsat que cubren la zona de estudio según los sistemas de referencia WRS1(arriba) y WRS2(abajo).

II.3.6 Técnicas de Procesamiento de Imágenes de satélite

Cuando la información de una imagen está en forma digital, cuantificada en píxeles con niveles discretos de radiometría, hay dos formas de extraer la información (Richards, 1986). Una es el procesamiento espacial de imágenes, donde a través de técnicas de mejoramiento y realce de rasgos que facilita la interpretación y la cuantificación de los píxeles con atributos similares. Otra es el procesamiento espectral de imágenes, el cuál explota las propiedades de las diferentes cubiertas terrestres y las interrelaciones entre las diferentes bandas espectrales de un sensor multiespectrales. Los satélites Landsat cubren diferentes intervalos en el espectro (Figura 4). Procesamiento de imágenes para evaluación de recursos naturales incluyen técnicas como clasificación supervisada, no-supervisada, cálculo de índices como NDVI.

Una imagen se puede registrar a un determinado sistema de coordenadas y de esa forma sus píxeles se pueden direccionar en términos de coordenadas (latitudes y longitudes) en vez de píxeles y números de línea (Richards, 1986).

III. OBJETIVOS.

Objetivo General.

Realizar un análisis retrospectivo de los humedales en el delta del río Colorado por medio de sensores remotos y su relación con el flujo a través de la frontera EUA -México.

Objetivo Específicos.

- Elaborar una serie de tiempo de imágenes de satélite a partir de 1972 al 2002 con la evolución de eventos de inundación y el cambio en la vegetación.
- Conocer la relación entre la variación en el gasto del Río Colorado y su efecto en las llanuras de inundación del delta del Río Colorado.
- Categorizar la cubierta vegetal a través de índices de vegetación normalizados, en condiciones de sequía e inundación extrema así como una perspectiva reciente.
- Proponer recomendaciones para su conservación y manejo.

IV. Metodología.

Materiales:

- Registros de flujo del río Colorado y de entregas de agua de E.U.A. a México durante 1972-2002, obtenidos de la Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA),
- Imágenes de satélite del acervo de Landsat de 1972-2002.
- Mapas topográficos impresos escala 1:50,000 del INEGI, como referencia espacial.
- Programa de procesado de imágenes Ermapper v6.2
- Sistema de Información Geográfico (SIG) arcview 3.2^a
- Programa de procesado de datos STATISTICA 6.1

Métodos

La secuencia metodológica de manera abreviada se puede desglosar en los siguientes puntos y esquemáticamente en la figura 6:

- Búsqueda en línea de las imágenes de Landsat que cubren el delta y que mostraran históricamente desde el inicio del programa en 1972, las condiciones de inundación y sequía en la zona. Se salvaron todas las imágenes muestra que permitiesen reconstruir la historia reciente del delta del Colorado.
- Selección de imágenes a adquirir a resolución completa (30m) que permitiesen hacer un análisis espacial mas detallado de las siguientes condiciones: reciente, inundación extrema y sequía o de poco flujo del río Colorado de EUA a México.
- Geo-referencia. Para hacer un análisis multitemporal del registro Landsat en la zona del delta, fue necesario transformar todas las fuentes de información espacial a un mismo sistema de referencia, por eso, a las imágenes muestra del catálogo, los mapas topográficos y las imágenes Landsat en resolución original, se les aplicó una transformación geométrica para que se ajustaran a un mismo contexto cartográfico.

- Integración de mosaicos de imágenes muestra Landsat que exhibieran momentos históricos del delta.
- Animación de la historia reciente del delta a través de la secuencia cronológica de los mosaicos de imágenes muestra.
- Una vez geo-referenciadas las fuentes de información espacial, se delimitaron las zonas inundadas en los mosaicos de imágenes muestra para estimar áreas inundadas en el testimonio de Landsat.
- Se delimitó las zonas inundadas en los mosaicos de imágenes con resolución original para estimar zonas inundadas con mayor exactitud en condiciones extremas y una perspectiva reciente.
- Se calculó los índices de vegetación NVDI sobre la zona de influencia del cauce principal del río Colorado en las imágenes a resolución completa bajo las diferentes condiciones.
- Correlación histórica del área inundada estimada de las imágenes Landsat con los datos de flujo del río Colorado de EUA a México.

IV.1 Geo-Referencia.

En un sistema de información geográfica es importante partir de un mapa base de referencia con la precisión necesaria para el proyecto para así poder comparar y ajustar datos espaciales provenientes de diferentes fuentes; para ello es necesario que todas las imágenes estén en el mismo sistema de coordenadas geográficas con un mismo sistema de referencia. Eso permite hacer un análisis multi-temporal y estimar las áreas inundadas en las mismas unidades.

Para éste trabajo el mapa base se compone de un mosaico de 12 mapas topográficos escala 1:50,000 de INEGI que cubren la zona de estudio. Se adoptó como contexto espacial la proyección cartográfica implícita de estos mapas que es la Universal Transversa de Mercator (UTM) zona 11 con el sistema de referencia Norteamericano de 1927 (NAD27). Las claves de los mapas utilizados para este mosaico fueron: I11D65, I11D66, I11D67, I11D75, I11D76, I11D77, I11D86, I11D87, H11B16, H11B17, H11B26, H11B27 (Figura 7).

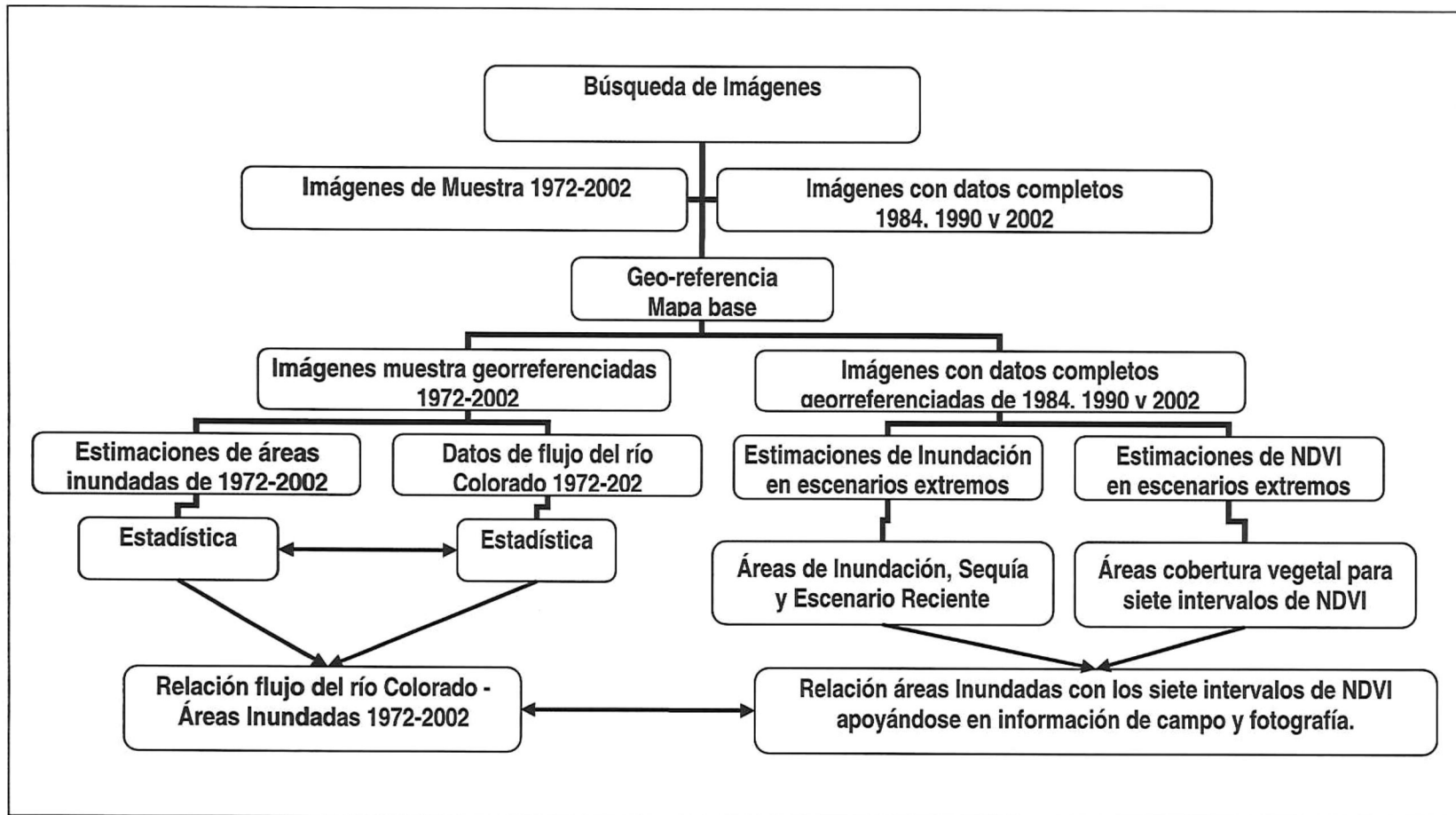


Figura 6. Secuencia metodológica.

A cada mapa se le aplicó un proceso de barrido con 300 puntos por pulgada y posterior geo-referencia, la cuál consiste en aplicar una transformación geométrica polinomial al mapa de tal manera que se ajuste al sistema de la referencia (UTM zona 11). Para ello se seleccionan un conjunto de puntos de control sobre la imagen, en promedio 30 puntos por mapa, que corresponden a los cruces de coordenadas de la retícula UTM de los mapas, estableciéndose así una tabla de puntos de control donde se relacionan las coordenadas de imagen y su correspondiente coordenadas UTM. Con esta información se calculan los coeficientes del polinomio y si tiene un error cuadrático medio bajo, se aplica la transformación geométrica. El error cuadrático medio máximo en el conjunto de mapas fue de 1.4 metros. (Richards, 1986).

Una vez geo-referidos los 12 mapas, se integraron en un mosaico y se comprimieron al formato ecw (Enhanced compressed Wavelet), formato que además de comprimir el archivo, permite el rápido despliegue del mismo. Este mosaico de mapas topográficos, se utilizó como referencia para todas las demás fuentes de información espacial (Figura 7).

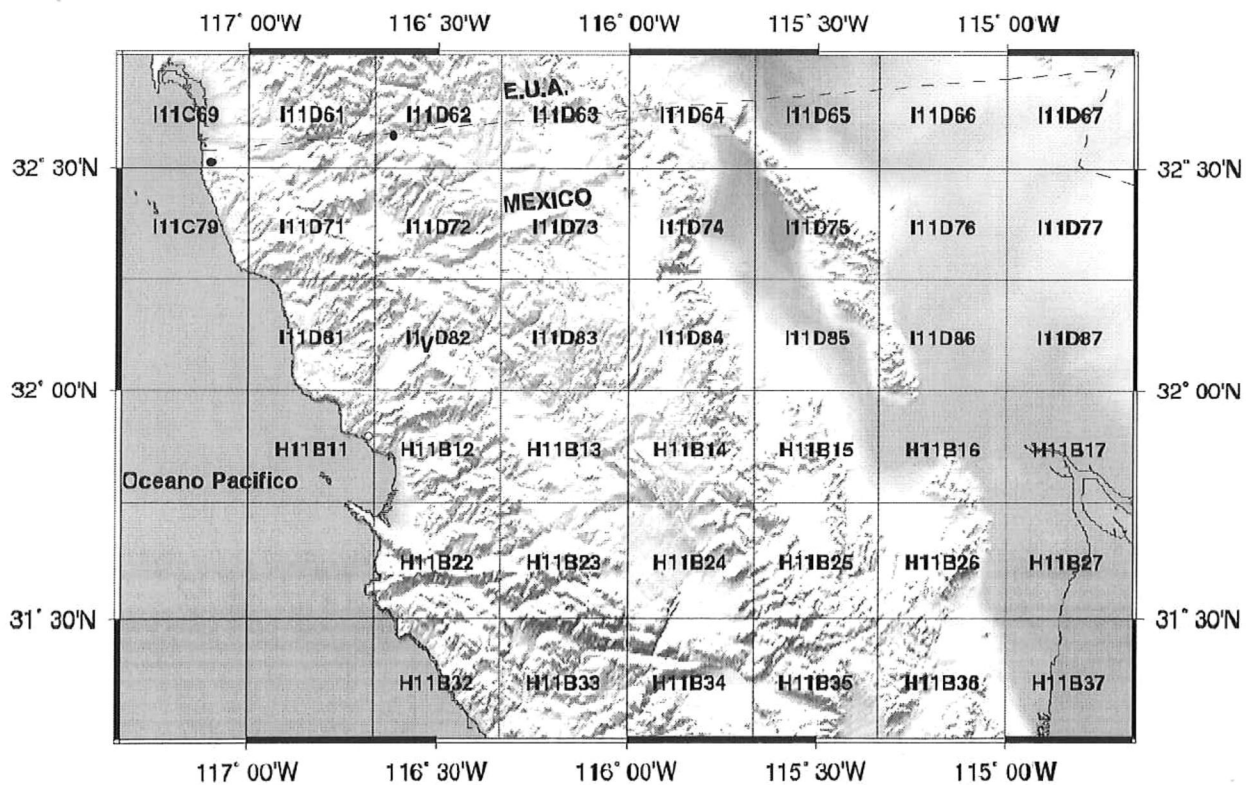


Figura 7. Claves de mapas topográficos, escala 1:50,000 del INEGI.

IV.2 Búsqueda de imágenes del Delta del Colorado en los archivos Landsat.

Se realizó una búsqueda de imágenes Landsat del Servicio Geológico de los E.U. (USGS) a partir de agosto de 1972 hasta agosto de 2002. El catálogo, que puede ser buscado en línea, contiene atributos de las imágenes como la fecha, el satélite (1 al 7), sensor (MSS, TM, ETM), e imágenes de muestra ("previews") de baja resolución que permiten inspeccionar la cobertura de nubes y la calidad de las mismas. Las imágenes muestra son compuestas en falso color con la combinación de bandas 5, 4,1 para las imágenes TM y la combinación 4, 3,1 para las MSS.

En la búsqueda de imágenes Landsat se procuraron imágenes de la misma fecha, o con fechas lo más cercano posible a lo largo de los diferentes pases. En la figura 8 se presenta el cubrimiento en el tiempo de la familia de satélites Landsat sobre la serie de tiempo de flujo del río Colorado de Estados Unidos a México medido en el sitio conocido como Lindero Norte, punto de entrega del agua de Estados Unidos a México.

Las imágenes se agruparon en una serie de tiempo con escenas de baja resolución que permitieron observar la evolución de los eventos de inundación en la zona de estudio durante el período de 1972 al 2002; y también ubicaron las fechas a adquirir que mostraran los escenarios de inundación extensiva, de sequía extrema y un escenario reciente de la zona del delta del río Colorado. Para la serie de tiempo se seleccionaron 157 imágenes muestra con las siguientes características: disponibilidad en línea con imágenes muestra, órbita y renglón dentro de la zona de interés, baja o nula cobertura de nubes.

Las imágenes fueron de fechas lo más cercanas posible, porque cuando se requirió que la escena que cubriese la región de estudio estuviera formada por un mosaico y no por una sola imagen, y no se encontraron con las mismas fechas, entonces se optó por la más cercana. Aquí hay que considerar que los satélites no cubren la región de estudio en un solo barrido la totalidad sino que tienen que pasar más de una vez con intervalos de 18 días para los satélites Landsat 1, 2,3 y 16 días para los Landsat TM, el mosaico resultante es una composición que muestra un momento en la dinámica del flujo hidrológico en la región. Para conservar registro de la composición de estos mosaicos se etiquetaron con nombres que incluyen el año, mes y día o días, que se utilizaron para conformar las escenas.

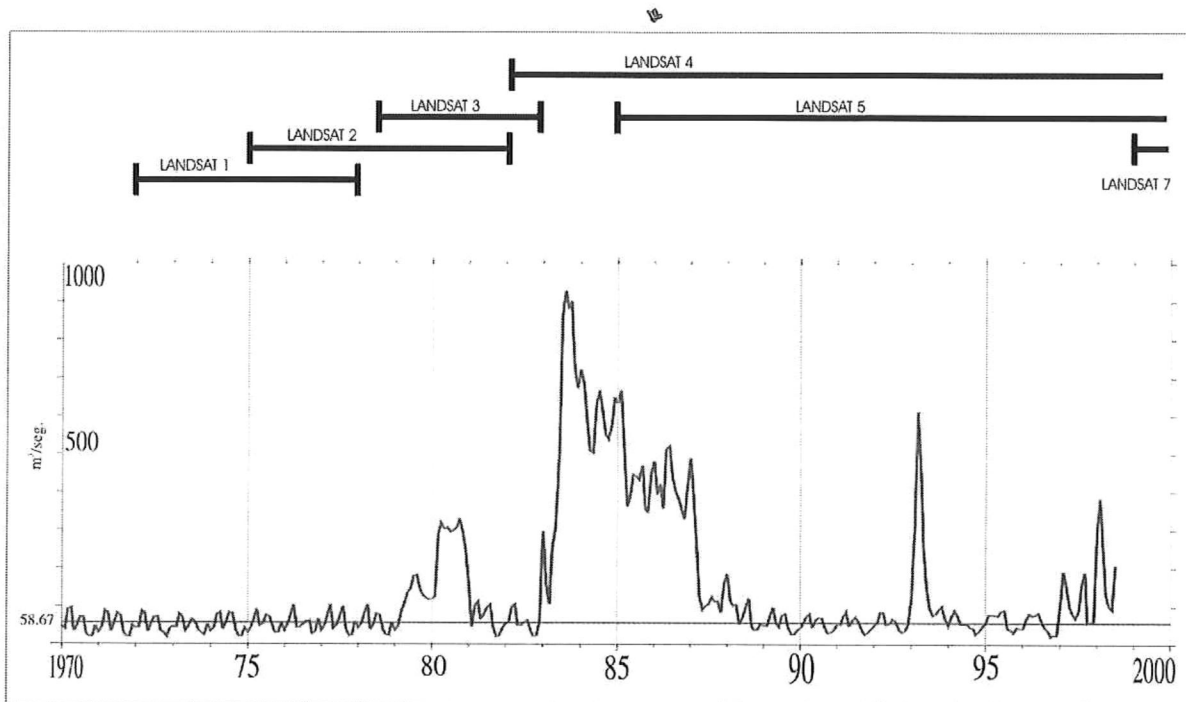


Figura 8. Serie de tiempo de 1970 a 1998 del flujo del río Colorado de EUA a México en m³/seg. La línea de 58.67m³/seg indica la cuota asignada a México, si esta fuera entregada a flujo constante. En 1972 se inició la observación sistemática de la tierra por los satélites Landsat, indicando arriba las vigencias y traslapes de operación. Los máximos en flujo están asociados a eventos de inundación de las planicies en el delta, registrados en las imágenes Landsat.

Una vez que se tuvo capturada la secuencia de imágenes muestra, se registraron utilizando como imagen objetivo al mapa base, identificando puntos geográficos constantes a través del tiempo, lugares como picos de formaciones montañosas, centros de áreas topográficas bien marcadas, y algunos cruces de carreteras con puentes. Estos puntos de control no fueron tan numerosos como los asignados a las cartas topográficas debido a la baja resolución espacial de las imágenes muestra.

Las imágenes ya registradas que abarcaran la región de interés, ya fueran solas o en mosaicos se cotejaron una por una contra el mapa base para corroborar su exactitud, se observó que los canales y las formaciones topográficas eran aceptables.

IV.3 Delimitación de zonas inundadas.

Cuando las imágenes están referidas a un sistema de coordenadas geográficas, es válido hacer estimaciones espaciales en las unidades del sistema utilizado, en este caso coordenadas UTM, cuyas unidades son en metros, entonces es posible medir áreas y distancias, asimismo hacer comparaciones de área.

Sobre las imágenes geo-referidas ya sea solas o sobre mosaicos contemporáneos, se delimitaron los polígonos de zonas que claramente se identifican como inundadas. Se trabajó sobre imágenes de muestra, excepto los años 1984, 1990 y 2002 en los cuáles se trabajaron las imágenes con la resolución espacial propias de Landsat TM (15 y 30 m.).

La digitalización de la zona de inundación para la imagen de 1984, se utilizó para definir lo que en adelante es el área de estudio (Figura 9), que comprende un polígono que incluye la máxima inundación registrada por imágenes Landsat más la zona riparia aledaña a ésta, extendiéndose hasta los diques de contención o bordos construidos a lo largo del cauce del Delta. Estos bordos fueron construidos para minimizar los daños en caso de inundación extrema. Esta zona indicada en la figura 9, se utilizó como área total en el análisis de las imágenes TM a resolución espacial propia del sensor de 30 y 15 m.

En el delineado de polígonos circundantes a las zonas inundadas, éstas se etiquetaron de acuerdo a la zona geográfica que cubren. Esto con el objetivo de definir históricamente la evolución y contribución de cada zona a la suma del área total para cada momento.

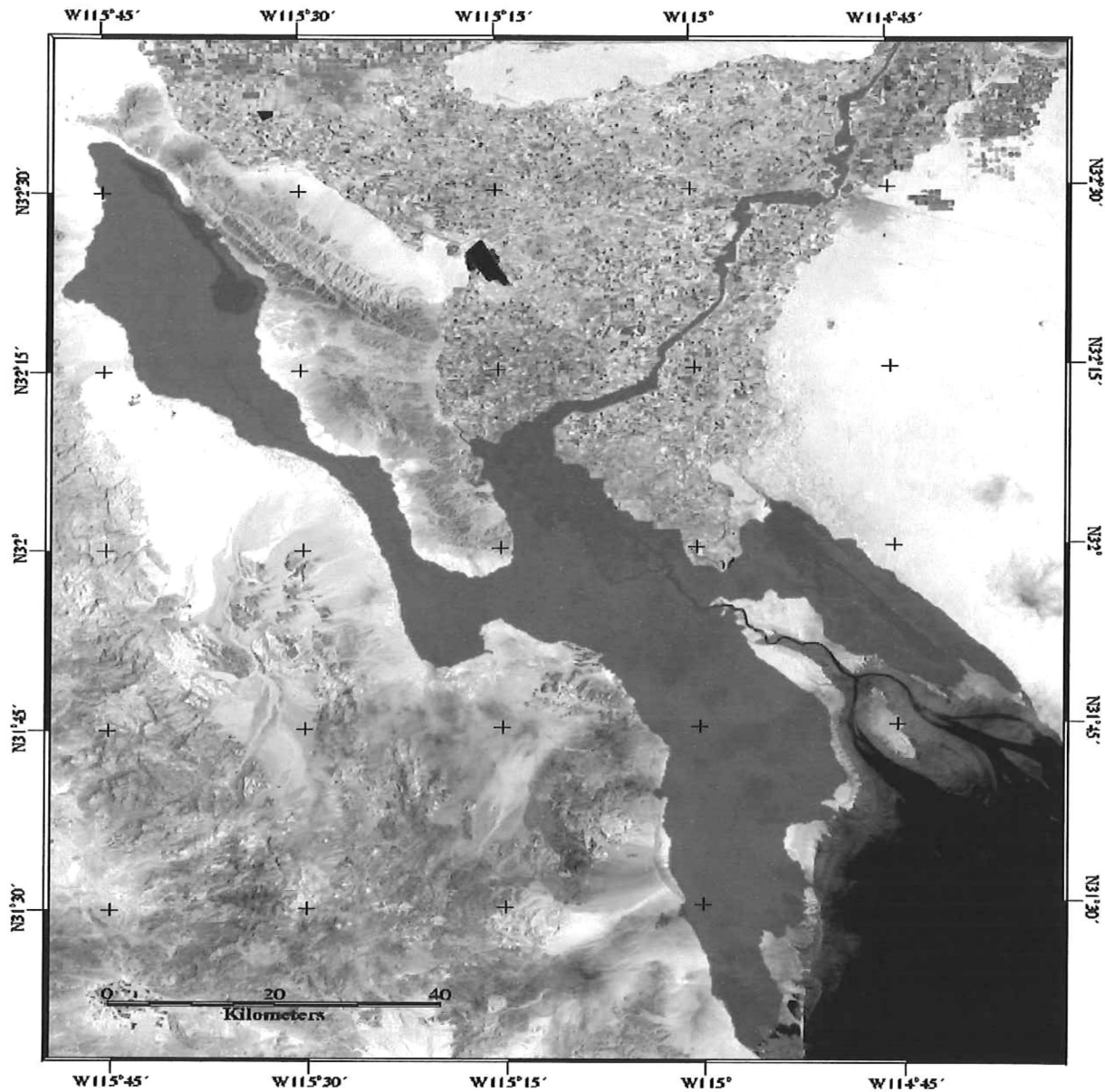


Figura 9. Área de estudio, indicada en azul sobre la imagen de mayo de 1990, utilizada para el análisis de las imágenes Landsat TM con resolución completa bajo los escenarios de inundación, sequía y reciente.

IV.3.1 Correlación de áreas inundadas y flujo del río Colorado de EUA a México de 1972 a 1998.

La digitalización de polígonos de inundación generó una tabla asociada con un total de 245 registros de áreas inundadas, estimadas en Km² de superficie (Anexo 3). A éstos registros de área inundada, se les calculó su valor promedio anual, y se les aplicó una prueba de ANOVA.

A los registros de flujo del río Colorado de EUA a México obtenidos de CILA (Anexo) se les dio el mismo tratamiento de etiquetado y prueba de ANOVA para obtener sus promedios anuales y así obtener dos listados de datos comparables entre sí. Tanto los promedios de áreas de inundación como los promedios de flujo se consideraron solamente el período de 1972 a 1998.

A las dos series de promedios (medias) se le corrió una regresión lineal, para saber la relación entre las dos variables, áreas inundadas como variable dependiente y flujo como variable independiente. Se utilizó una matriz de correlación no-paramétrica de Spearman, en la cuál la R (coeficiente de correlación) es reportado por omisión, asimismo esta prueba arroja una matriz de distribución de datos.

IV.4 Mapa de los humedales durante condiciones de inundación extensiva y sequía extrema

El segundo propósito de la búsqueda del catalogo Landsat, fue ubicar para su adquisición las imágenes TM mas representativas de las dos condiciones extremas, y así construir mosaicos con toda la región de interés con la resolución espacial propia de TM (30m).

Como se mostró en los antecedentes, las imágenes que cubren el Delta del Colorado, tienen las siguientes coordenadas de pase/renglón según el sistema WRS2: 39/37, 39/38, 38/37 y 38/38. Las imágenes multiescena es un término utilizado en el centro de datos del USGS EROS para ordenar dos ó más imágenes a lo largo del mismo pase, de la misma fecha (eg. 38/37 y 38/38). Además del beneficio de la misma fecha, tienen un costo reducido al ordenarse. Se procuraron imágenes con estas características en ambos casos a lo largo de los pases (38 y 39). Para la imagen de inundación extensiva se compraron cuatro imágenes Landsat TM, con fechas de 13 de abril y del 9 de junio de 1984 (Tabla IV); é imágenes de fechas 24 y 25 de mayo de 1990 (Tabla V) para la condición de sequía extrema. La cercanía en fecha (1 día) en los pases para el caso de sequía, se debe a que corresponden a diferentes satélites, uno es del Landsat 4 y el otro del 5.

Tabla IV. Lista de imágenes Landsat TM para escenario de Inundación en el delta del río Colorado.

Número de Identificación de la imagen	Fecha de Adquisición	Satélite	Pase	Renglón	Cobertura de nubes
5038038008416110	1984/06/09	5	38	38	0
5038037008416110	1984/06/09	5	38	37	0
5039038008410410	1984/04/13	5	39	38	1
5039037008410410	1984/04/13	5	39	37	0

Tabla V. Lista de imágenes Landsat TM para escenario de Sequía en el delta del río Colorado.

Número de Identificación de la imagen	Fecha de Adquisición	Satélite	Pase	Renglón	Cobertura de nubes
5038038009014510	1990/05/25	5	38	38	0
5038037009014510	1990/05/25	5	38	37	0
4039038009014410	1990/05/24	4	39	38	0
4039037009014410	1990/05/24	4	39	37	0

La elección de estas ocho escenas, cuatro para cada escenario se basó en la inspección visual del catálogo, que plasmaran las condiciones extremas y en una combinación de dos factores: cero porcentajes de cobertura de nubes y mayor cercanía entre las fechas disponibles para cada escenario. Para el caso de sequía, también nos apoyamos en los datos de flujo, buscando épocas persistentes con poco flujo de EUA a México

Cuando las imágenes para el escenario de inundación del 13 de abril y 9 de junio de 1984 (tabla VI), se cotejaron contra el mapa base y contra los vectores de INEGI de canales hidrológicos en la zona de interés, se observó un desplazamiento por lo que se realizó un ajuste al mapa base. Las imágenes fueron solicitadas al proveedor (USGS) con la proyección UTM, zona (11) del sistema de referencia (NAD27) del mapa base. Aún así fue necesario ajustar espacialmente las imágenes al mapa base.

Para hacer ésta corrección además de ubicar los puntos de control en los lugares estables como formaciones rocosas, se puso especial atención en definir puntos de control en los cruces de canales y de distinguir los canales activos de los secos, y de éstos con los caminos, lo cuál en la imagen TM por el tamaño de píxel y por la estación es posible confundir, ésta situación se corrige utilizando además los bordes entre rasgos.

Para el escenario reciente de la zona de estudio, se hizo una búsqueda en los archivos Landsat 7 ETM. Esta búsqueda abarcó un período de tiempo desde el 23 de abril de 2002 hasta el primero de octubre del mismo año, con requerimientos muy específicos: que la fecha correspondiera a una estación del mismo intervalo del estudio que se está llevando a cabo, que sea disponible a la venta (es decir que ya esté tomada, que no haya que ordenarla) y con un porcentaje de cobertura de nubes en la zona de estudio casi nulo.

Esta búsqueda dio como resultado un total de 35 imágenes que cumplían esos requisitos, aún entre ellas se seleccionaron dos opciones consideradas como óptimas, no sólo en la zona de estudio, sino considerándolas como futura fuente de información para otros trabajos (Tabla VI).

Tabla VI. Orden de pedido de Landsat para escenario 2002.

Fecha de Adquisición de la Imagen	Número de Identificación	Pase	Renglón	<u>Clasificación</u>	<u>Calidad de la Imagen</u>	Cobertura de nubes	Estación Receptora
2002/04/23	7039038000211350	39	38	Normal	99	0	EDC
2002/06/03	7038038000215450	38	38	Normal	99	0	EDC

A las imágenes se les aplicó un filtro pasa altas, para resaltar los bordes en zonas con contrastes o cambios en la cubierta terrestre. Para minimizar los cambios entre las imágenes de los diferentes pasos, se aplicó técnicas de balanceo de color entre imágenes vecinas, técnica también conocida como emparejamiento de histograma ("histogram matching").

IV.5 Estimaciones de áreas inundadas en condiciones de inundación extrema (1984), sequía (1990), y escenario actual (2002)

En esta sección se utilizaron las imágenes con resolución de 30m, propia de TM, a diferencia de los análisis hechos con imágenes muestra de baja resolución. Para estimar el área inundada en los diferentes escenarios y fecha reciente se procedió a elaborar una máscara ó región de interés que abarca todas las posibles áreas sujetas a inundación en la vecindad del cauce principal del río Colorado desde la frontera México-Estados

Unidos hasta la desembocadura en el Golfo de California. La zona está acotada por barreras topográficas naturales así como diques de contención como se observó en la figura 10.

El objetivo fue restringir los cálculos de áreas e índice de vegetación (NDVI) a las zonas con una influencia directa del río y enmascarar las áreas de cultivo y zonas urbanas en las llanuras naturales de inundación en la zona del Delta.

Para la detección de zonas inundadas se probaron varios métodos, entre ellos las técnicas de clasificación multiespectral, optando al final por el método de segmentación del histograma en la banda 5 de TM, utilizando diferentes umbrales en los distintos escenarios. Con esta técnica y bajo supervisión visual sobre compuestos en falso color donde se podía verificar corroborar que se delinearán las zonas inundadas.

La banda 5 (1.55-1.75 μm) en la ventana del infrarrojo medio, es sensible a variaciones de contenido de agua, ya sea en vegetación o como humedad en el suelo, la reflectancia disminuye conforme el contenido de agua se incrementa.

Para delinear el área de estudio, se tomó el mosaico de imágenes TM de 1984 utilizando la banda 5 y se trazó un vector dentro del cuál se sumaron los píxeles definidos como agua; los píxeles nulos, aquellos píxeles estimados como no-agua también se sumaron, y finalmente el total de ésta suma se multiplicó por el valor de la celda considerada en la imagen de 1984.

Inicialmente se probó un umbral de 40 para el año de 1984, que funcionó bien para el escenario de 1984; posteriormente se incrementó este umbral a 60 y 90 para los años de 1990 y 2002 respectivamente. La razón de utilizar varios umbrales para la estimación de agua es que un umbral de 40 permite estimar una cierta área de inundación, pero como se aprecia en las imágenes de los escenarios de 1984, 1990 y 2002 y sus totales correspondientes; hay una diferencia considerable tanto numérica como visual cuando ese umbral se incrementa el cual permite apreciar zonas con un menor contenido de agua. Sin embargo para comparar un área de zona inundada con otra de años diferentes, fue necesario utilizar el mismo umbral para establecer una comparación válida, para así distinguir un incremento o un decremento en área.

IV.6 Estimaciones cuantitativas de cobertura de vegetación por medio de Índices de Vegetación (NDVI)

Se calculó el índice NDVI solo sobre el área de estudio, apoyándonos en una máscara que excluye las áreas de cultivo, y demás zonas arriba del nivel topográfico de mayor inundación observada en 1984.

Los índices de vegetación (NDVI) para condiciones de sequía extrema (1990), inundación extensiva (1984) y escenario actual (2002) se calcularon con las bandas 3 (roja) y 4 (infrarroja cercano), utilizando la fórmula descrita en la sección de índices de vegetación. Del intervalo de valores posibles de NDVI, los cuáles varían entre -1 y +1 sólo se tomó los valores positivos porque son los que corresponden a zonas con vegetación detectable por medio de NDVI. Ésta serie de valores positivos no fue mayor de .7 en ninguno de los tres años. Los valores de NDVI se agruparon en 7 intervalos (Tabla VII).

Tabla VII. Clasificación de cubierta vegetal y su correspondiente intervalo de NDVI.

Intervalo de Respuesta a la vegetación	Intervalos de valores de NVDI
Muy Alta	0.6-0.7
Alta	0.5-.06
Media	0.4-0.5
Media	0.3-0.4
Media	0.2-0.3
Baja	0.1-0.2
Muy Baja	0-0.1

IV.7 Trabajo de corroboración de campo

Se llevaron a cabo salidas al campo con el fin de observar los diferentes tipos de vegetación presentes. Se hicieron recorridos en auto a lo largo del río Hardy y en la zona conocida como El Indio, también se recorrió en panga con motor eléctrico el humedal de Santa Clara cerca de la descarga del canal Welton-Mohawk. Estos recorridos se documentaron con fotografías (Figura 10) para observar las comunidades vegetales presentes y asociarlas de una forma general a los intervalos de NDVI.

En el humedal de Santa Clara se fotografió comunidades con predominancia de *Typha dominguensis* en sustrato inundado (A) y sustrato estable (B), pero con gran heterogeneidad de especies. En las áreas de ripario se fotografiaron comunidades con presencia de sauce (C) y comunidades con pino salado (*Tamarix ramosissima*), mezquite y álamo (*Populus fremontii*) (D). Aquí se vió presencia de especies animales como gallineta, el palmoteador y mapache; son lugares importantes como zonas de anidamiento y refugio para muchas especies.

También se visitó el cauce del río Hardy por la zona del campo Mosqueda y ahí se documentó la presencia de grandes extensiones de comunidades vegetales a lo largo de unos 20 Km. compuestas principalmente por pino salado (E). Asimismo se fotografiaron zonas con vegetación halófila o áreas desprovistas de ella conocidas como saladares en el sitio conocido como el "riñón" (F).

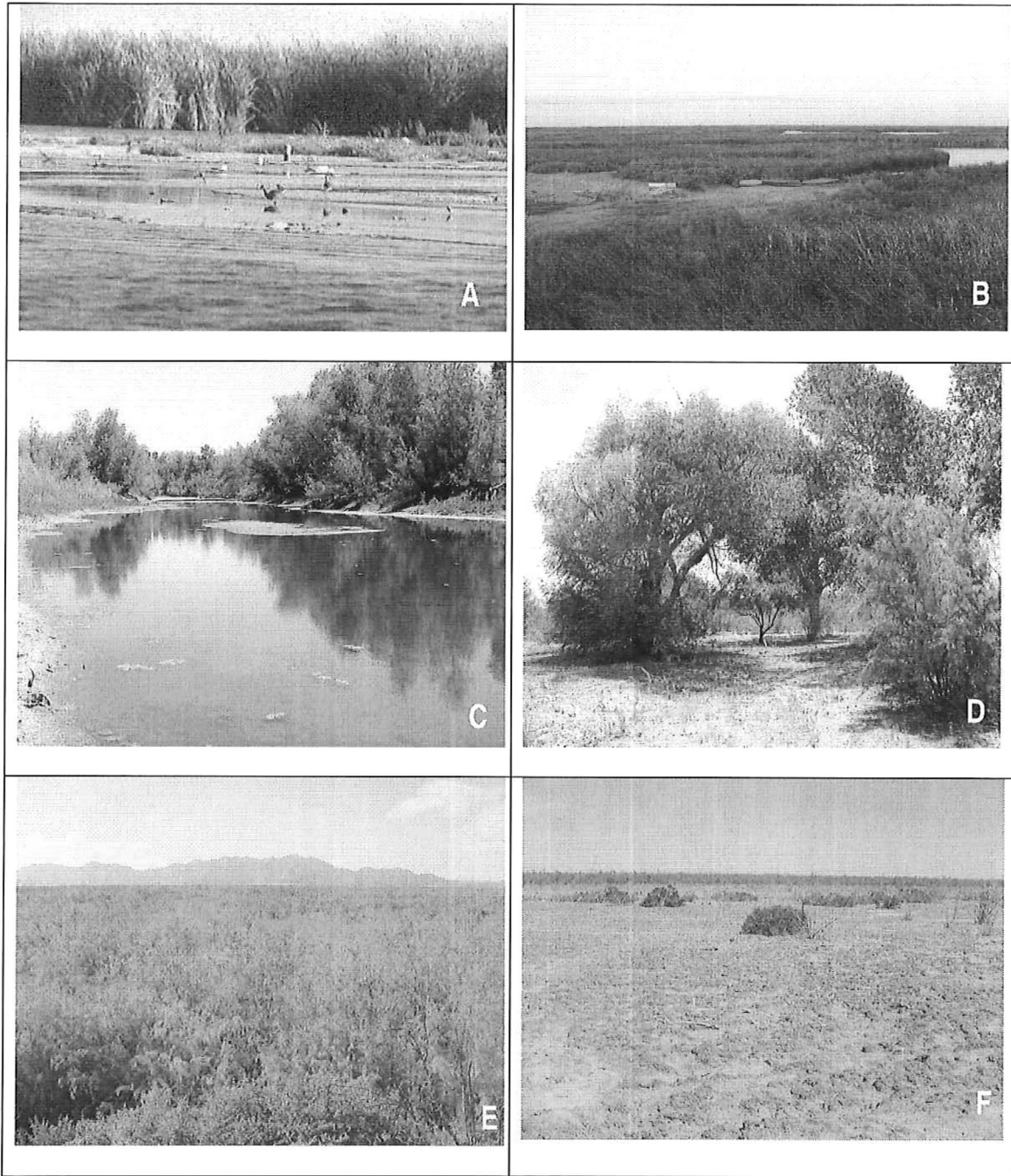


Figura 10. Fotografía de comunidades vegetales observadas en los visitas al campo en diferentes localidades en el delta del río Colorado. (A) y (B) Ciénega de Santa Clara, (C) río Colorado en la parte norte, (D) área de ripario del río Colorado por la zona del Indio, (E) áreas extensas de comunidades de pino salado (*Tamarix*) en la cercanía del humedal el indio viendo hacia el sur oeste con las montañas Cucapá de fondo; y (F) saladares en la parte al sur del delta del río Colorado cerca del "riñón".

V. RESULTADOS.

V.1 Imágenes Procesadas

Se construyó una secuencia a partir de imágenes muestra del catalogo Landsat para la zona del delta del río Colorado de 1972 al año 2002 formada por imágenes individuales y en mosaico. A pesar de haber una gran cantidad de imágenes almacenadas en archivo, el número de ellas que reúnen los requisitos para un estudio como éste es más limitado. Se llegó a un total de sesenta y tres escenas cuyas fechas se enlistan en el Anexo 1 y cuyas diferencias en su composición se describen en los siguientes incisos y se ilustran en la figura 11:

- A. Diecinueve de ellas en forma individual, este lote abarcó un período de tiempo de 1972 a 1982.
- B. Doce escenas en mosaico, formado por dos o tres imágenes para el período 1972 a 1983. Estas imágenes se geo-refirieron primero por separado y luego se integraron a un mosaico.
- C. Diecinueve escenas compuestas cada una por cuatro imágenes las cuales van de 1982 a 1999, en este caso se integraron primero a un mosaico y después se geo-referenciaron.
- D. Trece mosaicos formados por cuatro imágenes individuales de 1984 al año 2002, se corrigieron en forma individual las cincuenta y dos imágenes originales.

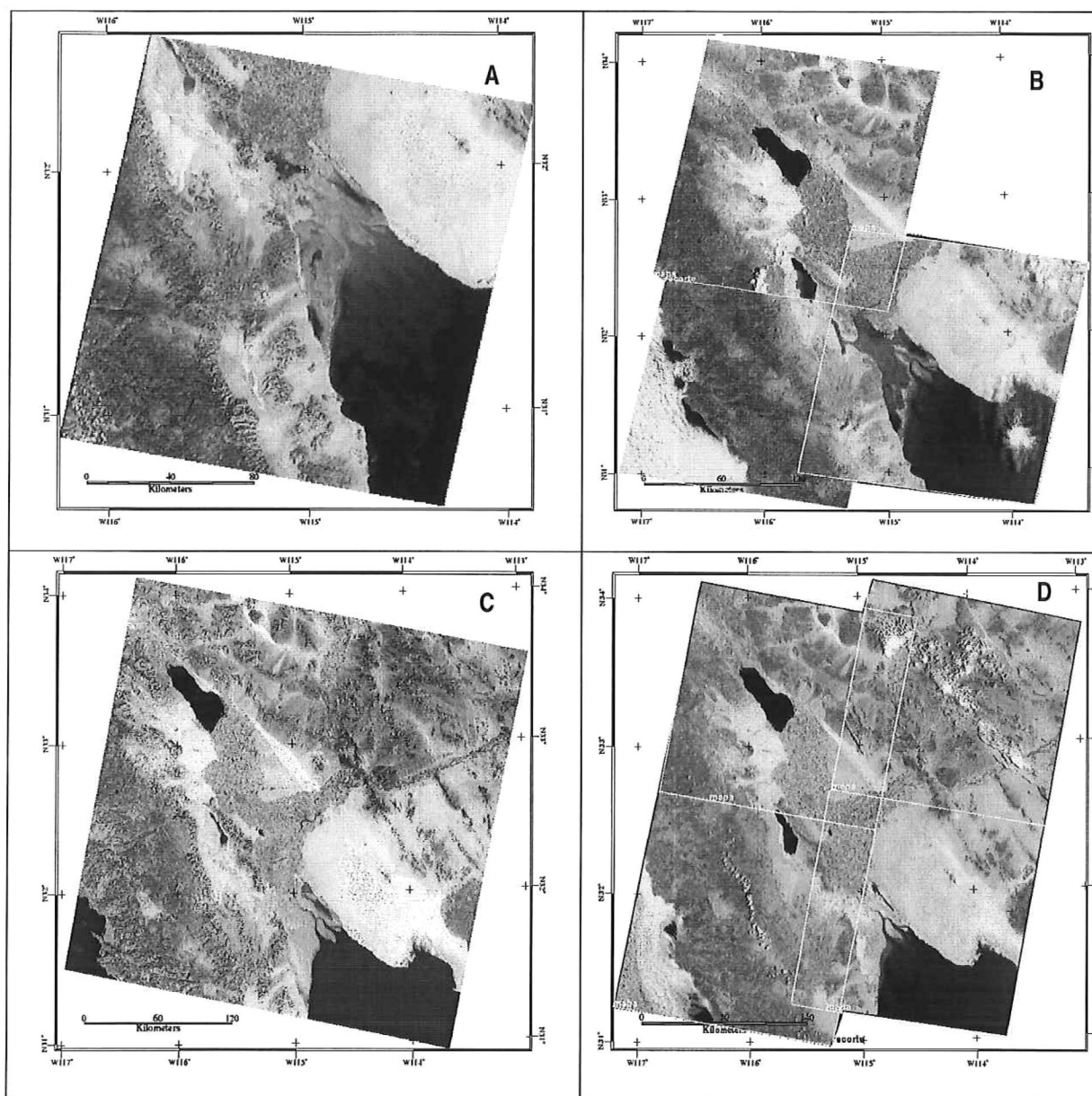


Figura 11. Ejemplo de cada uno de los tipos de escena donde se delimitaron las zonas de inundación: en A se muestra una imagen MSS de 5 de noviembre de 1972 por sí sola, en B un mosaico de imágenes MSS del 8 y 17 de julio de 1983, en C un mosaico elaborado a partir de imágenes TM de diciembre de 1997 y enero de 1998; y en D un mosaico de imágenes TM del 20 y 27 de junio de 1988.

V.2 Eventos de inundación 1972-2002

Apoyados con el sistema de información geográfica (SIG) arcview 3.2ª y sobre las 61 (N) distintas escenas geo-referenciadas del delta, preparadas a partir de imágenes muestra, individuales o en mosaico, se delimitaron las zonas recurrentemente inundadas de agosto de 1972 a agosto de 2002. Para evitar sesgos este proceso se hizo por una sola persona, por inspección visual de las imágenes y delineando en pantalla los polígonos circundantes. Cada polígono de zona inundada, se etiquetó con un código asociado al área donde se encontraba (Figura 12 y Figura 13).

Los identificadores asociados a cada zona son: río Hardy (1), Ciénega de Santa Clara (2), Laguna Salada (3), Salinas Ometepec (4), laguna de la plana geotérmica de Cerro Prieto(5). En los casos de inundación extensiva, cuando las distintas zonas se unieron formado una sola, ésta se etiquetó como (6). Cuando la Laguna Salada se encontraba inundada y parcialmente cubierta por las imágenes muestra, esta se etiquetó con el identificador 7.

Para cada escena se delinearono entre uno y cinco humedales, generando un total de 245 polígonos de zonas inundadas con su correspondiente tabla de atributos. Los atributos que caracterizan a cada polígono son: código de zona inundada (anteriormente descrito), área del polígono en m², perímetro en metros, fecha de la escena (individual o mosaico), un tiempo asignado en años y fracción de año, y una referencia al archivo de SIG que contiene los polígonos (Anexo 2).



Figura 12. Mosaico de imágenes MSS de 1973-07-15y16.

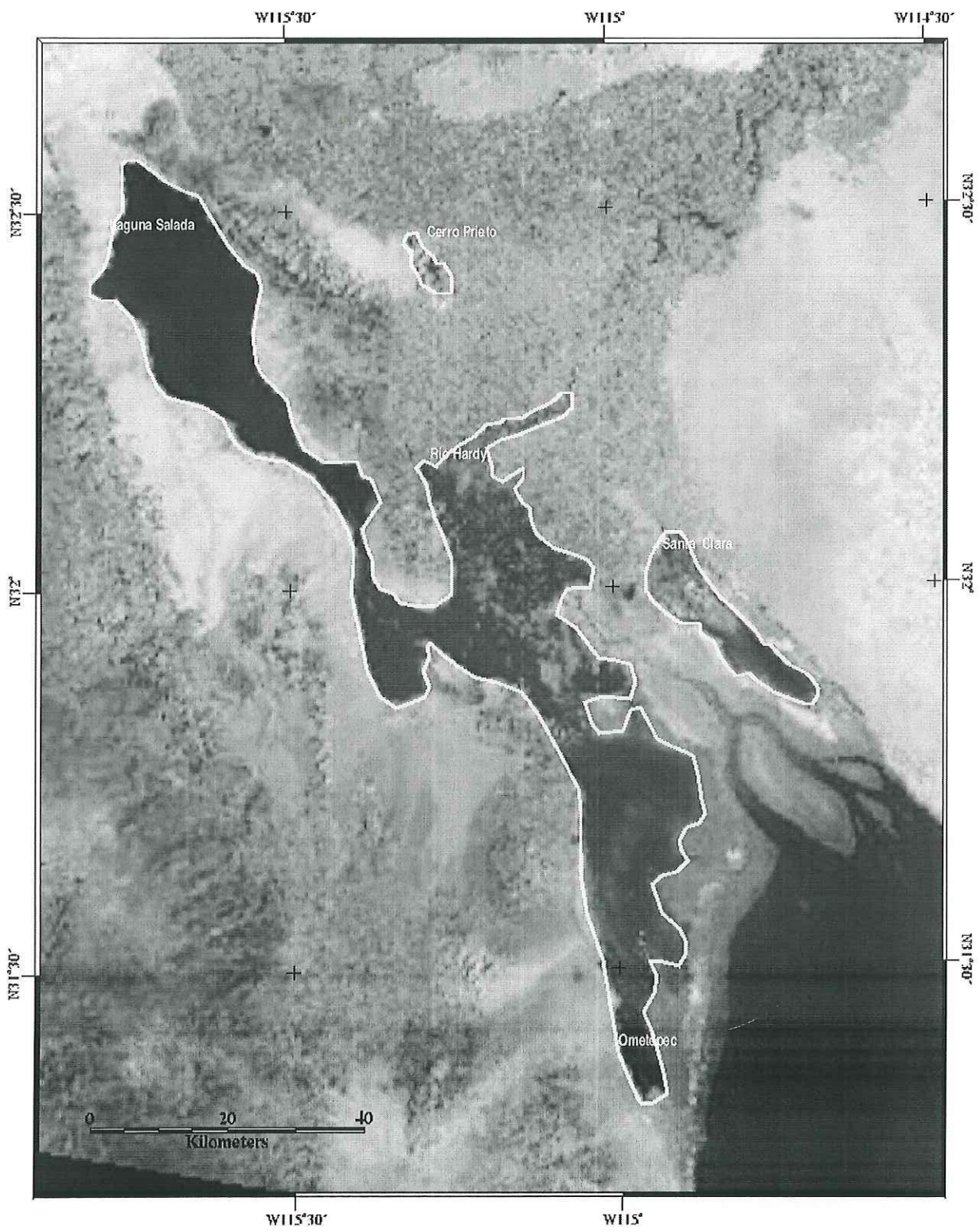


Figura 13. Mosaico de imágenes TM de abril de 1985-03 donde se muestran polígonos con la ubicación de las áreas recurrentemente inundadas del delta del río Colorado.

El tiempo asignado se preparó para graficar las áreas inundadas como serie de tiempo, calculando la fracción del año a partir del cociente del día juliano correspondiente a la fecha de la escena y 365 días /año. Para los mosaicos integrados por imágenes con fechas cercanas, se asignó un tiempo (día juliano) central entre las diferentes fechas que integran el mosaico.

En la figura 14 se muestra las 245 áreas medidas de las zonas inundadas del delta como serie de tiempo, indicando en color la contribución de cada zona y sin color de relleno la suma de todas ellas. Para mostrar la estrecha relación de zonas inundadas con el flujo del río Colorado, se graficó el flujo de éste medido en el lindero norte en m³/seg. Como se puede observar el año 1984 fue el que registró una inundación en un área más extensa mientras que el año con menor extensión de área inundada fue 1990, y en el año 2002 la extensión de la inundación no se redujo tanto como en 1990.

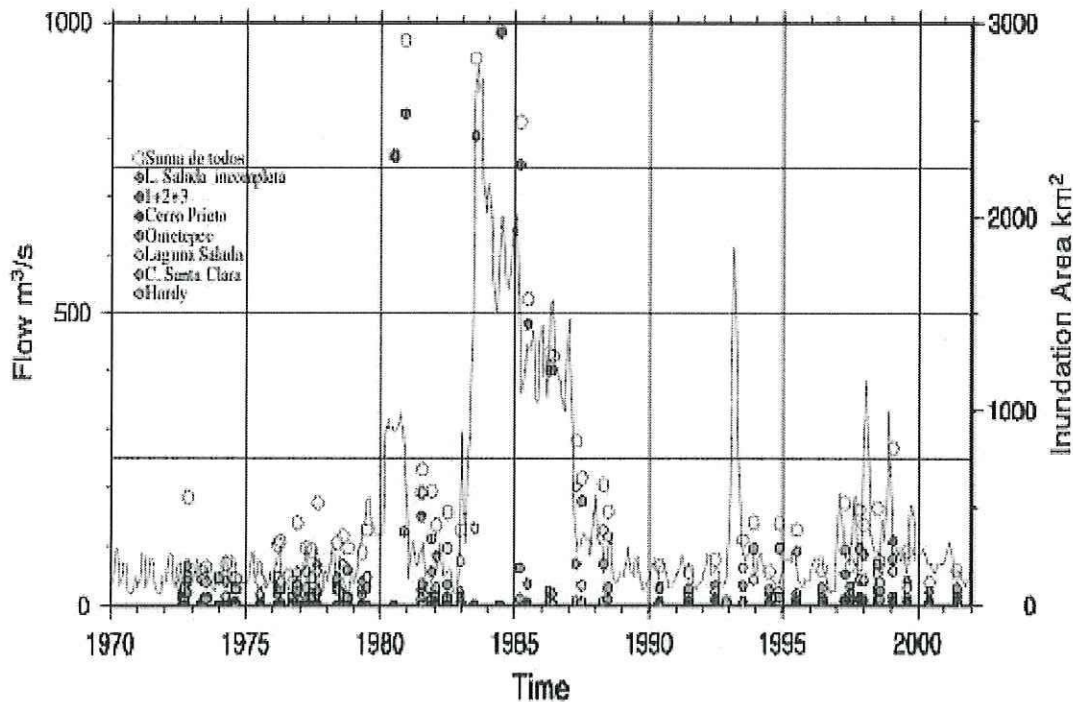


Figura 14. Áreas inundadas de 1972 a 2002, el flujo se indica en la línea roja continua, la etiqueta 1+2+3 significa que todas las zonas fueron inundadas formando una sola.

V.2.1 Estadística de eventos de Inundación

El propósito del análisis de varianza ANOVA es probar diferencias significativas entre medias comparando sus varianzas. Bajo la hipótesis que la varianza estimada dentro de la variabilidad de un grupo de datos debería ser la misma que aquella varianza entre grupos de datos (STATISTICA Versión 6).

Se aplicó un análisis de varianza ANOVA a los datos de flujo del río Colorado contra las medias anuales de las áreas de inundación en el delta para mostrar si existía dependencia entre sus varianzas. La regresión que se aplicó a las dos series de medias, mostró que existe una alta dependencia de las áreas inundadas del delta con respecto al flujo del río Colorado medido en el lindero norte en m³/seg (Figura 15).

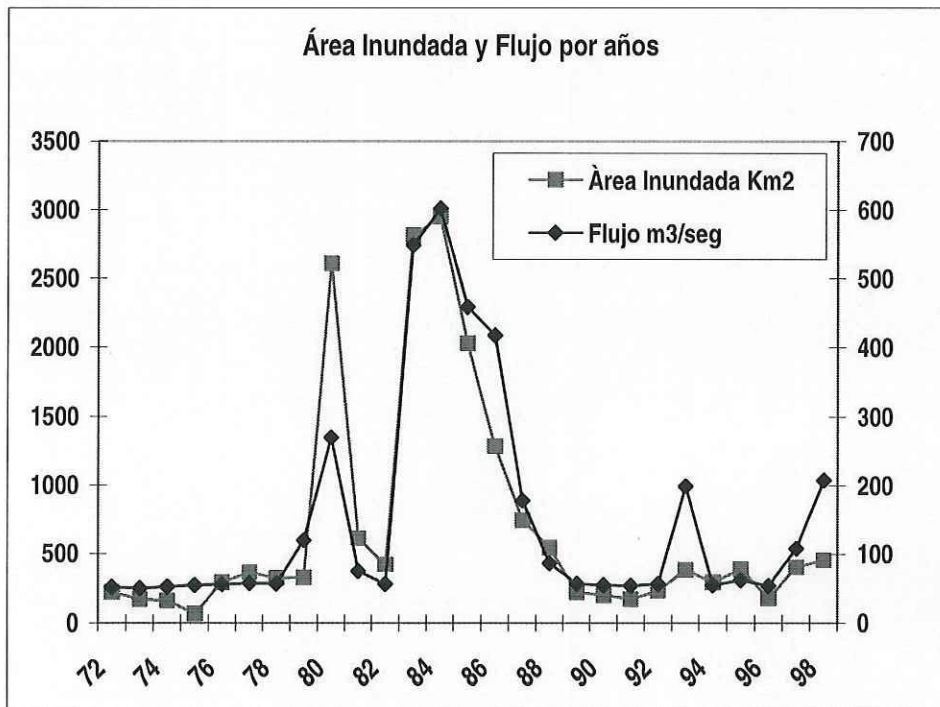


Figura 15. Gráfica de dos ejes para mostrar la relación entre la cantidad de flujo del río Colorado y la superficie de áreas inundadas de 1972 a 1998

En la figura 16 se puede observar la distribución de los valores residuales de las frecuencias esperadas contra las frecuencias observadas, esto considerando un intervalo de confianza de 95%; y se observa que caen dentro del límite de confianza excepto por aquellos valores dentro des años con valores de flujo excesivo. Una

prueba de significancia esta basada en la asunción de que la distribución de los valores residuales, por ejemplo las desviaciones de una regresión lineal, para una variable dependiente y sigue una distribución normal y que la variabilidad de los residuales es la misma para todos los valores de las variables independiente x (STATISTICA Versión 6).

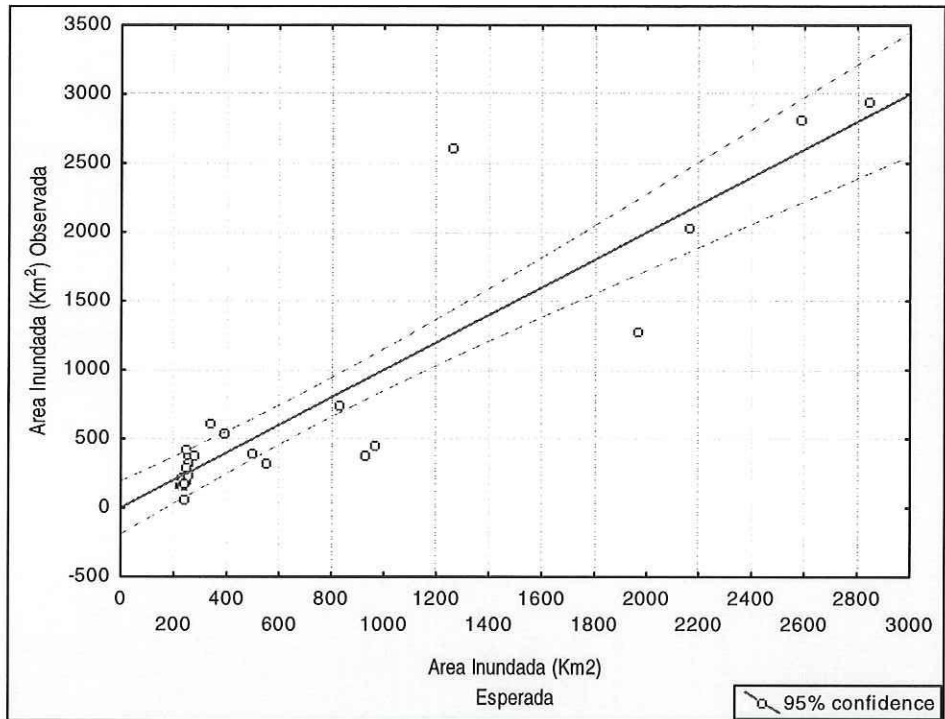


Figura 16. Gráfica con los 245 datos de área durante 30 años, se llevó a cabo una correlación entre áreas observadas y esperadas utilizando valores residuales y se obtuvo un resultado de $r=0.912088$.

V.2.2 Estimación de área inundada en años de inundación extensiva (1984), sequía prolongada (1990), y escenario actual (2002)

Las estimaciones de áreas inundadas a partir de umbrales en la banda cinco se pueden observar en la tabla VIII, el área de máxima inundación registrada en el período de este trabajo se observó en el mosaico de imágenes TM a resolución espacial de 30 m. de 1984, con un total de 2499.1596 Km² a un umbral de 40, lo cuál representó el 85% del total del área de estudio y solo un 15% de área libre de inundación.

En el mosaico de imágenes TM de 1990 el área total inundada fue de 38.4950 Km², lo que representó el 1% del total del área de estudio, y el 99% de áreas no-inundadas. En el 2002 las áreas de inundación se estimaron en 49.4859 Km² con el mismo umbral de definición para agua lo que representó el 2% del área de estudio y 98% de área libre, pero como se puede ver siguen siendo muy bajas en relación a 1984. Los porcentajes prácticamente se invierten entre 1984 y 1990.

Tabla VIII. Porcentajes de Inundación con tres umbrales para definición de agua. Se remarcan en negritas los umbrales que visualmente se apegaron mejor a las zonas de inundación en cada año.

	Umbral de Agua	Área de Inundación en Km ²	% de Area de Inundación	Área de No-Inundación en Km ²	% de Área de No-Inundación
1984	40	2499.1596	85	450.3339	15
	60	2581.4796	88	368.0139	12
	90	2686.1906	91	263.3030	9
1990	40	38.4950	1	2910.9986	99
	60	72.7644	2	2876.7292	98
	90	125.6680	4	2823.8255	96
2002	40	49.4859	2	2900.0076	98
	60	91.1496	3	2858.3440	97
	90	305.0222	10	2644.4713	90

V.3 Estimaciones de cobertura vegetal por medio de NDVI.

Los tres mosaicos de imágenes con datos completos sirvieron para calcular los NDVI de cada escenario y de esta forma estimar la distribución de la cobertura vegetal en el delta del Colorado: 1984 para mostrar un escenario con el flujo máximo, 1990 con el mínimo y 2002 para estimar un escenario reciente.

Se consideraron las opciones para clasificar la cobertura vegetal y se empezó una clasificación no-supervisada la cual funcionó para etiquetar comunidades vegetales sin embargo existía confusión de clases y se decidió no continuar con esta técnica. La información obtenida fue una herramienta de apoyo para proponer más adelante que comunidades se encontraban en las áreas de los diferentes intervalos de NDVI junto con la información proporcionada por fotografía aérea y observación directa.

Las estimaciones de cobertura vegetal (NDVI) para cada año se separaron en siete intervalos (Tabla IX); esto se hizo para poder comparar las áreas que ocupan los distintos intervalos. En 1984, 1990 y 2002 los intervalos de NDVI de menor porcentaje fueron aquellos con valores >0.5 , en tanto que los de mayor proporción fueron aquellos <0.3 . Como se puede apreciar en la tabla IX, en 1984 el área con un NDVI mayor que cero, que representa la suma de los siete intervalos fue 140.1855 Km^2 equivalente al 5% del área total de estudio la cuál fue la menor área estimada, esto se debió también a que el 85% del área se encontraba sumergida; en los años 1990 y 2001 las áreas correspondientes a cada intervalo fueron 213.3674 y 194.3291 Km^2 respectivamente, ambas dieron el mismo porcentaje de 7% de cobertura vegetal con respecto al total del área de estudio de 2949.4935 Km^2 (Figura 17).

Aún cuando los porcentajes totales de cobertura vegetal para 1990 y 2002 sean iguales, los totales de área para cada intervalo si se modificaron en ese período de tiempo (Tabla IX). El intervalo más alto de $0.6-0.7$ experimentó un constante decremento en cada año y el intervalo de $0-0.6$ subió en cantidad de área de 1984 a 2002, aún cuando todo éste intervalo de $0.4-0.7$ siguió representando 0% en el total de valores de NDVI. El único intervalo que exhibe un constante aumento en área es que va de $0.1-0.2$ (Figura 18).

Tabla IX. Totales de cobertura vegetal en Km² para los intervalos de NDVI durante 1984, 1990 y 2002, con porcentajes correspondientes y los cambios observados en cantidad y en proporción.

Vegetación dominante propuesta en base a observación directa	Intervalos de NDVI	Áreas expresadas en Km ² (% del total de la cobertura vegetal)			Observaciones: Cobertura Vegetal / % de NDVI
		1984	1990	2002	
Semiacuática					Menor
(<i>Typha</i> ; zona inundación)	0.6-0.7	0.1350 (0 %)	0.0813 (0)	0.0171 (0)	Igual
Semiacuática; (<i>Typha</i> ; zona sustrato estable)	0.5-0.6	0.3682 (0 %)	.8126 (0)	0.1600 (0)	Menor
Ripario Sauce (<i>Salix gooddingii</i> var. <i>vallicola</i>)	0.4-0.5	2.3072 (2 %)	4.3781(2)	0.467 (0)	Igual
Ripario, Sauce-Álamo (<i>Salix-Populus</i>)	0.3-0.4	7.8266 (6 %)	10.0532 (5)	3.0810 (2)	Menor
Pastizal heterogéneo (<i>Distichis</i>) con <i>Typha</i>	0.2-0.3	15.7852 (11 %)	26.3609 (12)	16.4236 (8)	Mayor
Pino salado (<i>Tamarix ramosissima</i>)	0.1-0.2	36.0296 (26 %)	58.8713 (28)	64.0469 (33)	Menor
Halófila y/ó mezquite	0-0.1	77.7338 (55 %)	112.8.01 (53)	110.1335 (57)	Mayor
Suma 7 intervalos NDVI		140.1855 (5%)	213.3674 (7 %)	194.3291 (7 %)	
Total Área de No-Vegetación		2809.3080 (95 %)	2736.1261 (93 %)	2755.1645 (93 %)	
Total Area Estudio		2949.4935 (100 %)	2949.4935 (100 %)	2949.4935 (100 %)	

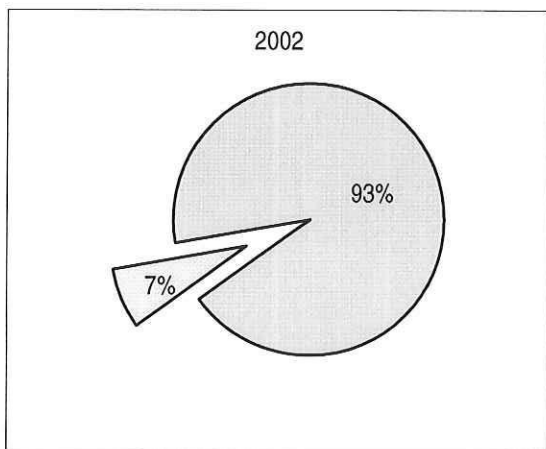
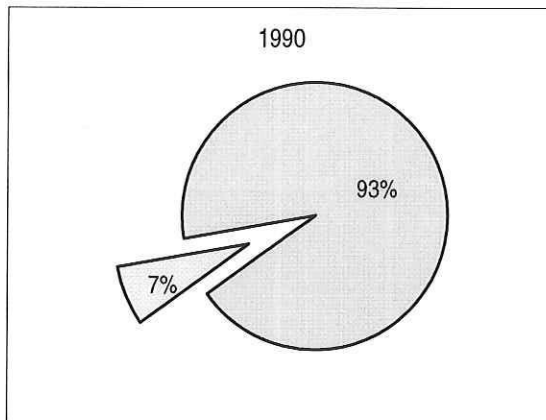
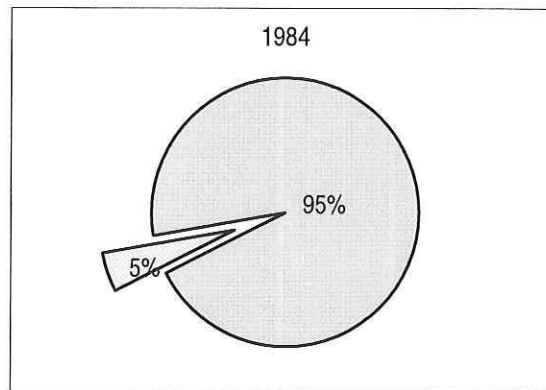


Figura 17. Porcentajes de áreas sin ninguna cobertura y áreas con cobertura con valores de NDVI > 0 con respecto al total del año de interés.

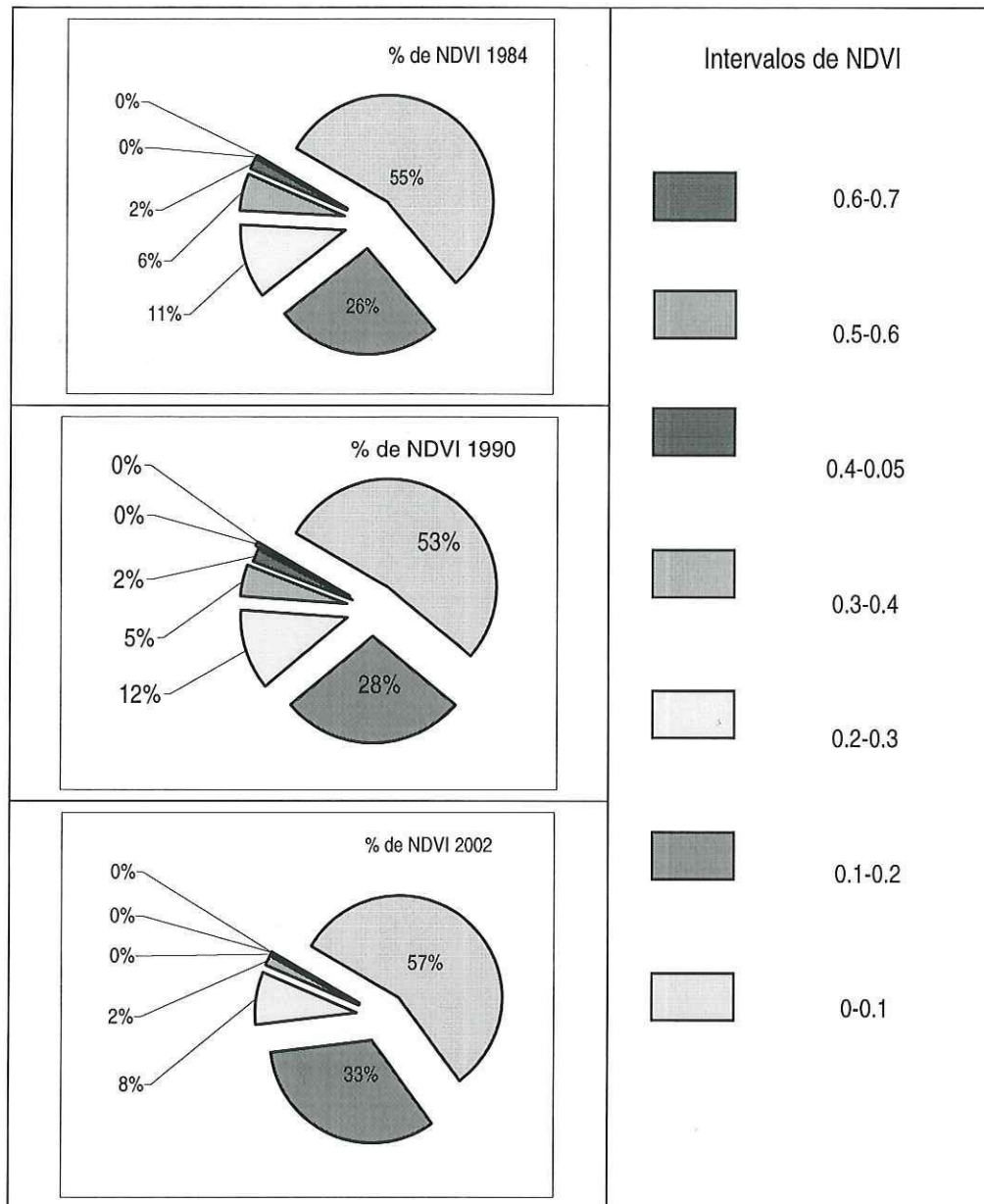


Figura 18. Porcentajes de intervalos de NDVI para los años con diferentes escenarios de inundación en el delta del río Colorado.

Para proponer comunidades vegetales a los diferentes intervalos de NDVI de una forma general se comparó las imágenes de NDVI obtenidas con las fotografías tomadas en los recorridos de campo, con la clasificación no-supervisada y con la fotografía aérea de las mismas áreas. Se observó que las áreas más cerca a las fuentes de agua correspondieron a los intervalos de NDVI arriba de 0.5, y conforme se alejan de ésta zona los valores de los intervalos de NDVI disminuyen. Asimismo hay que considerar que el año de 1984 tuvo la mayor parte del área de estudio cubierta por agua; la vegetación que se pudo estimar se encontraba en las orillas y como emergente por lo que las observaciones de áreas con NDVI se hicieron sobre los años de 1990 y 2002.

A lo largo del río Hardy fue dónde se observaron comunidades con pino salado en mayor proporción, aquí también los intervalos de NDVI con los valores más altos se encontraban junto a la fuente de agua y disminuían conforme se alejaban de ella. En el mosaico de 1990 se ve un corredor a lo largo del río Hardy formado con áreas de los intervalos entre 0.5-0.2, con las áreas más alejadas del río en los intervalos de NDVI < 0.2-0 (Figura 19). En el año de 2002 ya no observa el corredor formado por las área entre 0.5-0.2 junto al río Hardy sino que se observan valores entre 0.2 y 0.3 en la zona del Indio, en menor cantidad y más agrupados (Figura 20). En las visitas a las áreas junto al río Hardy por el lado del campo Mosqueda se observó comunidades de pino salado y vegetación halófila, formando desde áreas heterogéneas hasta zonas donde la vegetación es muy densa y compuesta casi exclusivamente por pino salado, y que esas áreas correspondían a los intervalos <0.2.

La manera como se distribuyeron los intervalos de NDVI en el extremo norte de la ciénega de Santa Clara donde desemboca el canal Welton-Mohawk, durante 1990 se puede observar en la figura 21. Las áreas con valores altos de NDVI correspondieron a zonas con comunidades de tule (*Typha dominguensis*) en áreas inundadas y aquellas con valores bajos a comunidades de *Typha* en sustrato estable. También se observó que había en esas comunidades otras especies como carrizo, sin embargo la especie más abundante fue la *Typha*. En la figura 22 muestra como esos mismos intervalos de NDVI se modificaron en 2002, los valores altos de NDVI se redujeron en área y aumentó la proporción de los intervalos de valores bajos. En los intervalos >0.1 se observó que eran la vegetación eran saladares con halófilas o suelos desnudos, y en las orillas cercanas al doctor se observó presencia de pino salado.

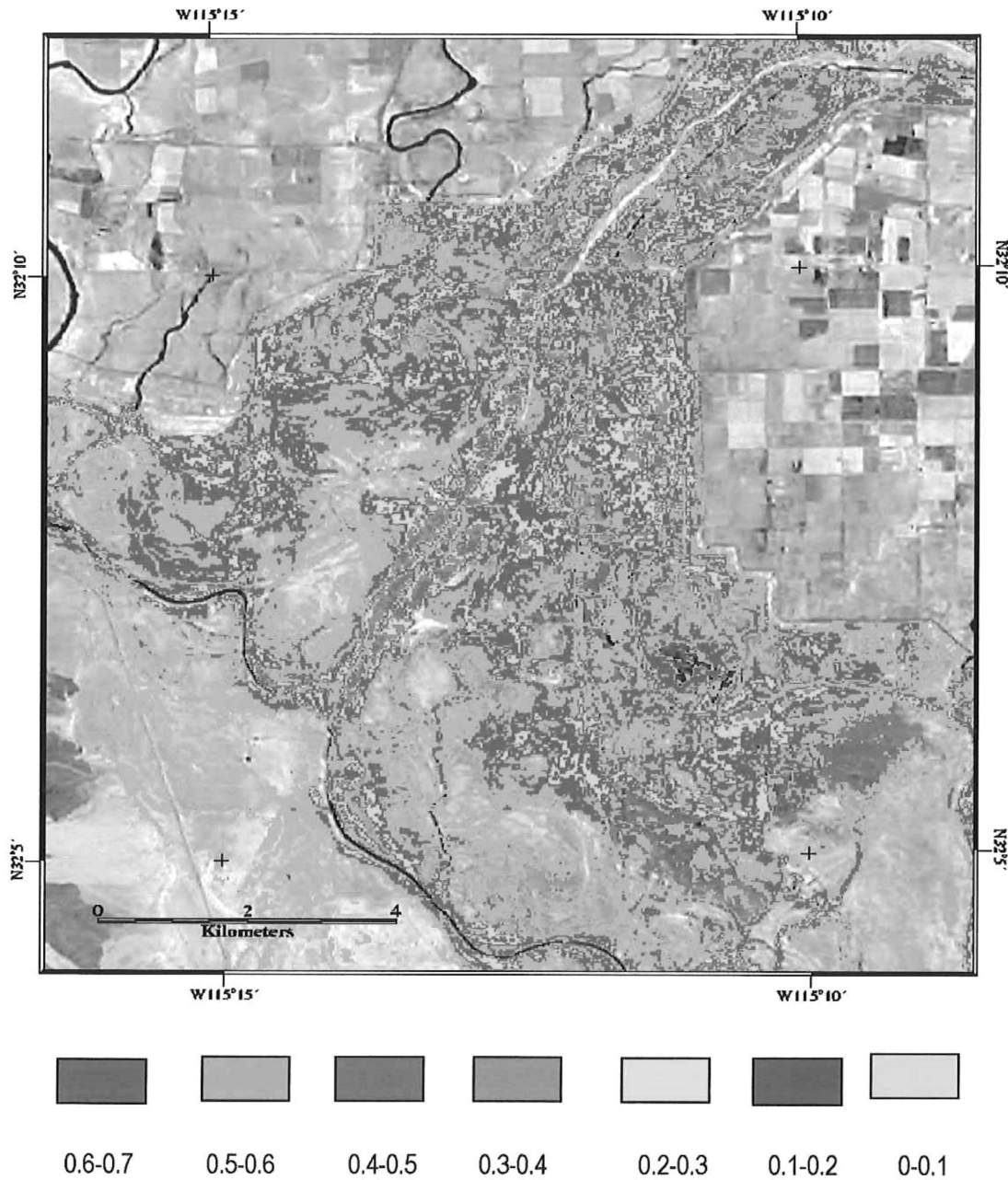


Figura 19. Distribución de los intervalos de índices de vegetación NDVI en la confluencia del río Colorado y río Hardy en mayo de 1990.

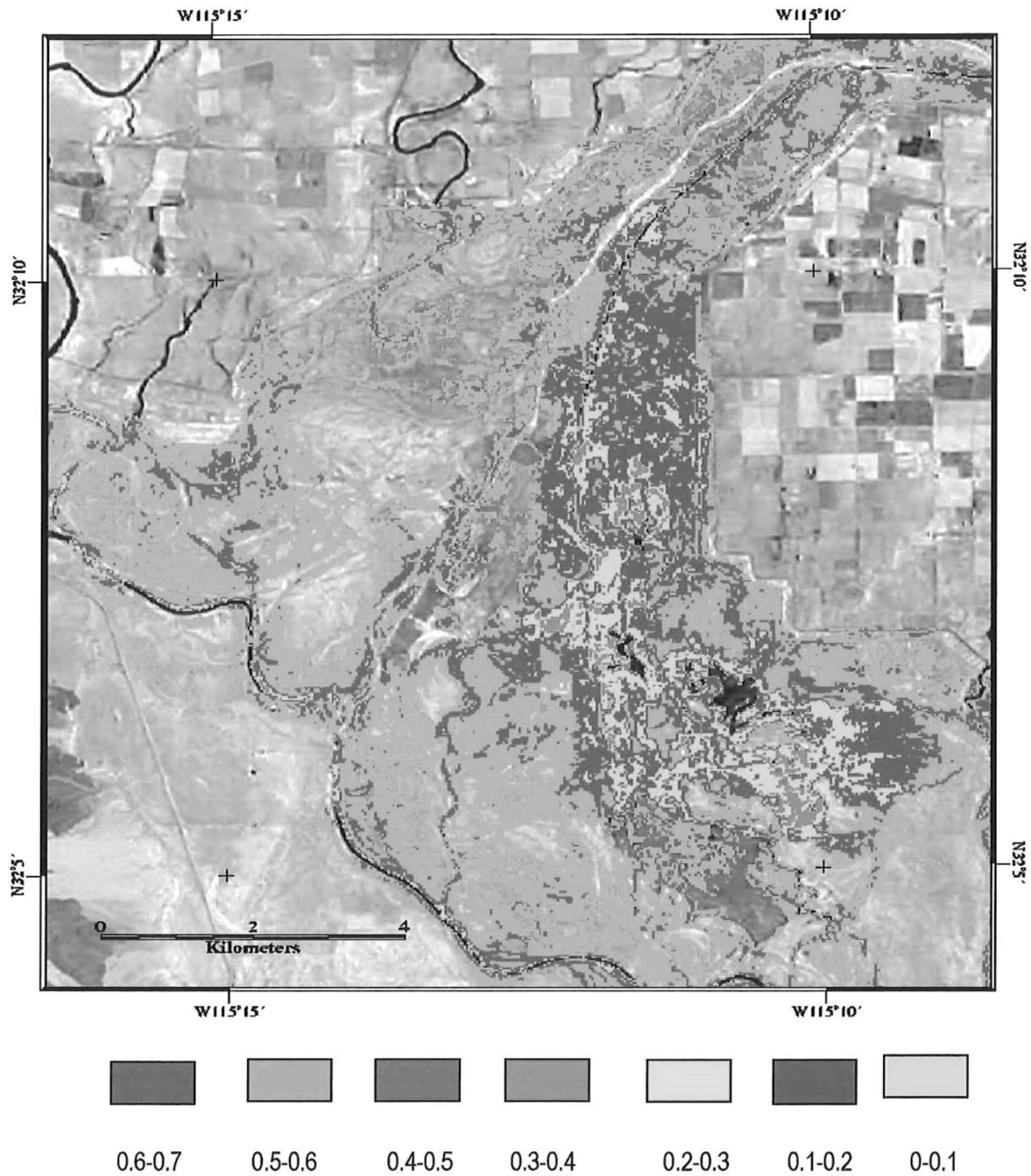


Figura 20. Distribución de intervalos de NDVI en la confluencia del río Colorado y río Hardy en junio de 2002.

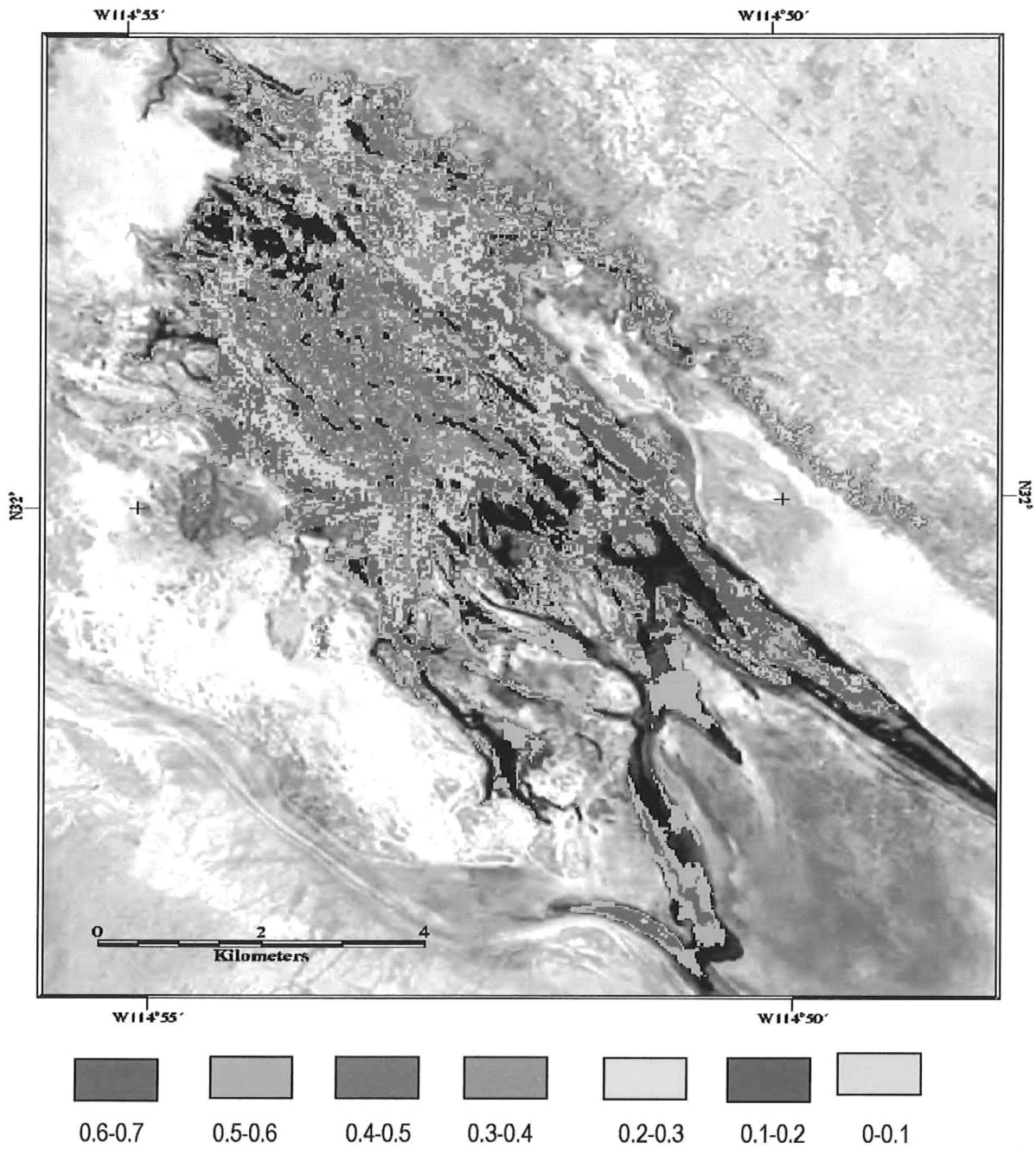


Figura 21. Intervalos de NDVI de las comunidades vegetales en la Ciénega de Santa Clara correspondientes al 25 de mayo de 1990.

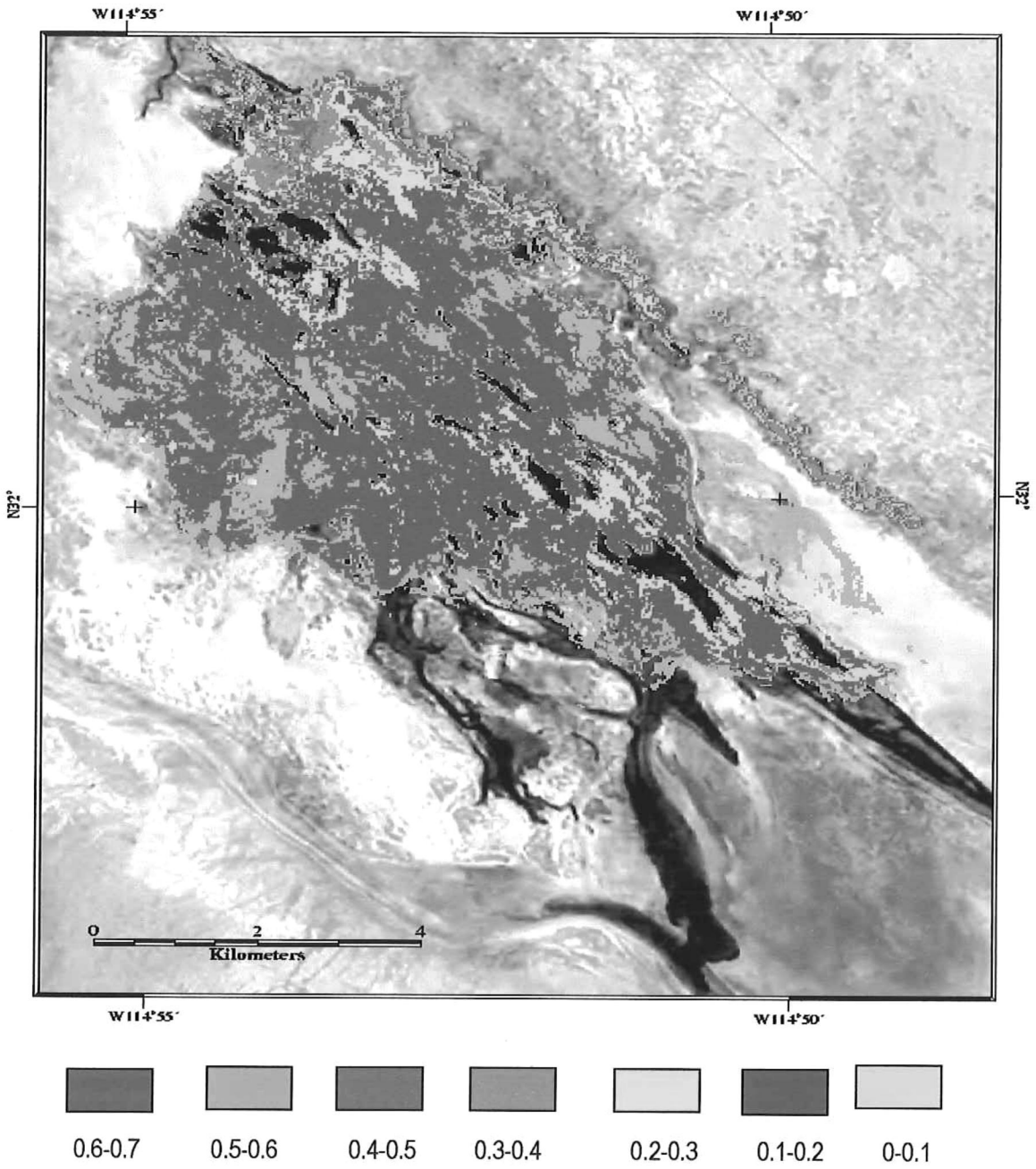


Figura 22. Intervalos de NDVI de las comunidades vegetales en la ciénega de Santa Clara correspondientes a 3 de junio de 2002.

V.4 Estimaciones de NDVI combinado con cantidad de área de no-vegetación é inundadas.

Como se aprecia en la tabla X con este arreglo de capas en el algoritmo utilizado para la estimación, las cantidades dan resultados iguales para los 3 años en cuanto a intervalos de NDVI, lo que se modifica es el área estimada como agua a consecuencia del cambio en el umbral aplicado. Este cambio afecta también la cantidad total del resto del área, aquella tomada como no-NDVI y no-agua y que está en la parte inferior del algoritmo (Figura 23).

En 1984 las zonas inundadas sumaron 84% del área de estudio y el resto calculado como NDVI o como ninguno de los dos anteriores dieron un porcentaje de 11%. Al incrementarse este umbral a 60 y a 90 el resto del área que sí no es agua, no es vegetación se redujo a un 7%.

En los años de 1990 y 2002 la cantidad de área inundada nos presentó un escenario completamente diferente. En 1990 el área que no esta inundada y no tiene valores de NDVI >0 nos dio un porcentaje de 92%, el cuál al incrementar el umbral para agua a 60 se reduce a 91%, y si lo aumentamos a 90 se va a 90%. Para 2002 tenemos un cambio más marcado del porcentaje de este tipo de cobertura, se va de 92 a 90 y luego a 86% cuando se incrementa el umbral de 40 a 60 y luego a 90.

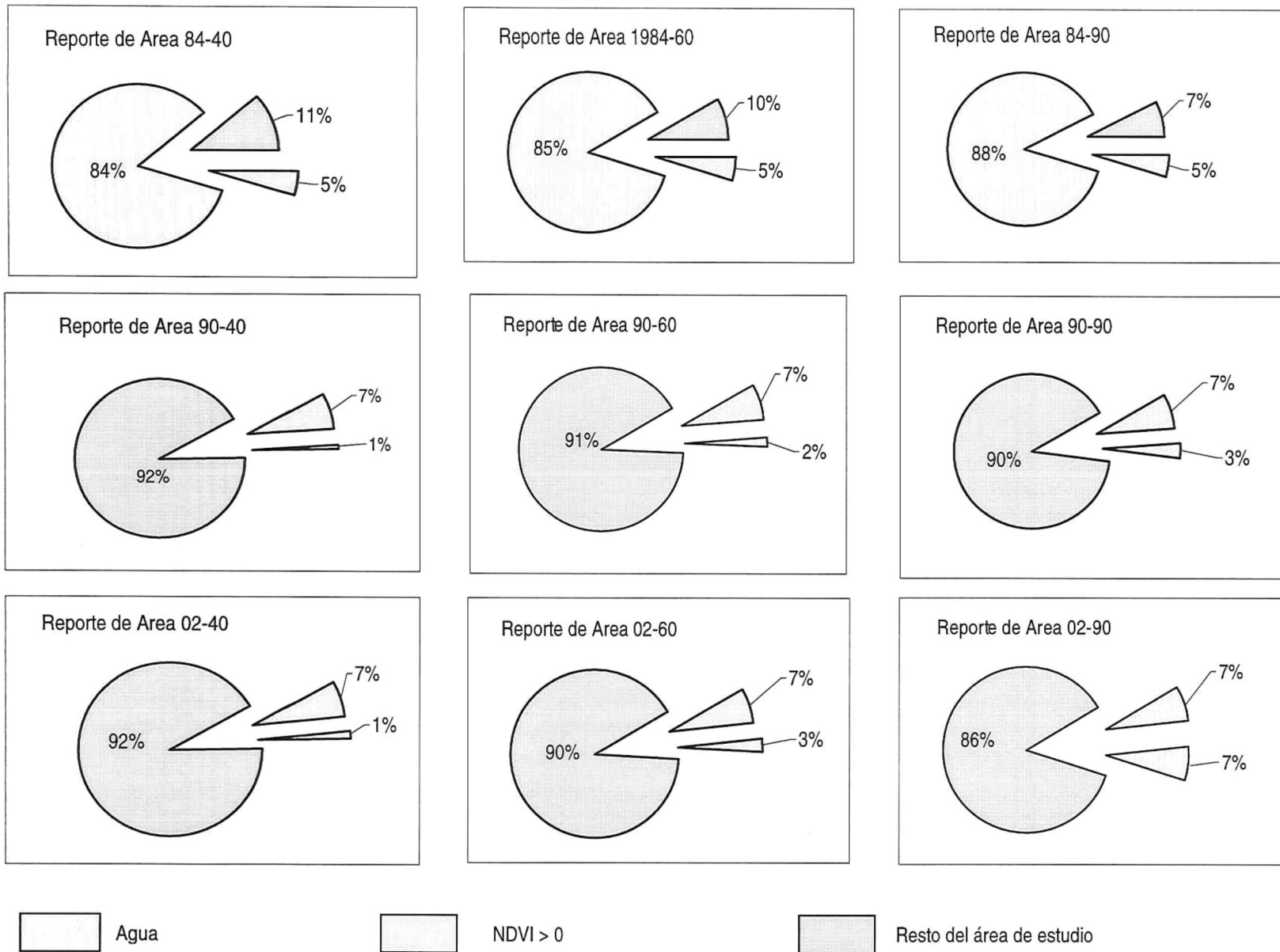


Figura 23. Porcentajes de cobertura en la zona de estudio agrupadas en clases NDVI ≥ 0 (vegetación) áreas inundadas y NDVI < 0 (sin vegetación).

VI. DISCUSION.

VI.1 Variaciones de áreas de inundación.

En los años ochenta hubo una serie de inundaciones la primera de las cuáles se observa en la imagen de 1980; la de mayor extensión fue la de 1984 cuya área cubrió 85% del área de estudio, definida desde la frontera internacional hasta Laguna Salada. Posteriormente, hasta julio de 1986, Laguna Salada se mantuvo unida al río Hardy, disminuyendo paulatinamente la extensión debido a la evaporación hasta julio de 1989.

El año con menor extensión de área inundada fue 1990, y se ha mantenido con un perfil bajo hasta el año 2002, años con flujo del río Colorado cercanos a $60\text{m}^3/\text{seg.}$, sólo interrumpido por las liberaciones de agua en 1993 y 1997 (Zamora et al., 2001).

En el 2002, no se observó una reducción de las áreas inundadas como en 1990, sin embargo, el efecto de la última liberación de 1997 perduró hasta agosto de 1999 donde todavía fue posible observar un remanente de agua en Laguna Salada y río Hardy.

En la revisión de la serie de tiempo 1972-2002 de las imágenes muestra é imágenes con datos completos, se hizo patente que las áreas recurrentemente inundadas; e.g. río Hardy tienen un aporte primero que Laguna Salada, la cuál es un depósito terminal. A diferencia de lo reportado por All (2002) quién afirma que el excedente se desvía casi en su totalidad hacia la Laguna Salada sin alcanzar los humedales.

Una primera aproximación al análisis de los resultados fue graficar conjuntamente como serie de tiempo, las áreas inundadas y el flujo del río Colorado, analizar los puntos coincidentes, ahí se observó que había una correspondencia entre los picos y los valles del flujo con las áreas inundadas estimadas.

A fin de encontrar una prueba estadística que demostrara la relación entre el flujo del río Colorado y los cambios en las áreas de inundación, se consideró que los registros de áreas inundadas son datos puntuales, correspondientes a una momento dado en la serie de tiempo, por lo que se decidió utilizar una forma de estandarizar esos datos en un parámetro que fuera más sencillo de interpretar, para ello se obtuvieron las medias anuales de los totales de área inundada, así como medias anuales de los datos de flujo del río Colorado. Con éstas medias se realizó una regresión múltiple, la que dio como resultado un índice de correlación de $r= 0.912088$, el que significa una alta correlación entre el flujo del río Colorado y las áreas de inundación en esa serie de tiempo, también significa

que las imágenes prueba pueden dar un resultado confiable para estimar cambios en el flujo de un río y su efecto sobre las zonas que inunda.

VI.2. Estimación de área inundada en años de inundación extensiva (1984), sequía prolongada (1990), y escenario actual (2002)

Para obtener el área total de estudio se aplicó un umbral de 40 para la definición de fórmula de agua sobre el mosaico TM de 1984 y se tomaron como límites los canales y diques naturales; esta zona se estimó en 2949.5 Km². Cubrió el 85% de la zona de estudio, y con incremento a 60 en el umbral este porcentaje se incrementó

Para el escenario de sequía en el año de 1990 el umbral 40 se utilizó a efecto de hacer comparaciones con el año de 1984 y 2002, pero visualmente se observó que conforme se incrementaba a un umbral de 60 y luego a 90, tanto mejor se apreciaban las áreas de inundación.

Para el año de 2002 se probaron los mismos umbrales y finalmente se dejó en 60. En este año las áreas de inundación son mayores con respecto al año de 1990, bajo el mismo umbral de definición de agua, pero como se puede ver en la tabla 9 siguen siendo muy bajas en relación a 1984.

En el período de tiempo de 1972 hasta el año 2002 los porcentajes de áreas inundadas prácticamente se invierten entre un año de inundación (1984) y uno de sequía (1990), mostrando de esta forma los dos escenarios extremos de inundación en el río Colorado.

VI.3 Estimación de cobertura vegetal por medio de NDVI y su categorización en intervalos

En 1984 se estimó 85% de área inundada y 5% de cobertura vegetal (140.1855 Km²), esto quiere decir que la mayor parte del área de estudio se encontraba cubierta por agua. Las estimaciones de cobertura vegetal son entonces, estimaciones propuestas a partir del índice de vegetación normalizado NDVI, aquellas zonas que obtuvieron valores mayores que cero. Todas aquellas zonas con valores menores que cero, son áreas ya sea inundadas o con escasa o nula vegetación.

Para 1990 se estimó una cobertura vegetal de 213.3674 Km², que representa el 7% del área de estudio. En el escenario de 2002, se estimó la cubierta vegetal en 194.3291 Km² que al hacerse los cálculos de porcentajes correspondió también al 7%.

A pesar de que los porcentajes de NDVI son iguales para 1990 y 2002 los totales de área en su desglose muestran una disminución en cobertura vegetal; por otra parte no todas los intervalos de NDVI disminuyeron en extensión. El área de 0.1-0.2 (segundo valor bajo de NDVI) aumento en extensión, de 58.8713 Km² en el año de 1990 a 64.0469 Km² en el año 2002, esto representa un 8.8% de aumento en doce años.

En las corroboraciones en campo se observó que la comunidad vegetal cerca del río Hardy estaba dominada por pino salado (*Tamarix ramosissima*). En el trabajo del Colorado Water Conservation (2003) donde se presenta una predicción de incremento de cobertura moderada de aumento de *Tamarix* de 2.5% por año lo más probable es que el porcentaje está subestimado. Esto puede deberse a que el área total donde esta especie es dominante en un 100% no se estimó. En terreno al nivel del mar, pone al pino salado en la capacidad de llegar en toda esa extensión al agua subterránea y crecer así sin control, y con esto mermar de forma considerable las fuentes de agua y por otra parte desplazando a las especies nativas

Todas éstas observaciones en campo son consistentes con las características de ésta especie oportunista: alta eficiencia reproductora, debido a que se dispersa muy eficientemente por aire, por eso encontramos que estas áreas están expandiéndose a porcentajes similares a los reportados; resistencia a largos períodos de sequía. Y la característica más ventajosa es su sistema de raíces de hasta 30 metros de profundidad, en comparación de raíces de sauces sanos que llegan a dos metros (Baum 1978, USDI-BOR 1995; en Colorado Water Conservation, 2003).

El área de humedales de Santa Clara, además del flujo del río, se alimenta de los drenes agrícolas del Distrito de Irrigación del Wellton-Mohawk, como de canales de Riito y agua de deshecho de sectores agrícolas en México (Nagler, 2003).

La ciénega de Santa Clara con salinidad entre 3-10 partes por millón ha permitido que *Typha*, la especie dominante, se haya establecido en este humedal a partir de 1977 cuando empezó a operar el canal Welton-Mohawk. Antes de esto, no se observa una huella importante de la ciénega en las imágenes muestra. *Typha* es una especie poco tolerante a salinidades mayores a las que prevalecen en la ciénega (3-10 ppm). En 1990 los valores altos

(>0.5) de NDVI están más ampliamente distribuidos en la parte norte, alrededor de la desembocadura del canal Welton-Mohawk (Figura 19) y en 2002 están más restringidos cerca de la desembocadura (Figura 20), esto puede deberse a un incremento en la salinidad.

El análisis de la respuesta de la vegetación a flujos pasados (Zamora-Arroyo, 2001) determinó que una vez cada cuatro años con un flujo de tres meses en primavera de $3 \times 10^9 \text{ m}^3$ a $80\text{-}120 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ era suficiente para establecer nuevas cohortes de árboles nativos, este trabajo de una forma indirecta afirma entonces que solo en condiciones de flujo anómalas se va a dar regeneración de cubierta vegetal en el delta del río Colorado, ya que la cuota anual de México es de $1.85 \times 10^9 \text{ m}^3$. Pitt et al., (2000) recomendaron además un flujo perenne de $4 \times 10^7 \text{ m}^3$ para mantener el hábitat acuático para peces, pájaros e insectos en ésta zona.

Los efectos de las inundaciones de los años ochenta se observaron hasta 1989, esa debe ser otra razón por la cuál las imágenes de 1990 presentan una mayor cobertura vegetal que el 2002, con persistencia por varios años de áreas inundadas. En la década de los 90 se dieron dos liberaciones de agua, una en 1993 y otra en 1997, y que entre la última y 2002 ha pasado más tiempo del propuesto en la periodicidad de cuatro años para la renovación de la cubierta vegetal.

Esto es importante porque si las áreas correspondientes a especies de árboles nativos disminuyeron como un todo, los renuevos que se observaron como producto de las liberaciones de 1993 y 1997 (Zamora, 2001) no compensan la cubierta vegetal que se ha perdido en el período que va de 1990 a 2002.

VI.4 Interés en Conservación.

Para modificar las prácticas de manejo de uso de agua y suelo es necesario el apoyo de trabajos como éste, en el que se muestren los efectos de la aplicación de políticas públicas y con base a los resultados dar recomendaciones que se consideren necesarias para ayudar a conservar los ecosistemas del delta del río Colorado.

Los acontecimientos políticos, jurídicos y naturales recientes relacionados con los derechos de uso del agua del río Colorado presentan implicaciones para el delta del río Colorado. Durante los últimos meses de 2003 la presión que los intereses de los Estados Unidos ejercieron sobre la Cuenca del río Colorado, es probable que esta presión socave los esfuerzos para destinar agua para fines ecológicos en el río Colorado y su Delta.

El efecto neto de las negociaciones en los últimos meses de 2003 ha sido una considerable reducción en el suministro de agua al sur de California, para México eso se traduce en que mientras se siga litigando sobre el uso de agua en California es poco probable que se realice alguna modificación al Tratado de 1944 para otorgar flujos extras a México.

El delta del río Colorado tiene una situación de sequía prolongada, esto provoca una competencia entre los usuarios del recurso de las reservas de agua en los Estados Unidos, en los estados por los que pasa el río Colorado hay litigios de muchos tipos para obtener una participación mayor sobre el recurso. El río Colorado pasa por los estados de Wyoming, Utah, Nevada, Colorado, Arizona, California y finalmente desemboca en el Golfo de California en México, el agua se utiliza para generar energía eléctrica, dar servicios urbanos no solo a ciudades sino a las comunidades indígenas de E. U. y México, y mantener recursos naturales como comunidades de animales y plantas.

Arizona, por ejemplo ha utilizado la sequía como plataforma para establecer un nuevo compromiso a fin de asegurar que reciba su cuota completa de agua del río Colorado. Recientemente Nevada presentó una solicitud al Departamento del Interior de los Estados Unidos para recibir 74 millones de m³ de agua adicional para los próximos diez años, alegando que no debería ser castigada por el fracaso de California para llegar a un acuerdo sobre el recurso (Cornelius, 2003).

Para México esto significa que cualquier agua excedente que se halle disponible en el futuro, en lugar de permitir que se entregue como flujo a la región del Delta se destinará a resolver el déficit de agua en las reservas de las presas en Estados Unidos.

Todo lo anterior tiene efecto directo sobre el flujo del río Colorado sobre las áreas cubiertas de vegetación en su Delta y las repercusiones sobre las comunidades de animales que la habitan, sin embargo se ha observado que la dinámica de la disponibilidad del agua no sólo tiene efectos directos de aporte o carencia, sino que hay que optimizar el agua con que se cuenta.

Uno de los efectos o presiones indirectas sobre la cantidad de agua disponible es el uso no-benéfico de agua por parte de especies invasoras como el pino salado (*Tamarix ramosissima*). El término no-benéfico está

definido como la diferencia de consumo de agua (evotranspiración) entre el pino salado y las especies nativas que desplazó (Colorado Water Conservation, 2003).

En Colorado, E. U. y otros estados de ese país, se tiene el problema de erradicar las especies vegetales exóticas, de las cuáles el pino salado es la más grave. El impacto de infestación de 169.99 Km² de pino salado para los próximos 50 años se está calculado en una pérdida de casi 545.34 millones m³ de agua por año, para hacer una comparación el Departamento de Agua de Denver le dio servicio a 1, 100,000 personas con 308 millones de m³ de agua en el año de 2001. Por lo tanto el gobierno del estado autorizó la orden D00203, al Departamento de Recursos Naturales para dirigir los esfuerzos para la erradicación de pino salado (Colorado Water Conservation, 2003). Para poner en el contexto de nuestro estudio se debe poner énfasis en que la cuota anual para México es de 1,851 millones de m³, eso quiere decir que los 545.34 millones de m³ de agua que están proyectando perder cada año a causa del pino salado en el estado de Colorado en los Estados Unidos por los próximos 50 años equivalen al 29.46% de la cuota anual de México.

En el delta del río Colorado se reportó un área total de pino salado de 408.61 Km² obtenido sobre una imagen Landsat TM de 1997 con una cobertura de vegetación de 23% (Zamora et al., 2001); esta cantidad comparada con lo estimado por el estudio anterior (Colorado Water Conservation, 2003); el cuál estima una cantidad de 169.99 Km² de pino salado capaces de consumir el equivalente del 29.46% de la cuota anual de México y con nuestros resultados de que el área del segundo intervalo de NDVI (0.1-0.2) donde se observó pino salado en cobertura vegetal hasta de 100%, la cuál se estimó en 64, 0469 Km² en 2002 y un aumento de área de 8.8% en doce años, pone a esta especie como un problema potencial con serios efectos sobre la cantidad de agua disponible en el delta del río Colorado.

Los costos para la eliminación varían dependiendo del grado de infestación, la existencia de especies valiosas y el tipo de terreno. Las técnicas de eliminación pueden ser aplicación de herbicidas por avioneta o helicóptero, desmonte con máquinas, y técnicas nuevas como bio-control con un escarabajo chino, el cuál está siendo investigado por el Departamento de Interior de los Estados Unidos. La eliminación del pino salado (Tamarix

ramosissima) también requiere que posteriormente se restaure al hábitat a las plantas nativas (Colorado Water Conservation, 2003).

Dentro del nuevo Programa de Manejo para la Reserva del Alto Golfo (diciembre, 2002) se reconoce la invasión del pino salado como amenaza a la biodiversidad de la región y se recomienda su erradicación de las zonas riparias del Delta del río Colorado dentro de varias de sus estrategias en forma general. Sin embargo, no se dan estrategias específicas con las cuáles se haga una prospección sobre costos de la erradicación del pino salado contra los beneficios del agua ganada o ahorrada al río Colorado.

Por ejemplo, como parte las estrategias de uso general, la zona del delta del río Colorado está considerada como aprovechable para el ecoturismo, como uno de los servicios que proveen los humedales, aún cuando su desarrollo todavía es sumamente artesanal. En la corroboración de campo se notó falta de equipamiento para fines turísticos y no se ha documentado ninguna propuesta de desarrollo turístico de ningún tipo por parte de la Secretaría de Turismo Federal y del Estado.

En resumen se tiene suficiente información para considerar que el problema de la escasez de agua en el delta del río Colorado se debe a una sequía de largo plazo, con un flujo muy por debajo de lo que fue la condición original antes de las presas, y cualquier cambio a las políticas de asignación de agua será una solución a mediano y largo plazo y de difícil implementación por la cantidad de usuarios e intereses implicados en este conflicto binacional, México y Estados Unidos.

VII. CONCLUSIONES.

Las series de tiempo de flujo del río Colorado y áreas inundadas que se presentan permiten concluir que las variaciones en el flujo del río Colorado tienen un impacto directo sobre la extensión de las áreas inundadas y sobre la vegetación observada tanto en humedales como en áreas riparias en el Delta del río Colorado. Existe una correlación entre el flujo del río Colorado y las áreas inundadas en el Delta del río Colorado.

- Las áreas de inundación están en su gran mayoría dentro de lo esperado con un límite de confianza del 95% con respecto al resultado de la correlación de Spearman excepto en los eventos extremos como la inundación de 1984.
- Las series de tiempo de las imágenes Landsat de 1972 a 2002 muestran eventos de inundación, principalmente en la década de los ochenta ocasionados por anomalías climáticas que obligaron a las presas a liberar agua que no podían almacenar.
- Laguna Salada solo se inunda cuando el flujo del río Colorado es importante y persistente como en los años ochenta; asimismo se observó unida al área del río Hardy y éste último por separado con la ciénega de Santa Clara, esto muestra que el flujo del río Colorado puede continuar hacia esos lugares.
- Desde 1977 la ciénega de Santa Clara ha recibido el flujo de agua del canal del Welton Mohawk . De reclamarse esta agua para la planta desalinizadora de Yuma, la ciénega se secaría regresando al estado que tenía antes de ese año.
- Los años ochenta fueron los que registraron las mayores áreas inundadas, siendo 1984 el de la máxima área inundada en ese período cubriendo un extensión de 2472 Km².
- Los porcentajes de áreas inundadas dentro de la zona circunscrita de estudio durante años de mayor flujo (1980-1987) y años de menor inundación (1990, 1998-2002) son tan extremos que sus porcentajes prácticamente invierten sus proporciones.
- Imágenes de muestra son capaces de demostrar la correlación entre flujo y áreas inundadas en el río Colorado.

- Hay una disminución de cobertura vegetal en áreas con valores de NDVI >0.3 donde se observó presencia de comunidades de árboles nativos en zonas de ripario o en zonas de tular como Santa Clara.
- El intervalo de 0.1-0.2 de NDVI considerado como índice de cobertura vegetal se observó con un aumento en área y porcentaje proporcional en de 1990 a 2002, y se observaron extensas comunidades vegetales con dominancia de pino salado en aquellas zonas donde se presentó este intervalo. Por las características de dispersión y consumo de agua de la especie consideramos que existe un problema potencial sobre la disponibilidad del recurso.
- El Programa de Manejo para la Reserva del Alto Golfo del Delta del río Colorado debe considerar las variaciones de flujo y su efecto en la cobertura vegetal.

VIII. RECOMENDACIONES.

- Evitar que disminuya aún más el aporte de agua al delta del río Colorado.
- Evitar que los períodos entre liberaciones de agua rebasen cuatro años para que no se dé un deterioro mayor aún, en el evento de que no se de un año niño, deben buscarse fuentes alternativas de agua para al menos soportar las nuevas cohortes de árboles.
- Llevar a cabo promoción de los diferentes beneficios de los humedales del delta del río Colorado a la población fuera del sector académico, incluirlo en las zonas turísticas a considerar como se hace con zonas al sur del Estado para que de esa forma se cree una demanda por visitarlo y hacerlo atractivo y visible.
- Estimación de cobertura vegetal en los años siguientes de mayores inundaciones, por ejemplo los años siguientes al año de 1984.
- Estimar la pérdida de agua por la invasión de especies exóticas como el pino salado, puesto que no se encontró estudios específicos sobre la cantidad de agua que consume en la región del Delta en tiempo reciente.
- Realizar estudios acerca de otras especies invasoras que pudieran estar asociadas al pino salado, dentro de la zona del delta del río Colorado.

IX. BIBLIOGRAFIA.

- All, J. 2002. *International Utilization of shared water resources: a case study of the Colorado River Delta and Upper Gulf of California, Mexico*. Department of Geography and Regional Development. The University of Arizona. 164 pp.
- Andreasson, F. P., S. Birger, E. Jonson, 1999. Surface-water seasonality from stable isotope profiles of *Littorea* shells: implications for paleoenvironmental reconstructions of coastal areas, *Palaios*, 14: 273-281.
- Baum, B. R. 1978. The genus *Tamarix*. Israel Academy of Sciences and Humanities, Jerusalem. 209 pp.
- Chuvieco, Y. 1996. *Fundamentos de teledetección espacial*. 3a Edición revisada, Ediciones Rialp, S A. Madrid, España, pp.
- CILA/IWBC, 2001. 4 Minuta Conceptual 306 de la Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA/IWBC). Actualizada en septiembre del 2001, consultada en 2002. www.ibwc/simposio
- Colorado Water Conservation. 2003. Impact of Tamarisk Infestation on the Water Resources of Colorado. Preparado por el Departamento de Recursos Naturales del Colorado Water Conservation Board. Para contacto: tcarlson@tamariskcoalition.org
- Cornelius, S., P. Culpand, L.L.P., Dempsey, Pitt J., F.Zamora, 2003. Acontecimientos recientes relacionados con el río Colorado: Implicaciones para la conservación de su Delta. Environmental defense, Sonoran Institute.
- DOI, 1996. Department of the Interior. Geological Survey (USGS). Controlled Flooding of the Colorado River in Grand Canyon: the Rationale and Data-Collection Planned. Última modificación: 04 Nov 96. http://water.usgs.gov/wid/FS_089-96/FS_089-96.html
- Convención de Ramsar, 2001. Página de internet, consultada en 2002. http://ramsar.org/wwd2001_index.htm
- Galindo-Bect, M.S., E.P. Glenn, H.M. Page L.A. Galindo-Bect, J.M. Hernández-Ayón, R.L Petty, J. García Hernández, 2000. Analysis of the Penaeid shrimp catch in the Northern Gulf of California in relation to Colorado River discharge. *Fishery Bulletin* 98:222-235.
- Glenn, E. P., Luecke, D.F., Pitt, J., Congdon, C., Valdes-Casillas, C., Briggs, M. Junio de 1999. A Delta Once More. Restoring Riparian and Wetland Habitat in the Colorado River Delta. EDF. Environmental Defense Fund.
- Glenn, E. P., Zamora-Arroyo, F., Nagler, P. L., Briggs, M., Shaw, W., Flessa, K. (2001). Ecology and conservation of the Colorado River Delta, Mexico. *Journal of Arid Environments* (2001) 49: 5-15.
- Kowalewski, M., Avila S., G.E., Flessa, K.W., Goodfriend, G.A, 2000. Delta's former productivity: Two trillion shells at the mouth of the Colorado River. Department of Geological Sciences; University of Arizona. *Geology*: December; .28, (12), p. 1059-1062.
- Lavín, M.F., S. Sanchez, 1999. How the Colorado river affected the hidrography of the upper Gulf of California. *Continental Shelf Research* 19: 1545-1560.
- Mertes, L. A. K., 2000. In E. E. Wohl (Ed.), 2000. Chapter 5. Inundation Hydrology. *Inland Flood Hazards' Cambridge University Press, Cambridge*, 145-166.
- Mertes, L. A. K., Daniel, D. L., Melack, J. M., Nelson, B., Martinelli, L.A., Forsberg, B. R., 1995. Spatial patterns of hidrology, geomorphology, and vegetation on the floodplain of the Amazon River in Brazil from a remote sensing perspective. *Geomorphology* 13:215-232.
- Nagler, P.L., Schiff-Hursh, K., E.P. Glenn. 2003. Building upon the Anderson-Ohmart vegetation classification system: Improved methods of mapping vegetation in the CR delta using satellite imagery, aerial photographs and ground-data.
- NASA, biblioteca de, 2003 (Nacional Aeronautics And Space Administration) y NOAA (Nacional Oceanic and Atmospheric Administration), dirección: http://earthobservatory.nasa.gov/Library/MeasuringVegetation/measuring_vegetation_2.html
- NASA, 2003. Páginas de internet consultadas: <http://samadhi.jpl.nasa.gov/ms/QuickLooks/landsat6QL.html>, <http://ls7pm3.gsfc.nasa.gov/scenes/Default.html>, <http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/las/handbook/handbook>
- Nagler, L.P., Glenn, E.P., Huete, A. R. 2002. Assessment of spectral vegetation indices for riparian vegetation in the Colorado River delta, México. *Journal of Arid Environments* 49: 91-110.

- Novo; E.M.L.M. Sensoriamento Remoto, Princípios e Aplicações; 2a edição; Edit. Edgard Blücher Ltda., Junio de 1989, São Paulo, SP, Brasil.
- OECD (1993) "Cuerpo de indicadores para revisiones de desempeño medioambiental de la OECD". OECD Environment Monographs No. 83. OECD. París. Documento en formato Acrobat [gd93179.pdf](#)[gd93179.pdf](#)
- OECD (1993). OECD core set of indicators for environmental performance reviews. OECD Environment Monographs No. 83. OECD. París. Documento en formato Acrobat [gd93179.pdf](#)[gd93179.pdf](#)(195KB). [gd93179.pdf](#)[gd93179.pdf](#)[gd93179-fr.pdf](#)[gd93179-fr.pdf](#)
- PACES, 2002. Pan American Center for Earth and Environmental Sciences, Department of Geological Sciences, University of El Paso, Texas. <http://paces.geo.utep.edu/welcome.shtml>
- Pinter, L., Cressman, D.R. & Zahedi, K. (1999). Capacity Building for Integrated Environmental Assessment and Reporting: Training Manual. United Nations Environment Programme (UNEP), International Institute for Sustainable Development (IISD) & Ecologistics International Ltd. Dirección en internet: <http://lead.virtualcenter.org/es/dec/toolbox/Refer/psrbasic.htm>
- Pitt, J., Luecke, D., Cohen, M., Glenn, E. y Valdez-casillas, C., (2000). Two nations, one river: managing ecosystem conservation in the Colorado River delta. *Natural Resources Journal* 40: 819-864.
- Programa de Manejo Reserva de la Biosfera del Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado, segundo borrador, diciembre de 2002.
- USDI-BOR 1995. Vegetation Management Study: Lower Colorado River, Phase II U.S. Department of Interior, Bureau of Reclamation, Lower Colorado River, Draft Report, Boulder City, Nevada. Pp.
- UICN 1999. Humedales de Meso América. Sitios Ramsar de Centroamérica y México. Documento elaborado por el Área de Humedales y Zonas Costeras de la UICN-Meso America. Impresión Comercial La Nación S.A. San José, pp.
- USGS, 2003. Earth Resources Technology Satellite (ERTS), página de internet: http://eosims.cr.usgs.gov:5725/DATASET_DOCS/landsat_dataset.html
- Richards, J. A., 1986. Remote Sensing Digital Image Analysis. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Alemania.
- Rodríguez, C. A., Flessa K. W., Téllez-Duarte M.A., Dettman D. L., Avila-Serrano G. A., 2001. Macrofaunal and isotopic estimates of former extent of the Colorado River estuary, upper Gulf of California. *Journal of Arid Environments* 49: 1-11.
- Rosa, R. Introdução ao Sensoriamento Remoto; EDUFU; 2a Ed., Uberlândia, MG, Brasil, 1992.
- SELPER. Diccionario SELPER; SELPER; 1987, Brasil. <http://www.ltid.inpe.br/selper/image/inicio.html>
- Sánchez R. D., Burnett E., Croxen F. 2001. Mapping Typha Dominguensis in the Ciénega de Santa Clara using Satellite Images, global Positioning System, and Spectrometry. U.S. Department of the Interior. U.S. Geological Survey. Open-File Report 00-314.
- Sheffner, E. J. 1994, The Landsat Program: Recent History and Prospects. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. p. 735.
- Stromberg, J. C. 2001. Restoration of riparian vegetation in the south-western United States: importance of flow regimes and fluvial dynamism. *Journal of Arid Environments* 49: 17-34.
- Vandersande M. W., Glenn P. E., Walwort J. L. 2001. Tolerance of five riparian plants from the lower Colorado River to salinity drought and inundation. *Journal of Arid Environments* 49: 147-159.
- Zamora-Arroyo F., Nagler P. L., Briggs M., Radtke D., Rodríguez H., García J., Valdes C., Huete A., Glenn E.P., 2001. Regeneration of native trees in response to flood releases from the United States into the delta of the Colorado river, Mexico. *Journal of Arid Environments* 49: 35-48
- Zengel, S. A., Meretsky, V. J., Glenn, E. P., Felger, R. S., Ortiz, D. 1995. Ciénega de Santa Clara, a remnant wetland in the Rio Colorado delta (México): vegetation distribution and the effects of water flow reduction. *Ecological Engineering*. 4 19-36

Anexo 1

A	B	C	D
1972-09-12	1972-08	1982-12	1984-05
1972-09-30	1973-07-15y18	1984-06	1985-06-06-28y27
1972-11-05	1974-07y08	1985-03	1986-06-06-06y15
1973-05-22	1975-07-14y24	1986-04	1987-07-04y11
1973-12-24	1976-08-14y22	1987-04	1988-06-20y27
1974-04-11	1977-08-26y27	1988-04	1989-08-01y7-25
1974-08-15	1978-08-12y22	1990-05	1990-05-23y24
1976-03-13	1979-07-03y11	1991-06	1993-07-4y11
1976-04-18	1980-06-18y07-05	1992-06	1994-07-7y11
1976-11-29	1981-07-18y19	1993-11-12	1997-06-20y29
1977-04-04	1982-07-04y05	1994-11	2000-06-5y12
1977-06-15	1983-07-08y15	1995-07	2001-06-08y15
1978-06-01		1996-06	2002-08-5y14
1978-10-14		1997-04	
1979-04-30		1997-10	
1980-11-26		1997-12y98-01	
1981-06-30		1998-06	
1981-11-21		1999-01	
1982-02-01		1999-07y08	

Anexo 2

Código de zona inundada	Area del polígono en m ²	Perímetro en metros	Fecha	Tiempo en años y fracción de año	Referencia al archivo arcview (SIG)
5	1267861.636	4574.974	1972-08-25y26	1972.652	humedales1972-1981
2	42258259.974	41854.769	1972-08-25y26	1972.652	humedales1972-1981
1	65794519.683	48970.471	1972-08-25y26	1972.652	humedales1972-1981
2	31780222.853	49717.89	1972-09-12	1972.6986	humedales1972-1981
4	27298721.406	31051.017	1972-09-12	1972.6986	humedales1972-1981
5	2021986.857	5726.413	1972-09-12	1972.6986	humedales1972-1981
1	83089944.125	60335.68	1972-09-12	1972.6986	humedales1972-1981
2	19957668.615	25366.307	1972-09-30	1972.7479	humedales1972-1981
1	31325777.11	30835.685	1972-09-30	1972.7479	humedales1972-1981
4	26332887.436	31240.573	1972-09-30	1972.7479	humedales1972-1981
5	1825052.648	5353.594	1972-09-30	1972.7479	humedales1972-1981
4	69209861.187	40505.077	1972-11-05	1972.8465	humedales1972-1981
1	155129574.11	67519.964	1972-11-05	1972.8465	humedales1972-1981
7	122481820.2	69968.691	1972-11-05	1972.8465	humedales1972-1981
2	205104918.91	109839.367	1972-11-05	1972.8465	humedales1972-1981
1	133676222.28	56983.005	1973-05-22	1973.389	humedales1972-1981
2	11085499.266	15856.653	1973-05-22	1973.389	humedales1972-1981
4	21879719.03	25849.636	1973-05-22	1973.389	humedales1972-1981
5	3275818.919	9740.334	1973-05-22	1973.389	humedales1972-1981
4	34701771.254	33726.769	1973-07-15y16	1973.5369	humedales1972-1981
2	44469250.84	59694.719	1973-07-15y16	1973.5369	humedales1972-1981
1	118904279.04	60837.601	1973-07-15y16	1973.5369	humedales1972-1981
5	2420473.652	7528.032	1973-07-15y16	1973.5369	humedales1972-1981
1	138417617.67	67066.515	1973-12-24	1973.98	humedales1972-1981
5	2300626.618	6806.32	1973-12-24	1973.98	humedales1972-1981
5	1974215.706	6754.48	1974-04-11	1974.2767	humedales1972-1981
1	122680425.05	56826.799	1974-04-11	1974.2767	humedales1972-1981
3	51284810.623	34580.724	1974-04-11	1974.2767	humedales1972-1981
2	38145816.721	50919.696	1974-04-11	1974.2767	humedales1972-1981
3	6435345.264	11043.392	1974-07-14y24	1975.5479	humedales1972-1981
3	13591214.255	14761.078	1974-07y08	1974.6	humedales1972-1981
1	97352424.371	72708.474	1974-07y08	1974.6	humedales1972-1981
2	12632530.426	20299.982	1974-07y08	1974.6	humedales1972-1981
4	7196638.284	11931.394	1974-07y08	1974.6	humedales1972-1981
5	3225425.696	7496.893	1974-07y08	1974.6	humedales1972-1981
3	12461609.253	14192.531	1974-08-15	1974.622	humedales1972-1981
5	4230640.021	11281.144	1974-08-15	1974.622	humedales1972-1981
4	17057987.349	17795.268	1974-08-15	1974.622	humedales1972-1981
2	18775950.355	23879.351	1974-08-15	1974.622	humedales1972-1981
1	83481533.881	60784.207	1974-08-15	1974.622	humedales1972-1981

Código de zona inundada	Area del polígono en m ²	Perímetro en metros	Fecha	Tiempo en años y fracción de año	Referencia al archivo arcview (SIG)
5	7635159.238	10805.804	1975-07-14y24	1975.5479	humedales1972-1981
3	61998405.304	45108.524	1975-07-14y24	1975.5479	humedales1972-1981
1	46865938.83	38905.89	1975-07-14y24	1975.5479	humedales1972-1981
2	11014036.978	13973.809	1975-07-14y24	1975.5479	humedales1972-1981
3	150517425.26	104037.405	1976-03-13	1976.1972	humedales1972-1981
5	4192401.225	9637.091	1976-03-13	1976.1972	humedales1972-1981
2	65131183.18	48938.443	1976-03-13	1976.1972	humedales1972-1981
1	91531135.529	56034.305	1976-03-13	1976.1972	humedales1972-1981
2	84304217.235	57166.775	1976-04-18	1976.2959	humedales1972-1981
4	17025065.992	16849.162	1976-04-18	1976.2959	humedales1972-1981
1	96623406.301	50140.825	1976-04-18	1976.2959	humedales1972-1981
5	3695727.516	7702.739	1976-04-18	1976.2959	humedales1972-1981
3	123058436.39	84560.534	1976-04-18	1976.2959	humedales1972-1981
2	15920829.508	30204.513	1976-08-14y22	1976.7123	humedales1972-1981
3	4124055.254	8035.006	1976-08-14y22	1976.7123	humedales1972-1981
4	10353312.223	13809.807	1976-08-14y22	1976.7123	humedales1972-1981
1	31146668.366	32306.898	1976-08-14y22	1976.7123	humedales1972-1981
3	47788095.684	30385.355	1976-08-14y22	1976.7123	humedales1972-1981
5	5022741.143	10418.912	1976-08-14y22	1976.7123	humedales1972-1981
5	3849901.117	8185.02	1976-11-29	1976.9123	humedales1972-1981
1	109439184.72	55002.729	1976-11-29	1976.9123	humedales1972-1981
4	75349320.758	46245.181	1976-11-29	1976.9123	humedales1972-1981
3	170371955.07	83134.32	1976-11-29	1976.9123	humedales1972-1981
2	59828364.562	51684.82	1976-11-29	1976.9123	humedales1972-1981
5	3160212.489	7224.08	1977-04-04	1977.2575	humedales1972-1981
3	171259265.9	80852.204	1977-04-04	1977.2575	humedales1972-1981
1	92238682.158	57799.858	1977-04-04	1977.2575	humedales1972-1981
2	29443400.031	35825.192	1977-04-04	1977.2575	humedales1972-1981
5	2649305.177	7471.294	1977-06-15	1977.4548	humedales1972-1981
4	43552502.195	34678.075	1977-06-15	1977.4548	humedales1972-1981
2	30014604.855	36359.345	1977-06-15	1977.4548	humedales1972-1981
3	136577103.31	76933.05	1977-06-15	1977.4548	humedales1972-1981
1	64166931.782	64275.289	1977-06-15	1977.4548	humedales1972-1981
2	208010126.5	80086.19	1977-08-26y27	1977.6548	humedales1972-1981
1	58149086.213	41262.351	1977-08-26y27	1977.6548	humedales1972-1981
3	174078505.13	88641.661	1977-08-26y27	1977.6548	humedales1972-1981
5	5225485.634	8894.006	1977-08-26y27	1977.6548	humedales1972-1981
4	77876166.266	41323.643	1977-08-26y27	1977.6548	humedales1972-1981
2	135788709.91	71129.172	1978-06-01	1978.4164	humedales1972-1981
5	3666019.049	10827.324	1978-06-01	1978.4164	humedales1972-1981
1	100267168.89	52723.053	1978-06-01	1978.4164	humedales1972-1981
7	79511574.503	49085.98	1978-06-01	1978.4164	humedales1972-1981

Código de zona inundada	Area del polígono en m ²	Perímetro en metros	Fecha	Tiempo en años y fracción de año	Referencia al archivo arcview (SIG)
2	5905068.948	11843.86	1978-08-12y22	1978.6246	humedales1972-1981
3	41992516.025	26817.497	1978-08-12y22	1978.6246	humedales1972-1981
1	31610748.842	29059.676	1978-08-12y22	1978.6246	humedales1972-1981
5	4246587.434	7818.616	1978-08-12y22	1978.6246	humedales1972-1981
3	210278822	75802.388	1978-08-12y22	1978.6246	humedales1972-1981
4	61998945.995	43041.068	1978-08-12y22	1978.6246	humedales1972-1981
3	35151327.711	25025.335	1978-10-14	1978.7863	humedales1972-1981
5	3442632.247	7575.807	1978-10-14	1978.7863	humedales1972-1981
4	45630094.051	34537.07	1978-10-14	1978.7863	humedales1972-1981
2	180621656.01	77494.172	1978-10-14	1978.7863	humedales1972-1981
1	29980153.353	27572.879	1978-10-14	1978.7863	humedales1972-1981
5	2191940.493	6531.904	1979-04-30	1979.3288	humedales1972-1981
1	87302977.3	52699.192	1979-04-30	1979.3288	humedales1972-1981
7	58858650.315	42730.026	1979-04-30	1979.3288	humedales1972-1981
2	121451781.81	76241.95	1979-04-30	1979.3288	humedales1972-1981
2	93655568.29	86582.121	1979-07-03y11	1979.515	humedales1972-1981
1	144369555.7	78342.932	1979-07-03y11	1979.515	humedales1972-1981
3	146432717.52	134288.815	1979-07-03y11	1979.515	humedales1972-1981
5	2804878.135	7606.968	1979-07-03y11	1979.515	humedales1972-1981
5	2364210.056	7294.509	1980-0616-0705	1980.5	humedales1972-1981
6	2310640726.8	589219.969	1980-0616-0705	1980.5	humedales1972-1981
6	2530656519.5	399980.253	1980-11-26	1980.9041	humedales1972-1981
7	374615916.26	95027.512	1980-11-26	1980.9041	humedales1972-1981
5	3441880.34	7295.436	1981-06-30	1981.5	humedales1972-1981
1	32488086.57	38495.439	1981-06-30	1981.5	humedales1972-1981
7	456423385.27	109210.336	1981-06-30	1981.5	humedales1972-1981
2	82013655.01	75617.448	1981-06-30	1981.5	humedales1972-1981
3	575794979.43	223400.19	1981-07-18y19	1981.548	humedales1972-1981
1	5484691.297	8982.669	1981-07-18y19	1981.548	humedales1972-1981
2	111907711.89	76249.283	1981-07-18y19	1981.548	humedales1972-1981
7	341005376.86	83470.605	1981-11-21	1981.8904	humedales1972-1981
5	2997728.907	7366.22	1981-11-21	1981.8904	humedales1972-1981
4	27876171.802	30073.647	1981-11-21	1981.8904	humedales1972-1981
1	36434839.984	38421.933	1981-11-21	1981.8904	humedales1972-1981
2	170855905.05	79004.033	1981-11-21	1981.8904	humedales1972-1981
2	50460641.508	42914.918	1982-02-01	1982.087	humedales1972-1981
1	89947922.564	49384.354	1982-02-01	1982.087	humedales1972-1981
7	253174143.23	69894.084	1982-02-01	1982.087	humedales1972-1981
4	12739688.668	20579.288	1982-02-01	1982.087	humedales1972-1981
5	4616441.722	8501.075	1982-02-01	1982.087	humedales1972-1981
3	292744474.32	93812.386	1982-07-04y05	1982.5095	humedales1972-1981
1	41290296.964	34466.265	1982-07-04y05	1982.5095	humedales1972-1981

Código de zona inundada	Area del polígono en m ²	Perímetro en metros	Fecha	Tiempo en años y fracción de año	Referencia al archivo arcview (SIG)
2	108267389.29	80951.809	1982-07-04y05	1982.5095	humedales1972-1981
4	28014464.046	31077.306	1982-07-04y05	1982.5095	humedales1972-1981
5	5601289.701	9843.854	1982-07-04y05	1982.5095	humedales1972-1981
6	21052165.223	25776.902	1982-12	1982.96	humedales1972-1981
1	68394178.707	42832.558	1982-12	1982.96	humedales1972-1981
5	3273641.325	6938.333	1982-12	1982.96	humedales1972-1981
2	46123062.14	34335.504	1982-12	1982.96	humedales1972-1981
3	225856720.993	84802.827	1982-12	1982.96	humedales1972-1981
4	18166479.65	17035.673	1982-12	1982.96	humedales1972-1981
3	398199549.76	100923.762	1983-07-08y17	1983.5315	humedales1972-1981
5	5080194.266	8804.099	1983-07-08y17	1983.5315	humedales1972-1981
6	2412702566.2	473934.377	1983-07-08y17	1983.5315	humedales1972-1981
6	2949504973.8	811658.889	1984004y06	1984.42	tm-82-02
5	2706468.891	7864.746	1984004y06	1984.42	tm-82-02
1	30260461.988	25489.98	1985-03	1985.208	humedalestm82-98
6	2265598126.803	514836.554	1985-03	1985.208	humedalestm82-98
2	192542427.341	77223.086	1985-03	1985.208	humedalestm82-98
5	14227843.851	17179.434	1985-06-28y06-21	1985.4784	tm-82-02
2	112500353.64	86027.629	1985-06-28y06-21	1985.4784	tm-82-02
6	1446451002	558018.642	1985-06-28y06-21	1985.4784	tm-82-02
1	18258475.506	25742.017	1986-04	1986.29	humedalestm82-98
2	72901835.926	80743.677	1986-04	1986.29	humedalestm82-98
6	1204176044.9	486934.198	1986-04	1986.29	humedalestm82-98
2	60373459.481	68914	1986-06-06y15	1986.4438	tm-82-02
6	1207260564.7	457783	1986-06-06y15	1986.4438	tm-82-02
1	11395093.953	16215	1986-06-06y15	1986.4438	tm-82-02
3	607511262.93	171627.037	1987-04	1987.29	humedalestm82-98
2	214280622.7	91839.064	1987-04	1987.29	humedalestm82-98
1	22123851.549	23857.52	1987-04	1987.29	humedalestm82-98
1	15431695.475	18047.425	1987-07-04y11	1987.515	tm-82-02
3	105801798.34	59920.9	1987-07-04y11	1987.515	tm-82-02
2	532611708.92	146801.183	1987-07-04y11	1987.515	tm-82-02
1	19316067.38	21015.088	1988-04	1988.29	humedalestm82-98
3	382540003.278	96399.141	1988-04	1988.29	humedalestm82-98
2	213802725.748	94833.286	1988-04	1988.29	humedalestm82-98
2	90315715.877	69712.642	1988-06-27y20	1988.48	tm-82-02
4	30211047.664	24212.536	1988-06-27y20	1988.48	tm-82-02
3	355941760.79	121979.381	1988-06-27y20	1988.48	tm-82-02
2	75231014.578	59572.77	1989-08-01y07-25	1989.589	tm-82-02
3	119106793.508	69196.54	1989-08-01y07-25	1989.589	tm-82-02
1	27302142.574	27685.705	1989-08-01y07-25	1989.589	tm-82-02
3	4803981.15	8399.157	1990-05-ECW	1990.41	tm-82-02

Código de zona inundada	Area del polígono en m ²	Perímetro en metros	Fecha	Tiempo en años y fracción de año	Referencia al archivo arcview (SIG)
3	1771701.051	6690.506	1990-05-ECW	1990.41	tm-82-02
5	18182918.137	20729.714	1990-05-ECW	1990.41	tm-82-02
2	91162538.386	83039.866	1990-05-ECW	1990.41	tm-82-02
4	86400829.81	51035.846	1990-05-ECW	1990.41	tm-82-02
2	82605259.983	65952.975	1991-06	1991.5	tm-82-02
4	23110964.275	19764.337	1991-06	1991.5	tm-82-02
3	44458962.578	56934.648	1991-06	1991.5	tm-82-02
5	22885696.318	23566.525	1991-06	1991.5	tm-82-02
2	106618008.43	66292.116	1992-06	1992.5	tm-82-02
4	32749186.973	23898.051	1992-06	1992.5	tm-82-02
3	70794700.529	63040.575	1992-06	1992.5	tm-82-02
5	22650590.338	27063.131	1992-06	1992.5	tm-82-02
4	101628838.56	54742.846	1993-07-04y11	1993.515	tm-82-02
2	19256435.555	28210.546	1993-07-04y11	1993.515	tm-82-02
1	18420429.709	19066.48	1993-07-04y11	1993.515	tm-82-02
3	193472808.42	81833.905	1993-07-04y11	1993.515	tm-82-02
2	290873845.557	87509.234	1993-11-12	1993.92	humedalestm82-98
1	15363325.054	17541.132	1993-11-12	1993.2	humedalestm82-98
3	130709293.704	70112.545	1993-11-12	1993.92	humedalestm82-98
1	63928505.269	62160.53	1994-07-7y11	1994.5205	tm-82-02
5	17445684.174	20375.981	1994-07-7y11	1994.5205	tm-82-02
2	79145106.29	64034.41	1994-07-7y11	1994.5205	tm-82-02
4	10594151.09	12607.804	1994-07-7y11	1994.5205	tm-82-02
4	39833356.922	25667.828	1994-11	1994.8745	tm-82-02
1	15319029.581	17002.063	1994-11	1994.8745	tm-82-02
3	70078211.544	62220.18	1994-11	1994.8745	tm-82-02
2	293063287.7	93500.807	1994-11	1994.8745	tm-82-02
2	276152885.47	113331.278	1995-07	1995.542	tm-82-02
3	61399633.418	62313.416	1995-07	1995.542	tm-82-02
4	33546580.958	25653.099	1995-07	1995.542	tm-82-02
5	19033236.504	19920.019	1995-07	1995.542	tm-82-02
2	12166765.334	14364.763	1996-06	1996.455	tm-82-02
5	20878539.52	21229.262	1996-06	1996.455	tm-82-02
4	39098047.596	24775.616	1996-06	1996.455	tm-82-02
2	90228376.917	71951.282	1996-06	1996.455	tm-82-02
2	17792258.983	15502.493	1996-06	1996.455	tm-82-02
3	33789689.266	21183.911	1997-04	1997.29	humedalestm82-98
4	22593586.625	20385.686	1997-04	1997.29	humedalestm82-98
6	161458582.336	131695.924	1997-04	1997.29	humedalestm82-98
2	282446584.905	90692.257	1997-04	1997.29	humedalestm82-98
5	22525739.55	23940.463	1997-04	1997.29	humedalestm82-98
4	62262453.963	36908.69	1997-06-20y29	1997.4931	tm-82-02

Código de zona inundada	Area del polígono en m ²	Perímetro en metros	Fecha	Tiempo en años y fracción de año	Referencia al archivo arcview (SIG)
2	96757480.824	75459.356	1997-06-20y29	1997.4931	tm-82-02
5	24093936.133	25436.473	1997-06-20y29	1997.4931	tm-82-02
3	21125825.312	16940.719	1997-06-20y29	1997.4931	tm-82-02
3	131360841.673	68903.541	1997-10	1997.833	humedalestm82-98
2	287655064.523	100026.484	1997-10	1997.833	humedalestm82-98
5	27020650.08	25125.915	1997-10	1997.833	humedalestm82-98
4	41945881.593	27867.593	1997-10	1997.833	humedalestm82-98
5	24695056.536	22027.735	1997-12y98-01	1998	humedalestm82-98
3	127227518.516	70193.286	1997-12y98-01	1998	humedalestm82-98
2	261784546.359	90052.872	1997-12y98-01	1998	humedalestm82-98
1	210933999.13	91018.239	1998-06	1998.5	tm-82-02
2	80660350.717	66790.245	1998-06	1998.5	tm-82-02
5	28398829.433	25994.243	1998-06	1998.5	tm-82-02
4	15943520.474	22140.579	1998-06	1998.5	tm-82-02
3	164504506.22	76604.573	1998-06	1998.5	tm-82-02
3	173700570.574	86038.626	1999-01	1999.08	humedalestm82-98
5	21765643.624	23126.125	1999-01	1999.08	humedalestm82-98
4	43279961.329	28432.021	1999-01	1999.08	humedalestm82-98
6	328785710.015	156919.533	1999-01	1999.08	humedalestm82-98
2	239682158.174	87271.412	1999-01	1999.08	humedalestm82-98
4	40100722.844	27058.981	1999-07y08	1999.6	tm-82-02
5	19962394.82	20398.428	1999-07y08	1999.6	tm-82-02
2	123299370.96	76639.031	1999-07y08	1999.6	tm-82-02
3	91467532.883	66519.694	1999-07y08	1999.6	tm-82-02
5	21139859.89	19477.109	2000-06-5y12	2000.4329	tm-82-02
3	5443851.32	10527.88	2000-06-5y12	2000.4329	tm-82-02
3	16557552.176	31478.067	2000-06-5y12	2000.4329	tm-82-02
2	72827493.036	62448.598	2000-06-5y12	2000.4329	tm-82-02
3	8892238.758	15265.372	2001-06-08y15	2001.4465	tm-82-02
3	2657094.918	7125.882	2001-06-08y15	2001.4465	tm-82-02
3	10391320.045	13973.585	2001-06-08y15	2001.4465	tm-82-02
5	25717173.282	20829.087	2001-06-08y15	2001.4465	tm-82-02
2	85039032.519	65599.838	2001-06-08y15	2001.4465	tm-82-02
4	45960980.49	31848.585	2001-06-08y15	2001.4465	tm-82-02
5	18542796.792	20557.703	2002-08-5y14	2002.6027	tm-82-02
2	85489664.071	57903.319	2002-08-5y14	2002.6027	tm-82-02
4	27947775.15	21198.854	2002-08-5y14	2002.6027	tm-82-02