

El Agua Perdida

Usos y Flujos de Agua en la Región del Deltadel Río Colorado

SEPTIEMBRE 2001

Michael J. Cohen

y

Christine Henges-Jeck

un reporte del

P A C I F I C I N S T I T U T E
FOR STUDIES IN DEVELOPMENT, ENVIRONMENT, AND SECURITY

654 13th Street • Preservation Park • Oakland, CA • 94612 • United States of America
[tel] 1-510-251-1600 • [fax] 1-510-251-2203
<http://pacinst.org> • pistaff@pacinst.org

Capítulo Uno : Introducción

El propósito de este estudio es evaluar y presentar la información de una forma tal que se puedan comprender de manera amplia y exacta los influjos, descargas, y usos del agua en la gran región del delta del Río Colorado. El estudio utiliza las fronteras hidrológicas del delta descritas por Sykes (1937). Esta región comprende aproximadamente 8,611 km², extendiéndose en partes de Arizona y California en los Estados Unidos, y en partes de Baja California y Sonora, en México (ver Figura EO -1). El Río Colorado suministra prácticamente toda el agua necesaria para uso agrícola, urbano y natural en este delta definido de manera tan general. Para disminuir en parte la confusión en cuanto a la extensión actual y limitada del delta que todavía existe, en este reporte se utiliza el término “región del delta del Río Colorado” o simplemente “región” para referirse a toda la extensión hidrológica propiamente dicha del delta del Río Colorado.

La región del delta del Río Colorado es objeto de creciente interés binacional. Una gran parte de este interés se centra en las áreas de humedales y riveras del delta que todavía quedan, una región de unas 60,000 hectáreas (ha) a lo largo de ambos lados de la frontera¹ en Baja California y Sonora. Aún así, un enfoque limitado en lo que queda del delta sería demasiado restrictivo: los usos y flujos de agua en toda la región fronteriza del Río Colorado son de interés, en vista de que el área es centro de transferencias de agua, planes de conservación y restauración del hábitat, y de esfuerzos en cuanto a tratamiento de aguas de desecho.

Cada uno de estos proyectos y acciones requieren que se conozcan los usos y flujos del agua en el área particular bajo consideración. Dentro de estos diversos esfuerzos está ausente un repaso holístico de los usos y flujos de agua a través de toda la región como un todo. Este estudio busca cerrar esta brecha al ofrecer un repaso binacional amplio acerca de los recursos de agua de la región fronteriza del Río Colorado.

Con el fin de comprender mejor y de informar sobre los planes que se están llevando a cabo, así como de las decisiones que se están tomando, la información en el presente reporte está organizada de acuerdo con el uso del agua, fuentes, región política y caudal relativo. El periodo de tiempo utilizado en este estudio es de 1991 hasta 1998. En casi la mitad de esos años se observó un caudal superior al promedio en todo el sistema, debido a inundaciones a lo largo del Río Gila o a descargas en la Represa Hoover causadas por aportes de agua superiores al promedio, provenientes de la parte alta de la cuenca, y al almacenamiento a casi la totalidad de su capacidad. Para reflejar la variabilidad de las descargas en toda la región, en el reporte se divide el periodo de estudio en años de No Inundación y años de Inundación, definiéndose estos últimos como los que en la descarga media diaria máxima en el Lindero Internacional Sur excedieron los 80 m³ / s (Zamora – Arroyo y otros, 2001).

¹ El tramo de 37 km de la frontera entre México y los Estados Unidos definido por el Río Colorado

El estudio está organizado como sigue. En el resto de este capítulo se describe el área de estudio, incluyendo un repaso breve de la construcción de represas e infraestructura de desvío sobre el Río Colorado. En el Capítulo Dos se describe brevemente el contexto institucional que gobierna las descargas de agua para la región del delta. En el Capítulo Tres se discuten los métodos utilizados en el reporte, los límites del sistema, fuentes de datos y limitaciones de los mismos. En el Capítulo Cuatro se describen los caudales históricos en toda la región, orígenes y cantidades de aportes y de descargas, extracción de agua subterránea e infiltración, y la infraestructura física que transporta el agua a través de la región del delta. En el Capítulo Cinco se discute el uso agrícola, urbano y natural del agua en la región del delta. En el Capítulo Seis se ofrecen varias conclusiones de tipo general y señala las brechas que existen en la información. En el Apéndice A se ofrece un breve repaso de la salinidad en la región del delta, mientras que en el Apéndice B se definen los acrónimos utilizados en este reporte.

Descripción del Área de Estudio

La extensión de la región del delta del Río Colorado está definida por suelos aluviales, a pesar de que los tipos de suelo varían desde suelos finos de arcilla fina compactada en el Valle Imperial, hasta suelos arenosos porosos en las riberas de los ríos aguas abajo de la Represa Morelos. El tipo de suelo determina el drenaje, la escorrentía, capacidad de almacenamiento de agua, cuáles productos pueden cultivarse con éxito, y otros usos de la tierra. Los suelos de la región del delta en general son planos hasta ligeramente inclinados. Las características de drenaje van desde arenas excesivamente drenadas y arenas con guijarros, hasta arcillas sedimentarias de poco drenaje (Departamento de Agricultura de los EUA, 1980).

Formación del Delta del Río Colorado

Dos factores importantes crearon el delta del Río Colorado: la inmensa cantidad de sedimento acarreado por el mismo río, y la estructura dinámica de la cuenca donde el río depositó esos sedimentos. Con el paso de varios millones de años, el Río Colorado acarrió más de un trillón de toneladas de sedimento desde las Montañas Rocosas, aguas abajo hasta la desembocadura del río (Sykes, 1937). El material derrubiado en el Gran Cañón, el Cañón Glen y en otras partes de la cuenca rellenaron unos 260 km de la parte alta del Golfo de California, desde una profundidad de miles de pies (Departamento de Transportes, 1974), efectivamente rellenando un cañón con el material removido de otros. Con anterioridad a la construcción de represas en la parte superior (que atrapan sedimento), el Colorado transportó entre 45 a 455 millones de toneladas métrica de sedimento anualmente (Minckley 1991), depositando entre el 70 y 80 por ciento de este material en el delta (Morrison y otros, 1996). Por unidad de agua, este sedimento es diez veces el que acarrea el Nilo y diecisiete veces el del Río Mississippi (de Buys, 1999).

No obstante, a diferencia del Nilo o del Mississippi, donde ambos desembocan en sendas plataformas continentales de poca profundidad a lo largo de un amplio mar, el Colorado desemboca en

una angosta fosa submarina con una profundidad estimada de 2,700 m (Sykes, 1937). Esta fosa yace dentro de una dinámica zona de desbordamiento de la corteza conocida como la Zona de Grieta del Golfo de California (Cohen y otros, 1999); la fosa lentamente se extendió aún cuando el río depositó sedimento dentro de ella. El río inicialmente se juntó con el Golfo a más de 160 km abajo del actual punto más al norte, rellenando gradualmente la fosa submarina al punto que, en la actualidad, el río desemboca como a sesenta millas más hacia el sur (Sykes, 1937). La región del delta puede visualizarse como una gigantesca “T”, con un brazo extendiéndose hacia el noroeste y el otro al sudeste, con una corta derivación que corre aproximadamente en forma perpendicular a las primeras, extendiéndose hacia Yuma, Arizona (ver Figura EO-1). Las fuertes marejadas en el Golfo, que alcanzan una amplitud vertical de más de 8 metros en la desembocadura del río (Lavín y otros, 1997) también han contribuido a la formación del delta y a la re-distribución de sedimentos en todo el Golfo.

Antes de ser embalsado, el Colorado con frecuencia cambió de curso, saliéndose de cauce conforme los sedimentos rellenaron su cauce: áreas no desarrolladas en el delta están repletas de pequeñas lagunas circulares y aguas estancadas, que son vestigios de antiguos meandros. Periódicamente, el río corrió hacia el noroeste, hacia la actual población de Indio (Sykes, 1937). Eventualmente se formaron dos parapetos, uno al sudeste de lo que es hoy Mexicali y el otro al sur de las Montañas de la Sierra de los Cocopah, dividiendo la cuenca en tres sub-cuencas, con la del norte desembocando en el actual Lago Salton, una sub-cuenca más pequeña al sudoeste, desembocando en la efímera Laguna Salada, y el resto drenando en la parte superior del Golfo de California (ver Figura 1.1). La división entre la Laguna Salada y los drenajes al Golfo es poco pronunciada; fuertes avenidas a lo largo del curso principal y el Río Hardy drenarán parcialmente hacia la Laguna, y las mareas de primavera en el Golfo ocasionalmente pasarán sobre los parapetos, drenando también hacia la Laguna. La elevación máxima en la región del delta se encuentra en la Represa Imperial, con una elevación de la superficie de 46 m sobre el nivel medio del mar (snmm). La elevación máxima en Indio, California, cerca del punto más al norte del brazo noroeste de la región del delta, es de 9.1 m snmm. El punto más bajo se encuentra en el fondo del Mar Salton, aproximadamente a -82.6 m snmm (la elevación actual de la superficie del Mar es de -69.4 m snmm). El punto más bajo de la cuenca de la Laguna Salada es de -3 m snmm.

La vertiente del Río Colorado, como un todo, cubre unos 632,000 km², de las cuales 3,200 km están en México (Getches, 1985). Las cuencas del Mar Salton y de la Laguna Salada cubren adicionalmente unos 21,700 km² y 5,440 km², respectivamente. La Cuenca del Mar Salton incluye una parte de la Montaña San Gorgonio (3,506 m de elevación), con una precipitación media anual estimada de menos de 2.5 cm (Hely y Peck, 1964). La precipitación media anual estimada en la cuenca de la Laguna Salada es generalmente menos de 1.2 cm, mientras que en la región del delta en general es menos de 0.05 cm (Hely y Peck, 1964).

El Río Colorado recorre unos 2,250 km desde sus orígenes en las Montañas Rocosas en Colorado, hasta su desembocadura en el Golfo de California. El área de estudio incluye los últimos

206 km del Río Colorado, desde la Represa Imperial hasta el Golfo. En su discurrir aguas abajo desde la Represa Imperial, el río se encuentra con la Represa Laguna (9.7 km), la desembocadura del Río Gila (24 km), el Lindero Internacional Norte (NIB, por sus siglas en Inglés) con México (45.1 km), la Represa Morelos (46.8 km), el Lindero Internacional Sur (79 km), el puente del Ferrocarril Sonora – Baja California (119.7 km), y la desembocadura del Río Hardy (146 km). El Río Gila, con una cuenca de unos 150,000 km² en el sur de Arizona y partes de Nuevo México y Sonora, recorre 1,010 km para unirse con el Río Colorado cerca de Yuma, Arizona. Las otras corrientes perennes en el área de estudio son los antiguos lechos del Río Colorado, que actualmente llevan aguas de desecho agrícola y municipales. De éstos, el Río Álamo que corre por el norte de la frontera por unos 97 km, desemboca en el Mar Salton y es el mayor en términos de descarga media anual. El Río New recorre unos 32 km por el norte, a través del Valle de Mexicali y la ciudad de Mexicali, hacia la frontera, y luego otros 97 km a través de la parte baja del Valle Imperial, donde recorre unos 24 km por el sudoeste para desembocar en el Río Colorado cerca de la zona de las mareas. El Río Whitewater, conocido también como Whitewater River Stormy Channel (Canal Tormentoso del Río Whitewater) lleva principalmente aguas de eventos de tormentas eventuales hacia el Mar Salton.

Clima

La región del delta yace dentro del desierto de Sonora. Es una región caliente y seca, cuya precipitación anual promedio es menos de 7.5 cm, mientras que las temperaturas diarias máximas pueden superar los 38° Celsius durante más de 5 meses en el año.² El clima genera un importante flujo neto de agua, con tasas de evaporación (medida en bandeja) que en la región supera los 2.7 m cada año (Owen-Joyce y Raymund, 1996). La precipitación tiende a decaer durante dos estaciones definidas, con precipitaciones generadas por la humedad proveniente del Océano Pacífico, y las lluvias veraniegas, que a menudo se presentan en forma de tormentas de corta duración y alta intensidad, generadas por la humedad del Golfo de California (Hely y Peck, 1964). Las tormentas breves pueden producir una importante escorrentía en las montañas vecinas, aunque la mayoría de esta escorrentía tiende a ser absorbida por los suelos aluviales arenosos en la cuenca (Olmsted y otros, 1973).

Historia Humana de la Región

A pesar del clima, diferentes tribus, incluyendo la de los Indios del Desierto de Cahuilla en el norte, los Kamia, los Quechan y los Cocopah (Cucapá en México) han vivido en la región durante cientos y quizás miles de años (Kelly, 1950). El fértil suelo aluvial y mucho sol, hacen que el área sea ideal para agricultura.

Ya en 1849 se habían concebido planes para irrigar la Depresión Salton con agua del Río Colorado, aunque transcurrieron otros cincuenta años antes de que se concretaran los planes de desarrollo (Hundley, 1975). En 1901, la California Development Company (Compañía para el

² Hoja de datos IID – Resumen de Clima (2000)

Desarrollo de California) cavó un canal en la rivera del Río Colorado, justo al norte del Lindero Internacional Norte para conducir agua a través de México hacia un antiguo cauce del Río Colorado, conocido como el Río Álamo. Las primeras aguas discurrieron al Valle Imperial en Junio de ese año, y durante los siguientes ocho meses, 2,000 colonos habían excavado 645 km de canales y habían preparado 40,000 ha de terrenos de cultivo (Hundley, 1975). En 1905, las inundaciones a lo largo del cauce principal rompieron una compuerta provisional, desviando e incrementando una parte del Río Colorado hacia el canal de irrigación, y en última instancia ensanchando la toma de agua a 0.8 km de ancho y desviando todo el río hacia su antiguo curso (de Buys, 1999). Durante dos años parte, o la totalidad, del Río Colorado fluyó a través de esta toma, inundando cientos de miles de acres en la cuenca de Salton y creando el Mar del mismo nombre³ (Sykes, 1937). Las correntadas producidas por las inundaciones tallaron el Río New en el sedimento suave del delta, destruyendo la mayor parte de Mexicali y transportando en forma estimada 340 millones de metros cúbicos de sedimento hacia el Mar Salton (de Buys, 1999).

También ocurrieron inundaciones periódicas a lo largo del Río Gila, inundando el poblado de Yuma, Arizona y las tierras cultivadas de los alrededores. Teniendo que hacerle frente a ciclos de inundaciones y de sequía, la gente de la región recurrió al gobierno federal en busca de una infraestructura que regulara el caudal de los ríos Colorado y Gila, llamados que provocaron un eco lanzado por los intereses del sur de California, donde estaban ansiosos de llevar agua del río hacia sus ciudades que estaban creciendo (Reisner, 1993). El gobierno federal autorizó la construcción de una enorme infraestructura que dominara el Río Colorado y mejorara el pronóstico y la confiabilidad de sus avenidas. La Represa Laguna, primera represa de importancia sobre el Río Colorado, se terminó en 1909, para que le diera servicio a los proyectos de Gila y Yuma⁴. La Represa Roosevelt, sobre el Río Salt al este de Phoenix, Arizona, quedó cerrada en 1911, reduciendo de manera notable las inundaciones en el Río Gila. El sifón de Yuma, terminado en 1912, inicialmente transportó agua de la estructura de desfogue del Canal Principal de Yuma, en el lado de California de la Represa Laguna, en el Río Colorado, hacia Arizona, para que le sirviera al Proyecto Yuma. La Represa Hoover, a 472 km río arriba de la Represa Imperial, regula las descargas en la región fronteriza del Río Colorado. La Represa Imperial, terminada en 1938 es una represa de desvío, en la frontera aguas arriba de la región del delta; desvía el agua hacia el Canal All American (inicialmente sirviendo a California, terminado en 1940) y al Canal Principal por Gravedad de Gila (que le sirve a Arizona, terminado en 1939). En 1941 se terminó un brazo de desvío en el Canal All American para que llevara agua a una parte de la Reserva División en California, y a todo el Valle División en Arizona, con agua desviada en la Represa Imperial, puenteando de manera efectiva la función de desvío de la Represa Laguna. La última

³ Durante el recorrido por sus meandros a través de la región del delta, el Río Colorado periódicamente se drenó hacia el norte, dentro de la Depresión Salton, formando y uniendo encarnaciones previas del Mar Salton, que se conocían como Lago Cahuilla.

⁴ Sykes (1937: 67) informa que el embalse formado por la Represa Laguna “se llenó de sedimento prácticamente hasta el borde de la represa a pocas semanas de ser terminada.”

estructura de importancia en el río, la Represa Morelos (terminada en 1950), desvía agua en el Canal Álamo de México, construido inicialmente en 1900 para desviar el agua hacia el Valle Imperial. El Canal Coachella, que desvía agua del Canal All American para irrigar las tierras del Valle Coachella, se terminó en 1948. El Canal Wellton-Mohawk, que desvía agua desde el Canal Principal por Gravedad de Gila, se terminó en 1951. La Represa Painted Rock, última represa sobre el Río Gila antes de su confluencia con el Río Colorado, se terminó en 1960.

En los inicios del siglo 20, grupos de interés de los Estados Unidos poseían o controlaban grandes extensiones de la región del delta en México (Ward, 1999). La administración mexicana de Cárdenas (1934 – 1940) expropió muchas de estas propiedades, promoviendo la inmigración hacia la región y el desarrollo de ejidos (granjas comunitarias), lo que condujo al corte de vegetación a gran escala y a la conversión de los humedales del delta en terrenos agrícolas (Ward, 1999). Estas tierras, inicialmente irrigadas casi de manera exclusiva por aguas superficiales del Río Colorado, fueron organizadas en el Distrito 14 de Irrigación, administrado por la Comisión Nacional de Agua (CNA) de México. El área total irrigada llegó a su máximo con 192,612 ha hacia finales de los años 50, pero decreciendo de allí en adelante. La extracción a gran escala de aguas subterráneas se inició a mediados de los años 50, en parte como respuesta a la disminución de flujos debidos a la captación en el embalse del Cañón Glen, y en parte debido al creciente consumo en los Estados Unidos (Bradley y De Cook, 1978).

Estas represas y canales facilitaron la conversión de unos 1.2 millones de acres de tierra en la región fronteriza para agricultura de irrigación, generando más de \$2 billones de ingresos en 1997 en toda la región. La agricultura sigue siendo el motor económico en la región fronteriza, a pesar de que en años recientes la producción industrial, principalmente maquiladoras en Mexicali, se han convertido en la principal fuente de ingresos en la región mexicana del delta. Toda la región ha sufrido un marcado crecimiento de población durante la última década, como se muestra en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1
Población en la Región del Delta del Río Colorado

	1990	2000
Parte Baja del Valle Coachella	84,139	126,177
Valle Imperial	110,749	154,549
Mexicali	601,938	764,902
Área de Yuma	78,803	108,055

Fuentes: Departamento de Seguridad Económica de Arizona; Departamento Financiero de California, 2000; CVWD 2000; INEGI

Capítulo Dos : Contexto Institucional

En los Estados Unidos, un complejo conjunto de tratados, leyes, acuerdos, contratos, resoluciones judiciales y reglamentos, conocidos como la Ley del Río, controlan los flujos y usos del Río Colorado. La Ley del Río, en un sentido amplio, determina la cantidad y el momento de entrar agua en el área de estudio. En México, la reglamentación para el uso del Río Colorado está centralizada a nivel federal, pero la información sobre esta estructura legal no está tan a la mano. En este capítulo se describe en términos generales, las más prominentes de estas instituciones en los Estados Unidos y México.

Los ingresos de agua del Río Colorado aguas abajo de la Represa Hoover se controlan y regulan con base a las necesidades de control de inundaciones, órdenes de desvío aguas abajo, y a la demanda de generación hidroeléctrica (cf. Nathanson, 1980). El grado de control institucional sobre el Río Colorado no puede exagerarse: la inundación de 1983 ha sido la única vez, desde la construcción de la Represa Hoover en 1935, que se descargó la represa, y a lo largo de la parte baja del Río Colorado, no hubo control total por parte de la Oficina de Reclamos del los Estados Unidos (USBR, por sus siglas en inglés) (Holburt, 1984). Es difícil comprender el concepto de que, en uno de los ríos principales, es posible abrir o interrumpir el flujo, sin embargo este es el factor principal en la parte baja del Río Colorado. Salvo en raras ocasiones de avenidas desacomodadamente altas en el Lago Mead, y a la disponibilidad limitada de almacenamiento (lo que dio origen a los Lineamientos Para Control de Descarga de Inundaciones del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos), los flujos en la parte baja del Río Colorado son autorizados por el USBR. Éste determina las tasas de descarga con base a un complejo algoritmo para cumplir con las órdenes de consumo aguas abajo para desvíos de tipo agrícola y urbano. En este algoritmo se integran órdenes de desvío agrícola, entregas necesarias para México, necesidades de almacenamiento, control de inundaciones, y contratos de generación de energía hidroeléctrica. La decisión de las descargas toma en cuenta consideraciones sobre prioridades en el uso del agua, según lo requiera la ley federal que se aplique (USBR 1996). El flujo de aportes en el área de estudio es casi en su totalidad dependiente de las descargas de las represas que se encuentran aguas arriba.

Dentro de la Ley del Río se encuentran dos elementos principales que se refieren a las obligaciones que tienen los Estados Unidos con México: el *Tratado de 1944 Sobre Utilización del Aguas de los Ríos Colorado y Tijuana y del Río Grande con México*⁵ y la Minuta 242 de la Comisión del Lindero Internacional y Aguas (IBWC por sus siglas en inglés) emitida en 1973. El primero garantiza la entrega de 1,850 millones de metros cúbicos, o MMC / año a México. En ausencia de excedentes, la responsabilidad sobre la entrega de esta aguas debe compartirse de manera equitativa por las cuencas superior e inferior (Hundley, 1966; 1975). El Artículo 10(b) del tratado le asigna a

⁵ Ver a Hundley (1966) para una historia completa del tratado de 1944 con México

México 246.7 MMC adicionales cuando la Sección de los Estados Unidos de la IBWC determina que existe un excedente de aguas en el Río Colorado superior a la cantidad necesaria para suplir el uso en los Estados Unidos; tales excedentes según el Tratado fueron declarados en 1997 – 2000.

Después de una larga disputa entre México y los Estados Unidos acerca de la calidad del agua enviada a México, la cual había sido degradada por descargas salobres del Distrito de Riego y Drenaje de Wellton – Mohawk en Arizona, a principio de los años 60, los dos países adoptaron la Minuta 242 de la IBWC (Fradkin, 1981; Wahl, 1989). La Minuta 242 indica que 1,670 MMC de las entregas anuales de agua a México en la Represa Morelos deberían tener una salinidad promedio menor de 115 (± 30) ppm (partes por millón) que la salinidad que tiene el río en la Represa Imperial; los restantes (73 MMC entregados en la frontera internacional con México, cerca de San Luis, tendrán “una salinidad sustancialmente parecida a la de las aguas que se acostumbra entregar allí” (en Hundley, 1986:39). El Congreso entonces adoptó el Acta Para Control de Salinidad en la Cuenca del Río Colorado, de 1974, autorizando medidas que permitieran cumplir con la Minuta 242, incluyendo la construcción de la Planta de Desalinización de Yuma⁶, por un monto de \$250 millones (Wahl, 1989), y la construcción de la Extensión del Desvío Principal de Desfogue (MODE, por sus siglas en inglés) y de su extensión de desvío, que descarga el drenaje agrícola en la Ciénaga de Santa Clara en México (Glenn y otros, 1992).

Durante el periodo estudiado, se tenía disponible suficiente agua en el Lago Mead como para cumplir con México las obligaciones del tratado, así como satisfacer las órdenes de desvío de los Estados Unidos por parte de los propietarios de contratos en Arizona y California. En 1996, se declaró un excedente limitado en los Estados Unidos, para satisfacer las órdenes de desvío de los usuarios aguas arriba del área de estudio; en ese año no se dispuso de excedentes de agua para México.

En Arizona, el Río Gila está completamente ocupado por usuarios aguas arriba del área de estudio, y es objeto de adjudicación continua (ver Torzón, 2000), lo que significa que la descarga del Río Gila en la región del delta está limitada a drenaje agrícola y a flujos poco frecuentes de inundación. La Asociación de Usuarios del Agua del Condado de Yuma, formada en 1903 para recibir agua del Proyecto Federal de Yuma tiene, entre sus prioridades más altas, los derechos sobre las aguas del Río Colorado en Arizona. Tales derechos de agua se definen como “la cantidad razonablemente necesaria para riego” en tierras del Proyecto Yuma (20,000 ha) en el Valle División, y 1,340 ha fuera del área de estudio, en Yuma Mesa (Nathanson, 1980). El Proyecto Gila contempló la entrega de agua en 6,070 ha en los Valles Gila Norte y Sur, dentro del área de estudio, y en 10,120 ha en la Unidad Yuma Mesa, y 30,400 ha en la división Wellton – Mohawk, ambas fuera del área de estudio, pero que reciben agua del Canal Principal Gila de Gravedad, que corre a través del área de estudio. Los derechos de agua en las tierras del Proyecto Gila se cuantifican con base a la capacidad del Canal Principal Gila de Gravedad (Nathanson, 1980).

⁶ La planta fue prácticamente terminada en 1992 y en la actualidad está en estado de espera.

El Acuerdo de Siete Partes de 1931, de California (en Nathanson, 1980) codificó la prioridad de los derechos sobre las aguas del Río Colorado establecidas según precedencia de uso por las siete entidades que han desviado o solicitado agua del río (Gottlieb y FitzSimmons, 1991). El Acuerdo de Siete Partes estableció un conjunto de derechos en siete niveles, de acuerdo al siguiente orden de prioridad: (1) el Distrito de Riego de Palo Alto (PVID); (2) el Distrito de Reservación del Proyecto Yuma (compuesto de las Unidades Indian y Bard); (3) el Distrito de Riego Imperial (IID), el Distrito de Aguas del Valle Coachella (CVWD), y el Distrito de Riego de Palo Verde; (4) el Distrito de Aguas del Sur de California (MWD) y/o la Ciudad de Los Ángeles, y la Ciudad y el Condado de San Diego; (6) IID y PVID para uso en la “Parte Baja de Mesa Verde”; y (7) “toda el agua restante disponible para ser usada en la Cuenca de California del Río Colorado”. Los primeros tres conjuntos de prioridades dan un total de consumo de 4,750 MMC anuales. El PVID tiene derecho sobre las aguas necesarias para ser usadas en beneficio de 42,300 ha; los derechos sobre los restantes 4,750 MMC recaen en usuarios dentro del área de estudio, salvo aquellas aguas que puedan necesitarse para ser usadas en beneficio de 6,480 ha en las tierras de Mesa Palo Verde.

La Tabla 2.1 muestra el consumo utilizado en los distritos de riego dentro del área de estudio, y en otros distritos que reciben agua a través del mismo, así como entregas a México, para propósito de comparación con los volúmenes calculados en el estudio (mostrados en el Capítulo Cinco). De ninguna manera en este estudio se pretende interpretar la Ley del Río, o evaluar el uso que los propietarios de contratos hagan con las aguas del Río Colorado. Debe hacerse notar también que las definiciones utilizadas en este reporte no se adhieren de manera estricta con aquellas que se encuentran en la Ley del Río.

Tabla 2.1 Consumo Medio Anual y Entregas a México		
	Año de No Inundación	Año de Inundación
MMC		
<i>Arizona</i>		
D. R. y D. Wellton & Mohawk	333	317
Ciudad de Yuma	17	19
D.R.Valle Gila Norte	25	23
D.R. de Yuma	64	60
D.R. de Mesa Yuma	239	229
Unit "B" I&D District	31	27
Asoc. Usuarios de Agua de Cond. Yuma	273	257
Cocopah Indian Reservation	6	14
Total de retornos no medidos en AZ *	218	185
<i>Sub-región de California</i>		
Div. Reservación Proy. Yuma, Unid. India	52	43
Div. Reservación Proy. Yuma, Unid. Bard	64	63
Distrito de Riego Imperial	3,608	3,714
Distrito de Riego del Valle Coachella	396	408
Total Sub-Región de California	4,120	4,228
Total de retornos no medidos en CA	115	111
<i>Sub-Región México</i>		
Entrega en Frontera Int'l. Norte **	1,842	4,537
Entrega en Frontera Terrestre Int'l. Sur	143	146
Entrega total según Tratado	1,949	5,256
Desvío Según Minuta 242	148	109
<p>* Retornos no medidos estimados por la Oficina de Reclamación de los EU (USBR) para todo el estado.</p> <p>** Entregas a México según localidad se reportaron únicamente en los años de estudio 1995-1998; "Entregas totales según Tratado reflejan la media de todos los años del estudio, por lo tanto esta no es la suma de los dos términos. Fuente: USBR (1991-98a)</p>		

Por ejemplo, en los reportes anuales *Recopilación de Registros* del USBR, el “uso para consumo” (o simplemente consumo) se define como “extracciones incluyendo el bombeo subterráneo, menos el flujo retornado medido y menos el flujo actual estimado no medido” hacia el cauce principal del Río Colorado. Para llevar una contabilidad más detallada, este estudio define el “uso” como las extracciones menos los retornos dentro de las fronteras del área de estudio como un todo, en lugar de solamente hacia el cauce principal. Además, los “Años de Inundación” en el Río Colorado puede asumirse que son años en los cuales se realizaron descargas para control del caudal, según lo establecido por los lineamientos del Cuerpo de Ingenieros del Ejército; durante el periodo de estudio, tales descargas se hicieron en 1997-1998. En este estudio se definen los “Años de Inundación” con base a descargas en el Lindero Internacional Sur, agregando a lo anterior el año 1993.

La Constitución Mexicana establece el marco legal necesario para el manejo de aguas en México y le reserva al gobierno federal los derechos sobre las aguas nacionales, incluyendo el Río Colorado (Castro, 1995). La Constitución también le reserva al gobierno nacional la propiedad del agua subterránea (Cossio Díaz 1995). En la práctica, la Comisión Nacional de Agua (CNA) de México determina las entregas del Río Colorado y reglamenta la extracción de aguas subterráneas dentro de la región del delta (Mumme, 1996). La CNA determina los patrones de cosechas y asigna consecuentemente el agua. En años recientes, sin embargo, se han iniciado esfuerzos para descentralizar esta autoridad y otorgar una mayor autonomía a nivel local (Clinton y otros, 2001)

Capítulo Tres : Metodología

Este estudio elaboró un balance de agua para la región del delta del Río Colorado haciendo uso de datos disponibles de flujos superficiales y de extracción del subsuelo, volúmenes calculados de evaporación y evapotranspiración, y descargas estimadas basadas en registros históricos. En este capítulo se describen las fronteras del área de estudio, los fundamentos para separar los datos espacial y temporalmente, orígenes y limitaciones de los datos, y los métodos utilizados para elaborar el balance de aguas.

Fronteras del Área de Estudio

Con el fin de evitar confusiones con la extensión limitada de lo que queda del delta del Río Colorado, en este estudio se utiliza el término “región del delta del Río Colorado” o “región”, para referirse a las fronteras hidrológicas del delta del Río Colorado. No obstante, tales fronteras no están uniformemente definidas en razón de las variaciones en los sedimentos del río, la mezcla y la cobertura con aluvión local, y a las limitaciones cartográficas debidas a la escala del mapa de Sykes. Además, las

fronteras han sido modificadas ligeramente en algunos lugares para reflejar la localización de las estaciones de medición o por otras razones relacionadas con los datos. Por ejemplo, el estudio utiliza Milepost 87 como la localización en la cual el Canal de Coachella ingresa a la región del delta, debido más a la disponibilidad de registros de descarga para ese sitio, que por razón de que es el punto definitivo en el cual el canal cruza la frontera de Sykes. Para cada una de las tabulaciones en los siguientes capítulos se describe el contexto de los flujos o el uso medido.

Para contar con una base comparativa y en aras de mayor claridad, el área de estudio está dividida en tres sub-regiones: Arizona, California y México (ver Figura 3.1). Debido a que el Distrito 14 de Riego de México incluye tierras cultivadas tanto en Baja California como en Sonora, los datos de caudal y de uso para estos estados se han combinado dentro de la sub-región de México. Se arguye que la segregación de datos en estas sub-regiones crea una separación arbitraria y que fomenta las fronteras políticas a expensas de un enfoque holístico, a pesar de que las sub-regiones proveen un medio razonable y expedito para uso segregado y también para reconocer el papel de las diferentes autoridades que regentan los recursos dentro de sus fronteras.

Años de No Inundación y de Inundación

Para reflejar la variabilidad de los flujos del Río Colorado, en el reporte se divide el periodo de estudio en años de No Flujo y de Flujo. Los datos para los años de No Flujo reflejan un promedio de los años 1991, 1992, 1995 y 1996. Los datos para los años de Flujo reflejan un promedio de los años 1993, 1997 y 1998. El año 1994 no se incluyó en el estudio debido a la inquietud de que los persistentes daños por inundación en los eventos del Río Gila de 1993 distorsionaran los patrones de siembra y utilización en las sub-regiones de Arizona y México. La descarga media anual en el Lindero Internacional Sur para los años de No Inundación fue de (26.6 MMC); para los años de Inundación, la descarga media anual fue mayor en dos órdenes de magnitud: >2,600 MMC. Tal separación entre años de Inundación y de No Inundación resalta la diferencia tan importante en cuanto a descargas en estas dos categorías. La descarga media para el periodo como un todo ocultaría tales diferencias, produciendo un panorama equivocado en cuanto a la cantidad de agua (y usos relacionados) en cualquier año dado.

En la escogencia del periodo de estudio se refleja el deseo de maximizar el número de puntos de datos, a la vez que se minimizan las distorsiones debido a cambios con el tiempo, tales como crecimiento de la población, variaciones en las cosechas como respuesta al mercado y a otras fuerzas, y otros factores. Los intentos para generalizar los datos a lo largo de varios años pueden ser objeto de limitaciones e inexactitudes, particularmente distorsiones debidas a cambios demográficos⁷. A pesar del importante crecimiento de la población en la región del delta, éste refleja cambios muy limitados

⁷ Por ejemplo, entre 1990 – 2000, la población de Mexicali creció en forma estimada en un 21%, en el Valle Imperial un 28% y en el área de Yuma un 27% (Departamento de Seguridad Económica de Arizona 2001; Departamento Financiero de California 2001; e INEGI 2000).

en cuanto al uso urbano (suma de usos domésticos, municipales y de consumo industrial) entre 1991 y 1998.

Aguas Subterráneas

Una gran cantidad de las aguas subterráneas que yacen bajo la región del delta se originaron en el Río Colorado. Las aguas subterráneas, tal y como se entienden en este reporte, se refieren solamente al método mediante el cual el agua fue capturada para su uso, en distinción del agua superficial desviada directamente del cauce principal del Río Colorado. El agua subterránea y el agua superficial están íntimamente relacionadas; por ejemplo, los ríos y canales a menudo pierden agua por filtración durante las crecientes altas, y ganan agua acumulada en las orillas durante épocas de poco flujo (Dunne y Leopold, 1978). Aún así, con el fin de comprender mejor los usos del agua en la región, este estudio considera la extracción de aguas subterráneas y la recarga como términos separados en el balance de aguas, en forma de influjos o ingresos y de salidas, respectivamente. La minería de aguas subterráneas (extracción por encima de los niveles de recarga) crea efectivamente una fuente adicional de uso, lo que quedaría oculto si el agua del subsuelo no se tratara como recurso separado. La información sobre flujos de agua subterránea, recarga, y tasas de extracción puede variar en diferentes áreas de la región del delta, y donde se tienen registros, éstos no son consistentemente confiables. Varios estudios que se están realizando tratan de evaluar mejor y de ampliar el conocimiento que se tiene sobre fuentes, extensión, calidad, y caudal del agua del subsuelo en la región.

Origen de Datos y Limitaciones⁸

Para este reporte no se efectuaron mediciones nuevas. Más bien, el balance de agua es una recopilación de registros existentes y de evaluaciones de los mismos. Las fuentes primarias de información para este estudio incluyen el Servicio de Prospección Geológica de los Estados Unidos (US Geological Survey (USGS)), la Oficina de Reclamación de Tierras de los Estados Unidos (US Bureau of Reclamation (USBR)), las secciones mexicanas y de los Estados Unidos en la Comisión de la Frontera Internacional y Aguas (IBWC), la Comisión Nacional de Agua (CNA), la Comisión de Servicios de Agua del Estado, la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Mexicali, y la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural, así como ciudades y distritos de riego en forma individual en los Estados Unidos y México. Para una lista completa, refiérase a “Fuentes de Datos” en la Sección de Referencias.

Diversas limitaciones en los datos afectan la exactitud de este reporte. Algunos de los problemas específicos encontrados con los datos incluyen: información faltante y fuentes no reportadas; variabilidad de los datos; inexactitud de los datos. Para muchas áreas en la región del delta no se encontró información disponible. Dentro de las principales brechas en el reporte se incluye la ausencia

⁸ Ver Gleick (1993) para una adecuada advertencia sobre inexactitudes y poca confiabilidad de datos medidos e inferidos.

de datos sobre descargas del Río Colorado aguas abajo del Lindero Internacional Sur, volumen de escorrentía en la sub-región de México, y cantidad de agua del Río Colorado y escorrentía local que fluye hacia la Laguna Salada. En El Marítimo, última estación de medición sobre el Río Colorado, existen mediciones únicamente para los años 1960-1968, que estaban influidas por aportes del Río Hardy, retornos agrícolas y marejadas de la parte superior del Golfo, todo lo cual constituye un reto en los esfuerzos por relacionar los caudales estimados con registros de etapas subsiguientes o con caudales en el Lindero Internacional Sur. Otras brechas incluyen información incompleta sobre tipos de freatofitas y cobertura del follaje en la región, así como información sumamente limitada sobre tasas de recarga de acuíferos.

La variabilidad de los datos, definiciones, estándares, así como limitaciones en tiempo y espacio hacen que las comparaciones sean difíciles. Ejemplos de esta variabilidad van desde las unidades utilizadas para las mediciones, hasta normalización de los reportes. Particularmente, los reportes de aguas del subsuelo tuvieron poca confiabilidad: una gran cantidad de información es reportada de manera voluntaria por operadores de pozos y extracciones similares (USBR, 1996). La variabilidad en el periodo de tiempo durante el cual se recolectaron los datos empañan también cualquier comparación y le resta confianza a los mismos. Por ejemplo, la CNA reporta patrones de siembra de cosechas y entregas de agua según año de agua, en lugar de hacerlo según el año calendario utilizado en este estudio; algunos de los datos de la CNA se reportan por estación del año, complicándose así los esfuerzos para convertirlos a formato de año calendario.

Adicionalmente, los datos reportados, incluyendo aquellos presumiblemente confiables como lo son los caudales de los medidores de flujo, pueden no ser totalmente exactos. Owen-Joyce y Raymond (1996) evaluaron la exactitud de las estaciones de medición que registran los desvíos de agua y los retornos al Río Colorado aguas arriba del Lindero Internacional Norte, y salvo la estación en la Conducción de Desechos del Canal Principal de Yuma, se reportó que los registros de la estación de los Estados Unidos utilizados en este reporte están dentro de un 10% de la descarga real, en un 95% de las veces. La Tabla 3.1 muestra la exactitud reportada para otros registros de medición. La exactitud de los datos medidos de caudal sugiere que las descargas reportadas en este informe son, cuando mucho, dentro de un 10% de las condiciones reales. Es probable que otros datos, particularmente aquellos correspondientes a agua subterránea y a cantidades entregadas, sean menos exactos, aunque no se realizaron análisis de sensibilidad como parte de este estudio.

Tabla 3.1 Exactitud de Registros en Algunas Estaciones de Medición de Caudal		
Nombre de la Estación	Instrumento N°	% de error
Conducción de Desechos Canal Principal de Yuma *	09525500	> 15%
Río Gila, cerca de Dome	09520500	~10%*; > 15% - ~15% +
Frontera Int'l Norte +	09522000	~ 10%
Toma en Represa Morelos +	09522030	~ 15% - ~10%
Frontera Int'l Sur +	09522200	> 15%
Río Álamo, cerca de Niland **	10254730	~ 15%
Río New, cerca Westmorland **	10255550	~ 10%
Fuentes: * Owen-Joyce y Raymond (1996) + Hill (1993) ** USGS		

Métodos

En el estudio se utilizó un balance de masa para estimar los flujos en toda la región. La ecuación del balance de masa (Owen-Joyce y Raymond, 1996) puede describirse como:

$$Q_{ds} = Q_{us} + Q_{rf} + P + T_r - Q_{ex} - E - CU_d - ET - \Delta S_r - \Delta S_a - Q_{sb},$$

donde

Q_{ds} = caudal en el límite aguas abajo

Q_{us} = caudal en el límite aguas arriba

Q_{rf} = flujo retornado al río (desde afuera de la región)

P = precipitación

T_r = ingreso de tributarios (escorrentía local)

Q_{ex} = agua exportada

E = evaporación de superficies abiertas de agua

CU_d = uso doméstico municipal e industrial

ET = evapotranspiración

ΔS_r = cambio en almacenamiento del embalse (incluyendo el Mar Salton)

ΔS_a = cambio en almacenamiento del acuífero

Q_{sb} = caudal hacia la sub-cuenca

El total de caudal ingresado, para toda la región, o para una sub-región particular, puede describirse como:

$$IF = Q_{us} + Q_{rf} + P + T_r .$$

El total de caudal que sale puede describirse como:

$$OF = Q_{ds} + Q_{ex} + E + C_{ud} + ET + Q_{sb} + \Delta S_r + \Delta S_a .$$

Tal como se definió anteriormente, el caudal ingresado menos el caudal egresado en cualquier año dado debe ser igual a cero. Si los términos individuales no se balancean, las entradas no serán iguales a las salidas, lo que genera un residuo que puede ser expresado como porcentaje de las entradas. Un residuo bajo puede sugerir una exactitud relativamente alta en la ecuación de balance de agua, aunque también puede reflejar la presencia de dos o más errores que tienden a anularse mutuamente.

Los registros de descargas en la frontera aguas abajo (Q_{ds}) para las sub-regiones de Arizona y California son bastante completos; no existen registros similares para la sub-región de México, o para el sistema como un todo. La última estación activa de medición en el cauce principal del Río Colorado se encuentra en el Lindero Internacional Sur, aproximadamente a 120 km aguas arriba de la desembocadura. En la literatura se ha estimado que la descarga en la desembocadura del río es equivalente a la que se tiene en el Lindero Internacional Sur (Lavín y Sánchez, 1999; Galindo-Bect y otros, 2000). Históricamente, han existido dos puntos de medición aguas abajo del Lindero Internacional Sur: El Marítimo y M.C. Rodríguez. El Marítimo, última de las estaciones de medición sobre el Río Colorado, estaba localizada en la ribera derecha del río, a 76.6 km aguas abajo del Lindero Internacional Sur, 30.0 km aguas abajo del puente ferroviario, y a 3.2 km aguas abajo de la confluencia del Río Colorado con el Hardy (ver Figura 4.3). Los datos de caudal en esta estación están disponibles solamente entre Enero, 1960 y Julio, 1968, cuando se determinó que la influencia de las mareas distorsionaba las lecturas (CILA, 1968). Los registros de la estación posteriores a 1968 se limitan a dar el promedio diario de la altura en el instrumento, donde se refleja la influencia de la marea así como la descarga en el cauce principal y el drenaje agrícola. La estación de medición M.C. Rodríguez, localizada en la rivera izquierda del Río Colorado, localizada a 39.4 km aguas abajo del Lindero Internacional Sur, y a 7.2 km aguas arriba del puente ferroviario, fue desmantelada el 31 de Agosto de 1983 a causa del alto nivel de las aguas y de la erosión en las orillas. La descarga instantánea máxima registrada en esta estación fue de 901 m³/s, el 15 de Agosto de 1983. Los registros en esta estación reflejan filtraciones de los canales que corren adyacentes al río. En la Figura 3.2 se comparan los registros anuales de descarga en las estaciones de medición del Lindero Internacional Sur, M.C. Rodríguez y El Marítimo. Nótese que en 1962-1963, la descarga reportada en las dos estaciones localizadas aguas abajo excedió la del Lindero Internacional Sur, lo que posiblemente refleja retornos de aguas desechadas por debajo de ese punto, o errores de reporte o de medición.

Tabla 3.2 Correlación Entre Descarga Media Diaria en el LIS y Estaciones Aguas Abajo

Estación	Intervalo	1960		1964	
		r ²	Ecuación de regresión	r ²	Ecuación de regresión
M.C. Rodríguez	1 día	0.967	y=0.959 x + 0.71m ³ /s	0.873	y=0.893 x + 0.21m ³ /s
El Marítimo	2 días	0.944	y=0.834 x + 1.42m ³ /s	0.696	y=0.694 x + 1.98m ³ /s

Para estimar durante el periodo de estudio el caudal del Río Colorado cerca del puente de ferrocarril y en su desembocadura, se corrieron regresiones lineales para los registros de descarga media diaria en las estaciones del Lindero Internacional Sur y El Marítimo, respectivamente, para los años 1960 y 1964.⁹ En la Tabla 3.2 se presenta el resultado del mejor ajuste para estas correlaciones. En la tabla, el “Intervalo” refleja el tiempo de travesía del agua entre el Lindero Internacional Sur y la estación aguas abajo, según se determinó con la ecuación de mejor ajuste. Nótese que los registros de descarga se obtuvieron por día, limitándose así la resolución en cuanto a tiempo: el tiempo real de travesía pudo haber sido varias horas más o menos que el que se presenta, y se esperaría que variara con la magnitud de la descarga. Los coeficientes de correlación para ambas estaciones son más bajos durante los presuntos años de No Inundación, reflejando posiblemente una mayor influencia de flujos de retorno variables entre el Lindero Internacional Sur y las estaciones aguas abajo.

Estas correlaciones se usaron como guía para estimar la descarga en las estaciones aguas abajo durante los años de No Inundación y de Inundación. Diversos factores, entre ellos la construcción de diques de contención, tamaño y forma alterada de canales debido a eventos de inundación que sucedieron, prácticas cambiantes de riego, variabilidad de la descarga a la Laguna Salada, y la misma exactitud dudosa de los registros en El Marítimo, limitan la confiabilidad de estas correlaciones para estimación de la descarga en la desembocadura del Río Colorado.

Las fuentes de información sobre registros de aguas que ingresan, incluyendo descargas en la frontera aguas arriba (Q_{us}) y los flujos de retorno (Q_{rf}), variaron según la sub-región. Los ingresos que llegaron a la sub-región de Arizona se derivaron en gran parte de los datos del USBR y del USGS (Oficina de Reclamación de los E.U. y Oficina de Prospección Geológica de los E.U., respectivamente). La descarga dentro de la sub-región del Río Colorado, el Río Gila, el Canal All American y otros distritos de riego¹⁰ se registraron anualmente (USBR, 1991 – 98a; USBR; USGS). Los ingresos de agua registrados en la sub-región de California a través del Canal All American en la

⁹ Se presume que 1960 fue de un año de Inundación, con una descarga media diaria máxima de 173m³/s en el LIS, mientras que se presume que 1964 es indicativo de un año de No Inundación, con una descarga media diaria máxima de 45.3 m³/s en el LIS.

¹⁰ La descarga de otros distritos de riego incluye las aguas de desecho de Yuma Mesa, Yuma Auxiliar y el WMIDD.

Represa Imperial, el Canal de Coachella, y los ríos Nuevo, Álamo y Whitewater se obtuvieron del USBR, el USGS y la IBWC (Comisión de Frontera Internacional y Agua) (1991-98). La descarga en la Caída 4 del Canal All American se dedujo de la descarga reportada por el Distrito de Riego Imperial (IID) en la Caída 1, 26 km aguas arriba, asumiendo una tasa constante de flujo (2.5 MMC/km) debido a filtración, evapotranspiración (ET) de freatofitas y evaporación, basándose en la salida total en la porción no revestida del canal (Mumme, 1996) y en las tasas reportadas de evaporación en bandeja. Los registros de ingreso de agua a la sub-región de México en el Lindero Internacional Norte y cerca del Lindero Internacional Sur se obtuvieron de la IBWC (1991 – 1998).

La precipitación P en la sub-región de Arizona se calculó a partir de la extensión abierta de agua (Hill, 1993) y de los registros de precipitación de la Estación de Cítricos de Yuma (IBWC 1991 – 1998). La precipitación en el Mar Salton se obtuvo a partir del modelo del mar Salton del USBR (Weghorst, com. pers.); y la precipitación en otras superficies abiertas de agua en la sub-región de California se calcularon a partir de la lluvia reportada por el IID y a la extensión de aguas abiertas (Jensen, 1995; Hill, 1993). La precipitación para la sub-región de México se calculó a partir de los registros de precipitación de las estaciones “Delta” y “Riito”, según lo reportado por el IBWC (1991 – 1998) y a la extensión reportada de aguas abiertas (Zamora-Arroyo, com. pers.), además de una estimación de la superficie de aguas abiertas en el Distrito 14 de Riego de México (890 ha). Los registros de precipitación y evaporación de los años 1995 y 1996 no estaban completos para la estación “Delta”, y por lo tanto las medianas para la sub-región de México no incluyeron estos años.

Factores tales como la profundidad y permeabilidad del suelo, cobertura de la vegetación e intensidad y duración de las lluvias afectan la escorrentía y los ingresos de tributarios (T_i) (Hely y Peck, 1964). Estos últimos estimaron la escorrentía del área baja del Río Colorado – Mar Salton midiendo la infiltración inicial del suelo y correlacionando ésta con el tipo de suelo, proyectando esto a una curva de escorrentía. Esta curva de escorrentía se usaría después para proyectar la escorrentía como un porcentaje de la precipitación, yendo efectivamente desde 0% para suelos aluviales arenosos, a aproximadamente 8% para suelos aluviales menos permeables, y hasta más del 20% para áreas al pie de colinas o en mesetas, con suelos menos permeables. En este estudio se estima que la escorrentía es un 8% de la precipitación, para tomar en cuenta la falta de registros de lluvias en las regiones montañosas, en contraposición a la infiltración esperada en suelos aluviales permeables entre la base de las montañas y los sistemas hidrológicos en estudio. Para proyecciones más exactas se requieren registros con una resolución más fina en el tiempo de lo que se tenía disponible para este estudio, así como un análisis de la permeabilidad de los suelos que yacen bajo los arroyos ocasionales (Hely y Peck, 1964). Por lo tanto, el cálculo de la escorrentía aportada por los tributarios se ofrece a manera de estimación de tipo general.

Los registros anuales de “Exportaciones” (Q_{ex}) y de “Retornos de exportaciones” (Q_r) en la Sub-región de Arizona se calcularon a partir de datos del USBR (1991 – 1998a) y de la IBWC (1991-

1998)¹¹. Los Registros de agua exportada desde la sub-región de México a Tijuana y Tecate se obtuvieron de la CNA.

En la sub-región de Arizona, la evaporación (E) se calculó a partir de una estimación del área de aguas abiertas (405 ha) y de las tasas reportadas de evaporación en bandeja (IBWC 1991 – 1998). La mayor parte de la evaporación en la sub-región de California provino del Mar Salton, según el modelo del USBR. La evaporación en los canales de entrega, embalses y drenajes en el Valle de Coachella, el Valle Imperial y las Unidades de Reservación se calculó a partir de datos de superficie (Jensen, 1995; CVWD – (Coachella Valley Water District) 2000; Hill, 1993) y a tasas reportadas de evaporación en bandeja (IBWC, 1991-1998). Para la sub-región de México, la evaporación se calculó a partir del área total de aguas abiertas (Zamora – Arroyo, com. pers.) y a las tasas reportadas de evaporación en bandeja para la estación “Delta”, según lo reportado por la IBWC (1991 – 1998), utilizando un coeficiente de bandeja / superficie de agua libre de 0.70 (NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration (Administración Nacional de Océanos y la Atmósfera), 1982).

El consumo urbano en la sub-región de Arizona se tomó del Reporte Sobre Demostración de Tecnología de Contabilización para la Parte Baja del Río Colorado (LCRAS DOT).¹² La ciudad de Yuma separó el agua aplicada para uso industrial y la de uso municipal (Baer, com. pers.). En la sub-región de California, el uso para consumo urbano en el Valle de Coachella y en las Unidades de Reservación fue reportado por la CVWD y en los informes LCRAS DOT del USBR, respectivamente, y para el Valle Imperial se calculó asumiendo una tasa de consumo de 60% para usuarios municipales y del 15.5% para usuarios industriales (CVWD 2000; USBR 1995 – 98; USBR). A pesar de que la Ciudad de San Luis Río Colorado, Sonora, está fuera de la región de estudio, su efluente municipal (registros de OOMAPAS) descarga en el Río Colorado, aguas abajo del Lindero Internacional Sur, y se incluyó como un flujo de retorno en la sub-región de México. Los registros sobre uso para consumo en Mexicali provinieron de CESP.M.

En la sub-región de Arizona, la evapotranspiración (ET) se tomó de los reportes de LCRAS DOT. Estos reportes registraron el consumo para los sectores agrícola¹³ y ambiental, desde 1995 y hasta 1998¹⁴. Las tasas de ET utilizadas para el área de Yuma para 1995 y 1996 fueron de 25-38 cm

¹¹ El agua exportada desde la sub-región de Arizona se envió a: Distrito de Riego y Drenaje de Wellton-Mohawk; Cuerpo Aéreo de Marinos; Ferrocarril South Pacific; Distrito de Riego de Yuma Mesa; a la mitad de las fincas de la Universidad de Arizona (una de las fincas está en el Valle de Yuma, y la otra en Yuma Mesa); Cultivadores de Frutas de Yuma; Distrito de Riego de la Unidad B; y al Campo de Pruebas de Yuma.

¹² Para las siguientes entidades: Ciudad de Yuma; Desert Lawn, Ferrocarril Southern Pacific; Escuela Superior Yuma Union; Oficina del USBR del Área de Yuma, Parque R.V. Cocopah; Somerton; Gadsen; San Luis; y Condado de Yuma.

¹³ Se utilizaron los registros LCRAS DOT del USBR de los siguientes distritos: Desert Lawn Memorial, Reservación Indígena de Fuerte Yuma; granjas de Arizona; Mittry SWA&YPG Arizona; Refugio Nacional de Vida Silvestre Imperial, Mittry Lake SWA; Cocopah Norte; Valle Gila Norte; Rancho Sturges; Estado de Arizona, limítrofe; estación agrícola de la Universidad de Arizona (se utilizó solamente la mitad de la cifra debido a que una mitad está fuera de la región); Cocopah Oeste; Distrito de Riego de Yuma; Distrito de Riego del Valle de Yuma.

¹⁴ Los usuarios a lo largo de la parte baja del Colorado han manifestado su preocupación en cuanto a la metodología del reporte y la posibilidad de errores.

más altas que las tasas promedio de ET consignadas en los reportes de 1997 y 1998 debido a correcciones hechas por la disparidad en los valores reportados por las estaciones CIMIS y AZMET (USBR 1995-98). En ausencia de datos más exactos, las tasas totales de ET de 1998 (0.62 m para uso agrícola y de 1.24 m para uso natural) fueron aplicadas a terrenos cultivados y a vegetación natural existentes en 1995 y 1996, para derivar de allí una estimación más exacta del consumo.

La ET para la sub-región de California se calculó a partir de registros existentes. El consumo agrícola se derivó de los reportes publicados y de los registros de descarga de aguas de desecho, cuando los había disponibles (USBR 1991 – 98b; CVWD 2000). El CVWD (Distrito de Riego del Valle Coachella) (2000) suministró la información relativa a la descarga de aguas agrícolas de desecho en 1999, mientras que el IID reportó la descarga de 1991-1998 al Mar Salton (en Tostrud, 1997). La descarga de aguas agrícolas de desecho del IID fueron ajustadas para calcular el uso por freatofitas a lo largo de los drenajes y en los ríos Álamo y New (Nuevo), la evaporación, recarga, pérdidas incurridas antes de la entrega, y descarga de aguas urbanas de desecho.

Las tasas de ET para las principales cosechas en la región del delta se obtuvieron a partir de fuentes existentes (ver Tabla 3.3). Las tasas de ET de las cosechas varían según una cantidad de factores, incluyendo temperatura y viento, por lo que son muy específicas de cada sitio. Como se muestra en la Tabla 3.3, se dispone de todo un rango de estimaciones para determinar la ET. En un esfuerzo encaminado a evitar estimaciones extremas, en este estudio se calculó la ET utilizando tasas que estaban dentro del rango de estimaciones ya publicadas. Por ejemplo, existían varias tasas de ET (Erie y otros, 1982; CDWR, 1993; IID; Jensen, 1995) para algodón, alfalfa y remolacha para azúcar; tomando para este estudio el promedio de estos valores; el CDWR (1994) publicó un rango de tasas de ET que se usaron para verificar la exactitud de la media calculada. Para trigo y lechuga se tenía disponible únicamente un dato de ET (Erie y otros, 1992; Jensen, 1995). La ET para uvas se calculó a partir de los extremos alto y bajo de los rangos de ET reportados por la CDWR (1993; 1994).

La ET ambiental se limita a estimar el consumo por freatofitas; no incluyendo la vegetación de altura, que se alimenta predominantemente de agua del subsuelo. Si bien la vegetación emergente, como la que se da en el Lago Mittry y en La Ciénega, se alimenta de agua superficial (Glenn y otros, 1992; 1996), la vegetación de rivera ya establecida se alimenta de acuíferos aluviales que yacen bajo la superficie (Dawson y Ehleringer, 1991; Stromberg, 1993), representando adecuadamente un uso mancomunado. La extensión de la cobertura de freatofitas no se dividió por tipos (es decir, en yerbas de humedales y cedro salado de rivera), sino que en muchos casos el terreno simplemente se reportó como de uso generalizado por freatofitas (cf Jensen, 1995) y por lo tanto en este reporte se divide en uso de humedales emergentes y uso en riveras. Las freatofitas crecieron a lo largo de canales de conducción para agricultura y zanjas de drenaje en toda la región. No se tenía disponible la extensión

y características de la vegetación a lo largo de los canales de conducción en toda la región y zanjas de agua de desecho en las sub-regiones de Arizona y México¹⁵.

Tabla 3.3 Tasas de Evapotranspiración (ET) Media Anual Según Cosecha, en la Región del Delta del Río Colorado (m).

	Erie y otros 1982	CDWR 1994	CDWR 1993	Jensen 1995	Condado Imperial - sin fecha -	ET del Estudio
Algodón	1.05	.98 - 1.01	1.01	.94	1.05	1.01
Alfalfa	1.89	1.31 - 2.01	1.31 - 1.83	1.67	1.58	1.71
Trigo	.66	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.66
Remolacha	n.d.	1.16	1.16	2.81	n.d.	1.01
Uva	n.d.	.73 - 1.01	.73 - .91	n.d.	n.d.	0.87
Cítricos	n.d.	.64	n.d.	.86	n.d.	0.85
Lechuga	n.d.	n.d.	n.d.	.43	n.d.	0.43

La ET ambiental en la sub-región de Arizona fue reportada en los informes del LCRAS DOT del USBR (USBR, 1995 – 98). El consumo por freatofitas en la sub-región de California se obtuvo de varias fuentes. Los drenajes y ríos (ríos New (Nuevo) y Álamo) que transportan drenajes agrícolas del IID y aguas urbanas de desecho de Mexicali y ciudades en el Valle Imperial soportaron a unas 4,600 hectáreas de vegetación (Boyle, en Jansen, 1995). La ET de freatofitas previa a la entrega en el Valle Coachella fue insignificante, como se muestra en la tasa de eficiencia del 99% para distribución de agua del CVWD (CVWD, 2000). Las pérdidas por ET posteriores a la entrega en el Valle Coachella fueron registradas por Bechtel (según reporte en Tostrud, 1996) y se ajustaron para el consumo de agua subterránea por la vegetación de rivera establecida. Tostrud (1996) reportó que un 30% de las pérdidas en la entrega en el IID se debió a ET de freatofitas. Se promediaron las estimaciones de consumo ambiental posterior a la entrega realizadas por Boyle (en Tostrud, 1996) y el IID (en MWD, 2000). La ET de la vegetación natural que rodea el Mar Salton se calculó según la extensión de terreno de acuerdo a los tipos específicos de vegetación (Programa de Base de Datos del Mar Salton, 2000) y de las tasas de ET para esa vegetación de acuerdo con lo reportado en los informes del LCRAS DOT del USBR (USBR 1995-98). Las tasas de evapotranspiración para freatofitas en el resto del delta se calcularon a partir de reportes sobre densidad de vegetación, extensión y tipo (Valdés – Casillas y otros, 1998; Zamora – Arroyo y otros, 2001) y de los reportes LCRAS DOT del USBR (USBR, 1997)

¹⁵ Los reportes del LCRAS DOT del USBR suministraron la extensión de freatofitas y el consumo por usuario en Arizona; no se especificó si esta agua provenía del Río Colorado, de canales de conducción o de zanjas de drenaje.

sobre coeficientes de ET para 1997, ajustados para que reflejaran la variación en las tasas de evaporación en bandeja. El uso adicional por freatofitas en la sub-región de México se estimó a partir de la longitud de canales y drenajes no recubiertos, de manera proporcional a la ET por freatofitas en el Valle Imperial.

El cambio en el volumen almacenado del embalse (ΔS_r) refleja el cambio en contenido del Mar Salton, según se calcula mediante un modelo suministrado por el USBR; el Mar provee la única superficie de almacenamiento notable en la región del delta¹⁶. Se asumió que el cambio en el almacenamiento superficial (ΔS_a) era despreciable en áreas irrigadas de la sub-región de California debido al extenso uso de drenajes tipo baldosa en los valles Imperial y Coachella y a los retornos bajo la superficie hacia el cauce principal de las Unidades de Reservación. Se calculó una cifra para la recarga estática de agua superficial en el Valle Coachella a partir del presupuesto de 1999 de agua superficial en el Plan de Manejo de Agua para el Valle de Coachella (2000).¹⁷ En las Unidades de Reservación, la recarga de agua superficial se calculó a partir de la diferencia entre la extracción de agua superficial y el cambio en almacenamiento subterráneo (USBR, 1996).

La recarga de aguas superficiales en la sub-región de Arizona se estimó como la diferencia entre la extracción de agua del terreno y el cambio reportado en almacenamiento subterráneo en los valles de Yuma, Gila Sur, y Gila Norte en 1992 (año de No Inundación) y 1993 (año de Inundación) (USGS, 1996). A pesar de que el cambio en las reservas subterráneas fue medido por el USBR, la sub-estimación de los volúmenes de extracción (ver arriba) reduciría de manera similar la recarga estimada por efecto de inundación.

Para la sub-región de México, la recarga de agua superficial estimada para uso agrícola y urbano se derivó a partir de varias fuentes, tal como se discutió en el Capítulo Cuatro. La recarga estimada de agua superficial para la sub-región de México se derivó a partir de reportes aislados y pérdidas reportadas por la CNA en la conducción, además de un volumen estimado de recarga de los terrenos inundados durante los años de Inundación. La recarga en estos años se basó en la profundidad del agua del terreno en 1999-2000 (reportado entre 1-2 metros) entre los diques de contención en la llanura inundable del Río Colorado; área estimada entre de los diques de la Represa Morelos y el Río Hardy, y la capacidad de contención de agua (30%) (Dunne y Leopold, 1978) de acuerdo con el tipo de suelo reportado (predominantemente marga arenosa) (Zamora – Arroyo y otros, 2001). Este volumen máximo instantáneo no cuenta para el movimiento del agua superficial, ya sea en áreas externas a los diques o en los retornos hacia los ríos conforme se devuelven las aguas de inundación. Además, la profundidad reportada del agua superficial del terreno puede representar un aumento en el volumen de

¹⁶ El IID mantiene >3.7 MMC de almacenamiento en embalses de regulación, mientras que el embalse terminal del CVWD en el Lago Coahuilla tiene una capacidad de unos 1.8 MMC.

¹⁷ Algunos de los elementos de línea de la recarga subterránea se omitieron del cálculo debido a que ya se habían contabilizado en algún otro sitio del estudio. Dentro de estos elementos de línea se incluyen: flujos hacia drenajes, retornos domésticos y de campos de golf; percolación de aguas domésticas servidas; e influjos provenientes de afuera del área de estudio.

almacenamiento debido a las inundaciones de 1997-1998, en vez de una elevación estática, sugiriendo que el valor calculado debe ser tratado como un mínimo.

En años de inundación, el agua del cauce principal del Río Colorado ha descargado en la cuenca de la Laguna Salada (Q_{sb}) (Valdés-Casillas y otros, 1998; Luecke y otros, 1999). Un examen de las imágenes de Satélite LandSat 4 Multispectral Scanner (ruta 39, fila 38) reveló agua estancada en la Laguna Salada en 1993, 1997 y 1998. En Noviembre de 1998, uno de los autores observó agua fluyendo del cauce principal del Río Colorado a través de un canal hacia la cuenca de la Laguna Salada, aunque no se determinó el caudal. La descarga en la Laguna Salada fue estimada basándose en observaciones anecdóticas de un reporte no publicado (Compean – Jiménez y otros) donde se estimó que en 1984, la extensión del área inundada era de 40,000 ha, con una profundidad máxima de 4 m y un volumen de 730 MMC, y a partir de una estimación basada en GIS (Sistema de Información Geográfica) sobre la extensión de la Laguna en 1997 de 9,300 ha. El desvío a la Laguna Salada está aproximadamente a 16 km aguas abajo del sitio anterior en El Marítimo, por lo tanto la descarga estimada a la Laguna fue restada de la descarga total que llega a la desembocadura del río en la parte superior del Golfo.

La parte superior del Golfo de California se caracteriza por mareas muy altas (amplitud > 8 m) (Lavin y otros, 1997) que afectan fuertemente los últimos 19 km del río (Luecke y otros, 1999), y que distorsionan las mediciones en el río en El Marítimo, a 40 km aguas arriba de la desembocadura (CILA, 1960 – 1968), y se ha reportado que afectan áreas que están a 15 km más hacia arriba (Payne y otros, sin fecha). Ocasionalmente, las altas mareas fluyen dentro de la Laguna Salada, presentando un reto todavía mayor en los esfuerzos por determinar el origen de las aguas estancadas en la región. Debido a las dificultades encontradas para tomar en cuenta los efectos de las mareas, el estudio para el balance de aguas no incluye la zona de mareas, definida aquí como los últimos 19 km del río.

Capítulo Cuatro : Hidrología

En este capítulo se discute la hidrología de la región del delta del Río Colorado, incluyendo la descarga del cauce histórico y reciente, orígenes y cantidades de influjos y salidas, extracción y recarga de agua subterránea, así como la infraestructura física que transporta el agua en la región. En este capítulo se describen los flujos para la región como un todo, y para las tres sub-regiones en Arizona, California y México.

Flujos del Río Colorado

Previo a la construcción de estructuras de regulación a lo largo de su recorrido, la descarga estacional y anual del Río Colorado variaba en forma dramática, desde prolongadas sequías hasta

violentas inundaciones (O'Connor y otros, 1994; Tarboton, 1995). Se ha estimado en 17,000 MMC la descarga media anual a largo plazo del Río Colorado cerca de Lee's Ferry, Arizona, 1,042 km aguas arriba de la Represa Imperial (límite aguas arriba del área de estudio) (Meko y otros, 1995). La descarga media anual en Lee's Ferry durante el periodo registrado (1906-1998) se ha estimado en 18,500 MMC. El USBR (Harkins, com. pers.) estima que las pérdidas, debido a evaporación, uso por freatofitas, y otras pérdidas del sistema, entre Lee's Ferry y el Lindero Internacional Norte, supera los ingresos en aproximadamente 600 MMC por año, lo cual sugiere que estos registros ajustados son una representación razonable de las descargas en la frontera aguas arriba del sistema. Antes de que el embalse y los desvíos le privaran de agua, el Río Gila contribuía adicionalmente con lo que se calcula en 1,600 MMC/año en el caudal del Río Colorado, en su confluencia cerca de Yuma (USBR, 1952), 23.7 km aguas abajo de la Represa Imperial.

Durante el periodo de registro (1951 – 1999), la descarga media anual registrada del Río Gila cerca de Dome fue de 280 MMC, mientras que la mediana de la descarga anual para el mismo periodo fue de 7 MMC.¹⁸ La descarga combinada de los ríos Gila y Colorado fluyó a través del delta del Río Colorado

Salvo en años con una escorrentía desacomodadamente alta, virtualmente todo el flujo del Colorado ahora es captado y utilizado antes de que llegue a su desembocadura (Morrison y otros, 1996). En la Figura 4.1 se compara la descarga en la última estación de medición sobre el Río Colorado, en el Lindero Internacional Sur (79 km aguas abajo de la Represa Imperial), con la descarga combinada estimada sin reducciones ni regulaciones de los ríos Colorado y Gila, y con el flujo superficial total que ingresa al área de estudio, que aquí se define como el caudal del Río Colorado aguas arriba de la Represa Imperial más el caudal del Río Gila cerca de Dome. En 1977, el flujo estimado sin reducciones ni regulaciones en Lee's Ferry fue de 6,200 MMC, menos de la cantidad realmente enviada a la Represa Imperial desde el Lago Mead.

Flujo por Inundaciones

Como se muestra en la Figura 4.1, los flujos no regulados del Río Colorado son extremadamente variables. Por ejemplo, la descarga media anual del Río Colorado en el LIS durante los 30 años más recientes de registro (1969 – 1998) fue de 2,350 MMC, mientras que la mediana de la descarga anual fue de únicamente 190 MMC ($\sigma = 4,400$ MMC). La descarga regulada del Río Colorado también mostró una marcada variabilidad durante el periodo de estudio. Casi la mitad de esos años presencié inundaciones por encima de las orillas aguas abajo de la Represa Morelos, a causa de desfuegos para abrir espacio en las represas Hoover y Painted Rock, que fueron provocados por ingresos mayores al promedio y a almacenamiento en las represas muy cercanos a la capacidad total.

¹⁸ Datos calculados por el Sistema Nacional de Información Sobre Aguas – Sistema Automatizado de Procesamiento de Datos, Reporte de descarga media diaria para la estación 09520500 (Río Gila, cerca de Dome, Arizona). Datos sin tratar cortesía de Bill Roberts, USGS.

Para reflejar esta variabilidad, el reporte divide el periodo de estudio en años de No Inundación y años de Inundación, definiendo estos últimos como aquellos en los cuales la descarga media máxima en el LIS excede los 80 m³/segundo, que es el umbral mínimo estimado para inundación por encima de las riveras, aguas abajo de la Represa Morelos (Zamora – Arroyo y otros, 2001). En la Figura 4.2 se muestra el número total de días, por año, dentro del periodo de estudio, en los cuales la descarga media diaria igualó o superó este mínimo estimado de inundación, así como la cantidad total de días en los cuales la descarga media diaria excedió el estimado de inundación de 100 a 200 m³/s de Luecke y otros (1999). Debajo del eje x de cada año está la descarga máxima instantánea anual y la descarga media diaria, en pcs (pies cúbicos por segundo) y en m³/s (metros cúbicos por segundo). En 1996 no se registró una descarga cuantificable en el Río Colorado a la altura de la ISB (Lindero Internacional Sur).

Tabla 4.1 Descarga Media Anual del Río Colorado en la Región del Delta. ¹⁹		
MMC	Año de No Inundación	Año de Inundación
R.Colorado aguas arriba de Rep. Imperial	6,961	8,689
R.Colorado aguas abajo de Rep. Imperial	342	884
Río Gila cerca de Yuma	223	1,955
Canal de desfogue de Yuma	286	252
Canal de desfogue Pilot Knob	625	1,819
Otros retornos imperial – Morelos *	212	179
Río Colorado en la NIB	1,795	5,105
Río Colorado aguas abajo de Morelos	42	2,546
Retornos de los E.U. Morelos - SIB	2	5
Retornos del Colorado en la SIB	27	2,615
Efluente San Luis R.C. cerca de Km 27 *	10	11
Desfogue Km 27	21	239
Desfogue Km 38	1	12
R. Colorado en M.C. Rodríguez *	23	2,510
Drenaje de Colector del Sur	11	12
Drenaje Principal del Sur	31	30
Río Hardy *	49	59
Río Colorado en El Marítimo *	20	2,183
Río Colorado en parte sup. Golfo de CA *	20	1,937
* Datos derivados; otros provienen de registros de medición en el propio caudal.		

Descarga al Cauce Principal

La Tabla 4.1 muestra la descarga media anual en las estaciones de medición localizadas en el cauce principal del Río Colorado en el área de estudio durante los años de No Inundación y de Inundación, así como retornos al cauce principal a lo largo de su curso, tanto reportados como estimados. En la Figura 4.3 se muestra la localización de estas estaciones. Los años de caudal bajo en el Río Gila (1991, 1996 – 1998) no coinciden con los años de No Inundación del estudio (1991 – 1992,

¹⁹ Fuentes: IBWC; USBR; Valdés – Casillas y otros, 1998; CILA; OOMAPAS.

1995 – 1996). La descarga media anual para los años de caudal bajo en el Río Gila cerca de Dome, Arizona, es de 11 MMC, lo cual es únicamente un 5% del volumen reportado para los años de No Inundación. La media para los años de Inundación refleja el evento de inundación del Río Gila en 1993, que tuvo un caudal total registrado de 5,800 MMC.

El desfogue del Canal Principal de Yuma descarga en el cauce principal del río, en el lado de California, 10.5 km aguas arriba del LIN. El desfogue Pilot Knob se localiza en el Canal All American, 33.5 km aguas abajo de la toma de aguas de la Represa Imperial. Descarga en el cauce principal aproximadamente a 1.6 km aguas arriba del LIN. En la Tabla 4.1, “Otros retornos Imperial – Morelos” incluyen los registros del Drenaje Principal Reservation No. 4 (inmediatamente aguas arriba del desfogue del Canal Principal Yuma), el drenaje de Salida de Yuma Mesa (2.7 km aguas abajo del desfogue Yuma), el Drenaje Araz (4.0 km arriba del LIN), de la División de Reservación de California, y del desfogue Cooper (0.8 km aguas debajo del LIN y 1.0 km arriba de la Represa Morelos), descargando agua de regulación (aproximadamente 1.8 MMC / año) del Canal Cooper, que sirve a Valley División del Proyecto Yuma. El USBR estima el caudal no medido retornado al Río Colorado proveniente de la sub-región de Arizona anual (1991 – 1998a) en 31.6 MMC en los años de No Inundación, y de 30.7 MMC en los años de Inundación, excepto una cantidad adicional no cuantificada proveniente de la sub-región de California. Algunos de estos retornos se reflejan en “Otros retornos”, a la vez que otros ingresan al cauce principal abajo de Morelos. Presumiblemente, algunos retornos no medidos del lado mexicano de la línea fronteriza también contribuyeron a la descarga al cauce principal, aunque no se dispuso de la estimación de los mismos.

Entre la Represa Morelos y el LIS, el desfogue Eleven Mile (Milla Once) (5.1 km aguas abajo de la Represa Morelos) y el desfogue Twenty-one Mile (Milla Veintiuno) (28.0 km aguas abajo) descargan el exceso de los desvíos de Valley Division del Proyecto Yuma en Arizona, al cauce principal del Río Colorado. Bajo condiciones de emergencia, el agua de drenaje de Wellton-Mohawk que proviene de la Extensión de la Salida Principal del Drenaje o Main Outlet Drainage Extensión (MODE, en inglés) ha sido descargada a un punto inmediatamente debajo de la Represa Morelos (IBWC 1991 – 1998). Estos registros están reportados en la Tabla 4.1 como “retornos Morelos – LIS.” La descarga del Río Colorado desminuyó en un tercio entre la Represa Morelos y el LIS durante los años de No Inundación, presumiblemente a causa de infiltraciones, evapotranspiración y evaporación. El Servicio de Conservación de Suelos (USDA – Departamento de Agricultura de los EUA, 1980) clasifica los suelos en el lado de los EU en la frontera como una mezcla de suelos arenosos y aluviales, con drenaje de moderado a excesivo, lo que sugiere un alto potencial de infiltración²⁰.

²⁰ La información proporcionada por el modelo de recursos de aguas superficiales del Departamento de Recursos de Agua de Arizona para el área de Yuma durante los años 1979 (representativo de un año de Inundación) y 1982 (representativo de un año de No Inundación) sugiere que las contribuciones anuales hechas al caudal aguas abajo de la Represa Morelos por el acuífero en el lado de los EU (recargado por percolación de irrigación intensiva en el área) puede estar en el orden de los 24 MMC, a pesar de que este modelo no ha sido verificado en el campo (Greer, com. pers.).

“Efluente San Luis R.C.” se refiere a aguas de desecho no tratadas descargadas por la Ciudad de San Luis Río Colorado en el caudal principal, a unos 3.2 km aguas abajo del LIS. Parte del agua que México desvía en la Represa Morelos se transporta a través del Canal Central de Alimentación a un punto que está 5.0 km aguas abajo del LIS, desde donde puede retornarse al río a través del desfogue en Km 42, en la rivera derecha del río, o puede ser desviada al sistema del Canal Bacanora - Monumentos a través del sifón Sánchez Mejorada, para irrigar tierras en el Valle San Luis en la orilla izquierda del río. El desfogue en KM 38, 45.3 km aguas abajo del LIS, y a 1.3 km del puente de ferrocarril, regresa agua del Canal Barrote al cauce principal (IBWC 1991-1998). La descarga combinada del efluente del San Luis y los dos desfogues, excedieron la descarga reportada del caudal principal en el LIS durante los años de No Inundación.

Las descargas en las estaciones M.C. Rodríguez y El Marítimo se calcularon utilizando el análisis de regresión descrito en el Capítulo Tres. Esta descarga estimada en M.C. Rodríguez fue menor que la que se reportó en el LIS, a pesar de los aportes de desfogues y efluentes. Tales disminuciones pueden deberse a recarga subterránea y a uso freatofito, o pueden reflejar un error en el análisis de regresión. El drenaje Carranza descarga al cauce principal aproximadamente 10 km abajo del puente de ferrocarril; El drenaje Principal del Sur descarga a aproximadamente otros 10 km más abajo. El Río Hardy, que acarrea aguas de drenaje agrícola del Valle de Mexicali y una escorrentía estimada de 5.9 MMC de la cercana Sierra de los Cocopah en los años de No Inundación y de 4.4 MMC en años de Inundación, descarga en el cauce principal a unos 27 km aguas abajo del puente ferroviario, y a 49 km abajo del Lindero Internacional Sur.

Flujos Sub-Regionales

Tal como se discutió con anterioridad, las fronteras del sistema de la región del delta como un todo se basan en la investigación realizada por Sykes (1937) sobre la extensión hidrológica del delta del Río Colorado. Las tres sub-regiones están delimitadas por fronteras meramente políticas dentro de toda una extensión hidrológica, con el fin de describir mejor los flujos dentro de la región. A continuación se discuten los balances de agua para cada una de estas sub-regiones.

Sub-Región de Arizona

En Arizona se desvían las aguas del Río Colorado a la altura de la Represa Imperial para uso en irrigación y urbano, a través del Canal Principal por Gravedad Gila, y a través del Sifón de Yuma, desde el Canal All American. Agua adicional también ingresa a la sub-región a través de flujos intermitentes del Río Gila, flujos de retorno de los distritos de riego y drenaje fuera de la región del delta, agua bombeada del mismo río, y agua del terreno extraída de acuíferos de poca profundidad (acuíferos someros) dentro de la sub-región. El agua del terreno sale de la sub-región a través de evapotranspiración, recarga, retornos al cauce principal, exportaciones a distritos fuera de la región

(como Yuma Mesa y el WMIDD), y entregas a México a través del Canal Sánchez – Mejorada (en la frontera terrestre cerca de San Luis) y el MODE.

En la Tabla 4.2 se muestra el influjo y el egreso medio anuales en la sub-región de Arizona, y en la Figura 4.4 se exhibe la localización de las estaciones. Se estimó que la superficie de aguas abiertas en la sub-región era de 400 ha; la precipitación se basó en registros de Yuma Citrus Station (Estación de Cítricos de Yuma) (IBWC 1991 – 1998). Los reportes proporcionados por el Sistema de Demostración de Tecnología para Contabilidad de la Parte Baja del Río Colorado (LCRAS DOT, en inglés) estiman un influjo no medido de tributarios del Río Colorado, entre la Represa Imperial y la Represa Morelos, en 4 MMC/año. Los datos sobre extracción de agua del terreno es auto-reportada y potencialmente incompleta²¹. Los influjos reportados en “Campo de Pozos 242 cerca de San Luis” salieron de la sub-región casi de inmediato, igual que “Otras entregas [a México] cerca del Lindero Internacional Sur.” Los “retornos de exportaciones” se refiere a influjos de drenaje agrícola de los distritos de riego que están fuera de la región del delta, pero extraídos del Río Colorado en la sub-región, como en Yuma Mesa y Wellton-Mohawk.

En el Capítulo Cinco se discuten los métodos utilizados para estimar los usos agrícola, urbano y natural que se consignan bajo “Egresos.” La “Infiltración del Terreno” se calculó a partir de reportes de extracción y de cambios medidos en el nivel de reservas subterráneas (USBR, 1996).²² Basándose en este cambio medido, la extracción neta de agua del terreno en la sub-región fue de 46 MMC en 1992, y de 50 MMC en 1993. Las “Exportaciones” se refieren al agua enviada a usuarios del Río Colorado fuera de la región del delta. En los “Retornos al Río Colorado” se reúnen los retornos totales que van al cauce principal, los retornos de desfuegos aguas abajo de la Represa Morelos, y la descarga del Río Gila. El residuo, expresado como porcentaje de los influjos, es de 0.9% en años de No Flujo, y de -7.5% en años de Flujo. En el balance anterior no se encuentran incluidos los flujos que discurren bajo la superficie desde Arizona a la sub-región de México.

²¹ El USBR (1996) considera la estimación de extracciones como un “mínimo absoluto”, debido a que “hubo numerosos pozos privados que bombearon agua en la región para los cuales no se tuvo información disponible.” Los datos sobre agua del terreno provinieron de: Valle de Yuma; Valle Gila Sur y Valle Gila Norte, para 1992 y 1993, solamente.

²² Debido a que se presume que las estimaciones de extracción son bajas (ver arriba), es de esperar que la recarga calculada también sea baja. La extracción neta de agua del terreno, basada en el cambio medido en almacenamiento subterráneo, es probablemente una cifra más confiable.

Tabla 4.2 Balance de Aguas de la Sub-región de Arizona		
	No inundación	Inundación
MMC		
Ingresos		
Canal Principal de gravedad Gila	963	902
Río Gila en Dome	223	1,955
Sifón de Yuma	453	460
Retornos de exportaciones	212	179
Precipitación y otras fuentes locales	4	4
Extracción de agua del terreno	46	49
Campo de Pozos 242, cerca de San Luis	22	5
Total	1,923	3,554
Egresos		
Exportaciones	833	767
Evaporación	11	11
Consumo urbano	28	27
Evapotranspiración agrícola	290	260
Evapotranspiración freatofita	49	51
MODE, cerca del Lindero Int'l. Sur	147	109
Otras entregas cerca del Lindero Int'l. Sur	152	143
Retornos al Río Colorado	308	2,344
Recarga de aguas del terreno	57	78
Retornos no medidos estimados	32	31
Total	1,907	3,821
Diferencia	16	(267)
Fuentes: IBWC (1991-98); USBR (1991-98a,b)		

Sub-Región de California

California desvía el agua del Río Colorado para usos agrícola y urbano en la Represa Imperial a través del Canal All American, así como también en, y cerca de, las Unidades de Reservación y en el Valle Imperial, y a través del Ramal de Coachella del Canal, en el Valle del mismo nombre. A la sub-región ingresa agua adicional en forma de flujos de retorno desde México a través de los ríos New y Álamo, como aguas del terreno extraídas en la parte baja del Valle de Coachella, como flujos de retorno y escorrentía intermitente del Río Whitewater, precipitación ocurrida en superficies abiertas de agua (predominantemente en el Mar Salton), y otras escorrentías de carácter local. La porción de la sub-región de California que no bordea la parte principal del cauce en su mayor parte se encuentra por debajo del nivel del mar, por lo tanto una gran cantidad del agua superficial que ingresa a la sub-región como un todo, no regresa al cauce principal. El agua superficial sale de la sub-región mediante evapotranspiración, evaporación, recarga del terreno, y unos pocos retornos hacia el cauce principal.

El Canal All American, que es un canal revestido parcialmente y de flujo por gravedad, recorre 132 km desde la Represa Imperial hacia la esquina sudoeste del Valle Imperial. Entre la Represa Imperial y Pilot Knob, las Unidades de Reservación desvían agua del Canal All American a través del

Canal Principal de Yuma y de cuatro canales más pequeños. Una vez que abandona el delta en Pilot Knob, el canal cruza 23 km de dunas arenosas antes de alcanzar el Salto Uno, donde el Canal Coachella se desprende del Canal All American para entregar agua al Distrito de Agua del Valle de Coachella (CVWD). En una gran parte de su curso (ver Figura 4.5), el Canal Coachella bordea la región del delta.

Para fines del presente estudio, se asumió que el agua del Río Colorado reingresa al delta cerca de Milepost 87 en el Canal Coachella, cuando ingresa al Valle del mismo nombre (cerca del extremo nordeste del Mar Salton). En el Valle Imperial, el agua reingresa al delta en el Salto Cuatro del Canal All American, 84 km aguas abajo de la Represa Imperial y a 26 km aguas abajo del Salto Uno.

El total de recarga reportado en 1999 de aguas superficiales en la parte baja del Valle de Coachella (CVWD, 2000) fue de 230.5 MMC, de los cuales 1.7 MMC provinieron de recarga natural, 160.7 MMC de retornos agrícolas, 30.5 MMC de retornos de tipo doméstico y de campos de golf, 1.1 MMC de percolación de aguas desechadas, y 36.5 MMC de influjos por debajo de la superficie desde el exterior del área de estudio, y de otros distritos que reciben agua a través del área de estudio. El Distrito Imperial de Riego (IID) está formado por aproximadamente 2,263 km de zanjas de drenaje que recogen la escorrentía superficial y el drenaje sub-superficial de 51,864 km de drenajes tipo baldosa en el Valle Imperial, limitando la recarga de aguas del terreno en el área.²³

Los influjos y egresos de la sub-región de California se muestran en la Tabla 4.3; en la Figura 4.5 se muestra la localización de las estaciones en la Cuenca del Salton, mientras que las estaciones cercanas al cauce principal se incluyen en la Figura 4.4.

²³ El volumen del acuífero en el subsuelo del Valle Imperial se estima en 1.1 billones de pie-acres, de los cuales 20% se estima que es recuperable (Plan General del Condado Imperial). La calidad de esta agua del terreno, con salinidad superior a los 2,000 mg/l, la hace no apta para uso agrícola o doméstico.

Tabla 4.3 Balance de Aguas de la Sub-región de California		
	No inundación	Inundación
	MMC	
Ingresos		
Canal All American, neto	278	241
Canal All American, Salto 4	3,466	3,552
Canal Coachella, en Milepost 87	338	350
Río Álamo, en la frontera	2	2
Río Nuevo, en la frontera	167	216
Río Whitewater, cerca de Indio	2	15
Precipitación y otras fuentes locales	123	173
Extracción de agua del terreno	239	244
Total	4,615	4,793
Egresos		
Exportaciones	1	1
Evaporación	1,842	1,780
Consumo urbano	88	87
Evapotranspiración agrícola	2,233	2,270
Evapotranspiración freatófita	317	302
Recarga /evap. agua desecho urbanas	37	37
Recarga de aguas del terreno	123	143
Cambio en reserva (Mar Salton)	(15)	96
Retornos al Río Colorado	192	158
Total	4,818	4,874
Diferencia	(203)	(81)
Fuentes: CVWD 1999; IBWC (1991-98); IID; USBR (1991-98a,b); Weghorst, comentario personal		

En “Canal All American, neto” se refleja el agua desviada de ese canal por usuarios de California en el tramo entre la Represa Imperial y el punto donde el canal abandona la región del delta, en Pilot Knob. Los egresos del sistema entre Pilot Knob y el Salto 4 del Canal All American, y a todo lo largo del Canal Coachella hasta Milepost 87, se realizaron fuera de la región y no se incluyeron en este balance.²⁴ “Canal Coachella en Milepost 87” refleja la descarga total del canal reportada en la localidad, según reporte del CVWD. Los datos sobre extracción de agua del terreno provino del CVWD y de las Unidades de Reservación.

²⁴ La infiltración del Canal Coachella se estima en 43 MMC/año, generalmente son flujos en la gradiente hacia abajo en dirección al Mar Salton. Se estima la infiltración del Canal All American entre Pilot Knob y el Salto 4 en 84 – 123 MMC / año, de los cuales una gran cantidad fluye a manera de aguas subterráneas hacia México, donde es extraída (Hayes, 1991).

Tabla 4.4 Balance de Aguas del Mar Salton		
	No inundación	Inundación
	MMC	
Ingresos		
Río Álamo, cerca de Niland	738	776
Río New, cerca de Westmoreland	538	602
Río Whitewater, cerca de Mecca	67	65
Precipitación	78	111
Otros	303	210
Total	1,724	1,764
Egresos		
Evaporación	1,739	1,668
Cambio en contenido	(15)	96
Fuentes: USGS; Weghorst, comentario personal		

En los “Egresos”, fue preponderante la evaporación en la superficie del Mar Salton (97%) (área media de 97,000 ha), con fuentes adicionales que incluyen canales, zanjas de drenaje, y los ríos Álamo, New y Whitewater. En el Capítulo Cinco se describe en detalle los usos agrícola, urbano y natural. En “Recarga /evaporación de aguas urbanas de desecho” se refleja el uso que el CVWD le da a los estanques de recarga para el efluente municipal. Se exportó una pequeña cantidad de agua del sistema hacia la parte superior del Valle de Coachella. Los “Retornos al Río Colorado” incluyen el agua que pasa por los desfogues de Pilot Knob y del Canal Principal de Yuma desde el Canal All American, y los flujos de retorno de las Unidades de Reservación.²⁵ En “Cambios en Reserva” se refleja la variación en el volumen del Mar Salton; ver en la Tabla 4.4 el balance de agua del Mar Salton. El residuo del balance de agua para la sub-región de California, expresado como porcentaje de los influjos totales, es de – 4.2% en años de No Inundación y de – 1.7 en años de Inundación.

El Mar Salton es el sumidero terminal para la mayoría del drenaje agrícola del Valle Imperial. La Figura 4.6 representa gráficamente los influjos y salidas del Mar. “Otros” influjos es un término residual calculado como influjos totales menos la precipitación, menos las descargas medidas de los tres ríos que se midieron. En “Otros” se incluye el drenaje agrícola, influjos de tributarios naturales como el Arroyo Salt y el Arroyo San Felipe, y otros cursos efímeros del desierto, así como filtraciones de aguas del terreno. El USBR estimó la magnitud de “Otros” en 222 MMC, mientras que Cohen y otros (1999) estimaron para esta categoría 215 MMC para el periodo de 1960 – 1996. En este lapso de 36 años, el influjo estimado medio anual hacia el Mar fue de 1,660 MMC. La discrepancia entre estas estimaciones y la cifra calculada incluida en la tabla 4.4 puede ser atribuible a errores en la estación de

²⁵ El USBR le acredita al Estado de California, en su Recopilación Anual de Registros, un total de aproximadamente 90 KAF/año de flujos de retorno no medidos; una cantidad no especificada de estos retornos no medidos presumiblemente se originan en la sub-región, pero para este estudio se han estimado.

medición.²⁶ El residuo, expresado como porcentaje de los influjos, es de 7.7% en años de No Inundación y de 9% en años de Inundación.

Sub-Región de México

El brazo principal del Río Colorado marca la frontera que separa las sub-regiones de Arizona y California, y por lo tanto estas aguas no fueron captadas dentro de estas sub-regiones. De igual manera, el río no entra a la sub-región de México sino hasta que llega al Lindero Internacional Sur. Las entregas a México a partir del cauce principal en el Lindero Internacional Norte se realizaron en su mayor parte (>97% en años de No Inundación y de 50% en años de Inundación) en la Represa Morelos mediante el Canal Álamo. El agua superficial también ingresa a la sub-región de México en forma de entregas en la frontera, cerca de San Luis, en forma de agua del terreno extraída fuera del área de estudio y conducida a la sub-región desde el campo de pozos de San Luis Mesa Arenosa en México, y como escorrentía local. Además de la evapotranspiración y evaporación, el agua superficial sale del sistema hacia California a través de los ríos New y Álamo, en forma de recarga de aguas del subsuelo, y hacia el Golfo de California a través del canal del Río Colorado y, durante eventos de inundación, a través de inundaciones de poca profundidad en las llanuras del delta inferior (Zamora – Arroyo y otros, 2001). México también exporta agua de la sub-región a través del Acueducto Río Colorado – Tijuana hacia Tecate, Tijuana, y Ensenada.

La Comisión Nacional de Aguas (CNA) y operadores privados de pozos enviaron agua del Río Colorado hacia la sub-región de México a través de una compleja infraestructura de pozos y canales. La CNA reporta 470 km de canales principales en la sub-región, de los cuales 350 km son revestidos, y otros 2,399 km de canales secundarios, de los cuales 1,850 km son revestidos. Trava Manzanilla (1991) reporta 658 pozos operando en la sub-región (422 propiedad del gobierno y 236 privados), además de 67 pozos propiedad del gobierno federal que operan en la zona de ocho kilómetros establecida por la Minuta 242, al este de San Luis Río Colorado. Una red de 422 km de drenajes principales y 1,240 km de drenajes secundarios transportan aguas de desecho agrícola hacia el Río New al norte y al Colorado y el Hardy al sur. Las tierras al este del Río Colorado, en el Valle de San Luis, drenaron a la Ciénega Santa Clara y a los humedales de El Indio, a través de los desfuegos del Riíto (descarga media anual de 16 MMC) y de Plan de Ayala (descarga media anual de 18 MMC), respectivamente (Valdés – Casillas y otros, 1998). El agua se exportó a la sub-región a través del Acueducto Río Colorado – Tijuana, que recorre 122 km con una diferencia de elevación de 1,150 m (IBWC, 2001). La Extensión del Desfogue Principal de Desvío (Extensión de Desvío), que desagua drenajes salobres (>2,800 mg/l) agrícolas bombeados del WMIDD, recorre 56 km desde las cercanías del Lindero Internacional Sur hasta la Ciénega Santa Clara (Valdés – Casillas y otros, 1998). El

²⁶ Se ha reportado que la exactitud del dispositivo de medición en Álamo River es “pobre”, con un margen de error >15% (USGS).

efluente proveniente de Mexicali descargó en el Río New, mientras que el de San Luis Río Colorado descargó en el Río Colorado, justo aguas abajo del Lindero Internacional Sur.

Tabla 4.5 Volúmenes Reportados y Estimados de Agua del Subsuelo Extraída en el Distrito 14 de Riego de México.			
Fuente	Año	Volumen extraído (MMC)	Toma en Morelos (MMC)
CNA	1990	1,100	1,725
Cálculo de IBWC	1992	850	1,722
IBWC *	Normal +	8,025	1,725
Estimado aprox. por Tostrud	No exceso	1,037	1,680
CNA	1999	892	2,340
Cálculo de IBWC*	Alto ++	677	2,893
Estimado aprox. por Tostrud	Exceso	731	2,097
* Datos de IBWC reimpresos en Hill (1993); + Promedios de 1978, 1982 y 1989. ++ promedio de 1979-1981, 1983-1988.			

Los registros de agua superficial para la sub-región de México estaban incompletos y variaron según el origen. En la Tabla 4.5 se muestran las tasas de extracción reportadas y estimadas para el periodo de estudio y se comparan con la toma reportada en la Represa Morelos (IBWC 1991-1998), que es un indicador del uso de agua superficial. La IBWC (1991 – 1993) reportó que el 33-34% del área total en el Valle de Mexicali fue irrigada mediante agua del subsuelo, aunque esta estimación no se reportó después de 1993. Para esta estimación, se asumió que la extracción de agua del subsuelo era la mitad de la toma reportada en la Represa Morelos, menos el retorno de desfogues reportados y desvíos reportados para las áreas de recarga. Los limitados datos de la CNA sobre extracción de agua del subsuelo que se pudieron obtener para este estudio no contradicen la proyección intuitiva de Tostrud (borrador manuscrito, 2000) de que la sub-región de México disminuye su dependencia en el agua del subsuelo al haber disponible más agua superficial del Río Colorado. En años de No Inundación, la CNA descargó 39.0 MMC de agua del Río Colorado desviados en la Represa Morelos para áreas de recarga de agua de subsuelo, incrementando esto a 93.0 MMC en años de Inundación. La descarga del bombeo de aguas del subsuelo a lo largo de los canales principales disminuyó de 17.5 MMC en años de No Inundación a 0.5 MMC en años de Inundación. Además, en México la extracción de agua del subsuelo desde sus campos de pozos dentro de la zona de cinco millas establecida por la Minuta 242 declinó de 91.1 MMC en años de No Inundación a 14.6 en años de Inundación, todo lo cual sugiere

que la dependencia de México del agua del subsuelo disminuyó cuando hubo disponibilidad de reservas adicionales de aguas superficiales.

Las estimaciones también varían en cuanto a volumen de recarga de agua del subsuelo en la sub-región de México. En 1999, la CNA reportó en la sub-región pérdidas de conducción de 796 MMC. Restándole la evaporación y la evapotranspiración de las freatofitas a lo largo de los canales, esto sugiere que la infiltración total de los canales de conducción puede estar en el orden de los 617 MMC / año. Román (en Waller, 1992) estima que la recarga del acuífero de Mexicali por el Río Colorado, el Canal All American, las conducciones mexicanas, y la percolación a nivel profundo de los campos, es de unos 700 MMC / año. Mumme (1996) reporta hasta en 120 MMC / año el volumen de agua bombeado en el Valle de Mexicali, atribuible a infiltración del Canal All American.

No se conoce la infiltración a lo largo del canal del Río Colorado durante el periodo de estudio. En el borrador del reporte de Tostrud (2000) se estima que durante el periodo de caudal alto del Río Colorado en 1983-1989 (descarga media anual en el Lindero Internacional Sur de 7,812 MMC), los acuíferos se recargaron con 662 MMC / año. Hely y Peck (1964) reportan tasas iniciales de infiltración de más de 5 cm en 30 minutos en los suelos adyacentes el cauce principal, sugiriendo que es plausible la estimación de la recarga realizada por Tostrud.

En la Tabla 4.6 se presentan la media anual de influjos y salidas para la sub-región de México; y en la Figura 4.7 se muestra la localización de las estaciones. La “Toma en Morelos” refleja el agua desviada del cauce principal hacia el Canal Álamo en la Represa Morelos. Las “Entregas Desde el Campo de Pozos de Mesa Arenosa de San Luis” reflejan el agua del terreno extraída dentro de los 8 km de los límites reglamentarios de protección de bombeo (opuesto al campo de pozos de la Minuta 242 en Arizona) y descargada en los canales Sánchez Mejorada y Revolución. La media del área abierta de aguas, incluyendo el cauce principal, humedales, canales y zanjas de drenaje fue de 900 ha en años de No Inundación y, agregando la superficie estimada de la Laguna Salada, sería de 9,300 ha en años de Inundación. No se han incluido flujos del subsuelo, como el influjo estimado de 84 – 123 MMC / año de aguas del subsuelo provenientes de infiltraciones del Canal All American (Hayes, 1991). La diferencia en la descarga para el MODE cercano al Lindero Internacional Sur es el resultado del evento de inundación del Río Gila en 1993, el cual interrumpió la descarga del Wellton – Mohawk y disminuyó las entregas totales para ese año a 75.8 MMC. La precipitación y otras fuentes incluyen la escorrentía estimada de las cuencas del Río Hardy y Laguna Salada, además de una estimación de descarga anual de pozos artesanos en el borde sudeste de la región del delta (Glenn y otros, 1996).

Tabla 4.6 Balance de Aguas de la Sub-Región de México		
	No inundación	Inundación
	MMC	
Ingresos		
Toma en Represa Morelos	1,752	2,559
Río Colorado en Lindero Int'l Sur	27	2,615
MODE, cerca del Lindero Int'l Sur	147	109
Otras entregas cerca del Lindero Int'l Sur	150	143
Precipitación y otras fuentes locales	33	31
Campo de pozos San Luis Mesa Arenosa	90	6
Extracción de aguas del terreno	950	777
Total	3,149	6,240
Egresos		
Exportaciones	25	39
Evaporación – cauce princip. y humedales	54	83
Evaporación – Laguna Salada	-	226
Evaporación – canales agrícolas y zanjas	13	14
Consumo urbano	40	40
Evapotranspiración agrícola	1,542	1,270
Evapotranspiración de freatofitas	426	456
Flujo al Golfo de California	22	2,405
Río Álamo en la frontera	2	2
Río New en la frontera	167	216
Recarga de aguas del subsuelo	617	925
Total	2,908	5,676
Diferencia	241	564
Fuentes: IBWC (1991-98); CNA		

En el Capítulo Cinco se describen en detalle los usos agrícola, urbano y natural. La “Evaporación” fue subdividida para mostrar la variabilidad producida por el llenado y evaporación de la Laguna Salada y el incremento durante los años de Inundación a causa del llenado de las llanuras. Durante los años de No Inundación, la evapotranspiración de freatofitas, a lo largo del cauce principal (incluidas dentro de la ET general de freatofitas en la Tabla 4.6), excede el flujo de agua reportado para el Río Colorado aguas abajo de la Represa Morelos (ver Tabla 4.1) por un factor de cinco, indicando que tal vegetación se alimenta del acuífero aluvial más que del agua en la superficie. La Recarga del subsuelo” refleja la recarga a través de suelo aluvial normalmente seco que se inunda durante eventos de inundación, tanto dentro de las compuertas como en la cuenca de Laguna Salada. El “Flujo al Golfo de California” se calculó a partir del análisis de regresión descrito con anterioridad, e incluye una estimación del flujo sobre la superficie durante los años de Flujo (Zamora – Arroyo y otros, 2001). Este volumen difiere de la descarga estimada en el mismo canal del Río Colorado (ver Tabla 4.1), pues toma en cuenta otras fuentes que descargan en el Golfo, como lo son la Ciénaga Santa Clara durante los años de No Inundación, y para incluir la descarga al Golfo a través de la delgada capa superficial de agua proveniente de áreas inundadas durante los años de Inundación.

Tabla 4.7 Balance de aguas en la region del Delta Rio Colorado²⁷		
	No inundación	Inundación
	MMC	
Ingresos		
R.Colorado, aguas abajo de Rep. Imperial	345	888
Río Gila, en Dome	223	1,955
Río Whitewater, cerca de Indio	2	15
Canal Princip. Gila, en Represa Imperial	963	902
Canal All American, desvío neto	278	241
Desfogues entre Imperial y Morelos	1,124	2,250
Salto 4 de Canal All American	3,466	3,552
Canal Coachella, cerca de North Shore	338	350
Flujos de retorno de export. fuera del delta	212	179
Precipitación y otras fuentes locales	160	210
Extracción de aguas del subsuelo	1,235	1,071
Campo de pozos 242, cerca de San Luis	22	5
Campo de pozos San Luis Mesa Arenosa	90	6
Total	8,458	11,624
Salidas		
Exportaciones	859	808
Evaporación	1,919	2,114
Consumo urbano	155	154
ET de consumo agrícola	4,064	3,800
ET de freatofitas	792	810
Recarga o evaporación desechos urbanos	37	37
Recarga del subsuelo	797	1,146
Flujo al Golfo de California	22	2,450
Cambio en vol. almacenado (M.Salton)	(15)	96
Total	8,630	11,415
Diferencia	(172)	209

Región del Delta del Río Colorado

En la Tabla 4.7 se presentan los influjos y descargas medias en la región del delta del Río Colorado como un todo, y en la Figura 4.3 se muestra la localización de las estaciones. El agua superficial del Río Colorado contribuyó con un 85% del total medido de influjos hacia el sistema durante los años de No Inundación (y con un 18% adicional contribuido por el Río Gila durante años

²⁷ Fuentes: USBR; IBWC; Mumme, 1996; Tostrud, 1997; Glenn y otros, 1999; CNA.

de Inundación). En años de No Inundación, otras fuentes adicionales al Río Colorado contribuyeron con <2% del volumen total medido en este estudio.²⁸

La diferencia (residuo) es de - 2.0% en años de No Inundación y de 2.2% en años de Inundación. Estos residuos sumados son marcadamente menores que la diferencia en las sub-regiones de California y México, sugiriendo que la descarga entre las sub-regiones no fue completamente captada dentro de este análisis. Las fuentes potenciales de error incluyen las fuentes identificadas de mayor magnitud de influjos y salidas. Dentro de los influjos, la extracción estimada de agua del subsuelo y los registros reportados de los desfuegos en el Canal Principal de Yuma (incluidos dentro del “Desfuegos entre Imperial y Morelos”) son las fuentes de error más probables. Salvo las “Exportaciones”, todas las salidas identificadas son cifras calculadas y fuentes de posibles errores. La disponibilidad limitada de información sobre recarga del subsuelo es la fuente más probable de error, aunque los registros incompletos sobre tipos y extensión de freatofitas pueden ser parte de este error.

Capítulo Cinco: Usos Por Sector

La mayoría del agua que ingresó a la región del delta del Río Colorado se consumió dentro de la región por evapotranspiración, consumo urbano, o evaporación. En este estudio, el término “Agua Aplicada” se refiere al agua entregada para un uso determinado, como por ejemplo, la cantidad de agua entregada en un campo para irrigación o, a escala diferente, el agua enviada a un organismo para distribución a clientes municipales. El Agua Aplicada, menos los retornos al sistema (como por ejemplo la escorrentía de aguas superficiales y recarga de agua del subsuelo) es igual al consumo, o “uso” en un sector particular. En muchas ocasiones, los flujos de retorno de varios usos no fueron reportados o medidos y, por consiguiente, el uso por consumo tuvo que ser calculado (estos cálculos se describen en el Capítulo Tres).

En este estudio se definen tres sectores de consumo: agrícola, urbano (incluyendo uso doméstico, municipal e industrial), y ambiental. La Tabla 5.1 proporciona el consumo medio anual por sector para la totalidad de la región del delta, en años de No Inundación y de Inundación. A continuación se describen los usos dentro de estos tres sectores, y se sub-dividen aún más por sub-regiones.

²⁸ En este estudio se incluyó únicamente la precipitación sobre superficies de agua abierta. La precipitación total en toda la región del delta en años de No Inundación se estimó en 620 MMC, y en 890 MMC en años de Inundación, lo que representa en cada caso un 7% del influjo total ajustado. A un promedio de <8 cm / año, la precipitación media anual es marcadamente menor que la evapotranspiración potencial (>2.0 cm/ año) en la región (Owen-Joyce y Raymond, 1996).

MMC	Agrícola	Urbano	Ambiental
No Inundación	4,070	155	792
Inundación	3,799	154	810

Agrícola

Dentro del sector agrícola, el agua se aplicó en irrigación³⁰, abreviar ganado, y para usos relacionados con acuicultura. La demanda de agua varía según el uso: por ejemplo, las demandas de agua para irrigación de cosechas varió en el Valle de Coachella desde 2.0 AF/acre para lechuga hasta 7.5 AF/acre para alfalfa (CVWD 1999).³¹ El agua que no se usó fue descargada a diferentes cuerpos de agua en la región del delta. En la sub-región de Arizona, el agua de desecho agrícola retornó al cauce principal del Río Colorado o fue descargada hacia México en el Lindero Internacional Sur. En la sub-región de California, las aguas de desecho provenientes de los distritos de riego a lo largo del río fueron retornadas al cauce principal, mientras que en los Valles Imperial y Coachella se descargaron en el Mar Salton a través de extensos drenajes tipo baldosa que existen en el subsuelo de estos distritos de riego. En ausencia de estos drenajes, como en el Distrito 14 de México, la infiltración del agua se aplicó como irrigación que recargó el acuífero.

Más de la mitad del área total de tierras en la región del delta estaba irrigada. Salvo en la sub-región de México, la extensión irrigada varió sólo ligeramente entre los años de No Inundación y de Inundación.

Sub-Región	Año No Inundación	Año Inundación
Arizona	46,539	50,182
California	252,527	257,383
México	197,084	182,920
TOTAL	496,150	490,485
Fuentes: CNA; USBR 1991 – 98b.		

Como se ilustra en la Tabla 5.2, los distritos de riego en las sub-regiones de Arizona y California

²⁹ Fuentes: CNA; CVWD 2000; IID 1999; Jensen 1995; USBR 1995-98; Distrito Metropolitano de Agua 1998; CRWQCB; OOMAPAS; Programa de Base de Datos del Mar Salton; Tostrud 1997; USBR 1995-98; Valdés – Casillas y otros, 1998; Zamora – Arroyo y otros, 2001.

³⁰ Dentro de las prácticas de irrigación se incluye el agua aplicada en: preparación de terrenos; salinización; cumplir requisitos de necesidad de agua de cosechas (ET); y aspectos de control de clima.

³¹ La aplicación de la demanda de agua también varía entre los distritos de riego debido a diferencias en el tipo de suelo, clima o factores culturales, como el espaciamento entre plantas.

cultivaron 2.8% más tierras en años de Inundación (308,000 ha) que en años de No Inundación (299,000 ha). El Distrito 14 de México cultivó 7.2% menos acres en años de Inundación que en años de No Inundación, a pesar de que hubo 65% más de agua del Río Colorado que cruzó la frontera.

Agua Utilizada

Ocho importantes distritos de riego y varias áreas agrícolas más pequeñas que se encuentran en la región del delta desvían agua del Río Colorado para irrigación. En la Tabla 5.3 se muestra el uso medio de agua en los principales distritos de riego durante años de No Inundación y de Inundación³². Tal como se muestra en esa Tabla, los usuarios agrícolas en la sub-región de California aplicaron a sus cosechas más agua del Río Colorado que el total combinado de los usuarios en las sub-regiones de Arizona y México. A pesar de que la diferencia entre desvíos de agua en años de No Inundación y de Inundación en las sub-regiones de Arizona y California son despreciables, el Distrito 14 de México irrigó menos acres de terreno en años de Inundación y aplicó más agua del Río Colorado para compensar el agua del subsuelo utilizada en años de No Inundación.

Extraída por:	Agua Río Colorado		Agua del Subsuelo		Total	
	No Inundación	Inundación	No Inundación	Inundación	No Inundación	Inundación
Arizona						
Distrito Riego Norte del Gila	56	53	-	-	56	53
Distrito Riego de Yuma	68	65	13	13	81	79
Distrito Riego Valle de Yuma	308	299	32	36	340	334
Otros irrigadores	66	69	-	-	66	69
Subtotal	498	486	44	49	543	535
California						
Distr. Agua Valle Coachella	340	343	80	80	421	423
Proy. Yuma. Div. Reservación	101	95	26	30	127	126
Distrito de Riego Imperial	3,182	3,071	-	-	3,182	3,071
Subtotal	3,623	3,509	106	110	3,730	3,620
México, Distrito 14	1,670	2,245	950	777	2,620	3,022
TOTAL	5,792	6,240	1,101	937	6,894	7,178

Fuentes: CNA; USBR 1996; USBR 1991 – 98a.

Agua del Subsuelo

Salvo el IID, la mayoría de los distritos agrícolas en la región complementaron el abastecimiento de agua superficial del Río Colorado con agua del subsuelo (ver Tabla 5.3). En la Tabla 5.4 se muestra

³² El Proyecto de División de Reservación de Yuma consiste de dos distritos de irrigación: la Unidad Bard y la Unidad Indian.

la extracción de agua del terreno en los distritos de riego, tanto para años de No Inundación como para años de Inundación, en forma de porcentaje del total de agua agrícola aplicado en cada una de las sub-regiones. El Distrito 14 de México extrajo más agua del subsuelo, 950 MMC en años de Inundación, que todos los otros distritos de riego juntos³³. La mayor aplicación de agua del subsuelo que se reportó para los sembradíos de la sub-región de California sucedió en el Valle de Coachella, donde el agua del subsuelo proporcionó el 19%, o aproximadamente 80 MMC para irrigación (CVWD, 2000). El IID, que es el mayor usuario en la región de aguas superficiales, no reportó la aplicación de agua del subsuelo para riego.

Uso del Agua.

La estimación del consumo aplicado a uso agrícola generalmente implica que a las entregas registradas hay que restarles la descarga de aguas de desecho. Como se muestra en la Tabla 5.1, las cosechas consumieron casi el 80% del total de agua utilizado en la región del delta. Al dividir el consumo de agua en uso agrícola entre la superficie de tierra sembrada, se revela que en la sub-región de California se utilizó la mayor cantidad de agua por unidad de superficie: en años de No Inundación, el sector agrícola de esta sub-región usó 2.9 AF/acre, comparado con el consumo de la sub-región de Arizona de 2.0 AF/acre y de 2.6 AF/acre en la sub-región de México. De igual forma, en años de Inundación, el sector agrícola de la sub-región de California usó 2.9 AF/acre, y en las sub-regiones de Arizona y México, 1.7 y 2.3 AF/acre respectivamente (ver Tabla 5.5).

	Año No Inundación	% del total	Año de Inundación	% del total
Arizona	46	8.4	49	9.2
California	106	2.8	111	3.1
México	950	36.3	777	25.7

Fuentes: CNA; CVWA 2000; IBWC 1991-1998; Tostrud 1997; USBR 1996.

Nótese que la relación: consumo de agua a superficie irrigada, utilizada aquí se basa en el área de terrenos cultivados, y no de superficie física de tierra. Si bien esta última se refiere a la cantidad de hectáreas bajo cultivo en un distrito de riego en cualquier momento, el área cultivada se refiere a la extensión total anualmente sembrada en un distrito de riego, lo cual incluye la doble cosecha, que es la práctica de sembrar múltiples productos en una sola superficie de terreno. Los distritos de riego en las sub-regiones de Arizona y California practican la cosecha doble en un 14% (sub-región de California, años de No Inundación) a un 45% (sub-región de Arizona, años de Inundación) anual de su superficie total cultivable. No se tuvo disponible información sobre prácticas de doble cosecha en la sub-región

³³ México: En la literatura no se separó el agua del subsuelo utilizada para irrigación de la cantidad usada para propósitos urbanos.

de México. Como se muestra en la Tabla 5.6, el uso medio de agua por acre aumenta significativamente cuando se aplica a la superficie física.

Mezcla de Cosechas y Evapotranspiración

La evapotranspiración (ET) es el mayor componente en el uso agrícola de agua. Debido a que la ET varía de acuerdo con el tipo de cosecha, la mezcla de cosechas en cada uno de los distritos de riego afectó de manera directa el uso de agua en las sub-regiones. La Tabla 5.7 muestra la superficie sembrada con las principales cosechas en la región.³⁴ Por área, el trigo y la alfalfa fueron las dos cosechas más grandes en la región en todos los años, seguidos por algodón en años de No Inundación y lechuga en años de Inundación. En el periodo de estudio, aproximadamente el 25% de las cosechas en la región fueron de trigo, y casi un 20% de alfalfa. La superficie sembrada de algodón varió entre un 9.9% en años de No Inundación y 5.0% en años de Inundación, y la lechuga fue de aproximadamente el 6% en todos los años (USBR 1991 – 98b; SAGAR).

La Tabla 5.8 muestra la ET de las principales cosechas de la región. La sub-región de California utilizó más agua por unidad de superficie principalmente porque la tasa de ET de la alfalfa, que es la mayor cosecha en el Valle Imperial, desfiguró el promedio de la sub-región como un todo, ocultando otras cosechas más especializadas y de uso menos intensivo de agua, como en la uva de mesa y lechugas, que predominaron en el Valle de Coachella y en los otros distritos de riego en la sub-región. Siendo la cosecha que requiere agua de manera más intensa, la alfalfa tuvo una tasa estimada de ET de 5.6 AF/acre (Erie y otros, 1982; Jensen 1995). A pesar de que contribuyó con menos del 30% de la superficie agrícola total en la sub-región de California, la alfalfa utilizó casi el 75% del agua usada por el sector agrícola de esta sub-región. La segunda cosecha en importancia de la sub-región, el trigo, tuvo una tasa de ET de 2.15 AF/acre (Erie y otros, 1982; Jensen 1995).

La mezcla de cosechas en la sub-región de Arizona se inclinó hacia cosechas de uso menos intensivo de agua, generando un consumo general menor que en la sub-región de California. Como se muestra en la Tabla 5.7, la mayor cosecha en la sub-región de Arizona, la lechuga, utilizó aproximadamente el 32% de la tierra cultivable de la sub-región. Con una tasa de ET de 1.41 AF/acre, la lechuga ocupó del 22% (No Inundación) al 27% (Inundación) del agua utilizada por el sector agrícola en la sub-región de Arizona. Igual que la sub-región de California, la de Arizona también fue la segunda en producción de trigo por unidad de área.

Tabla 5.5 Uso Medio Agrícola de Agua en la Región del Delta del Río Colorado

³⁴ Las principales cosechas en el delta se definen como las cosechas de mayor volumen por unidad de superficie, para: CVWD; IID; División Reservación, Unidades Bard e Indian; distritos de riego de la sub-región de Arizona; y Distrito 14 de México.

	Arizona Año de No Inundación	Arizona Año de Inundación	California Año de No Inundación	California Año de Inundación	México Año de No Inundación	México Año de Inundación
Área sembrada (ha)	47	50	253	257	197	183
Uso de agua (MMC)	290	260	2,233	2,270	1,542	1,270
Uso de agua por acre sembrado (MMC/ha)	6.2	5.2	8.8	8.8	7.8	6.9

Fuentes: CVWD 2000; SAGAR; Tostrud 1997; USBR 1991-98b; USBR 1995-98

**Tabla 5.6 Relación Entre Área Promedio y Consumo, en los Principales
Distritos de Riego de la Región del Delta del Río Colorado**

	Arizona Año de No Inundación	Arizona Año de Inundación	California Año de No Inundación	California Año de Inundación	México Año de No Inundación	México Año de Inundación
Agua utilizada (MMC)	290	260	2,233	2,270	1,542	1,270
Área física (ha x 1,000)	25	25	217	217	N/d	N/d
Área con cosechas (ha x 1,000)	47	50	253	257	197	183
Área física (Uso / ha)	11.6	10.5	10.3	10.5	N/d	N/d
Área con cosechas (Uso / ha)	6.2	5.2	8.8	8.8	7.8	6.9

Fuentes: CVWD 2000; SAGAR; Tostrud 1997; USBR 1991-98b; USBR 1995-98

**Tabla 5.7 Área Media Anual de Principales Cosechas en la Región del Delta del Río Colorado
(MMC)**

	Arizona Año de No Inundación	Arizona Año de Inundación	California Año de No Inundación	California Año de Inundación	México Año de No Inundación	México Año de Inundación	Regional Año de No Inundación	Regional Año de Inundación
Trigo	10	9	29	33	80	80	119	121
Alfalfa	1.3	1	74	71	21	19	97	90
Algodón	3.2	3	3	2.4	37	21	43	26
Lechuga	15	16	14	13	.5	.5	30	30
Remolacha	-	-	15	16	-	-	15	16
Uvas	-	-	6	5.5	-	0.1	6	6
Toronja	0.4	0.2	3.5	2.8	-	-	4	3
TOTAL	30	29	146	144	139	121	314	292
AREA TOTAL	47	50	253	257	197	183	496	490

Fuentes: SAGAR; USBR 1991-98b.

En la sub-región de México, el trigo dominó en la mezcla de cosechas. Este producto comprendió el 41% del área de la sub-región en años de No Inundación y el 44% en años de Inundación, a pesar de haber usado únicamente el 34% del agua utilizada por el sector agrícola de esta sub-región en años de No Inundación y el 41% en años de Inundación (CNA; SAGAR). La segunda cosecha en la sub-región de México, el algodón, tuvo una tasa más alta de ET (3.32 AF/acre) y utilizó

un 24% (No Inundación) y un 17% (Inundación) del consumo agrícola total de agua de la región (Erie y otros, 1982; CDWR 1993; Jensen 1995).

Urbano

El sector urbano, que comprende usos domésticos, municipal e industrial de agua, utilizó menos agua que los otros sectores de la región (ver Tabla 5.1). El agua en este sector se aplica a usos tales como irrigación de grama, usos domésticos, manufactura y otros usos municipales. Este estudio no incluyó el agua utilizada por las plantas geotérmicas.³⁵ El consumo urbano utilizó aproximadamente 2% del total de agua de la región. El agua del Río Colorado se complementó en muchas áreas con agua de mayor calidad del subsuelo, mostrando requerimientos más altos en cuanto a calidad de agua que en los demás sectores (ver Tabla 5.9).

Uso del Agua

Las tres sub-regiones satisficieron su demanda urbana mediante una combinación de agua del Río Colorado y agua del subsuelo, a pesar de que en cada sub-región la dependencia de esta última varió notablemente. En la sub-región de Arizona, la mayor aplicación de agua urbana se dio en la Ciudad de Yuma. Tanto en años de No Inundación como de Inundación, Yuma desvió agua del Río Colorado a través del Canal All American y el Canal Principal de Yuma para cumplir con su demanda anual de 33 MMC (USBR 1991-98a). Varias otras entidades más pequeñas³⁶ en la sub-región de Arizona desviaron aproximadamente 16.0 MMC desde una combinación no distinguible de acuíferos del subsuelo en el Río Colorado (USBR 1991-98a).

La mayor demanda urbana en la sub-región de California se encontró en el Valle de Coachella: el CVWD envió 102 MMC anuales de agua del subsuelo (CVWD 2000). La demanda urbana en el Valle Imperial se satisfizo con agua del Río Colorado únicamente: el IID transportó el 2% de su captación del Río Colorado a las siguientes diez ciudades para tratamiento y entrega a clientes domésticos, municipales e industriales: Brawley; Calapatria; Caléxico; El Centro; Heber; Holtville; Imperial; Niland; Seeley; y Westmorland. En años de No Inundación, estas ciudades enviaron 57 MMC a usuarios urbanos, y en años de Inundación la entrega fue de 59 MMC³⁷ (USBR 1991-98b). Las Unidades Indias a lo largo de la parte baja del Colorado, en la sub-región de California, entregaron menos de 1MMC anual al sector urbano (USBR 1991-98a; USBR 1991-98b).

Debido a consideraciones en cuanto a la calidad del agua, la sub-región de México depende para el sector urbano de agua del subsuelo o de una mezcla de agua del subsuelo y del Río Colorado. El

³⁵ Las plantas geotérmicas en el Valle Imperial re-inyectaron al acuífero agua extraída del subsuelo, mientras que las que se encuentran en el Valle de Mexicali mantienen el agua en estanques de evaporación revestidos.

³⁶ Dentro de ellas se incluyen: Desert Lawn, Ferrocarril Southern Pacific, Escuela Superior Yuma Union, Oficina del USBR Para el Área de Yuma; Parque Cocopah RV; Somerton; Gadsen; San Luis; y Condado de Yuma (USBR 1991-98a).

³⁷ El crecimiento del 28% en la población del Valle Imperial entre 1990 y 2000 (Departamento Financiero de California) fue la causa de una mayor demanda en años (de Inundación) posteriores.

total reportado de agua extraída del subsuelo anualmente para uso urbano (incluyendo la que se exportó a través del acueducto a Tecate, Tijuana y Ensenada) fue de 197 MMC (CNA). Parte de esta agua se envió a usuarios urbanos en Mexicali, además de la que se exportó para uso urbano a Tecate, Tijuana y Ensenada. Los usuarios urbanos de Mexicali recibieron 78 MMC en años de No Inundación y 83 MMC en años de Inundación de una combinación de aguas del Río Colorado y del subsuelo local (CESPM). Las entregas más grandes en años de Inundación posiblemente reflejan el crecimiento demográfico en el periodo más reciente comprendido entre años de Inundación.

Como se muestra en la Tabla 5.9, el uso urbano de agua en la región del delta del Río Colorado fue principalmente para fines domésticos y municipales, aunque también hubo un cierto uso industrial, principalmente en el Valle Imperial y en Mexicali. El Valle Imperial soportó una mayor base industrial, con aproximadamente un 36% de sus entregas urbanas, aproximadamente unos 21 MMC, enviados a usuarios industriales anualmente (IID 1999). A lo largo del cauce principal, se obtuvieron registros de uso industrial únicamente para Yuma, Arizona, que entregó aproximadamente el 20 por ciento de su entrega urbana, o sean 7 MMC, a usuarios industriales anualmente (Baer, com. personal; USBR 1995-98). Los usuarios industriales en Mexicali recibieron un 21%, o sean 16 MMC, del agua urbana de la ciudad en años de No Inundación, y un 26%, o 22 MMC, en años de Inundación (CESPM).

Tabla 5.8 Evapotranspiración Media de Principales Cosechas en el Delta del Río Colorado

MMC	Arizona Año de No Inundación	Arizona Año de Inundación	California Año de No Inundación	California Año de Inundación	México Año de No Inundación	México Año de Inundación	Regional Año de No Inundación	Regional Año de Inundación
Alfalfa	21	15	1,279	1,211	360	321	1,660	1,548
Trigo	63	59	194	217	524	522	781	798
Algodón	32	31	31	25	374	212	437	268
Lechuga	64	70	61	56	2	2.6	127	128
Remolacha	-	-	150	157	-	-	150	157
Uvas	-	-	53	49	0.4	1	53	50
Toronja	3	1.5	30	23	0.2	0.1	33	25
TOTAL	183	177	1,798	1,738	1,261	1,059	3,241	2,974
USO TOT. AGUA	290	260	2,233	2,270	1,542	1,270	4,064	3,800

Fuentes: CDWR 1993; Erie y otros, 1982; SAGAR; USBR 1991-98b.

Tabla 5.9 Entrega Urbana Media Anual en la Región del Delta del Río Colorado

MMC	Arizona Año de No Inundación	Arizona Año de Inundación	California Año de No Inundación	California Año de Inundación	México Año de No Inundación	México Año de Inundación	Regional Año de No Inundación	Regional Año de Inundación
Entrega	52	50	162	162	78	83	292	295

urbana									
<i>Fuente</i>									
R.Colorado	52	50	59	60	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d
Subsuelo	N/d	N/d	83	82	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d
<i>Destino</i>									
Doméstico	45	43	141	139	62	61	247	244	
Municipal	7	7	21	22	16	22	44	50	
Fuentes: CVWD 2000; IID 1999; CRWQCB; OOMAPAS; USBR 1991-98a; USBR 1991-98b.									

MMC	Arizona Año de No Inundación	Arizona Año de Inundación	California Año de No Inundación	California Año de Inundación	México Año de No Inundación	México Año de Inundación	Regional Año de No Inundación	Regional Año de Inundación
Agua usada:	28	27	88	87	40	40	156	154
Doméstica	27	26	84	84	37	37	148	147
Municipal	1.1	1.1	3.5	3.6	2.7	3.6	7.3	8.3
Desecho :	24	23	74	74	38	43	136	139
Mar Salton	-	-	36	36	38	43	74	79
Río Colorado	24	23	0.5	0.5	-	-	24	23
Recarga / evapor.	-	-	37	37	-	-	37	37
Fuentes: CESPM; CRWQCB; CVWD 2000; McNaughton, com. pers.; Tostrud 1997; USBR 1991-98a / 1991-98b / 1995-98								

Uso Urbano y Aguas de Desecho

Del agua desviada, los usuarios domésticos en el sector urbano generalmente usan un 60% (USBR 1995-98), y los usuarios industriales cerca de un 16% (USGS). Estas estimaciones indican que durante el periodo de estudio, se descargaron 136 MMC de aguas de desecho en los años de No Inundación, y 139 MMC en años de Inundación (ver Tabla 5.10). Aproximadamente el 73% de las aguas urbanas de desecho de la región se descargaron en el Mar Salton o se retornaron al Río Colorado. El 27% restante del agua de desecho salió de la región mediante evaporación y lagunas de infiltración

En la sub-región de Arizona, las aguas servidas de la Ciudad de Yuma se trataron y fueron regresadas al Río Colorado. No se conoció cuál fue el destino del resto de las aguas de desecho de esta sub-región (<5.5 KAF). Después de su tratamiento, toda el agua de desecho del Valle Imperial y aproximadamente el 10% de la del Valle de Coachella se descargó en el Mar Salton a través de drenajes y de los ríos Álamo y New (CRWQCB). La mayor parte del agua de desecho del Valle de Coachella (90%) salió de la región a través de evaporación y en lagunas de infiltración (CRWQCB). Las comunidades de la sub-región de California adyacentes al Río Colorado trataron menos de 1.2 MMC de aguas servidas por año; no se pudo conocer el destino de esa agua de desecho (USBR 1991-98a).

(Foto)
El Río Colorado sostiene a un gran número de freatofitas.

En la sub-región de México, la mayor parte del agua de desecho de Mexicali descargó al Mar Salton a través del Río New. Aproximadamente un 87% de los 38 – 43 MMC de aguas servidas de Mexicali fueron recolectadas para su tratamiento: 90% de esta agua recolectada se trató y se regresó al Río New. El 10% restante, así como el agua no recolectada se descargó sin tratar en los canales que fluyen hacia el Río New (McNaughton, com. pers.).

Ambiental

La ET ambiental estimada se limita a las freatofitas. No se incluyen estimaciones de la ET de la vegetación de altura, que se alimenta más del agua del subsuelo que del agua superficial. En la región del delta existieron aproximadamente 81,000 ha de vegetación emergente en humedales y riveras. Sustentándose principalmente en aguas de drenaje agrícola, esta vegetación creció a lo largo del cauce principal del Río Colorado, de los ríos Álamo y New, canales de conducción para irrigación y zanjas de drenaje, así como áreas donde se recolectó el drenaje agrícola, como la Ciénaga de Santa Clara y los humedales de El Indio. Los arroyos y acuíferos de poca profundidad también le dieron sustento a pequeños parches de vegetación en algunas áreas, como los humedales de El Doctor.

Uso Natural

La vegetación natural en la región utilizó 796 MMC de agua en años de No Inundación y 810 MMC en años de Inundación. La vegetación a lo largo del cauce principal del Río Colorado utilizó 254 MMC de agua en años de No Inundación y 294 MMC en años de Inundación. La mayor parte del agua utilizada por la vegetación (72%, años de No Inundación, 75%, años de Inundación) se usó en la sub-región de México.

La vegetación a lo largo de canales de conducción y zanjas de drenaje en la región del delta utilizaron más de 370 MMC de agua anualmente³⁸. La mayor parte de esta ET ocurrió en el Valle Imperial de California y en el Distrito 14 de México, donde algunos canales de conducción y la mayoría de las zanjas de drenaje no estaban recubiertas.

³⁸ Esto es una estimación, pues la ET en los canales de conducción y zanjas de drenaje en la sub-región de Arizona no se separó de la ET a lo largo del Colorado.

Tabla 5.11 Evapotranspiración Media Anual de Vegetación Natural		
	Año de No Inundación	Año de Inundación
	MMC	
Arizona		
Área de Vida Silvestre Mittry Lake	11	12
Represa Imperial a Represa Morelos	38	39
ET Natural total en Arizona	49	51
California		
Zona riveras en cauce principal	23	21
Vegetación humedales en Cuenca Salton	241	232
Vegetación en alrededores de Mar Salton	54	49
ET Natural total en California	317	302
México		
Cauce principal y Río Hardy	183	221
Ciénaga de Santa Clara	68	76
El Indio	44	37
Otra vegetación de humedales en el Valle de Mexicali	132	123
ET Natural total en México	426	456
ET total regional	792	810
Fuentes: USBR 1995-98; Valdés – Casillas y otros, 1998; Luecke y otros, 1999; Zamora – Arroyo y otros, 2001.		

A pesar de que en el Distrito de Riego Imperial rutinariamente se elimina la vegetación de las orillas de los canales de conducción y zanjas de drenaje (salvo en casos en que la vegetación sirve para estabilización de taludes), aproximadamente 197 MMC anuales fueron utilizados por la vegetación de riveras y humedales que crece a lo largo de canales y zanjas y de los ríos New y Álamo, y en menor grado, en canales de conducción no revestidos (Tostrud, 1997). En el Distrito 14 de México, la vegetación a orillas de los canales de conducción y zanjas de drenaje abiertas en el terreno, consumieron 132 MMC en años de No Inundación y 123 MMC en años de Inundación. La vegetación en el Distrito de Agua del Valle de Coachella utilizó poca agua (aproximadamente 43.1 MMC / año) debido a que la mayoría del agua se entregó a través de tuberías, con una tasa de eficiencia del 98.5%, y el sistema de recolección de aguas de desecho fue también cerrado, con pocas zanjas a cielo abierto (CVWD).

La vegetación alimentada por descargas de canales de drenaje y ríos en las sub-regiones de California y México utilizó también cantidades importantes de agua. La vegetación que rodea el Mar Salton utilizó 53 MMC de agua en años de No Inundación y 49 MMC en años de Inundación (Programa de Base de Datos del Mar Salton). En la sub-región de México, la vegetación de la Ciénaga Santa Clara y en los humedales de El Indio utilizaron aproximadamente 112 MMC anuales.

Conclusión

El agua del Río Colorado discurre a través de la mayor parte de la región del delta, a pesar de que los meandros del río han sido reemplazados por una compleja y sofisticada infraestructura que conduce agua hacia, y la evacua desde, más de un millón de acres de tierras irrigadas. Esta agua se utiliza para producir toda una variedad de cultivos de forraje y legumbres bajo un clima extremadamente caliente y seco, generando una evapotranspiración agrícola que supera los 3,700 MMC / año. Esta evapotranspiración representa en sí misma el mayor consumo de agua en la región del delta, tanto en años de No Inundación como de Inundación, consumiendo casi la mitad de los influjos totales durante los años de No Inundación. La evapotranspiración de freatofitas consumió <10% de los influjos totales de los años de No Inundación, mientras que aquella producida en superficies abiertas de agua consumieron aproximadamente una cuarta parte de tales influjos. El consumo urbano fue despreciable (~2%); y aún con el crecimiento esperado de la población de la región, tal consumo continuará representando un porcentaje muy pequeño de la demanda regional total (a pesar de que los impactos locales, y sobre la calidad del agua, serán más fuertes).

Durante años de No Inundación, solamente un 10% de los influjos totales a la región del delta salieron de allí en forma de agua superficial, al este como exportaciones hacia Wellton-Mohawk y en volúmenes mucho más pequeños hacia el oeste, a Tijuana y Tecate. Se estimó que durante los años de No Inundación, <0.4% del flujo registrado en la Represa Imperial, que es el límite superior del área de estudio, alcanzó la desembocadura del río. En años de Inundación, esto se elevó a >27%. Durante los años de No Inundación, aproximadamente el 80% del total de agua que ingresó a la región del delta salió hacia la atmósfera, 10 veces el volumen total de precipitación que cayó en toda la región.

La distinción entre años de No Inundación y años de Inundación reveló marcadas diferencias dentro de la sub-región de México, a pesar de que en las otras sub-regiones estas diferencias fueron más limitadas. En la sub-región de México, los años de Inundación fueron testigos de un incremento en el desvío de agua superficial, un decrecimiento en la extracción de agua del subsuelo, y un incremento en la recarga de agua del subsuelo, tanto dentro de las cuencas de recarga como en la llanura inundable del Río Colorado. Este aumento en la recarga ayudó a revertir la sobre-extracción de agua del subsuelo durante los años de No Inundación, aunque debe enfatizarse que este estudio se limitó a los flujos de agua superficial y en ningún momento se trató de cuantificar todo el rango de influjos y salidas de aguas del terreno, como lo son los movimientos de agua bajo la superficie entre las sub-regiones. La recarga en la llanura inundable tomaría en cuenta el alto nivel de ET por freatofitas en el cauce principal calculada en este estudio, la cual excedió la disponibilidad de agua superficial en años de No Inundación por un factor de cinco.

La extracción de agua del subsuelo en la parte baja del Valle de Coachella y en la sub-región de México indicó que no existió agua superficial en cantidad o calidad suficiente, o ambas, como para

satisfacer la demanda local. En la sub-región de Arizona, el agua del subsuelo se extrajo para bajar la elevación de la tabla de agua bajo la zona de crecimiento de las raíces de los cultivos, y en algunos casos debido a que el acceso a tal tipo de agua era más conveniente que el agua superficial. Salvo en la parte inferior del Valle de Coachella, la información sobre extracción de agua del subsuelo fue limitada y de confiabilidad desconocida. Todavía menos disponible estuvo la disponibilidad de datos sobre tasas de recarga de agua del subsuelo. Tales limitaciones en la información impusieron un desafío a los esfuerzos por elaborar un balance riguroso de aguas para las sub-regiones de Arizona y México, y para toda la región del delta en general.

Tal como se anotó en el Capítulo tres, la exactitud de los datos reportados en general estuvo limitada a un 90% para los instrumentos más exactos de medición de caudal. Salvo algunas mediciones hechas en flujos de retorno, la mayoría de los flujos fueron calculados para este estudio. Algunos cálculos, como el volumen de escorrentía local y el agua del cauce principal que ingresa a la cuenca de la Laguna Salada, fueron especulativos y se presentaron únicamente como estimaciones de tipo general.

Estos cálculos generales, caracterizados por la ausencia de datos en varios de los términos importantes de la fórmula para calcular el balance de agua, requieren una investigación más amplia. Dentro de las brechas en los datos se incluyen:

- Descarga del Río Colorado aguas abajo del Lindero Internacional Sur, la cual se podría obtener volviendo a establecer la Estación M.C. Rodríguez.
- Extracción de aguas del subsuelo en las regiones de Arizona y México.
- Extracción de agua del subsuelo por usuarios urbanos.
- La relación entre el acuífero aluvial y el cauce principal del Río Colorado aguas abajo de la Represa Morelos, incluyendo datos de series de tiempo sobre profundidad para llegar al agua del subsuelo.
- Datos verificados de series de tiempo sobre extracción de agua del subsuelo en las sub-regiones de Arizona y México.
- Tasas reales de ET de cultivos principales en la región del delta.
- Estimación sobre la variación con el tiempo de la extensión y volumen de la Laguna Salada, y profundidad hasta llegar al agua del subsuelo en la cuenca.

Apéndice A - Calidad del Agua

A pesar que varios contaminantes degradan la calidad del agua en el delta del Río Colorado, la principal preocupación es la salinidad. La salinidad alta causa entre \$500 y \$750 millones en daños a los usuarios agrícolas, municipales e industriales en la cuenca inferior del Río Colorado de los Estados Unidos (Departamento del Interior – DOI, 1999). No se dispuso de datos para México. Los daños inducidos por la sal incluye cosechas menores, reemplazo más frecuente de tuberías municipales, y menor plazo de vida útil en equipo industrial (Foro Sobre Control de Salinidad en la Cuenca del Río Colorado, 1996).

La salinidad elevada en el delta del Río Colorado es el resultado de una combinación de procesos naturales y humanos. Sin interferencia de la actividad humana, los manantiales salinos, la erosión de formaciones geológicas salinas, y los efectos de concentración de la evaporación y transpiración, generarían una salinidad de 334 mg/l en la Represa Imperial (Foro Sobre Control de Salinidad en la Cuenca del Río Colorado, 1996; DOI 1999). En décadas pasadas, las actividades humanas han exacerbado el problema de salinidad en la parte baja del Colorado: hacia 1997, las exportaciones fuera de la cuenca, irrigación, construcción de embalses que propician la evaporación, y el uso municipal e industrial aumentaron la salinidad media anual a 704 mg/l en la Represa Imperial (USBR).

Tabla A.1 Salinidad en la Región del Delta		
	Sólidos totales disueltos	
	Año No inundación	Año Inundación
Punto de Muestreo	(mg/l)	
R. Colorado en Represa Imperial	784	713
R. Colorado en el LIN	906	760
Otras entregas cerca del LIS	1,274	1,222
MODE	2,838	2,045
Río New, cerca de la frontera	2,836	2,583
Mar Salton	42,271	43,304

Tal como se anotó en el Capítulo Dos, la elevada salinidad en los años 60s fue motivo para que al Tratado EU-México de 1944 se le agregara la Minuta 242. Allí se establece que la salinidad media anual del agua entregada a México en el Lindero Internacional Norte (LIN) no excedería en más de 115 mg/l (± 30 mg/l) la salinidad del río en la Represa Imperial.³⁹ En el Título I del Acta para el Control de la Salinidad en la Cuenca

del Río Colorado (P.L. 93-320), aprobada en 1974, se describen los medios estructurales para implementar la Minuta 242. En el Título II de esta Acta se creó un programa de control de calidad del agua, responsable de implementar medidas específicas para cumplir con los objetivos y normas del Acta de Agua Limpia (DOI, 1999). La salinidad aguas arriba de la Represa Morelos permaneció dentro de los parámetros fijados por la Minuta 242 durante el periodo de estudio. En años de No Inundación,

³⁹ En los Estados Unidos se han registrado varios niveles de salinidad en ppm, pero en este reporte se han convertido a mg/l. En niveles por debajo de los 7,990, las ppm y los mg/l son unidades intercambiables (USGS, 1993)

el agua en la Represa Imperial contenía 784 mg/l de sólidos disueltos totales (SDT) y aguas arriba de Morelos había 122 mg/l, que decreció a 47 mg/l en años de Inundación (USBR; IBWC 1991-98).

A pesar de una menor salinidad aguas arriba de la Represa Morelos, las concentraciones de sal aumentaron en el cauce principal abajo del LIS, en el Río New, en canales de drenaje y en sitios de recolección de descargas agrícolas (Tabla A.1). La salinidad aumentó en años de No Inundación conforme disminuyó la descarga. En la frontera, el agua del Río New y del MODE tenían la misma salinidad, 2,800 mg/l, en años de No Inundación. En años de Inundación, la salinidad del Río New bajó a 2,600 mg/l y la de MODE a 2,000 mg/l (IBWC 1991-98 y USBR, 2001). La salinidad en el cauce principal aguas arriba de su confluencia con el Río Hardy, varió entre 1,810 mg/l a 560 mg/l durante el evento de inundación de 1997 (Valdés – Casillas y otros, 1998).

La salinidad regional fue mayor en los cuerpos de agua sostenidos por agua de drenaje agrícola. La salinidad del Mar Salton fluctuó entre 42,000 mg/l en años de No Inundación y 43,000 mg/l en años de Inundación. El Mar constituye un cuerpo de agua terminal, con una elevación en su superficie de aproximadamente 227 pies por debajo del nivel del mar, donde las tasas de evaporación exceden los 8 pies por año. El agua que se evapora en el Mar deja tras de sí sales y otros elementos. La salinidad en la Ciénaga Santa Clara se estimó que varía entre 3,000 y 5,000 mg/l (Valdés-Casillas y otros, 1998).

Además de la salinidad, en la región son objeto de preocupación el aumento en selenio y otros contaminantes. Aunque pequeñas, las concentraciones de selenio en el Mar Salton indican su presencia en las tuberías de conducción de agua de drenaje en la región, como en los ríos New y Álamo. Otros contaminantes que degradan la calidad del agua de la región incluyen nutrientes, residuos de pesticidas, y metales pesados. El análisis de tales componentes cae fuera del alcance de este reporte.

Apéndice B – Figuras

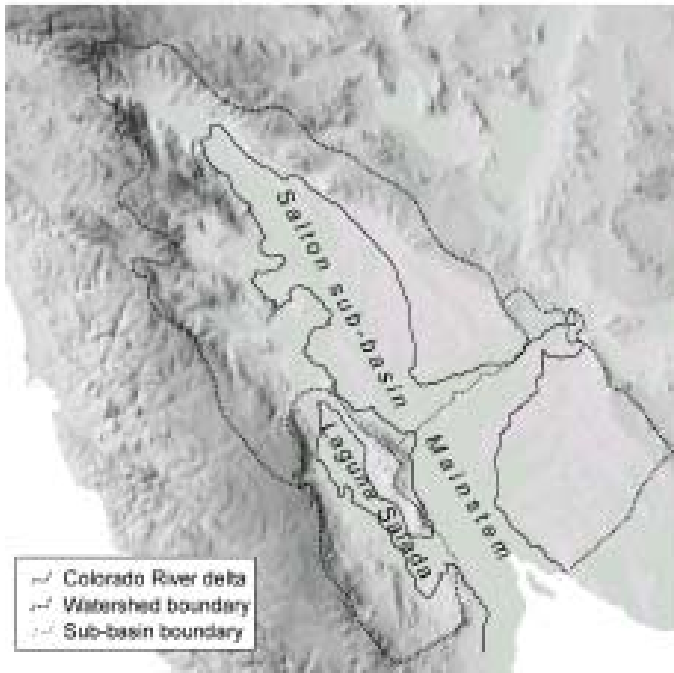


Figura 1.1



Figura 3.1 Sub-Regiones de Arizona, California y México.

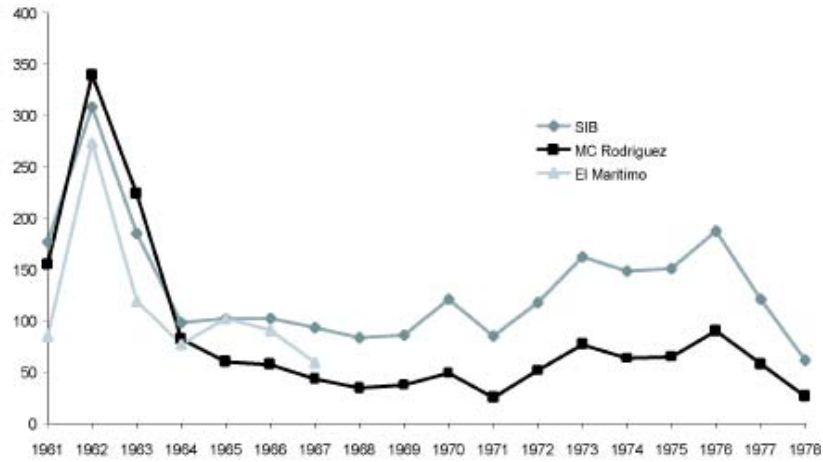


Figura 3.2 Caudal Reportado Aguas Debajo de la Represa Morelos, 1961 - 1982

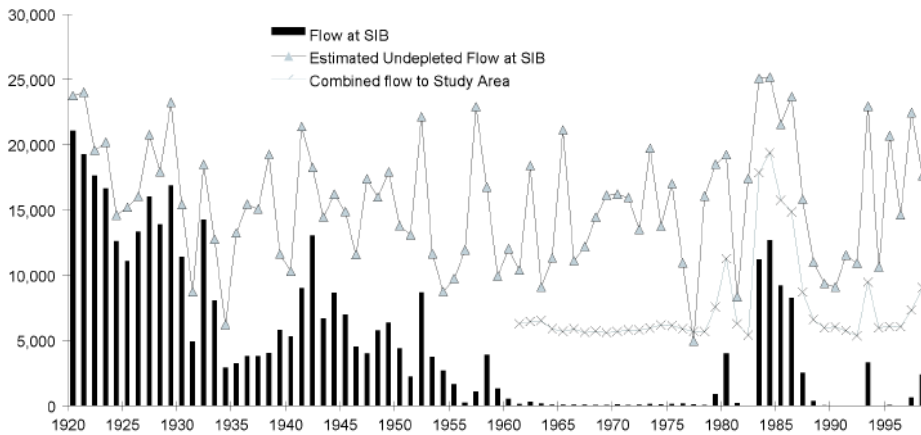


Figura 4.1 Flujo Medido y Estimado Sin Reducciones ni Regulaciones a Través de la Región del Delta, 1920 – 1998¹

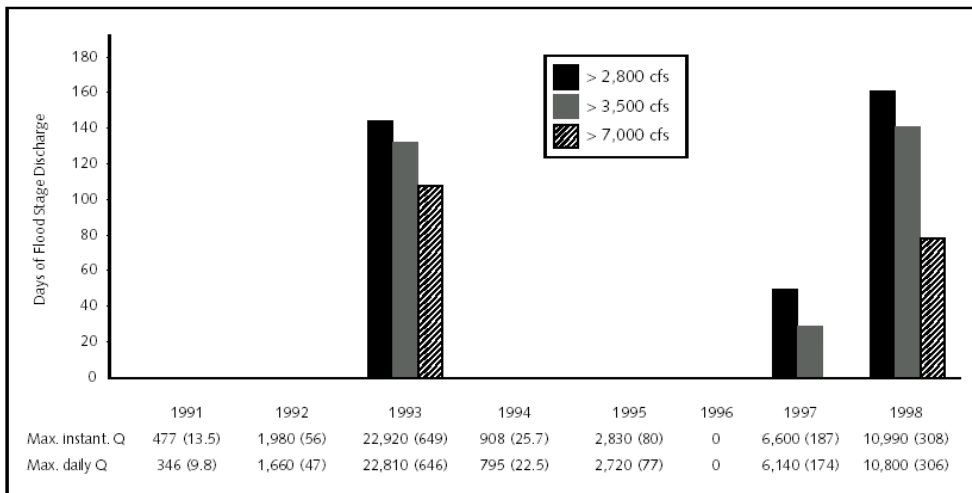


Figura 4.2 Total de días de descarga en el Lindero Internacional Sur, 1991 – 1998, con descarga máxima instantánea (Q) en pcs (m³/s) (IBWC 1991- 1998)

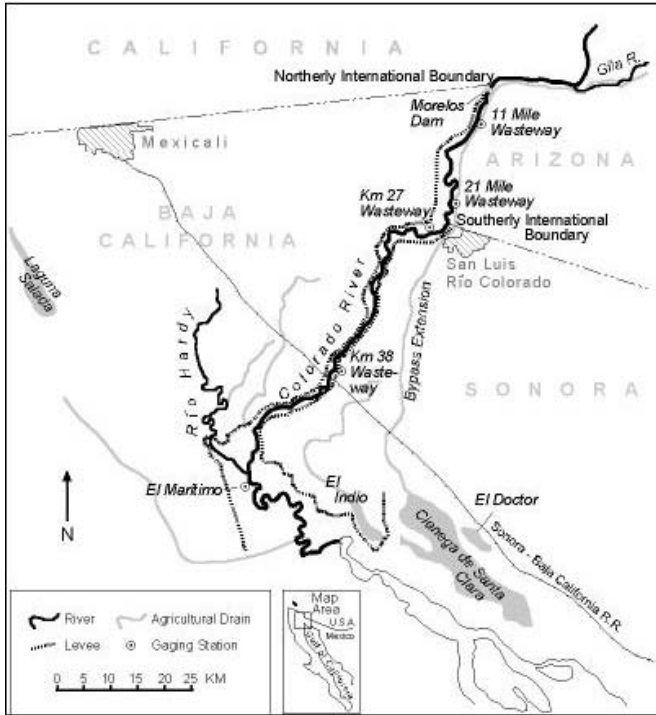


Figura 4.3 Infraestructura en la Región del Delta del Río Colorado



Fig. 4.4 Sub-región de Arizona y la Porción Principal de la Sub-Región de California



Figura 4.5 Porción de la Cuenca del Salton en la Sub-Región de California

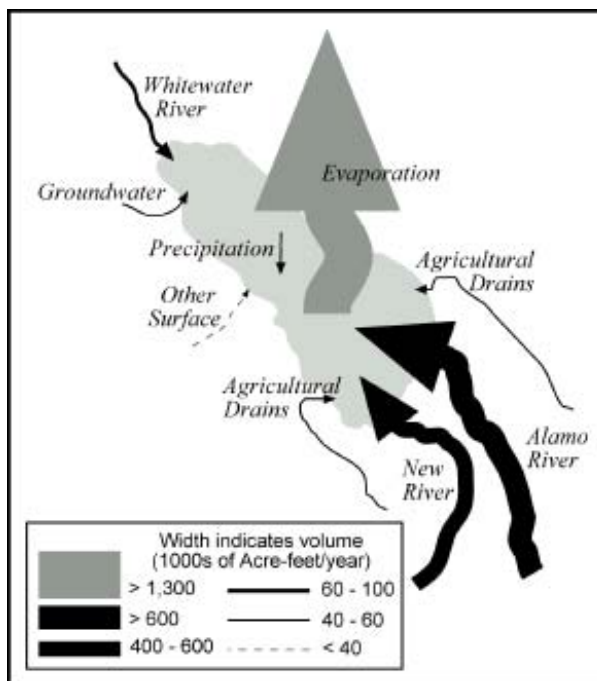


Figura 4.6 Influjos y Egresos del Mar Salton
Fuente: Cohen y otros, 1999

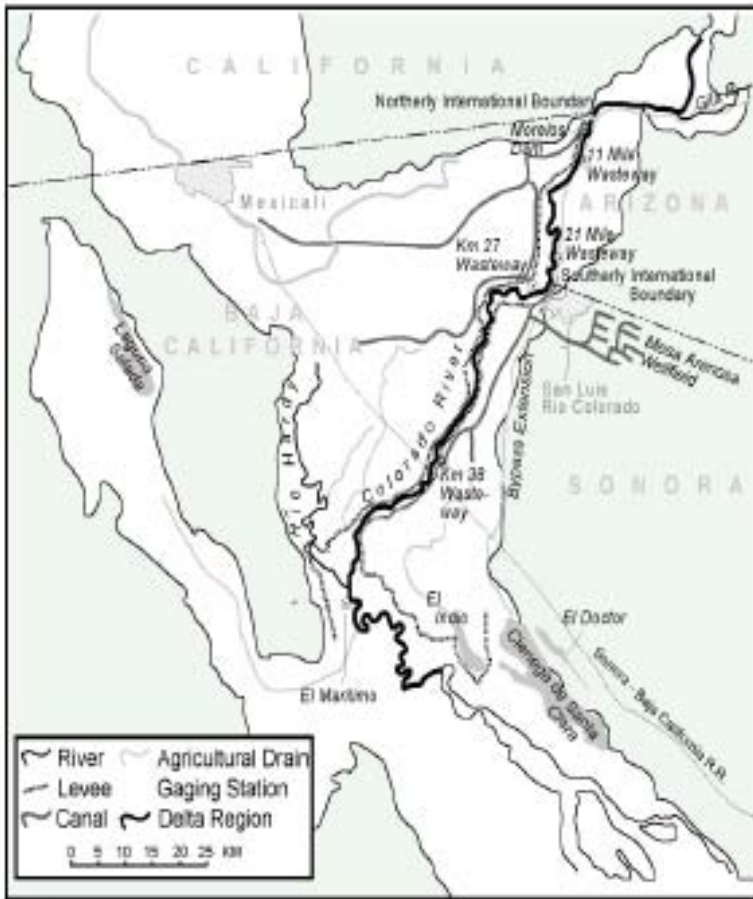


Figura 4.7 Sub-Región de México.

Fuentes

Unpublished

- Arizona Department of Economic Security, Population Statistics Unit.
www.de.state.az.us/links/economic/webpage/popweb/T2027.web.html.
- Border Environmental Cooperation Commission 2000. Construction of a Wastewater Treatment Plant and Rehabilitation of the Wastewater Collection System San Luis Río Colorado, Sonora. www.cocef.org/aproyectos/summarySLRColorado.htm.
- California Department of Finance (2000). Historical City, County, State and Population Estimates, 1991-2000, with 1990 Census Counts.
http://www.dof.ca.gov/HTML/DEMOGRAP/Hist_E-4xls.
- California Regional Water Quality Control Board - Colorado River Region. National Pollutant Discharge Elimination System (NPDES) Permit and Waste Discharge Requirements.
- Case, P. and Alward, G. 1997. Patterns of Demographic, Economic and Value Change in the Western United States: Implications for Water Use and Management. Report to the Western Water Policy Review Advisory Commission.
- Comision Estatal de Servicios Publicos de Mexicali (CESPM). Unpublished data.
- Comision Nacional del Agua (CNA). Gerencia Regional de la Peninsula de Baja California. Distrito de Riego 014, Río Colorado. Jefatura de Operación. Unpublished data.
- Coachella Valley Water District (CVWD). 2000. Coachella Valley Draft Water Management Plan. http://www.cvwd.org/Public_Docs/Coachella_Valley_Water_Management_Plan.pdf.
- Colorado River Board of California. Colorado River Water Report. Weekly and Annual Reports. Glendale, California.
- Imperial County. Water Element of the Imperial County General Plan.
http://elib.cs.berkeley.edu/cgi-bin/doc_home?elib_id=858.
- Imperial Irrigation District (IID) 2001. <http://www.iid.com>.
- Instituto Nacional de Estadísticas, Geografía, Informática (INEGI) 2000. Municipality Populations of Baja California, Selected Years 1990-2000.
http://www.sci.sdsu.edu/ccbres/mexi_data.html.
- Metropolitan Water District. Metropolitan's Comments on the November Draft of the Colorado River Board of California's Study Entitled "The Salton Sea: 1906-1996 Computed and Measured Salinities and Water Levels." Los Angeles, CA.
- Organismo Operador Municipal de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de San Luis Río Colorado (OOMAPAS). Unpublished data.
- Salton Sea Database Program. <http://cem.uor.edu/salton/> Unpublished data.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural. Unpublished data.
- Tostrud, Merlin B. (1997). The Salton Sea: 1906-1996 Computed and Measured Salinities and Water Levels, Draft. <http://home.earthlink.net/~tostrud/>, visited August 2000. (Copy on file with authors).

U.S. Bureau of Reclamation (USBR) 1991-98b. *Crop Production Reports*. Boulder City, Nevada: U.S. Bureau of Reclamation, Lower Colorado Region. Annual.

_____. n.d. *Colorado River System Consumptive Uses and Losses Report: 1971-1975*.

United States Geological Survey (USGS). 2000. "Estimated Use of Water in the United States in 1990: Industrial Water Use." <http://water.usgs.gov/watuse/tables/intab.st.html>.

Personal Communication

Addiego, Jeffrey. U.S. Bureau of Reclamation. Email correspondence, August 2000.

Baer, Hank. City of Yuma, Department of Public Works. Facsimile, August 2000.

Grubaugh, Elston. Letter. July 2001.

Greer, Bill. Hydrologist, USBR Yuma Area Office. Email correspondence, July 2001.

McNaughton, Eugenia. U.S. Environmental Protection Agency, Region IX. Telephone conversation, August, 2000.

Roberts, Bill. U.S. Geological Survey, Yuma, Arizona. Email correspondence, August, 2000.

Zamora-Arroyo, Francisco. Conservación Internacional. Email correspondence, January 2001.

References

Bradley, M.D., and DeCook, K. 1978. Ground Water Utilization in the Arizona-Sonora Border region. *Natural Resources Journal* 18: 29-48.

Carbajal, N., Souza, A., and Durazo, R. 1997. A numerical study of the ex-ROFI of the Colorado River. *Journal of Marine Systems* 12: 17-31.

Castro, J.E. 1995. Decentralization and Modernization in Mexico: The management of water services. *Natural Resources Journal* 35: 461-487

Clinton, M., Hathaway McKeith, M., Clark, J., Cunningham, P., Getches, D.H., Lopezgamez, J.L., Martínez Morales, L.O., Bogada, B., Palafox, J., & Valdés-Casillas, C. 2001. Immediate Options for Augmenting Water Flows to the Colorado River Delta in Mexico. May. 41 pp.

Cohen, M.J., Morrison, J.I., and Glenn, E. 1999. *Haven or Hazard: The Ecology and Future of the Salton Sea*. Oakland, CA: Pacific Institute.

Compean Jiménez, G., Baylon Grecco, O., Robles, H., & Aranda, E. (no date). *Federal Fishery Delegation in Baja California: Preliminary Study of the Fishery in Laguna Salada, Baja California*. <http://www.sci.sdsu.edu/salton/PrelStdFisheryLagunaSalada.html>.

Cossio Díaz, J.R. 1995. Constitutional framework for water regulation in Mexico. *Natural Resources Journal* 35: 489-499.

Dawson, T.E., and Ehleringer, J.R. 1991. Streamside trees that do not use stream water. *Nature* 350: 335-336.

deBuys, W. 1999. *Salt Dreams: Land & Water in Low-Down California*. Albuquerque: University of New Mexico Press. 307 pp.

- Dunne, T., and Leopold, L.B. 1978. *Water in Environmental Planning*. New York: WH Freeman and Company. 818 pp.
- Erie, L.J., French, O.F., Bucks, D.A., and Harris, K. 1982. Consumptive Use of Water by Major Crops in the Southwestern United States. Conservation Research Report No. 29, Agricultural Research Service. D.C.: U.S. Department of Agriculture.
- Fradkin, P. 1981. *A River No More: The Colorado River and the West*. New York: Alfred A. Knopf. 360 pp.
- Galindo-Bect, M.S., Glenn, E.P., Page, H.M., Fitzsimmons, K., Galindo-Bect, L.A., Hernandez-Ayon, J.M., Petty, R.L., Garcia-Hernandez, J., and Moore, D. 2000. Penaeid shrimp landings in the upper Gulf of California in relation to Colorado River freshwater discharge. *Fishery Bulletin* 98: 222-225.
- Getches, D. 1985. Competing demands for the Colorado River. *University of Colorado Law Review* 56: 413-479.
- Gleick, P.H. 1993. "About the data," in *Water in Crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources*, P.H. Gleick, (ed.), pp. 117-119. NY: Oxford University Press.
- Glenn, E.P., Felger, R.S., Burquez, A., and Turner, D.S. 1992. Cienega de Santa Clara: Endangered Wetland in the Colorado River Delta, Sonora, Mexico. *Natural Resources Journal* 32: 817-824 .
- Glenn, E., Lee, C., Felger, R., and Zengel, S. 1996. Effects of water management on the wetlands of the Colorado River delta, Mexico. *Conservation Biology* 10: 1175-1186.
- Glenn, E.P., Lee, C., Felger, R., and Zengel, S. 1996. Effects of Water Management on the Wetlands of the Colorado River Delta, Mexico. *Conservation Biology* 10: 1175-1186.
- Gottlieb, R., and FitzSimmons, M. 1991. *Thirst for Growth: Water Agencies as Hidden Government in California*. Tucson: University of Arizona Press.
- Hayes, D.L. 1991. The All-American Canal Lining Project: A Catalyst for Rational and Comprehensive Groundwater Management on the United States-Mexico Border. *Natural Resources Journal* 31: 803-827.
- Hely, A.G., & Peck, E.L. 1964. *Precipitation, Runoff and Water Loss in the Lower Colorado River-Salton Sea Area*. U.S. Geological Survey Professional Paper 486-B. Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office. 16 pp.
- Holburt, M.B. 1984. The 1983 High Flows on the Colorado River and Their Aftermath. *Water International* 9: 99-105.
- Hundley, N. 1966. *Dividing the Waters: A Century of Controversy between the United States and Mexico*. Los Angeles: University of California Press.
- Hundley, N. 1975. *Water and the West: The Colorado River Compact and the Politics of Water in the American West*. Los Angeles: University of California Press.
- Hundley, N. 1986 . "The West Against Itself: The Colorado River — an Institutional History." In *New Courses for the Colorado River*, G. Weatherford and F. Brown (eds.), pp. 9-49. Albuquerque: University of New Mexico Press.
- International Boundary and Water Commission (IBWC) (US Section). 2001. Draft Environmental Assessment: Implement International Agreement for Deliveries to Tijuana, Baja California of a Part of Mexico's Colorado River Water's Through the Southern California Aqueducts. Dated March 13. 83 pp.

- Jensen, M.E. 1995. Water Use Assessment of the Imperial Irrigation District, Final Report. Fort Collins, CA. Report to the United States Bureau of Reclamation, Boulder City, Nevada.
- Kelly, D.S. 1950. "A brief history of the Cocopa Indians of the Colorado River delta." In *For the Dean: Essays in Anthropology in honor of Byron Cummings*, E.K. Reed and D.S. King (eds.), pp. 159-170. Tucson: Hohokam Museums Assoc.
- Lavín, M.F., Beier, E., & Badan, A. 1997. Estructura hidrográfica y circulación del Golfo de California: Escalas estacional e interanual. In Lavín, M.F. (ed.), *Contribuciones a la Oceanografía Física en México*, pp. 41-171. Unión de Geofísica Mexicana. Monografía No. 3.
- Lavín, M.F., & Sánchez, S. 1999. On how the Colorado River affected the hydrography of the Upper Gulf of California. *Continental Shelf Research* 19: 1545-1560.
- Leopold, A. 1949. *A Sand County Almanac: With Other Essays on Conservation From Round River*. New York: Oxford University Press.
- Luecke, D.F., Pitt, J., Congdon, C., Glenn, E., Valdés-Casillas, C., and Briggs, M. 1999. *A Delta Once More: Restoring Riparian and Wetland Habitat in the Colorado River Delta*. D.C.: Environmental Defense Publications.
- Meko, D., Stockton, C.W., and Boggess, W.R. 1995. The Tree-Ring Record of Severe Sustained Drought. *Water Resources Bulletin* 31: 789-801.
- Minckley, W.L. 1991. Native Fishes of the Grand Canyon Region: An Obituary? In *Colorado River Ecology and Dam Management* (National Research Council, ed.). D.C.: National Academy Press.
- Morrison, J.I., Postel, S.L., and Gleick, P.H. 1996. *The Sustainable Use of Water in the Lower Colorado River Basin*. Oakland, California: Pacific Institute.
- Mumme, S.P. 1996. "Groundwater Management on the Mexico-United States Border." Report to the Commission on Environmental Cooperation, Montreal, Canada.
- Nathanson, M.N. 1980. *Updating the Hoover Dam Documents: 1978*. U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation. Denver: U.S. Government Printing Office.
- Newson, M. 1994. *Hydrology and the River Environment*. Oxford: Clarendon Press.
- O'Connor, J.E., Ely, L.L., Stevens, L.E., Melis, T.S., Kale, V.S., and Baker, V.R. 1994. A 4500-year record of large floods on the Colorado River in the Grand Canyon, Arizona. *Journal of Geology* 102: 1-9.
- Olmsted, F.H., Loeltz, O.J., and Irelan, B. 1973. *Geohydrology of the Yuma Area, Arizona and California*. U.S. Geological Survey Professional Paper 486-H.
- Owen-Joyce, S.J. 1987. *Estimates of Average Annual Tributary Inflow to the Lower Colorado River, Hoover Dam to Mexico*. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 87-4078.
- Owen-Joyce, S.J., and Raymond, L.H. 1996. *An Accounting System for Water and Consumptive Use Along the Colorado River, Hoover Dam to Mexico*. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2407.
- Owen-Joyce, S.J., Wilson, R.P., Carpenter, M.C., and Fink, J.B. 2000. *Method to Identify Wells that Yield Water that will be Replaced by Water from the Colorado River Downstream from Laguna Dam in Arizona and California*. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 00-4085. 31 pp., plus maps.

- Payne, J.M., Reid, F.A., and Carrera Gonzalez, E. (no date). "Feasibility Study for the Possible Enhancement of the Colorado Delta Wetlands: Baja California Norte, Mexico." Prepared by Ducks Unlimited. 31 pp., plus appendix.
- Reisner, Marc. 1993 (2nd ed). *Cadillac Desert: The American West and its Disappearing Water*. NY: Penguin Books.
- Stromberg, J.C. 1993. Frémont Cottonwood - Goodding Willow Riparian Forests: A Review of their Ecology, Threats, and Recovery Potential. *Journal of the Arizona-Nevada Academy of Science* 26: 97-110.
- Sykes, G. 1937. *The Colorado Delta*. Publication no. 460. Washington, DC: Carnegie Institution.
- Tarboton, D.G. 1995. Hydrologic scenarios for severe sustained drought in the southwestern United States. *Water Resources Bulletin* 31: 803-813.
- Thorson, J.E. 2000. Report of the Special Master. *In Re The General Adjudication of All Rights to Use Water In The Gila River System And Source*. Contested Case No. W1-203. In the Superior Court of the State of Arizona in and for the County Of Maricopa. June 30.
- Trava Manzanilla, J.L. 1991. El manejo de agua en México: Estados sección oeste. In *Manejo Ambientalmente adecuado del agua en la frontera México-Estados Unidos*, J.L. Trava Manzanilla, J. Román Calleros y F.A. Bernal Rodríguez (eds.), pp. 142-227. Tijuana: El Colegio de la Frontera Norte.
- Tufte, E.R. 1983. *The Visual Display of Quantitative Information*. Cheshire, Connecticut: Graphics Press. 197 pp.
- U.S. Bureau of Reclamation. 1995-1998. *Lower Colorado River Accounting System Demonstration of Technology Calendar Year 1995-1998*. Boulder City, Nevada: Lower Colorado Regional Office. March. 47 pp. plus attachments. [published annually].
- U.S. Department of Interior (DOI). 1974. *Salton Sea Project, California: Federal-State Feasibility Report*. April. 5 vols.
- U.S. Geological Survey. 1993. "Policy and Technical Guidance for Conversion of Sediment Concentration from Parts per Million (ppm) to Milligrams per Liter (mg/l)." U.S. Geological Survey Memorandum No. 93.21. Dated August 9. Posted at <http://water.usgs.gov/admin/memo/SW/sw93.21.html>
- Valdés-Casillas, C., Hinojosa-Huerta, O., Muñoz-Viveros, M., Zamora-Arroyo, F., Carrillo-Guerrero, Y., Delgado-García, S., López-Camacho, M., Glenn, E.P., García, J., Riley, J., Baumgartner, D., Briggs, M., Lee, C.T., Chavarría-Correa, E., Congdon, C., and Luecke, D. 1998. Information Database and Local Outreach Program for the Restoration of the Hardy River Wetlands, Lower Colorado River Delta, Baja California and Sonora, Mexico. Guaymas, Sonora, Mexico: Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM), Campus Guaymas.
- Wahl, R.W. 1989. *Markets for Federal Water: Subsidies, Property Rights, and the Bureau of Reclamation*. Washington, D.C.: Resources for the Future.
- Waller, T. 1992. Southern California Water Politics and U.S.-Mexican Relations: Lining the All-American Canal. *Journal of Borderlands Studies*. VII, No. 2. Fall.
- Ward, E. 1999. Two Rivers, Two Nations, One History: The Transformation of the Colorado River Delta since 1940. *Frontera Norte* 11: 113-140.

Zamora-Arroyo, F., Hinojosa-Huerta, O., Glenn, E., and Briggs, M. 2001. Vegetation trends in response to instream flows in the Colorado River Delta, Mexico. *Journal of Arid Environments*. (in press).