



UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales

Departamento de Geología

POLITICA Y MANEJO BILATERAL EN UN
ACUIFERO TRANSFRONTERIZO DE MEXICO:
“EL ACUIFERO SON-01 VALLE DE SAN LUIS
RIO COLORADO, SONORA, MEXICO”.

TESIS

Que para obtener el Grado de:
Maestro en Ciencias-Geología.



PRESENTA:

LUCAS ANTONIO OROZ RAMOS

Hermosillo, Sonora, Junio de 2007

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

CONTENIDO

Capitulo		Pag.
I	INTRODUCCIÓN	1
II.	ANTECEDENTES, OBJETIVOS Y ALCANCES	3
	II.1 ANTECEDENTES	3
	OBJETIVO GENERAL	4
	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
	ALCANCES	4
III.	PANORAMA GENERAL DE LOS ACUÍFEROS TRANSFRONTERIZOS	5
	III.1 ANTECEDENTES	5
	III.2 SAN DIEGO-TIJUANA (EUA-MEX)	5
	III.3 CUENCA BAJA DEL RÍO COLORADO (EUA-MEX)	6
	III.4 SONOYTA-PAPAGOS (MEX-EUA)	7
	III.5 NOGALES (MEX-EUA)	7
	III.6 SANTA CRUZ (MEX-EUA)	8
	III.7 SAN PEDRO (MEX-EUA)	8
	III.8 CONEJOS MEDANOS-BOLSON DE LA MESILLA (MEX-EUA)	9
	III.9 BOLSON DEL HUECO-VALLE DE JUAREZ (MEX-EUA)	10
	III.10 EDWARD TRINITY-EL BURRO (MEX-EUA)	11
	III.11 CUENCA BAJA DEL RÍO BRAVO / GRANDE (MEX-EUA)	12
	III.12 SOCONUSCO-SUCHIATE CUATAN (MEX -GUATEMALA)	14
	III.13 CHICOMUSELO-CUILCO SELEGUA (GUATEMALA-MEX)	15
	III.14 OCOSINGO-USUMACINTA-POCOM-IXCAN (GUATEMALA-MEX)	16
	III.15 MARQUÉZ DE CONCILLAS-CHIXOY/XACLBAL (MEX_ GUATEMALA)	17
	III.16 BOCA DEL CERRO-SAN PEDRO (GUATEMALA-MEX)	18
	III.17 TRINITARIA-NEWTON (GUATEMALA-MEX)	19
	III.18 PENÍNSULA DE YUCATÁN-CANDELARIO-HONDO (MEX-GUAT- BELICE)	19
IV.	EL PAPEL DEL U.S. DEPARTAMENTO DE AGRICULTURA EN EL VALLE DEL RÍO COLORADO	21

Capitulo	Pag.
V. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	26
V.1 LA CUENCA DEL RÍO COLORADO	26
V.2 HIDROGRAFÍA	28
V.3 CUENCA MEJORADA BACANORA	30
V.4 CLIMATOLOGÍA	32
V.5 PRECIPITACIÓN	34
V.6 TEMPERATURA	35
V.7 INFORMACION SOCIOECONÓMICA	36
V.8 DEMOGRAFÍA	36
V.9 GANADERÍA	37
V.10 PESCA	37
V.11 INDUSTRIA	38
V.12 TURISMO	38
VI. METODOLOGÍA DE TRABAJO	39
VI.1 ACTIVIDADES DE CAMPO	39
VI.2 ACTIVIDADES DE GABINETE	39
VII. Estudios Previos Analizados	40
VII.1 ESTUDIOS ANALIZADOS	40
VII.2 ANÁLISIS CRÍTICO DE ESTUDIOS PREVIOS	41
VIII. EL DESARROLLO DEL DISTRITO DE RIEGO 014	46
IX. MANEJO Y GESTIÓN DEL AGUA EN LA CUENCA	48
IX.1 EL PAPEL DE LA COMISIÓN INTERNACIONAL DE LÍMITES Y AGUA (CILA)	48
IX.2 LOS TRATADOS INTERNACIONALES	49
IX.3 MANEJO BINACIONAL DEL AGUA EN LA CUENCA	50

Capitulo

Pag.

X.	MODELO CONCEPTUAL DE FUNCIONAMIENTO HIDROGEOQUÍMICO	54
	X.1 HIDROGEOQUÍMICA	54
	X.2 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA	57
	X.3 DISTRIBUCIÓN DE PARÁMETROS FÍSICOS Y QUÍMICOS	57
	X.3.1. CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	57
	X.3.2. TEMPERATURA	60
	X.3.3. POTENCIAL DE HIDRÓGENO	60
	X.3.4. DUREZA TOTAL	61
	X.3.5. FLUORUROS	63
	X.3.6. CALCIO	64
	X.3.7. MAGNESIO	65
	X.3.8. SODIO	66
	X.3.9. CLORURO	68
	X.3.10 ALCALINIDAD	70
	X.3.11 NITRATOS	71
	X.4 CALIDAD DEL AGUA EN TÉRMINOS DE SALINIDAD	72
	X.5 CLASIFICACIÓN DE LAS FAMILIAS DE AGUA	74
	X.6 METALES	77
XI.	GEOLOGÍA, GEOFÍSICA Y MODELO CONCEPTUAL DE FUNCIONAMIENTO HIDRODINÁMICO, BALANCE Y DISPONIBILIDAD	79
	XI.1 GEOLOGÍA	80
	XI.1.1 GEOLOGÍA HISTÓRICA	80
	XI.1.2 GEOLOGÍA LOCAL	80
	XI.1.3 ESTATIGRAFÍA	82
	XI.1.4 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL	83

XI.2	GEOFÍSICA	84
XI.2.1	GEOLOGÍA DEL SUBSUELO	87
XI.2.2	CORRELACIÓN ESTATIGRÁFICA DE POZOS PROFUNDOS	87
XI.2.3	CORRELACIÓN ESTATIGRÁFICA DE POZOS SOMEROS	92
XI.3	EL MODELO CONCEPTUAL	97
XI.3.1	CENSO DE APROVECHAMIENTOS DE AGUA SUBTERRÁNEA	97
XI.3.2	VALLE DE SAN LUIS, MARGÉN IZQUIERDO DEL RÍO COLORADO	97
XI.3.3	MESA ARENOSA	98
XI.3.4	NIVELACIÓN DE BROCALES	98
XI.3.5	PIEZOMETRÍA	100
XI.3.5.1	NIVELES ESTÁTICOS	100
XI.3.5.2	PROFUNDIDAD DEL NIVEL ESTÁTICO 1985	102
XI.3.5.3	PROFUNDIDAD DEL NIVEL ESTÁTICO 1995	102
XI.3.5.4	PROFUNDIDAD DEL NIVEL ESTÁTICO 2005	102
XI.3.5.5	ELEVACIÓN DEL NIVEL ESTÁTICO 1985	107
XI.3.5.6	ELEVACIÓN DEL NIVEL ESTÁTICO 1995	107
XI.3.5.7	ELEVACIÓN DEL NIVEL ESTÁTICO 2005	107
XI.3.5.8	EVOLUCIÓN DEL NIVEL ESTÁTICO 1985 -1995	110
XI.3.5.9	EVOLUCIÓN DEL NIVEL ESTÁTICO 1995 - 2005	111
XI.3.6	HIDROMETRÍA	112
XI.3.7	HIDRÁULICA DE POZOS	116
XI.3.8	MODELO CONCEPTUAL	119
XI.3.9	BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	121
XI.3.10	ECUACIÓN GENERAL DE BALANCE	127
XI.3.10.1	ENTRADAS HORIZONTALES POR FLUJO SUBTERRÁNEO	127
XI.3.10.2	LLUVIA Y EVAPOTRANSPIRACIÓN METEÓRICA	130
XI.3.10.3	INFILTRACIÓN POR PRECIPITACIÓN	132
XI.3.10.4	INFILTRACIÓN EN CAUCES DE ARROYOS O CANALES	132

	XI.3.10.5 INFILTRACIÓN POR RIEGO	133
	XI.3.10.6 EXTRACCIÓN POR BOMBEO	134
	XI.3.10.7 SALIDAS POR EVAPOTRANSPIRACIÓN	134
	XI.3.10.8 SALIDAS HORIZONTALES POR FLUJO SUBTERRÁNEO	138
	XI.3.10.9 BALANCE DE AGUA SUBTERRÁNEA Y DISPONIBILIDAD	138
	XI.3.10.10 DISPONIBILIDAD DE AGUAS NACIONALES	140
	XI.3.10.11 USOS DEL AGUA	141
XII.	PRODUCTIVIDAD Y DEMANDA DEL AGUA EN LA ZONA DE ESTUDIO	144
XIII.	ASPECTOS DE INEQUIDAD EN LA ZONA DE ESTUDIO	146
	XIII.1 MÉXICO – ESTADOS UNIDOS	147
	XIII.2 SONORA – BAJA CALIFORNIA	148
XIV.	SALINIDAD	151
	XIV.1 SALINIDAD EN AGUAS SUPERFICIALES	151
	XIV.2 SALINIDAD EN AGUAS SUBTERRÁNEAS	153
	XIV.3 SALINIDAD EN SUELOS	153
XV.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	155
	XV.1 CONCLUSIONES	155
	XV.2 RECOMENDACIONES	158
XVI.	BIBLIOGRAFÍA	161

INDICE DE TABLAS

TABLA	PAG.
1. EVOLUCIÓN DE LA POBLACIÓN EN LA ZONA DE ESTUDIO	36
2. SUPERFICIE AGRÍCOLA EN LA ZONA DE ESTUDIO	37
3. INVENTARIO GANADERO EN LA ZONA DE ESTUDIO	37
4. ESTUDIOS PREVIOS ANALIZADOS	41
5. PARÁMETROS FÍSICOS DE CAMPO	56
6. CRITERIOS DE CLASIFICACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA	58
7. ESQUEMA DE CLASIFICACIÓN DE FREEZE Y CHERRY	72
8. LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA DIFERENTES ELEMENTOS	78
9. PARÁMETROS HIDRÁULICOS PRUEBAS DE BOMBEO UNISON	117
10. PARÁMETROS HIDRÁULICOS PRUEBAS DE BOMBEO ARIEL	117
11. CELDAS DE ENTRADA DE AGUA SUBTERRÁNEA	128
12. VOLÚMENES DE PÉRDIDA DEL ACUÍFERO POR EVAPOTRANSPIRACIÓN	137
13. CÁLCULO DE LAS SALIDAS HORIZONTALES SUBTERRÁNEAS	137
14. VOLÚMENES APROVECHADOS SEGÚN TIPO DE FUENTE	141
15. VOLÚMENES ASIGNADOS Y POBLACIÓN BENEFICIADA	142
16. VOLÚMENES POR USO, CICLO AGRÍCOLA 2004-2005	143
17. EVOLUCIÓN DE LOS VOLÚMENES PARA USO URBANO	143
18. EVOLUCIÓN DE LA PRODUCCIÓN AGRÍCOLA, 1993-2004	145
19. EVOLUCIÓN DE LA SALINIDAD DE SUELOS DEL VALLE DE MEXICALI	154

INDICE DE FIGURAS

FIGURA	PAG.
1. ACUÍFEROS TRANSFRONTERIZOS MÉXICO-ESTADOS UNIDOS	5
2. ACUÍFEROS TRANSFRONTERIZOS MÉXICO-GUATEMALA	13
3. ACUÍFEROS TRANSFRONTERIZOS MÉXICO-BELICE	14
4. SUELOS SALINOS EN LA CUENCA DEL RÍO COLORADO	21
5. LOCALIZACIÓN DE LAS COSTAS DEL COLORADO	22
6. DAÑOS ANUALES POR SALINIDAD	23
7. PRINCIPALES FUENTES DE SALINIDAD	23
8. SALINIDAD POR ACTIVIDAD AGRÍCOLA	24
9. LA CUENCA DEL RÍO COLORADO	27
10. LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	29
11. HIDROGRAFIA DEL AREA DE ESTUDIO	31
12. LOCALIZACIÓN DE LA PRESA MORELOS	32
13. CLIMAS QUE SE PRESENTAN EN LA ZONA DE ESTUDIO	33
14. PRECIPITACIÓN TOTAL ANUAL EN LA ZONA DE ESTUDIO	34
15. TEMPERATURA MEDIA ANUAL EN LA ZONA DE ESTUDIO	35
16. PRECIPITACIÓN EFECTIVA EN LA ZONA DE ESTUDIO	36
17. PUNTOS DE ENTREGA DE AGUA A MÉXICO	52
18. VOLÚMENES ENTREGADOS A MEXICO POR CILA AL DR 014	53
19. APROVECHAMIENTOS MUESTREADOS EN EL ACUÍFERO SLRC	55
20. CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	59
21. TEMPERATURA	60
22. POTENCIAL HIDRÓGENO (PH)	61
23. CONCENTRACIÓN DE DUREZA TOTAL	62
24. CURVAS DE ISOVALORES DE DUREZA	62
25. CURVAS DE ISOVALORES DE FLUORUROS	63
26. CURVAS DE ISOVALORES DUREZA CÁLCICA	64
27. CURVAS DE ISOVALORES DE MAGNESIO	65
28. CONCENTRACIÓN SODIO	66

FIGURA	PAG.
29. ISODISTRIBUCIÓN DE SODIO	67
30. ISOISTRIBUCIÓN DE POTASIO	68
31.- CONCENTRACIÓN DE CLORUROS	69
32. DISTRIBUCIÓN DE CLORUROS	69
33. DISTRIBUCIÓN DE ALCALINIDAD	70
34. DISTRIBUCIÓN DE SULFATOS	71
35. CONCENTRACIÓN NITRATOS	72
36. CONCENTRACIÓN SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES	73
37. DISTRIBUCIÓN SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES	74
38. PORCENTAJES FAMILIAS DE AGUAS	75
39. FAMILIAS DE AGUAS PIPER	75
40. FAMILIAS DE AGUAS STIFF	76
41. GEOLOGÍA EN EL ÁREA DE ESTUDIO	81
42. LOCALIZACIÓN DE CORTES LITOLÓGICOS Y SECCIONES SÍSMICAS	85
43. MAPA DE ANOMALÍAS DE BOUGUER	86
44 MAPA AEROMAGNÉTICO	86
45. POZOS PROFUNDOS EN EL ÁREA DE ESTUDIO	90
46. CORRELACIÓN ESTATIGRÁFICA DE LOS POZOS PROFUNDOS	91
47. MAPA DE LOCALIZACIÓN DE SECCIONES ESTATIGRÁFICAS	92
48. SECCIÓN ESTATIGRÁFICA 1, ORIENTADA NW-SE MESA ARENOSA	93
49. SECCIÓN ESTATIGRÁFICA 2, ORIENTADA NE-SE MESA ARENOSA	94
50. SECCIÓN ESTATIGRÁFICA 3, ORIENTADA WE / SW-NE MESA ARENOSA	95
51. SECCIÓN ESTATIGRÁFICA 4, ORIENTADA NW-SE MESA ARENOSA	95
52. SECCIÓN ESTATIGRÁFICA 5, ORIENTADA N-S MESA ARENOSA	96
53. SECCIÓN ESTATIGRÁFICA 6, ORIENTADA NE-SW MESA ARENOSA	96
54. LOCALIZACIÓN DE LOS APROVECHAMIENTOS CENSADOS	99
55. LOCALIZACIÓN BROCALES NIVELADOS	101
56. PROFUNDIDAD DEL NIVEL ESTÁTICO 1985	103
57. PROFUNDIDAD DEL NIVEL ESTÁTICO 1995	104
58. PROFUNDIDAD DEL NIVEL ESTÁTICO 2005	105

FIGURA	PAG.
59. ELEVACIÓN DEL NIVEL ESTÁTICO 1985	107
60. ELEVACIÓN DEL NIVEL ESTÁTICO 1995	108
61. ELEVACIÓN DEL NIVEL ESTÁTICO 2005	109
62. EVOLUCIÓN DEL NIVEL ESTÁTICO 1985-1995	110
63. EVOLUCIÓN DEL NIVEL ESTÁTICO 1995-2005	111
64. ELEVACIÓN DEL NIVEL ESTÁTICO 2005 3ERA DIMENSIÓN	112
65. USO DE LOS APROVECHAMIENTOS	113
66. VOLUMEN EXTRAÍDO POR USO	113
67. TIPO DE EXTRACCIÓN EN LOS APROVECHAMIENTOS	114
68. DESCARGA DE APROVECHAMIENTOS EN LITROS POR SEGUNDO	114
69. PROFUNDIDAD TOTAL DE APROVECHAMIENTOS	115
70. VOLUMEN DE EXTRACCIÓN POR BOMBEO EN BATERÍA DE POZOS FEDERALES	116
71. LOCALIZACIÓN PRUEBAS DE BOMBEO	118
72. MODELO CONCEPTUAL HIDROGEOLÓGICO DEL ACUÍFERO	120
73. COMPONENTES FLUJO EN UN ACUÍFERO LIBRE	124
74. DIAGRAMA DE FLUJO DE BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	126
75. CELDAS DE ENTRADA Y SALIDA DE FLUJOS DE AGUA SUBTERRÁNEA	129
76. AREAS DE PRECIPITACIÓN EN EL ACUÍFERO	130
77. AREAS DE EVAPORACIÓN EN EL ACUÍFERO	131
78. RELACIÓN ENTRE NIVEL ESTÁTICO Y PORCENTAJE DE ETR	135
79. AREAS CON PROFUNDIDADES DE NIVEL FREÁTICO MENORES A 10 METROS	136
80. ZONAS DEL ACUÍFERO Y FLUJOS DE RECARGA EN EL DTO. DE RIEGO 014	140
81. PRODUCCIÓN AGRÍCOLA GLOBAL EN LA ZONA DE ESTUDIO	145
82. MÓDULOS DE RIEGO 1, 2 Y 3, MARGEN IZQUIERDA DEL RÍO COLORADO	149

I

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, los conflictos por el recurso hídrico son cada vez más frecuentes, tales conflictos no solamente se relacionan con el tema de la escasez, sino que implican también aspectos de calidad, acceso, distribución, infraestructura y política normativa.

Una cuenca hidrológica es un espacio multidimensional en el que convergen múltiples intereses (sociales, económicos, políticos, culturales, ambientales), y en el que como en cualquier otro escenario social las acciones de un actor repercuten en las de todos los demás, de ahí la importancia de diseñar mecanismos de gestión integrada de los recursos de la cuenca, en los que puedan coordinarse las diversas actividades.

Si en una cuenca hidrológica estatal es difícil manejar los recursos, en una cuenca transfronteriza la gestión se vuelve mas complicada, ya que el agua que se utiliza, se comparte de dos maneras, como siempre entre sus diferentes usuarios (agricultura, público-urbano, pecuario, industrial, medio ambiente, etc.), pero además entre diferentes usuarios de regiones administrativas o países que comparten una misma cuenca o acuífero.

Todo caudal de agua que utilizan muchas regiones bajas, en ciudades, estados y países depende de los usuarios de las partes altas. En contraparte ciertos países o usuarios pueden verse obligados a satisfacer las exigencias de países situados aguas abajo.

Una gestión equitativa y sostenible del agua común requiere de instituciones flexibles y acciones holísticas, capaces de responder a variaciones hidrológicas, cambios socioeconómicos, valores de la sociedad y, especialmente en el caso de cursos de agua internacionales, a los cambios de régimen político. Este tipo de situación puede manejarse a través de lo que se denomina la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos, integración que puede efectuarse de dos formas; en función del sistema natural y en función del sistema humano.

La integración debe producirse teniendo en cuenta la variabilidad en el espacio y en el tiempo. Queda entendido que para la gestión integrada de los recursos hídricos, la unidad de base es la cuenca, allí donde las aguas superficiales y las subterráneas se unen de modo confuso entre sí y en relación con la utilización y gestión de la tierra.

A nivel mundial existen 261 cuencas internacionales y 145 naciones poseen territorios en cuencas compartidas. Aunque sus límites rara vez coinciden con los límites administrativos existentes, se progresa gracias a una legislación e instituciones apropiadas. A pesar del potencial conflictivo, la experiencia sugiere que en las cuencas compartidas prevalece la cooperación para la solución de conflictos.

En los últimos cincuenta años se han firmado 200 tratados relativos a los distintos cursos fluviales internacionales (excluyendo el tema de la navegación). Estos acuerdos siguen siendo imperfectos por los siguientes motivos:

1. Falta de medidas relativas a la repartición de los recursos acuáticos;
2. Especificaciones insuficientes sobre la calidad del agua;
3. Falta de dispositivos para el control, aplicación y resolución de conflictos, y
4. No inclusión de todos los países ribereños.

En lo que respecta a la gestión de los acuíferos transfronterizos, el avance es insuficiente, a pesar del volumen masivo de agua de que se trata, a menudo de excelente calidad (volumen estimado en 23 400 000 km³ frente a los 42 800 km³ de los ríos). La falta de voluntad internacional y de financiamiento para recoger la información necesaria frena la evaluación de los recursos hídricos subterráneos.

Para obtener el presente documento se recopiló y analizó la información disponible en materia de uso o aprovechamiento del recurso hídrico en la cuenca transfronteriza del Río Colorado, entre los Estados Unidos y los Estados Unidos Mexicanos, en especial tomando énfasis en los tratados internacionales firmados por ambos países.

II ANTECEDENTES, OBJETIVOS Y ALCANCES

II.1 ANTECEDENTES

Desde hace varios años el Río Colorado dejó de llegar al mar. El flujo del río ha venido incrementando su regulación con diversas presas en las zonas superiores (río arriba), lo que ocasiona una desviación de un 90% del flujo de agua dulce, que es empleada en la agricultura y el consumo doméstico en diversas ciudades de Arizona, Nevada y sur de California. Mediante un tratado internacional a México le pertenece aproximadamente el 10% restante del caudal anual.

El uso del agua en territorio mexicano es para irrigación y consumo doméstico en los Estados de Sonora y Baja California. Desde 1960, poca agua dulce ha sido vertida en el Golfo de California, exceptuando algunos años inusualmente húmedos. Esta disminución del flujo en la parte baja de la cuenca o delta del Río Colorado, se ha maximizado por las condiciones de escasez o sequía de la región, han motivado que en los últimos años se presenten una serie de conflictos por la política de distribución y gestión del agua.

Ante esta situación, productores agrícola de la región consideran que la solución a la problemática descrita es de competencia federal, donde la Comisión Nacional del Agua debe intervenir, por ser la entidad del país que signó los acuerdos internacionales con Estados Unidos, en lo que se establece el mecanismo de distribución del vital líquido en la zona de Baja California y San Luis Río Colorado.

De esta manera, para el análisis de la problemática descrita desde un enfoque de la gestión integrada de los recursos hídricos, es necesario partir de la siguiente hipótesis:

“¿EXISTE INEQUIDAD EN LA DISTRIBUCIÓN DEL AGUA EN EL DELTA DEL RÍO COLORADO?”

La situación debe considerarse no solamente desde el enfoque de calidad y de escasez, sino que se deben incluir los efectos ocasionados por el desequilibrio de los ecosistemas, principalmente por la pérdida de flujo debido a las obras de captación aguas arriba, ya que este es insuficiente para satisfacer las necesidades de los humedales y cuerpos costeros al final de la cuenca en territorio mexicano.

Por otra parte, las prácticas agrícolas inadecuadas que se siguen sobre todo en la zona de estudio del Distrito de Riego 014 Mexicali- San Luis Río Colorado, representan por otra parte una fuente potencial de contaminación de los acuíferos, debido a la infiltración de las aguas de retorno agrícola que contienen concentraciones inadecuadas de agroquímicos y pesticidas, que elevan la salinidad de suelos y agua.

OBJETIVO GENERAL

Integrar y analizar la información disponible en materia de manejo y gestión del recurso hídrico en la cuenca transfronteriza del Río Colorado, con objeto de determinar si existe una condición de inequidad en la distribución del agua y en su caso, establecer propuestas para su gestión.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Recopilar información de estudios y proyectos en la zona de estudio.
- Determinar los volúmenes de extracción de aguas subterráneas para los diferentes usos, así como cuantificar la magnitud de los componentes de la recarga natural, inducida y artificial.
- Analizar la variación histórica de los escurrimientos y de la calidad del agua superficial y subterránea en tiempo y espacio, valorar los problemas ambientales ocasionados y proponer alternativas de solución.
- Revisar los valores de los parámetros físicos e hidráulicos regionales que rigen el movimiento del agua en el subsuelo, como son: conductividad hidráulica, espesor del acuífero, transmisividad y coeficiente de almacenamiento, que describan satisfactoriamente el comportamiento histórico y actual del uso del recurso subterráneo.
- Analizar la hidrodinámica del flujo subterráneo del acuífero de San Luis Río Colorado para definir el potencial hídrico
- Evaluar el estado actual de explotación de las aguas subterráneas.

ALCANCES

El área de estudio comprende principalmente el área acuífera de San Luis Río Colorado (Mesa Arenosa), ya que es la fuente sobre la que sustentan las actividades productivas de la región, dentro del municipio de San Luis Río Colorado, Sonora, México.

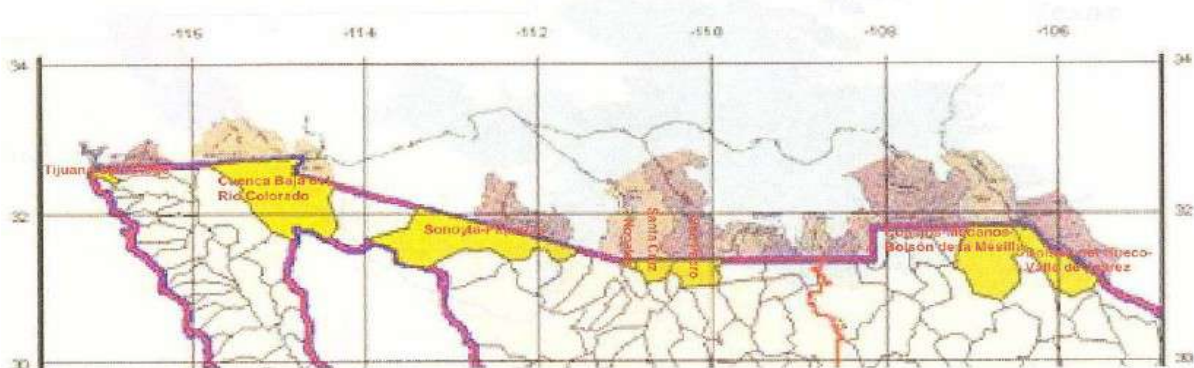
III PANORAMA DE LOS ACUIFEROS TRANSFRONTERIZOS

MEXICO – ESTADOS UNIDOS,
MEXICO – GUATEMALA
MEXICO – GUATEMALA - BELICE

III.1 Antecedentes.

En las zonas fronterizas internacionales, es cada vez es más común que se generen serios conflictos por la distribución de los recursos hídricos de las cuencas o acuíferos que son compartidos por dos o más países. Figura. 1

Figura 1. Acuíferos transfronterizos México-Estados Unidos



III.2 ACUIFERO SAN DIEGO – TIJUANA (EUA – MEXICO)

El sistema acuífero se localiza en la porción sur del estado de California en los EUA y en la porción norte del estado de Baja California en México.

En esta región el clima es seco y la agricultura es la actividad principal. La demanda de agua entre la población es alta en ambos países, concentrándose en las ciudades de San Diego en los EUA y Tijuana en México.

El acuífero está conformado por materiales aluviales en los valles y por conglomerados en las terrazas y lomeríos adyacentes. Su extensión superficial es reducida y su espesor en territorio mexicano es de unos 300 m, en la planicie de San Diego su espesor es menor. A México le corresponde la parte “aguas arriba” del sistema. La extracción de agua subterránea es mayor en territorio mexicano, aunque disminuyó al incrementarse la importación de agua desde la cuenca del Río Colorado para el abastecimiento de Tijuana. La salinidad del agua subterránea aumenta con la profundidad en territorio mexicano; en la planicie costera de San Diego se registra la presencia de intrusión de agua marina en la faja costera.

El crecimiento urbano de Tijuana ha originado una contaminación creciente del acuífero y el ascenso de los niveles freáticos provocado por las fugas en las redes hidráulicas. El sistema es importante para el desarrollo urbano en ambos países, aunque se tiende a incrementar la importación de agua. El impacto transfronterizo actual o potencial está relacionado con la calidad del agua que cruza la frontera internacional de México-EUA, por el riesgo de contaminación asociado con la descarga de las aguas subterráneas de Tijuana.

III.3 ACUIFERO CUENCA BAJA DEL RIO COLORADO (EUA – MEXICO)

El Sistema Acuífero Transfronterizo Cuenca Baja del Río Colorado se localiza en la porción sur de los estados de California y Arizona en los EUA y en la porción norte de los estados de Baja California y Sonora en México.

El clima es seco, con precipitación pluvial menor que 200 mm/a y evaporación potencial mayor que 2 000 mm/a. La densidad de población es baja, y la actividad principal en ambos países es la agricultura.

El acuífero está constituido por clásticos no consolidados depositados en el delta del río Colorado y en la fosa del Saltón; en la porción mexicana tiene gran extensión y espesor de varios cientos de metros. Aunque la recarga natural es muy escasa, el riego de una gran superficie con agua derivada del río Colorado ha generado una cuantiosa recarga incidental, por filtración en canales y retorno de excedentes de riego en terrenos de gran capacidad de infiltración. La extracción de agua subterránea es mayor en territorio mexicano (900 hm³/a). La salinidad del agua subterránea se ha incrementado por el lavado de suelos agrícolas y la infiltración de aguas del drenaje agrícola (1 000 - 2 400 ppm) y se ha identificado contaminación difusa originada por las prácticas agrícolas.

El sistema ha sido estudiado en ambos países por instituciones oficiales y académicas, por lo que se dispone de amplia información respecto a su recarga, descarga, extracción, funcionamiento hidrodinámico y calidad de agua subterránea, así como de modelos de simulación.

El sistema reviste gran importancia para el desarrollo agrícola, especialmente en territorio mexicano. El riesgo de impacto transfronterizo es muy serio, porque una fracción importante de la recarga de la porción mexicana del sistema procede de los EUA; de hecho hay obras en proyecto que reducirán significativamente la alimentación subterránea que recibe México, por lo que se están contemplando medidas de mitigación y hay enérgica oposición social en ambos países por parte de grupos ecologistas.

El tema es objeto de negociación en el seno de la Comisión Internacional de Límites y Aguas entre México y los EUA desde hace más de 20 años. A pesar de ello, puede convertirse en asunto de litigio internacional.

III.4 ACUIFERO SONOYTA – PAPAGOS (MEXICO - EUA)

El Sistema Acuífero Transfronterizo Sonoyta-Pápagos está ubicado en la porción norte del estado de Sonora en México y en la porción sur del estado de Arizona en los EUA. La densidad de población es baja en ambos países, y la agricultura es la actividad principal. En territorio de EUA existe una reservación india. El clima de la región es seco.

El acuífero está formado por materiales aluviales. Su extensión superficial es reducida; su espesor es de varias decenas a más de 200 m. La porción “aguas arriba” corresponde a EUA. La extracción de agua subterránea es mas importante en territorio mexicano, el uso principal del agua es agrícola. La calidad del agua varía en la zona, siendo común la presencia de agua salobre debido a la aridez de la región.

El sistema es importante para la población de la Reserva de los indios Pápagos en territorio de EUA y para la población rural en México. El incremento en la extracción del agua en EUA implicaría una reducción de la alimentación que recibe la porción mexicana del sistema.

III.5 ACUIFERO NOGALES (MEXICO – EUA)

El sistema Acuífero Transfronterizo está ubicado en la porción norte del estado de Sonora en México y en la porción Sur del estado de Arizona en los EUA. La población está concentrada en las ciudades gemelas de Nogales; las actividades principales son la agricultura y la industria. El clima es seco, con precipitación menor que 300 mm/a y evaporación mayor que 2000 mm/a.

El acuífero, constituido por materiales aluviales y rocas fisuradas, es de reducida extensión, poco espesor y permeabilidad media. La recarga es pobre debido a la aridez de la región, en su mayor parte es generada en territorio mexicano. El agua subterránea circula de México a EUA a través de la faja estrecha del arroyo Nogales, estimándose el caudal de flujo en $2 \text{ hm}^3/\text{a}$. La calidad natural del agua es aceptable, aunque se ha identificado contaminación de origen industrial en territorio mexicano.

El sistema es importante para el desarrollo urbano e industrial. El impacto transfronterizo está más relacionado con la calidad que con la cantidad: la contaminación del acuífero, generada en México, puede propagarse a EUA y afectar la calidad del agua captada por los pozos municipales de Nogales en Arizona. Además, el incremento de la extracción en la porción mexicana puede interceptar el caudal de flujo subterráneo que pasa a través de la frontera internacional, de México a EUA.

III.6 ACUIFERO SANTA CRUZ (MEXICO – EUA)

El sistema acuífero se localiza en la parte norte del estado de Sonora en México y en la parte sur de Arizona en los EUA. La población está concentrada en la parte estadounidense y en su mayor parte esta dedicada a la agricultura, en territorio mexicano la densidad de población es baja y el desarrollo incipiente. El clima regional es seco, con precipitación menor que 300 mm/a y evaporación potencial mayor que 2 000 mm.

El acuífero está constituido por materiales aluviales, conglomerados y rocas volcánicas fisuradas, su extensión superficial y espesor son reducidos y su transmisividad es media. La recarga es poco cuantiosa y en parte es originada en territorio Mexicano al que le corresponde la parte “aguas arriba” del sistema. La dirección principal del flujo subterráneo es de sur a norte, de México a EUA; el caudal de flujo se estima en 1,7 hm³/a. La calidad natural del agua subterránea es buena y no se han identificado focos importantes de contaminación.

El sistema es importante para el desarrollo agrícola en EUA y para el desarrollo urbano en México. En territorio mexicano hay una creciente exportación de agua subterránea del valle de Santa Cruz para el abastecimiento de la población de Nogales en territorio de EUA; hay un campo de pozos que suministra agua a la población de Nogales en Arizona. El incremento de la extracción de agua subterránea en la porción mexicana puede reducir y aún anular el caudal de flujo que pasa de México a EUA.

III.7 ACUIFERO SAN PEDRO (EUA – MEXICO)

El Sistema Acuífero Transfronterizo San Pedro se localiza en la porción Norte del estado de Sonora en México y en la porción Sur del estado de Arizona en los EUA. La densidad en ambas porciones de población es baja. El clima regional es seco, con precipitación menor que 300 mm/a y evaporación mayor que 2 000 mm/a. La agricultura es la actividad principal en ambos países; en México hay un desarrollo industrial importante en la cabecera del sistema.

El acuífero está constituido por materiales aluviales en los valles y por conglomerados en las lomeríos adyacentes. Su extensión superficial y espesor son reducidos, su transmisividad es media a baja. La recarga es poco cuantiosa debido a la aridez de la región.

La porción “aguas arriba” corresponde a México. La extracción de agua subterránea esta ampliamente distribuida en ambos países. La dirección principal del flujo subterráneo es de México a EUA; se estima que el caudal del flujo que pasa a través de la frontera internacional es de unos 2 hm³/a.

La calidad natural del agua subterránea es aceptable, aunque se ha registrado un riesgo de contaminación derivado de la descarga de aguas residuales de una empresa minera asentada en la cabecera del sistema. Por otra parte, el incremento de la extracción en territorio mexicano implicaría una reducción de la recarga subterránea que recibe la porción estadounidense del sistema.

III.8 ACUIFERO CONEJOS MEDANOS-BOLSON DE LA MESILLA (MEXICO – EUA)

El Sistema Acuífero Transfronterizo se extiende en el estado de Chihuahua (México) y en el estado de Texas (EUA), en una región muy árida: la precipitación pluvial media es menor que 100 mm/a y la evaporación potencial mayor que 2 000 mm/a. Su desarrollo es incipiente en México y poco significativa en EUA; sin embargo, en el futuro próximo revestirá importancia creciente, conforme aumente la presión de la demanda de agua en las ciudades de Juárez y El Paso, ubicadas en el colindante Bolsón del Hueco.

El acuífero forma parte de las cuencas cerradas de la porción occidental de Texas y de la porción norte de México. Está constituido por materiales aluviales y depósitos de bolsón, cuyo espesor es de varios cientos de metros y mayor que 1 000 m en ambos países; su extensión superficial es de unos 10 000 km². Es de tipo “libre”, de permeabilidad media a baja y gran capacidad de almacenamiento. El agua que contiene es dulce (<1 000 ppm) en su tramo superior, de unos 100 m; su salinidad aumenta con la profundidad, y en algunas áreas contiene elementos químicos (As, Fe, Mn) disueltos en concentraciones mayores que las permisibles para el consumo humano.

En territorio de EUA se captan de este acuífero unos 65 Mm³/a para usos doméstico, industrial y agrícola; en territorio mexicano la extracción de agua es apenas de unos 2 hm³/a para uso doméstico y pecuario, aunque se está contemplando un proyecto para suministrar agua de este acuífero a Ciudad Juárez a mediano plazo.

No se ha determinado la recarga de este acuífero, pero debido a la escasa precipitación pluvial y a la intensa evaporación potencial, se supone de muy reducida magnitud; sin embargo, su cuantiosa reserva almacenada permitiría captar importantes volúmenes de agua por muchos años.

En su estado actual, casi natural, un reducido caudal de agua subterránea pasa de México a los EUA y descarga al cauce del río Bravo/Grande. Hasta ahora, la escasez natural de agua ha limitado el desarrollo de esta cuenca. Sin embargo, este acuífero representa una importante reserva de agua para cubrir demandas futuras en el propio bolsón o para transferir agua al colindante Bolsón de El Hueco, donde el desarrollo es de mucha mayor importancia y la oferta adicional de agua es muy limitada.

Por lo mismo, se está considerando un proyecto para recargar artificialmente el agua residual municipal de Ciudad Juárez en la porción mexicana del Bolsón de La Mesilla, con el fin de aumentar la renovación del acuífero y sostener un sistema de tratamiento, recarga y reuso, similar al que ya existe en el Bolsón del Hueco.

Hasta ahora no se han provocado efectos transfronterizos, porque los aprovechamientos en territorio de EUA están muy retirados de la frontera internacional y la captación en la porción fronteriza mexicana es prácticamente nula.

A futuro, sin embargo, tendrán que realizarse estudios y celebrarse acuerdos binacionales, con el objetivo de elaborar conjuntamente una estrategia para explotar la reserva casi no renovable de este acuífero sin generar impactos perjudiciales en el país vecino.

III.9 ACUIFERO BOLSON DEL HUECO - VALLE DE JUAREZ (MEXICO – EUA)

Se extiende en el estado de Chihuahua (México) y en el estado de Texas (EUA). Tiene gran importancia, dado que se trata de una región con precipitación pluvial menor que 200 mm/a y evaporación potencial mayor que 2 000 mm/a. En México, es la principal fuente que abastece a Ciudad Juárez y al distrito de riego del Valle de Juárez; la fuente complementaria es el río Bravo/Grande; en los EUA, la fuente principal que suministra agua a la ciudad de El Paso y a la zona de riego del Bolsón del Hueco es el río Bravo/Grande, mientras que el acuífero es la fuente complementaria.

El acuífero forma parte de las cuencas cerradas de la porción occidental de Texas y de la porción norte de México. Está constituido por materiales aluviales y depósitos de bolsón, cuyo espesor es de varios cientos de metros en México y más de 1 000 m en territorio de los EUA; su extensión superficial es de unos 8 000 km², correspondiendo un 80% a EUA. Es de tipo “libre”, de permeabilidad media a baja y gran capacidad de almacenamiento. Contiene agua dulce (< 1 000 ppm) en su tramo superior, especialmente en la faja fluvial del río Bravo/Grande; agua salobre en su tramo intermedio, y agua salada en su tramo profundo.

En su estado natural, estaba hidráulicamente conectado al río Bravo/Grande, al que descargaba por ambas márgenes, por lo que no había circulación subterránea a través de la frontera; al incrementarse la explotación del acuífero en ambos países, se abatieron los niveles del agua subterránea y el acuífero se desconectó del río, que ahora le alimenta por infiltración a lo largo del cauce. La extracción de agua subterránea es del orden de 310 hm³/a, volumen que representa el mayor porcentaje respecto a su contraparte en los EUA.

La concentración de pozos en las zonas urbanas colindantes de Ciudad Juárez y de El Paso, ha generado una gran depresión de los niveles del agua subterránea en la porción sur occidental del bolsón, donde se han provocado

abatimientos de varias decenas de metros en los últimos 30 años; la concentración de pozos es también importante en el distrito de riego del valle de Juárez, donde se capta un volumen importante de agua subterránea con fines agrícolas. El abatimiento de los niveles de agua subterránea ha inducido la migración ascendente del agua salobre o salada hacia las porciones someras que contienen agua dulce; este mecanismo y la contaminación derivada de la infiltración de aguas residuales municipales y excedentes de riego, han dado lugar a un deterioro gradual de la calidad del agua.

En México, el crecimiento demográfico urbano concentrado en Ciudad Juárez, ha motivado una transferencia gradual de agua del sector agrícola al público urbano. En EUA, el crecimiento de la demanda de agua de la ciudad de El Paso y la limitada oferta de las fuentes de suministro, ha dado lugar al desarrollo de un sistema de tratamiento-recarga-reuso: las aguas residuales municipales de la ciudad de El Paso son conducidas a una planta de tratamiento de nivel terciario, inyectadas mediante pozos al subsuelo donde reciben un tratamiento natural y recuperadas aguas abajo para servir las nuevamente a la ciudad.

La concentración del bombeo de pozos ha generado impactos transfronterizos: en ambos lados de la frontera, principalmente el abatimiento de los niveles del agua y la interferencia de los pozos municipales concentrados en las zonas urbanas mayores y la salinización gradual del agua.

Debido a la importancia de este acuífero, desde hace varias décadas se han llevado a cabo el intercambio de información entre ambos países y un estudio binacional encaminado a formular conjuntamente estrategias de manejo.

III.10 ACUIFERO EDWARDS TRINITY - EL BURRO (MEXICO – EUA)

El Sistema Acuífero Transfronterizo Edwards Trinity- El Burro se extiende en la porción norte del estado de Coahuila (México) y en la porción sur del estado de Texas (EUA), en una región árida: la precipitación pluvial media es menor que 300 mm/a y la evaporación potencial mayor que 2 000 mm/a. En territorio de EUA el acuífero es la principal fuente de abastecimiento de la ciudad de Austin y de otras localidades menores.

El acuífero está constituido por rocas calizas de alta permeabilidad secundaria; su extensión superficial en territorio de EUA es de unos 70 000 km². En amplias áreas de EUA aflora originando caudalosos manantiales y alimentando a pozos de alta producción; en territorio mexicano subyace a una importante secuencia de rocas sedimentarias marinas y continentales poco permeables. La calidad del agua que contiene varía en el área, entre agua dulce en las áreas donde aflora o se encuentra cerca de la superficie del terreno, y agua salobre o salada en las porciones profundas del acuífero, dependiendo de la composición de las rocas acuíferos y del tiempo de estancia del agua en el subsuelo.

En México, las rocas que constituyen este acuífero afloran en la Serranía de El Burro, donde el acuífero descarga parcialmente a través de caudalosos manantiales, cuyas aguas sustentan unidades de riego y se infiltran para alimentar a acuíferos someros de menor espesor y extensión, constituidos por materiales aluviales y conglomerados poco cementados, que están conectados con el río Bravo/Grande y que abastecen a numerosas poblaciones medianas y menores asentadas en su faja fluvial.

En la secuencia de rocas poco permeables que confinan al acuífero Edwards, existen yacimientos de carbón que son explotados en territorio mexicano, para lo cual ha sido abatir los niveles freáticos del acuífero somero.

La explotación del acuífero Edwards es más importante en territorio de EUA, donde sus porciones más accesibles y permeables suministran importantes volúmenes de agua para usos domésticos, municipales, agrícolas e industriales; en territorio mexicano, la explotación es mucho menor. Se desconoce la recarga de este acuífero, pero debido a la gran extensión y capacidad de infiltración de sus zonas receptoras, se le supone de gran magnitud.

Hasta ahora no se han identificado efectos transfronterizos y es poco probable que se generen en el mediano plazo porque el acuífero descarga en forma difusa a las formaciones subyacentes y, finalmente, al cauce del río Bravo/Grande, sin que exista circulación subterránea de un país a otro. A pesar de ello, dado el creciente desarrollo poblacional e industrial de la región, es importante propiciar programas de intercambio de información y realizar estudios binacionales, para promover el desarrollo sustentable de este acuífero y prevenir impactos perjudiciales transfronterizos.

III.11 ACUIFERO CUENCA BAJA DEL RIO BRAVO/GRANDE (MEXICO – EUA)

El Sistema Acuífero Transfronterizo Cuenca Baja del Río Bravo/Grande se extiende en la porción norte de los estados de Coahuila y Tamaulipas (México) y en la porción sur del estado de Texas (EUA), en la faja del río Bravo/Grande comprendido entre la Presa Internacional Falcón y la desembocadura del río en el Golfo de México. Se trata de una región semiárida, con precipitación pluvial media de unos 350 mm/a y evaporación potencial del orden de 1 800 mm/a.

En ambos países existen numerosas ciudades medianas en esa faja, que demandan cantidades crecientes de agua para usos municipal, industrial y servicios. El sistema está conformado por numerosos acuíferos alojados en los depósitos fluviales del río Bravo/Grande y sus afluentes principales. Estos acuíferos son de extensión superficial variada, espesor de unas cuantas decenas a varios cientos de metros y prácticamente independientes entre sí; están hidráulicamente conectados al río, que constituye su nivel base de descarga, y en general contienen agua dulce a salobre.

En la planicie costera, los acuíferos fluviales sobreyacen a una secuencia de rocas sedimentarias continentales y marinas, de gran espesor y baja permeabilidad, que contienen agua cuya salinidad crece con la profundidad hasta alcanzar concentraciones de 5 000 ppm o mayores. Los acuíferos dulces son captados por gran número de pozos someros de caudal medio o bajo, parte del cual procede del caudal del río cuando el área de influencia del bombeo se extiende hasta su cauce.

La recarga de estos acuíferos depende en parte de la variación de los caudales conducidos por el río y, en parte, es inducida por el bombeo de los pozos, a costa de una reducción de su caudal base y de la disponibilidad de agua superficial. En territorio mexicano se están contemplando proyectos de desarrollos industriales poco consumidores de agua, que serían abastecidos mediante desalinización de agua subterránea salobre o salada.

No se han identificado efectos transfronterizos, pero la explotación de estos acuíferos puede reducir la disponibilidad de agua superficial, por lo cual será conveniente cuantificar su aportación al río Bravo/Grande y acordar esquemas de uso conjunto aguas superficiales/aguas subterráneas. Un incremento importante de la extracción de agua subterránea podría provocar que los acuíferos se desconecten del río, incrementando con ello la infiltración en su cauce a costa de una mayor reducción de su caudal base.

Por otra parte, en las figuras 2 y 3 se presentan los acuíferos transfronterizos localizados en la frontera sur.

Figura 2. Acuíferos Transfronterizos México - Guatemala

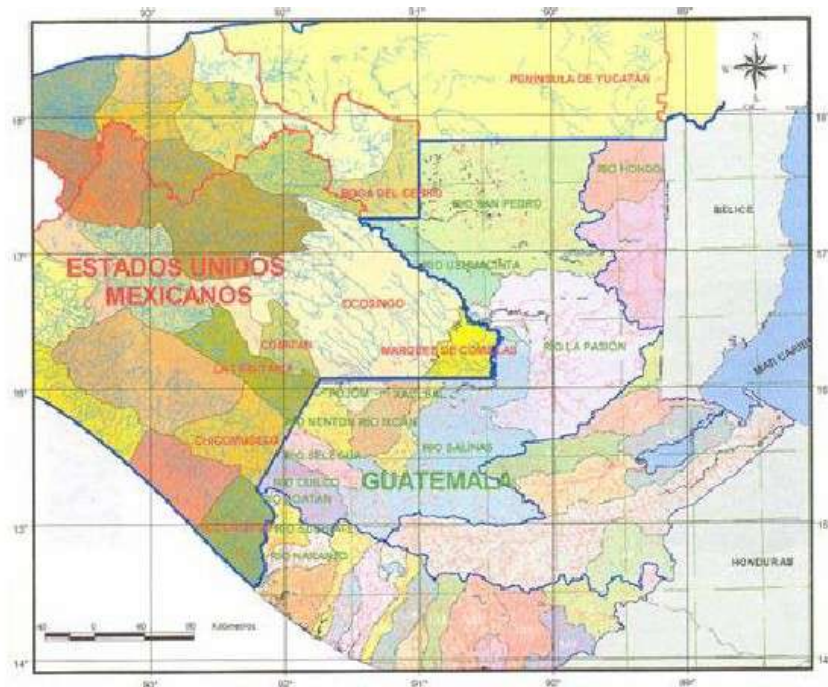
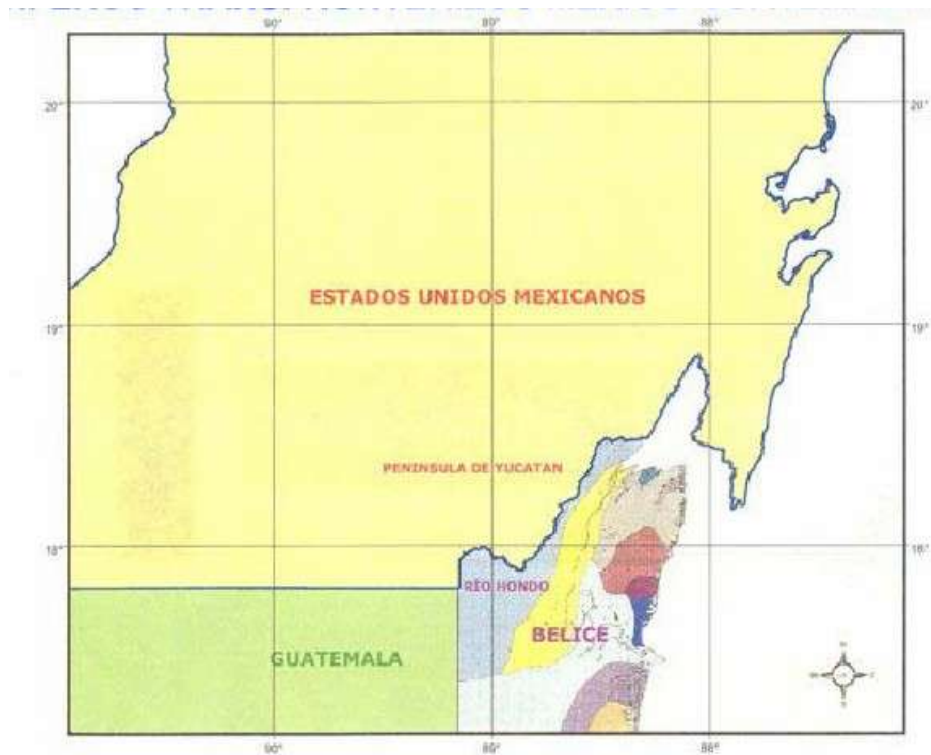


Figura 3. Acuíferos Transfronterizos México – Guatemala-Belice



III.12 ACUIFERO SOCONUSCO – SUCHIATE / COATAN (MEXICO – GUATEMALA)

El Sistema Acuífero Transfronterizo Soconusco-Suchiate/Coatán se extiende por el Estado de Chiapas en México y en el Departamento de San Marcos en Guatemala. La topografía es predominantemente montañosa en su parte alta y de relieve plano en su porción costera. La población está concentrada en la zona costera del lado Mexicano y en el lado Guatemalteco en los valles intermontanos, estimándose una población de 1,5 millones de habitantes. El clima es muy variado dado que la elevación topográfica varía entre 0 y más de 4 400 metros sobre el nivel del mar.

El agua subterránea tiene importancia mayor en los períodos de estiaje, para el consumo humano y el desarrollo agrícola. El agua subterránea tiene mayor importancia en la porción costera del Océano Pacífico, en donde está expuesto a la intrusión salina, y donde también contribuye al sostenimiento de los ecosistemas costeros (humedales y manglares).

El acuífero está constituido por materiales aluviales de granulometría variada, que descansan sobre rocas cristalinas (granitos, dioritas) y volcánicas del Terciario (basaltos y andesitas emitidas por el volcán Tacaná).

El acuífero es de tipo libre, de características hidráulicas variadas y está conectado con el río Suchiate en su porción baja, el cual constituye su nivel base de descarga. En la porción alta, el flujo subterráneo es de Guatemala hacia México, en la porción baja prácticamente no existe circulación subterránea a través de la frontera internacional.

El conocimiento que se tiene del sistema acuífero es escaso; el monitoreo de niveles y de calidad del agua subterránea tiene poca cobertura y falta actualizar la evaluación del sistema en cuanto a su renovación. El acuífero ha sido observado y evaluado por el INSIVUMEH en Guatemala y por la CONAGUA en México y en los aspectos transfronterizos interactúan bajo la coordinación de la CILA.

El acuífero es fuente importante para la agricultura en la parte baja de la cuenca y para los usos domésticos-pecuarios en toda su extensión. Está expuesto a la intrusión salina en la porción costera y su calidad ha sido deteriorada por las actividades agropecuarias, deposición de desechos líquidos y sólidos. Al momento, los riesgos significativos de impacto transfronterizo son mínimos; aunque los eventos meteorológicos extremos, como sequías, huracanes y tormentas tropicales, pueden afectar la calidad y disponibilidad de agua.

III.13 ACUIFERO CHICOMUSELO – CUILCO / SELEGUA (GUATEMALA – MEXICO)

El Sistema Acuífero Chicomuselo-Cuilco/Selegua se localiza en el Estado de Chiapas (México) y los Departamentos de Huehuetenango, San Marcos y Quetzaltenango (Guatemala). La población más importante es la ciudad de Huehuetenango. El clima es relativamente seco (especialmente en el territorio mexicano), y la topografía montañosa con pequeños valles intermontanos.

El acuífero está conformado en su parte superior por clásticos no consolidados y en su parte inferior por rocas kársticas limitadas inferiormente por rocas metamórficas y marinas. El acuífero es de tipo libre con desarrollo kárstico importante. Su permeabilidad secundaria es alta por karsticidad y fracturamiento y hay zonas conductoras asociadas con grandes fallas geológicas; tiene estrecha relación con las corrientes superficiales con las que intercambia agua en forma alternada. El agua circula de Guatemala hacia México.

El acuífero ha sido estudiado por CONAGUA en México y por CILA en ambos países; el INSIVUMEH dispone de información climatológica, hidrológica y geológica. El conocimiento del sistema acuífero en general es escaso en ambos países; el monitoreo escaso e incipiente de niveles y calidad del agua subterránea, hay pocas mediciones de corrientes superficiales, la evaluación de manantiales es poco confiable y también se carece de una evaluación de la recarga.

El acuífero es la fuente principal de abastecimiento para los sectores doméstico y agropecuario, así como para el consumo humano. El agua subterránea es importante, especialmente durante los períodos de estiaje, aprovechándose la descarga de manantiales y la extraída mediante pozos someros en los valles para uso doméstico, pecuario y agrícola en pequeña escala. Hay contaminación antropogénica por descargas de aguas residuales a las corrientes y por falta de saneamiento ambiental básico. Puede haber riesgo de impacto transfronterizo por contaminación del agua en las partes altas. El acuífero es vulnerable a eventos meteorológicos extremos que pueden generar efectos degradativos sobre la calidad del agua subterránea.

III.14 ACUIFERO OCOSINGO – USUMACINTA – POCOM – IXCAN (GUATEMALA – MEXICO)

El Sistema transfronterizo se localiza en el Estado de Chiapas (México) y en los Departamentos de Huehuetenango, Petén y Quiché (Guatemala). El clima es cálido subtropical en Guatemala y seco en México. El relieve es montañoso, con valles y mesetas intermontanos. El agua subterránea es de poca importancia relativa, porque los niveles del agua están profundos; es captada en los manantiales y mediante pozos profundos. La población está dispersa en pequeñas comunidades, en donde se utiliza el agua para usos doméstico y agropecuario; las principales poblaciones de Guatemala lo constituyen Sayaxché y el Triángulo Ixil.

El acuífero está constituido por rocas kársticas que representan complejos sistemas de circulación subterránea, asociados con grandes cavernas y fracturas. El agua subterránea circula de Guatemala hacia México y descarga al río Usumacinta, que es el nivel de caudal base.

En algunas áreas, el agua subterránea se caracteriza por su alto contenido de sulfatos y carbonatos que la hacen poco apta para el consumo humano y animal. El acuífero ha sido poco estudiado, aunque se dispone de información obtenida en los estudios y exploraciones petroleras. El conocimiento hidrogeológico es pobre a causa del escaso desarrollo local. Las mediciones hidrométricas sobre el río Usumacinta, proporcionan una idea sobre la caudal base aportado por el acuífero.

El acuífero abastece a la población rural que utiliza el agua con fines doméstico y pecuario; así mismo, alimenta a los ríos y sostiene la vegetación ribereña especialmente durante los períodos de estiaje.

El principal impacto transfronterizo consistiría en una reducción significativa del caudal base del río Usumacinta. Con sería afectación a los ecosistemas y a la navegación fluvial.

III.15 ACUIFERO MARQUÉS DE COMILLAS - CHIXOY/XACLBAL (MEXICO – GUATEMALA)

El Sistema Acuífero Marqués de Comillas-Chixoy/Xaclbal se extiende en el Estado de Chiapas (México) y en los Departamentos de Totonicapán, Quiché, Alta Verapaz, Baja Verapaz y Petén (Guatemala).

En las zonas altas existen poblaciones importantes, como: Santa Cruz del Quiché, Salamá y Cobán, mientras que en las partes bajas del territorio guatemalteco, las poblaciones están dispersas.

El clima es variable desde zonas templadas con altitudes mayores de 3 000 metros sobre el nivel del mar hasta las tierras bajas de los ríos Lacandón (México) y Salinas (Guatemala), en zonas selváticas tropicales.

Existen manantiales localizados en las partes altas de las cuencas y con ello se abastece de agua a las comunidades.

El acuífero se encuentra en depósitos de rocas sedimentarias del Cretácico Terciario, calizas y dolomitas cretácicas que presentan extensas área de circulación kárstica. El acuífero por estar en rocas kársticas presenta complejos sistemas de circulación subterránea asociado con grandes cavernas y fracturas. El agua subterránea circula de Guatemala hacia México y la descarga es a través de los ríos Salinas y La Pasión (Guatemala).

Los niveles del agua subterránea normalmente son profundos y muy variados. En las parte altas de la cuenca, el agua subterránea se aprovecha por medio de pozos excavados, pozos perforados y manantiales. En las partes bajas el aprovechamiento es escaso y algunas áreas se caracterizan por el alto contenido de sulfatos y carbonatos que la hacen poco apta para el consumo humano y animal.

El acuífero ha sido medianamente estudiado en los valles intermontanos, disponiéndose de información hidrometeorológica en INSIVUMEH, INDE y en las Municipalidades de algunos municipios de Guatemala, pero en las parte bajas el conocimiento hidrogeológico es escaso.

Los caudales de los ríos Chixoy y Xaclbal dan una idea del caudal base reportado por el acuífero. En este río existen algunas hidroeléctricas importantes como la del Chixoy. El acuífero abastece a la población urbana y rural que utiliza el agua con fines domésticos, agropecuarios y principalmente en pequeños sistemas de irrigación; así mismo, alimenta a los ríos y riachuelos que sostienen la vegetación ribereña y la protección de las montañas.

El principal impacto transfronterizo consistiría en la reducción significativa del caudal base de los ríos Chixoy y Xacalbal afectando los sistemas fluviales y los humedales de la región.

III.16 ACUIFERO BOCA DEL CERRO - SAN PEDRO (GUATEMALA – MEXICO)

El Sistema Acuífero Transfronterizo Boca del Cerro-San Pedro se extiende en los Estados de Tabasco, Campeche y Yucatán (México) y en el Departamento de Petén (Guatemala). La mayoría de la población del lado de Guatemala se encuentra en la cabecera de la cuenca; mientras que en el lado mexicano se ubica en las partes bajas de la cuenca hidrográfica.

El clima es cálido húmedo y tropical en toda su extensión, las mayores alturas alcanzan los 600 metros sobre el nivel del mar.

Los niveles del agua subterránea normalmente son profundos y muy variados.

El Sistema Acuífero se localiza sobre calizas y dolomitas que tienen elevado grado de permeabilidad por fracturación y de extensas áreas con desarrollo de circulación kárstica. En las zonas medias y bajas se tienen sedimentos marinos terrígenos, areniscas calizas arcillosas y lutitas cubiertas por sedimentos recientes depositadas en el ambiente continental.

En la mayoría del área el acuífero es libre conformado por materiales no consolidados. Es un acuífero multiestrato de modesta productividad y niveles de permeabilidad variable, primaria y secundaria, generalmente baja con intercalación de niveles impermeables a semi-permeables. En estratos profundos puede encontrarse un acuífero de buena productividad. El flujo es de Este a Oeste dirigiéndose al Golfo de México.

El aprovechamiento de aguas subterráneas es escaso y en casi toda el área se caracteriza por el alto contenido de sulfatos y carbonatos, que la hacen poco apta para el consumo humano y animal. El acuífero ha sido estudiado únicamente en la cuenca del Lago Petén Itzá y en su área de influencia por el INDE y el INSIVUMEH, pero el conocimiento hidrogeológico del resto del área guatemalteca es escaso. Existe monitoreo hidrométrico y climatológico por parte de INSIVUMEH (Guatemala), CONAGUA (México) y la Oficina de la Comisión Internacional de Límites y Aguas México – Guatemala (CILA).

El acuífero abastece de agua a las poblaciones del área urbana central de Petén (Guatemala) y la ciudad de Tenosique; así mismo se alimenta con el caudal base a los afluentes de la cuenca, los cuales mantienen la vegetación ribereña y la humedad de la cobertura boscosa. En el lado guatemalteco es importante el aporte de agua a los sistemas de humedales que ocupan una superficie considerable de la cuenca hidrográfica.

El principal impacto transfronterizo consistiría en la reducción significativa del caudal base del río San Pedro, afectando a los sistemas fluviales y a los humedales de la región.

III.17 ACUIFERO TRINITARIA – NENTON (GUATEMALA – MEXICO)

El sistema acuífero Trinitaria-Nentón se localiza en el Estado de Chiapas en México y en el Departamento de Huehuetenango en Guatemala. El relieve es montañoso con valles intermontanos estrechos y el clima es seco. El agua subterránea es importante, sobre todo en la estación seca. Actualmente es captada en manantiales y mediante pozos someros en los valles y es utilizada con fines doméstico, pecuario y para el abastecimiento de pequeños sistemas de irrigación.

El acuífero está alojado en un relleno de materiales no consolidados, depositado sobre una estructura sinclinal de rocas calcáreas. El acuífero es del tipo libre, de permeabilidad media y baja capacidad de almacenamiento. Sus niveles freáticos están someros y tiene estrecha conexión con las corrientes superficiales, con las que intercambia agua. El agua fluye en el subsuelo de Guatemala hacia México.

El acuífero ha sido estudiado a nivel preliminar por CONAGUA y por CILA en México; INSIVUMEH mantiene monitoreos climático e hidrológico en Guatemala, pero el conocimiento del acuífero es aún escaso en ambos países.

El acuífero es la fuente principal de agua que abastece a la población rural. Está localmente contaminado por la descarga de aguas residuales de las poblaciones sin instalaciones sanitarias adecuadas.

III.18 ACUIFERO PENINSULA DE YUCATÁN – CANDELARIO – HONDO (MEXICO – GUATEMALA – BELICE)

El sistema acuífero se localiza en la porción Sur de la Península de Yucatán, en los Estados de Campeche y Quintana Roo en México, en el Departamento de Petén en Guatemala y en los Distritos de Orange Walk y Corozal en Belice. En su mayor parte se extiende en la Plataforma Yucateca, de relieve plano. La población está ampliamente dispersa en las tres naciones.

El agua subterránea reviste gran importancia relativa, porque el terreno kárstico tiene reducida pendiente topográfica y gran capacidad de infiltración; consecuentemente, la única corriente superficial es el río Hondo, que recibe parte de la descarga del acuífero, que es captado mediante gran número de pozos poco profundos.

El acuífero está formado por rocas kársticas de alta permeabilidad secundaria, asociada con oquedades de disolución, donde se han desarrollado complejos sistemas de circulación subterránea. El agua circula a través del subsuelo de Guatemala a Belice y luego hacia México. En algunas áreas tiene altas concentraciones de sulfatos, por lo que no es apta para el consumo humano y pecuario.

El acuífero es vulnerable a la contaminación antropogénica, porque el terreno kárstico tiene gran capacidad de infiltración y capacidad prácticamente nula para atenuar contaminantes; sin embargo la abundante recarga y la rápida circulación del agua propicia la disolución y el transporte de los contaminantes, especialmente durante las lluvias torrenciales asociadas a los huracanes y las tormentas tropicales.

El sistema acuífero es la principal fuente de abastecimiento de agua a la población rural. No se identifica mayor riesgo de impacto transfronterizo, debido al escaso desarrollo en el territorio guatemalteco y a que la recarga en la porción mexicana y beliceña es cuantiosa.

IV EL PAPEL DEL U.S. DEPARTAMENTO DE AGRICULTURA EN EL VALLE DEL RÍO COLORADO.

Control de la salinidad

A finales de década de los sesentas y principios de los setentas, representantes de los siete estados del Valle del río Colorado, Arizona, California, Colorado, Nevada, New México, Utah y Wayoming y de varias agencias federales han discutido los problemas del aumento de los niveles de la salinidad en la parte baja del sistema del Río Colorado. (Fig. 4.)

Figura 4. Suelos salinos en la cuenca baja del río Colorado



Los estados del valle establecieron en 1973 el Foro de Control de salinidad en el Río Colorado para propiciar la cooperación entre estados y para adquirir y compartir la información necesaria para cumplir con la sección 303 (a y b) del Acta Agua Limpia (Clean Water Act).

Con la entrada y el soporte del foro, el congreso decretó el acta de control de la salinidad del Valle del Río Colorado de 1974 (Ley pública 93-320) y enmiendas subsecuentes. Estas leyes autorizan a los Departamentos del Interior y de Agricultura para reforzar y proteger la calidad del agua disponible en el Río Colorado para el uso en los Estados Unidos y la República de México. El Acta proporciona los medios para cumplir con las obligaciones de los Estados Unidos hacia la República Mexicana según la Minuta No. 242 de la CILA Comisión Internacionales de Límites y Agua.

Además, la ley también proporciona los medios para reunir los estándares numéricos de la calidad del agua para los sólidos disueltos totales en tres localizaciones en el río de Colorado según los requerimientos del Acta de la calidad del agua de 1965 (PL 89-234) según la enmienda prevista por el Acta Federal del Control de la Contaminación del Agua de 1972.

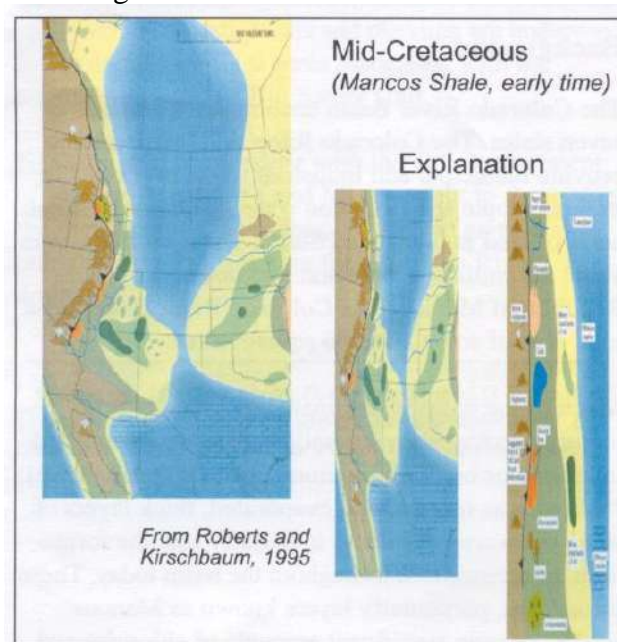
Desarrollo de la Salinidad

El Valle del Río Colorado abarca porciones de siete estados. El Río Colorado y sus afluentes proporcionan el agua municipal e industrial para aproximadamente 27 millones de personas y agua de la irrigación a casi 1 620 000 ha de tierra en los Estados Unidos. El Río también beneficia a aproximadamente 2,3 millones de personas y 202 500 ha en la República Mexicana.

Gran parte del Valle es dominado por los aspectos geológicos que incluye las formaciones sedimentarias que fueron depositadas en ambientes marinos o salobres. Mientras que estos mares bajos antiguos retrocedieron y se evaporaron, las capas gruesas de sedimento fueron dejadas detrás para solidificar en las formaciones expuestas a través del Valle actualmente. Estas formaciones, capas específicamente conocidas como “Mancos Shales” (Pizarras, lutitas), contienen cantidades significativas de cloruros y de sulfatos de sodio, calcio, y magnesio así como otras sales y minerales que, con el desgaste erosivo por la acción atmosférica natural o actividades humanas, contribuyan a cargar los sólidos disueltos totales (SDT) en el Río. El transporte de sales varía grandemente dependiendo de la concentración de las sales en los estratos subyacentes, de la estructura de los estratos, y de la presencia de cualquier estrato impermeable en la trayectoria del agua.

La figura 5 muestra la localización de las costas durante la época de depositación hace unos 90 millones de años.

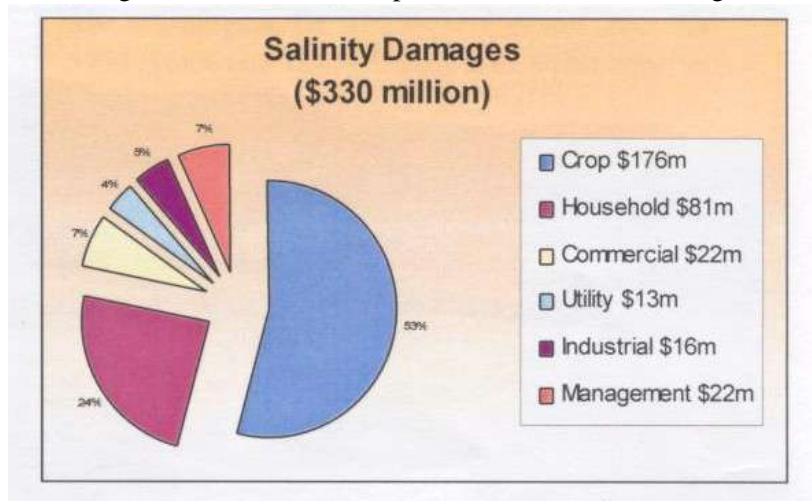
Figura 5. Localización de las Costas



Daños de la salinidad

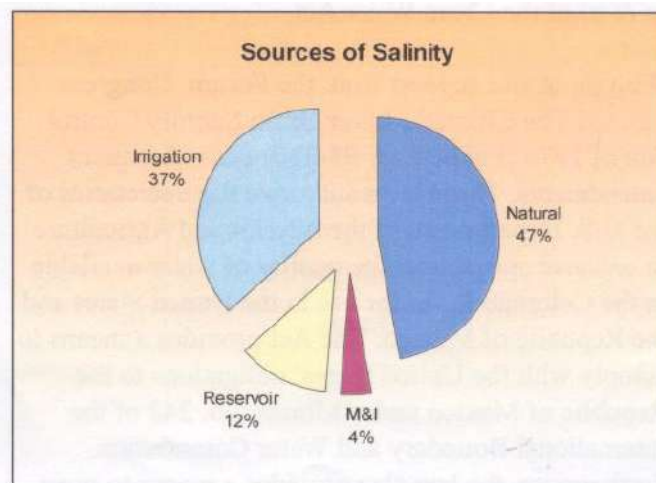
La salinidad del agua (medida como STD) afecta a usuarios del agua proporcionalmente a la concentración de sólidos en el agua. Los daños en los Estados Unidos significan actualmente cerca de 330 millones de dólares anuales. Los daños en México no son cuantificados, en la agricultura, la principal afectación es en la reducción de las cosechas, disminución en la selección de cosecha, costo agregado por el manejo de suelos salinos y sódicos e incremento en los requisitos de irrigación. (Figura 6)

Figura 6. Daños Anuales por Salinidad, SDT=800 mg/l



Las fuentes principales de la sal en el Valle se representan en la Figura 7. La irrigación de las cosechas, huertas, viñedos y forrajes y otros usos en agricultura es el segundo gran contribuidor de la sal al Río Colorado.

Figura 7. Principales fuentes de salinidad

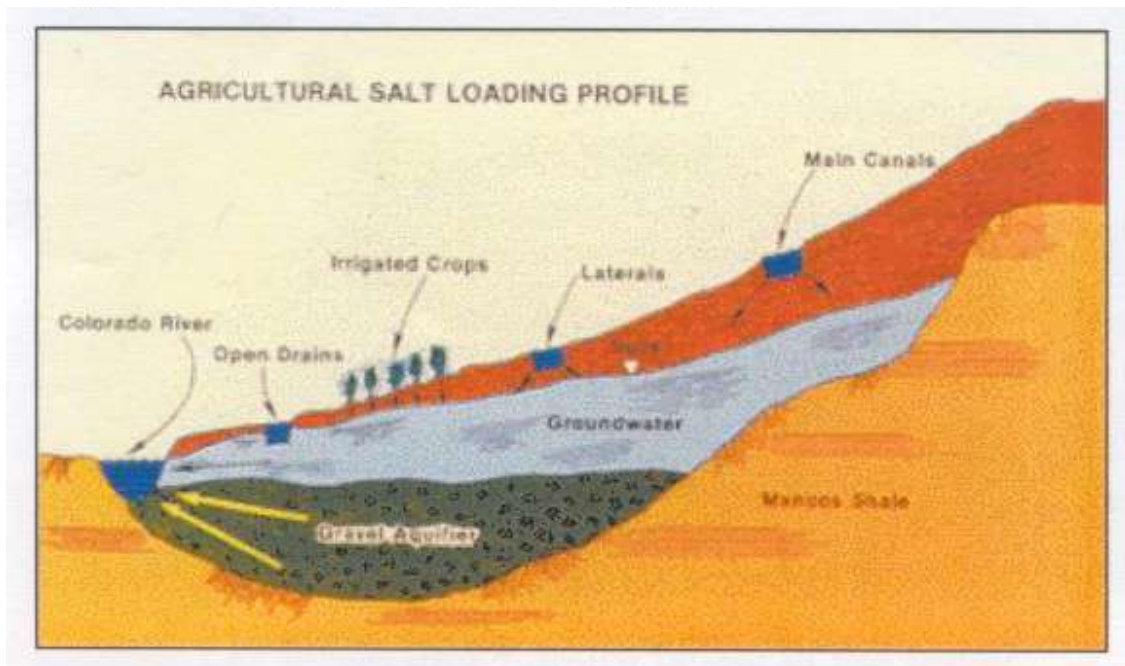


Dado el papel histórico del Bureau of Reclamation y del Departamento de Agricultura, el desarrollo agrícola y

las mejoras en el Oeste de los Estados Unidos, es seguido por los esfuerzos del control de la salinidad que se han dirigido sobre todo a las áreas de mayor irrigación. Reclamation, es la principal agencia para el control de la salinidad en el Valle del Colorado según se estipula en el Acta del Control de la salinidad, ha hecho gran progreso en el control de la sal con medidas como “off-farm”, mientras que el USDA (Departamento de Agricultura) ha aplicado sus esfuerzos en medidas de “on-farm” en tierras privadas.

La irrigación de cosechas y pasturas, y la filtración relacionada a los canales de entrega y laterales según se ha calculado, contribuye aproximadamente con 3,4 millones de toneladas de sal (37% de la salinidad total) al Río de Colorado anualmente. La irrigación aumenta el crecimiento de la planta y consumo de agua, concentrándose la sal en la zona de escurrimiento y fragmentos lixiviados. El agua que se lixivia o percola debajo de la zona de la raíz disuelve las sales encontradas en los suelos subyacentes y material adjunto, normalmente pizarras marinas (Mancos shales). El agua que no es consumida por plantas o animales, o por las actividades humanas o por la evaporación, finalmente llega al Río de Colorado. (Figura 8)

Figura 8. Salinidad por actividad agrícola



Control de la salinidad

De 1987 al presente, el USDA ha planeado y ha implementado seis proyectos de control de salinidad en tres estados bajo la autorización de varios "farm bills".

Desde 1996, el programa de control de la salinidad del USDA ha sido consolidado del Programa de Incentivos de Calidad Medioambiental administrado por el Servicio de Conservación de Recursos Naturales. Los proyectos incluyen tomar medidas de salinidad en campos que reducen el impacto de agricultura irrigada reduciendo el agua que se fuga del campo.

Esto se cumple mejorando las estructuras y dirección de los sistemas de la irrigación y el reemplazo de agujeros laterales y zanjas. La eliminación de sistemas de entrega resquebrajados y la instalación y funcionamiento apropiado de los sistemas de irrigación reduce la cantidad de agua que se desvía sin ser consumida por las cosechas. La instalación de sistemas de irrigación mejorados redundan en el mejor rendimiento y calidad de las cosechas.

V DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

V.I LA CUENCA DEL RÍO COLORADO

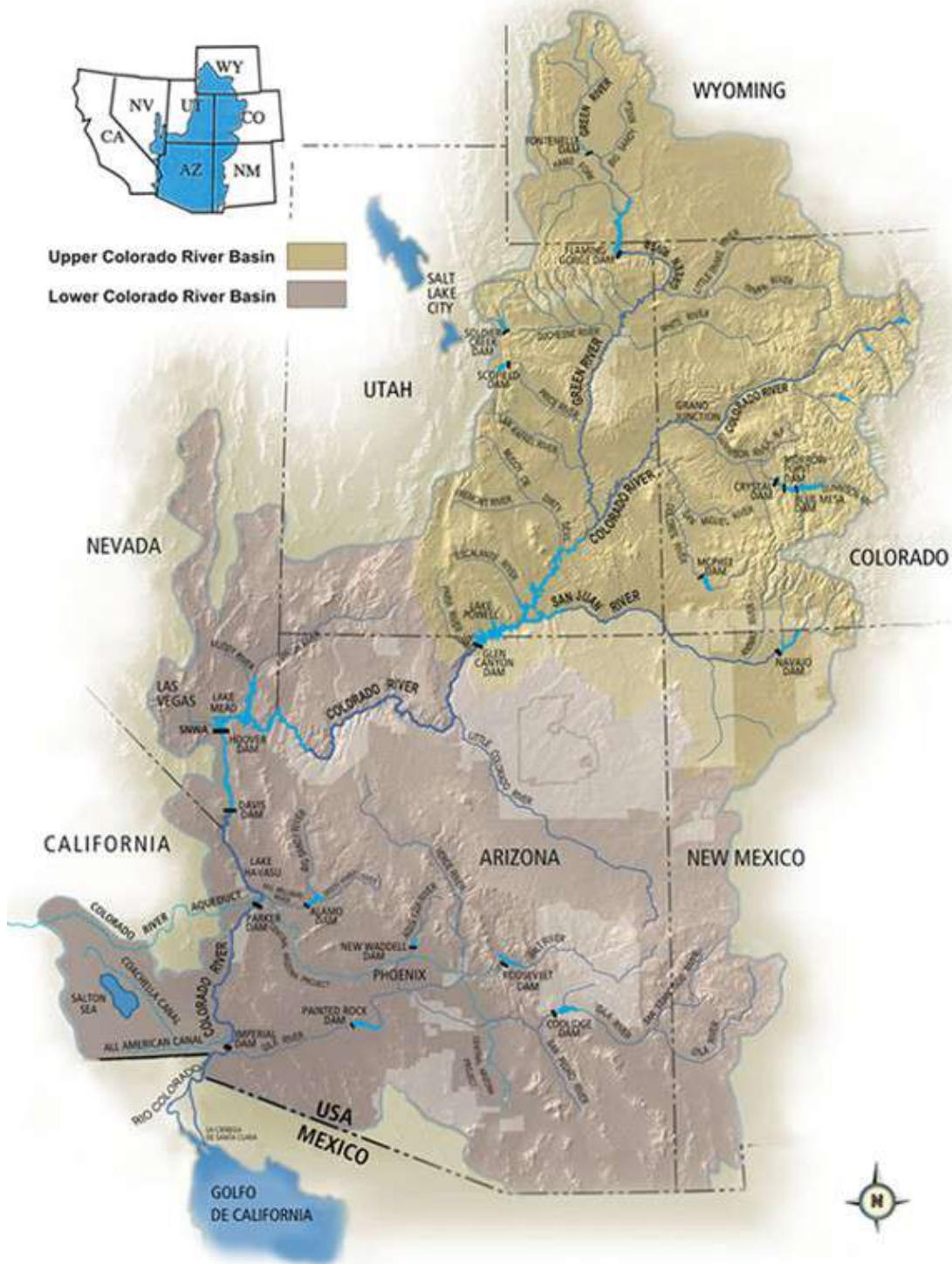
El Río Colorado recorre una extensión aproximada de 2 300 km desde su nacimiento en el estado de Colorado, en Estados Unidos, hasta su desembocadura en el Golfo de California, drenando un área aproximada de 630 000 km², que incluye parte de siete Estados de la Unión Americana (Wyoaming, Utah, Colorado, Nuevo México, Arizona, Nevada y California), así como de los Estados de Sonora y Baja California en la región norte de México (figura 9).

De acuerdo a registros climatológicos, las temperaturas extremas de la cuenca fluctúan desde -45 °C en lo mas alto de las montañas rocallosas, hasta +53 °C en el Valle de Mexicali. La parte sur de la cuenca corresponde a zonas desérticas y recibe un promedio de sólo 64 mm de precipitación pluvial por año, mientras que en la cuenca alta, la precipitación alcanza de 1 000 a 1 500 mm/a.

El promedio del flujo virgen anual del río varia entre 16 000 y 18 500 hm³, en el punto conocido como Lee's Ferry, exactamente abajo del actual lago Powell de la presa Glenn Canyon. De este volumen, actualmente se derivan más de 6 200 hm³ (33.5 % del total), hacia regiones que están fuera de la cuenca; por ejemplo, el sur de California y la cuenca del río Grande.

La cuenca del río, por criterios operativos, ha sido dividida en Cuenca alta y Cuenca baja. Las montañas Rocallosas dominan la topografía de la cuenca alta, y es aquí donde el Colorado obtiene la mayor parte de su fuente y descarga de agua. La cuenca baja, en contraste, se caracteriza por valles aluviales planos, separados por fluctuaciones de baja montaña, escasa lluvia y vegetación xerofítica. El afluente mayor del Colorado es el río Green. Los ríos Gunnison y San Juan son los otros afluentes del alto río Colorado.

Figura 9. La Cuenca del Río Colorado



Fuente: Bureau of Reclamation, Upper Colorado Regional Office

En territorio mexicano, el Delta del río Colorado tiene una extensión de 8 412,75 km² que representa al 4,5 por ciento de la superficie total del Estado, las localidades más importantes además de la cabecera municipal son: El Poblado Luis B. Sánchez, Golfo de Santa Clara, Nuevo Michoacán e Islita.

La zona de estudio es el área que comprende el acuífero SON-01: Valle de San Luis Río Colorado, el cual se localiza entre los meridianos 113° 15' al 114° 50' de longitud oeste y entre los paralelos 21° 30' al 32° 40' de latitud norte. Para poder realizar una configuración hidráulica completa se integró la información de la margen izquierda del Río Colorado del Valle de Mexicali que corresponde al estado de Sonora, teniendo una nueva área localizada entre los meridianos 114° 15' al 115° 5' de longitud oeste y entre los paralelos 31° 35' al 32° 30'. (Figura 10)

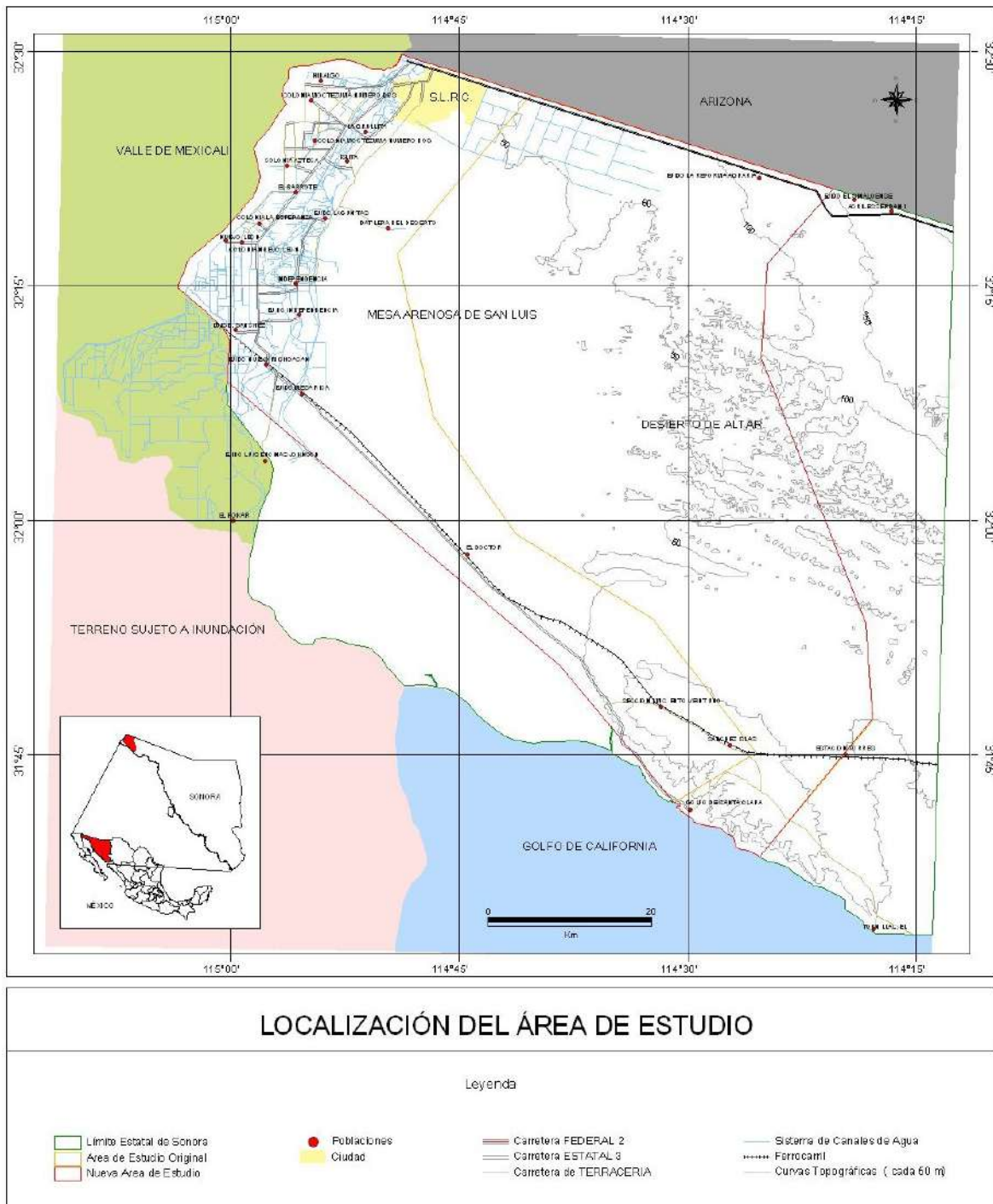
El área de estudio tiene como límites al norte la Mesa la Fortuna, Mesa de Yuma, y el valle de Yuma pertenecientes al estado de Arizona, EUA; al oriente se extiende el Desierto de Altar y la zona Volcánica de El Pinacate en el estado de Sonora; hacia el sur el Golfo de California, y al poniente el Delta del Río Colorado o Valle de Mexicali y la zona de inundación del Golfo de California que son parte del municipio de Mexicali, B.C.

El municipio de San Luis Río Colorado colinda al norte con el condado de Yuma, Arizona, Estados Unidos de Norteamérica; al sur con el Golfo de California, al este con los municipios de Gral. Plutarco Elías Calles y Puerto Peñasco, al oeste con el municipio de Mexicali, Baja California y el tramo final del Río Colorado.

V.2 HIDROGRAFÍA

El área de estudio queda comprendida en las regiones hidrológicas Sonora Norte (RH8) y Río Colorado (RH7). La región RH7 comprende la parte occidental y contempla la Cuenca Bacanora Mejorada (A), la cual a su vez integra a las Subcuencas Sánchez Mejorada (a) en la parte oriental y Bacanora-Monumento (b) en la parte occidental. La región RH8 se encuentra hacia la parte oriental y está representada por la Cuenca Desierto de Altar – Río Bámori (C) y la subcuenca Desierto de Altar (c). (Figura 11).

Figura 10. Localización de la zona de estudio



Fuente: (INEGI, 2000).

V.3 CUENCA BACANORA MEJORADA (A)

Se localiza en la porción occidental del área de estudio cubriendo una área de 1 512 km² que comprende el valle de Mexicali que queda en la margen izquierda del río Colorado. Al norte continúa adentrándose al vecino país del norte EUA; hacia el oeste abarca hacia el estado de Baja California; en la parte este se localiza la Cuenca Hidrológica de Desierto de Altar y al sur se encuentra el Golfo de California.

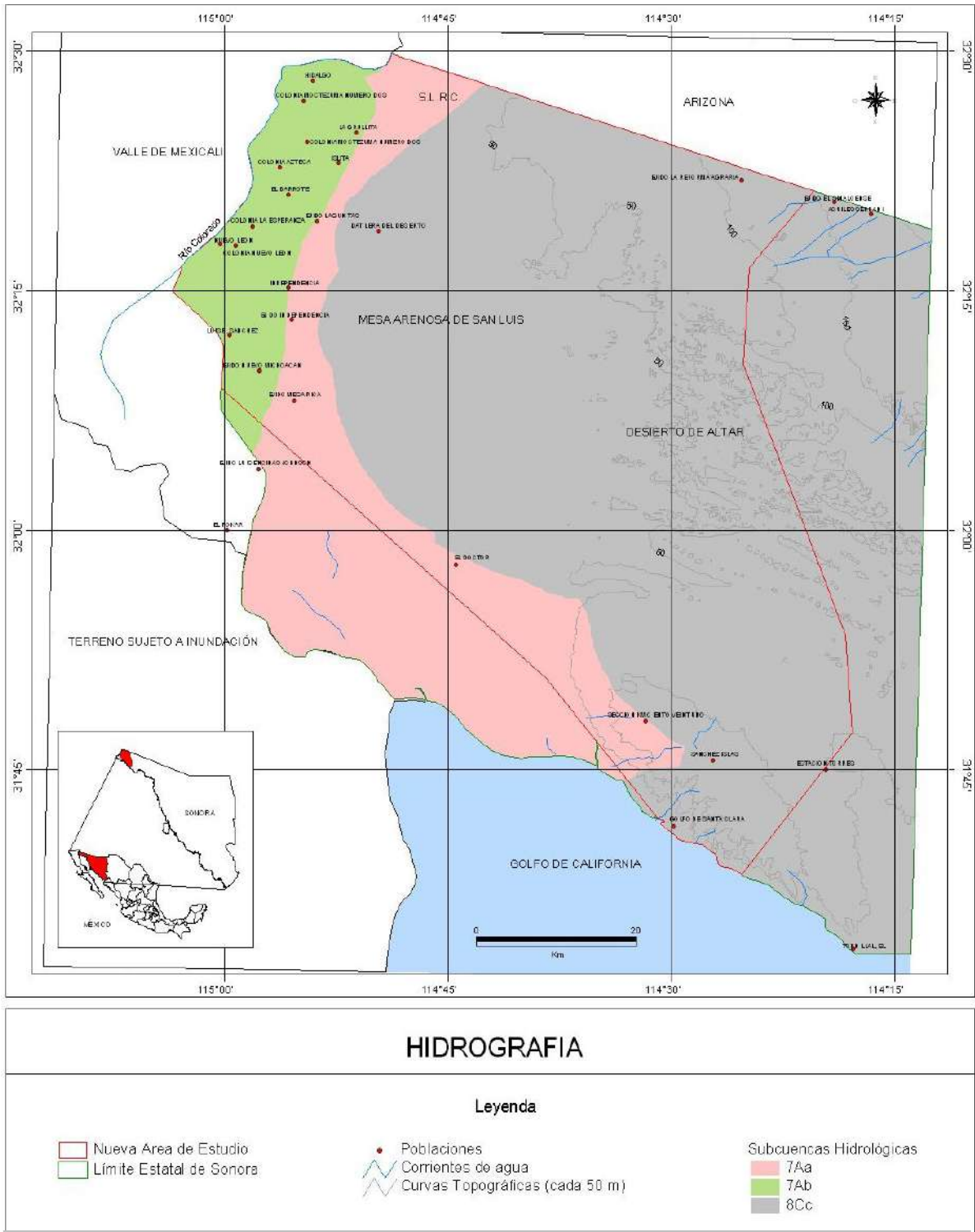
Tiene una topografía suave ya que abarca la parte oriental del Valle de Mexicali el cual tiene sus niveles mas altos en la parte norte con 40 m bajando suavemente hacia el sur hasta llegar al nivel del mar. Este valle es regado principalmente por las aguas del Río Colorado que son encausadas por medio de canales. El cauce del río Colorado actualmente está seco ya que solo cuando se tienen excedentes de agua suministradas por EUA a México se desfoga el agua por su cauce.

Cuenca Desierto de Altar (C)

Se localiza en la porción oriental del área de estudio y cubre un área de 2 940 km², conocido como el Desierto de Altar y la zona volcánica del Pinacate. Los límites de esta cuenca son al norte donde se encuentra el país de EUA, y donde se amplía su área; al oeste por la Cuenca Bacanora-Mejorada; al este y suroeste por la Cuenca San Ignacio, y al sur por el Golfo de California.

Consta de una topografía regular a excepción de los afloramientos volcánicos del pinacate y sierras de roca metamórfica e ígnea que alcanzan alturas de hasta 680 m como el Cerro Pinto o 520 m como Sierra el Rosario. En lo concerniente al área de estudio se localizan algunas corrientes intermitentes en la parte noreste y sur, pero debido a su alto índice de infiltración por el material arenoso estas no son de importancia.

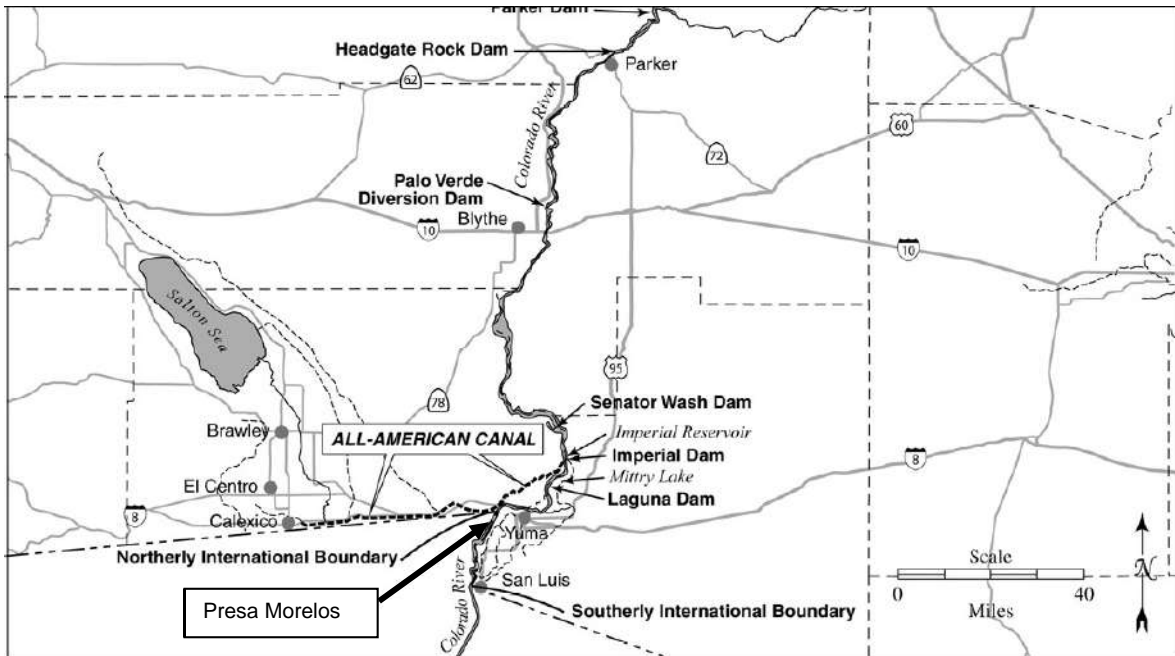
Figura 11. Hidrografía en el área de estudio.



FUENTE: (INEGI, 2000).

El agua superficial proviene de los E.U.A. y se recibe en la presa Morelos en la línea fronteriza, sus aguas se destinan principalmente al uso agrícola y para agua potable. (Figura 12)

Figura 12. Localización de la presa Morelos



Fuente: U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, Yuma Area Office

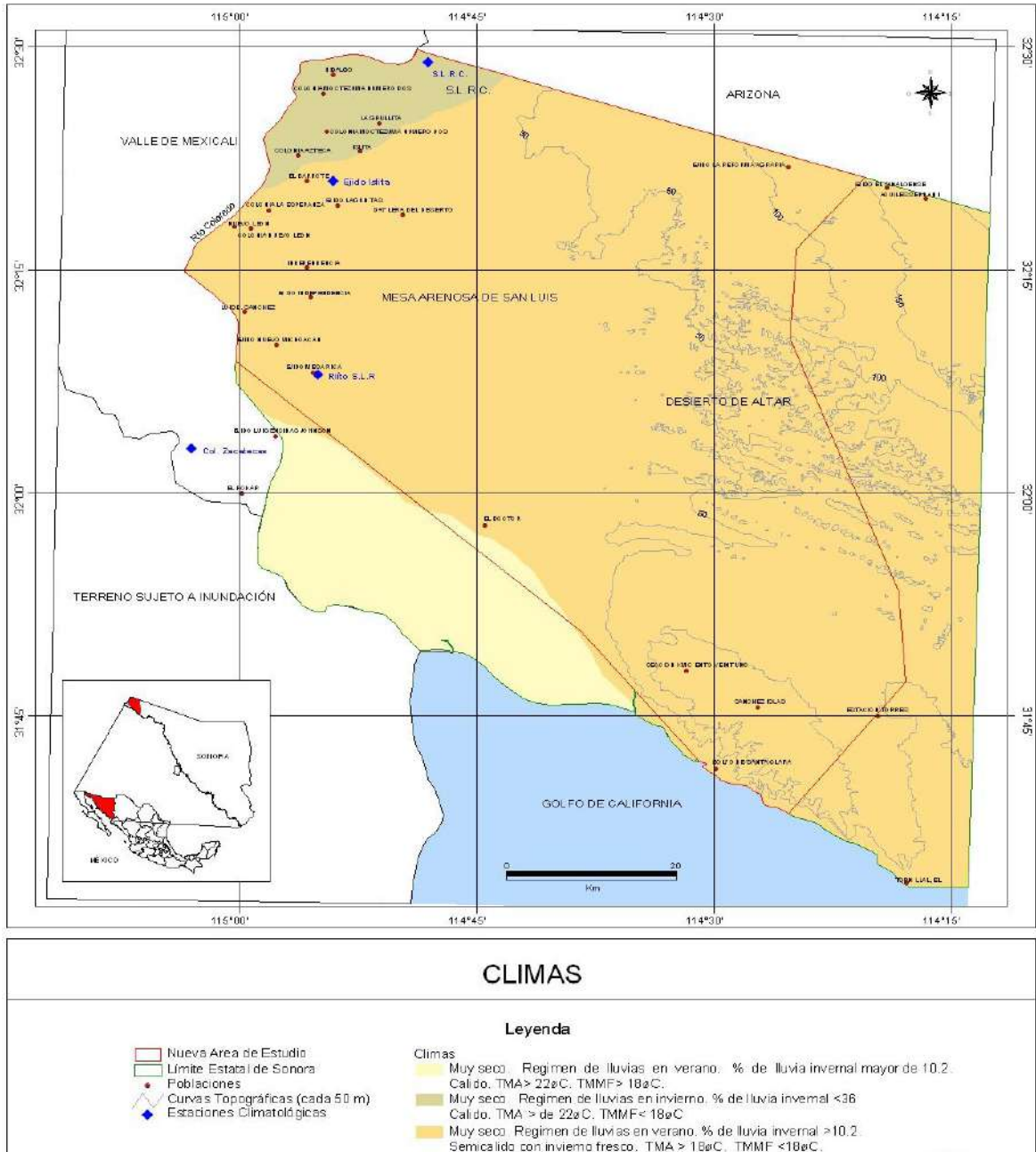
Esta agua se mezcla con el agua subterránea extraída de la batería de pozos de Mesa Arenosa de San Luis, para bajar el contenido de sólidos disueltos totales. Los pozos localizados en la margen izquierda del Río Colorado, situados en el valle, extraen agua subterránea destinada a riego agrícola, y en menor proporción a uso doméstico. Esta parte del valle pertenece al estado de Sonora y es administrada por los usuarios del Distrito de Riego 014 a través de los Módulos 1, 2 y 3.

V.4 Climatología

De acuerdo con la información disponible, en el área de estudio de la Mesa Arenosa de San Luis, no se presentan variaciones climáticas importantes, la región se caracteriza por su aridez, efecto que conlleva a una serie de resultantes que son manifiestas en el tipo de vegetación y la falta de humedad de los suelos.

Según estudios de INEGI (1994) que siguen la clasificación de Köppen solo existe un tipo que abarca el 100% de la superficie el cual es un clima muy seco Muy seco-semicálido con lluvias en verano (BWhw(x')). El porcentaje de lluvia invernal es mayor a 10,2 y temperatura media anual menor a 18 °C. Este tipo de clima presenta invierno fresco. (Figura 13).

Figura 13. Climas que se presentan en el área de estudio



Fuente: (INEGI, 2000).

Estos tipos de climas, también llamados desérticos, se caracterizan por su precipitación inferior a los 400 mm/a y su temperatura media anual de 18 a 26 °C. Son considerados muy extremos, ya que su oscilación térmica, es decir, la diferencia entre la temperatura media del mes más cálido y la del mes más frío es mayor a 14 °C.

Fuera del área de estudio en la región NE y SE, se presentan climas más o menos similares según INEGI (1996). En la región NE el clima es muy seco ((BW(h')hs(x')) con régimen de lluvias en invierno, % de lluvia invernal < 36,0 cálido, TMA > de 22 °C, TMMF < 18 °C. También la región SE presenta un clima muy seco, (BW(h')hw(x')) pero con régimen de lluvia en verano, % de lluvia invernal > 10,2 cálido, TMA > 22 °C y TMMF > 18 °C. Otros estudios fuera del área indica a la región oriental de la Mesa Arenosa con un clima imperante según la clasificación Thornthwaite es E.d.B.a., desértico, caluroso en verano y frío en invierno con precipitaciones muy bajas y variables y según la clasificación Köppen,

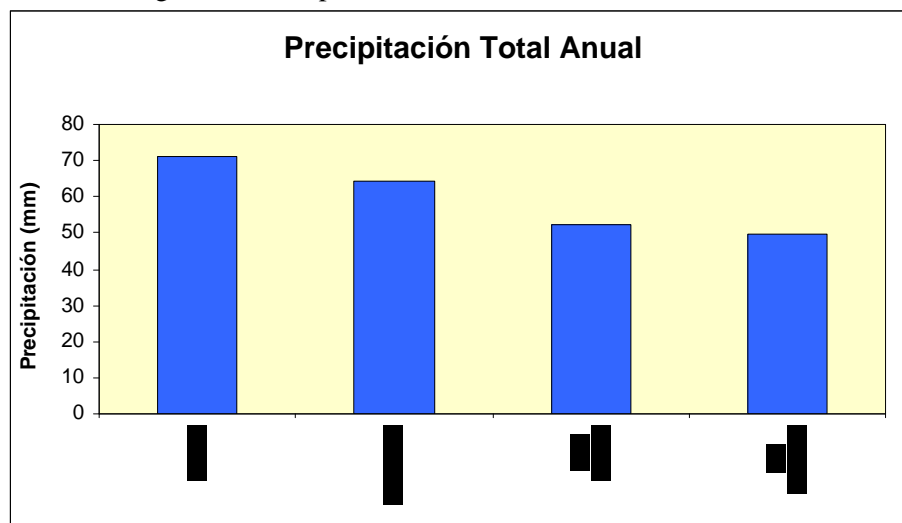
Estaciones Climatológicas

En la realización de este estudio, se ha analizado la información de 4 estaciones climatológicas: Riíto S.L.R.C, Ejido Islitas, Colonia Zacatecas y San LuíS Río Colorado, todas ellas alrededor del área de estudio y administradas por la Comisión Nacional del Agua (Figura 13). De las estaciones se presentan los datos obtenidos de los cálculos, así como también diversos gráficos para observar las variaciones existentes en los diferentes períodos de análisis para los parámetros de temperatura, precipitación y evaporación.

V.5 Precipitación

En las estaciones que rodean el área de estudio, se puede observar que la precipitación es característica de lluvias de verano y de invierno. En las estaciones de Puerto Peñasco y Riíto S.L.R.C también se observa que las mayores precipitaciones son en octubre. En la figura 14 se puede ver que las mayores precipitaciones son en el área de la estación de San LuíS Río Colorado con una media anual de 68,4 mm y las mínimas en la estación Colonia Zacatecas con 49,1 mm la media anual.

Figura 14. Precipitación total anual en la zona de estudio

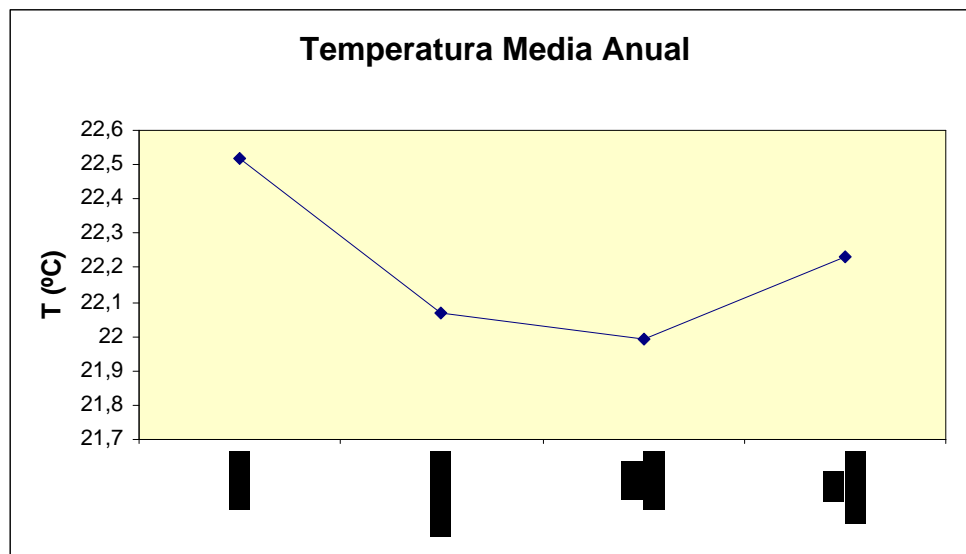


Fuente: Comisión Nacional del Agua. Organismo de Cuenca Noroeste

V.6 Temperatura

Todas las estaciones tienen una temperatura media por arriba de los 20 °C, el menor valor es en la estación de Riíto S.L.R.C. de 22,5 °C, y el máximo en San Luis Río Colorado de 22,5 °C (Figura 15). Para estas estaciones los meses más cálidos son en Julio y Agosto, y los más fríos en Diciembre y Enero.

Figura 15. Temperatura media anual promedio en la zona de estudio



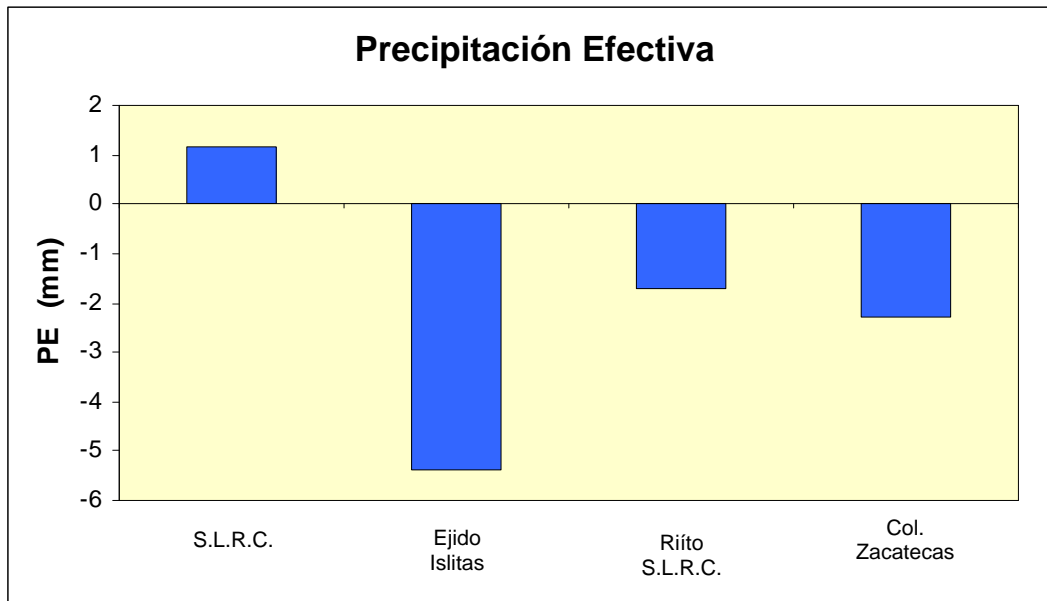
Fuente: Comisión Nacional del Agua. Organismo de Cuenca Noroeste

Precipitación Efectiva

En la figura 16 de la precipitación efectiva se puede ver que en la mayoría de las estaciones son valores negativos es decir, la cantidad de agua evapotranspirada es mayor que la precipitada y por lo tanto no existe gran posibilidad de infiltración.

La estación con valor positivo es San Luis Río Colorado de 1,1 mm lo que indica que en el área que cubre esta estación hay más posibilidad de infiltración.

Figura 16. Precipitación efectiva media anual en la zona de estudio



Fuente: Comisión Nacional del Agua. Organismo de Cuenca Noroeste

V.7 INFORMACIÓN SOCIOECONÓMICA

De acuerdo con información del Instituto Nacional de Geografía e Informática (INEGI), la población económicamente activa del municipio de San Luis Río Colorado es de 54 982 habitantes, de los cuales 54 425 tienen ocupación y 557 se encuentran desocupados. De las personas ocupadas 10 446 se dedican al sector primario, 16 843 al sector secundario, 25 280 al terciario, 1 856 no especifican actividad y 47 775 habitantes son económicamente inactivos.

V.8 Demografía

Según los censos de población y vivienda de 1980, 1990, y las cifras preliminares de el conteo de población y vivienda del año 2005, elaborados por el INEGI, presentan los siguientes resultados para este municipio.

Tabla 1. Evolución de la población en la zona de estudio

Población				Tasa de crecimiento (%)	
1980	1990	2000	2005	1980/1990	1990/2000
92 790	110 530	145 006	157 076	1,8	2,77

Fuente: INEGI

Su población actual es de 157 076 habitantes, del total de sus pobladores 79 129 son hombres 77 947 son mujeres. Tiene una tasa de crecimiento del 2,77 por ciento y presenta una densidad poblacional del 17,2 hab/km².

Agricultura

La agricultura cuenta con una superficie de 29 355 ha, de las cuales 27 915 son de riego, 53 de temporal y 1 387 de medio riego. De la superficie total, 14 480 ha son de la pequeña propiedad y 14 875 ha son de propiedad ejidal. En los últimos años, la agricultura del municipio se ha diversificado con el cultivo de algodón y de hortalizas impulsado por el repunte en el precio internacional de sus productos.

Tabla 2. Superficie agrícola en la zona de estudio

Actividad	Superficie (ha)	
	Riego	Temporal
Agrícola	29,302.0	53.0

Fuente: H. Ayuntamiento Municipal de San Luis Río Colorado

En la actualidad se siembran anualmente 5 000 ha de vegetales destacando los cultivos de cebollín, coliflor, rapíni, melón, espárrago, calabacita y otras hortalizas, así como frutales, tales como el dátil, durazno, vid y el higo.

V.9 Ganadería

La actividad ganadera se practica en 800 000 ha de agostadero con una población de 2 547 cabezas de ganado bovino, beneficiando a 263 productores. Su principal objetivo es la producción de becerros al destete para su exportación a los Estados Unidos de Norteamérica.

Tabla 3. Inventario ganadero en la zona de estudio

Actividad	Superficie (ha)
	Agostadero
Ganadería	800,000.0

Fuente: H. Ayuntamiento Municipal de San Luis Río Colorado

V.10 Pesca

La pesca junto con la agricultura, son las principales actividades del sector primario en el Municipio, generando en su conjunto, 9 651 empleos, lo que representa el 28 % de la población ocupada. Esta actividad es realizada por 2 cooperativas de altura, 3 cooperativas de bahía y 3 permisionarios con 16 embarcaciones mayores y 105 lanchas.

V.11 Industria

La industria es la segunda actividad de importancia en la economía del municipio, 28 plantas industriales dan ocupación a 8 046 empleados. Los tipos de empresas son: metal-mecánica, electrónica, plástico, textil, fábrica de muebles y alimentos.

Comercio

El comercio es la actividad más importante para la economía municipal, ya que junto al sector servicios genera 15 870 empleos, lo que representa el 46% de la población ocupada. La actividad se practica en 1 672 establecimientos comerciales entre los que destacan abarrotes, farmacias, mueblerías, ferreterías, tiendas de ropa, zapaterías y locales de artesanías.

V.12 Turismo

Una de las actividades económicas con mayor potencial de desarrollo es el turismo, ya que se cuenta con recursos naturales diversos que lo hacen atractivo tanto para el turista nacional como internacional. Dentro de sus atractivos naturales destacan el Golfo de Santa Clara y la región volcánica del Pinacate considerada como reserva de la biosfera.

En lo que se refiere a infraestructura turística, se cuenta con 19 hoteles con 675 cuartos, trailer con 150 espacios, 36 restaurantes y 20 bares. El personal ocupado asciende a 2 324 personas.

VI METODOLOGÍA DE TRABAJO

VI.1 ACTIVIDADES DE CAMPO

Las actividades de campo se realizaron con objeto de conocer y recopilar los puntos de vista de los diversos actores de la cuenca, con la aplicación de entrevistas a los diversos tipos de usuarios del agua, autoridades e instituciones educativas y organizaciones no gubernamentales en la zona de estudio.

VI.2 ACTIVIDADES DE GABINETE

1. Compilación, integración, resumen y análisis crítico de estudios previos.

Obtener información útil y necesaria para el análisis de la situación actual del área de estudio y se realizaron resúmenes de cada uno de los trabajos previos, puntualizando: objetivos, actividades, resultados y conclusiones de los autores.

Adicional a la búsqueda de información bibliográfica que se realice en diversos centros, instituciones, bibliotecas, etc., se recurrió a la aplicación de entrevistas a los diversos actores para conocer su opinión sobre la problemática del agua en la zona de estudio.

2. Censo de aprovechamientos, hidrometría, piezometría y nivelación de brocales.

Conocer el número, localización, uso y demás características de los aprovechamientos hidráulicos de la región. Asimismo, evaluar los volúmenes de extracción de dichos aprovechamientos, direcciones de flujo a partir del análisis potenciométrico tridimensional y nivelación de brocales.

3. Valorar el Balance de agua, analizando detenidamente cada una de las componentes que conforman las entradas y salidas de agua y su impacto dentro de la zona de estudio, como pueden ser: precipitación, recarga natural, escurrimientos, entradas laterales de flujo subterráneo, evapotranspiración, excedencias por infiltración de aguas de riego, etc.

4. Conclusiones y recomendaciones

Presentar conclusiones y recomendaciones que se basen en los resultados obtenidos del análisis de la información durante el desarrollo de las diferentes etapas del presente trabajo.

VII ESTUDIOS PREVIOS ANALIZADOS

VII.1 ESTUDIOS ANALIZADOS

Los informes y estudios previos así como información diversa se recabaron principalmente en el Organismo de Cuenca Noroeste de la Comisión Nacional del Agua y del Organismo de Cuenca de la Península de Baja California. También se obtuvo información de la Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA), Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), Módulos de Riego 1, 2 y 3 del Distrito de Riego 014, así como en su centro de Hidrometría del km 27 del Canal Reforma.

La información en las principales dependencias se comenta a continuación:

Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Noroeste

Se obtuvieron 8 informes y estudios así como información digital que corresponden a fechas de 1968 a 1996, realizados por compañías particulares y por el propio gobierno a través de la Secretaría de Recursos Hidráulicos y la Dependencia de Aguas Subterráneas.

Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca de la Península de Baja California

7 informes y estudios así como información digital correspondiente a fechas de 1972 a 2005, realizados por compañías particulares, Universidad de Sonora y por el propio gobierno a través de la Secretaría de Recursos Hidráulicos y la Dependencia de Aguas Subterráneas. La información se encuentra en la Jefatura de Aguas Subterráneas la cual está representada por el Ing. Carlos Gómez y en las oficinas de Operación de Pozos de Aguas Subterráneas la cual está representada por el Ing. Alfredo Ochoa.

Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE)

De este centro de estudios se obtuvo información de la Tesis del 2004 para obtener el grado de Maestro en Ciencias de Martín Pacheco. Así como comentarios valiosos de los Geofísicos Rogelio Martínez y Juan Manuel Espinoza.

Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA)

En esta Comisión el Ing. Juan Alfredo Ríos Moreno proporcionó información de un boletín del 2001 referente los volúmenes destinados a México por EUA y el Ing. Francisco Bernal, Rep. de CILA Mexicali que proporcionó información muy valiosa

Organismo Operador Municipal de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de San Luis Río Colorado (OOMAPASS)

Se obtuvo el informe correspondiente al lado norteamericano “Geohydrologic of the Yuma area, Arizona and California”. Este informe fue proporcionado por Martín Humberto Hernández Aguilar, que es el director del departamento técnico (OOMAPAS) en la ciudad de San Luis Río Colorado.

VII.2 ANÁLISIS CRÍTICO DE ESTUDIOS PREVIOS

El análisis crítico de estudios previos se desarrolló con aquellos informes que presentaban información útil al área de estudio de los cuales se presenta a continuación su resumen, y en formato anexo digital se presenta una tabla con el análisis crítico completo de dichos estudios.

Tabla 4
Estudios Previos Analizados

Estudio	Temas	Observación	Año
Ariel Construcciones, S.A. "Estudio Hidrogeológico Completo de los Acuíferos del Valle de Mexicali, B.C. y Mesa de San Luis, Son.	Estudio	El estudio se enfoca al acuífero que se localiza en el Valle de Mexicali y Mesa Arenosa de San Luis Río Colorado. El periodo de estudio es de 1957 a 1968. Se concluyó que la extracción subterránea es del orden de 1,100 hm ³ /año. Deduciendo una extracción anual neta de 500 hm ³ /año. Los niveles de agua subterránea han ido bajando gradualmente con abatimientos pronunciados en la parte central y sur favoreciendo la entrada de salinidad al valle.	1968
Secretaría de Recursos Hidráulicos. Dirección General de Estudios. "Resumen del Estudio Geohidrológico del Valle de Mexicali, B.C. y Mesa Arenosa de San Luis, Son." Dirección de Aguas Subterráneas	Estudio	Se enfoca al valle de Mexicali y la batería de pozos federales en la Mesa Arenosa de san Luis. Se registra un abatimiento progresivo de medio metro al año debido a una sobreexplotación de los acuíferos del valle y se propone trasladar la explotación a la Mesa Arenosa de San Luis por ser de carácter inexplorada, o regular el volúmen de extracción debido al considerable riesgo de intrusión salina.	1972
Geological Survey Professional Paper 486-H "Geohydrologic of the Yuma Area, Arizona and California"	Estudio	El estudio corresponde al estado de Yuma y este de California, y describe la hidrogeología del Valle y la Mesa de Yuma. Presenta la geomorfología, estratigrafía, hidroestratigrafía, familias de agua, evoluciones en niveles estáticos, valores de transmisividad y coeficientes de almacenamiento con un rango de 1914 a 1973 años.	1973

Tabla 4 (Continuación)
Estudios Previos Analizados

Estudio	Temas	Observación	Año
SARH - GYCSA. "Informe del Estudio Geohidrológico Preliminar en el Area de Los Vidrios - San Luis Río Colorado".	Informe	El area de estudio es la carta de Los Vidrios, abarca el lado de EUA y México, se encuentra al este de Mesa Arenosa. Proporciona datos de secciones geológicas, hidrogeológicas y SEVs.	1981
SARH. "Aspectos Geohidrológicos del Distrito de Desarrollo Rural 002, Río Colorado".	Informe	El presente informe se realiza en el Distrito de Desarrollo Rural 02 y Mesa Arenosa de San Luis, haciendo énfasis en la recuperación de los niveles en el acuífero mediante infiltración de excedentes por el río Colorado. El volumen de recarga al acuífero es de 700 hm ³ /año. Con una extracción de 1 100 hm ³ /año. Proponiendo una extracción de 900 hm ³ /año referente a este estudio.	1987
Comisión Nacional del Agua. "Estudio de Geofísica de Resistividad y Geohidrología complementaria en la Mesa Arenosa de San Luis R. C. y en la Región Costa Rica, Municipio de Caborca, en el Edo. de Sonora".	Estudio	Presenta información principal de sondeos eléctricos verticales en tablas, secciones e interpretación geológica. El estudio se desarrolla en dos zonas siendo la Zona A: Mesa Arenosa, la de importancia. La zona B se refiere a Caborca.	1990
SARH, "Aspectos Generales sobre la Infraestructura de los Ejidos de la Mesa Arenosa de San Luis Río Colorado.	Compendio de Aspectos Generales de Infraestructura	Contiene un compendio de acuerdos sobre la infraestructura de pozos destinados a siembra. No tiene un índice temático, por lo que la información se encuentra desorganizada. De importancia se tienen tablas de estudios químicos de agua y censo de aprovechamientos.	1990
SARH, "Informe Geohidrológico Preliminar de la porción oriental de la Mesa Arenosa de San Luis Río Colorado".	Informe	Es un informe geohidrológico desarrollado a base de información histórica y censo de 20 pozos ubicados en la porción oriental de la Mesa Arenosa. No presenta anexos.	1990

Tabla 4 (Continuación)

Estudios Previos Analizados

Estudio	Temas	Observación	Año
<p>CNA, Gerencia Estatal en Baja California. "Estimación de las Recargas y Estudio del Comportamiento del Acuífero del Valle de Mexicali".</p>	<p>Estudio</p>	<p>Se tiene una hipótesis de recarga al acuífero de Mexicali de 700 hm³, los cuales en este estudio arrojaron una cantidad de 850 hm³. La calidad de agua proveniente del país del norte recibida en la Presa Morelos es de 1 500 ppm en sales por efecto del reciclaje de riego, esto es en agua superficial, En agua subterránea se tiene una calidad de agua de 400 ppm en sales. Según el estudio en la parte de Mesa Arenosa de San Luis se tiene un recibimiento de agua subterránea de 282 hm³/ año provenientes de Yuma Arizona.</p>	<p>1991</p>
<p>CNA, Gerencia Estatal de Baja California. "Informe Preliminar de las Condiciones Geohidrológicas Imperantes en el Distrito de Riego 014, Río Colorado, en el periodo comprendido: del 9 de Febrero de 1987 al 2 de Marzo de 1992".</p>	<p>Informe</p>	<p>Presenta una evolución negativa en la zona antigua de bombeo que va de -2 a -8 m en general. Se registran 3 flujos subterráneos principales. Dos en la zona antigua, el primero de este a oeste en la Mesa de Andrade, y el segundo de norte a sur desembocando en el Golfo de California. El tercer flujo va de norte a sur en Mesa Arenosa de San Luis. En ese tiempo los excedentes del Río Colorado no tuvieron repercusiones en el nivel subterráneo. Los niveles estáticos no están por debajo del nivel del mar.</p>	<p>1992</p>
<p>SARH / CNA. "Recursos Hidráulicos Subterráneos en el Estado de Sonora Aspectos Generales y Balance Geohidrológico Estatal".</p>	<p>Informe</p>	<p>Proporciona información general del acuífero. Se describe la situación actual de los acuíferos en el estado de Sonora, su disponibilidad, cantidad de aprovechamientos, situación de explotación, volúmenes de extracción, entre otros. El informe carece de índice. Solo se aprovecha la información al acuífero concerniente.</p>	<p>1993</p>

Tabla 4 (Continuación)
Estudios Previos Analizados

Estudio	Temas	Observación	Año
CNA. "Clasificación de Acuíferos y Disponibilidad de aguas Subterráneas en el Estado de Sonora".	Informe	Contiene la descripción de la problemática de los acuíferos Costa de Hermosillo, S.L.R.C, Sonoyta y Guaymas, presentado en tablas y un modelo conceptual subterráneo esquemático. Vienen tablas de extracción, condición geohidrológica y balance geohidrológico de las zonas geohidrológicas en el estado de Sonora.	1995
Consultores en Infraestructura y Servicios, S.A. de C.V. "Actualización del Estudio Geohidrológico de la Cuenca Baja del Río Colorado, B.C.	Estudio	El estudio se refiere al Distrito de Riego 014, en el cual se desarrolló un modelo conceptual con el programa MODFLOW con un periodo de 1996-2014. Los resultados fueron que con una explotación igual se tendrían abatimientos mínimos en toda el area y que para lograr un equilibrio de explotación desde el punto de vista del flujo es de 655 hm ³ . Por otra parte se tomaron los datos de entrada subterránea equivalente a 700 hm ³ /año.	1996
CNA, Gerencia Regional de la Península de Baja California. "Estudio Técnico Justificativo de la Zona Geohidrológica del Acuífero BC-10 Valle de Mexicali B. C. y Mesa Arenosa de San Luis, Son."	Estudio	Es una propuesta de límites de acuífero, así como la totalidad de volúmenes de entrada y extracción al acuífero. También se presentan los periodos de los niveles estáticos.	1998
Comisión Internacional de Límites y Aguas. "Boletín Hidrométrico del Río Colorado". Num.42-2001.	Boletín	Presenta estaciones hidrométricas, calidad de agua, áreas regadas, datos climatológicos, escurrimiento y gasto entre los límites de México y Estados Unidos del año 2001, acompañados de tablas con valores medios del periodo comprendido entre 1935 y 2001.	2001

Tabla 4 (Continuación)
Estudios Previos Analizados

Estudio	Temas	Observación	Año
CICESE. Tesis para M.C. en Geofísica. Martín Pacheco. "Estructura y Evolución de la Cuenca Altar, Sonora, a partir de la Integración de Datos Geofísicos y Geológicos".	Tesis	Abarca toda el área de estudio. Contribuye al conocimiento de la estratigrafía de la cuenca de Altar mediante el análisis e integración de datos geológicos y por registros geofísicos de siete pozos y seis líneas de reflexión sísmica.	2004
Comisión Nacional del Agua. "Compendio de Registros de Pozos en Mesa Arenosa de San Luis".	Compendio	Se presentan los datos de corte litológico, construcción y algunas pruebas de bombeo en los pozos de agua subterránea construidos en la Mesa Arenosa de San Luis.	-
Comisión Nacional del Agua. "Compendio de Registros de Pozos de la Serie G, construidos por el departamento de Aguas Subterráneas".	Compendio	Se presentan los datos de corte litológico, construcción y algunas pruebas de bombeo en los pozos de agua subterránea construidos en el Valle de Mexicali y Mesa Arenosa de San Luis Río Colorado. El objetivo es el de tener un mejor conocimiento subterráneo del área.	-
Comisión Nacional del Agua-UNISON. "Actualización del Estudio Hidrogeológico del acuífero de San Luis Río Colorado, Mpio. de San Luis Río Colorado, Sonora	Estudio	Contiene la descripción de la problemática del acuífero de SLRC, presentado un modelo conceptual subterráneo esquemático e información tabular de extracción, condición geohidrológica y balance geohidrológico de la zona de estudio.	2005
Comisión Nacional del Agua-UNISON. "Actualización del Estudio Hidrogeológico del acuífero de Valle de Mexicali	Estudio	Contiene la descripción de la problemática del acuífero, presentado un modelo conceptual subterráneo esquemático e información tabular de extracción, condición geohidrológica y balance geohidrológico de la zona de estudio.	2005

VIII
EL DESARROLLO DEL DISTRITO DE RIEGO 014

A continuación se explica la cronología del desarrollo en el valle de Mexicali de acuerdo al uso de agua superficial y subterránea:

A principios de los años de **1900** el valle se venía regando con agua proveniente de Estados Unidos a través del canal El Álamo. Pero debido a la reducción de aguas superficiales para México se empezó a utilizar agua de algunos pozos de uso rudimentario lo cual dio lugar al canal *All American*.

En el año de **1939** dado al crecimiento de las superficies de riego se creó el Distrito de Riego 014 Río Colorado a cargo de la Comisión Nacional de Irrigación.

En el año de **1955** debido a la insuficiencia de agua aportada por Estados Unidos a través del río Colorado se dio inicio a la perforación de pozos profundos para obtener el volumen necesario.

En el año de **1957** se incremento la extracción de agua subterránea por lo que se considera para fines prácticos el año inicial de explotación subterránea de agua para riego con extracciones anuales que varían de 700 a 1 200 hm³, aún cuando en **1955** se decretó zona de veda.

En la década de los **60's** el Distrito de Riego enfrentó serios problemas por la alta concentración de solutos en las aguas del Río Colorado, mal manejo y control de agua y un deficiente drenaje de las tierras que propiciaron el ensalitramiento de los suelos.

En el año de **1968** se firma un convenio internacional entre Estados Unidos y México en donde se otorga a México la cantidad de 1 850,2 hm³ anuales de agua superficial con no más de 1,300 ppm de sólidos totales disueltos.

Los sitios de entrega de agua están distribuidos de la siguiente manera: Presa Morelos (con el 91%), b) los drenes Cooper, Milla 11 y Milla 21, aguas abajo de la presa Morelos, en el tramo en el que el Río Colorado constituye la frontera internacional (con el 1%), y c) el Canal Sánchez Mejorada, que recibe agua del Canal Principal este y del Dren Principal de Yuma (con el 8%).

En el periodo de **1967-1969** se realizó una campaña de perforación de pozos conocidos como serie "G", los cuales se utilizaron para tener un mayor conocimiento geohidrológico del Valle de Mexicali y Mesa de San Luis, los cuales tienen una profundidad que varía de 200 a 800 m. Algunos de estos pozos se equiparon y otros quedaron como de observación.

Para el periodo de **1971-1976**, con la rehabilitación del Distrito (revestimiento de canales), se produjeron notables cambios en el régimen de la recarga, al disminuir

las pérdidas por infiltración.

En el periodo de **1972-1988** se construyeron los pozos pertenecientes a la batería de Mesa Arenosa de la cual se realizó un convenio con EUA de extracción máxima de $187 \text{ hm}^3/\text{a}$, para no afectar el área de captación en el lado norteamericano.

En el año de **1973**, la Comisión Federal de Electricidad inició la explotación del Campo Geotérmico de Cerro Prieto, consumiendo un caudal de $3 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ para fines de enfriamiento.

En el año de **1981** la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos destinó uso de agua potable a las poblaciones ubicadas en la franja fronteriza, desde San Luis Río Colorado hasta el litoral del Pacífico.

En el año de **1991** de forma global para atender la demanda de agua potable de una población del orden de los 1 699 729 habitantes, se requería un gasto máximo diario de 7 269 l/s.

Para el año de **1996** la extracción se realiza mediante 725 pozos, de los cuales 489 están a cargo del Distrito de Riego y los restantes son particulares que en conjunto extraen de 800 a $1\ 100 \text{ hm}^3/\text{a}$.

El riego con agua superficial se lleva a cabo mediante la presa derivadora D. José María Morelos, utilizando un volumen de $1\ 730 \text{ hm}^3/\text{a}$ para el riego de 134 600 ha. El resultado de estas extracciones en el Distrito de Riego a resultado en un abatimiento máximo de 10 m, y para el área de Cerro Prieto el abatimiento es de 5 m. Las zonas con mayor registro de salinidad se han detectado al sur de la zona de estudio.

La calidad de agua del río Colorado presenta una salinidad que oscila entre los 1 200 y 1 300 ppm, y la del acuífero en explotación del Distrito de Riego ha subido desde unas 1000 ppm en el año de **1966** hasta un máximo de 2 200 ppm en el año de **1996**.

En lo que se refiere a la generación de energía eléctrica mediante pozos geotérmicos se sabe que en el Distrito de Riego existen 79 pozos localizados en la zona de Cerro Prieto (hacia el occidente del área de explotación de agua subterránea para uso agrícola), los cuales han denotado una disminución en productividad.

IX MANEJO Y GESTIÓN DEL AGUA EN LA CUENCA

IX.1 EL PAPEL DE LA CILA

La Comisión Internacional de Límites y Aguas es para México y los Estados Unidos la institución y foro binacional de carácter gubernamental que permite y habilita la aplicación de diversos Tratados y Acuerdos sobre Límites y Aguas. Se compone de dos secciones, la sección mexicana depende de la Secretaría de Relaciones Exteriores y la contraparte de EEUU depende del Departamento de Estado.

El papel de la Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA) en la frontera es organizar frecuentemente grupos institucionales de Asesores Técnicos para desarrollar soluciones conjuntas sobre un asunto o problemática que afecte a uno u otro país sobre la materia.

Durante más de 100 años, México y Estados Unidos han encomendado a la CILA las siguientes funciones:

- Vigilancia y aplicación de los Tratados Internacionales sobre Límites y Aguas Internacionales (Derechos y obligaciones de cada país).
- Establecer soluciones a las diferencias que puedan surgir como consecuencia de tales aplicaciones.
- Verificar la operación y mantenimiento de las obras construidas bajo los acuerdos internacionales.
- En coordinación con las dependencias correspondientes de su respectivo país la supervisión y ejecución de estudios técnicos internacionales conjuntos que resuelvan problemas que afecten a uno u otro país.
- Analizar y dar seguimiento a los problemas de Saneamiento Fronterizo.
- Formular las recomendaciones a los gobiernos de ambos países para la solución de asuntos de límites y aguas. (Actas y Memorándums Técnicos).
- A fin de cubrir toda la frontera, además de sus oficinas centrales que se localizan en Ciudad Juárez-El Paso, se cuenta con oficinas en Tijuana y Mexicali, B.C.; Nogales, Son; Ojinaga, Chih., Cd. Acuña, Coah.; Nuevo Laredo, Nueva Cd. Guerrero y Reynosa, Tam., con contrapartes en Estados Unidos.

IX.2 LOS TRATADOS INTERNACIONALES

Tratado de Guadalupe-Hidalgo. Tratado de Límites del 02 de Febrero de 1848 que establece la frontera entre México y Estados Unidos de América.

Tratado de la Mesilla, 1853. Modificó la frontera a su situación actual.

Convención del 29 de julio de 1882. Estableció otra Comisión temporal para llevar a cabo nuevamente el levantamiento de la Línea Divisoria Internacional (LDI) terrestre y colocar monumentos adicionales entre Cd. Juárez-El Paso y Tijuana-San Diego.

Convención del 12 de noviembre de 1884. Estableció las reglas para determinar la posición del límite internacional fluvial cuando los ríos transfieran segmentos de un país a otro.

Convención del 01 de marzo de 1889. Estableció la Comisión Internacional de Límites (CIL) para que aplicara las reglas de la convención anterior.

Convención del 21 de mayo de 1906. Establece la distribución de las aguas del Río Bravo para los dos países. Asigna a México los 74,008 Mm³ para Ciudad Juárez.

Tratado de Aguas Internacionales de 1944. Utilización de las aguas de los Ríos Colorado, Tijuana y Bravo. La CIL se convierte en CILA y se incluye dar atención preferente a los problemas de saneamiento fronterizo.

Convención del Chamizal, 20-Ago-1963. Resolvió el problema de territorio mexicano en disputa por casi 100 años. Se transfirieron a México 177 de las 243 ha en conflicto.

Tratado de límites de 1970. Señala que deberá mantenerse el carácter de frontera internacional de los cauces de los ríos Bravo y Colorado.

Actas de la Comisión. Más de 300 Actas para la solución de problemas conjuntos de límites y aguas internacionales.

VII.3 LEGISLACIÓN DEL RIO COLORADO EN LOS ESTADOS UNIDOS

La Ley del Río. Conformada por una serie de acuerdos internos en Estados que regulan las asignaciones en la Cuenca Alta y en la Cuenca Baja

Upper Colorado River Basin Compact, 1948.

Colorado River Storage Project Act. 1956. Autoriza la construcción de 4 presas entre ellas la Presa Glen Canyon para la Cuenca Baja

Colorado River Basin Project. Act. 1968. Obligación nacional entregar agua a México

CR Basin Salinity Control Act. 1974. En cumplimiento al Acta 242. Construcción del Wellton-Mohawk y Planta Desaladora de Yuma.

Minutas de la CILA. 242, 264, 274, 288, 291, 294, 306.

IX.3 MANEJO BINACIONAL DEL AGUA EN LA CUENCA

Para su manejo se han creado grupos de trabajo binacionales (GTB), para el análisis y propuestas conjuntas de solución de los problemas entre ambos países relacionados con los siguientes temas.

- A. Entregas de Agua
- B. Salinidad
- C. Rectificación del tramo Internacional y Azolves
- D. Asuntos Ambientales

Así mismo, se han emitido de manera conjunto los siguientes tratados y acuerdos sobre el manejo del agua entre ambos países.

Tratado Sobre la Distribución de Aguas Internacionales entre México y los Estados Unidos de América

Capítulo III Río Colorado

Artículo 10

De las aguas del Río Colorado, cualquiera que sea su fuente se asigna a México: Un volumen garantizado de 1 850 hm³/a.

Artículo 15

En cualquier año en que haya agua en exceso para satisfacer las demandas en los EU y el volumen garantizado de 1 850,234 hm³ , se asignará a México 2 096,931 hm³/a. (1,7 MAF).

Artículo 15 (f)

México tendrá el derecho de aumentar o disminuir, durante avisos dados a la Sección de los Estados Unidos con 30 días de anticipación, cada uno de los volúmenes mensuales establecidos en la Tabla Anual en una cantidad que no exceda del 20% de su respectivo monto.

**Acta 242 de la CILA
(30 DE AGOSTO DE 1973)**

Con referencia al volumen anual de las aguas del Río Colorado garantizados a México por el Tratado de 1944, de 1 850,234 hm³ anuales; en la figura 17 se presentan los puntos de entrega de agua y en la figura 18 los volúmenes entregados a México por CILA y su distribución en el Distrito de Riego 014 Mexicali, B.C.

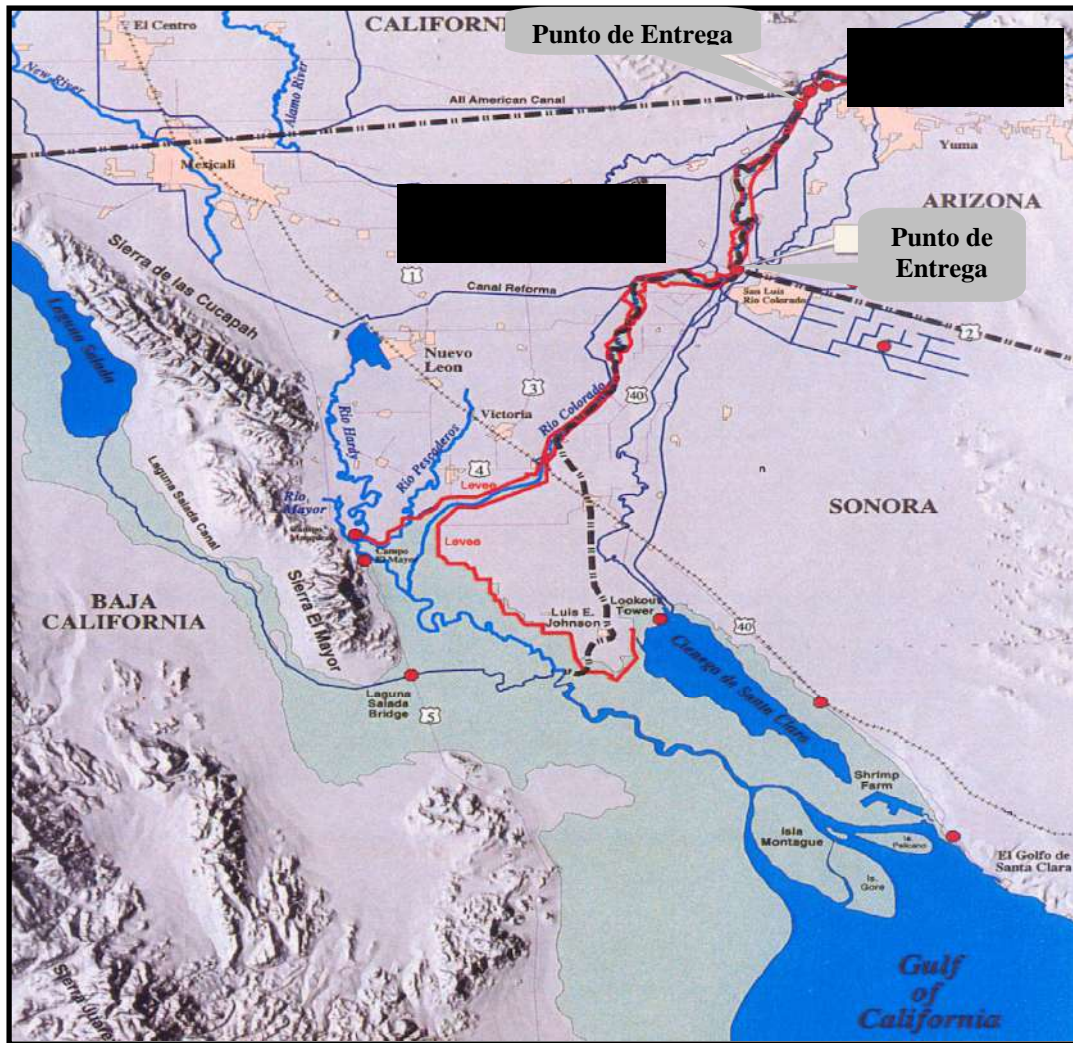
- A). Los EU entregarán 1 677,545 hm³/a por el Lindero Norte (Presa Morelos).
- B). Los Estados Unidos continuarán entregando a México en la LDI terrestre de San Luis (Canal Sánchez Mejorada) aproximadamente 172 689 hm³/a.
- C). Cualquier disminución en las entregas a que se refiere el inciso B), será compensado por un aumento igual en las entregas a que se refiere el apartado A)
- D). Cualesquiera otros cambios sustanciales en los volúmenes de agua antes dichos deberán ser convenidos por la Comisión.

ACTA 197

(Adopción del Reglamento de Operación de la Presa Morelos)

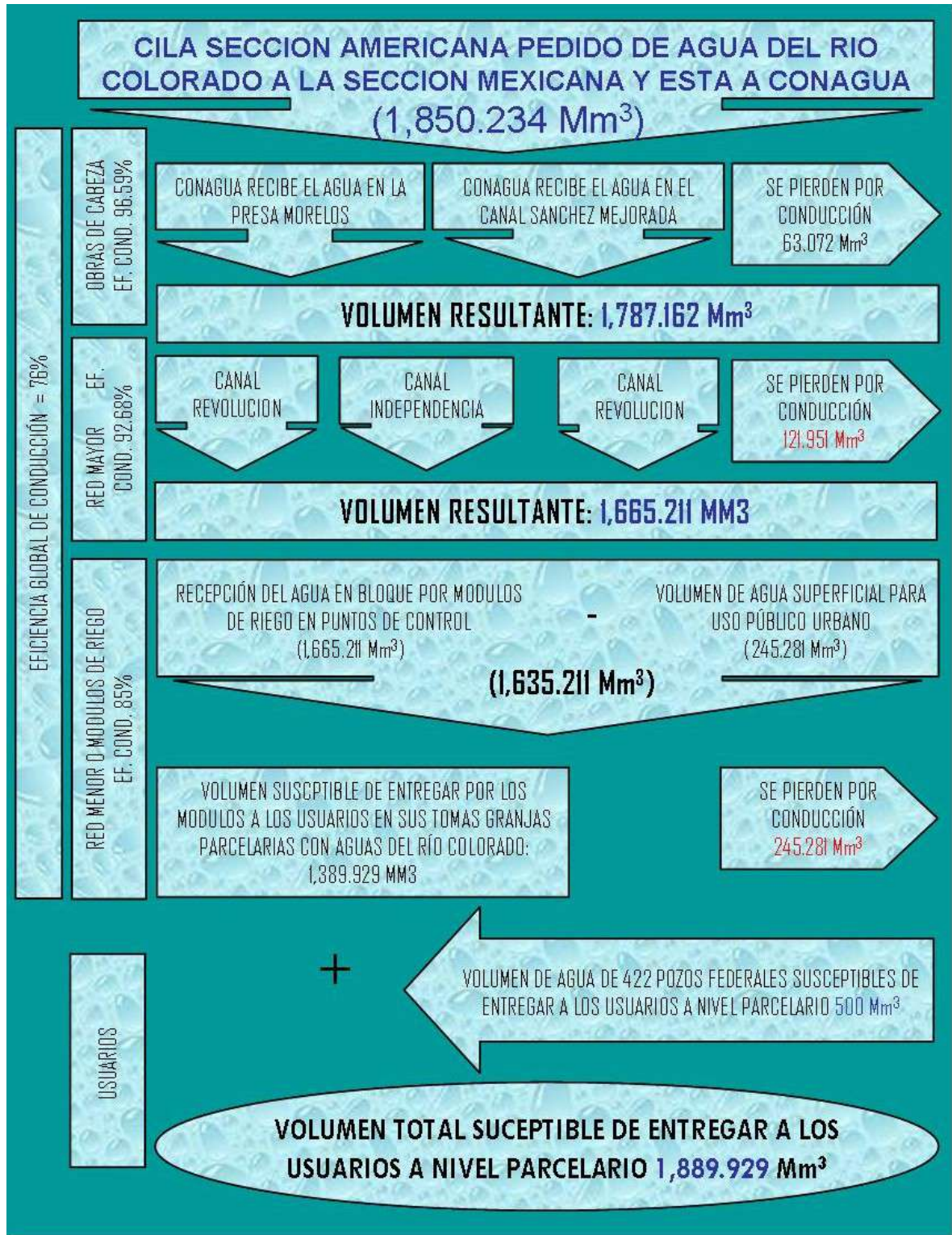
Establece los criterios para las tablas diarias de entregas para cada semana, mismos que se deberán solicitar a más tardar el miércoles de la semana anterior.

Se envía un pronóstico para la semana siguiente y se va ajustando conforme se programan los volúmenes en forma semanal.



Fuente: CILA. Conforme al tratado de 1944 y Acta 242

Fig. 18.- Volúmenes entregados a México por CILA y su distribución en el DR 014 Mexicali, B.C.



X

MODELO CONCEPTUAL DE FUNCIONAMIENTO HIDROGEOQUIMICO

X.1 Hidrogeoquímica

Para el área de la Mesa Arenosa de San Luis existen muy pocos trabajos sobre la calidad de agua y generalmente los trabajos están enfocados al Valle de Mexicali que abarca una parte (batería) de la Mesa Arenosa con los siguientes estudios:

- 1) Estudio de la Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), "Aspectos Generales sobre la Infraestructura de los Ejidos de la Mesa Arenosa de San Luis Río Colorado, Sonora" (1989);
- 2) Informe Geohidrológico Preliminar de la Porción Oriental de la Mesa Arenosa de San Luis Río Colorado, Son." (1990);
- 3) Informe Preliminar de las Condiciones Geohidrológicas Imperantes en el Distrito de Riego 014, Río Colorado, en el Período Comprendido del 2 de Marzo de 1992 al 9 de Febrero de 1987" (1992); y
- 4) Estimación de las Recargas y Estudio del Comportamiento del Acuífero del Valle de Mexicali (1991) y; Estudio Técnico Justificativo de la Zona Geohidrológica del Acuífero BC-10 Valle Mexicali B. C. y Mesa Arenosa de San Luis, Sonora (1998).

Se analizó la información existente sobre calidad del agua, que solo cuenta con datos proveniente de 5 aprovechamientos localizados en la porción Norte de la Mesa Arenosa. Los períodos de análisis son de 1983 y 1982, y los parámetros analizados son los iones mayores (calcio, sodio, magnesio, bicarbonato, cloruro y sulfato), conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos (STD) y el potencial de hidrógeno. También la clasificación de Wilcox y Scofield. En general, el agua presenta de moderadas a altas concentraciones de sólidos totales disueltos, sodio, cloruros y en ocasiones sulfatos, y el pH del agua es de neutro a alcalino.

El agua superficial entregada a México por E. U. A tiene una salinidad media de aproximadamente 1 300 mg/l de SDT, según los análisis químicos realizados por CILA en muestras de agua recolectadas en los sitios de entrega. El agua del río Colorado es de carácter sulfatado sódico.

Por otra parte, se cuenta con una base de datos sobre análisis de agua de la Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos del Distrito de Riego No. 14 Río Colorado, los cuales quedan dentro de la Mesa Arenosa de San Luis ubicados en la batería perteneciente a dicho distrito. Cuentan con datos de conductividad eléctrica, pH, calcio, sodio, magnesio, carbonato, bicarbonato, cloruro, sulfato, Na% y R. A. S., con un total de 53 aprovechamientos.

De manera general, para la Mesa Arenosa los STD son del orden de los 700 a 2 000 mg/l, presentan altas concentraciones de cloruros y sodio, y menos frecuente

la alta concentración de sulfatos. Esto en base a los límites máximos permisibles establecidos por la Norma Oficial Mexicana.

La mala calidad del agua se dice que es debido a la sobreexplotación que existe en el valle de Mexicali, la alta salinidad proveniente del río Colorado que ocasiona el ensaltramiento gradual del suelo y adicionalmente el clima desértico seco.

Figura 19. Aprovechamientos muestreados en el acuífero de S.L.R.C., estudio del año 2005.

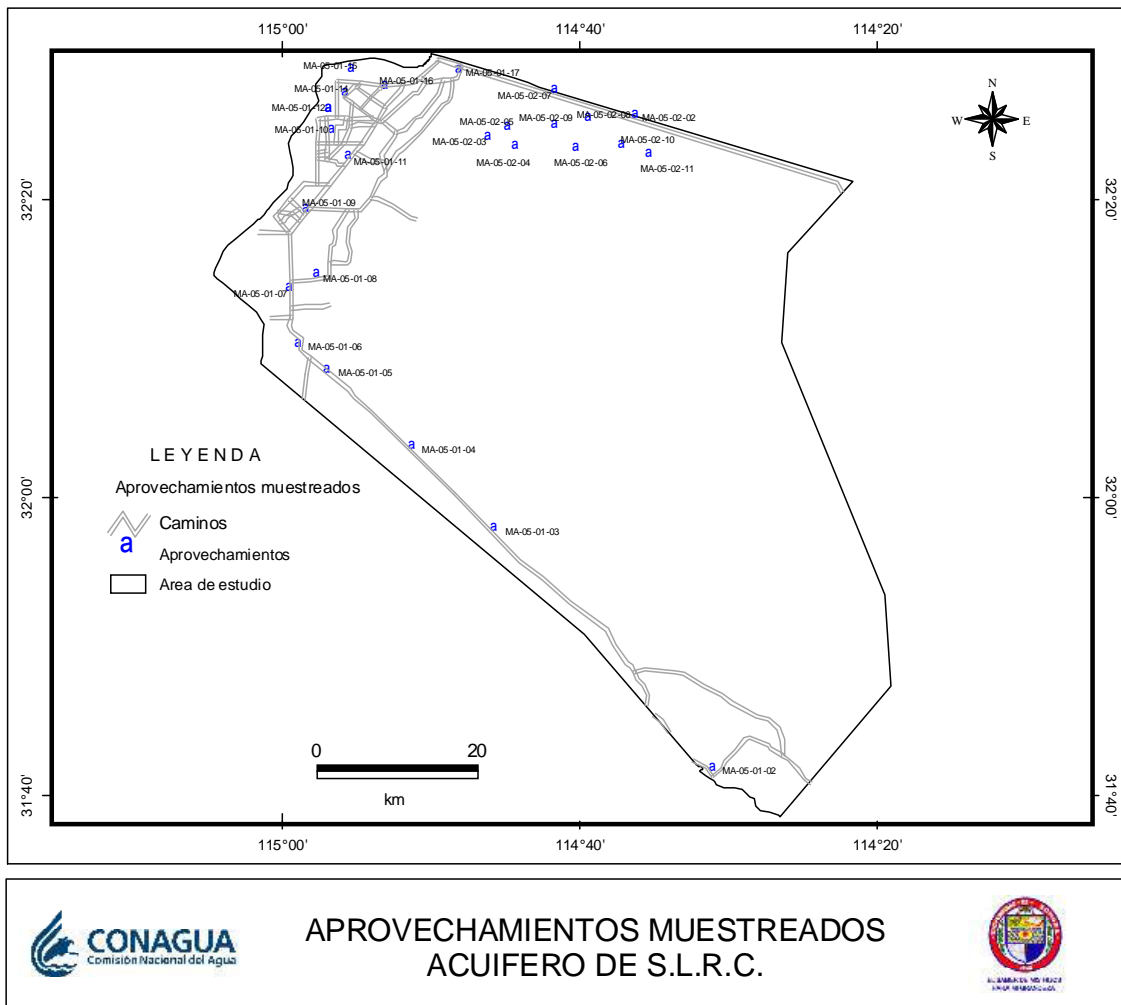


Tabla 5. Parámetros físicos de campo y localización de puntos de muestreo Acuífero de San Luis Río Colorado, Sonora, México

Muestreo				Parámetros Físicos de Campo			Localización			
No.	Clave	Fecha	Hora	C. E.	Temp	pH	Coordenadas UTM		Localidad	
							X	Y		
1	MA 05 01 02	09/12/2005	11:45	3740.0	29.10	7.75	737272	3508727	Golfo de Santa Clara	
2	MA-05-01-03	09/12/2005	12:55	1450.0	28.90	7.39	713392	3538117	El Doctor	
3	MA-05-01-04	09/12/2005	14:10	1399.0	31.20	7.58	704575	3548167	Ej. Flor del Desierto	
4	MA-05-01-05	09/12/2005	14:55	3820.0	29.00	7.70	695327	3557276	Mesa Rica	
5	MA-05-01-06	09/12/2005	15:50	3000.0	34.90	7.66	692209	3560477	Ej. Nuevo Michoacán	
6	MA-05-01-07	09/12/2005	15:45	2510.0	28.00	7.69	691153	3567573	Luis B. Sánchez	
7	MA-05-01-08	09/13/2005	10:20	1720.0	29.90	7.90	693974	3569276	Ej. Independencia	
8	MA-05-01-09	09/13/2005	11:20	1281.0	29.00	7.55	692729	3577375	Campillo 2	
9	MA-05-01-10	09/13/2005	13:25	2170.0	24.60	7.20	695245	3587262	Col. Moctezuma N° 2	
10	MA-05-01-11	09/13/2005	12:30	2200.0	25.10	7.27	697088	3584006	Entre Col. Azteca e Islita	
11	MA-05-01-12	09/13/2005	14:10	3280.0	23.90	7.25	694819	3589800	Col. Moctezuma No 2	
12	MA-05-01-14	09/13/2005	15:20	3470.0	23.50	7.07	696646	3591663	Col. Moctezuma No 2	
13	MA-05-01-15	09/13/2005	16:20	2410.0	23.80	7.25	697113	3594767	Hidalgo	
14	MA-05-01-16	09/13/2005	17:00	2570.0	23.90	7.03	700764	3592732	Entre Col. Moc. No 2 y munic. de S.L.R.C.	
15	MA-05-01-17	09/14/2005	03:36	1430.5	27.10	7.51	708522	3594749	S. L. R. C.	
16	MA-05-02-02	09/13/2005	10:55	2120.0	30.80	7.70	727188	3589711	Distrito de Riego N° 14	
17	MA-05-02-03	09/13/2005	12:30	1140.0	29.10	7.60	711793	3586511	Distrito de Riego N° 14	
18	MA-05-02-04	09/13/2005	13:15	1320.0	31.20	7.60	714711	3585469	Distrito de Riego N° 14	
19	MA-05-02-05	09/13/2005	14:10	1230.0	29.40	7.50	713750	3587908	Distrito de Riego N° 14	
20	MA-05-02-06	09/13/2005	14:55	1830.0	28.00	7.60	721043	3585421	Distrito de Riego N° 14	
21	MA-05-02-07	09/13/2005	10:15	2120.0	29.30	7.50	718706	3592515	Distrito de Riego N° 14	
22	MA-05-02-08	09/13/2005	16:15	1770.0	30.60	7.60	722280	3589201	Distrito de Riego N° 14	
23	MA-05-02-09	09/13/2005	17:00	1760.0	36.00	7.60	718751	3588305	Distrito de Riego N° 14	
24	MA-05-02-10	09/13/2005	17:45	1930.0	29.50	7.80	725937	3585905	Distrito de Riego N° 14	
25	MA-05-02-	09/13/2005	15:30	1410.0	29.70	7.90	728786	3584971	Distrito de Riego N° 14	

	11								
--	----	--	--	--	--	--	--	--	--

T: temperatura (° C), pH: potencial de Hidrógeno, C.E. Conductividad eléctrica (µsiems/cm)

X.2 Caracterización Hidrogeoquímica

La interpretación de la geoquímica del agua, permite no solamente conocer la calidad del agua sino la dinámica del flujo subterráneo, con los procesos de intercambio a lo largo de su movimiento y en un nivel mayor de conocimiento, dependiendo de la información disponible, se reconoce el origen de los diferentes orígenes del agua. Para ello es necesario considerar dos principales representaciones; a) **Espacial**, con la que se muestra la distribución de los diversos elementos mayores, el cual tiene mayor influencia en la composición química del flujo subterráneo y; b) **Temporal**, con la que se define su carácter típico y se busca la probable evolución de los diversos parámetros presentes en el flujo subterráneo. Igualmente se revisa el posible origen de diversos contaminantes que degradan la calidad del agua subterránea en algunas zonas, tales como manganeso, fierro, boro y nitratos, así como plaguicidas clorinados principalmente, no siendo el caso de este último para la zona

Para la caracterización de familias de agua se utilizaron los métodos de: a) Diagramas de Piper, b) Clasificación de stiff.

Los diagramas de Piper y Stiff son gráficos y se basan en la clasificación por balance de masas que permiten zonificar la presencia de diferentes tipos de familias hidrogeoquímicas regionalmente. Mientras que para acentuar las diferencias entre tipos de aguas aún del mismo acuífero, y la clasificación de potabilidad por salinidad en términos de STD y CE.

X.3 Distribución de Parámetros Físicos y Químicos

Una parte importante de la interpretación hidrogeoquímica es la distribución espacial de elementos mayores, estas distribuciones se plasmaron en mapas de Isopletras ó mapas de líneas de igual concentración en mg/lit. Así mismo se realizaron distribuciones de dureza total, fluoruro, conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos.

El objetivo de esta representación espacial es buscar el carácter típico del

agua, así como su evolución a través del flujo subterráneo. Una vez caracterizados los tipos de agua tomando en cuenta su correlación hidroestratigráfica, se zonificaron siguiendo el modelo hidrogeológico conceptual descrito.

X.3.1 Conductividad Eléctrica

La conductividad eléctrica de una solución es la capacidad de la misma para transportar la corriente eléctrica. Debido a que los iones son los responsables de la conducción de la electricidad a través de una muestra de agua, la conductividad se relaciona con la concentración iónica total. Por lo tanto, la conductividad puede ser usada para dar una idea de los sólidos totales disueltos en una muestra de agua.

La determinación de este parámetro se efectúa mediante un electrodo conectado a un conductivímetro. La unidad de medición es el recíproco de la resistencia en ohms y se expresa para aguas subterráneas, como microsiemens por centímetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$) equivalente a $\mu\text{mhos}/\text{cm}$. (A. Molina, 1996).

La conductividad eléctrica es altamente dependiente de la temperatura. Se incrementa aproximadamente 2% por cada $^{\circ}\text{C}$ (Lloyd, 1985). La razón principal es que la viscosidad del agua disminuye con el incremento de temperatura y por tanto la resistencia al movimiento de los iones decrece. Al realizar la medición de este parámetro en campo se puede identificar la posible estratificación de la calidad del agua y correlacionar las profundidades de captación de pozos y norias.

Un criterio representativo para la interpretación de la calidad del agua en función de la medición de la CE, es el establecido por la American Potability and Health Association (APHA, 1995), que clasificó la calidad del agua de acuerdo con los criterios que se muestran en la tabla 6.

Tabla 6. Criterios de clasificación de la calidad del agua

Criterio	Tipo	Rango	Unidades
i)	Agua dulce	100 – 2 000	$\mu\text{ S}/\text{cm}$
ii)	Agua salobre	2 000 – 5 000	$\mu\text{ S}/\text{cm}$
iii)	Agua de mar	5 000 – 45 000	$\mu\text{ S}/\text{cm}$
iv)	Salmuera	45 000 – 100 000	$\mu\text{ S}/\text{cm}$

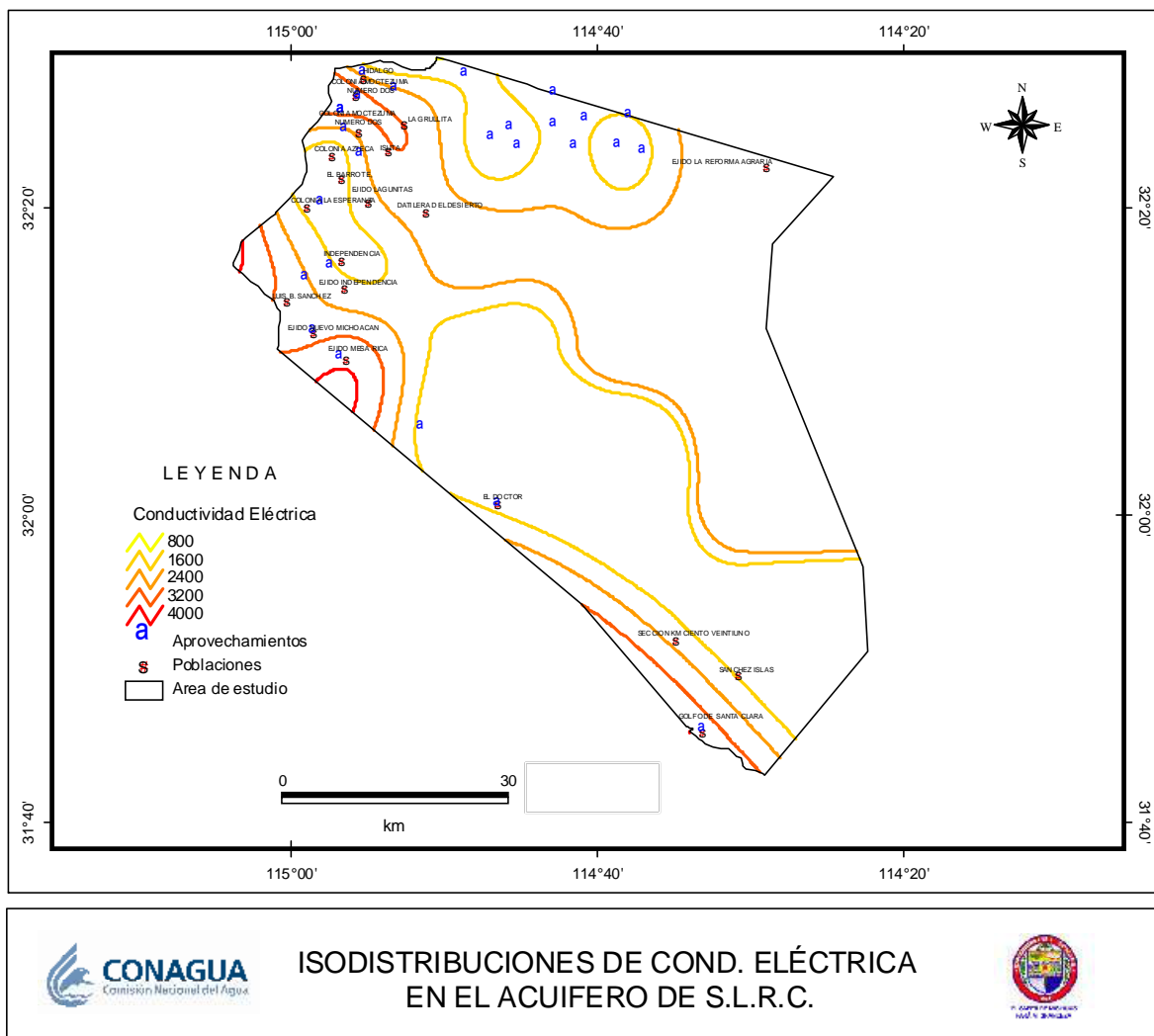
Fuente: American Potability and Health Association (APHA, 1995)

En el acuífero de S. L. R. C., los valores de conductividad eléctrica en los sitios de muestreo varían en proporciones similares de agua dulce y agua salobre, éstas oscilan entre 1 140 y 3 820 $\mu\text{S}/\text{cm}$ con promedio de 2 123,2 $\mu\text{S}/\text{cm}$ lo cual representa la calidad típica del área de estudio

Los sitios de muestro clasificados como *agua salobre* se ubican mayormente en la porción noroeste del área de estudio entre el ejido Hidalgo e Islita (aprovechamientos MA-05-01-10, 11, 12, 13, 14 y 15), entre el ejido Independencia y Mesa Rica (MA-05-01-07, 08, 05), dos pertenecientes al Distrito de Riego N° 14 (MA-05-02-02 y 08) y un aprovechamiento muy aislado ubicado en el poblado de Golfo de

Santa Clara al sur del área. Los aprovechamientos restantes se han clasificado de tipo *agua dulce*, éstos se ubican principalmente en la porción norte del área de estudio en el Distrito de Riego N° 14, en el municipio de San Luis Río Colorado, y en la porción W-SW en cuatro aprovechamientos. Figura 20.

Figura 20. Concentraciones de conductividad eléctrica en los aprovechamientos del acuífero de San Luis Río Colorado, año 2005.

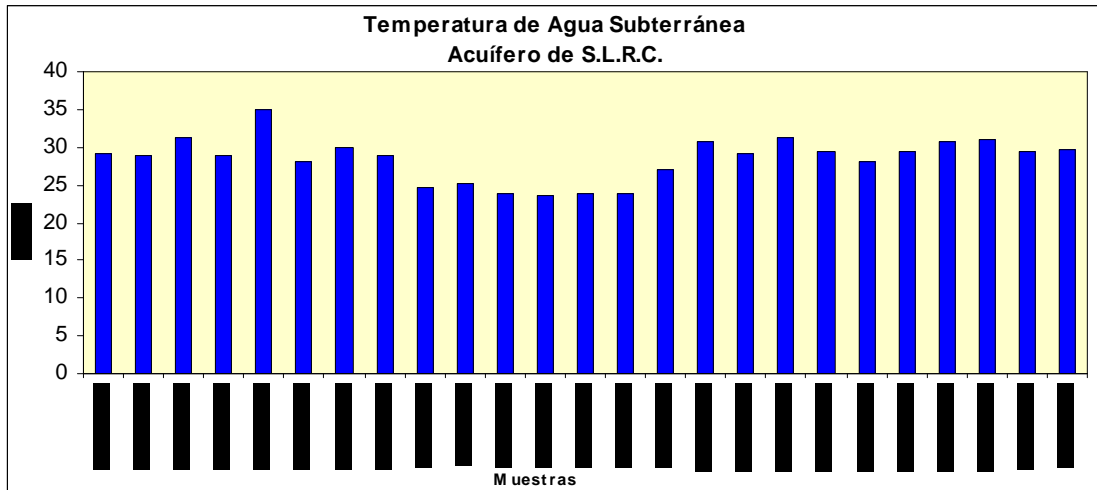


X.3.2 Temperatura

La temperatura es un parámetro físico que en la naturaleza generalmente aumenta con la profundidad, a este fenómeno se le conoce con el nombre de gradiente geotérmico. Dicho gradiente tiene un promedio de 3 °C por cada 100 m de profundidad. Sin embargo existen excepciones cuando el sistema hídrico esta en relación con sistemas extremos frío-calor, ya que por lo general la temperatura en el agua subterránea se mantiene en equilibrio con las rocas del acuífero. Por lo anterior es muy útil llevar a cabo medidas de este parámetro en pozos y obtener variaciones con la profundidad, las cuales pueden servir de apoyo en la interpretación de la circulación del flujo subterráneo, inferir los tipos de rocas y como indicadores de las zonas de recarga (Mazor, 1997).

En general, en el área de estudio, las temperaturas medidas en los sitios de muestreo varían de 23.5°C a 34.90°C (Figura 21). La temperatura subterránea mayor corresponde al aprovechamiento MA-05-01-06 en el ejido Nuevo Michoacán con 34.9°C; y la mínima corresponde a la muestra MA-05-01-14 de la Colonia Moctezuma N° 2. La variación entre el máximo y el mínimo es de 11.4 °C.

Figura 21. Concentraciones de la Temperatura en los aprovechamientos del acuífero de San Luis Río Colorado, año 2005.

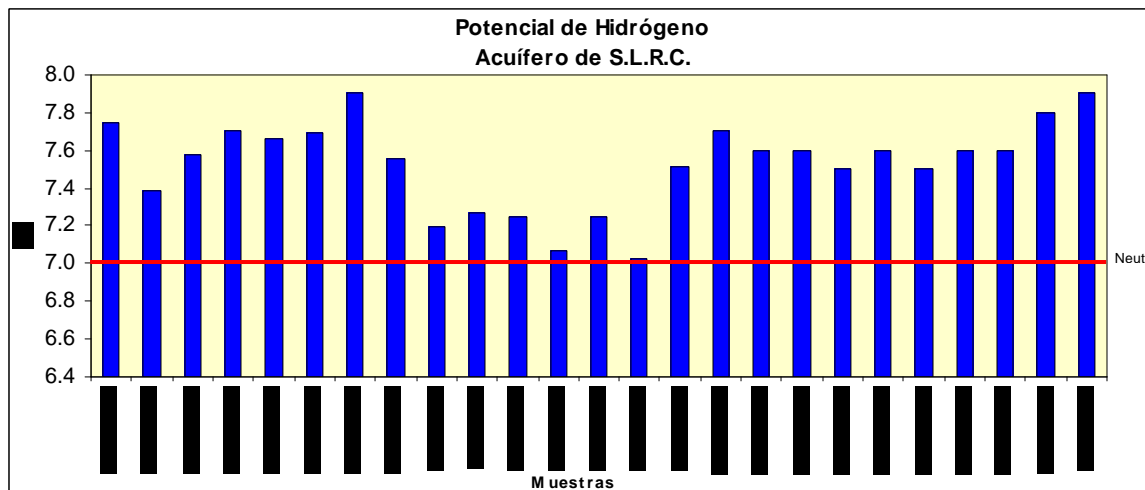


X.3.3 Potencial Hidrógeno (pH)

La medición del pH debe realizarse *in situ* debido a los cambios que se pueden sufrir por la pérdida o ganancia de gases disueltos, tales como CO₃. El agua subterránea generalmente esta en equilibrio a una presión parcial de CO₃ mucho mas alta (10⁻¹ a 10⁻³ bar) que la de la atmósfera (10⁻³ a 10⁻⁵ bar), por lo que cuando esta expuesta a la atmósfera, este gas escapa y el pH se incrementa (Freeze y Cherry, 1979).

El rango de potencial hidrogeno se mantiene ligeramente por encima de la neutralidad, la mayoría de las muestras analizadas corresponden con valores de pH en el rango de 7,2 a 8,0, y un valor promedio de 7,5, lo que indica que en general para toda el área de estudio el agua es ligeramente alcalina, es decir, que existe una importante presencia de carbonatos en la zona de estudio (Figura 22).

Figura 22. Concentración de pH en los aprovechamientos del acuífero de San Luis Río Colorado, año 2005.



X.3.4 Dureza Total

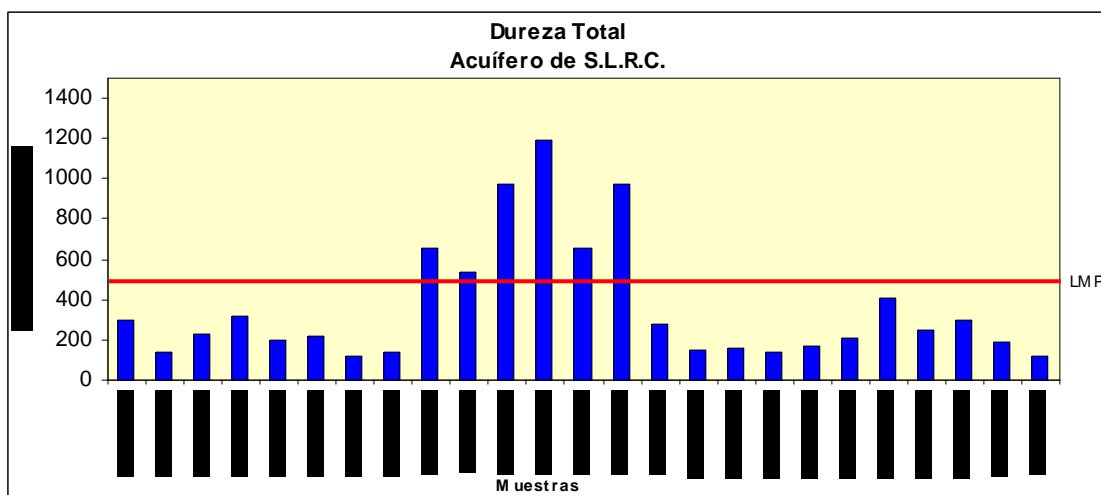
La dureza mide la capacidad de un agua para consumir jabón o producir incrustaciones. Las definiciones actuales la identifican con el contenido en iones alcalinoterreos, esencialmente calcio más magnesio (Ca+Mg).

El agua se puede clasificar por su dureza, pero esta clasificación varía con las localidades de acuerdo con las aguas disponibles. Agua con menos de 50 mg/l de CaCO_3 se denomina blanda, hasta 100 mg/l ligeramente dura, hasta 200 mg/l moderadamente dura y mayor de 200 mg/l muy dura (OMS, 2004; USEPA, 2004). El límite máximo permisible (LMP) es 500 mg/l según la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 (NOM).

En general, las concentraciones en el acuífero de San Luis Río Colorado varían de 123,0 mg/l a 1 193,0 mg/l. Sin embargo, el agua se puede clasificar de dos tipos: predominantemente de agua muy dura ya que el 68% de los aprovechamientos presentaron concentraciones mayores a los 200 mg/l.

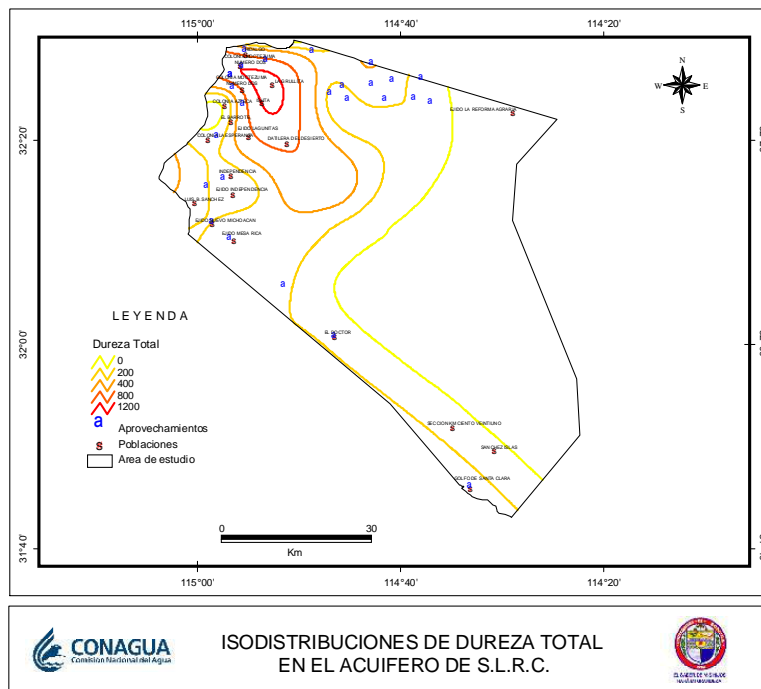
El segundo tipo es de un 32% de agua moderadamente dura. Los aprovechamientos con concentraciones por arriba del LMP (Figura 23) corresponden a MA-05-01-11, 10, 15, 12, 16 y 14 con valores de 532, 553, 657, 968, 976, 976 y 1193 mg/l respectivamente, siendo el último valor el de mayor concentración para todo el acuífero.

Figura 23 Concentración de dureza total en los aprovechamientos del acuífero de San Luis Río Colorado, año 2005.



La configuración de las curvas de isodistribuciones de dureza total para los análisis del 2005, (Figura 24) muestra que las mayores concentraciones se presentan al NNW del área de estudio en los pozos cercanos al municipio de San Luis Río Colorado, y las menores hacia el sur entre los poblados del El Doctor y El Golfo de Santa Clara.

Figura 24 Concentraciones de dureza total en los aprovechamientos del acuífero de San Luis Río Colorado, año 2005.



X.3.5 Fluoruros

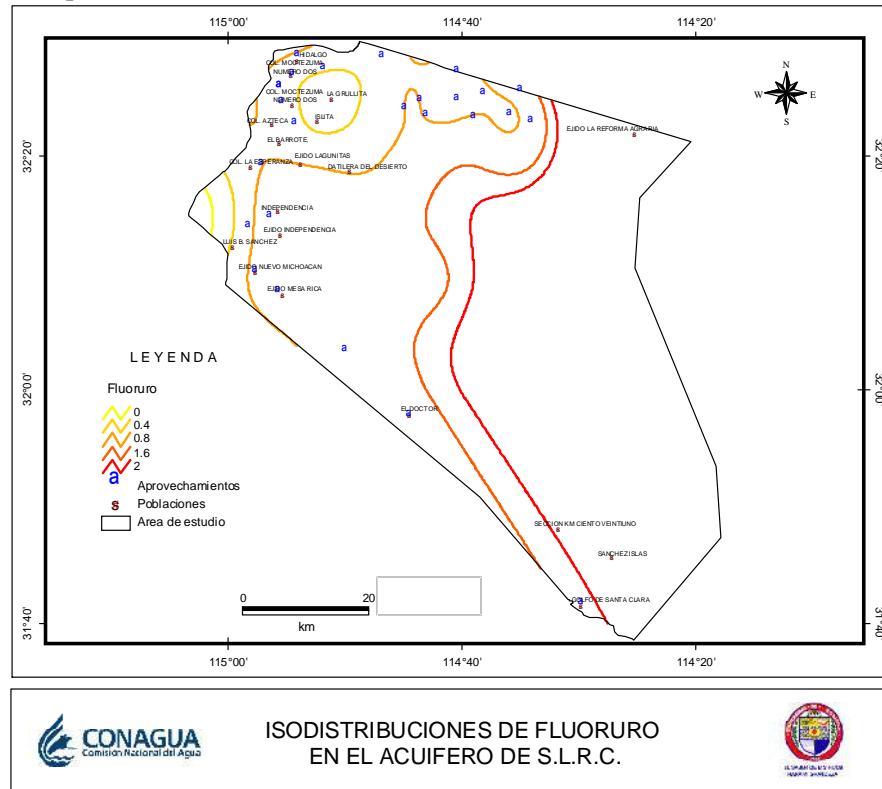
El flúor, es un elemento que se puede presentar en el agua de manera natural, muchos minerales contienen concentraciones flúor y puede estar en cualquier tipo de roca. Los fluoruros son liberados al aire cuando el viento arrastra el suelo. Los procesos de combustión en las industrias pueden liberar fluoruro de hidrógeno al aire. Los fluoruros que se encuentran en el aire acabarán depositándose en el suelo o en el agua.

Las concentraciones de fluoruros en el acuífero de S.L.R.C., varían de 0,40 a 1,80 mg/l. El límite máximo permisible que establece la Norma es de 1,5 mg/l, para uso y consumo humano. Sólo un pozo presenta valores mayores a dicho límite y pertenece a la clave MA-05-01-02, del poblado Golfo de Santa Clara. Otro pozo muy cercano al LMP es el MA-05-01-03 ubicado en El Doctor con una concentración de 1,20 mg/l

En la figura 25 se observan las curvas de isodistribuciones de fluoruros, donde se muestra que las líneas de menores concentraciones se ubican en la parte NNW del área de estudio en y alrededor de los poblados Ejido Islitas, Col. Moctezuma No. 2, Luis B. Sánchez y en el municipio de S.L.R.C. Así mismo las mayores concentraciones al sur del acuífero, cerca del golfo de Santa Clara. Las altas concentraciones de fluoruros al sur del área de estudio, posiblemente se debe a las bajas concentraciones de calcio y altas de sodio que propician el aumento.

Figura 25 Concentraciones de fluoruro en los

aprovechamientos del acuífero de San Luis Río Colorado, año 2005.

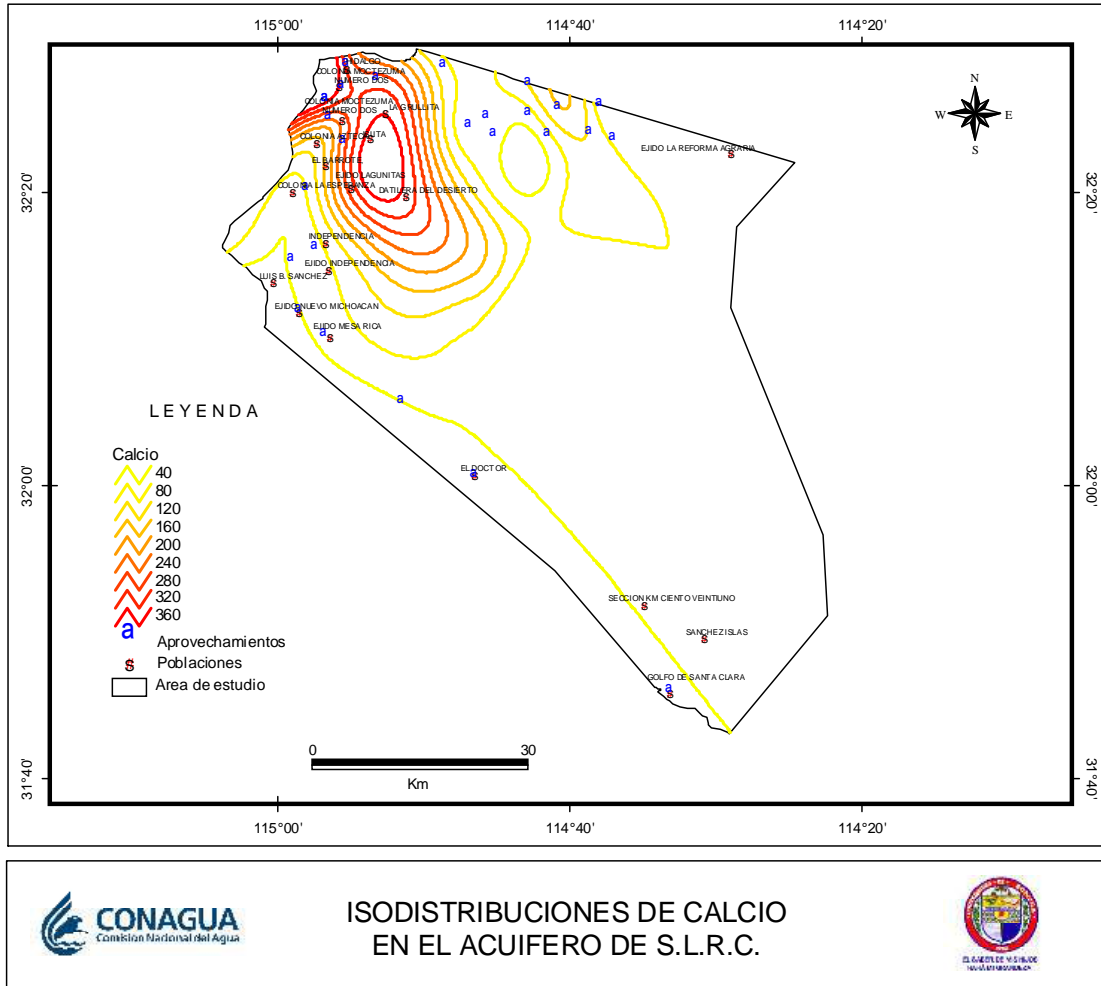


X.3.6 Calcio

Las concentraciones de calcio (Ca^{++}) en las aguas subterráneas, son muy comunes debido a la presencia de rocas que forman el medio geológico. Puede provenir de la liberación de algunos constituyentes de las rocas ígneas, principalmente basaltos y riolitas por el ataque a los minerales del grupo de los feldespatos y plagioclasas, así como resultado de la disolución de rocas calcáreas en las que el carbonato de calcio se disuelve fácilmente en el agua, a condición de que ésta contenga abundantes iones H^+ (Custodio y Llamas, 1996).

La configuración de las curvas de isodistribuciones del calcio, para los análisis del 2005 (Figura 26), muestra que las mayores concentraciones se presentan al NNW del área de estudio en los pozos del Ej. La Grullita y La Islita, así como las menores concentraciones se localizan en la parte sur en la línea de costa entre el poblado del Golfo de Santa Clara y El Doctor, en la parte oeste entre la Col. Esperanza y Ejido Independencia, y en la parte norte cerca del municipio de S.L.R.C.

Figura 26 Distribución de dureza cálcica en los aprovechamientos del acuífero de San Luis Río Colorado, año 2005.

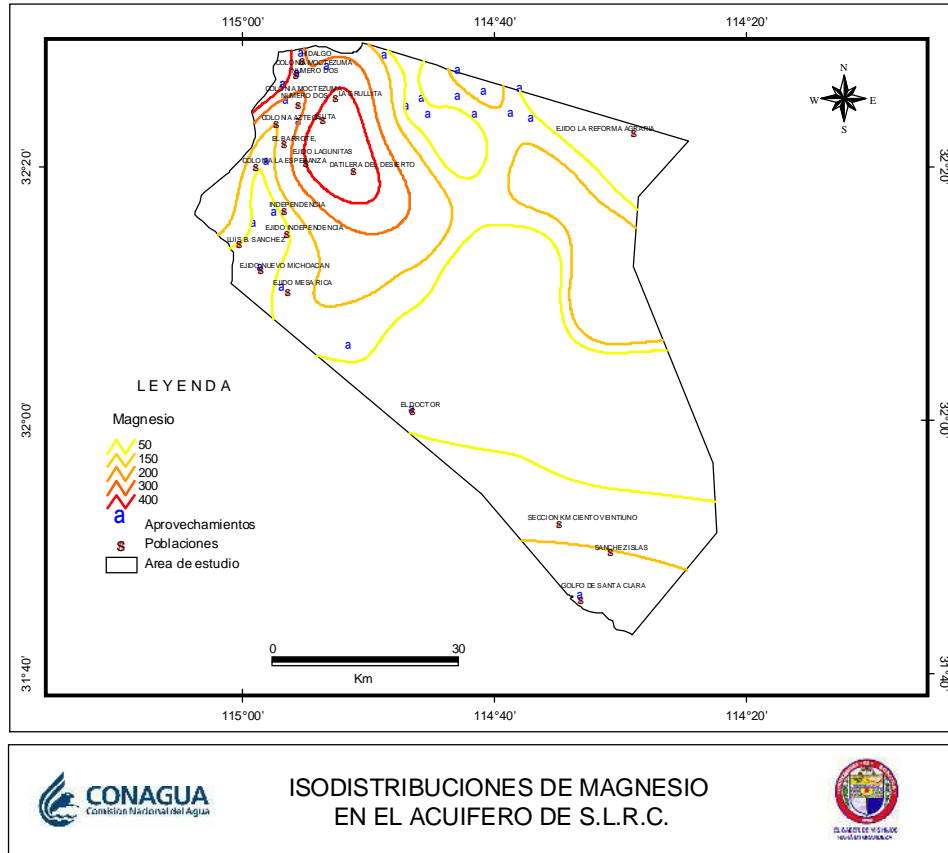


X.3.7 Magnesio

Este ión se encuentra formando parte, tanto de rocas ígneas como sedimentarias. La principal fuente de aportación de este catión es la disolución de dolomías y calizas dolomíticas y al ataque de silicatos magnésicos y ferromagnésicos. (Custodio y Llamas, 1996).

Las curvas de isodistribuciones (Figura 27) muestra que las mayores concentraciones se presentan al NNW del área de estudio cerca del Ej. La Grullita y La Islita. Las concentraciones menores se localizan entre la Col. Esperanza y el Ejido Independencia, así como también en la parte norte del área en la batería de pozos federales.

Figura 27 Distribución de magnesio en los aprovechamientos del acuífero de San Luis Río Colorado, año 2005.

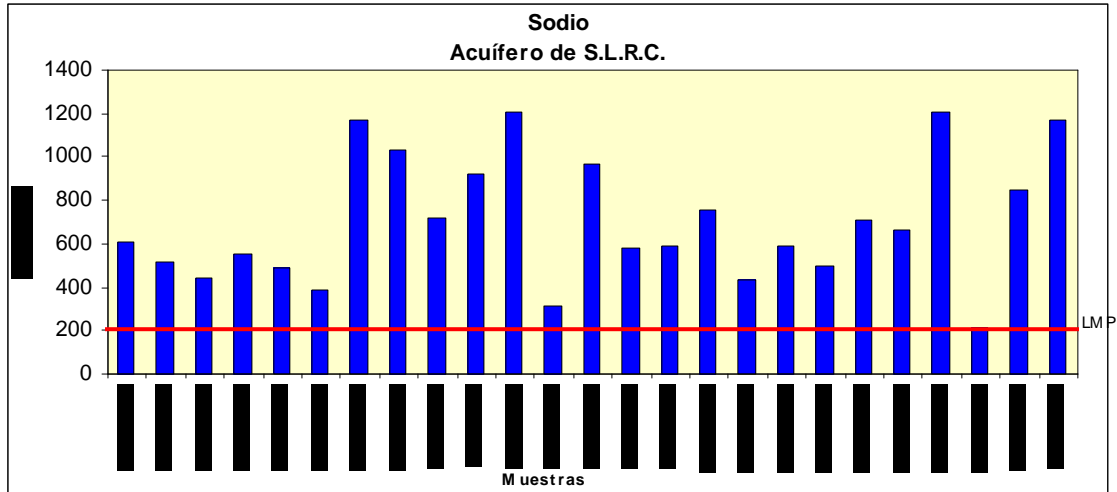


X.3.8 Sodio

Las concentraciones de sodio (Na^+) en el agua subterránea, son muy comunes debido a la presencia de rocas que forman el medio geológico. Este ión puede provenir de la liberación de algunos constituyentes de las rocas ígneas, principalmente basaltos y riolitas donde son el resultado del ataque a los minerales del grupo de los feldespatos y plagioclasas, así como por contaminación urbana e industrial (Custodio y Llamas, 1996)

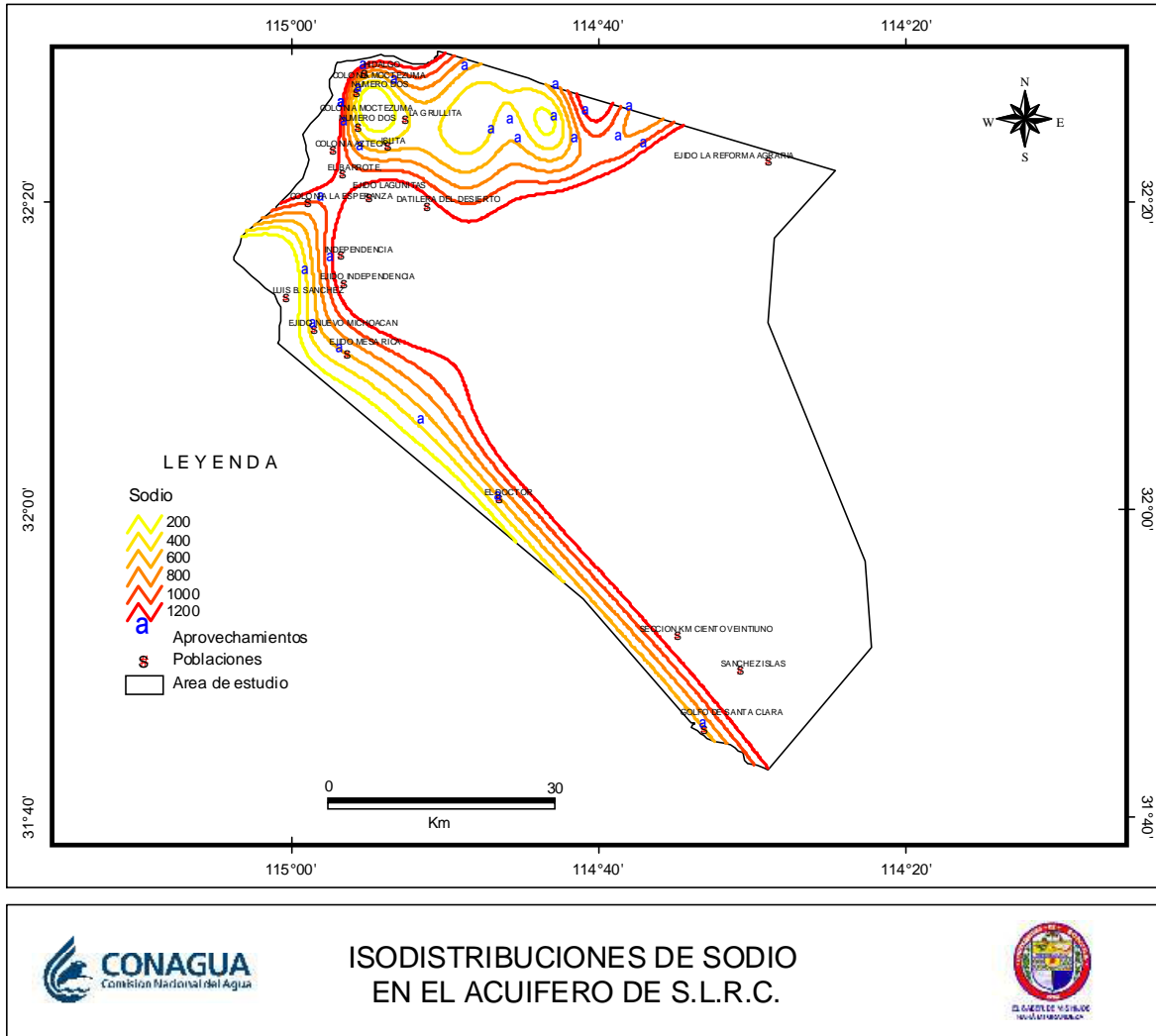
Para el sodio, la NOM establece 200 mg/l como LMP. Las concentraciones en el acuífero de S.L.R.C se encuentran por arriba del límite establecido, estas oscilan entre 216 y 1 211 mg/l. Los valores para cada uno de los aprovechamientos, se localizan en la figura 287.

Figura 28. Concentración de sodio en los aprovechamientos del acuífero de San Luis Río Colorado, en el años 2005.



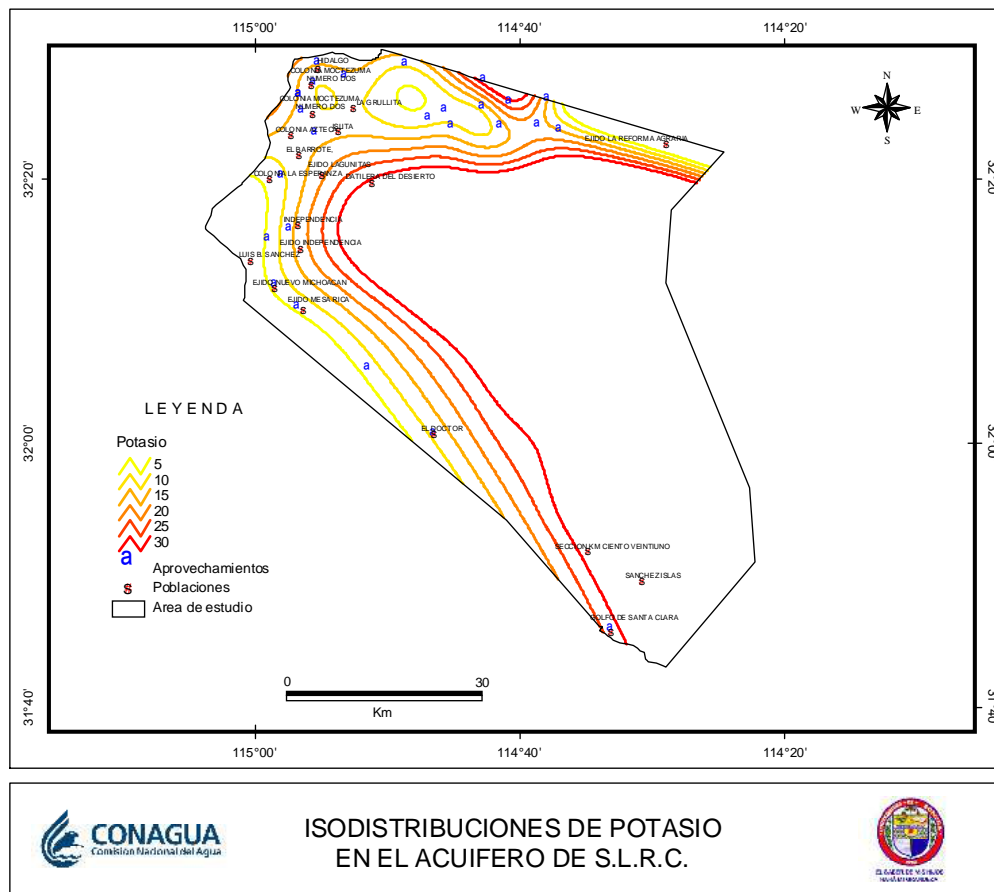
En la figura 29, se observan las curvas de isodistribuciones y muestran que las mayores concentraciones se presentan al NNW del área de estudio cerca de la Colonia Moctezuma No 2, Hidalgo y Ejido Independencia. También en la parte norte del área en la batería de pozos federales. Hacia el sur del área de estudio, se muestra un incremento de la línea de costa hacia adentro del acuífero.

Figura 29 Distribución de sodio en los aprovechamientos del acuífero de San Luis Río Colorado, en el año 2005.



En las curvas de isodistribución de potasio presentes en la figura 30, muestran que las mayores concentraciones se localizan en la zona de la batería de pozos federales en el norte del área de estudio y las menores concentraciones al NNW alrededor de las poblaciones de La Grullita, Col Moctezuma No. 2 y Ejido Mesa Rica. Así mismo en la parte sur del área se observa un incremento de la línea de costa, hacia el interior del acuífero.

Figura 30. Distribución de potasio en los aprovechamientos del acuífero de San Luis Río Colorado, en el año 2005.

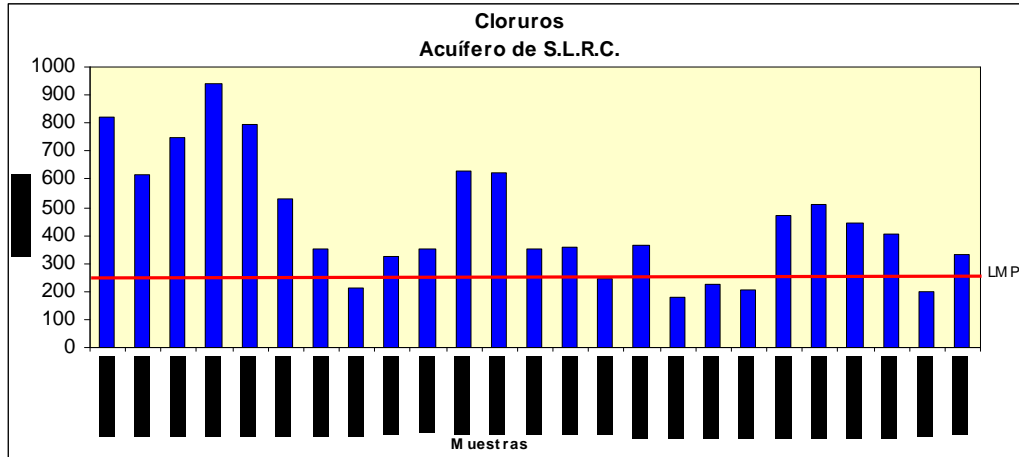


X.3.9 Cloruro

Este ión puede proceder del lavado de terrenos de origen marino; las aguas congénitas y fósiles pueden aportar cantidades importantes; el agua de lluvia y su concentración en el terreno; la mezcla con agua marina en regiones costeras; el ataque de rocas, aunque en general el aporte es pequeño por ser un elemento escaso en la corteza terrestre. Los vertidos industriales y urbanos pueden aportar cantidades importantes (Custodio y Llamas, 1996).

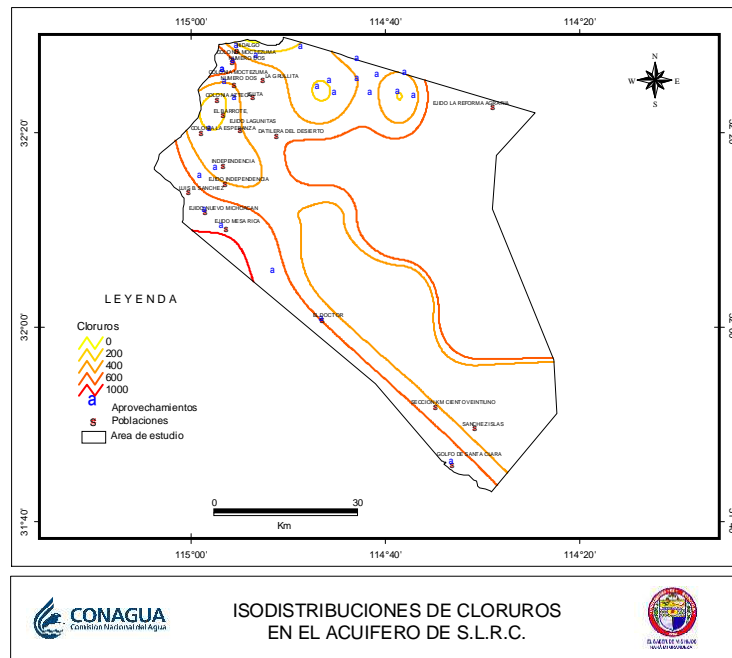
La NOM establece un LMP para el cloruro de 250 mg/l para uso y consumo humano. En el área de estudio, solo 6 aprovechamientos presentan valores dentro de LMP que varían de 181 a 248 mg/l sin embargo son valores altos. El resto oscila entre 327 y 941 mg/l (Figura 31). Como en el resto de los iones el valor máximo corresponde al aprovechamiento MA-05-01-05 el cual se dispara hasta valores de 941,0 mg/l, este pozo se ubica en el Ej. Mesa Rica en la región central-Este del área de estudio.

Figura 31 Concentración de cloruros en los aprovechamientos del acuífero de San Luis Río Colorado, en el años 2005.



La configuración de las curvas de isodistribuciones de los cloruros, (Figura 32) muestra que las mayores concentraciones se presentan en la porción Este del área de estudio en el Ej. Mesa Rica y en el área de la línea de costa entre el poblado del Golfo de Santa Clara y El Doctor (Estación Militar). Sin embargo las curvas con valores por arriba del LMP se encuentran en todo el área. Las concentraciones aptas para agua potable se encuentran por la Col. Esperanza y en la parte norte, al este del Municipio de S.L.R.C.

Figura 32. Distribución de cloruros en los aprovechamientos del acuífero de San Luis Río Colorado, estudio del año 2005.



X.3.10 Alcalinidad

La NOM y la EPA no establecen un límite máximo permisible para la

alcalinidad en agua potable. En el acuífero de San Luis Río Colorado las concentraciones oscilan entre 82,0 a 364,0 mg/l. Las mayores concentraciones se localizan en el municipio de S.L.R.C., Hidalgo, Col. Moctezuma No. 2, entre Col. Azteca e Islita y entre El Doctor y el Golfo de California. Los aprovechamientos con menor concentración se encuentran en la parte norte en la batería de pozos federales y entre la Col. Esperanza y Ejido Flor del Desierto, al este del área (ver figura 33).

Figura 33. Distribución de alcalinidad en los aprovechamientos del acuífero de San Luis Río Colorado, estudio del año 2005.

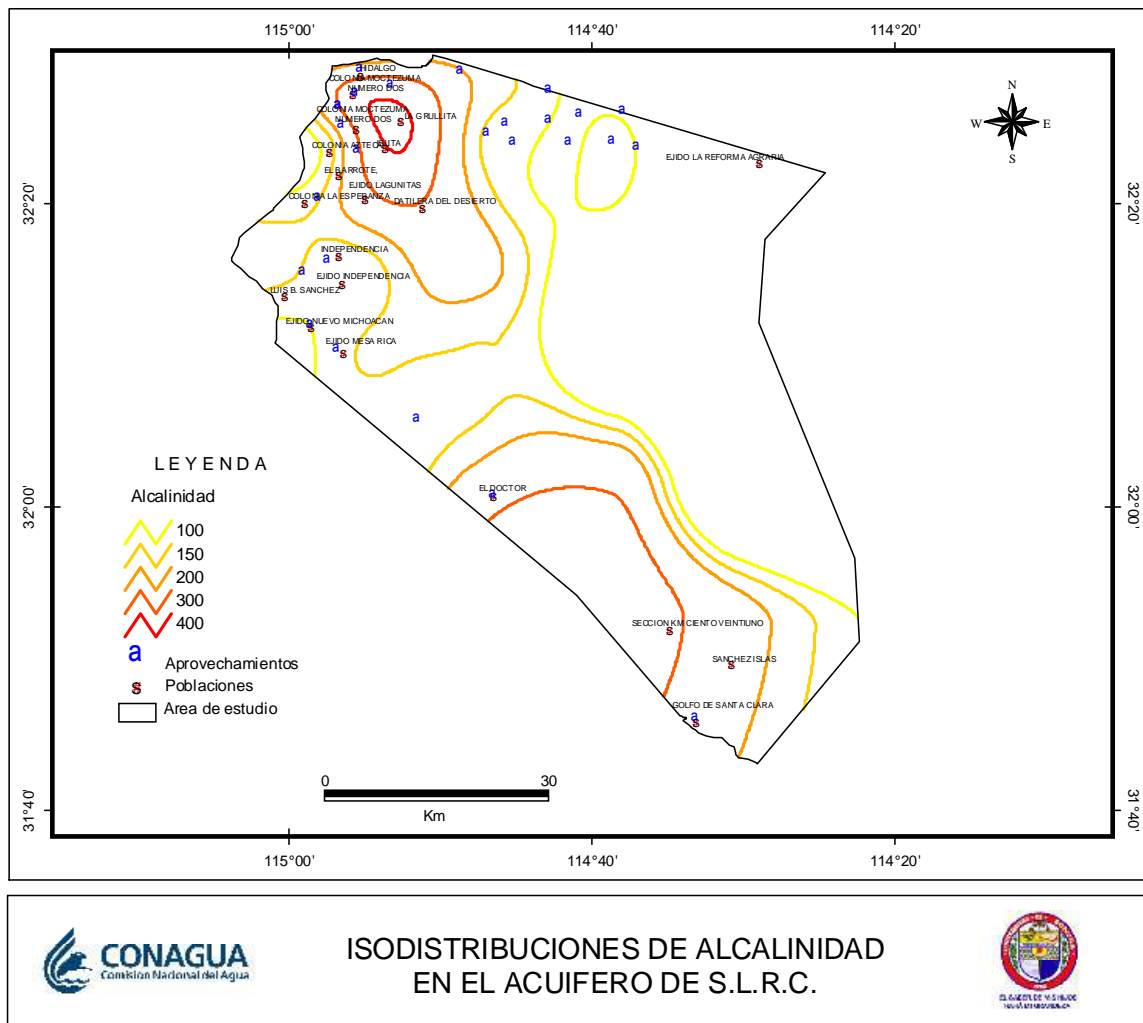
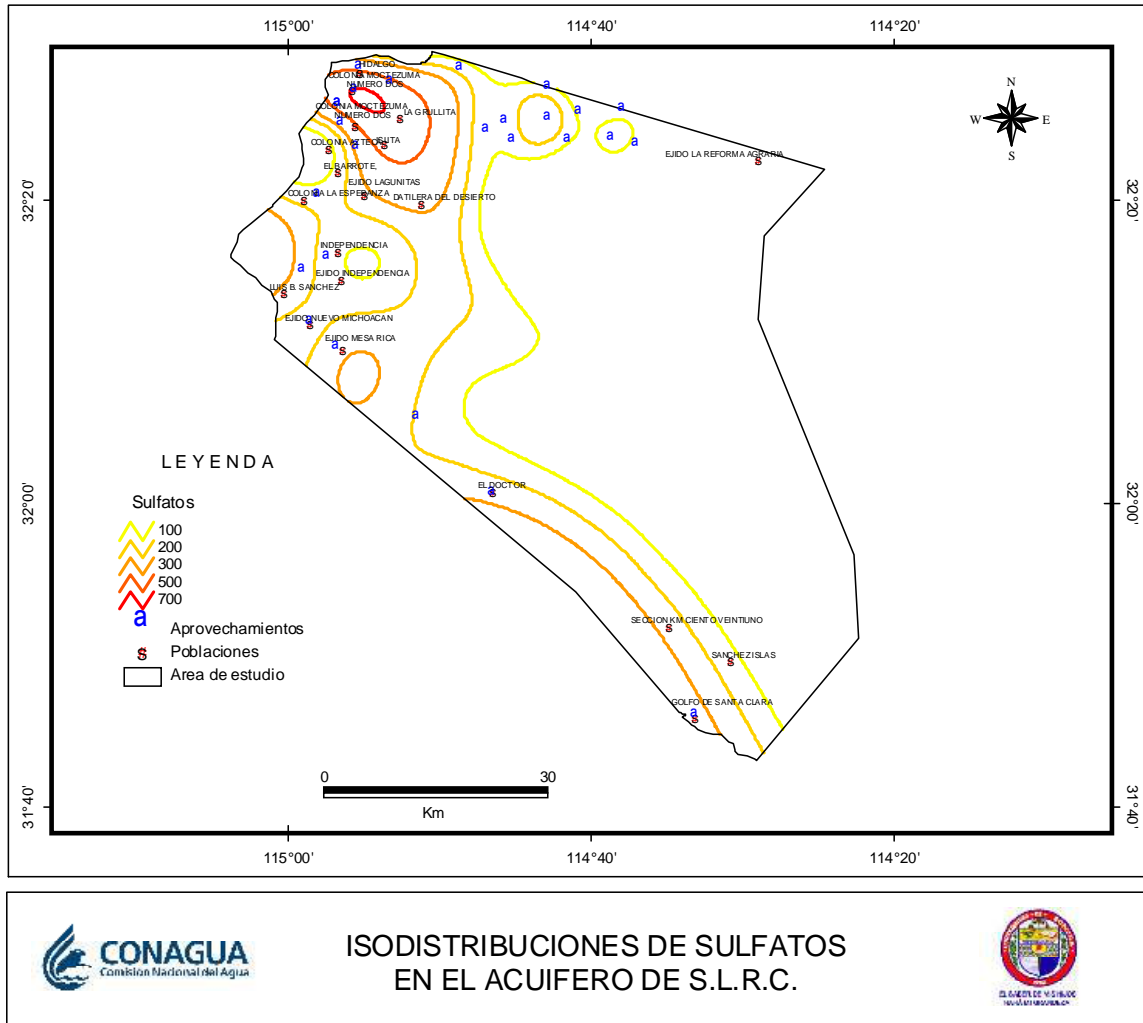


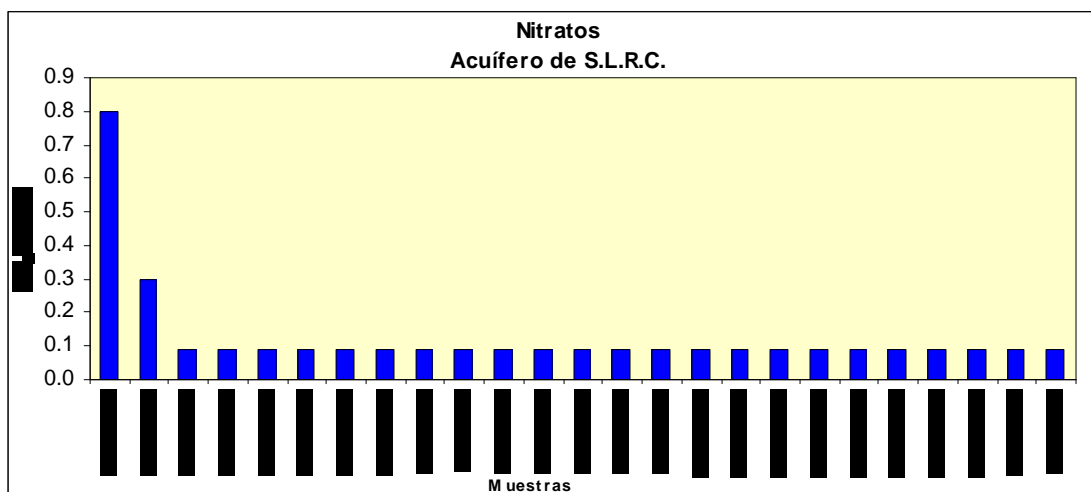
Figura 34 Distribución de sulfatos en los aprovechamientos del acuífero de San Luis Río Colorado, estudio del año 2005.



X.3.11 Nitratos

Las concentraciones de nitrato (en términos de nitrógeno) en el área de estudio, es muy homogénea, la mayoría de los datos obtenidos presentan valores menores a 0.1 mg/l a 0.8 mg/l, Todos por abajo del límite máximo permisible establecido por la NOM de 10 mg/l para uso y consumo humano (Figura 35).

Figura 35 Concentraciones de nitratos en los aprovechamientos del acuífero de San Luis Río Colorado.



X.4 Calidad del Agua en términos de salinidad

La calidad del agua en el área de estudio, se obtuvo de la clasificación de Sólidos Totales Disueltos (STD), en base al esquema de Frezee y Cherry (1979), (Tabla 7). Para el área de estudio, de los 25 aprovechamientos muestreados el 36% se clasificó como agua dulce, mientras que el 64% se clasificaron como agua salobre, que a su vez, se encuentran por arriba del límite máximo permisible establecido por la NOM de 1000 mg/l para agua potable.

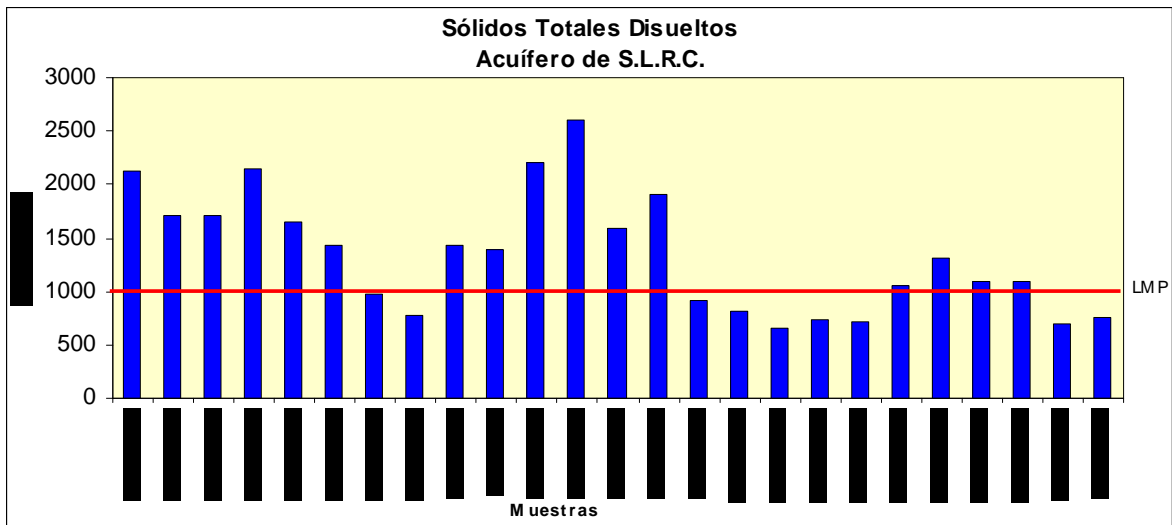
Tabla 7 Esquema de Clasificación de Frezee y Cherry.

CATEGORIA	SOLIDOS TOTALES DISUELTOS (Mg/Lt)
Agua dulce	0-1000
Agua Salobre	1,000-10,000
Agua salina	10,000-100,000
Salmuera	Más de 100,000

Cabe mencionar, que los aprovechamientos clasificados como de agua dulce, sus valores STD para algunos aprovechamientos se encuentran muy cercanos a la norma establecida para agua potable.

Las concentraciones de los pozos con agua salobre varían de 1 058,0 en el Distrito de Riego N° 14 (MA-05-02-06) hasta 2610.0 en la Colonia Moctezuma N° 2 (MA-05-01-14) mg/l. Los demás aprovechamientos de este tipo se distribuyen por la línea de costa o región W-SW, otra parte se encuentra concentrados en la porción NW y algunos dentro del área del Distrito de Riego N° 14 al norte del área. (Figura 36).

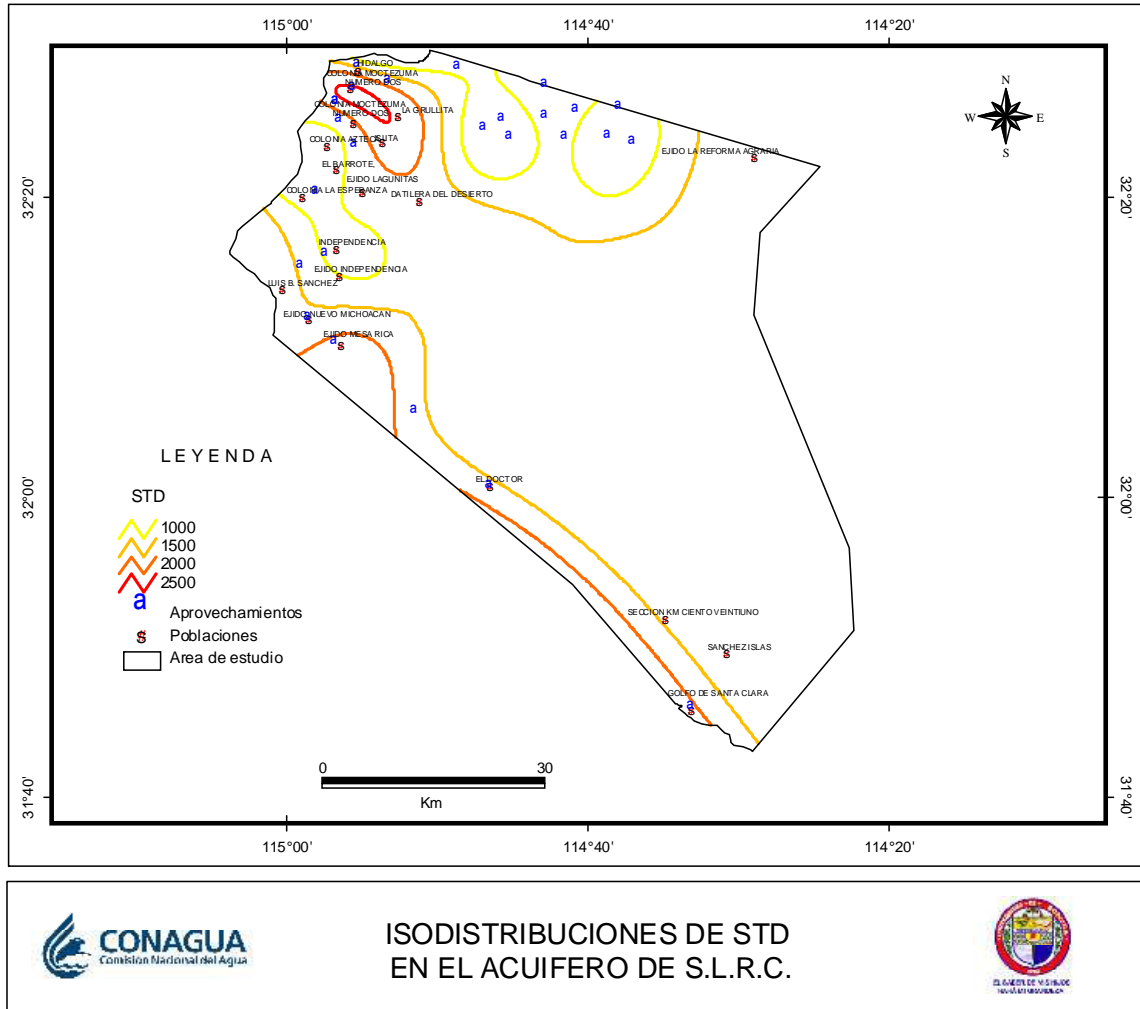
Figura 36. Concentraciones de sólidos totales disueltos (STD) en los aprovechamientos del acuífero de San Luis Río Colorado.



Por otra parte, los aprovechamientos clasificados como de agua dulce se encuentran distribuidos principalmente en el norte del área, en el Distrito de Riego N° 14 y sólo dos en la porción W del área en el Ejido Independencia (MA-05-01-08) y Campillo 2 (MA-05-01-09), sin embargo, para el primero las tendencias a agua salobre son más notorias (970 mg/l).

Lo mismo sucede para la muestra recolectada en el municipio de San Luis Río Colorado (MA-05-01-17) con 920 mg/l (Figura 37).

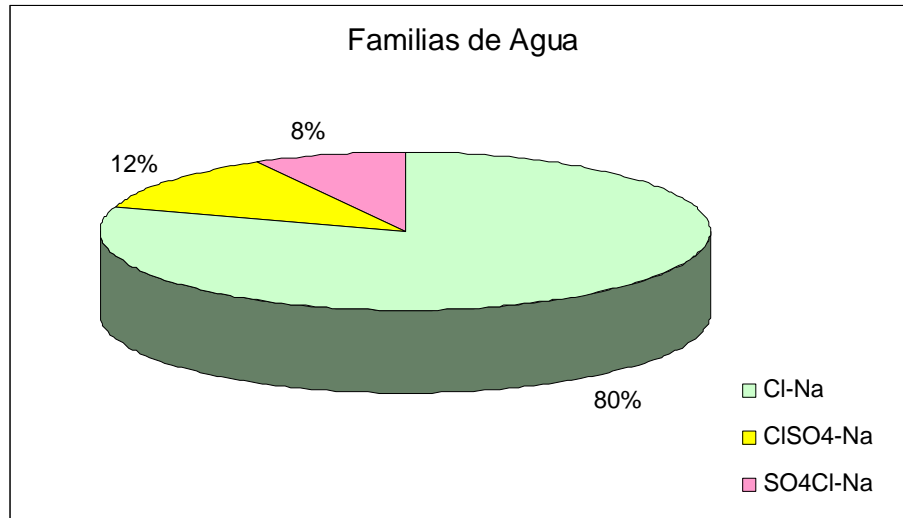
Figura 37. Distribución de sólidos totales disueltos (STD) en los aprovechamientos del acuífero de San Luis Río Colorado, estudio del año 2005.



X.5 Clasificación de las Familias de Agua

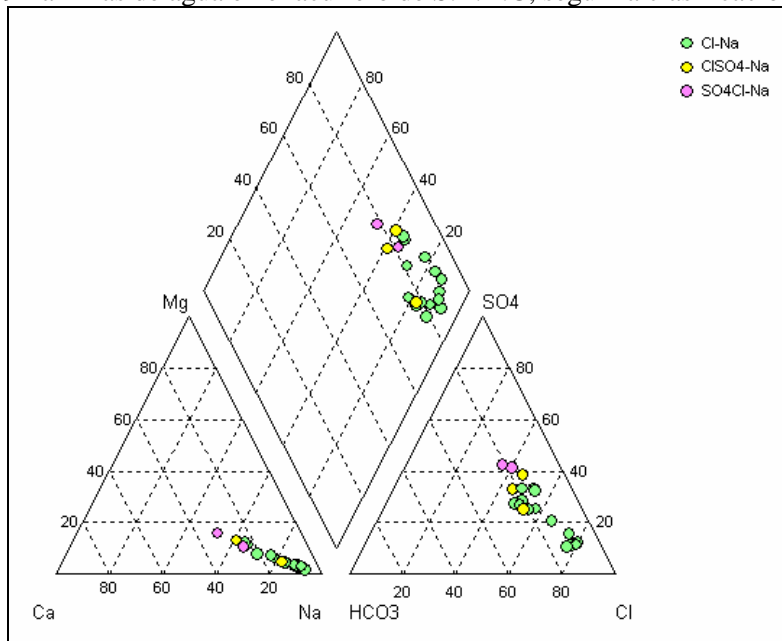
Un aspecto importante en la interpretación hidrogeoquímica, es determinar el anión y el catión predominante en el agua, para correlacionarse con el tipo o tipos de roca que circula. Para obtener la clasificación de las diferentes familias de agua se formularon los diagramas triangulares de Piper y los diagramas de Stiff, utilizando el software Aquachem versión 3.7, resultando las siguientes familias de agua para las muestras analizadas (Figura 38), las cuales son de mayor a menor presencia:

Figura 38. Porcentajes de familias de agua del acuífero de S.L.R.C, en el año 2005



Cloruradas Sódica (Cl-Na); Cloruradas Sulfatadas Sódica (ClSO₄-Na) y Sulfatadas Cloruradas Sódicas (SO₄Cl-Na) (Figura 39). Otra clasificación muy importante para las familias de agua es la de Stiff, ya que se puede observar más claro el anión y el catión predominante. También con dicha clasificación, se pueden hacer mapas de hidrogeoquímica y zoneamiento de Stiff, en donde se puede observar claramente la distribución espacial de dichas familias.

Figura 39 Familias de agua en el acuífero de S.L.R.C, según la clasificación de Piper

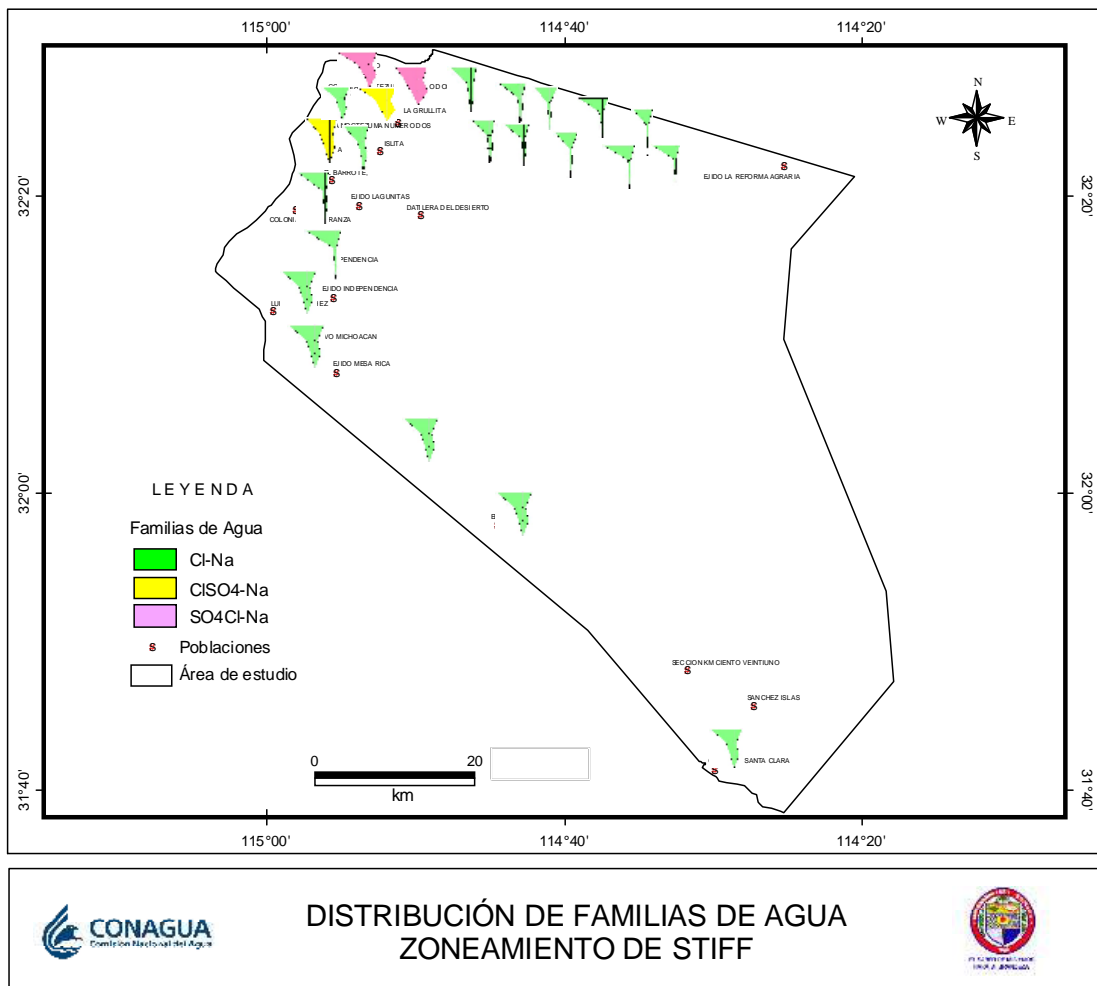


La familia de agua predominante es la clorurada sódica, seguida de concentraciones muy similares entre cloruros y sulfatos. Estas familias son típicas de agua de mala calidad, en este caso, probablemente debido al aporte de sales del agua de riego que se encuentran en la parte este del área, así como también en la

parte norte, la cual colinda con Estados Unidos. La calidad del agua del acuífero, también es afectada por el paleocauce del río Colorado que aporta una gran cantidad de sales principalmente sulfatos que acarrea desde sus inicios. Otro factor muy importante es la alta evaporación la cual aumenta las concentraciones de sodio.

En la Figura 40 se observa claramente la predominancia de agua clorurada sódica. En la parte este del área, margen izquierda del río Colorado se tienen familias tanto cloruradas como sulfatadas aquí se ve claramente la influencia del paleocauce en la calidad del agua que proporciona las altas concentraciones de sulfatos

Figura 40. Distribución de Familias de Agua y Zoneamiento de Stiff Acuífero de San Luís Río Colorado, estudio del año 2005.



X.6 Metales

Algunos metales requeridos por el organismo incluyen el cobalto, cobre,

hierro, manganeso, molibdeno, vanadio, estroncio, y zinc. El caso del hierro es notable entre éstos, siendo vital para la formación de hemoglobina. Sin embargo un alto grado de toxicidad de los metales puede traer consecuencias como perjuicios a la salud humana (intoxicaciones, enfermedades infecciosas y crónicas, muerte).

Así, lo que hace tóxicos a los metales pesados no son en general sus características esenciales, sino las concentraciones en las que pueden presentarse, y casi más importante aun, el tipo de especie que forman en un determinado medio. Por ello en un análisis hidrogeoquímico, la estimación de sus concentraciones es determinante en la obtención de la calidad del agua.

En el análisis químico de las muestras de agua se considero los siguientes metales: As, Ba, Cd, Cr, Co, Cu, Fe, Pb, Mn, Mo, Ni, Se, Sr, Tl, V y Zn. Para el análisis de metales como Níquel, Selenio y Talio, se consideraron los límites máximos permisibles establecidos por la Agencia de Protección al Medio Ambiente (EPA) y para el caso del Molibdeno el propuesto por la OMS. Para el resto de ellos se consideraron los establecidos por la Norma Oficial Mexicana, (NOM-127-SSA1-1994), para uso y consumo humano, los cuales se describen a continuación

Las concentraciones de **Arsénico** van desde no detectadas hasta valores de 0.017 mg/l, y se encuentran por abajo del LMP establecido por la NOM de 0,05 mg/l.

Las concentraciones de **Bario** para el área de estudio están en el rango de valores no detectados hasta 0,115 mg/l. La NOM establece como LMP 0,7 mg/l, por lo que en el acuífero de S.L.R.C las concentraciones se encuentran por debajo de dicho límite

Para el **Cadmio** el valor máximo obtenido es de 0,029 mg/l, así como también existen aprovechamientos donde no se detecto la presencia de éste metal. El LMP que establece la NOM es de 0,005mg/l.

En el caso del **Cromo** todas las concentraciones en el acuífero fueron no detectadas. El LMP establecido por la NOM de 0,05 mg/l.

Para el **Cobalto** las concentraciones son desde no detectadas hasta un valor máximo de 0,028mg/l localizado en EL Sauz de Ures. La NOM, EPA y la OMS no reportan algún LMP para uso y consumo humano.

Tabla 8 Límites Máximos Permisibles para diferentes elementos.

UNIVERSIDAD DE SONORA			
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA			
* Limites Maximos Permisibles considerados en la Cuenca Río Sonora			
Elemento	** Norma Oficial Mexicana	Agencia de Protección al Medio Ambiente (EPA, 200)	OMS
As	0.05	----	----
Ba	0.7	----	----
Cd	0.005	----	----
Cr	0.05	----	----
Co	----	----	----
Cu	2	----	----
Fe	0.3	----	----
Pb	0.01	----	----
Mn	0.15	----	----
Mo	----	----	0.07
Ni	----	0.02	----
Se	----	0.05	----
Sr	----	----	----
Tl	----	0.002	----
V	----	----	----
Zn	5	----	----
Ca	----	----	----
Na	200	----	----
K	----	----	----
Mg	----	----	----
NO ₃ (N)	10	----	----
Fluoruros	1.5	----	----
* Valores en ppm o mg/l			
** NOM-127-SSA1-1994			

En el caso del **Cobre** las concentraciones fueron no detectadas, solo en dos aprovechamientos se detectaron sus valores y estos son de 0,005 y 0,025 mg/l, encontrándose por abajo del LMP que establece la NOM de 2 mg/l.

Las concentraciones de **Estroncio** van desde valores no detectados hasta valores de 5,11 mg/l. No existe un LMP establecido para este ión.

Las concentraciones máximas detectadas de **Fierro** son de 1,54 mg/l, en algunos aprovechamientos no se detecto la presencia de este metal. Los pozos con concentraciones mayores a 0,3 mg/l que es el LMP establecido por la NOM son: Ma-05-01-10, 11, 12, 15 y 16, y se encuentran cerca de Ejido Islita, Col. Moctezuma No 2 y en el municipio de S.L.R.C.

El LMP establecido por la NOM para el **Manganeso** es de 0,15 mg/l. En general las concentraciones en el área de estudio son desde valores no detectados hasta concentraciones de 1,07 mg/l. Los pozos con concentraciones por arriba del LMP son: MA-05-01-10, 11, 12, 14, 15, 16 y 17 que se localizan cerca del Ejido Islita, Col. Moctezuma No 2 y en el municipio de S.L.R.C y en la batería de pozos.

Para el caso del **Molibdeno**, las concentraciones fueron de no detectadas a valores de 0,129 mg/l. La EPA y la NOM no establecen un LMP para uso y consumo humano por lo que se acudió a lo valores de la OMS el cual es de 0,07 mg/l. Para el

área de estudio las concentraciones se encuentran por debajo de dicho límite.

Las concentraciones de **Níquel** para el área de estudio fueron no detectadas. La EPA establece 0,05 mg/l como LMP.

Las concentraciones de **Plomo** fueron no detectadas. El LMP establecido por la NOM es de 0,01 mg/l.

La concentración de **Vanadio** fue no detectada. La NOM, EPA y OMS no establecen un LMP para uso y consumo humano

La concentración de **Zinc** en el área de estudio son bajas, la máxima es 0,148 mg/l, y el LMP establecido por la NOM es de 5 mg/l.

De esta manera, la calidad del agua en el acuífero S.L.R.C. es mala, debido a que en sólidos totales disueltos el 64% de los aprovechamientos se clasifican como agua salobre, y la dureza total se clasifica de dura a muy dura, por ello se considera limitada para uso agrícola y condicionado para uso potable.

De aquí que con este entendido para su uso, se realice una mezcla de aguas entre superficial y subterránea en la “licuadora” de manera que se mejora la calidad para uso en el riego. La familia predominante en consecuencia con un 73% es clorurada sódica seguida de la sulfatada sódica en un 16%, que son aguas típicas de una combinación entre aguas altamente evaporadas con probabilidad de cruce por diferentes sedimentos con cargas halíticas que se lixivian a su paso y por otro lado con origen de mala calidad como resultado de la actividad agrícola residual de los Estados Unidos.

Las concentraciones de metales pesados en el acuífero son en general bajas, salvo en los casos del fierro y manganeso con concentraciones por arriba de los LMP establecidos, principalmente al norte y noroeste del acuífero.

Es importante mencionar, que no se pueden obtener mejores interpretaciones y correlaciones, debido a dos causas principales; el área de estudio es muy grande y no existen aprovechamientos y; se cuenta con información histórica muy limitada para llevar a cabo evoluciones.

GEOLOGÍA, GEOFISICA Y MODELO CONCEPTUAL DE FUNCIONAMIENTO HIDRODINÁMICO, BALANCE Y DISPONIBILIDAD

XI.1 GEOLOGÍA

XI.1.1 Geologia Histórica

El delta del Río Colorado abarca un área de aproximadamente 8,600 km². El delta tiene un promedio de 5.6 km de profundidad al basamento hacia la parte centro-sur y se ha calculado que contiene más de 40 000 km³ de sedimentos del Río Colorado que han sido depositados en los últimos 2 a 3 Ma (Jenning y Thompson, 1986). Los sedimentos depositados por el río hace más de 3 Ma han sido trasladados en dirección al noroeste a lo largo de las fallas del sistema San Andrés (Winker y Kidwell, 1986). La historia del desarrollo del sistema fluvial del Río Colorado es compleja, con un registro temprano del drenaje interno dentro de cuencas cerradas y una revocación posterior de las direcciones de flujo. El curso actual del Río Colorado es producto de una combinación de eventos tectónicos y cambios climáticos en la planicie colorado *Plateau* y ha desembocado en el Golfo de California hacia los últimos 4.2 Ma (*Beus y Morales, 1990; Young y Spamer, 2002*).

Existen en el área de estudio rocas Paleozoicas metamórficas (Esquistos y *Gneis* de color café pardo), rocas extrusivas, representadas por basaltos, andesitas y riolitas. Rocas ígneas intrusivas del Cretácico las cuales son cortadas por grandes diques y que forman el basamento de la región. Afectadas por las orogenias de ese periodo, se encuentran también depósitos del Terciario y Cuaternario. Las rocas marinas que se depositaron posteriormente en una bahía que se originó en el Mioceno Superior, no se había empezado a separar del continente. Las condiciones de sedimentación eran las de un mar interno, somero hacia sus bordes, donde se formaron deltas mientras que en su parte central las condiciones eran las de un mar profundo con circulación restringida por tanto reductor de materia orgánica.

XI.1.2 Geología Local

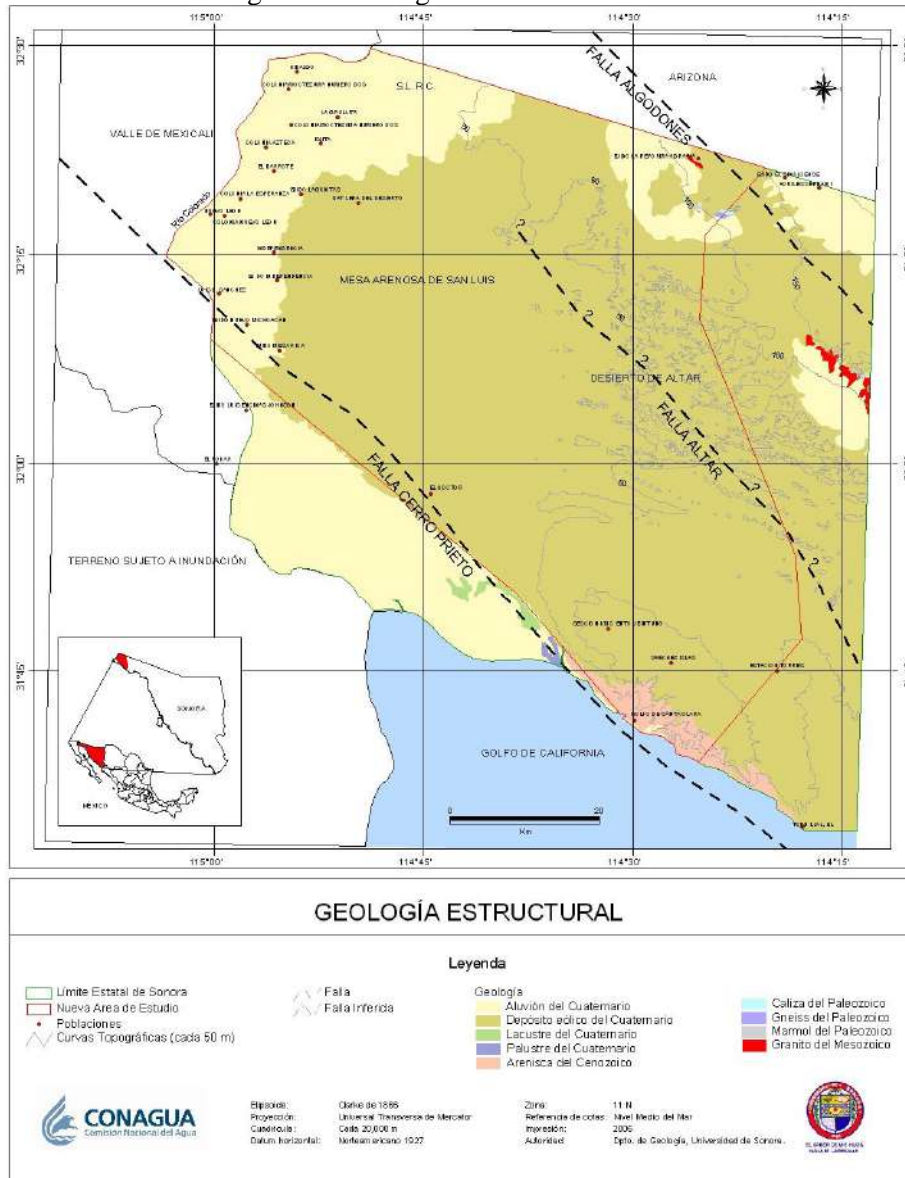
De acuerdo con la información de estudios previos, los actuales de campo, así como la obtenida en las cartas geológicas del INEGI I11-12 y H11-13 escala 1:250,000, edición 1983, dominan la mayor parte del área de estudio los sedimentos del Terciario y Cuaternario (depósitos eólicos del Cuaternario) representados por arcillas de la formación Bousse.

Los depósitos del Reciente (conglomerados, arenas, gravas, arcillas y depósitos de pie de monte) son transportados por los ríos Gila y Colorado. Se definen tres diferentes depósitos en la zona, siendo estos de tipo aluvial, eólico y lacustre. Al sur del área de estudio se encuentra aflorando aluvión del Cuaternario así como areniscas del Cenozoico.

En la parte Este se observan afloramientos de calizas del Paleozoico, así como mármol y granito de la misma edad. En el Norte se tiene mármol, gneis y

calizas del Paleozoico. La porción occidental del valle de Mexicali, es caracterizada en gran parte por las terrazas aluviales y macizos montañosos de la sierra Cucapá y Sierra el Mayor; con una orientación NW-SE, donde se observa un complejo montañoso de granitos, esquistos, calizas y cuarcitas, formando un levantamiento tectónico fallado en sus flancos. Dentro de la planicie, muy cerca de la sierra Cucapá aflora el volcán Cerro Prieto, formación basáltica, que descansa discordantemente sobre arenas finas y limos, siendo esta una muy importante zona de actividad geotérmica (Figura 41).

Figura 41 Geología en el área de estudio.



XI.1.3 Estratigrafía

Paleozoico Metamórfico

Afloran en el cerro del Viejo, Sierra Tinajas Altas, que se continúan en las montañas Gila y al Sur del Ejido Joaquín Amaro así como al norte de la Sierra del Viejo, estas sierras presentan una orientación NW-SE. Están constituidas por gneis y esquistos principalmente.

Cretácico

Se caracteriza por afloramientos de rocas ígneas intrusivas como: granitos, granodioritas, dioritas, etc., en las inmediaciones del merendero la Joyita y El Sahuaro, en la serranía de los EUA, en la Sierra del Rosario y al noroeste del ejido Reforma Agraria.

Terciario

Eoceno

A las rocas ígneas intrusivas le sobreyacen sedimentos continentales (gravas y areniscas) en ocasiones capas calcáreas intercaladas. No se encuentra aflorando en el área de estudio, esto se tomo en base a la perforación del pozo Exxon 1 que se localiza al oeste.

Oligoceno-Mioceno

Las rocas volcánicas extrusivas del Oligoceno y Mioceno se encuentran aflorando al norte y noreste del cerro del viejo encontrándose constituidas por basaltos, andesitas, riolitas, y dacitas. En ocasiones asociados a los depósitos del Eoceno.

Mioceno – Plioceno

Caracterizado por una fuerte depositación de sedimentos marinos constituidos por lutitas, areniscas y areniscas conglomeráticas.

Formación Bousse (Plioceno)

El único afloramiento conocido es en el área de Yuma, el cual esta constituido por areniscas y arcillas poco fosilíferas (corales y moluscos) principalmente. Posteriormente existe una zona de transición que divide a los depósitos marinos de los continentales.

Cuaternario

Esta representado principalmente por dunas en la cuenca de Altar y el desierto de Yuma constituidos por arenas y arcillas. Estos sobreyacen a los sedimentos aluviales mas recientes constituidos por: gravas, arenas y arcillas, que a su vez sobreyacen a los representados por depósitos fluviales y aluviales de los ríos Colorado y Gila los cuales están conformados por: boleos, gravas, arenas y aglomerados.

XI.1.4 Geología Estructural

La geología de la zona del valle de Mexicali desde el punto de vista de la Hidrología Subterránea, es relativamente simple: se trata de un graven formado por la falla de San Andrés y fallas asociadas, rellenos de materiales granulares arrastrados por el Río Colorado.

Las rocas metamórficas y las rocas ígneas intrusivas forman el basamento de la cuenca. Un estudio publicado por Petróleo Internacional (Noviembre de 1981) menciona que se perforaron 2 pozos al Oeste de la zona de interés, los pozos son: Exxon 1 y DH-7 ubicados al norte de nuestra área de estudio, el basamento se localizó a 3 200 m aproximadamente y hacia el área de estudio se va haciendo mas somero aflorando en la región de estudio.

La Cuenca de Altar está afectada por la gran falla de San Andrés que hace diez millones de años fue la que originó la separación de la península de Baja California. Es la más extensa, ya que se desarrolla a lo largo de 1 050 km con un ancho muy variable, desde menos de 1 000 m, hasta 15 000 m en lugares donde se entrelaza con líneas de fallas secundarias. Los movimientos tectónicos regionales junto con la falla de San Jacinto, la cuál es considerada la rama mas activa de la falla de San Andrés. En la parte noreste del área de estudio se encuentra la Falla Algodones la cuál cruza por el oeste del ejido Joaquín Amaro con una dirección NW-SE y se origina en el Desierto de Yuma adentrándose en el Desierto de Altar.

Estudios más recientes (Pacheco, 2004), mencionan que en la Mesa Arenosa de San Luis se localiza en su parte centro-sur la Cuenca de Altar que se halla limitada por la falla Cerro Prieto al sur y la falla de Altar al norte, ambas con direcciones NW-SE, esta última inferida por estudios de sísmica y correlaciones estratigráficas. La cuál sitúa en su parte suroeste los mayores espesores de material de relleno en dicha cuenca alcanzando los 5 200 metros (Figura 41).

XI.2 GEOFÍSICA

- Líneas Sísmicas. Se cuenta con la información de seis líneas de reflexión sísmica disponibles en área del Desierto de Altar y el Valle de Mexicali, proporcionadas por Martín Pacheco, generadas para su tesis de Maestría en Ciencias en el CICESE (Pacheco, 2004).
 - i. Aunque la calidad de los datos sísmicos es regular, es suficiente para lograr el objetivo que se busca en este trabajo: determinar las unidades del subsuelo y rasgos estratigráficos y estructurales de las principales unidades litológicas definidas, así como la identificación del basamento, sobre el cual se encuentra descansando la columna de sedimentos.
 - ii. Dicha información se utilizará en conjunto con la interpretación de los registros de pozo.
 - iii. Las líneas sísmicas entran en parte dentro del polígono oficial correspondiente al acuífero Mesa Arenosa, y sus dimensiones van de 20 a 50 Km.

- Unidades del Subsuelo. Con la información anterior, se definen cuatro unidades principales que cubren al Desierto de Altar y al Valle de Mexicali, y por consiguiente al polígono oficial correspondiente al acuífero Mesa Arenosa.
 - i. Con base en la interpretación litoestratigráfica de los pozos profundos, y basándose en el análisis de registros geofísicos, la columna estratigráfica generalizada del área se dividió en tres secuencias sedimentarias mayores descansando sobre un basamento granítico.
 - ii. Con base en las descripciones litológicas de los pozos y el análisis de los patrones de los reflectores sísmicos, se identificaron los contactos entre las unidades litológicas a lo largo de las seis líneas sísmicas. Se verificó la presencia y continuidad lateral de tres unidades sedimentarias mayores que comprenden el relleno sedimentario de la cuenca de Altar. De la base a la cima:
 - a. Secuencia de lodolita basal (570 – 900 m)
 - b. Secuencia de lodolita y arenisca intercaladas (1200 – 2200 m)
 - c. Secuencia de arena y grava no consolidada (900 – 3460 m)
 - iii. Finalmente se interpretaron las facies y los ambientes sedimentarios a partir de la integración de las electrofacies generadas con la información existente y de 25 SEV's realizados para este estudio, la litología y los reportes paleontológicos de los pozos.

- Gravimetría. Se cuenta con un mapa de anomalía de Bouguer para la región de la cuenca de Altar (modificado de Sumner, 1972).

- Magnetometría. Se cuenta con un mapa de anomalías aeromagnéticas para la región del norte del Golfo de California, con la ubicación geográfica de los pozos estudiados (modificado de Sumner, 1972).

Figura 42 Localización de cortes litológicos y secciones sísmicas.

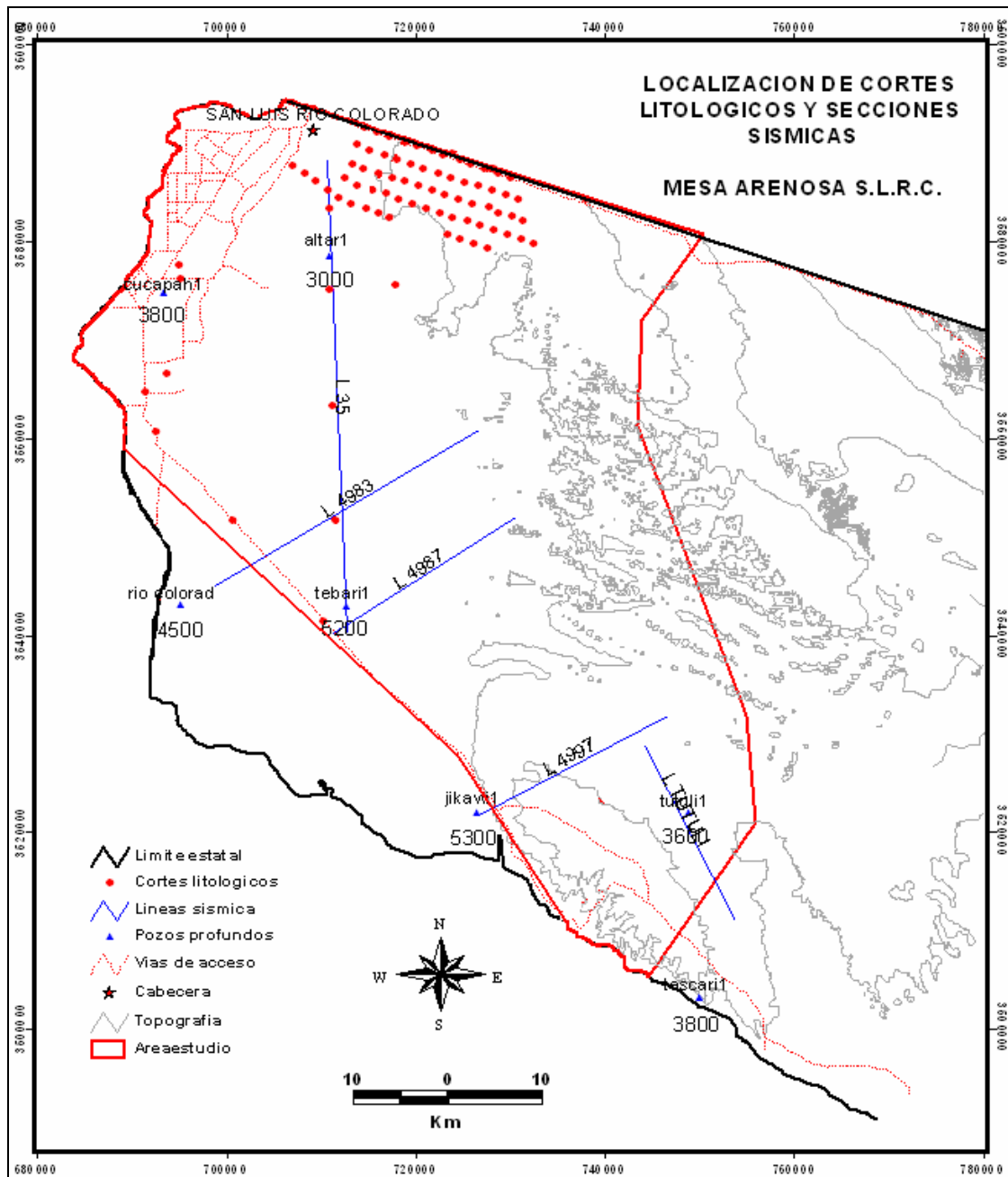


Figura 43 Mapa de anomalías de Bouguer (Modificado de Pacheco, 2004).

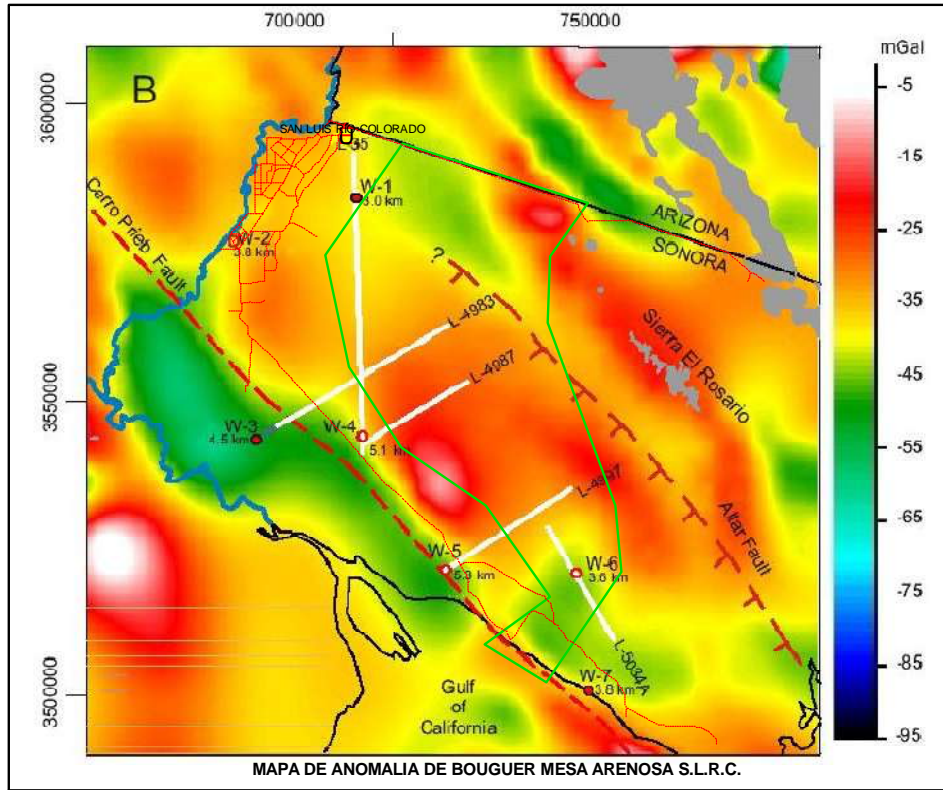
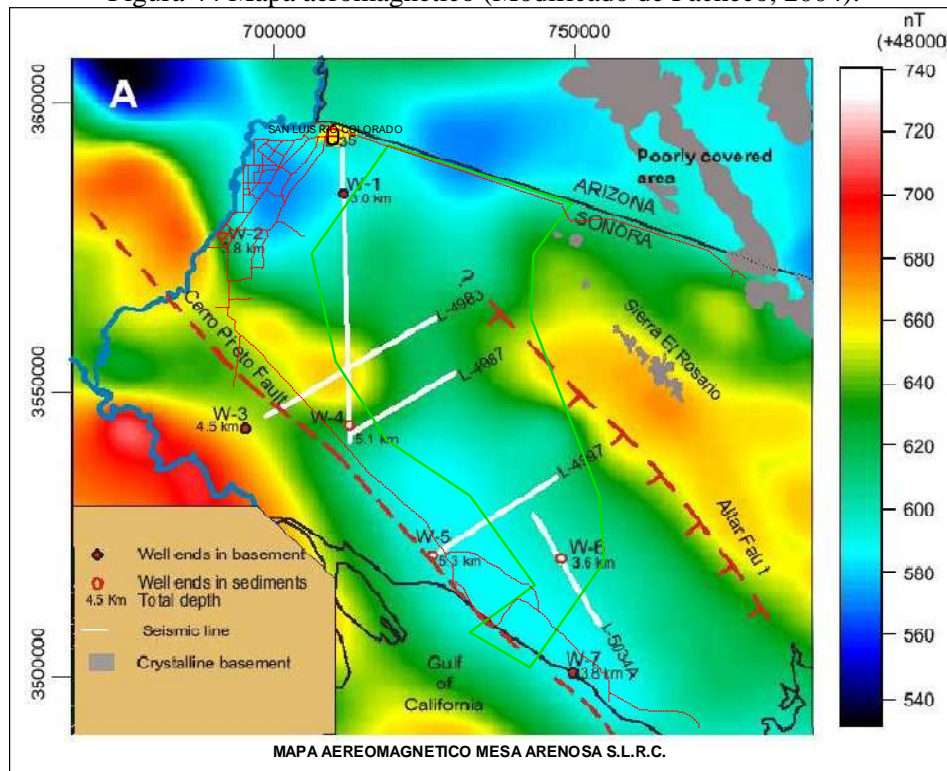


Figura 44 Mapa aeromagnético (Modificado de Pacheco, 2004).



XI.2.1 Geología del Subsuelo

La definición de la geología del subsuelo, así como las unidades que lo conforman, son de gran importancia para la identificación de los materiales que constituyen la zona saturada, la regionalización y el tipo de acuífero o acuíferos en determinadas regiones. Por ello, la información litoestratigráfica de pozos, y la aplicación de métodos geofísicos de prospección, tales como sondeos eléctricos verticales (SEV's), gravimetría forma una herramienta fundamental en el desarrollo de estudios de prospección hidrogeológica.

Para el desarrollo del presente apartado, se utilizó la información correspondiente a cortes litológicos de pozos profundos, dicha información corresponde a un grupo de registros geofísicos de siete pozos ubicados dentro del Desierto de Altar y el Valle de Mexicali (Figura 45), con los cuales se realizó una reconstrucción litológica a detalle de la secuencia estratigráfica cortada por los pozos, los cuales alcanzan profundidades que van de 3 a 5.3 Km.

Es importante mencionar aquí que, la información que proporcionan dichos cortes litológicos de pozos profundos no incluye los primeros 200 metros de la secuencia, por lo que fue necesario realizar un análisis complementario con la información de cortes litológicos de pozos de observación, proporcionada por la Comisión Nacional del Agua en la ciudad de Mexicali, Baja California, los cuales cubren profundidades dentro del rango de 150 a 300 m, y en un solo caso con 800 m.

Con las descripciones litológicas de los pozos profundos de Pacheco (2004), y el análisis de los patrones de los reflectores sísmicos, se identificaron los contactos entre las unidades litológicas a lo largo de seis líneas sísmicas. Se verificó la presencia y continuidad lateral de tres unidades sedimentarias mayores que comprenden el relleno en el acuífero Mesa Arenosa.

Finalmente se interpretaron las facies y los ambientes sedimentarios, a partir de la integración de electrofacies, litología y reportes paleontológicos de los pozos (Pacheco M., 2004). Dichas unidades, obedecen a un proceso de relleno de cuenca de más de 5 km de espesor y sobreyacen a un basamento granítico (BC) detectado únicamente en los pozos Altar-1, Río Colorado-1 y Tascari-1.

XI.2.2 Correlación estratigráfica de pozos profundos

Las unidades aquí definidas, se toman en este trabajo como la base de la geología del subsuelo. De la base a la cima las unidades que conforman el subsuelo son:

- **Unidad A (Secuencia de lodos marinos).** Sobre el basamento granítico se ubica una secuencia de lodos marinos de hasta 900 m de espesor y de posible edad Mioceno Tardío-Plioceno temprano. El contacto con el basamento granítico puede ser tectónico o deposicional.
- **Unidad B (Secuencia transicional marina-fluvial).** Una secuencia rítmica de lodos, arenas y limos de hasta 2 200 m de espesor sobreyacen a los depósitos

marinos y marcan el arribo de los sedimentos deltáicos del Río Colorado a esta parte del Golfo de California. La alternancia se interpreta como depósitos en la zona de transición marino-fluvial del delta. Esta unidad muestra la geometría de la progradación deltáica sobre la cuenca.

- **Unidad C (Secuencia transición-fluvial).** La cuenca de Altar constituyó hasta épocas recientes parte de la planicie fluvial del Río Colorado. Este periodo de progradación está representado por la secuencia de arenas no consolidadas con un espesor promedio de 1 000 m de espesor y que incluyen gravas de facies de canal y lodos de la planicie de inundación, en el pozo Jicawi se tiene hasta el orden de 3 400 m.

- **Unidad BC (Basamento cristalino).**

Como se menciona en un principio, en la información litológica de pozos profundos se omiten los primeros 200 metros, lo que hizo necesario un análisis complementario para definir las propiedades de dicho intervalo, correspondiente a la parte superior de la Unidad A. Para ello se utilizaron los cortes litológicos de pozos de observación y sondeos eléctricos verticales (SEV's), con los que se elaboraron secciones esquemáticas del subsuelo.

La información litológica de los pozos de observación, indica que la cuenca de la Mesa Arenosa de San Luis Río Colorado, es parte del sistema fluvio-deltaico del Río Colorado, tal como se definió en la Unidad A con la información de pozos profundos. En las secciones esquemáticas se observa que el relleno sedimentario esta constituido de arena, grava y gravilla con lentes de arcilla en sus primeros 200 a 300 m, sin embargo, en los pozos cercanos al Golfo y al cauce del Río Colorado, los intervalos de arcilla entre la arena llegan a ser muy potentes, lo que indica una variación de largo plazo en el ambiente de depósito.

El estudio detallado de la litología de los pozos existentes en el área permite proponer la presencia y continuidad lateral y vertical, de tres unidades o paquetes sedimentarios de materiales no consolidados de ambientes fluviales, las cuales muy posiblemente siguen el mismo patrón hasta el límite superior o zona de contacto con la Unidad B (Secuencia transicional marina-fluvial) que comprenden el relleno sedimentario de la cuenca Mesa Arenosa.

Se elaboraron varias secciones estratigráficas a lo largo del área de estudio, su interpretación permite observar la progradación del delta, evidenciada por una disminución gradual de tamaño de grano de grueso a fino de norte a sur, posiblemente producido por el sistema de falla Cerro Prieto. Y también, un incremento en el tamaño de grano de fino a grueso de oeste a este.

De esta manera, se definen tres unidades sedimentarias (*Unidad 1, 2 y 3*) en los primeros 300 m y que corresponden estrictamente a la secuencia de transición-

fluvial (Unidad A) definida en un principio en base a la información de cortes litológicos de los pozos profundos. Dichas unidades se describen a continuación:

- **Unidad 1.** Unidad no consolidada y constituida principalmente por arena que varía desde arena de grano fino a arena de grano medio. Esta unidad inicia prácticamente desde la superficie y varía en espesor hasta una profundidad mínima de 4 m (pozo IV-1) y hasta 26 m (pozo IV-12). Esta unidad superior corresponde posiblemente a sedimentos característicos de ambientes fluviales y aluviales.
- **Unidad 2.** Compuesta por arena, grava y gravilla no consolidada, contiene el registro sedimentario de las fácies fluviales del Río Colorado. La litología esta denominada por arena de grano medio a grueso que contiene intercalaciones de arcilla y grava. Esta secuencia sugiere ambiente fluvial caracterizado por fácies de canales y barras de canal. Esta unidad, presenta un espesor máximo de 150 metros, en el pozo G4-6 y con un espesor mínimo de 36 metros en el pozo IV-4
- **Unidad 3.** Esta unidad presenta potentes paquetes de grava y gravilla arenosa, lo cual sugiere que fueron depositados en un ambiente aluvial de alta energía, posiblemente en las laderas de los cerros antiguos. Con espesores de 90 metros en el pozo IV-4, 150 m en el pozo G3-14 y 198 metros en el pozo G4-5.

Figura 45 Pozos profundos en el área de estudio.

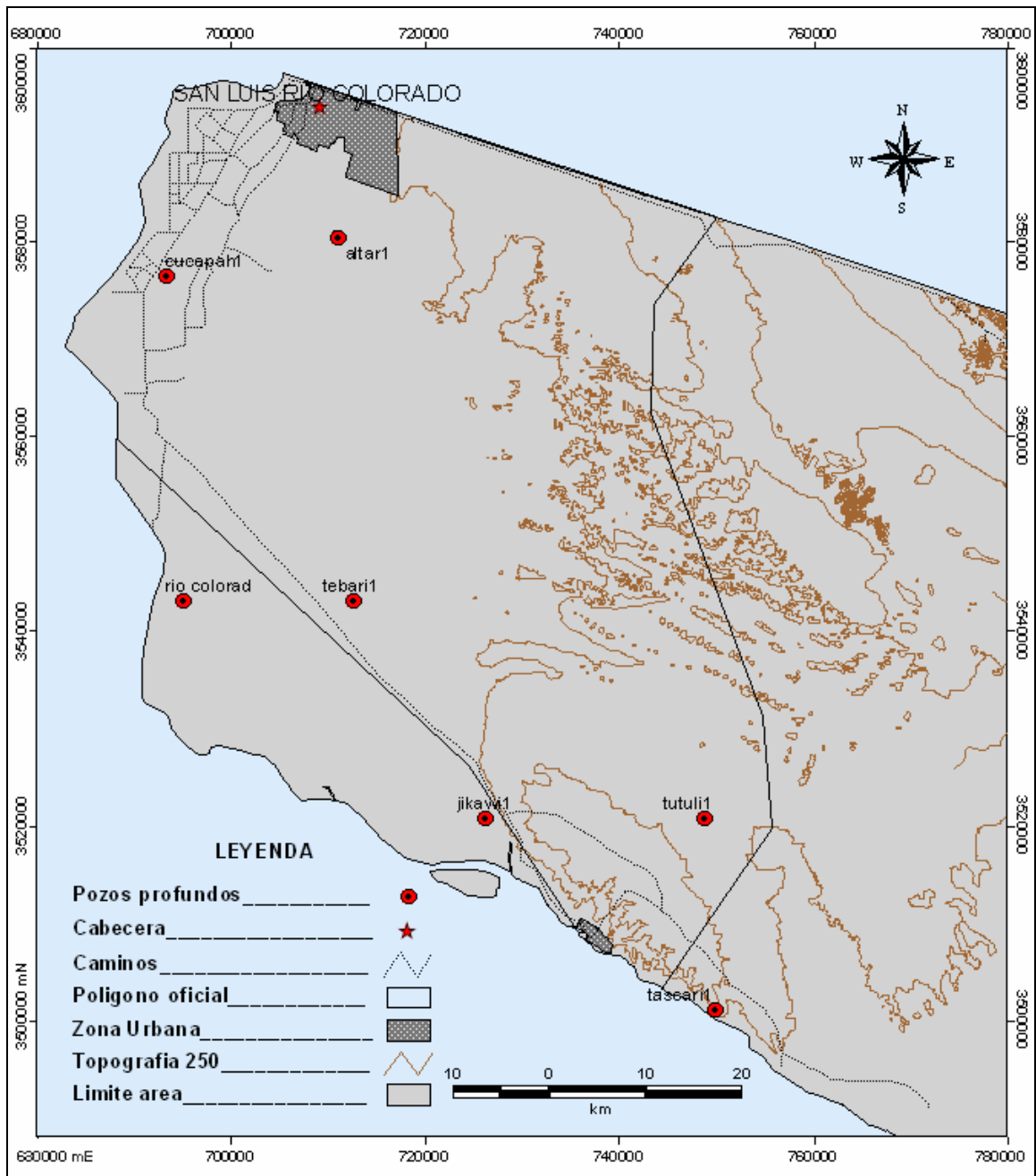
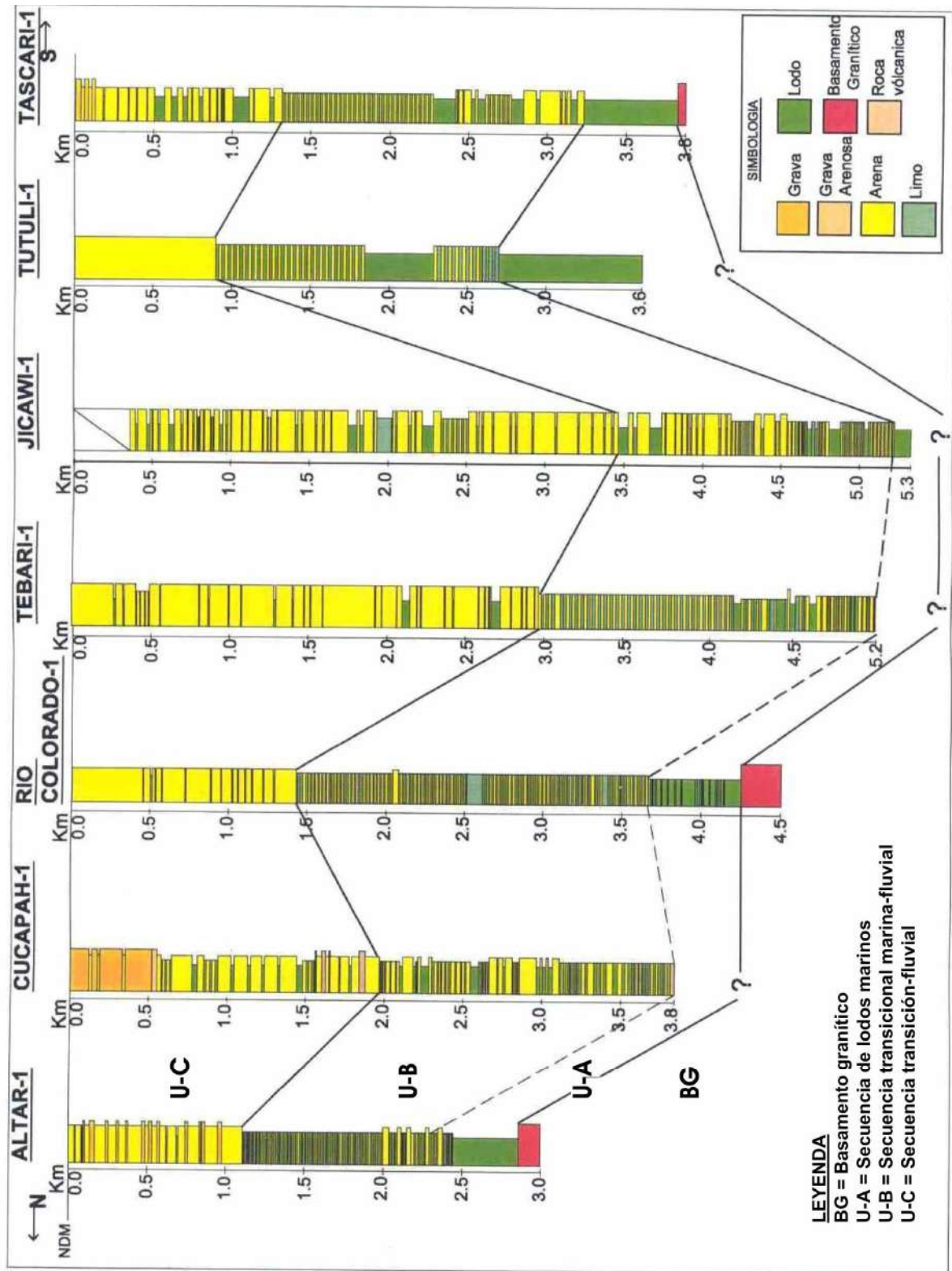


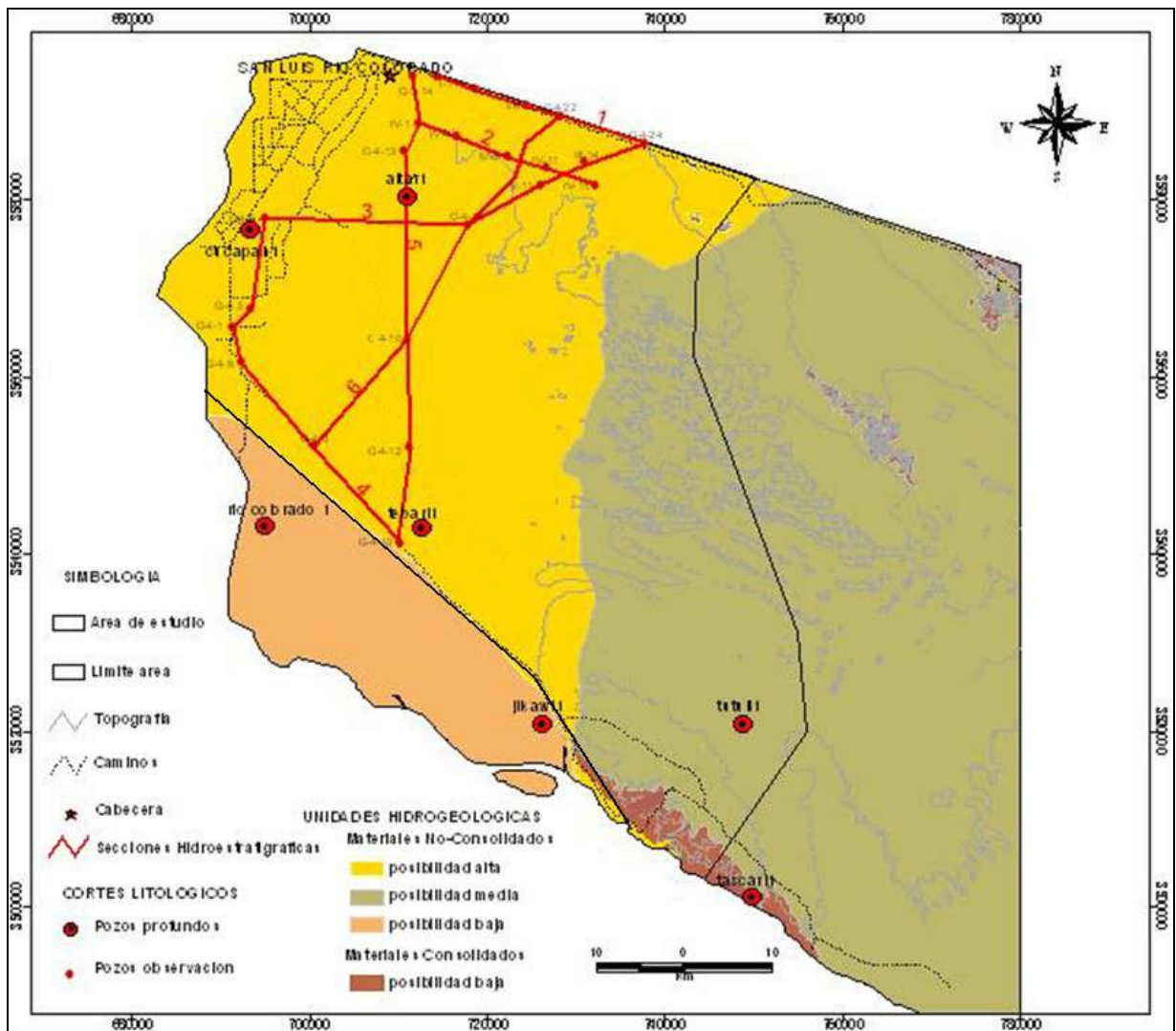
Figura 46 Correlación estratigráfica de los pozos profundos (Pacheco, M., 2004)



XI.2.3 Correlaciones Estratigráficas en Pozos Someros

Se elaboraron 7 secciones estratigráficas basadas en los cortes de pozos someros (aprox. 200 m de profundidad) a lo largo del área de estudio (Figura 47), su interpretación permite observar la progradación del delta, evidenciada por una disminución gradual de tamaño de grano de grueso a fino de norte a sur, posiblemente producido por el sistema de falla Cerro Prieto. Y también, un incremento en el tamaño de grano de fino a grueso de Oeste a Este.

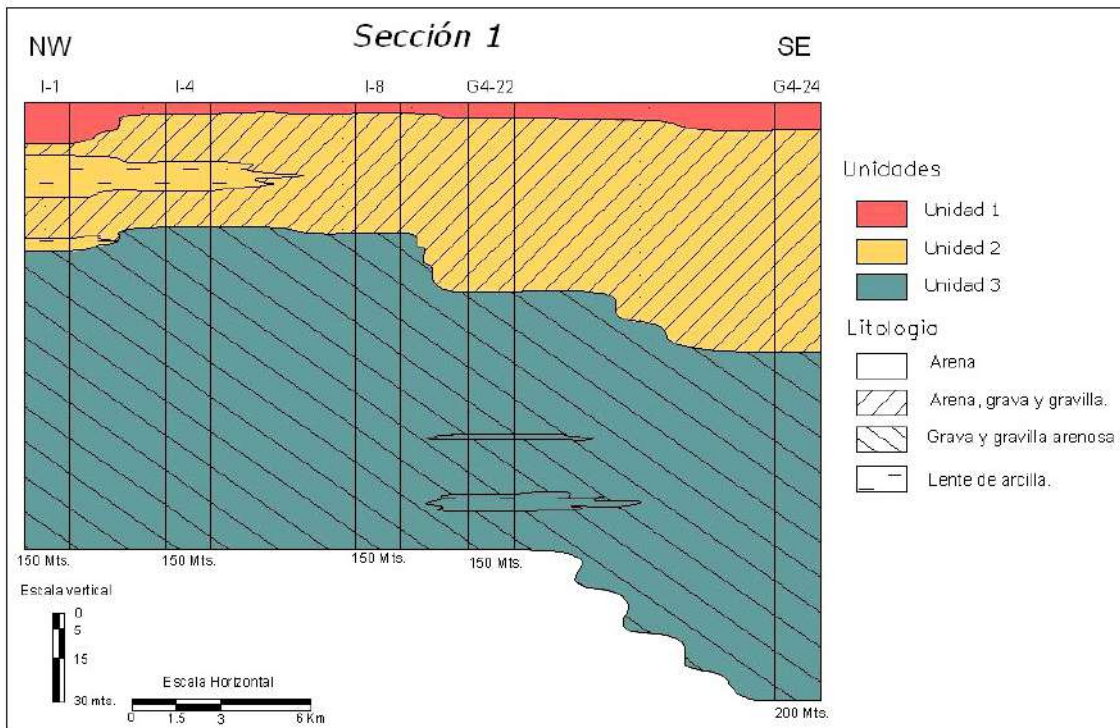
Figura 47 Mapa de localización de secciones estratigráficas del área de estudio.



Sección Estratigráfica 1.- Esta sección, esta constituida por 5 pozos, distribuidos en una longitud de aproximadamente de 25 Km, con una orientación NW-

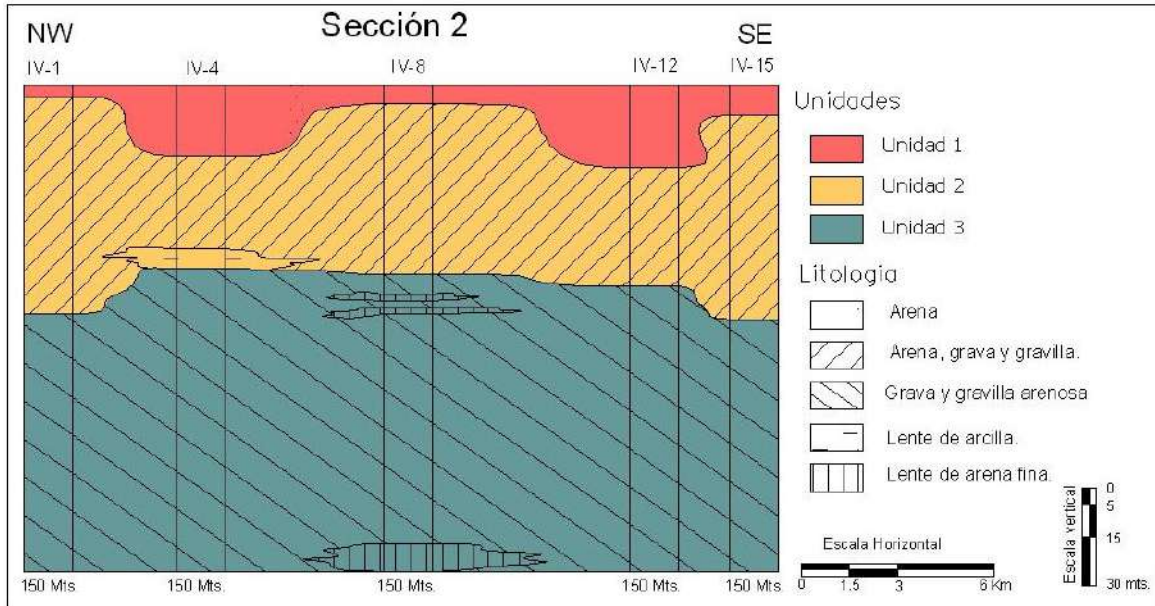
SE; compuesta por las 3 unidades estratigráficas arriba mencionadas. En los pozos I-1 y I-4 la Unidad 2 contiene una variación en su litología, ya que se encuentra un paquete de arcilla con un espesor de 10 m. En general la Unidad 2, tiene espesores que van de 74 m (pozo G4-24) a 38 m (pozo I-4). La Unidad 3 en general tiene espesores de 100 m (pozo I-1) a 108 m (pozo G4-24) (Figura 48).

Figura 48 Sección Estratigráfica 1, orientada NW-SE. Mesa Arenosa.



Sección Estratigráfica 2.- Esta sección fue elaborada con la información disponible en 5 pozos, distribuidos en una longitud de aproximadamente de 21 km con una orientación NW-SE; y esta compuesta por 3 unidades estratigráficas (Figura 49). En el pozo IV-4 se observa una variación en la litología de la Unidad 2, en donde se encuentra un paquete de arcilla con un espesor de 6 m. La Unidad 2 tiene espesores que van de 66 m en el pozo IV-1 y 34m en el pozo IV-4. En general la Unidad 3 tiene espesores de 94m en el pozo IV-4 y 78 m en el pozo IV-15. En el pozo IV-8 existen unos paquetes de arena fina de espesores de 10 m a 2 m.

Figura 49 Sección Estratigráfica 2, orientada NW-SE. Mesa Arenosa.



Sección Estratigráfica 3.- Esta sección, esta constituida a lo largo de 5 pozos, distribuidos en una longitud de aproximadamente de 43 km con una orientación W-E, en los pozos G4-5 al G4-14; y con una orientación SW-NE del pozo G4-14 al G4-24 (Figura 50). En esta sección se observa que la Unidad 1 no se encuentra en los pozos G4-5 y III-14. Se observa una variación en la litología de la Unidad 2, ya que se encuentra un paquete de arcilla con un espesor de 10 m (pozo G4-5), disminuyendo su espesor a 6 m en el pozo G4-14 y 4m en el pozo V-11. La unidad 2 tiene espesores que van de 102 m (pozo G4-5) y 76 m (pozo V-11). En general la unidad 3 tiene espesores de 146 m, en el pozo G4-5 y 116 m, en el pozo G4-24. En el pozo III-14 existen unos paquetes de arena fina de espesores de 4 m y que se extienden hasta el pozo V-11. Esta Unidad 3 ha sido afectada por la Falla de Altar, que pasa entre los pozos G4-14 y V-11.

Sección Estratigráfica 4.- Esta sección, esta interpretada con la información de 6 pozos, distribuidos en una longitud de aproximadamente de 44 km con una orientación N-S, en los pozos G4-5 al G4-6; y con una orientación NW-SE, del pozo G4-6 al G4-19 (Figura 51). En esta sección se observa que la Unidad 1 es escasa en el pozo G4-6. Esta sección se caracteriza por una alternancia de depósitos arcillosos en las Unidades 2 y 3, que indican variaciones importantes en la energía del depósito y/o en el tamaño de grano de los sedimentos aportados a la cuenca. Estos intervalos podrían interpretarse como depósitos de planicie de inundación durante cambios en la ubicación de los canales distribuidos por el complejo deltáico.

Figura 50 Sección Estratigráfica 3, orientada WE/SW-NE. Mesa Arenosa.

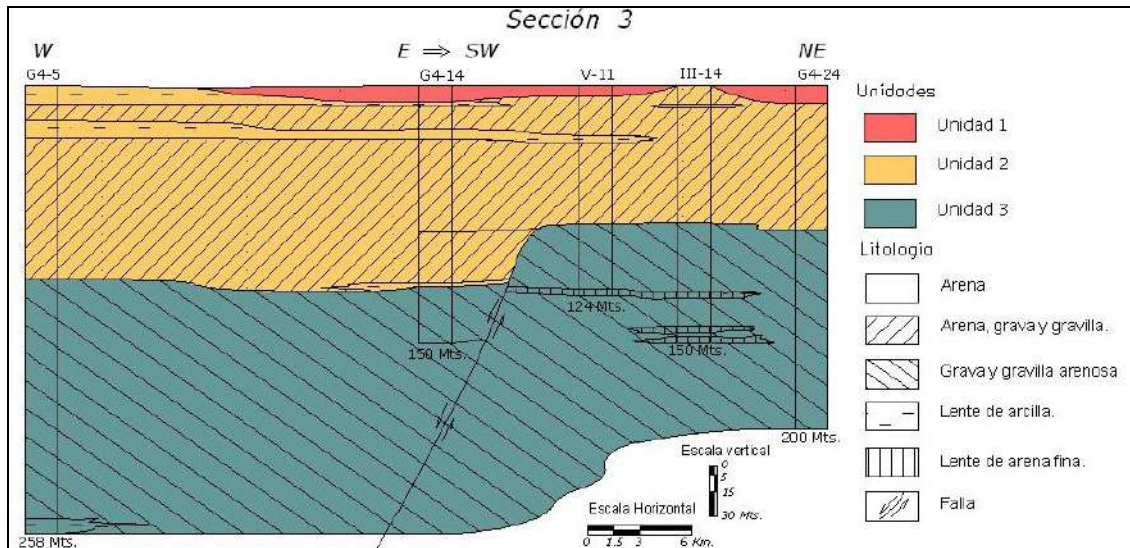
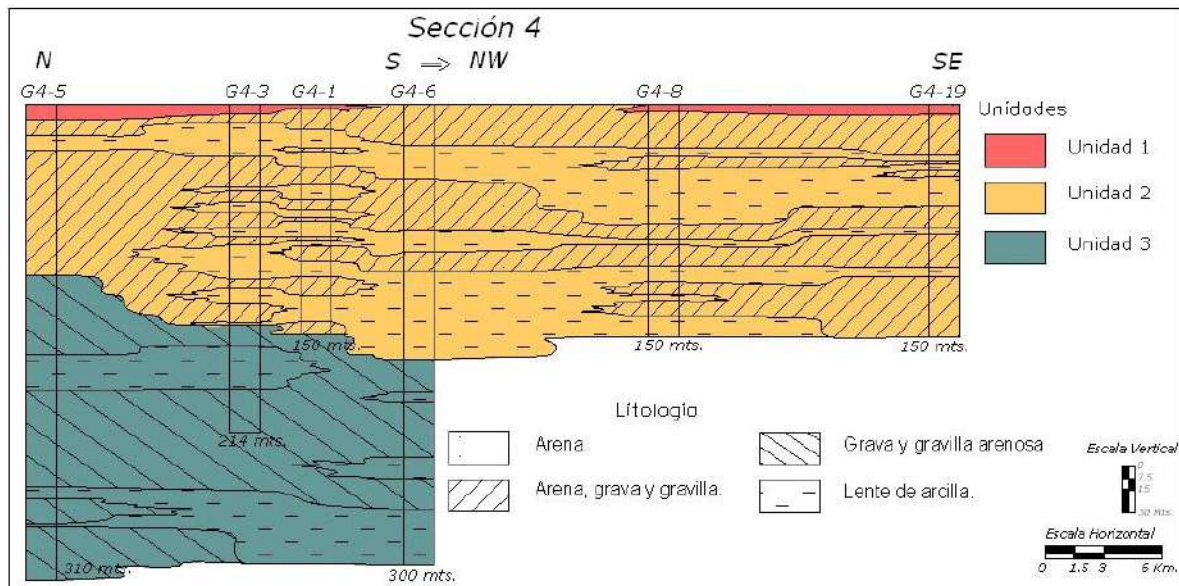
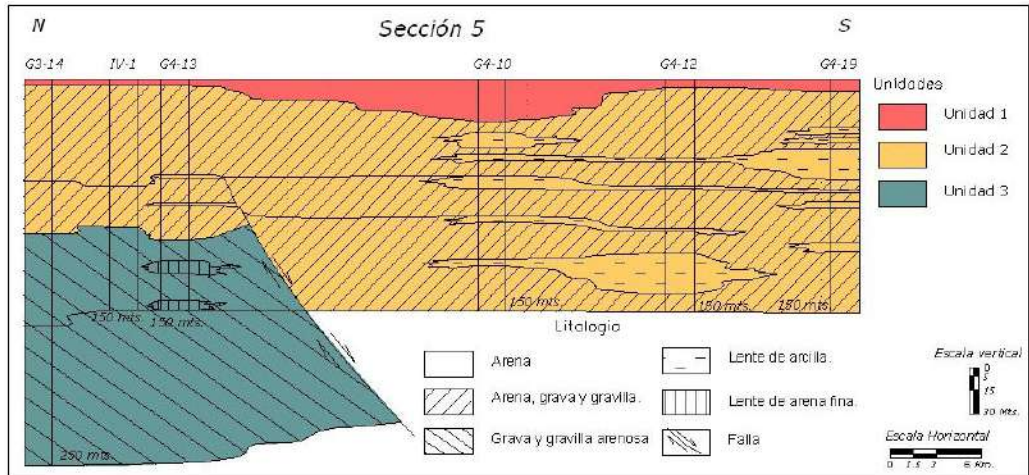


Figura 51 Sección Estratigráfica 4, orientada N-S/NW-SE. Mesa Arenosa.



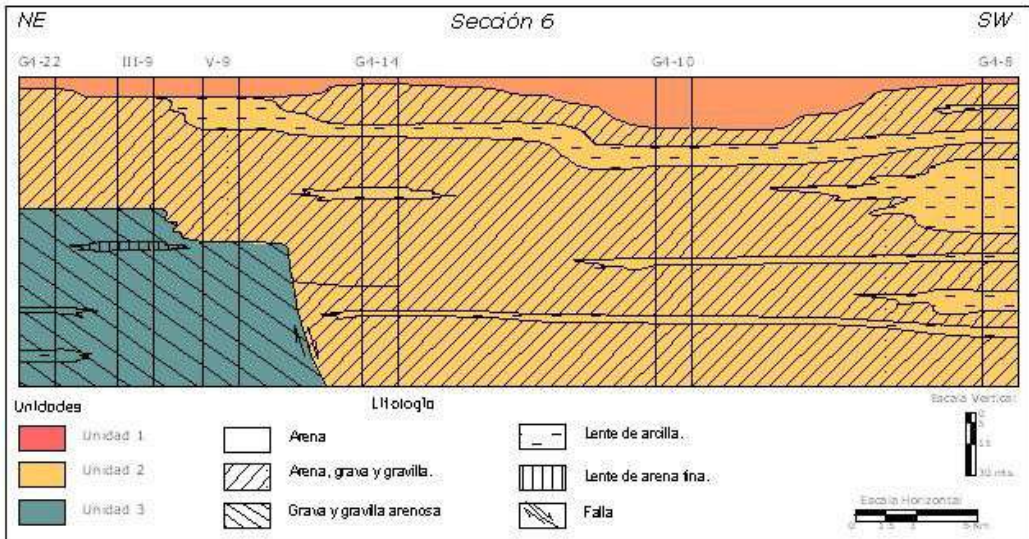
Sección Estratigráfica 5.- Esta sección, esta constituida por 6 pozos, distribuidos en una longitud de aproximadamente de 51 km con una orientación N-S (Figura 52). En la Unidad 1 se observa un incremento de espesor de 26 m en el pozo G4-10, también se pueden observar lentes de arcilla en los pozos G4-10, G4-12 y G4-19, siendo así esta área la mas expuesta a los cambios en la planicie de inundación. Entre los pozos G4-13 y G4-10 se encuentra evidenciada la continuación de la Falla de Altar.

Figura 52 Sección Estratigráfica 5, orientada N-S. Mesa Arenosa.



Sección Estratigráfica 6.- Esta sección, esta constituida por 6 pozos, distribuidos en una longitud de aproximadamente de 47 km con una orientación NE-SW (Figura 53). En la Unidad 1 se observa un incremento en espesor de 26 m en el pozo G4-10. En la Unidad 2 se observa un lente de arcilla en su parte superior, incrementándose considerablemente con otros lentes de arcilla a lo largo de la unidad hacia el suroeste (pozo G4-8). En esta sección se observa una falla que pasa entre los pozos V-9 y G4-14 que afecta a las unidades 2 y 3.

Figura 53 Sección Estratigráfica 6, orientada NE-SW. Mesa Arenosa.



En estas secciones se evidencia que a partir del ápice del delta, los pozos cortaron espesores más o menos regulares en la secuencia fluvial. Estos espesores se incrementan considerablemente hacia los pozos G4-8 y G4-19, lo que sugiere que el depocentro de la cuenca se encuentra hacia el NNW del pozo G4-19 hacia donde se localizan los pozos G4-12 y G4-10, lo cual podría explicar el aumento en los espesores de los sedimentos en estos pozos y su disminución en los pozos G4-6 y G4-1.

XI.3 El modelo conceptual

El modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico en el área de estudio se realizó con base a los volúmenes de agua potencial de recarga al acuífero las cuales son de manera vertical y horizontal, esto fue a partir de la medición de niveles de agua subterránea en los pozos del área así como el registro de los volúmenes de agua superficial, extracción de agua por bombeo, relación litológica, exploración geofísica, los cuales se integraron y analizaron para la presentación de los resultados.

XI.3.1 Censo de Aprovechamientos de Agua Subterránea

La medición de niveles de agua subterránea se desarrolló en la zona del valle de Mexicali margen izquierdo del río Colorado correspondiente al municipio de San Luis Río Colorado (valle de San Luis) y en Mesa Arenosa de San Luis.

Con base en los aprovechamientos del REPDA y los censados por CNA se integró una base final de 161 aprovechamientos. El censo 2005 recabó información de 121 aprovechamientos localizados en el área de Mesa Arenosa y Valle del margen izquierdo del Río Colorado. La actualización permite mostrar una reducción en el número de aprovechamientos debido a que algunos se encontraban activos (bombeando).

XI.3.2 Valle de San Luis, margen izquierda del río Colorado

El valle de San Luis está dentro del Distrito de Riego 014 el cuál se encuentra integrado por tres Módulos. Los pozos son de carácter ejidal y particular de uso agrícola. En total fueron 77 aprovechamientos en el valle.

En estas mediciones no se tuvo problema de acceso y comunicación, ya que se encuentran a la orilla del camino y no están cercados.

Se tomo en cuenta aquellos pozos que registraban un nivel estático. Se hace resaltar que muy pocos contenían aceite, producto que se usa para el motor del pozo.

La topografía del valle es de 30 m al norte decreciendo gradualmente hasta llegar al nivel del mar hacia el sur.

Los niveles estáticos registrados son de 2 a 15 m de profundidad, con el decremento hacia el sur. Los pozos están equipados con motor eléctrico de columna, con salidas de 4" a 12", profundidad de construcción total de 150 m en promedio.

Los pozos tienen una separación promedio de 1 a 1.5 Km.

XI.3.3 Mesa Arenosa

En Mesa Arenosa (MA) se encuentra una batería de pozos en su parte norte al este de la Ciudad de SLRC, esta batería de pozos es de carácter federal y es de uso para agua potable destinada a las ciudades de San Luis Río Colorado, Tecate, Tijuana y Ensenada. En total se midieron 49 niveles en la MA.

La batería de pozos se encuentra en una red de pozos compuesta por 5 líneas este-oeste con aproximadamente 67 pozos separados 1.5 km este-oeste y 1 km norte-sur entre un pozo y el otro.

Se tiene un acuerdo bilateral entre los estados de Sonora (México) y Arizona (E.U.A.), en el cuál sólo se puede extraer un volumen máximo de **197.358 hm³ / año** (Acta 242, 1973).

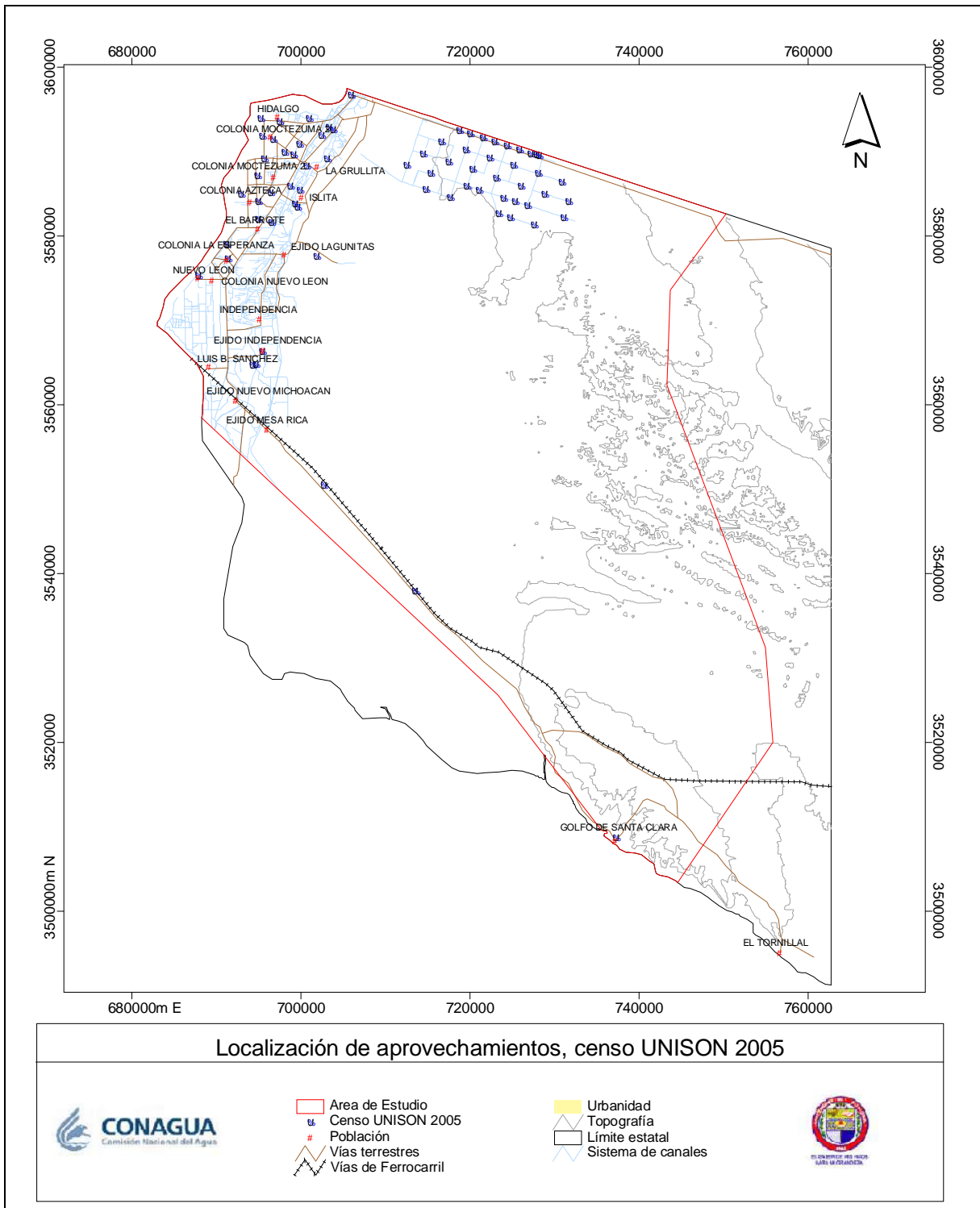
La profundidad de niveles estáticos es de 30 m en la parte oeste a 40 m en la parte este de la batería. Uno de los principales problemas para realizar la medición de niveles es que contienen mucho aceite, ello limita el descenso de la sonda.

Los demás pozos en la Mesa Arenosa se encuentran al sur sobre la carretera hacia el Golfo de Santa Clara.

X1.3.4 Nivelación de Brocales

Durante el periodo del 18 al 22 de Septiembre se realizaron un total de 13 nivelaciones (Figura 54), de las cuales 11 corresponden a los pozos en donde se realizaron las pruebas de bombeo. Solo se realizaron en el valle debido a que no todos estaban nivelados, mientras que en la batería de Mesa Arenosa se cuenta ya con el registro de las cotas de brocal.

Figura 54 Localización de los aprovechamientos censados en este estudio, 2005.



XI.3.5 Piezometría

XI.3.5.1 Niveles Estáticos

La configuración de niveles estáticos se basó principalmente en la base de datos proporcionada por la Comisión Nacional de Agua la cual corresponde a la medición de la profundidad al nivel estático que fue recabada en los paros de bombeo correspondientes al Valle de Mexicali con un período de 1984 al 2004, haciendo énfasis que en algunos años no se tiene suficiente información. Dicha tabla se actualizó para el año 2005 con el censo de aprovechamientos realizado por la Universidad de Sonora.

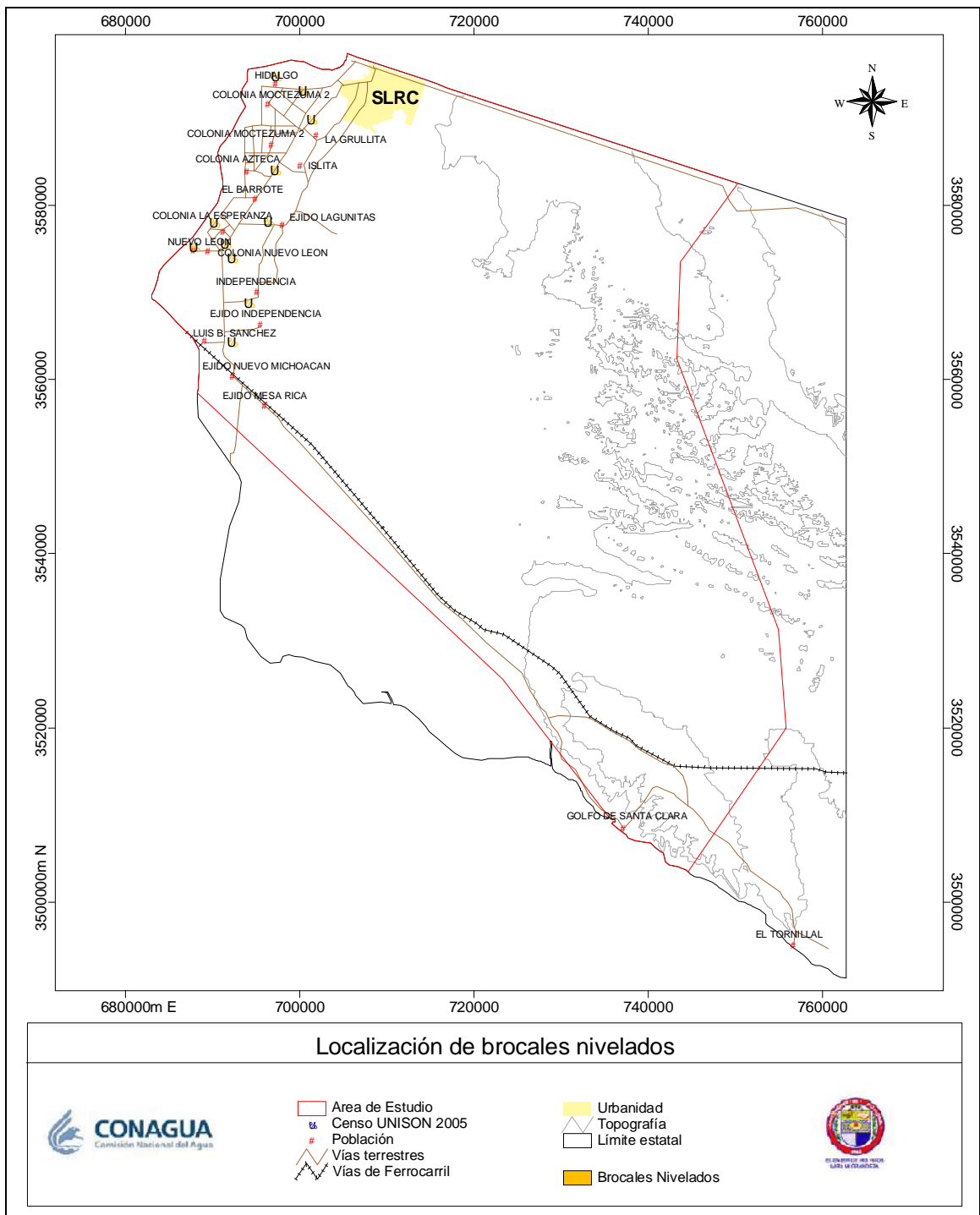
De manera importante se menciona que la base de datos de la Comisión Nacional del Agua corresponde solo a la parte del valle y a la batería de pozos de Mesa Arenosa localizados al este de la ciudad de San Luis Río Colorado, por lo que las configuraciones de los niveles corresponden solamente a la parte noroeste del área de estudio. Con la base de datos recabada por la Universidad de Sonora en el año 2005 se tienen datos adicionales hacia la parte sur lo cual permite una configuración mas amplia de los niveles.

Los aprovechamientos se localizan sobre el valle de Mexicali, en la margen izquierda del río Colorado, y en la Mesa Arenosa que es la batería de pozos federales localizada al este de la ciudad de San Luis Río Colorado.

El acuífero de San Luis Río Colorado lo comprende la Mesa de San Luis, que está dentro del Desierto de Altar, y está compuesta por depósitos de arena aluvial y eólica. En este acuífero los aprovechamientos se localizan en la parte norte sobre la línea fronteriza, al este de la ciudad de San Luis Río Colorado, estos aprovechamientos corresponden a la batería de pozos federales destinados a proveer agua potable. Al sur de este acuífero se localizan tres pozos de uso público urbano localizados en la población del Golfo de Santa Clara. El resto del área del acuífero que es alrededor de un 90 % no se explota debido a que no hay accesibilidad y ninguna población cercana que requiera del vital líquido, esto debido al tipo de terreno que se trata, un desierto.

El acuífero de Mexicali corresponde al oeste del área de estudio y está representado por la zona del valle, en el cuál se encuentran los pozos de uso agrícola del Distrito de Riego 014. Estos se hallan distribuidos en todo el valle y conducen sus aguas a través de canales dentro del mismo valle.

Figura 55 Localización de los brocales nivelados en este estudio, 2005.



Debido a la diferencia topográfica y al acuífero oficial correspondiente se realiza la descripción por acuífero la cuál incidirá principalmente en la descripción de

la profundidad al nivel estático. Para la configuración de las profundidades y elevaciones de los niveles estáticos se realizó de manera conjunta para mostrar completamente el área de estudio.

Debido a la falta de información en la parte central-este del acuífero de San Luis Río Colorado se realizó la configuración de las elevaciones y profundidades al nivel estático de manera inferida, tomando en cuenta el nivel topográfico de la zona y las condiciones geohidrológicas que imperan en el acuífero, así como el apoyo de estudios geofísicos.

XI.3.5.2 Profundidad al Nivel Estático 1985

La configuración de niveles para este año nos indica que la profundidad en los niveles estáticos es de 34 m a 30 m en Mesa Arenosa de San Luis, y en el Valle son menores a 10 m. La mayor profundidad se localiza en el pozo G-4-24 localizado al noroeste de la Mesa Arenosa, y los de menor profundidad se localizan al oeste de Mesa Arenosa en los pozos II-1, IV-1 y V-1 con profundidad de 6 m (Figura 56).

XI.3.5.3 Profundidad al Nivel Estático 1995

Las profundidades para este año son de 35 m a 32 m en Mesa Arenosa de San Luis, mientras que en el Valle alcanzan hasta una profundidad menor a 15 m. Las profundidades mayores se localizan en Mesa Arenosa, en los pozos II-1, III-1 y IV-1, con 42 m, y la menor profundidad se localiza en el pozo 1-Nuevo Michoacán con 3 m, localizado al este del poblado Luis B. Sánchez (Figura 57).

XI.3.5.4 Profundidad al Nivel Estático 2005

En la actualidad las profundidades son de 38 m a 31 m en Mesa Arenosa de San Luis, mientras que en el Valle se mantienen menores a 15 m. La mayor profundidad está ubicada en la Mesa Arenosa en el pozo III-14 con 43 m, y la menor profundidad se ubica en la estación El Doctor con 6 m (Figura 58). Para este año se las profundidades y elevaciones se proyectaron para toda el área del acuífero, basándose en la información geológico-geofísica con la cual se generó el modelo hidrogeológico. Sin embargo, no se utilizó esta configuración en la evaluación del acuífero, dado que la piezometría histórica disponible solamente integra la porción oeste-noroeste del área de estudio (Figuras 56 y 57), dado que distorsiona la evaluación al no contarse con una evolución para la misma área. En ambos casos se consideró confiable el trazo obtenido y que estas configuraciones para toda el área de acuífero podrán ser útiles en futuras actualizaciones de evaluación y dar seguimiento al comportamiento hidrodinámico.

Figura 56 Profundidad al nivel estático 1985.

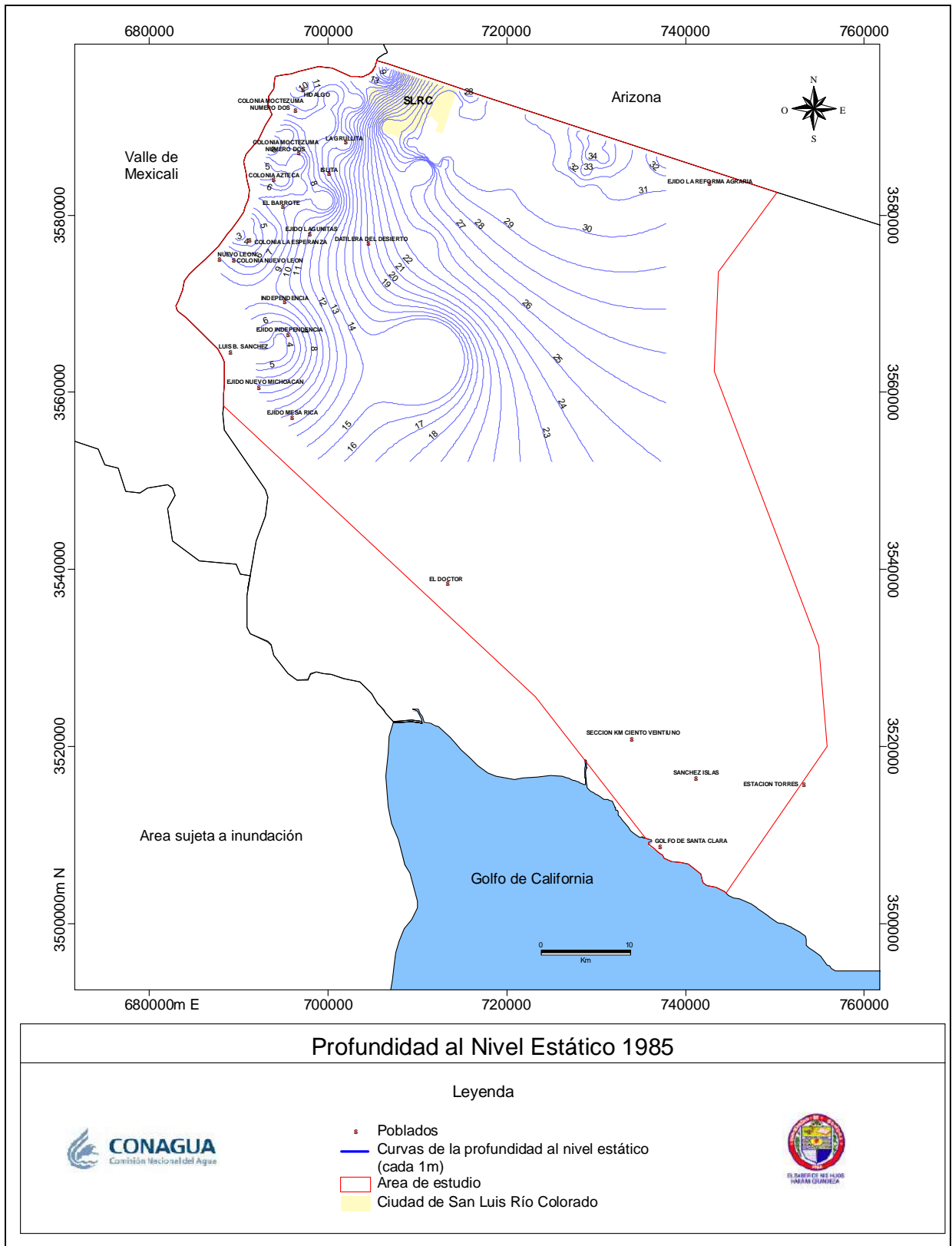


Figura 57 Profundidad al nivel estático 1995.

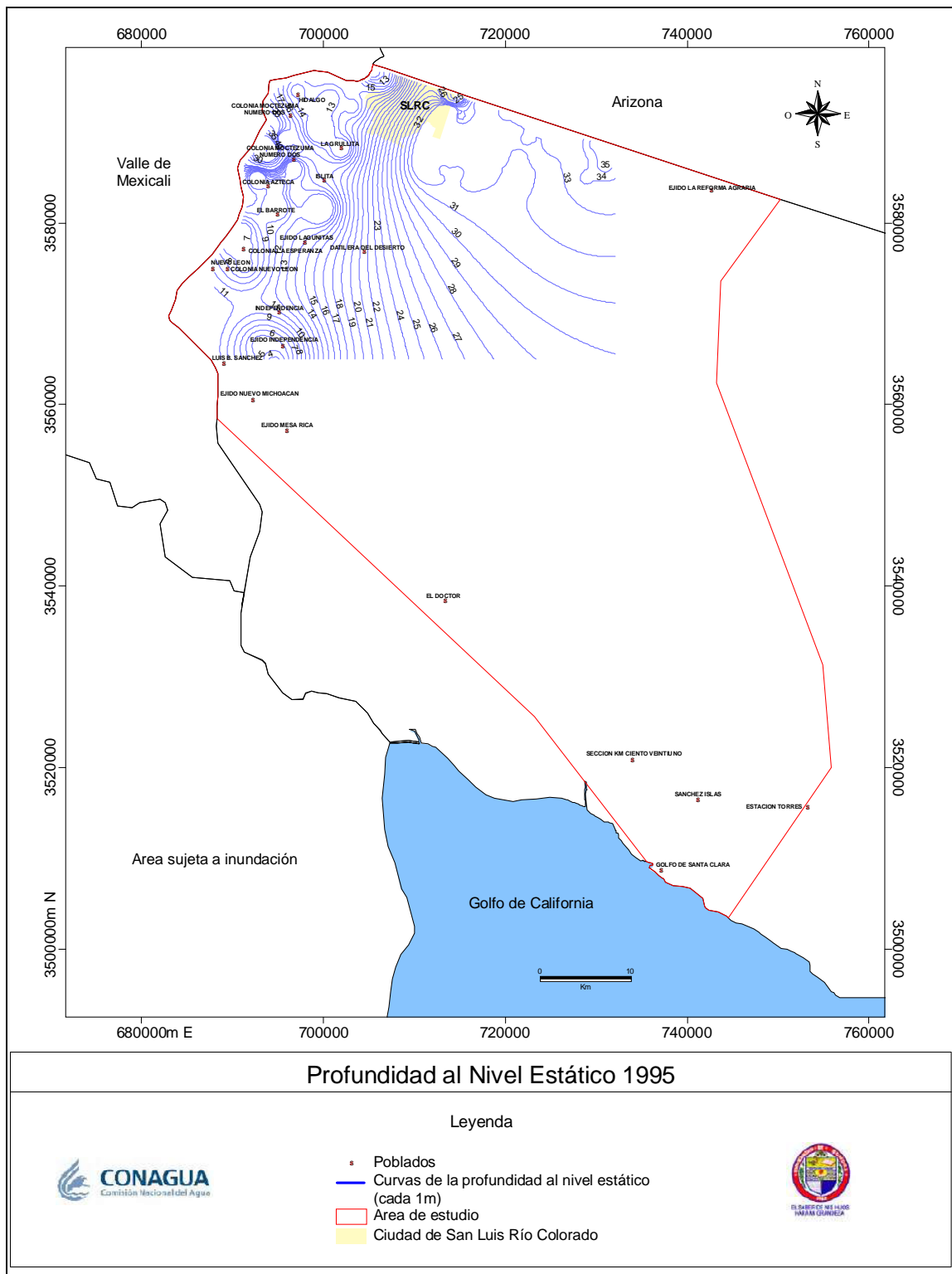
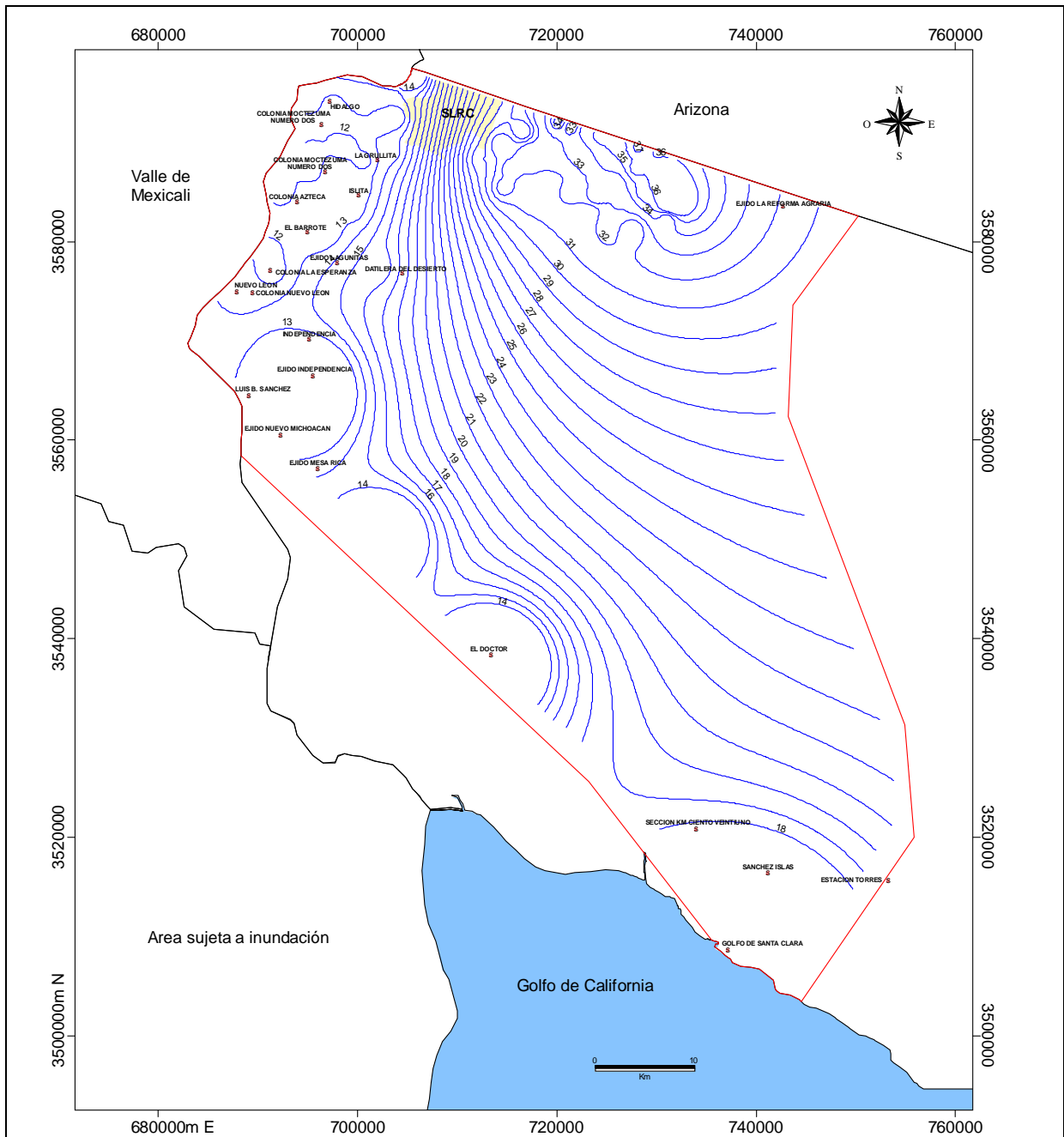


Figura 58 Profundidad al nivel estático 2005.



Profundidad del Nivel Estático 2005

Leyenda



- Poblados
- Curvas de la profundidad al nivel estático (cada 1m)
- Área de estudio
- Ciudad de San Luis Río Colorado



XI.3.5.5 Elevación del Nivel Estático 1985

La mayor elevación del nivel estático para este año es de 40 m sobre el nivel medio del mar, localizado al noreste de Mesa Arenosa, y desciende con una dirección general hacia el suroeste, en donde se localizan dos elevaciones mínimas de 12 msnm a 16 msnm. Se registra la mayor elevación correspondiente al pozo G-4-24 con 68 msnm, y las menores se localizan en un cono de mínimas elevaciones al oeste de Mesa Arenosa en los pozos II-1, IV-1 y V-1 con 6 msnm. Mas sin embargo la tendencia en el gradiente hidráulico es de noreste a suroeste, de las cuales se presentan dos direcciones de flujo subterráneo principal partiendo del noreste de Mesa Arenosa, la primera que va con dirección hacia el oeste, pasando por la zona urbana de San Luis, y la segunda con dirección al suroeste llegando al sur del valle en las cercanías del poblado Luis B. Sánchez (Figura 59).

XI.3.5.6. Elevación del Nivel Estático 1995

La elevación en el nivel estático va de 24 msnm a 16 msnm en Mesa Arenosa, y de 16 msnm a 10 msnm en el Valle. El flujo general es de noreste a suroeste, y se denotan dos flujos principales, el primero es con dirección al oeste, y el segundo con dirección al suroeste, de igual manera que en 1985, también en el sur del valle se localizan dos flujos contrarios que van a las respectivas zonas de explotación con un cambio mínimo en las elevaciones de 2 metros. La mayor elevación en el nivel estático se localiza en Mesa Arenosa en el pozo I-1 con 37 msnm, y la mínima se localiza también en Mesa Arenosa en el pozo IV-1 con 4 msnm (Figura 60).

XI.3.5.7 Elevación del Nivel Estático 2005

Las elevaciones más altas se localizan al noreste con 20 msnm y descienden hasta la línea de costa y parte del valle con valores menores a 10 msnm. El valor mínimo se localiza en el valle, en el poblado de La Colonia Azteca con 1 msnm, y el valor máximo se localiza en Mesa Arenosa en el pozo IV-14 con 22 msnm. El flujo general se mantiene de noreste a suroeste, y este año también con una ligera tendencia hacia el sur (Figura 61).

Figura 59 Elevación del nivel estático 1985.

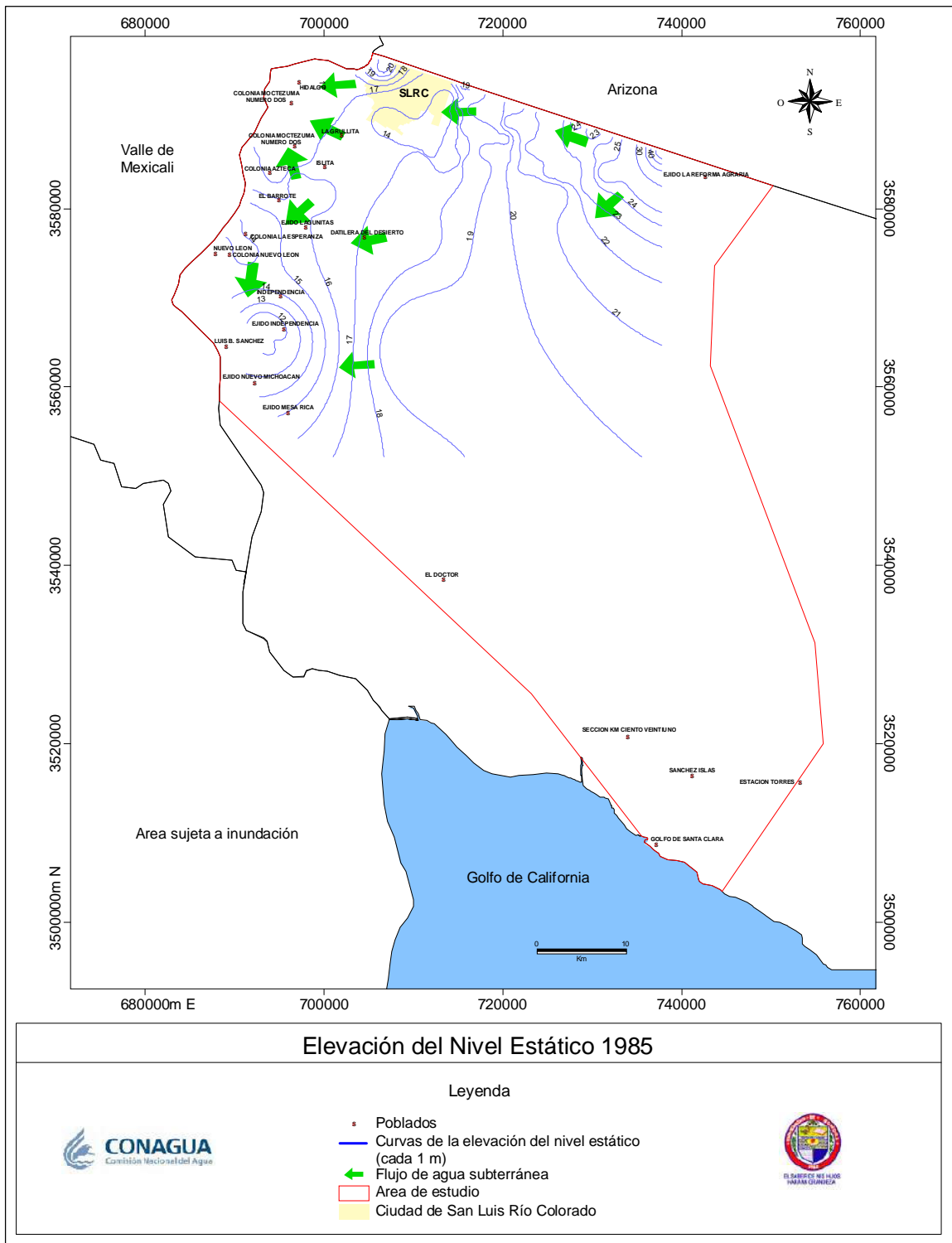


Figura 60 Elevación del nivel estático 1995.

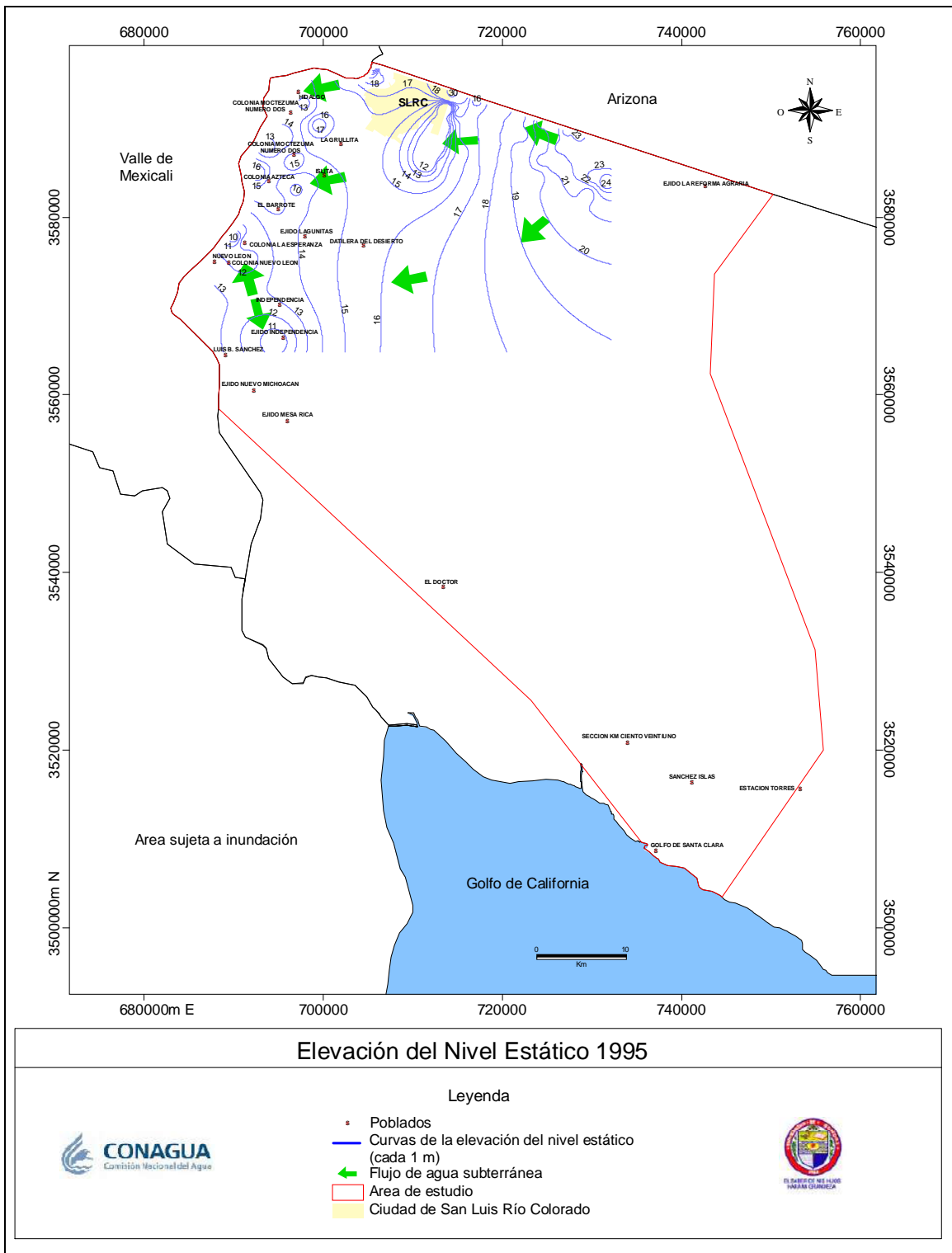
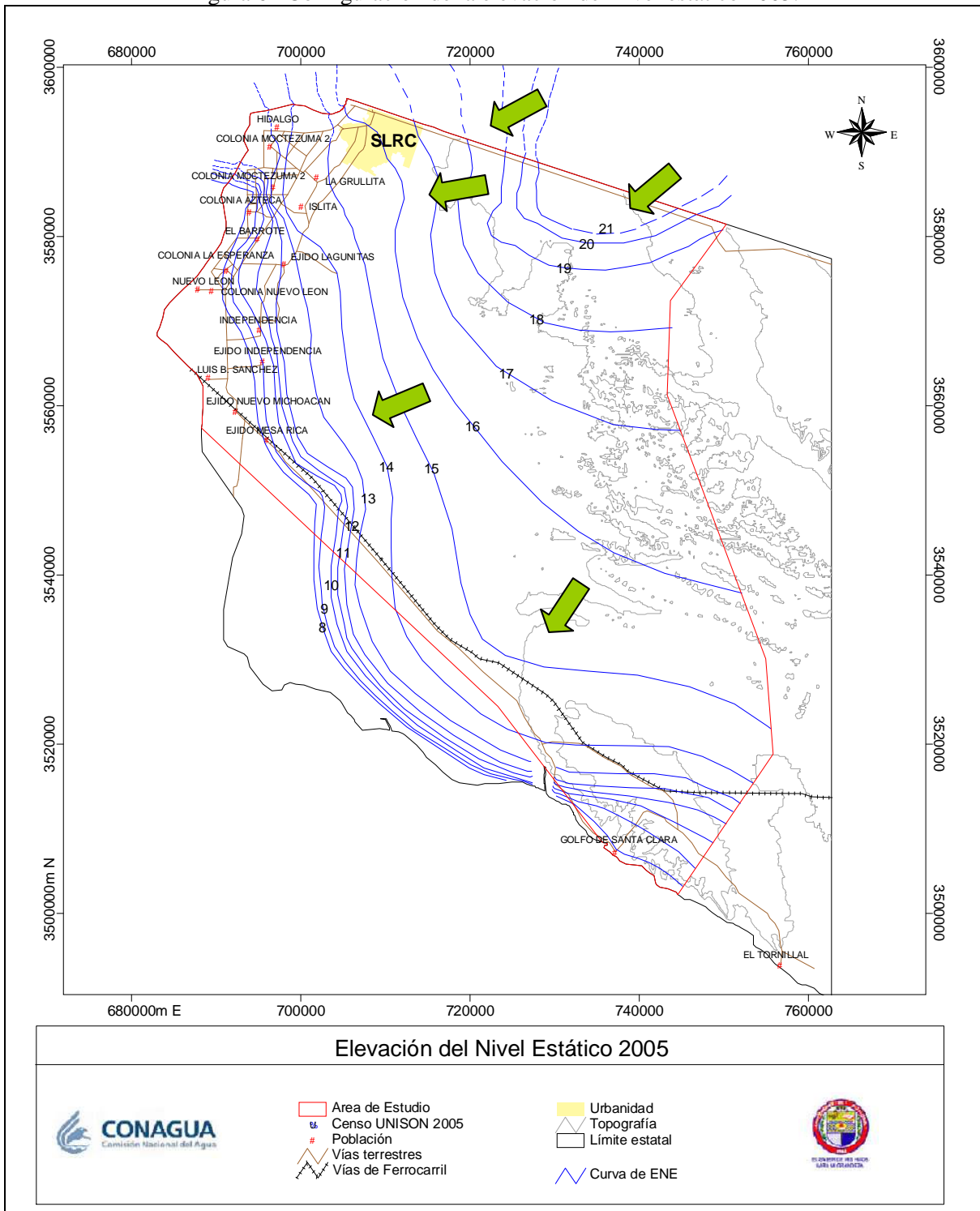


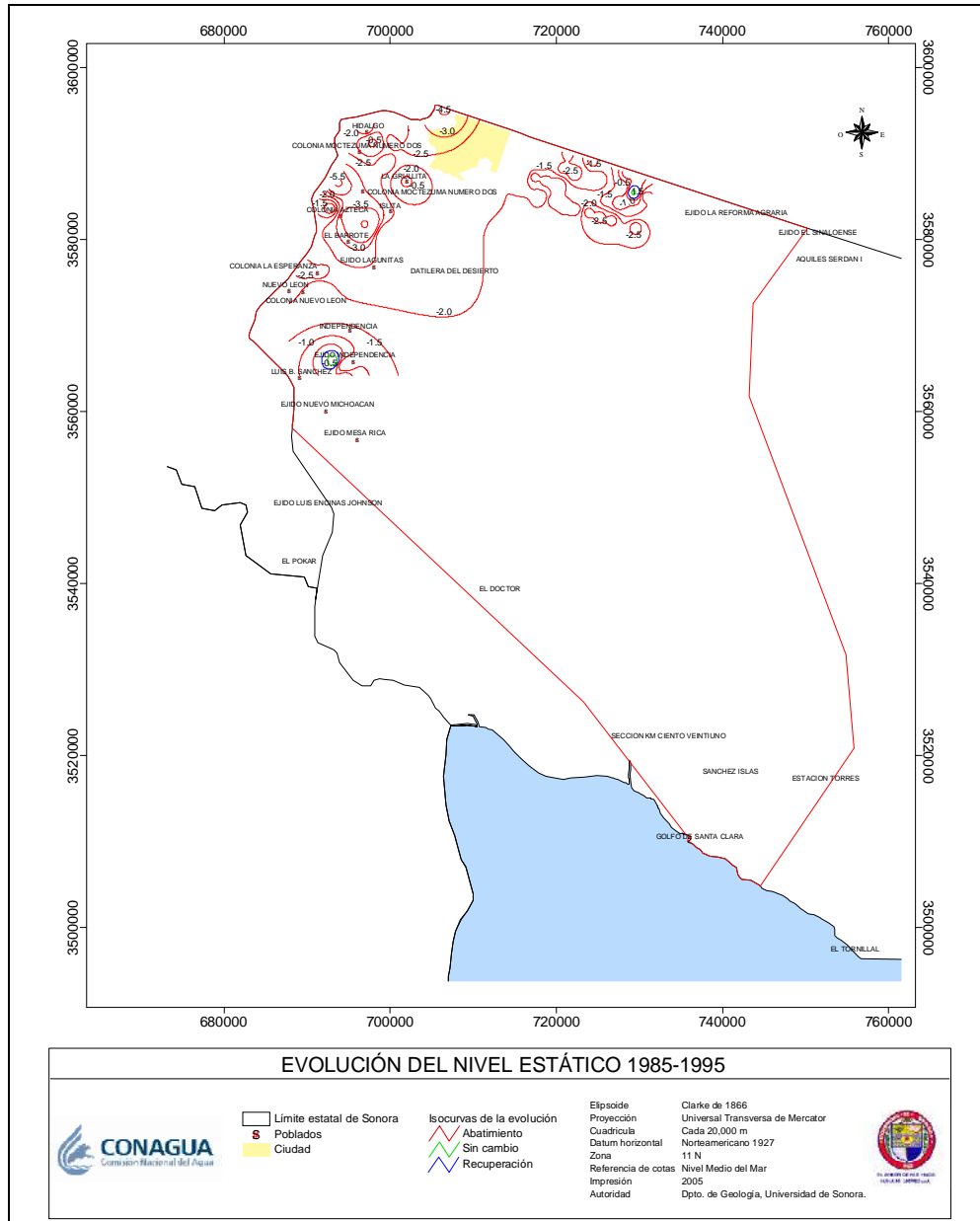
Figura 61 Configuración de la elevación del nivel estático 2005.



XI.3.5.8 Evolución de la elevación en los Niveles Estáticos 1985-1995

En este periodo se presentan abatimientos de hasta 2,5 m en Mesa Arenosa, y en la zona del valle de hasta 5,5 m. Las zonas en donde se muestra recuperación se localizan al oeste del Ejido Independencia con 0,5 m y en Mesa Arenosa en el pozo II-12 con 1,5 m. Entre la zona del Valle y Mesa Arenosa se observan abatimientos de 2 m a 2.5 m (Figura 62).

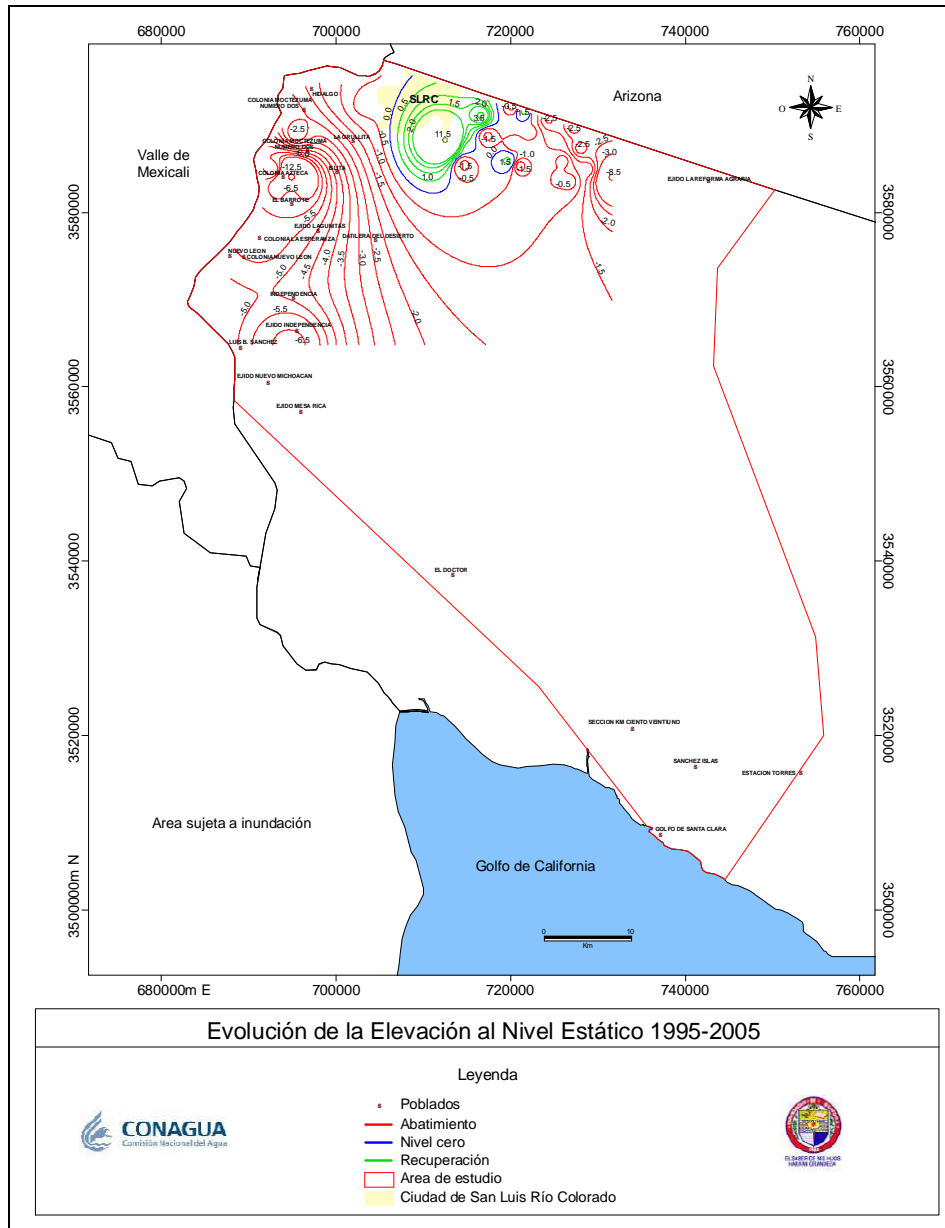
Figura 62 Evolución de la Elevación en los Niveles Estáticos en el periodo 1985-1995



XI.3.5.9 Evolución de la elevación en los Niveles Estáticos 1995-2005

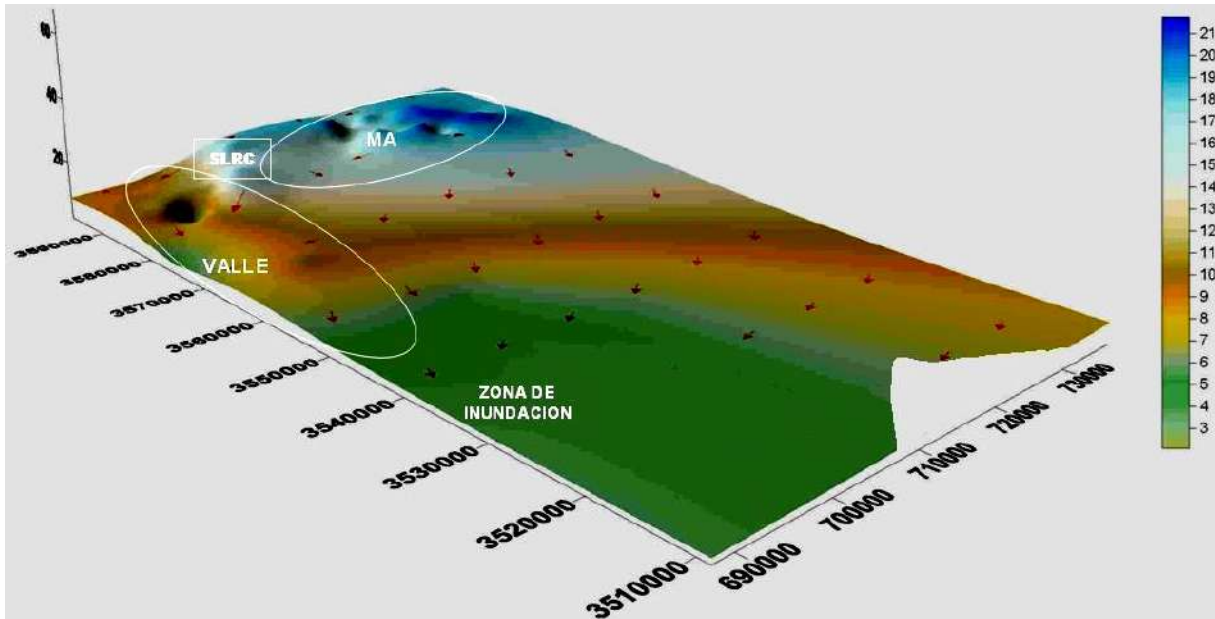
Los abatimientos máximos son al este de Mesa Arenosa con 8.5 m, mientras que en el centro de Mesa Arenosa se tienen de 1,0 m a 2.5 m de abatimiento. En el Valle se presentan abatimientos de 2.5 m en la Colonia Cuahutemoc Número Dos, hasta 12.5 m en la Colonia Azteca. Entre la zona del Valle y Mesa Arenosa se tienen abatimientos de 0.5 m a 3 m. Las recuperaciones se presentan en Mesa Arenosa al este de la ciudad de san Luis de hasta 11.5 m localizada en el pozo IV-1 (Figura 63).

Figura 63 Evolución de la Elevación en los Niveles Estáticos en el periodo 1995-2005



La Figura 64 muestra una configuración en tercera dimensión de la elevación del nivel estático 2005, en ella se observa con mayor claridad la dirección de flujo y las áreas donde se observa concentración de bombeo.

Figura 64 Elevación del Nivel Estático 2005, 3ra dimensión.



MA Mesa Arenosa de San Luis
 VALLE Margen izquierdo del Río Colorado
 ZONA DE INUNDACIÓN Zona de inundación de alta y baja marea.
 La barra de colores indica la elevación del nivel estático en metros.

XI.6 Hidrometría

*Registro Público de Derechos del Agua (REPDA)
 Región Noroeste de la Comisión Nacional del Agua*

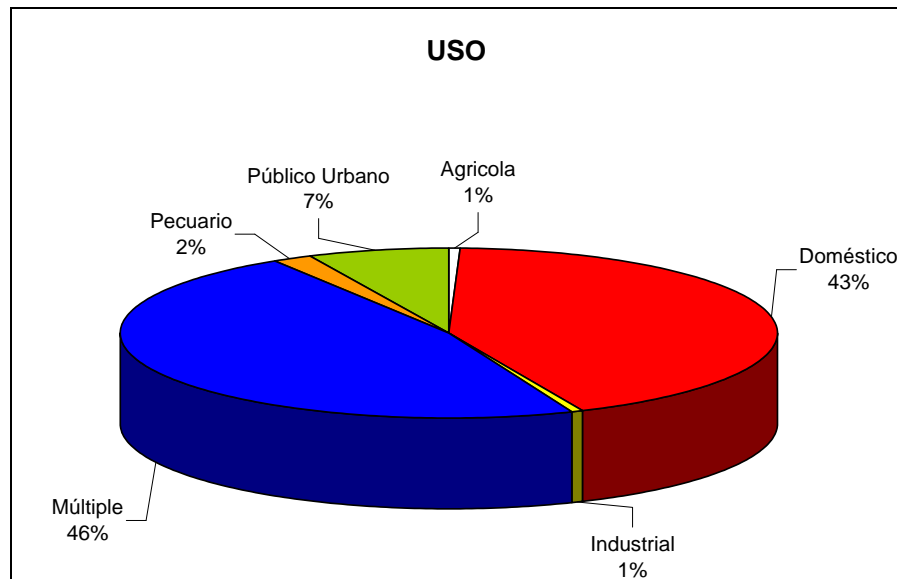
La tabla de aprovechamientos subterráneos proporcionada por REPDA es con fecha de actualización hasta el 2003 (*tabla digital en anexos*), en el área de estudio no se han otorgado concesiones (CNA Mexicali) por lo que la información en la tabla no presenta variabilidad. Se encuentran registrados un total de 191 aprovechamientos con un volumen de extracción anual de **708 529,74 m³**.

Uso

El uso principal es múltiple con un 46% seguido por el doméstico con el 43% y en menor uso es el relativo a la actividad agrícola (Figura 65).

A continuación se presentan las características de los aprovechamientos:

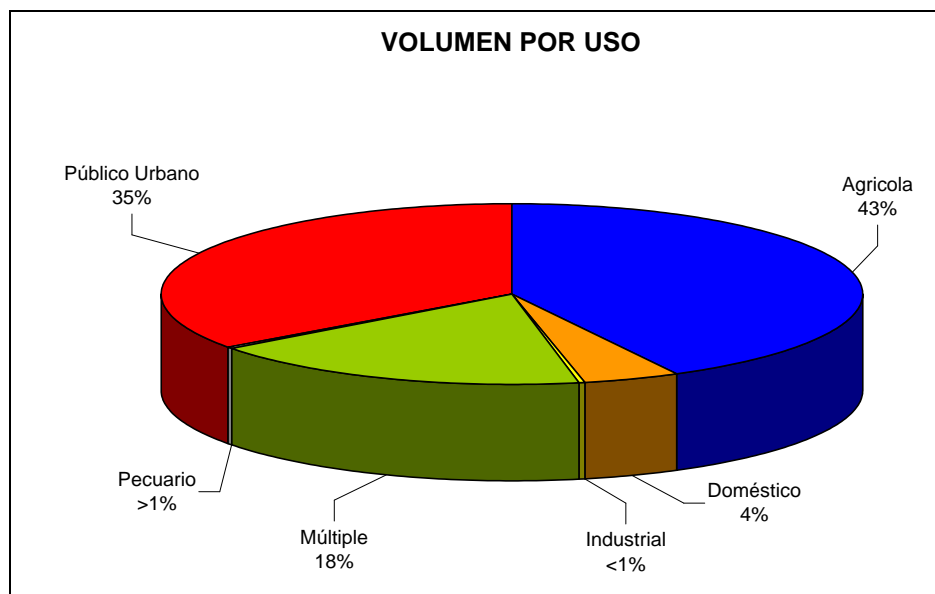
Figura 65 Uso de los aprovechamientos.



Volúmen de extracción por uso

Teniendo un volúmen de extracción total de 708 529 m³/a (REPDA) la cantidad mayor de extracción es la realizada por el uso agrícola con un 43%, seguido por el público urbano con un 35 % (Figura 66).

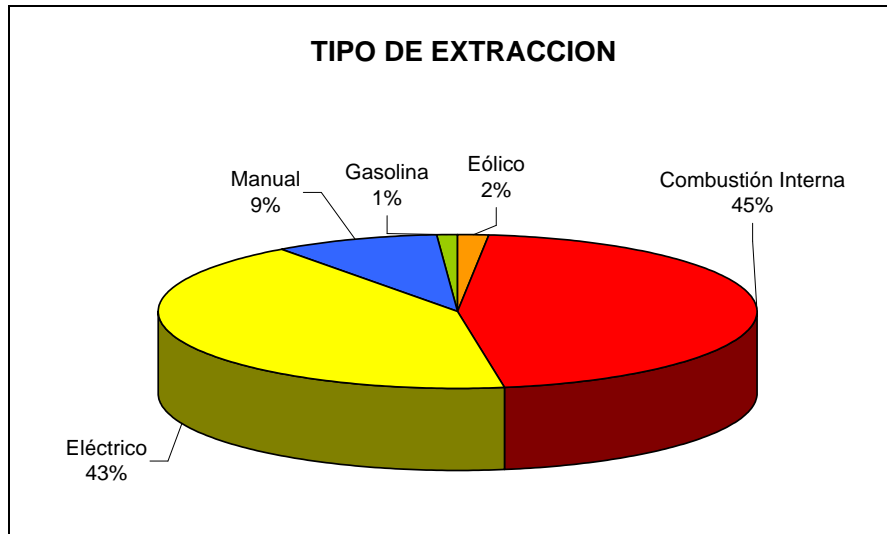
Figura 66 Volumen de extracción de aprovechamientos por uso.



Tipo de extracción

La mayoría de las extracciones son realizadas por motores de combustión interna con un 45 po%, seguido de motores eléctricos con el 43 % (Figura 67).

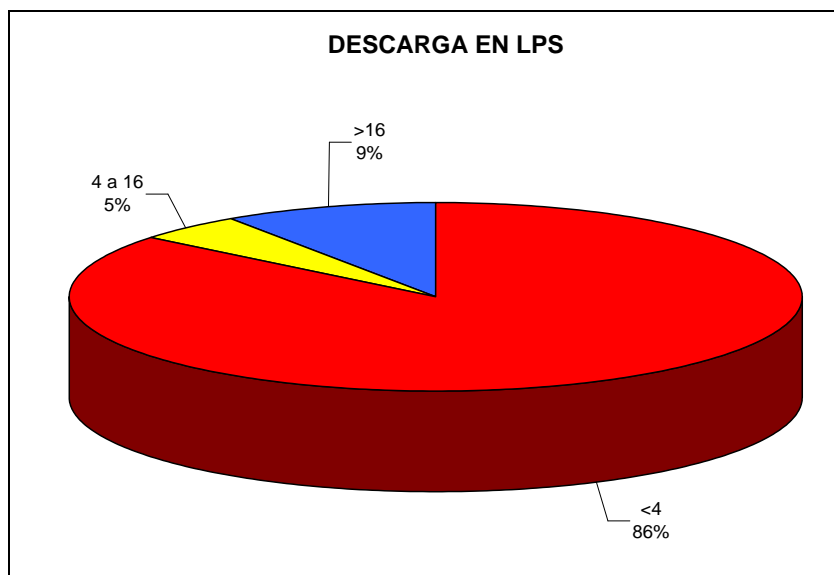
Figura 67 Tipo de extracción en los aprovechamientos.



Volumen de descarga

La mayoría de los aprovechamientos presentan una descarga menor a 4 lps representados en un 86 % del total (Figura 68).

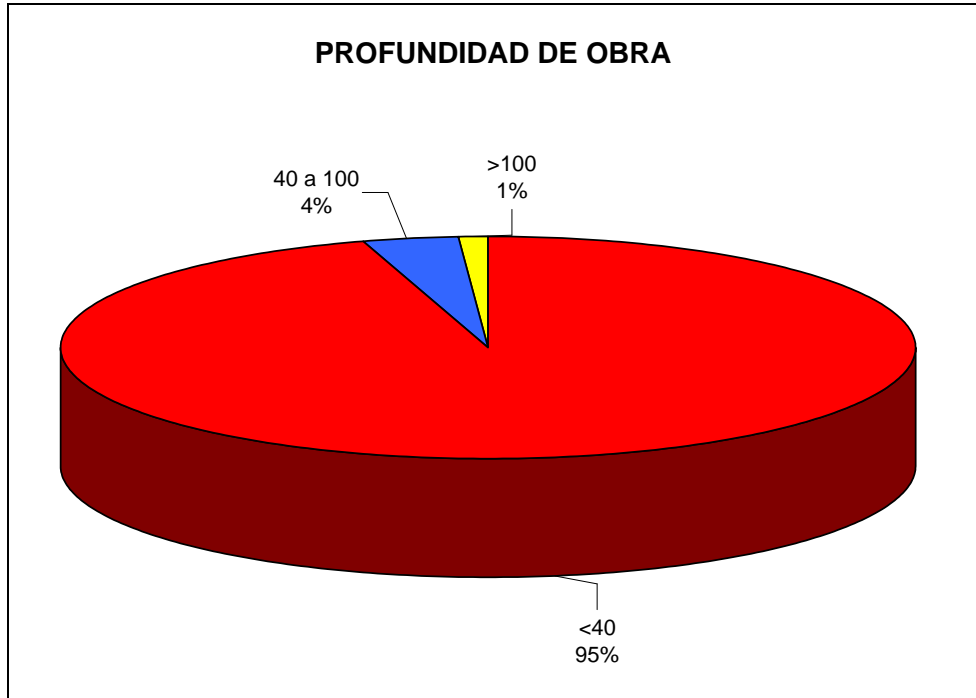
Figura 68 Descarga de aprovechamientos en litros por segundo.



Profundidad de obra

La profundidad total de los aprovechamientos va de 1,0 hasta 257 m, presentando en más del 90 % profundidades menores a 40 m. (Figura 69).

Figura 69 Profundidad total de los aprovechamientos.



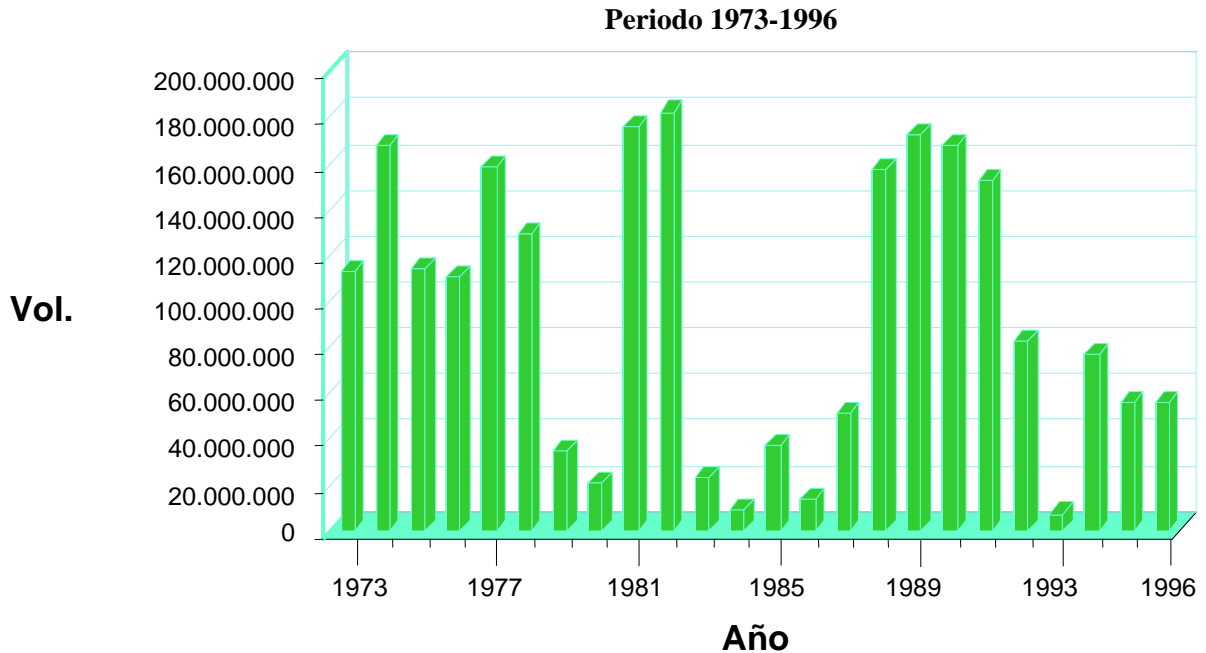
Módulos de Riego 1, 2 y 3, del Distrito de Riego 014 del Valle de Mexicali, Margen Izquierda el Río Colorado.

Para los módulos de Riego se tienen registrada una extracción de agua subterránea por bombeo un promedio de **179 hm³/a**, esta obtenida a partir de los valores reales de extracción por módulo proporcionada por el Distrito de Riego 014.

Mesa Arenosa de San Luis Río Colorado

La batería de pozos federales de la Mesa de San Luis extrae un promedio de **92,5 hm³/a**, tomando un periodo de 1973 a 1997, con extracciones altas de hasta 180 hm³/año a extracciones bajas de 7 hm³/año (Figura 70). Esto obedece principalmente a la demanda de agua requerida por el Distrito de Riego 014, y ésta a su vez por la cantidad de agua otorgada en la presa Morelos por E.U.A., ya que se tienen periodos de excedencia lo cual permite parar la extracción en la batería de pozos.

Figura 70. Volumen de extracción por bombeo
batería de pozos federales de la Mesa Arenosa de San Luis Río Colorado.



Registro Público de Derechos del Agua (REPDA) Región Noroeste de la Comisión Nacional del Agua

Para los aprovechamientos localizados en el área de estudio se tiene el registro oficial de volumen concesionado el cuál corresponde al Registro Público de Derechos del Agua (REPDA) de la Región de Baja California el cuál presenta un volumen de **286,5 hm³/año**.

XI.7 Hidráulica de Pozos

Históricamente se cuenta con 4 pruebas de bombeo de larga duración, además de 37 aforos realizados en pozos de carácter federal. Las cuales arrojaron transmisividades en un rango de 0,05 a 0,35 m²s⁻¹ en toda el área de estudio. De los cuales las mayores transmisividades se presentan en el cauce actual y no tan menores a el en la Mesa Arenosa.

Con el fin de tener un mayor conocimiento de las propiedades hidráulicas del medio que alberga al acuífero San Luis Río Colorado, durante el periodo del 18 al 22 de Septiembre se realizaron un total de 11 pruebas de bombeo distribuidas en la zona correspondiente a la margen izquierda del Río Colorado, en los módulos 1, 2 y 3. Las pruebas de bombeo realizadas en el área de estudio (Figura 71) son de corta duración (60 a 90 min.). En dichas pruebas de bombeo se midió el tiempo de recuperación del medio después de un periodo de bombeo determinado.

Los resultados hasta hoy interpretados, indican que el medio mantiene transmisividades del orden de $1.72 \times 10^{-1} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ como promedio, correspondientes a un acuífero granular de tipo libre con muy buena recuperación (Tabla 9).

Tabla 9 Parámetros hidráulicos obtenidos de las pruebas de bombeo de este estudio, 2005.

PARAMETROS HIDRAULICOS				
CLAVE	X	Y	Z	T (m ² / s) *
194	697123,867	3594763,09	23,077	2.07×10^{-2}
196	705824,226	3596870,73	28,641	1.03×10^{-1}
219	700238,197	3593180,57	25,234	1.72×10^{-1}
238	701201,328	3589808,19	24,297	2.73×10^{-2}
254	692842,359	3583179,52	20,447	3.02×10^{-2}
255	697095,809	3583970,02	21,573	2.96×10^{-2}
268	692149,374	3573904,44	17,241	2.02×10^{-2}
273	687738,322	3575138,29	17,206	2.34×10^{-2}
275	690055,442	3577947,7	17,091	6.89×10^{-3}
287	692129	3564281,98	15,838	1.39×10^{-2}
644	696319,425	3578044,88	18,905	1.86×10^{-2}

Valle de San Luis Río Colorado

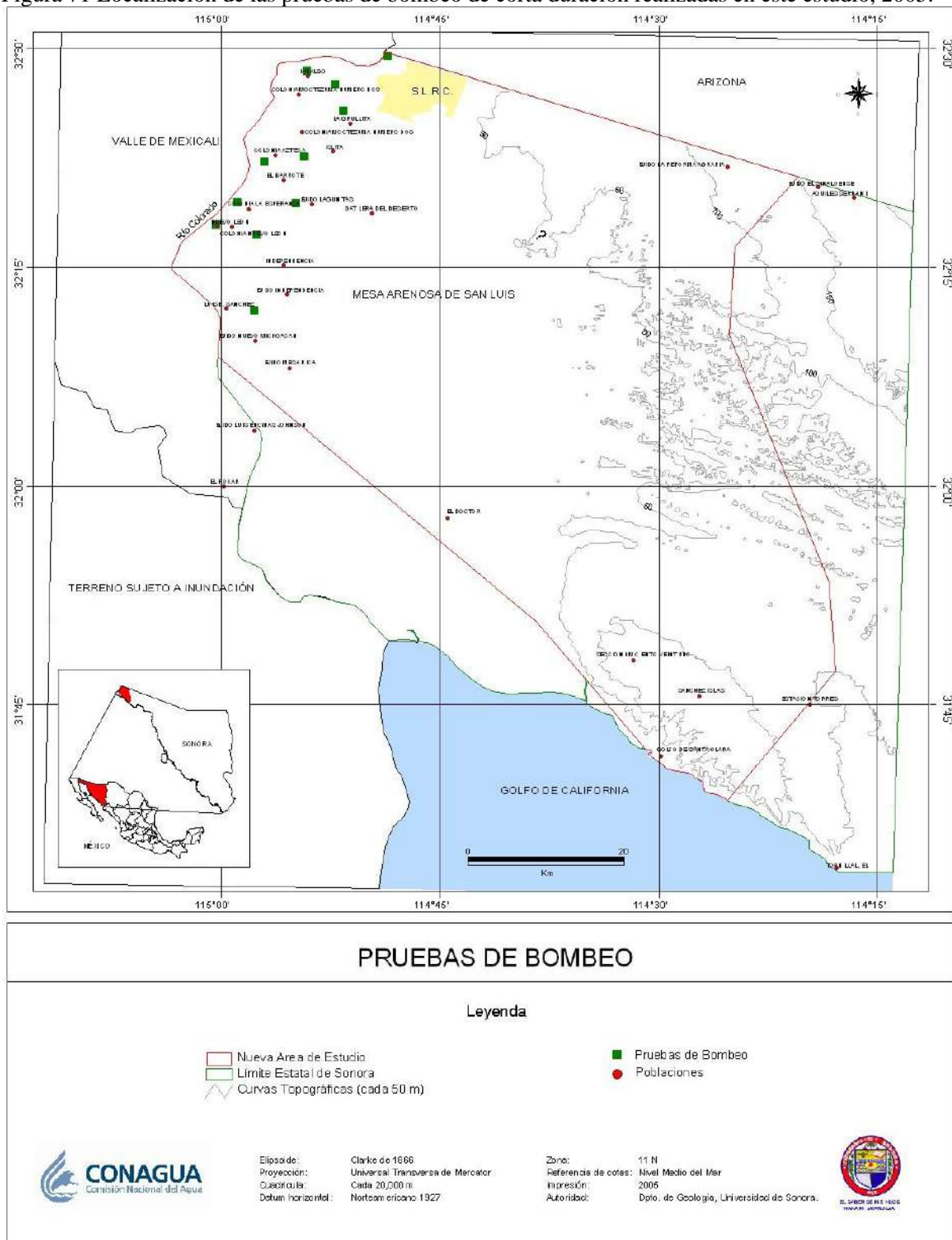
Para el área de **Valle de San Luis Río Colorado** se cuenta con transmisividades obtenidas de pruebas de bombeo realizadas en los pozos de la serie G, los cuales muestran un rango de transmisividades de 0.2 a $0.31 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Las cuales representan valores de un medio con materiales de gravas y arenas limpias (Tabla 10).

Tabla 10 Parámetros hidráulicos obtenidos de las pruebas de bombeo

Pozo de Bombeo	Latitud	Longitud	Pozo de Observación	Distancia entre pozos	Gasto (m ³ /s)	T (m ² /s)	S
G-3-14	32°27,83	114°43,17"	3 LESSER	92	0,135	$3,1 \times 10^{-1}$	$5,6 \times 10^{-3}$
G-4-23	32°25,26	114°34,51"	G-4-20	163	0,105	$2,0 \times 10^{-1}$	$5,6 \times 10^{-3}$
G-4-23	32°25,26	114°34,51"	G-4-22	464	0,105	$2,9 \times 10^{-1}$	$2,2 \times 10^{-3}$

Fuente: Ariel Construcciones, Estudio 1968.

Figura 71 Localización de las pruebas de bombeo de corta duración realizadas en este estudio, 2005.



XI.8 Modelo Conceptual

La información geológica, geofísica, piezométrica, e información de cortes litológicos, permitió actualizar el modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico del acuífero Mesa Arenosa.

Esta información indica que el sistema en la zona esta constituido por una unidad superior (Unidad C) de mas de 3 000 m de espesor, que corresponde a un sistema acuífero de tipo libre, que en ocasiones se pudiera comportar como semiconfinado o multicapa, en los niveles en donde ocurren materiales arcillosos.

Dicha unidad esta constituida principalmente por arenas no consolidadas de excelente textura para constituir un acuífero de alto rendimiento. En los primeros 300 metros de esta unidad se encuentran enclavados los pozos del distrito de riego, por lo que es la más importante en la zona.

Estos materiales presentan valores de transmisividad del orden de 1.0×10^{-1} a 4.13×10^{-1} , valores excelentes para un acuífero detrítico.

La superficie confinante en el subsuelo de dicho acuífero esta constituida por una secuencia transicional de lodos arenas y limos.

No existe recarga local por lluvia. El aporte principal de agua proviene del flujo subterráneo del lado americano y en menor importancia, la infiltración de agua en el distrito de riego, y en menor proporción de escurrimiento superficial estacional.

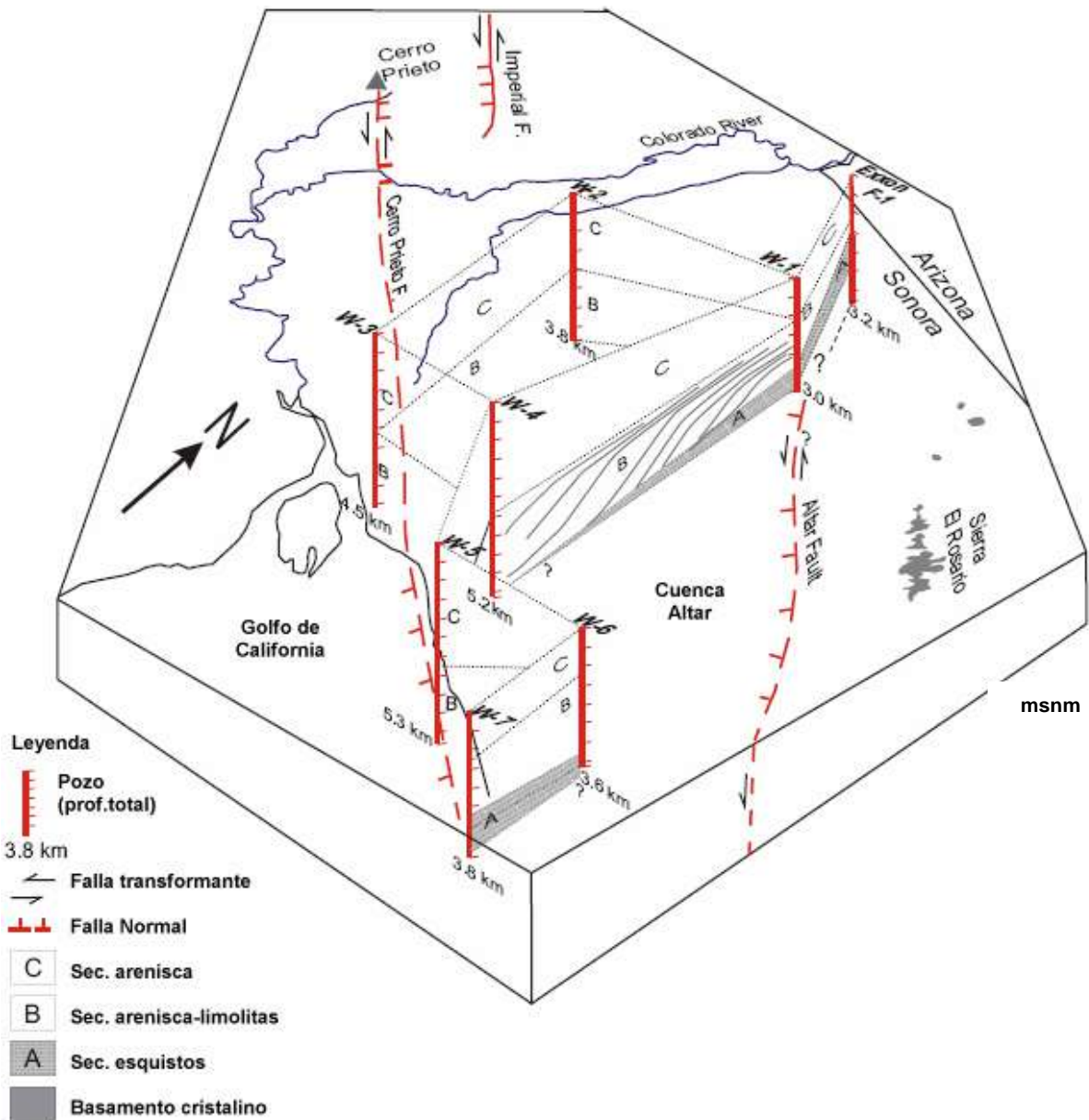
Las direcciones de flujo subterráneo indican tres principales tendencias una predominante hacia el suroeste, casi perpendicular a la línea de costa, otra con dirección norte-suroeste y que reconoce al río, un tercer flujo proviene de este flujo del río hacia el oeste para descargar en el Golfo de California.

Las pérdidas por evaporación se manifiestan en lo que corresponde a la zona agrícola (Módulos 1, 2 y 3) por la margen izquierda del Río Colorado, sin embargo son mínimas.

Las extracciones en el acuífero más significativas son a través de la batería de pozos federales ubicada en la zona, la cual extrae del orden promedio de $92 \text{ Hm}^3/\text{a}$.

Basados en esta información y apoyados principalmente por el corte litológicos de los pozos profundos (Pacheco, 2000) y el modelo conceptual del Valle de Mexicali (CIS, 1996), se obtuvo el siguiente Modelo Conceptual de Funcionamiento Hidrogeológico del Acuífero de San Luis Río Colorado (Figura 72).

Figura 72 Modelo Conceptual Hidrogeológico del Acuífero de San Luis Río Colorado
(Modificado de Pacheco, 2004)



Los primeros 200 metros de espesor del acuífero son penetrados por la batería de pozos de Mesa Arenosa, aunque la mayoría están a solo 150 m, y localizados al noroeste del acuífero. Le siguen 700 m de espesor hasta llegar a un espesor de 1 000 m en el acuífero considerado de tipo libre y compuesto por un material granular permeable.

XI.9 Balance de Aguas Subterráneas

La evaluación de la potencialidad de un acuífero debe realizarse mediante un método que trabaje directamente con el acuífero, con el agua infiltrada y relativamente al margen de los fenómenos que ocurren en la superficie. Este método recibe el nombre de “balance de agua subterránea”.

En el presente trabajo se efectuó un balance de agua subterránea que integra la parte oeste-noroeste del área de estudio ampliada, y abarca los módulos de riego 1, 2 y 3, el área de la batería de pozos de Mesa Arenosa ubicada al este de la ciudad de San Luis Río Colorado, y la misma ciudad, ya que la información histórica con la que se dispone es solo de esa área.

Se tomó como base los estudios anteriores realizados tanto en México, al este de San Luis Río Colorado y la franja izquierda del Río Colorado desde la frontera hasta cerca de la desembocadura al golfo de California, así como en la frontera sur de los Estados Unidos, específicamente en la región de Yuma, Arizona. Asimismo se realizó una campaña de trabajos de campo tales como geología, sondeos geofísicos, pruebas de bombeo, piezometría, etc.

Una vez trazadas las líneas equipotenciales se determinaron las líneas de flujo, determinando dos secciones de entrada principales, denominadas aquí como: Flujo Río Colorado y Flujo Yuma, que junto con los valores de transmisividades permitió calcular las entradas y salidas horizontales subterráneas correspondientes. Con el análisis de las evoluciones de la piezometría y el rendimiento específico se obtuvo el cambio en el almacenamiento del acuífero. Todo lo anterior nos permite calcular la Recarga Total media anual. A este valor se le restará la Descarga Natural Comprometida y el Volumen Anual de Agua Subterránea Concesionado e Inscrito en el REPDA y así obtener la Disponibilidad de Aguas Subterráneas del Acuífero de la Mesa Arenosa de San Luis Río Colorado.

Metodología

A veces es posible aislar ciertas partes del ciclo hidrológico para hacer un estudio por separado. Por ejemplo en agua subterránea, se está particularmente interesado en los componentes suelo y capa de agua que, tomados en conjunto, se pueden considerar como un subsistema. Sin embargo, al aislar este subsistema no se puede olvidar los diferentes transportes de humedad que lo unen con lo que lo rodea. Como los subsistemas forman parte de una entidad mayor, son abiertos desde el punto de vista de que su agua y energía se intercambia con el agua y la energía de los otros componentes del ciclo hidrológico.

Un subsistema como el del agua en el suelo se caracteriza por una entrada, una salida y una cantidad almacenada, cantidades que varían con el tiempo. La continuidad requiere que el subsistema esté en equilibrio. La forma más sencilla de expresar este equilibrio es por medio de la ecuación del balance de agua, algunas veces denominada ecuación del equilibrio hidrológico.

$$I - O = S$$

Donde I representa las entradas de agua, O las salidas y S el cambio en la cantidad de agua almacenada, para un período dado de tiempo. En cualquier subsistema aislado del ciclo hidrológico, se puede establecer una ecuación de equilibrio hidrológico. Dependiendo de las circunstancias, dicha ecuación puede ser muy simple o más complicada. Por ejemplo, para un pluviómetro la ecuación será de la forma

$$Pr = D S$$

Que indica que para un período dado de tiempo, la cantidad de precipitación (Pr) será igual al incremento de agua almacenada y medido en el pluviómetro. En este caso DS tendrá signo positivo.

En el caso de un lisímetro, en el que se elimina toda el agua en exceso, la ecuación, conteniendo más miembros, será para un período dado de tiempo:

$$Pr + I - Et - Dr = D S$$

Donde:

- Pr = precipitación
- I = agua aportada al lisímetro (riego)
- Et = evapotranspiración
- Dr = exceso de agua eliminada del lisímetro
- D S = cambio en la cantidad de agua almacenada en el lisímetro,
- D Ssm = cambio en la humedad del suelo almacenada

En nuestro caso $DS = D Ssm$

Componentes del Balance

Al elaborar cualquier balance de agua hay que tener cuidado en expresar todos los componentes del mismo en las mismas dimensiones y unidades.

Área de Balance

El área utilizada para calcular el balance de agua subterránea depende de varios factores, por una parte, lo ideal sería efectuar el balance para todo el acuífero (valle, planicie, etc.) a fin de conocer su potencialidad total; sin embargo, esto no siempre es posible, debido a que la aplicación del balance requiere conocimiento del comportamiento del acuífero, observado en pozos, los cuales no se encuentran distribuidos en toda el área, sino solo en una porción de la misma. Por consiguiente, en muchas ocasiones el área de balance tiene que limitarse al área de datos disponible.

Otras veces aún cuando se dispone de información acerca del comportamiento y características de todo el acuífero, puede interesar, por alguna

razón conocer especialmente el funcionamiento y potencialidad de una porción del mismo. En este caso el área de balance se limitará a esa porción.

El área de balance puede estar limitada por fronteras reales, geológicas e hidrológicas, tales como afloramientos o masas de agua (mar, lagos, etc.), y por fronteras virtuales o imaginarias.

Tiempo

No se puede excluir el elemento tiempo de estas ecuaciones ya que los subsistemas son abiertos y deben ser considerados como tales al evaluar las entradas y salidas de agua que tengan lugar en un determinado período de tiempo.

Generalmente, se establece un balance de agua para un período de tiempo que se elige de tal forma que se conozcan los valores numéricos de todos los componentes de la ecuación, a excepción de uno de ellos. Por ejemplo, si se elige el período de tiempo comprendido entre dos riegos, el contenido de humedad del suelo al principio y al final del período considerado será el de capacidad de campo. Por ello, en la cantidad de agua almacenada por el suelo será igual a cero. Como se miden la precipitación, aporte de agua y la cantidad de agua eliminada por drenaje, se podrá calcular la única incógnita que será la cantidad de agua eliminada por la evapotranspiración.

En el ejemplo anterior se ha empleado la ecuación del balance de agua para determinar una cantidad desconocida del subsistema, que era E_t . Es claro que se deberá conocer las otras cantidades con gran precisión ya que si no, al haber imprecisiones en una o más de las cantidades conocidas, se puede obtener un resultado con un error superior al valor de la incógnita. También se puede usar la ecuación del balance para comprobar si se han tenido en cuenta todos los componentes del flujo presentes y para determinar la importancia de los mismos en la zona en estudio. Por tanto, un balance de agua puede ser una técnica muy útil en cualquier estudio hidrológico si se emplea de las diferentes formas posibles.

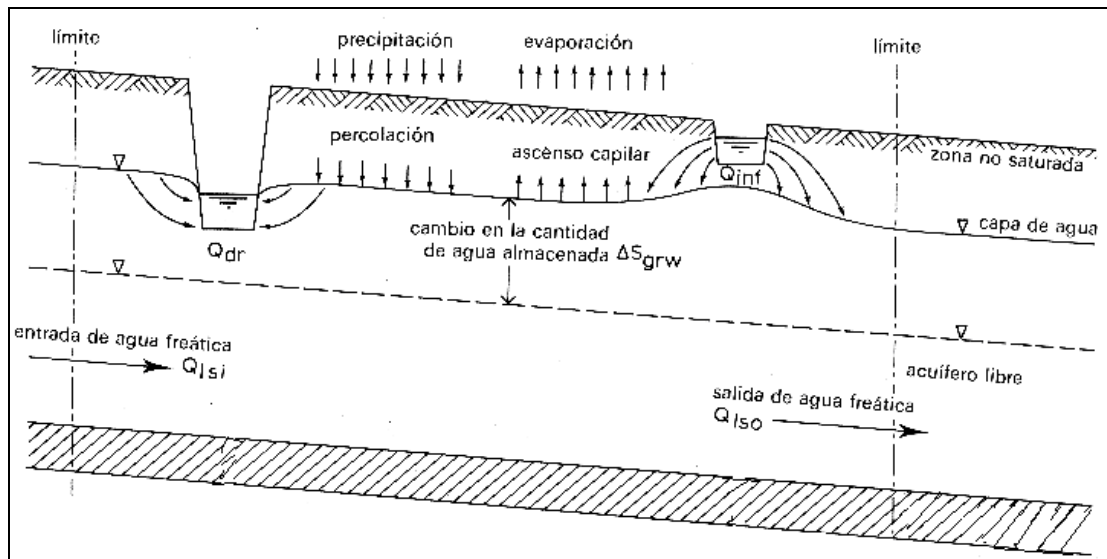
Se pueden resumir las características más importantes del balance de agua de la siguiente forma:

- se puede establecer un balance de agua para cualquier subsistema del ciclo hidrológico, cualquier tamaño del área en estudio y para cualquier período de tiempo.
- también puede servir para conocer una incógnita de la ecuación del balance siempre y cuando se conozcan los restantes miembros de la ecuación con la suficiente precisión.
- se puede emplear un balance de agua para comprobar si se han considerado cuantitativamente todos los componentes del flujo de agua presente en la zona en estudio.

- se puede considerar al balance de agua como un modelo del proceso hidrológico completo en estudio y, por ello, se puede emplear para predecir el efecto que sobre unos componentes del sistema o subsistema tendrán cambios introducidos en los restantes componentes.

En la siguiente figura 73 se representa en su forma más elaborada el subsistema constituido por el suelo y la capa de agua, que es en el que el especialista en agua subterránea está interesado. Como este subsistema es abierto, es decir, existe intercambio de agua con el exterior, es necesario definir correctamente los límites del subsistema y los componentes del flujo de agua que lo atraviesan.

Figura 73 Componentes del flujo de agua de un subsistema de acuífero de tipo libre.



La situación planteada en la Figura 73 es la correspondiente a un acuífero libre, freático, limitado superiormente por la superficie del terreno. Este acuífero libre está parcialmente saturado y el límite entre la parte saturada y la no saturada viene definido por la capa freática. El cambio en la altura de la capa de agua, puede ser medido por medio de sondeos o pozos de observación abiertos. Dado que se está interesado en establecer un balance de agua del sistema limitado superiormente por la capa de agua, inferiormente por el substratum y lateralmente por las líneas verticales trazadas a la derecha e izquierda del gráfico, en este subsistema, se pueden distinguir las siguientes componentes de entrada y salida de agua:

Entradas de Agua

Perc = Percolación efectiva, que es la que proviniendo de la precipitación atraviesa la zona no saturada del suelo y alcanza la capa freática.

Q_{inf} = Filtraciones en canales, cauces abiertos de agua y otras masas de agua cuyo nivel es superior al de la capa freática.

Q_{isi} = Entrada lateral subsuperficial de agua procedente de un área cercana cuyo nivel freático es superior al de la zona considerada.

Salidas de Agua

Cap = Ascenso capilar procedente de la capa de agua (superficial) y que va a parar a la zona no saturada del suelo situada por encima de dicha capa.

Q_{dr} = Salidas de agua desde la capa freática hasta canales, cauces abiertos de agua y otras masas de agua cuyo nivel es inferior que el de la capa freática.

Q_{iso} = Salida de agua lateral subsuperficial que procedente del subsistema en estudio va a parar a un área cercana cuyo nivel freático es inferior al del acuífero estudiado.

En resumen conceptualmente el planteamiento del problema es la suma algebraica de los componentes del flujo citados, que deberá ser igual al cambio en la cantidad de agua almacenada en el acuífero libre. Para entendimiento del planteamiento, dicho cambio viene expresado por el símbolo $D S_{grw}$. Por tanto, la ecuación del balance de agua puede adoptar la forma siguiente:

$$(Perc + Q_{inf} + Q_{isi}) - (Cap + Q_{dr} + Q_{iso}) = D S_{grw}$$

O bien simplemente: Recarga - Descarga = Cambio en la cantidad de agua almacenada

Por otra parte, se evapora agua por la superficie del suelo y además, la cubierta vegetal consume agua en la transpiración. Si la evapotranspiración (et) es superior que la precipitación y el riego, el contenido de humedad del suelo disminuye y llega a ser inferior al correspondiente al equilibrio entre el contenido de humedad del suelo y la presencia de la capa de agua; esto da lugar a que si la capa de agua y la zona radicular están en contacto por medio de la franja capilar se produzca un ascenso capilar de agua (Cap).

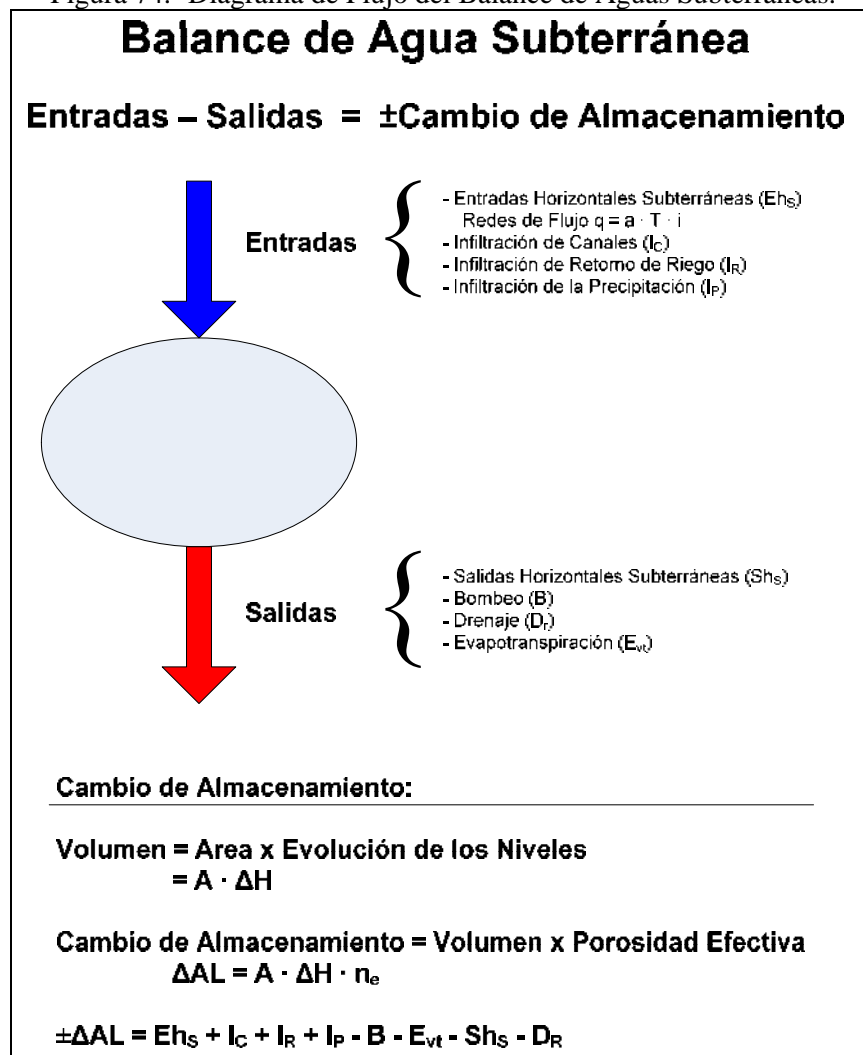
Los canales, cauces abiertos de agua y otras masas superficiales de agua tales como lagos, tienen cierta influencia sobre la altura de la capa de agua en el suelo. Cuando el nivel del agua en ellos es superior al de la capa de agua en el suelo, existe una pérdida y, por tanto, una recarga de la capa freática (Q_{inf}).

Por el contrario, si el nivel del agua en el suelo es superior al existente en los cauces de agua, existirá un paso de agua del suelo a esos cauces (drenaje) y se descargará esa agua por ellos (Q_{dr}). El volumen descargado por el acuífero a un río y en forma de manantiales, (Q_{dr}), se cuantifica mediante estaciones de aforo para medir la descarga de los manantiales y el caudal base de las corrientes. Por medio

de medidas hechas en los cauces de agua, se pueden determinar las entradas y salidas de agua superficial y el balance de agua resultante mostrará la cantidad que entra menos la que sale del sistema superficial de agua.

Si el nivel del agua en cauces abiertos permanece aproximadamente igual durante un período de tiempo considerado, por regla general se desprejará dicha cantidad. Obsérvese que para grandes extensiones de agua superficial y para períodos largos de tiempo, no se puede desprejar la evaporación. Una estimación bastante aproximada de la descarga del acuífero por evapotranspiración, (E_t), se tiene aplicando la evaporación potencial medida, al área en que está ocurriendo este tipo de descarga.

Figura 74.- Diagrama de Flujo del Balance de Aguas Subterráneas.



XI.10 Ecuación General de Balance

A la ecuación que expresa el principio de conservación de la materia aplicado a un acuífero o porción del mismo, se le llama “ecuación de balance de agua

subterránea”.

Ahora bien, tanto la recarga como la descarga ocurren en diferentes formas. La recarga puede ocurrir por flujo subterráneo (Eh) y/o por recarga vertical en el área de balance (Rv). Esta recarga puede estar constituida por la infiltración debida a la precipitación (Ip), la infiltración debida al retorno de los riegos (Ir) o la infiltración de los canales, o cuerpos de agua (Ic).

La descarga puede tener lugar por flujo subterráneo (Sh); aflorando en forma de manantiales o una corriente superficial, ya sea drenaje artificial o natural (D); mediante pozos de bombeo (B) y por evapotranspiración en zonas de nivel freático somero (Et).

$$Eh + Ip + Ir + Ic - (Sh + B + Et + D) = CVA$$

Donde:

Entradas Horizontales por Flujo Subterráneo, (Eh)

Infiltración por Lluvia (Ip)

Infiltración por cauce de canales (Ic)

Infiltración por Riego (Ir)

Salidas Horizontales por Flujo Subterráneo (Sh)

Extracción por Bombeo (B)

Salidas por Evapotranspiración (Et)

Drenaje de la zona de estudio (D)

Cambio del Volumen Almacenado (CVA)

XI.10.1 Entradas Horizontales por Flujo Subterráneo (Eh)

Para cuantificar el caudal de agua subterránea que participa como entradas por flujo subterráneo horizontal al sistema acuífero, para un período considerado, se realiza aplicando la Ley de Darcy a la red de flujo a través de una sección limitada por dos isolíneas equipotenciales y dos líneas de corrientes, definida por la configuración de elevación del nivel estático para el período analizado.

$$i = (H_1 - H_2)/L \quad \dots \text{gradiente hidráulico}$$

$$Q = aTi = akbi \dots \text{Gasto}$$

$$T = K(b) \dots \text{transmisividad}$$

Por lo tanto:

$$K = T / b \dots \text{permeabilidad (Conductividad hidráulica)}$$

Siendo **a** el ancho de la celda, **b** el espesor saturado del acuífero y **T** la

transmisividad definida como el producto de $K \cdot b$, la expresión para el gasto que circula por la celda obtenemos:

$$Q = aTi = abK$$

La expresión de Q para n celdas de la red de flujo, es la suma de los caudales que circulan por la misma:

$$Q = \sum_{j=1}^n a_j b_j K_j i_j$$

Las magnitudes de i_j y a_j , se midieron directamente del plano de configuraciones de elevación del nivel estático, cuando se trazó la red de flujo.

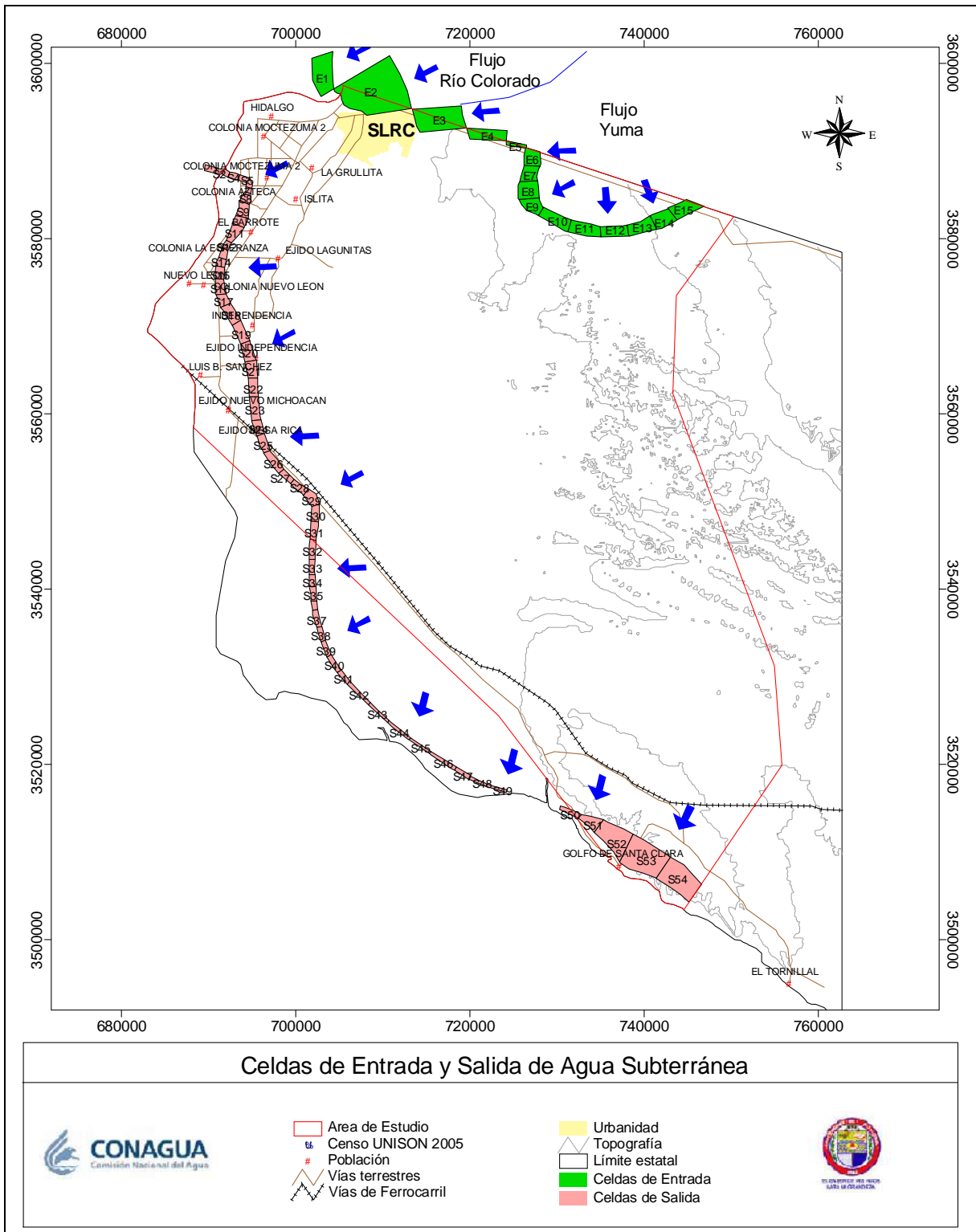
Para cuantificar el caudal de flujo que circula a través de la sección seleccionada, se consideró el concepto de transmisividad T , representativo para cada una de las secciones participantes en forma de promedios, tomando en cuenta que correspondan con las clases texturales de los materiales del acuífero en cada celda. De esta forma se identificaron dos flujos principales: Flujo Río Colorado y Flujo Yuma (Figura 75) y se calcularon las entradas por cada celda (Tabla 11).

Tabla 11. Celdas de entrada de agua subterránea.

No de Celda	B (m)	b (m)	dh (m)	dl (m)	K (m/s)	T (m ² /s)	i = dh/dl	Q (m ³ /seg)	Q (m ³ /año)
E1	4170	200	1	1650	0,000515	0,103	0,000606061	0,260309091	8 209 107,491
E2	5500	200	1	5940	0,000515	0,103	0,00016835	0,09537037	3 007 600
E3	2650	200	1	4790	0,00162	0,324	0,000208768	0,179248434	5 652 778,622
E4	1200	200	1	3750	0,00162	0,324	0,000266667	0,10368	3 269 652,48
E5	400	200	1	1530	0,000875	0,175	0,000653595	0,045751634	1 442 823,529
E6	1800	200	1	1250	0,000875	0,175	0,0008	0,252	7 947 072
E7	1780	200	1	1040	0,000875	0,175	0,000961538	0,299519231	9 445 638,462
E8	2050	200	1	1690	0,000875	0,175	0,000591716	0,212278107	6 694 402,367
E9	1950	200	1	1270	0,000875	0,175	0,000787402	0,268700787	8 473 748,031
E10	3680	200	1	580	0,000875	0,175	0,001724138	1,110344828	3 5 015 834,48
E11	3650	200	1	710	0,000875	0,175	0,001408451	0,899647887	28 371 295,77
E12	3200	200	1	520	0,000875	0,175	0,001923077	1,076923077	33 961 846,15
E13	3080	200	1	620	0,000875	0,175	0,001612903	0,869354839	27 415 974,19
E14	2360	200	1	1100	0,000875	0,175	0,000909091	0,375454545	11 840 334,55
E15	2720	200	1	980	0,000875	0,175	0,001020408	0,485714286	15 317 485,71
								6,534297116	206 065 593,85

Entrada Horizontal de 207 Hm³/año

Figura 75.- Celdas de entrada y salida en el cálculo del balance de aguas subterráneas.



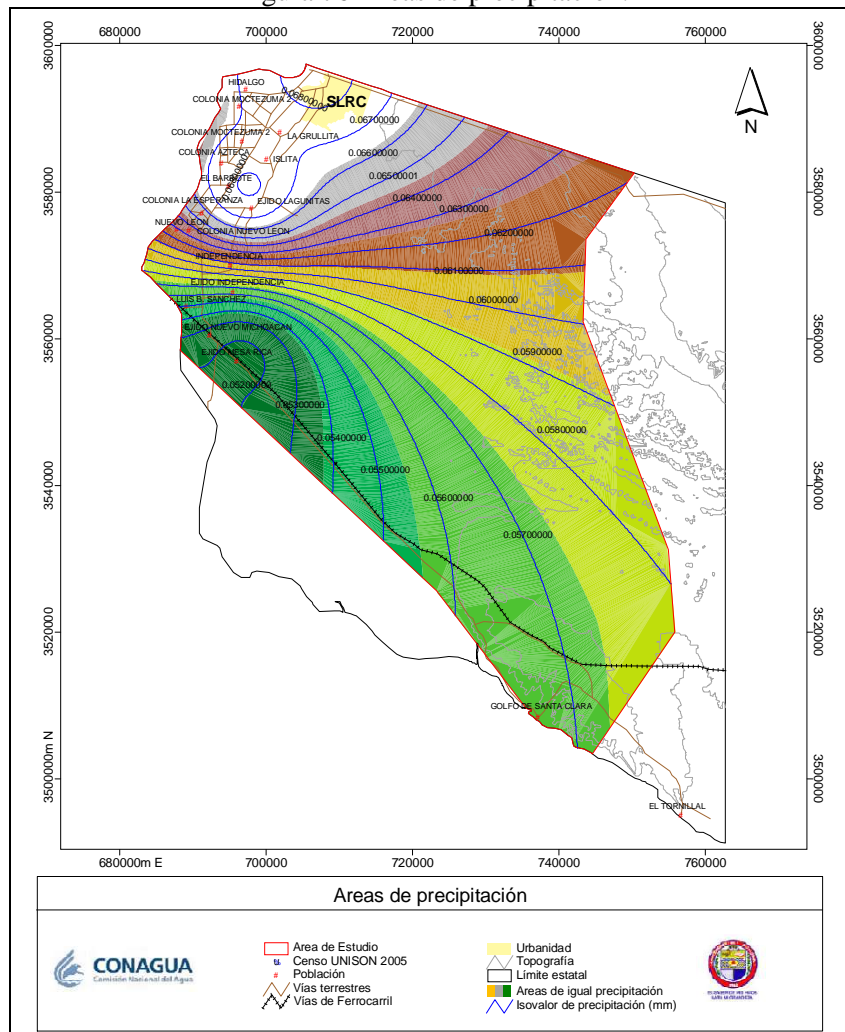
XI.10.2 Lluvia y evapotranspiración meteórica

La infiltración potencial por lluvia que recarga al acuífero (Ip) se obtiene por la diferencia del volumen de la precipitación y la evapotranspiración calculada por el método de Turc multiplicada por el coeficiente de infiltración en el área de estudio.

Precipitación

El cálculo se realiza a partir de los datos arrojados por las estaciones climatológicas localizadas en el área o en sus inmediaciones. De estas estaciones se obtiene una lámina promedio de precipitación anual con las cuáles se realiza un mapa de isovalores dentro del área de estudio para así obtener el volumen de precipitación total anual. El volumen de lluvia se obtiene de multiplicar la superficie del área de análisis (3 813 km²), por la lámina precipitada que se configura con el programa ArcView utilizando el método de Cargas Por la Distancia Inversa (figura 76), del cuál se obtiene un resultado de **227 hm³/año** en el área de estudio.

Figura 76 Áreas de precipitación.

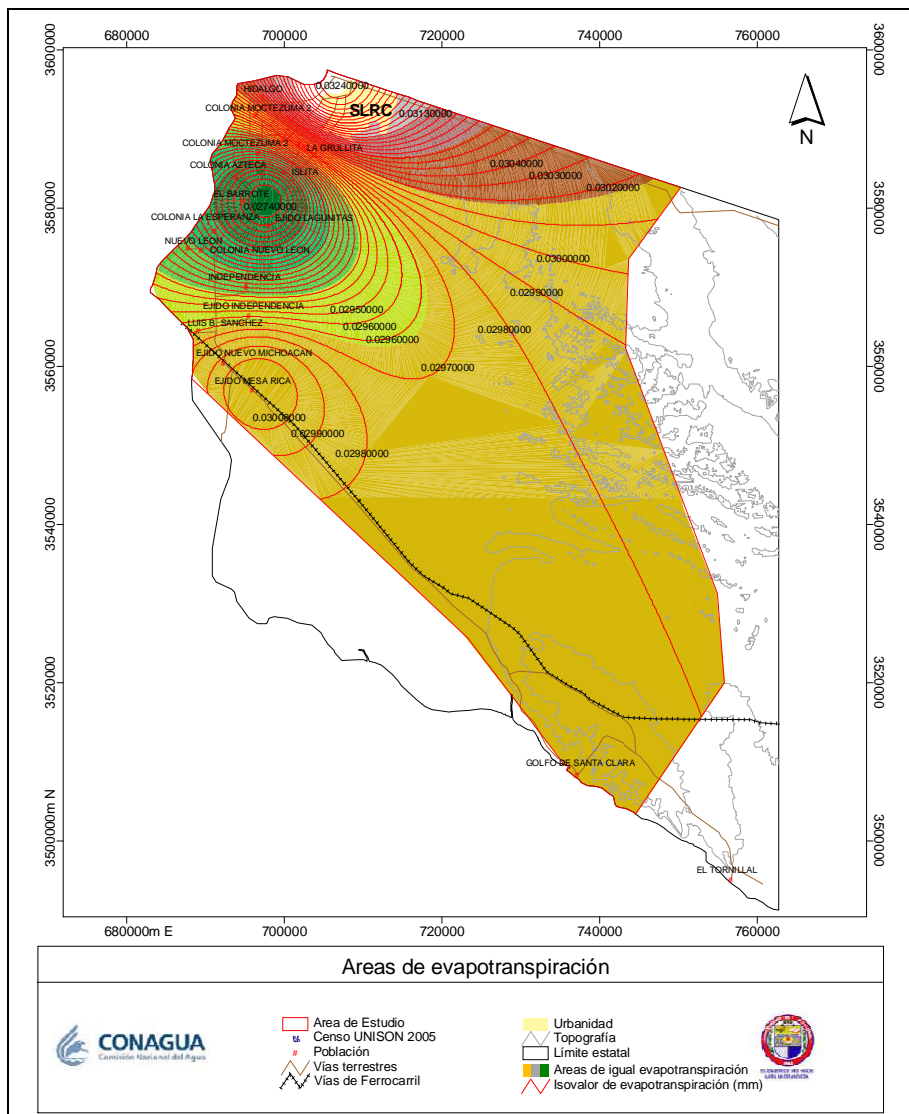


Evapotranspiración

Después de realizar el cálculo mediante el método de Turc para cada estación se obtuvo el volumen de la evapotranspiración generando un mapa de isovalores de cada estación, de igual manera que con la precipitación.

El cálculo de la evapotranspiración calculado a partir de la fórmula teórica de Turc al cuadrado para toda el área de estudio calculado de la misma manera que la precipitación por el Método de Cargas con Distancia Inversa, obteniendo un resultado de **194 Hm³/año** (Figura 77), correspondiendo al 85 % de la precipitación en el área.

Figura 77 Áreas de evapotranspiración.



XI.10.3 Infiltración por Precipitación

En el área de estudio se tiene un coeficiente escurrimiento de 0% a 5% (INEGI) el cuál es demostrado por la ausencia de cauces o corrientes superficiales,

esto debido al material arenoso que prevalece en el área el cuál presenta una alta permeabilidad y permite una alta infiltración con un coeficiente del 95%.

El cálculo del valor de infiltración por lluvia, se define como:

$$I_p = (V_p) K$$

Donde:

V_p- Volumen precipitado por lluvia en m³

K- Coeficiente de proporcionalidad de infiltración

$$V_p = \text{volumen de lluvia} - \text{volumen de evapotranspiración}$$

$$227 \text{ hm}^3/\text{año} - 194 \text{ hm}^3/\text{año} = 33 \text{ hm}^3/\text{año}$$

Si K = 0.95 entonces

$$I_p = 33 \text{ hm}^3/\text{año} \times 0.95$$

$$I_p = 31.35 = 31 \text{ hm}^3/\text{año}$$

La infiltración potencial (I_p) en el área de estudio es de 31 hm³/año

XI.10.4 Infiltración por cauce de arroyos o canales de riego (I_c)

Tomando entonces el planteamiento del balance de canales descrito anteriormente, el volumen de entrada de agua por canales a los módulos de riego 1, 2 y 3 es obtenido a partir del aforo del Distrito de Riego 014 cuyo promedio es de 350 Hm³/año y corresponde al agua superficial y subterránea obtenida por la extracción de bombeo.

Para la obtención del volumen de infiltración es fundamental el trabajo realizado por Escamilla (1990), asesor en su momento del Jefe del Distrito de Riego 014, ya que se fundamentó en el análisis de 20 años de observación y medición histórica, este es el apoyo para la obtención de los porcentajes de pérdidas en el sistema de canales y los retornos de riego.

En consecuencia, los porcentajes de pérdidas utilizados en el cálculo provienen de la tabla general de conducción en cauces del Distrito de Riego 014.

Tal como se expuso en la metodología, conceptualmente existe una pérdida en los canales por infiltración y evaporación. En el Distrito de Riego 014 el valor es obtenido a partir de la diferencia de volúmenes en las cabezas de medición de entrega en los linderos fronterizos, la entrega en los módulos y la entrega en las

parcelas, este es conocido por los cálculos que realiza, obteniendo una pérdida del 12% de los cuales un 37,5 % se evapora y el 62,5 % se infiltra (Escamilla, 1990).

Esto queda expresado matemáticamente de la siguiente manera:

$$350 \text{ hm}^3/\text{a} \times 0,12 = \mathbf{42 \text{ hm}^3/\text{a}}$$

De los cuales:

$$350 \text{ hm}^3/\text{a} \times 0,625 = \mathbf{26,25 \text{ hm}^3/\text{a Infiltración}}$$

$$350 \text{ hhm}^3/\text{a} \times 0,375 = \mathbf{15,75 \text{ hm}^3/\text{a Evaporación}}$$

La **infiltración por cauce** de arroyos o canales de riego (**Ic**) es de **26,25 hm³/año**

XI.10.5 Infiltración por Riego (Ir)

Para determinar la infiltración en la superficie de riego al volumen total de extracción, mediante el sistema de bombeo le fue restado el volumen de agua destinado para el uso público urbano, considerando exclusivamente el volumen aprovechado en el riego agrícola.

La infiltración se obtuvo utilizando dos métodos: 1) El obtenido a partir de los volúmenes de infiltración del riego en las parcelas, por medio de las láminas de riego promedio con base en los datos del Distrito de Riego 014, el cual es:

Para una superficie cultivada de 33 741 ha, se aplica una lámina promedio de 0,84m, lo que hace un volumen de 283,4 hm³ aplicados al año. Con un Índice de Infiltración del 20 % (Distrito de Riego 014), se obtiene un volumen de **Infiltración por retorno de riego de 57 hm³ por año.**

El segundo cálculo se realizó utilizando los volúmenes de infiltración de riego en las parcelas y el porcentaje de infiltración obtenido por Escamilla (1990):

En parcela las pérdidas que existen son del 34% (retorno de riego) de los cuales el 60% se percola y el 40% se evapora.

$$308 \text{ Hm}^3/\text{a} \times 0,34 = \mathbf{104,72 \text{ hm}^3/\text{a}}$$

$$104,72 \text{ hm}^3/\text{a} \times 0,6 = \mathbf{62,83 \text{ hm}^3/\text{a Percolación}}$$

$$104,72 \text{ hm}^3/\text{a} \times 0.4 = \mathbf{41,88 \text{ hm}^3/\text{año Evaporación}}$$

Finalmente se realizó un promedio con ambos resultados, considerando que de esta manera se actualiza el volumen. Entonces con los $57 \text{ hm}^3/\text{a}$ obtenidos por el cálculo de la lámina de riego y los $63 \text{ hm}^3/\text{a}$ por el cálculo de volúmenes en parcelas, se logra un promedio final de **$60 \text{ Hm}^3/\text{a}$ por infiltración en riego.**

XI.10.6 Extracción por Bombeo (B)

La extracción de agua subterránea por bombeo se determinó basándose en la información obtenida en el Distrito de Riego 014 y corroborando los datos durante el recorrido de campo para identificar las superficies de riego, tipo de cultivo, tiempo de operación de la obra, registro hidrométrico subterráneo y aplicación de lámina de riego para cada cultivo, así mismo se obtuvo información relativa a características constructivas de cada pozo activo ubicado dentro del área de análisis.

La información anterior dio como resultado una extracción media anual de **$92,5 \text{ hm}^3$** para el área de pozos federales de la Mesa Arenosa, mientras que el volumen de extracción por bombeo en los módulos 1, 2 y 3 en la margen izquierda del río Colorado resultó de aproximadamente **170 hm^3** anuales. De esta forma, la extracción real promedio en estas dos zonas da un total de **$262,5 \text{ Hm}^3$** anuales.

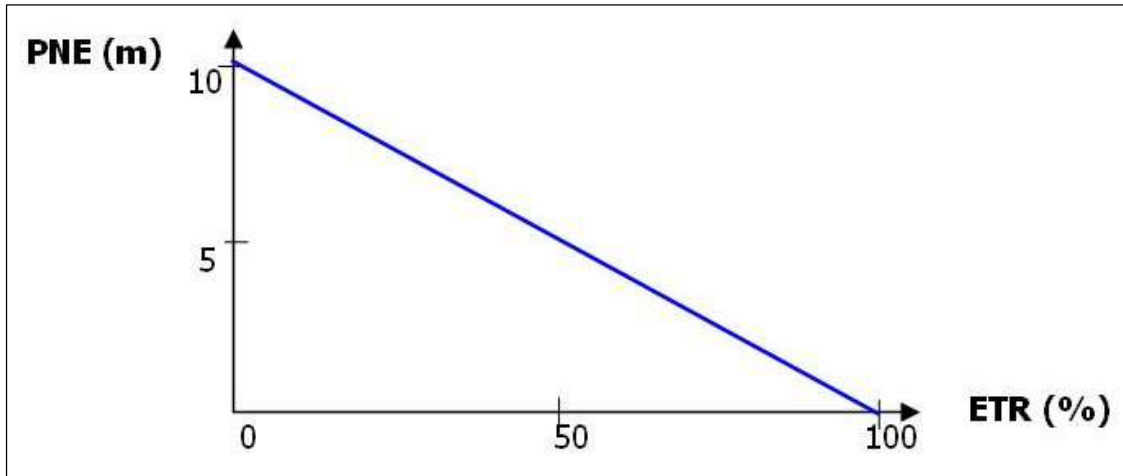
El dato oficial obtenido del Registro Público de Derechos del Agua (REPGA) de la Región de Baja California el cuál presenta un volumen de **$286,5 \text{ hm}^3/\text{a}$** , el cual será utilizado en el balance.

XI.10.7 Salidas por Evapotranspiración (Etr)

El cálculo de esta evapotranspiración corresponde con aquella pérdida de agua freática somera y que se aplica al balance de aguas subterráneas, considerando que el concepto tiene influencia hasta una profundidad máxima de 10 m, bajo el siguiente proceso (CNA, 2006):

En áreas donde el nivel estático se encuentra a una profundidad menor a 10 m, se calcula el valor de ETR exclusivamente para las zonas de niveles someros y se pondera el valor del volumen obtenido. Se parte de una relación lineal entre la profundidad al nivel estático (PNE) y el % de ETR (Figura 78).

Figura 78 Relación entre profundidad al nivel estático vs porcentaje de agua susceptible de evapotranspirarse.



Suponiendo una profundidad límite de extinción de 10 m para el fenómeno de ETR, a menor profundidad mayor será el % de ETR, de tal manera que a 10 m el valor de ETR es nulo y a 0 m el valor es del 100 %, a 5 m el 50%, a 2 m el 80% etc. Por ejemplo cuando el valor medio de profundidad es 10 m, se multiplica por 0.1 (significa que a esta profundidad, sólo el 10 % es susceptible de evapotranspirarse).

Lo mismo se hace para cada área comprendida entre dos curvas de profundidad menor a 10 m y este resultado multiplicado por el coeficiente promedio de evapotranspiración en el área, al final se obtendrá la suma de los volúmenes evapotranspirados.

En el área de Mesa Arenosa se registran profundidades de 28 a 43 m, por lo que no aplica el método antes descrito y no es necesario incluirlo en la ecuación de balance. Por su parte, en los Módulos de Riego se tienen profundidades de 7 a 14 m, y solo se aplicó en la franja costera donde las profundidades varían de 6 a 8 m (Figura 79). Para estas áreas se aplicó el principio de ETR para acuíferos freáticos obteniéndose **17.8 hm³** por concepto de pérdidas anuales por ETR (Tabla 12).

Figura 79 Áreas con profundidades al nivel freático menores a 10 m

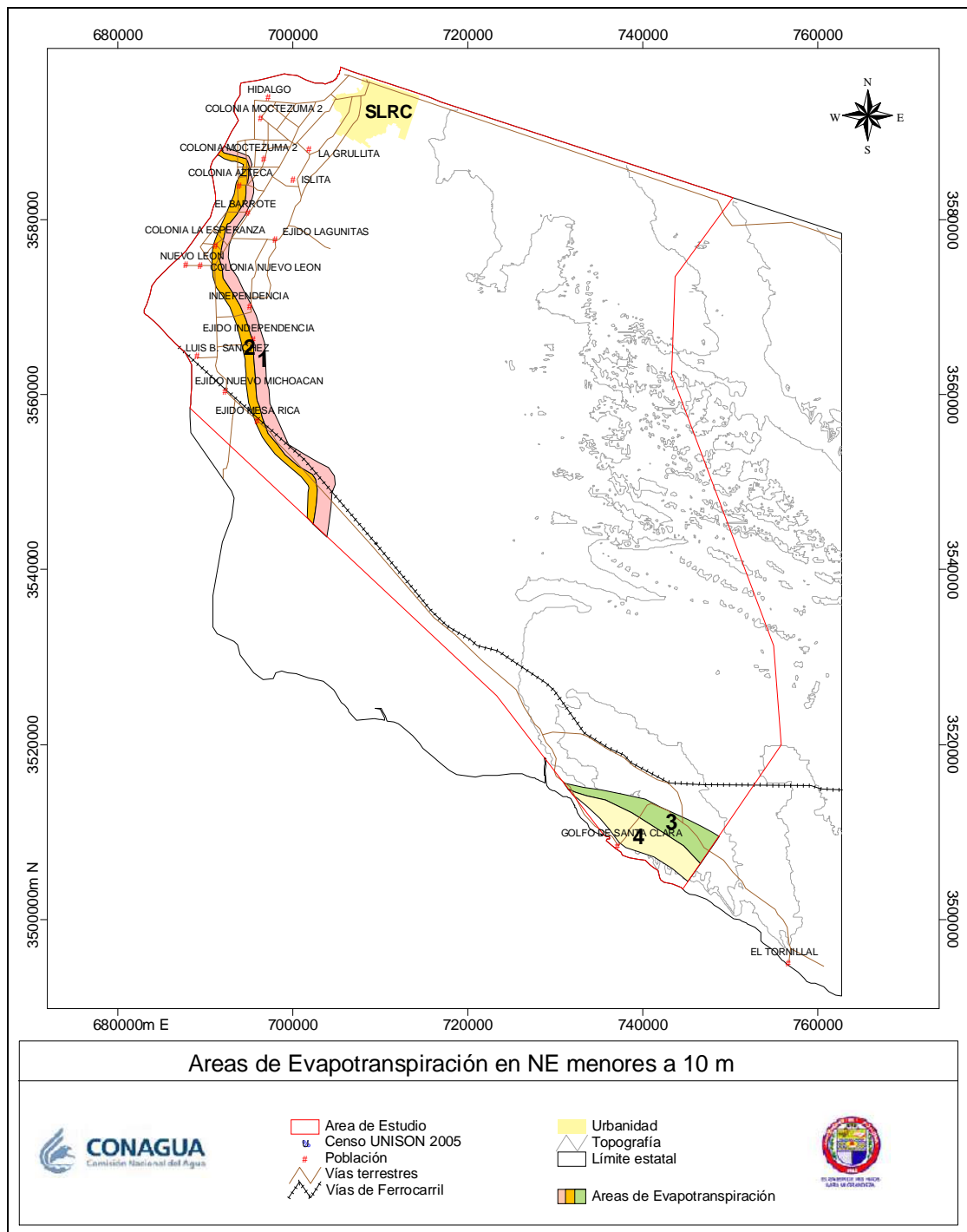


Tabla 12 Volúmenes de pérdida del acuífero freático por concepto de ETR

No.	PROF NE m	% ETR	AREA m ²	LÁMIN	LAMINA ETR	VOL m ³	VOL hm ³
-----	-----------	-------	---------------------	-------	------------	--------------------	---------------------

AREA				A %			
1	9	10	59 927 858,00	0,1	0,051	305 632,076	0,3056320 8
2	8	20	47 824 549,00	0,2	0,051	487 810,4	0,4878104
3	9	10	36 316 482,00	0,1	0,051	185 214,058	0,1852140 6
4	8	20	42 698 416,00	0,2	0,051	435 523,843	0,4355238 4
			186,77			1414180,38	1,4141803 8

Pérdida por ETR desde el nivel freático: 1.4 Mm³/año

XI.10.8 Salidas Horizontales por Flujo Subterráneo (Sh)

El flujo por salidas horizontales se calculó bajo las mismas consideraciones conceptuales expuestas para las entradas horizontales. Una vez determinadas las equipotenciales en m.s.n.m. y obtenidos los valores de transmisividad media correspondientes, se realizó el cálculo con base en el gradiente hidráulico (dh/dl) y la transmisividad del medio, los valores de espesor saturado (b) considerados en cada celda y los valores del ancho de las celdas de flujo (B). De esta manera el caudal Q es $Q = TiB$, donde i es el gradiente hidráulico calculado (Tabla 13).

Tabla 13- Cálculo de las Salidas Horizontales Subterráneas, en m³/año, (UNISON 2005).

No de Celda	B (m)	b (m)	dh (m)	dl (m)	K (m/s)	T (m ² s ⁻¹)	i = dh/dl	Q (m ³ s ⁻¹)	Q (m ³ /a)
S1	1 390	200	1	710	0,000175	0,035	0,001408451	0,068521127	2 160 882,254
S2	790	200	1	570	0,000175	0,035	0,001754386	0,048508772	1 529 772,632
S3	770	200	1	640	0,000175	0,035	0,0015625	0,042109375	1 327 961,25
S4	1 210	200	1	740	0,000175	0,035	0,001351351	0,05722973	1 804 796,757
S5	1 110	200	1	630	0,000175	0,035	0,001587302	0,061666667	1 944 720
S6	810	200	1	600	0,000175	0,035	0,001666667	0,04725	1 490 076
S7	600	200	1	640	0,000175	0,035	0,0015625	0,0328125	1 034 775
S8	1 180	200	1	1080	0,000175	0,035	0,000925926	0,038240741	1 205 960
S9	1 690	200	1	1240	0,000125	0,025	0,000806452	0,034072581	1 074 512,903
S10	1 050	200	1	1470	0,000125	0,025	0,000680272	0,017857143	563 142,8571
S11	2 120	200	1	1110	0,000125	0,025	0,000900901	0,047747748	1 505 772,973
S12	990	200	1	690	0,000125	0,025	0,001449275	0,035869565	1 131 182,609
S13	1 080	200	1	860	0,000125	0,025	0,001162791	0,031395349	990 083,7209
S14	980	200	1	1010	0,000125	0,025	0,000990099	0,024257426	764 982,1782
S15	1 410	200	1	1050	0,000125	0,025	0,000952381	0,033571429	1 058 708,571
S16	1 740	200	1	1070	0,000125	0,025	0,000934579	0,040654206	1 282 071,028
S17	1 360	200	1	1160	0,000125	0,025	0,000862069	0,029310345	924 331,0345
S18	2 360	200	1	1210	0,0001	0,02	0,000826446	0,039008264	1 230 164,628
S19	2 490	200	1	1130	0,0001	0,02	0,000884956	0,044070796	1 389 816,637
S20	2 250	200	1	1220	0,0001	0,02	0,000819672	0,036885246	1 163 213,115
S21	1 920	200	1	1200	0,0001	0,02	0,000833333	0,032	1 009 152
S22	2 120	200	1	1000	0,0001	0,02	0,001	0,0424	1 337 126,4
S23	2 720	200	1	1030	0,0001	0,02	0,000970874	0,052815534	1 665 590,68

S24	1730	200	1	990	0,0001	0,02	0,001010101	0,034949495	1 102 167,273
-----	------	-----	---	-----	--------	------	-------------	-------------	---------------

Tabla 13- Cálculo de las Salidas Horizontales Subterráneas, en m³/año, (UNISON 2005).

No de Celda	B (m)	b (m)	dh (m)	dl (m)	K (m ^s -1)	T (m ² s ⁻¹)	i = dh/dl	Q (m ³ s ⁻¹)	Q (m ³ /a)
S25	2040	200	1	950	0,0001	0,02	0,001052632	0,042947368	1 354 388,211
S26	2840	200	1	830	0,0001	0,02	0,001204819	0,068433735	2 158 126,265
S27	1710	200	1	700	0,0001	0,02	0,001428571	0,048857143	1 540 758,857
S28	1970	200	1	700	0,0001	0,02	0,001428571	0,056285714	1 775 026,286
S29	1860	200	1	1190	0,0001	0,02	0,000840336	0,031260504	985 831,2605
S30	1870	200	1	970	0,0001	0,02	0,001030928	0,038556701	1 215 924,124
S31	2080	200	1	880	0,0001	0,02	0,001136364	0,047272727	1 490 792,727
S32	2230	200	1	760	0,0001	0,02	0,001315789	0,058684211	1 850 665,263
S33	1780	200	1	630	0,0001	0,02	0,001587302	0,056507937	1 782 034,286
S34	1340	200	1	660	0,0001	0,02	0,001515152	0,040606061	1 280 552,727
S35	1680	200	1	690	0,0001	0,02	0,001449275	0,048695652	1 535 666,087
S36	990	200	1	620	0,0001	0,02	0,001612903	0,031935484	1 007 117,419
S37	2010	200	1	650	0,0001	0,02	0,001538462	0,061846154	1 950 380,308
S38	1660	200	1	560	0,0001	0,02	0,001785714	0,059285714	1 869 634,286
S39	1860	200	1	520	0,0001	0,02	0,001923077	0,071538462	2 256 036,923
S40	2040	200	1	520	0,0001	0,02	0,001923077	0,078461538	2 474 363,077
S41	1710	200	1	520	0,0001	0,02	0,001923077	0,065769231	2 074 098,462
S42	3350	200	1	450	0,0001	0,02	0,002222222	0,148888889	4 695 360
S43	2920	200	1	350	0,0001	0,02	0,002857143	0,166857143	5 262 006,857
S44	3240	200	1	350	0,0001	0,02	0,003125	0,2025	6 386 040
S45	2790	200	1	320	0,0001	0,02	0,002777778	0,155	4 888 080
S46	3430	200	1	360	0,0001	0,02	0,002222222	0,152444444	4 807 488
S47	2000	200	1	450	0,0001	0,02	0,002631579	0,105263158	3 319 578,947
S48	2090	200	1	380	0,0001	0,02	0,003448276	0,144137931	4 545 533,793
S49	240	200	1	290	0,0001	0,02	0,00212766	0,010212766	322 069,7872
S50	2540	200	1	470	0,0001	0,02	0,000854701	0,043418803	1 369 255,385
S51	2460	200	1	1170	0,0001	0,02	0,000389105	0,019143969	603 724,2023
S52	4070	200	1	2570	0,0001	0,02	0,000290698	0,023662791	746 229,7674
S53	4760	200	1	3440	0,0001	0,02	0,000362319	0,034492754	1 087 763,478
S54	4740	200	1	2760	0,0001	0,02	0,000362319	0,034347826	1 083 193,043
								1,664379141	52 487 860,61

Salidas Horizontales = 52.5 hm³/año

XI.10.9 Cálculo del balance de agua subterránea y disponibilidad

Balance de Aguas Subterráneas

El método usado en este estudio para el balance de agua subterránea considera todos los componentes posibles de entradas y salidas establecidos por la ecuación de balance del agua subterránea para un período de tiempo determinado. De esta manera, la ecuación para el balance de aguas subterráneas esta dado por:

$$Eh + Ip + Ir + Ic - (Sh + B + ETR + D) = \pm \Delta S$$

Donde:

Eh	= Entradas horizontales.	Sh	= Salidas horizontales.
Ip	= Infiltración por Precipitación.	B	= Extracción por bombeo.
Ir	= Infiltración por riego.	ETR	= Evapotranspiración.
Ic	= Infiltración en canales.	D	= Drenaje.
ΔS	= Cambio del volumen de almacenamiento.		

El cálculo del balance de aguas subterráneas se realizó seleccionando cuidadosamente los valores de transmisividades a utilizar, tomando en cuenta que estos correspondan con las características litológicas del espesor de acuífero de cada celda considerada. Para ello se revisaron los valores que se reportan en estudios previos, en México y en los Estados Unidos y los obtenidos en esta campaña. Con relación a la disponibilidad esta se obtuvo siguiendo la norma oficial de la Comisión Nacional del Agua (NOM-011-CNA-2000), la cual establece que el otorgamiento de nuevas concesiones de aguas superficiales o subterráneas estará supeditado a que haya disponibilidad de aguas superficiales o subterráneas respectivamente, y no a la disponibilidad total obtenida de la suma de ambas, por ello es necesario tomar en cuenta el volumen de agua que se encuentra actualmente concesionado para el acuífero de la Mesa Arenosa.

$$\text{Disponibilidad media anual de agua subterránea en una unidad hidrogeológica} = \text{Recarga Total media Anual} - \text{Volumen anual de aguas subterráneas concesionado e inscrito en el REPDA} - \text{Descarga Natural Comprometida}$$

Respecto a la descarga natural comprometida, en este como en otros casos, se juzgó que el volumen de **Sh** (salida horizontal) no debe considerarse comprometido dado que el área donde se ubican las celdas de flujo están aún dentro del límite administrativo del acuífero y en esa porción limítrofe no existe aprovechamiento del agua subterránea, por lo tanto, la expresión queda reducida a restar de la recarga total media anual, el volumen de bombeo concesionado.

Cambio del volumen de almacenamiento

Eh	Ip	Ir	Ic	Sh	B	Et	D	ΔW
207	31	60	26,25	52,5	286,5	1,4	0	-16,15

Donde:

Iv	= Infiltración vertical.	B	= Extracción por bombeo.
Eh	= Entradas horizontales.	Sh	= Salidas horizontales.
Ic	= Infiltración de canales.	ETR	= Pérdidas por evapotranspiración
Ip	= Infiltración por precipitación	D	= Drenaje
ΔW	= Cambio del volumen de almacenamiento.		

XI.10.10 Disponibilidad de Aguas Nacionales

R	DNCOM	VCAS	DAS
324,25	0	286,5	37,75

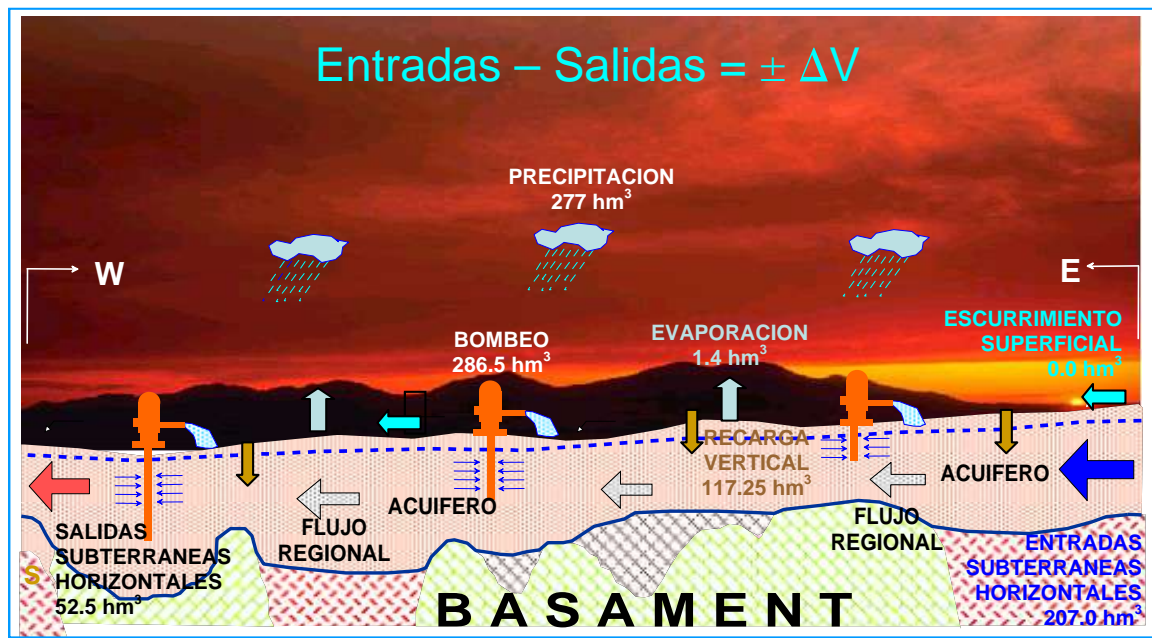
Donde:

R	= Recarga total.
DNCOM	= Descarga Natural Comprometida.
VCAS	= Volúmen Concesionado de Aguas Subterráneas.
DAS	= Disponibilidad Media Anual de Agua Subterránea.

Figura 80. Zonas del acuífero y flujos de recarga en el Distrito 014, Río Colorado.

DISPONIBILIDAD

ACUIFERO VALLE DE SAN LUIS RIO COLORADO , SONORA



DISPONIBILIDAD DE AGUAS SUBTERRANEAS (hm³/año)

$$\text{DISPONIBILIDAD} = \text{RECARGA} - \text{DESCARGA NATURAL COMPROMETIDA} - \text{VOL. CONCESIONADO}$$

$$37,5 = 324,5 - 0 - 286,5$$

XI.10.11 USOS DEL AGUA

El Distrito cuenta con dos fuentes de agua, las aguas superficiales del Río Colorado y las aguas subterráneas que pueden extraerse del acuífero.

1. Aguas de gravedad o superficiales: De acuerdo con el Tratado Internacional de Límites y Aguas, en la zona de estudio se tiene una disponibilidad de aguas superficiales del Río Colorado de 1 850,234 hm³/a, de los cuales: 1 730,234 hm³ se reciben en el Lindero Norte, derivados al la red hidráulica por la Presa Morelos y 120,0 hm³ por el Lindero Sur o Canal Sánchez Mejorada en el Valle de San Luis, Río Colorado.
2. Aguas subterráneas: Se tienen dos zonas de extracción de aguas subterráneas, designadas como Zona Antigua de bombeo y Mesa Arenosa de San Luis. En la zona antigua de bombeo, ubicada al noreste del valle de Mexicali y al norte del valle de San Luis Río Colorado, de acuerdo con el Estudio Geohidrológico del Distrito se pueden extraer 700 hm³/a.

Uso agrícola

Las concesiones para extraer aguas subterráneas son por 500 hm³/a con 425 pozos federales de los módulos del distrito de riego y por 200 hm³/a asignadas a 235 pozos particulares.

En la zona de la Mesa Arenosa de San Luis Río Colorado se tienen 62 pozos federales para extraer un volumen de 197,358 hm³/año de aguas subterráneas, de acuerdo con la recarga determinada por el Estudio Geohidrológico del Distrito. Volumen que está asignado a las ciudades de Baja California y San Luis R.C. Sonora, que se intercambia por aguas superficiales del distrito de riego, por lo que está disponible para el riego agrícola un volumen de 174,358 hm³/a descontando la concesión de la ciudad de San Luis Río Colorado de 23 hm³/a.

La evolución de los volúmenes aprovechados en los últimos años agrícolas de las diferentes fuentes de abastecimiento, se muestran en la tabla 14.

Tabla 14. Volúmenes aprovechados de las diferentes fuentes de abastecimiento
(miles de m³)

FUENTES	1998-1999	1999-2000	2000-2001	2001-2002	2002-2003
Presa Morelos	2,392.147	2,171.018	2,059.066	1,847.737	1,833.697
Canal Sánchez Mejorada	137.083	156.295	151.906	147.726	163.877
Mesa Arenosa SLRC	6.39	12.964	41.092	128.632	160.008
Pozos Federales ZAB	231.424	437.761	440.871	397.829	447.640
Pozos Particulares	2.001	3.235	6.043	4.056	5.865
Total	2,769.045	2,781.273	2,698.978	2,525.980	2,611.087

Fuente: Distrito de riego 014, Río Colorado

Agua para uso urbano

En 1972 el Gobierno Federal ordenó la perforación de pozos en la Mesa Arenosa de San Luis Río Colorado a fin de utilizar esta agua únicamente para uso público urbano del área fronteriza, desde San Luis Río Colorado, Sonora, hasta Ensenada, Baja California; de esta manera se buscó no reducir los volúmenes consignados a riego, ante el crecimiento continuo de las ciudades.

Por limitaciones físicas de la infraestructura, el agua extraída de los pozos de la Mesa Arenosa se intercambia por agua del Río Colorado, de tal forma que la Ciudad de Mexicali y el Acueducto Río Colorado – Tijuana reciben agua del Río Colorado y el agua de los pozos de la Mesa Arenosa de San Luis Río Colorado se aprovecha para riego en la Margen Izquierda del Distrito mezclándola con las aguas del Río Colorado (en un lugar denominado la licuadora), que se reciben en el Lindero Norte y las aguas de retorno agrícola recibidas por el Lindero Sur.

Pero esta circunstancia no significa que hayan creado derechos para los agricultores de las aguas de la Mesa Arenosa, así como tampoco las aguas del Río Colorado para las ciudades; la Comisión Nacional del Agua siempre ha declarado que el aprovechamiento de esta agua está debidamente regularizado e inscrito en el Registro Público de Derechos de Agua. Tabla 15.

De la Mesa Arenosa se extraen para uso urbano 197.360 Hm³/a y están asignados de la siguiente manera:

Tabla15.- Volúmenes asignados y población beneficiada

Acuífero	Ciudad	Vol. Asig. (hm³/año)	Población Beneficiada
0210: Valle de Mexicali	Mexicali, Baja California	82	653,046
0201: Tijuana	Tijuana, Baja California	80	1,286,187
0202 Tecate	Tecate, Baja California	3.36	59,124
0211: Ensenada	Ensenada, Baja California	9	260,075
2601: Valle de San Luis Río Colorado	San Luis Río Colorado, Sonora	23	138,796

El agua subterránea concesionada a Baja California y el Municipios de San Luis Río Colorado, Sonora, suma un total de 197.36 Hm³/a. Por otra parte, de acuerdo con el Informe de distribución de agua del Distrito de Riego, 014, Río Colorado, correspondiente el mes de Septiembre de 2005, (que equivale al cierre del año agrícola) los volúmenes servidos por usos fueron los que se muestran en la tabla 16.

Tabla 16. Volúmenes por uso (Año agrícola 2004 -2005)

Usos	Volumen bruto	%
Agrícola	2 475 277,4	87,40
Domestico	304 446,3	10,75
Industrial	14 142,1	00,49
Otros usos	38 204,0	01,35
Total	2 832 070,2	100,00

Fuente: Estadística Agrícola del Distrito de Riego 014, Río Colorado.

Como puede verse el uso doméstico está consumiendo 107,086 hm³ más del volumen que tiene concesionado. En la tabla 17 puede observarse como ha ido evolucionando el uso urbano, de acuerdo con la estadística del Distrito, por los volúmenes servidos tanto a la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Mexicali (CESPM) como al Acueducto Río Colorado – Tijuana (ARCT).

Tabla 17. Evolución de los volúmenes para uso urbano.

Fuente	2000	2001	2002	2003	2004
CESPM	86,302	86,027	78,211	72,020	71,408
ARCT	113,132	116,952	113,919	104,542	113,212
TOTAL	199,434	202,979	192,130	176,562	184,620

Fuente: Estadística Agrícola del Distrito de Riego 014, Río Colorado.

XII PRODUCTIVIDAD Y DEMANDA DE AGUA EN LA ZONA DE ESTUDIO

Agua Potable

Del volumen asignado de aguas superficiales al Distrito de Riego de 1 665,234 hm³/a, por acuerdo del Comité Hidráulico se asignó un volumen de 30,0 hm³/a para el uso público urbano en los poblados e industrias que se ubican fuera del sistema de agua potable de Mexicali operado por la CESPM.

Adicionalmente, este organismo operador ha ido incrementando su concesión mediante la adquisición de derechos de agua a través de la incorporación de algunas localidades rurales al área urbana y a la compra directa de derechos a los módulos de riego por un volumen de 16,6 hm³/a.

Por lo tanto, los centros de población e industrias de la región tienen actualmente una disponibilidad total de aguas superficiales del valle de Mexicali del orden de 244 Hm³/a. Aun así estarían excedidos con 104 Hm³/a de acuerdo al consumo real registrado por el Distrito.

La proyección realizada para el periodo del año 2000 al 2035, por el Estado de Baja California en el Programa Estatal Hidráulico 2003 -2007, establece que la demanda estatal de agua para uso domestico pasará de 231,41 hm³ en el año 2000 a 502,10 hm³ en el año 2035, lo que representa un incremento anual de 3,34 %.

Agricultura

El Distrito de Riego comprende una superficie física de 328 000 ha, las obras de infraestructura se localizan en una área compactada del orden de los 250 000 ha, 78 000 ha quedaron fuera del Distrito al realizarse la primera rehabilitación.

La superficie con derechos de riego es de 208 863 ha, pero durante los últimos años agrícolas solo se han sembrado 197 669 ha, superficie que puede considerarse como la de uso agrícola, existen por lo tanto 11 194 ha que no se siembran por diferentes causas, ya sea por cambio de uso de uso de agrícola a urbano, terrenos ensalitrados, u ociosos por falta de recursos para la actividad agrícola.

Evolución de la producción agrícola

En el año agrícola 2004 – 2005 se sembró una superficie de 197 669 ha y se cosechó una superficie de 195 218 ha. El valor de la producción fue del orden de los 774 889 890 pesos. Los cultivos principales por superficie son el trigo en el ciclo de otoño- invierno, el algodón en el ciclo primavera – verano y la alfalfa en los perennes. Por su importancia económica las hortalizas que incluyen la cebolla pequeña, el

espárrago y varios ocupan el primer lugar en el Distrito.

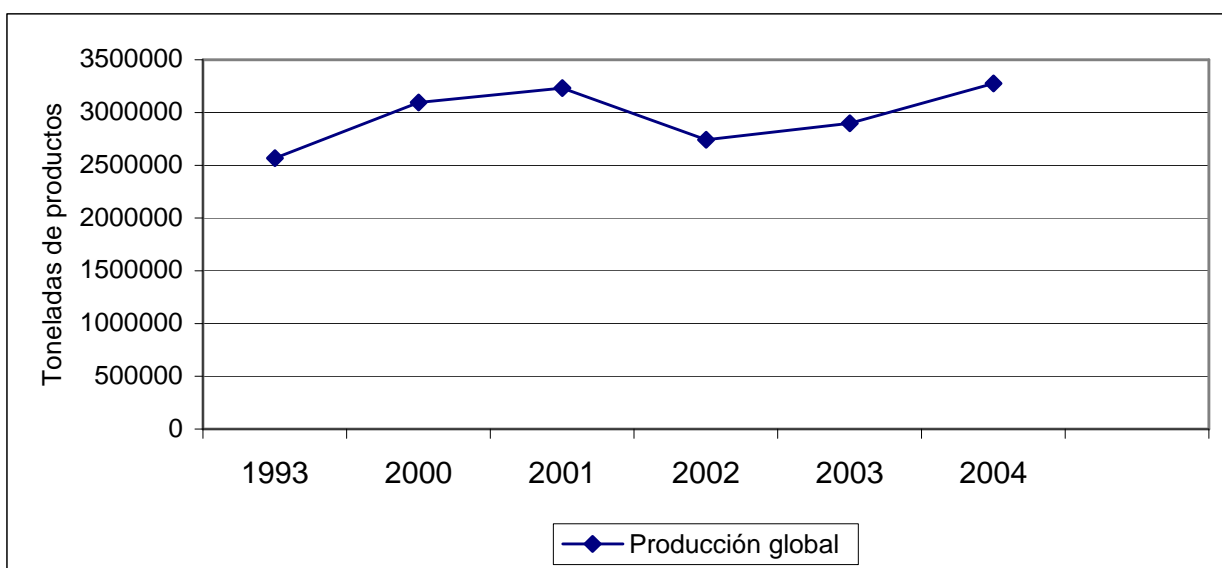
En la tabla 18 se puede valorar la evolución de la producción agrícola de los principales cultivos del Distrito. La variación de producción se debe más al decremento de la superficie cultivada que a los incrementos de rendimiento. Sin embargo, al analizar la producción global se observa una tendencia de aumento. (Figura 81)

Tabla 18. Evolución de la producción agrícola 1993-2004. (Toneladas)

CULTIVOS/AÑOS	1993	2000	2001	2002	2003	2004
CARTAMO	10 000	6 958	2 789	4 681	6 312	6 178
CEBADA	4 318	1 005	4 611	9 856	12 147	4 632
TRIGO	540 350	537 459	485 954	495 915	506 572	487 785
CEBOLLIN	76 608	53 850	55 743	61 058	84 635	87 510
ESPARRAGO	14 400	13 122	10 803	12 458	10 843	11 706
ALGODONERO	37 400	56 218	87 327	30 001	50 186	72 756
SORGO GRANO	6 930	10 484	10 061	6 328	44 510	43 700
MAIZ BLANCO	49 600	6 315	3 068	1 147	3 457	2 908
ALGODONERO	37 400	56 218	87 327	30 001	50 186	72 756
SORGO GRANO	6 930	10 484	10 061	6 328	44 510	43 700
RYE-GRASS	487 548	223 818	231 420	249 024	262 464	247 393
SORGO FORRAJERO	32 700	103 451	107 630	73 888	91 364	71 834
ALFALFA	1 215 000	2 010 965	2 130 928	1 758 265	1 728 413	2 118 153
SUMA	2 568 784	3 096 663	3 230 790	2 740 098	2 899 054	3 273 919

Fuente: Estadística Agrícola del Distrito de Riego 014, Río Colorado.

Figura 81.-Producción agrícola global en la zona de estudio



XIII

ASPECTOS DE INEQUIDAD EN LA ZONA DE ESTUDIO

XIII.1 México – Estados Unidos

La disputa entre México y Estados Unidos por la distribución equitativa de las aguas del río Colorado es ancestral. En diversas etapas históricas se ha negociado su distribución. Sin embargo, por sus características muy peculiares este recurso natural se ha compartido, prácticamente, desde que aparecieron los primeros asentamientos humanos en esa región. Derechos y obligaciones sobre la distribución equitativa de los recursos hídricos del delta del Colorado se han incorporado al derecho internacional. Por lo que la apelación unilateral a la soberanía de la distribución de las aguas internacionales del Colorado no sólo resulta contraria al derecho internacional sino a la costumbre regional.

La historia, la demografía, las condiciones climáticas, han obligado a negociar bilateralmente la distribución de las aguas internacionales del Río Colorado. Si bien es cierto que la corriente de este río nace y cruza por territorio norteamericano también lo es que su torrente, magnífica y extensa, debería desembocar, como antes lo hacía, en el Mar de Cortes.

Pero, la evolución demográfica y el crecimiento económico, de los estados de California, Nevada y Arizona, convierten a este recurso hídrico en una mercancía negociable, intercambiable y vendible. Para el estado de Baja California, sobre todo para el Valle de Mexicali, el agua del río Colorado no sólo es un recurso de subsistencia económica sino también materia de conservación ambiental.

California y Baja California comparten una frontera que consiste de dos sistemas climáticos separados; uno, de clima montañoso de la Sierra de San Pedro Mártir, a unos 160 km de distancia del Océano Pacífico y el otro, semiárido, desértico, que comprende la región fronteriza San Diego-Tijuana, Calexico-Mexicali.

Estas últimas, reciben una precipitación pluvial anual de entre 25 y 49 centímetros. Calexico y Mexicali, son los lugares más extremos de la región y la precipitación pluvial, en esta zona fronteriza, es de menos de 25 centímetros anuales.

Aunque, a pesar de lo inhóspito del desierto, los valles Imperial y Calexico son áreas agrícolas altamente productivas. ¿Cómo es esto posible con tan baja precipitación pluvial? La respuesta se llama Río Colorado.

Es precisamente en este renglón, donde el delta del río Colorado cobra una relevancia extrema. La historia de la diplomacia hídrica entre México y Estados Unidos, tiene en el delta del río Colorado uno de sus capítulos más extensos y complejos de la relación bilateral.

Es la batalla diplomática por el agua, por el bienestar de las comunidades fronterizas y por la comprensión de que dos naciones vecinas deben compartir, en sociedad, un recurso que históricamente han compartido.

En la oscilación de las negociaciones ha habido posiciones encontradas. Los recursos hídricos de la cuenca baja del río Colorado han tenido distintos enfoques. Si nos remontamos a 1789, cuando se promulgó el Plan de Pitic, obligatorio para las provincias internas, incluyendo nuestra referida zona fronteriza, veremos que el artículo 6 decía que en “cuestión de agua y etnicidad, el agua debería ser compartida”. Y el artículo 19, de esta proclamación, establecía que la irrigación debería ser la principal fuente de prosperidad en la fundación de un nuevo pueblo.

Dos artículos, dos preceptos, un enfoque, que deja bien claro que el destino final del agua del delta del río Colorado no es entubarla para satisfacer las necesidades de baño diario, lavar el auto, regar el césped o llenar la piscina, sino la agricultura que es el eje de la prosperidad y el bienestar de un pueblo.

La historia sobre la distribución del delta del río Colorado data de 1898 cuando, con recursos mexicanos, se construyó el canal transfronterizo “El Álamo” que dotaba de agua a los valles Imperial y Mexicali. Pero, hubo inconformidad porque la corriente hídrica pasaba por México y se alegaba que se abusaba de este recurso hidráulico. Hubo un intento en 1906 de desviar parte de las aguas que corrían por suelo mexicano y la empresa Rockwood abrió una bocatoma, fuera de toda proporción arquitectónica, que inundó todo el Valle Imperial ocasionando una depresión que dio vida a lo que hoy se llama el mar Salton.

En 1929 Estados Unidos proyectó la construcción de un canal independiente de México que resolviera el dilema, pero no fue hasta 1942 cuando se concretó la operación de un canal llamado Canal Todo Americano.

Pero el proyecto del Canal Todo Americano no consideró que al pasar únicamente por suelo estadounidense obligaría al torrente a cruzar por una zona de dunas desérticas que “chupan” por sus poros, una cantidad aproximada de 100 millones de metros cúbicos de agua.

En 1988, Estados Unidos quiso evitar que se siguieran filtrando esos millones de metros cúbicos y legisló una ley denominada en inglés: “San Luis Rey Indian Water Rights Settlement Act”, ordenamiento público 100-675, cuyo propósito fundamental era evitar la filtración de agua. En el Capítulo II, de la Sección 201 a la 207, de esta ley, se establece el revestimiento del Canal Todo Americano.

El revestimiento de esa porción del río Colorado cuya torrente pasa por esa área desértica y que una parte se queda en Estados Unidos y la otra se filtra, hacia las corrientes subterráneas, que forman los humedales de la mesa de Andrade en el valle de Mexicali.

Desde entonces el gobierno de México ha manifestado, en múltiples ocasiones, que el revestimiento del Canal Todo Americano perjudica a los agricultores del Valle de Mexicali (la historia apoya el planteamiento desde el Plan de Pitic) y pone en peligro de extinción a la flora y la fauna de los humedales de la Mesa de Andrade (protegidos por la Convención de Ramsar). Las negociaciones diplomáticas y las demandas jurídicas en los últimos años han sido de los más intensas y complejas.

Representantes del Consejo de Desarrollo Económico solicitaron la intervención directa del ejecutivo Federal, a fin de que se detuviera la construcción de ese canal alterno al Canal Todo Americano, ya que su construcción y revestimiento con concreto, no permitiría la filtración de agua y amenazaría la existencia de los humedales de la zona.

De esta manera la Novena Corte de Circuito de Apelaciones, con sede en San Francisco, California, ordenó la suspensión temporal de la construcción de un canal encementado alterno al Canal Todo Americano.

En conferencia de prensa, donde estuvieron representantes del Gobierno del Estado de Baja California, Ayuntamiento de Mexicali y miembros del Consejo de Desarrollo Económico, declararon que esta decisión de los jueces, de la corte de apelaciones, “es apenas un paso que se da” en lo que será una larga negociación con miras a la suspensión definitiva del encementado del Canal Todo Americano.

XIII.2 Sonora – Baja California

Esta disminución del flujo en la parte baja de la cuenca o delta del Río Colorado, se ha maximizado por las condiciones de escasez o sequía de la región, han motivado que en los últimos años se presenten una serie de conflictos por la política de distribución y gestión del agua.

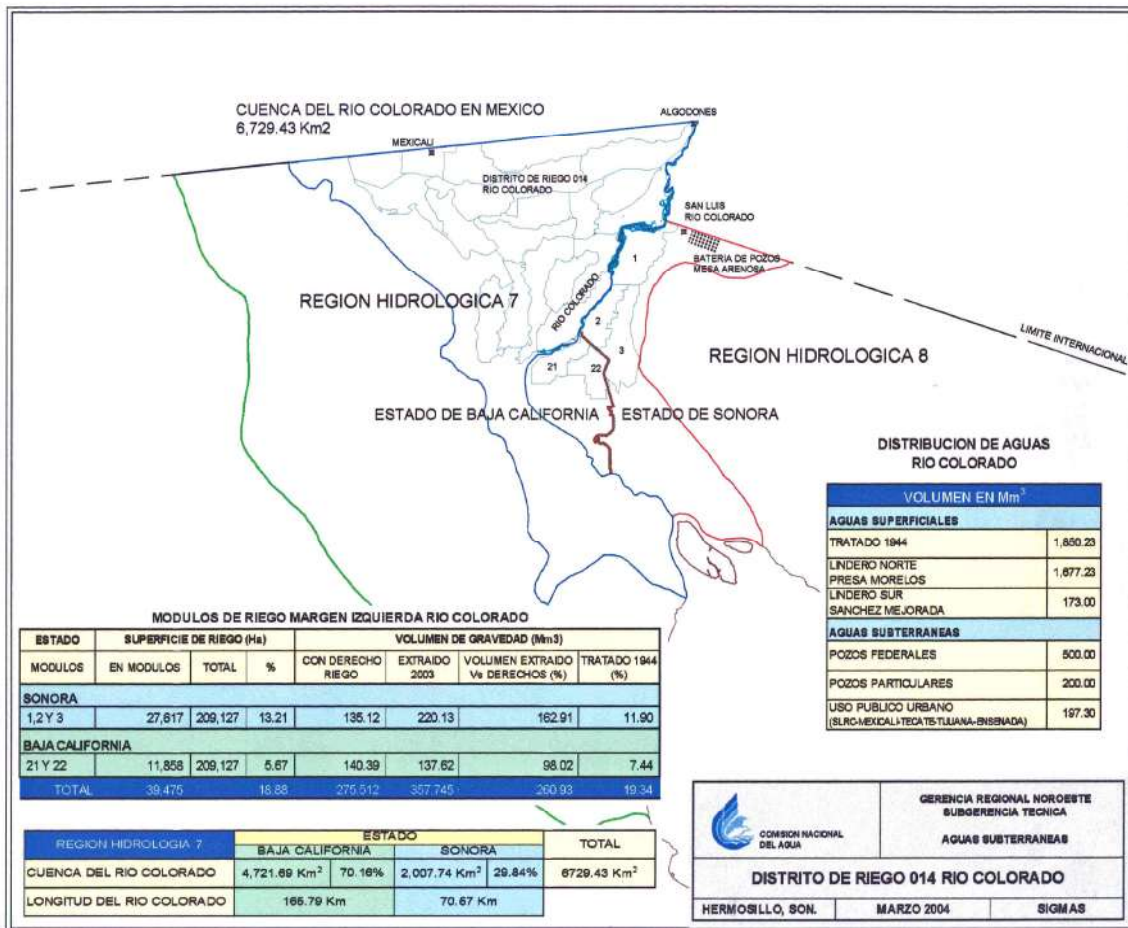
A nivel estatal, la Comisión Estatal del Agua de Sonora, solicitó la revisión de los acuerdos existentes para que la distribución de agua entre San Luis Río Colorado, Sonora y Baja California se realice con equidad, mientras que localmente, la Dirección de Infraestructura Hidroagrícola de la Comisión de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de San Luis Río Colorado, ha señalado que se requiere una redistribución del agua, ya que existe inequidad principalmente en cuanto a calidad, ya que el líquido que se queda en Sonora presenta mayor salinidad y a Baja California se envía la de mejores características.

Esta situación ha generado descontento en el sector productivo de San Luis Río Colorado, quienes piden que la calidad del agua que se manda a este municipio sea igual a la que se canaliza a Baja California.

La Dirección de Obras de la Comisión Estatal del Agua, explica que el total de agua que se distribuye a Baja California alcanza 900 ppm, mientras que la de San Luis Río Colorado es de 1 200 ppm, lo que significa que existe una diferencia promedio de sales de 300 ppm, suficiente para provocar bajos rendimientos en cultivos, y excesivo salitre en el suelo.

Ante esta situación, productores agrícolas de la región consideran que la solución a este problema es de competencia federal, donde la Comisión Nacional del Agua debe intervenir, por ser la entidad del país que signó los acuerdos internacionales con Estados Unidos, donde se establece el mecanismo de distribución del vital líquido en la zona de Baja California y San Luis Río Colorado. Figura 82.

Figura 82. Módulos de Riego 1, 2 y 3, Margen Izquierda del Río Colorado



La salinidad del agua y suelos agrícolas de los valles de Mexicali, Baja California y San Luis Río Colorado, Sonora, donde se asienta oficialmente el Distrito de Riego 014, Río Colorado, constituye uno de los factores más importantes que limitan la producción de alimentos de origen vegetal. En estos valles se tiene una superficie de 207,965 hectáreas con derecho de riego, de las cuales 97 500 ha presentan problemas de acumulación de sales solubles; esto representa el 47% de la superficie total.

Las actividades agrícolas en esta zona datan de principios del siglo XX, en esa época el ensalitramiento y deterioro de la capacidad productiva de los suelos pasaron desapercibidos; la calidad y cantidad de agua, constituyen uno de los binomios más importantes para el desarrollo de las actividades económicas de una región; el Distrito de Riego 014, no escapa a esta situación; ya que se tienen algunos problemas de abastecimiento y calidad del agua para los diferentes usos; entre ellos el agrícola; este sector es el que mayor volumen de agua demanda y requiere de aguas de buena calidad para la producción de cosechas.

Actualmente, la baja calidad del agua para riego se constituye como el principal agente causal de la salinización de los suelos y de acuerdo con resultados obtenidos por diversos investigadores, en el futuro la salinidad del agua se incrementará con mayor velocidad.

Al encontrarse la salinización de los suelos de estos valles, estrechamente ligada a las aguas superficiales y subsuperficiales provenientes de la cuenca del Río Colorado, se tiene que al hacer un balance del ingreso de sales en el agua, anualmente ingresan a la zona 3 600 000 toneladas de sales, de las cuales 1 985,000 toneladas son de ingreso superficial y el resto 1 615 000 toneladas en el agua extraída del subsuelo; muchas de estas sales son eliminadas por el sistema de drenaje a cielo abierto, estimándose que se evacúan alrededor de 1 890 000 toneladas y el resto, 1 710 000 se acumulan en el perfil de los suelos.

XIV SALINIDAD

XIV.1 SALINIDAD DE AGUAS SUPERFICIALES

En lo que respecta a la salinidad de las aguas superficiales, al constituir el Río Colorado su principal escurrimiento es el más monitoreado a través del tiempo. Este río, en sus 2 300 km de recorrido transporta en solución alrededor de nueve millones de toneladas de sales.

El manejo y control del agua a lo largo del cauce del río, se inició con la construcción de grandes presas de almacenamiento. Es así como se encontró la solución al problema de las grandes avenidas y su aprovechamiento en los E.U.A., los almacenamientos de agua sobre el cauce del Río Colorado, modificaron el ciclo hidrológico existente durante milenios.

Esto se manifestó con mayor rigor en las partes bajas de su cuenca, reduciéndose el volumen de agua escurrido y aumentando la concentración de sales disueltas; del total de los escurrimientos del Río Colorado, de acuerdo con lo estipulado en el Tratado Internacional de Límites y Aguas firmado entre México y E.U.A. en el año de 1944, a México le corresponden anualmente 1 850,234 Hm³ de los cuales 1 677,545 se entregan por la derivadora Morelos, punto de entrega conocido como lindero norte y el resto, 172,689 por el canal Sánchez Mejorada en San Luis Río Colorado, Sonora o lindero Sur.

La concentración de sales en el agua del Río Colorado ha cambiado gradualmente a través del tiempo. Desde que se inició el riego en las tierras agrícolas del valle de Mexicali, a principios del siglo pasado y hasta la fecha, la salinidad del agua ha sufrido un incremento mayor del 100%.

Este cambio se atribuye a procesos naturales (47%) de disolución de minerales y el resto (53%) a otras causas entre las que se encuentran, el aporte de aguas de retorno, evaporación, y exportación de agua a otras zonas y centros de consumo.

Cervantes en 1990 y Cervantes y Bernal en 1991, analizaron el comportamiento de la calidad del agua del Río Colorado a través del tiempo en el período comprendido de 1902 a 1989; encontraron de acuerdo con los registros existentes, que en 1902, la salinidad del agua del Colorado fue de 400 partes por millón (ppm), en tanto que para el año de 1932 alcanzó las 600 ppm; para 1948 la concentración fue de 760 ppm y en 1960 se incrementó a 800 ppm.

Actualmente se registran valores del orden de 1050 ppm; esto significa, un incremento anual en la mineralización del agua de 7,0 ppm, lo que ha deteriorado en diferentes grados la capacidad productiva de los suelos agrícolas del valle de Mexicali provocando su ensalitramiento.

En el estudio realizado por Cervantes (1990) y Cervantes y Bernal (1991) se excluyeron dos períodos en los que se presentaron variaciones extraordinarias en la salinidad del agua en esta región; el primero, corresponde al período comprendido de 1961 a 1965, en el que México recibió agua con un elevado contenido de sales disueltas provenientes de las descargas al Río Colorado, de aguas salobres provenientes del drenaje de tierras agrícolas del valle de Wellton-Mohawk, Arizona, lo que se conoció como el problema de la salinidad del Río Colorado; el segundo período, que comprende de 1982 a 1987, representa la época en que se presentaron los mayores escurrimientos del Río Colorado derivados a México desde la firma del tratado internacional.

A partir de 1961 y hasta 1973, la salinidad del agua mostró un comportamiento cíclico en el que la concentración total de sales disueltas alcanzó valores superiores a 1200 ppm en los meses de marzo y abril, llegando a las 2500 ppm entre los meses de septiembre a febrero.

Esto fue una consecuencia de la diferencia entre los volúmenes que se derivaron para riego de cultivos agrícolas en las dos épocas, dado que las demandas registradas en los meses de septiembre a febrero fueron significativamente inferiores a las que existían entre los meses de marzo a agosto, en tanto que los volúmenes de aguas salobres provenientes del drenaje agrícola del valle del Wellton-Mohawk, mantuvieron una concentración superior a las 15000 ppm durante el período comprendido de 1961 a 1965.

En el Tratado de Límites y Aguas de 1944, no se especificó la calidad del agua por entregar a México, lo que permitió que en 1961, se iniciara la operación y descarga de agua de 62 pozos profundos en el Valle del Wellton-Mohawk, Arizona, con una capacidad de bombeo de $15 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ y un elevado contenido salino, pasando a formar parte del caudal que recibía nuestro País. Esta agresión salina continuó por espacio de 12 años provocando graves daños a los suelos del Valle de Mexicali, que fueron enmascarados por la firma del acta 242 entre los gobiernos de ambos países en el año de 1973, que en uno de sus apartados dice lo siguiente:

Los Estados Unidos adoptarán medidas para dar seguridades de que no antes del uno de enero de 1994, y no después del uno de julio de 1974, los 1,677.545 millones de metros cúbicos que se entregan a México aguas arriba de la presa Morelos, tengan una salinidad media anual que no sobrepase en más de 121 ppm \pm 30 ppm, normas de México (115 ppm \pm 30 ppm, normas de Estados Unidos), a la salinidad media anual de las aguas del Río Colorado que lleguen a la presa Imperial, entendido que las aguas que se entreguen a México por conducto del canal Todo Americano, de conformidad con el Tratado de 1944, se considerarán como si se hubieran entregado aguas arriba de la presa Morelos para el propósito de calcular esta salinidad”.

XIV.2 SALINIDAD DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

La segunda fuente de agua para el Distrito de Riego 014, la constituyen las aguas subterráneas; la explotación del acuífero se realiza mediante 725 pozos profundos de bombeo que permiten extraer 700 Hm³/a, en la llamada zona antigua y 197.358 Hm³ de la Mesa Arenosa de San Luis Río Colorado. Para lograr lo anterior se dispone de 725 pozos (658 pozos en la zona antigua y 67 en la mesa arenosa).

En lo que respecta a las aguas subterráneas, la salinidad se ha incrementado a través del tiempo a una velocidad promedio de 21,8 ppm por año (López, 1991), ya que a inicios de la explotación formal del acuífero a finales de los años 50's la concentración promedio de sales disueltas fue de 1,096 ppm, mientras que en 1988 fue de 1,685 ppm, con un incremento total de 589 ppm.

En el año de 1995, se registró una concentración promedio de 1,772 ppm y de seguir esta tendencia para el año 2020 se tendrá en el agua extraída del acuífero una concentración de sales de alrededor de 2,312 ppm. Esto refleja un acelerado proceso de mineralización del acuífero que deteriora la calidad del agua extraída del subsuelo.

XIV.3 SALINIDAD DE SUELOS

Un aspecto de relevante importancia, lo constituye el impacto al medio ambiente que se provoca al someter nuevas áreas al regadío; esto se debe al cambio de régimen hidrológico al que son sometidos los suelos, ya que cuando se obtiene agua para riego en zonas áridas y semiáridas se resuelve un problema en su primera fase, pero el uso de agua en los suelos de estas regiones generalmente conduce a otro problema que es la acumulación de sales, sobre todo cuando no se toman las medidas preventivas adecuadas. Esto significa que la solución de un problema conduce en muchos casos a otro más grave.

En el valle de Mexicali, el ensalitramiento de los suelos ha sido una preocupación constante, ya que desde la década de los cincuentas cuando se realizó la primera cuantificación de las áreas ensalitradas, se determinó la necesidad de tomar medidas de control de la salinidad en los suelos agrícolas, iniciándose la construcción de drenes a cielo abierto para desalojar los excesos de agua aplicados a través de los riegos y otras medidas tendientes a mantener la capacidad productiva de los suelos.

Actualmente, la salinidad afecta en diferentes grados al 50% de los suelos bajo cultivo; esto ha provocado pérdida de áreas productivas, reducción en los rendimientos de los cultivos que son establecidos en estas condiciones, pérdidas económicas y un efecto negativo al medio ambiente en la región.

Para tener una idea de la importancia de este problema y al constituir el agua utilizada para riego la principal fuente de sales en los suelos agrícolas, en tabla 19 se presenta la evolución de la salinidad en los suelos del valle de Mexicali.

Estos estudios deben tomarse con reserva ya que no se pueden comparar entre sí, debido a que se utilizaron criterios de clasificación diferentes para cada estudio, pero sí muestran el problema del ensalitramiento de los suelos.

Tabla 19. Evolución de la salinidad de los suelos del valle de Mexicali, B.C.

CLASE ¹	1966		1979		1988		1991	
	Superficie (ha) / %		Superficie (ha) / %		Superficie (ha) / %		Superficie (ha) / %	
Primera	55 052 / 18,30		99 499 / 39,80		109,672 / 52,90		141,120 / 56.45	7
Segunda	96 985 / 32,26		79 264 / 31,71		69 070 / 33,40		75,512 / 30.21	
Tercera	56 145 / 18,67		43 320 / 16,93		16 203 / 7,80		20,163 / 8.06	
Cuarta	19060 / 6,34		11 465 / 4,58		4 109 / 2,00		4,149 / 1.66	
Quinta	73 445 / 24,43		17 452 / 6,98		8 126 / 3,90		9,056 / 3.62	
TOTAL	300,656	100	250,000	100	207,180	100	250,000	100

Fuente: López, L.A. y García, S.G. 1993. Evolución de la calidad de las aguas de riego y su impacto sobre los suelos del valle de Mexicali, B.C.

¹ A partir de la segunda clase se tienen efectos negativos sobre la producción de los cultivos, en particular los más sensibles.

Al tomar en cuenta la calidad del agua de riego proveniente de los escurrimientos del Río Colorado, los daños ocasionados a la agricultura en el valle de Mexicali, B.C. e Imperial, Ca., son difíciles de evaluar. Un estudio efectuado por el Bureau of Reclamations (s.f.) de los Estados Unidos de Norteamérica, estimó que daños causados por la salinidad solamente para el año de 1983, fueron de 91 millones de dólares.

XV CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

XV.1 Conclusiones

Del análisis de la información aquí presentada se puede concluir que en la zona de estudio no existe inequidad en la distribución del agua en el Delta del río Colorado, en razón de lo siguiente:

- 1.- El Río Colorado nace en las montañas Rocallosas en Colorado, atraviesa la Costa Oeste de los Estados Unidos con una longitud de 2 300 km y una área de 630 000 km² y desemboca en el Golfo de California formando un delta que da origen al acuífero del valle de San Luis Río Colorado y Valle de Mexicali.
- 2.- Conforme al tratado de 1944 y según acta 242 de la Comisión Internacional de Límites y Aguas, a México le corresponden 1 850,234 hm³ de los cuales 1 677,545 hm³ se entregan en la presa Morelos (Lindero Norte). 172 689 hm³ por el canal Sanchez Mejorada (Lindero Sur) volúmenes que son distribuidos a través de canales en el Distrito de Riego 014 de Mexicali, B.C. que incluye 3 módulos de riego en el estado de Sonora.
- 3.- En la margen izquierda del Río Colorado esta constituido el acuífero SON-01 Valle de San Luis Río Colorado, cuyas condiciones de fronteras son: Al oeste el Río Colorado, cuyo flujo es interrumpido en la presa Morelos, al norte con el Valle de Yuma, Az, al oriente se extiende el desierto de Altar y la zona volcánica del Pinacate, separados por la Falla de Altar y al sur con el Golfo de California.
- 4.- La información geológica, geofísica, piezométrica, e información de cortes litológicos, permitió actualizar el modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico del acuífero Mesa Arenosa. Esta información indica que el sistema en la zona esta constituido por una unidad superior (Unidad C) de mas de 3 000 m de espesor, que corresponde a un sistema acuífero de tipo libre, constituida principalmente por arenas no consolidadas de excelente textura para constituir un acuífero de alto rendimiento, que en ocasiones se pudiera comportar como semiconfinado o multicapa, en los niveles en donde ocurren materiales arcillosos.

Los primeros 200 m de espesor del acuífero son penetrados por la batería de pozos de Mesa Arenosa, aunque la mayoría están a solo 150 m y localizados al noroeste del acuífero. Le siguen 700 m de espesor hasta llegar a un espesor de 1 000 m en el acuífero considerado de tipo libre y compuesto por un material granular permeable

Estos materiales presentan valores de transmisividad del orden de los 1.0×10^{-1} a 4.13×10^{-1} , valores excelentes para un acuífero detrítico.

- 5.- El aporte principal de agua proviene del flujo subterráneo del lado americano y la infiltración de agua en el distrito de riego, y en menor proporción de escurrimiento superficial estacional.

Las direcciones de flujo subterráneo indican tres principales tendencias una predominante hacia el suroeste, casi perpendicular a la línea de costa, otra con dirección norte-suroeste y que reconoce al río, un tercer flujo proviene de este flujo del río hacia el oeste para descargar en el Golfo de California.

Las pérdidas por evaporación se manifiestan en lo que corresponde a la zona agrícola (Módulos 1, 2 y 3) por la margen izquierda del Río Colorado, sin embargo son mínimas.

- 6.- El balance del acuífero queda de la siguiente manera entradas horizontales 207 hm³, recarga vertical 117,25 hm³, extracciones 286,5 hm³.

- 7.- Si valoramos solamente aspectos cuantitativos, podemos concluir de acuerdo con los resultados del balance de aguas subterráneas realizado en el acuífero SON-01 Valle de San Luis Río Colorado, existe una disponibilidad media anual de agua subterránea del orden de los 37,5 hm³, cantidad suficiente para satisfacer la demandas actuales y futuras de los sectores agrícolas y urbanos, principales usuarios en la zona.

- 8.- La calidad del agua en el acuífero S.L.R.C. es mala, debido a que en sólidos totales disueltos el 64% de los aprovechamientos se clasifican como agua salobre, y la dureza total se clasifica de dura a muy dura, por ello se considera limitada para uso agrícola y condicionado para uso potable. De aquí que con este entendido para su uso, se realice una mezcla de aguas entre superficial y subterránea en un lugar denominado la "licuadora" de manera que se mejora la calidad para uso en el riego. La familia predominante en consecuencia con un 73% es clorurada sódica seguida de la sulfatada sódica en un 16%, que son aguas típicas de una combinación entre aguas altamente evaporadas con probabilidad de cruce por diferentes sedimentos con cargas halíticas que se lixivian a su paso y por otro lado con origen de mala calidad como resultado de la actividad agrícola residual de los Estados Unidos.

Las concentraciones de metales pesados en el acuífero son en general bajas, salvo en los casos del fierro y manganeso con concentraciones por arriba de los límites máximos permisibles establecidos, principalmente al norte y noroeste del acuífero.

En lo que se refiere a los aspectos cualitativos, la calidad del agua es un problema que afecta a ambos Estados de la República y que se refleja en el decremento de la productividad, de los valores de la producción y con pérdida de superficie agrícola por efecto de la salinidad de suelos.

9.- El incremento constante de la salinidad del agua superficial y subterránea en la cuenca del Río Colorado y la zona de estudio, se debe principalmente a fenómenos naturales de arrastre de minerales del suelo, dadas las características o condiciones geológicas de esa región, 47% de la salinidad es de origen geológico, 37% por la lixiviación de suelos por prácticas agrícolas. Este río, en sus 2,300 kilómetros de recorrido transporta en solución alrededor de nueve millones de toneladas de sales.

10.- Inequidad.

La salinidad del agua y suelos agrícolas de los valles de Mexicali, Baja California y San Luis Río Colorado, Sonora, donde se asienta oficialmente el Distrito de Riego 014, Río Colorado, constituye uno de los factores más importantes que limitan la producción de alimentos de origen vegetal. En estos valles se tiene una superficie de 207,965 hectáreas con derecho de riego, de las cuales 97 500 ha presentan problemas de acumulación de sales solubles; esto representa el 47% de la superficie total.

La salinidad de las aguas superficiales y subsuperficiales, se ha incrementado a través del tiempo. Esta salinidad se ha caracterizado por el flujo en masa de los componentes individuales, característica común de aguas de retorno o de drenaje.

El agua utilizada para el desarrollo de las diferentes actividades económicas en el Delta del Colorado, especialmente la agricultura, es de menor calidad en el Distrito de Riego 014, Río Colorado. Esto influye en el deterioro de los suelos en que es utilizada, particularmente en algunas áreas que tienen las características de una cuenca cerrada.

Los problemas de la salinidad del agua del Río Colorado, deben analizarse desde el punto de vista del impacto que se provoca en una región binacional, ya que se están afectando intereses de los residentes de ambos países; además, es de suma importancia tomar las medidas necesarias oportunamente bajo un marco de cooperación bilateral, considerando la alteración que se provoca al medio ambiente en ambos lados de la frontera.

XV.2 Recomendaciones

Es necesario plantear alternativas a los problemas que enfrentan los usuarios de los Distritos de Riego, derivados del deterioro de la calidad del agua de los acuíferos y de las prácticas inadecuadas de agroquímicos y pesticidas.

La zona de estudio enfrenta grandes retos, por una parte los derivados del deterioro de la calidad del agua y la pérdida de superficie agrícola afectada por salinidad y por otra, las normas regulatorias y de gestión política entre países y estados.

El deterioro de la calidad del agua podría solventarse modificando los patrones de mezcla y en caso de que con el tiempo los índices de salinidad sean tales que el efecto de mezcla no equilibre los índices de salinidad, habría que valorar la modificación del patrón de cultivos a otros mas resistentes a la salinidad o bien al cambio de uso de suelo, en actividades como la turística o la acuicultura, que son igual o mas importantes económicamente hablando.

Desde la perspectiva de un enfoque integral, se plantean las siguientes alternativas para la problemática aquí descrita en la zona de estudio:

LA GESTIÓN INTEGRADA EN LAS CUENCAS TRANSFRONTERIZAS

Los recursos de agua dulce, que trascienden las fronteras políticas y administrativas, deben ser compartidos entre las personas, los sectores económicos, las jurisdicciones inter-Estado y entre las naciones soberanas, respetando la necesidad de un medio ambiente durable.

La implementación de una Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) requiere una voluntad política y compromisos financieros de largo plazo.

Este debería incluir:

- a) La modificación de las leyes de agua nacionales que introdujeran o fortalecieran la GIRH y las técnicas de gestión en las cuenca transfronterizas;
- b) La creación de organismos de cuenca a nivel internacional ;
- c) La revisión y actualización de convenios, tratados, y/o declaraciones internacionales sobre la gestión de las aguas dulces en el marco de estos consejos de cuenca internacionales;
- d) La organización de sistemas coherentes de monitoreo, de intercambio de informaciones apropiadas y la implementación de bases de datos adecuadas;
- e) Elaborar y adoptar planes maestros nacionales y regionales sobre el agua; y
- f) La creación de sistemas racionales de financiamiento, basados en los principios de causa común y de solidaridad en las cuencas.

El manejo del agua del Río Colorado es muy complejo, la administración del sistema es de gran interés tanto para Estados Unidos como para México, por lo que corresponde realizarla a ambos países, para lo cual a través de tiempo se ha conformado una amplia y compleja legislación, que establece las bases para la operación del sistema, en función de sus asignaciones. Su ubicación geográfica y el uso intensivo de sus recursos, ha propiciado a través del tiempo una gran competencia a nivel de subcuencas, estados y usuarios, así como entre los dos países que comparten estos recursos.

Aunque a nivel internacional se cuenta con el Tratado de 1944 entre México y Estados Unidos y un significativo número de Actas o Minutas, no ha sido suficiente para resolver los conflictos que se derivan en aspectos de entregas de agua, salinidad, control de azolves y asuntos ambientales, que demandan alta prioridad de atención en la agenda bilateral de los dos países.

Por otra parte, la necesidad de asignar agua para usos ambientales cada día es mayor. A la fecha no existe ningún acuerdo que asegure una cantidad para tales propósitos, sin embargo los dos países han reconocido que el Delta del Río Colorado y el Alto Golfo de California son ecosistemas de importancia mundial por su biodiversidad y se requieren acciones conjuntas para la preservación de las especies que ahí habitan.

El primer obstáculo es el marco jurídico existente, lo que requerirá su adecuación conjuntamente con otras medidas que deberán tomarse en cada país y en forma bilateral de manera compartida y corresponsable, que aseguren que los recursos asignados para propósitos ambientales se aprovechen con tales fines. La participación del público y de las comunidades locales será un factor decisivo para la toma de estas decisiones.

Se cuenta con los elementos suficientes para mejorar o fortalecer la toma de decisiones a través de:

Modelo matemático de flujo

Modelo matemático de calidad del agua

Monitoreo piezométrico sistemático e instrumentación

XVI BIBLIOGRAFÍA

Álvarez-Borrego, S., Flores-Báez, B.P., Galindo-Bect, L.A., 1975. Hidrología del Alto Golfo de California II. Condiciones durante invierno, primavera y verano. Ciencias Marinas, v. 2, p.21-36.

Arámbula M. D.A., J.C. Palomino M.1991. Panorama Geohidrológico del Estado de Sonora. Tesis. Depto. de Geología. Universidad de Sonora. Hermosillo, Sonora, México.

ARIEL Construcciones. "Estudio Hidrogeológico Preliminar de los Acuíferos del Valle de Mexicali, B. C. y Mesa de San Luis, Son., 1967.

ARIEL Construcciones. "Estudio Hidrogeológico Completo de los Acuíferos del Valle de Mexicali B. C. y Mesa de San Luis, Son.". 1968.

Astier, J.L. 1982. Geofísica Aplicada a la Hidrogeología. Ed. Paraninfo. Madrid, España. Brooks K.N., P. F. Ffolliott, H.M. Gregersen, J.L. Thames. 1991. Hydrology and the management of watersheds. Iowa State University Press/Ames. USA.

Augustinus, P.G.E.F., 1989. Cheniers and chenier plains: A general introduction. Marine Geology, v. 90, p. 219-229.

Banco de Desarrollo de América del Norte. Caracterización Hidrogeoquímica del Acuífero "Bajo Río Bravo", Tamaulipas. 2005. Informe preliminar.

Barlow, J., Gerrodette, T., and Silber, G., 1997. First estimates of vaquita abundance. Marine Mammal Science, v. 13, p. 44-58.

Belice National Meteorological Service. Philip Goldson International Airport PO Box 717. Belice City, Belize.

Bernal-Rodríguez Francisco A. 2001. Aspectos actuales de las negociaciones sobre aguas del río Colorado con Estados Unidos

Calleros Roman Jesús y Ramirez Hernandez Jorge. "Interdependent Border Water Supply Issues: The Imperial and Mexicali Valleys". Tomo II. The U.S.-Mexican Border Environment. Página 95-144.

Carbajal, N., Sousa, A., and Durazo, R., 1997, A numerical model of the ex-ROFI of the Colorado River. Journal of Marine Systems, v. 12, p. 17-33.

Carriquiry, J.D. and Sánchez, A., 1999. Sedimentation in the Colorado River delta and upper Gulf of California after nearly a century of discharge loss. Marine Geology, v. 158, p. 125- 145.

Censo, Geología, Geoquímica de la Zona de la Trinitaria en el Edo de Chiapas. 1974. Compañía INGESA.

Cervantes, R.M. 1990. Evolución de la calidad del agua del río Colorado. Revista Ciencias Agropecuarias. vol. 2. num. 2. Universidad Autónoma de Baja California, México.

Cervantes, R.M. y Bernal, R.F.A. 1991. Comportamiento de la calidad del agua del río Colorado a través del tiempo y el espacio. Congreso Regional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Hermosillo, Sonora.

Chavez Guillén R. 1986. Apuntes de Geohidrología. Universidad Autónoma de Chapingo. México.

Cisneros-Mata, M.A., Montemayor-López, G., and Román-Rodríguez, M.J., 1995. Life history and conservation of *Totoaba macdonaldi*. Conservation Biology, v. 9, p.806-814.

Cohen, Michael J. y Henges-Jeck Christine. "El Agua Perdida, Usos y Flujos de Agua en la Región del Delta del Río Colorado". Pacific Institute. Septiembre 2001.

Cohen, Michael. 2005. Entendiendo los flujos del agua en el delta del Río Colorado. Señor Asóciate. Pacific Institute.

Coloquio la Problemática del Agua en Usos Agrícolas en el Valle de Mexicali. Roman, C.J.A., Bernal, R.F.A. y Lares, B.V., Eds, Mexicali, B.C., México. pp 28-44.

Consultores en Infraestructura y Servicios, S.A. de C.V. "Actualización del Estudio Geohidrológico de la Cuenca Baja del Río Colorado, B.C.

Comisión Federal de Electricidad. Resumen y Evaluación de Estudios Hidrogeológicos Realizados para el Abastecimiento de Agua a las Centrales Termoeléctricas Carbón I y II, Mediante las Alternativas de Explotación del Sistema Acuífero Calizo de la Porción Norte del Estado de Coahuila. 1994.

Comisión Federal de Electricidad. Estudio Geohidrológico del Sistema Acuífero en Calizas de la Porción Norte del Estado de Coahuila. Informe anual. 1998.

Comisión Federal de Electricidad. Estudio sobre el Comportamiento Geohidrológico del Acuífero y Construcción de pozos de Absorción, Producción e Inyección para la Planta Mérida. 1980.

Comisión Internacional de Límites y Aguas entre México y los Estados Unidos (CILA). Estudio Binacional sobre la Presencia de Sustancias Tóxicas en el Río Bravo/Río Grande y sus Afluentes, en su Porción Fronteriza entre México y Estados Unidos. 1994. Informe Final. 285 p.

Comisión Internacional de Límites y Aguas. "Boletín Hidrométrico del Río Colorado". Num.42-2001.

Comisión Nacional del Agua. "Estudio de Geofísica de Resistividad y Geohidrología complementaria en la Mesa Arenosa de San Luis R. C. y en la Región Costa Rica, Municipio de Caborca, en el Estado de Sonora". 1990.

Comisión Nacional del Agua. "Simposio México-Estados Unidos Sobre el Delta del Río Colorado. Aspectos Operativos Relacionados con el Manejo del Agua del Río Colorado". Presentación 2002.

Comisión Nacional del Agua. "Clasificación de Acuíferos y Disponibilidad de aguas Subterráneas en el Estado de Sonora". 1995.

Comisión Nacional del Agua, Gerencia Regional de la Península de Baja California. "Estimación de las Recargas y Estudio del Comportamiento del Acuífero del Valle de Mexicali". 1991.

Comisión Nacional del Agua, Gerencia Regional de la Península de Baja California. "Informe Preliminar de las Condiciones Geohidrológicas Imperantes en el Distrito de Riego 014, Río Colorado, en el periodo comprendido: del 2 de Marzo de 1992 al 9 de Febrero de 1987". 1992.

Comisión Nacional del Agua, Gerencia Regional de la Península de Baja California. "Estudio Técnico Justificativo de la Zona Geohidrológica del Acuífero BC-10 Valle de Mexicali B. C. y Mesa Arenosa de San Luis, Son.".

Comisión Nacional del Agua, Gerencia Regional de la Península de Baja California. "Compendio de Registros de Pozos en Mesa Arenosa de San Luis".

Comisión Nacional del Agua, Gerencia Regional de la Península de Baja California. "Compendio de Registros de Pozos de la Serie G, construidos por el departamento de Aguas Subterráneas".

Comisión Nacional del Agua. 2004. Subgerencia Regional Técnica. Gerencia Regional Noroeste. Hermosillo, Sonora. México.

Comisión Nacional del Agua. Estudio Geohidrológico del Valle de Tijuana en el Estado de Baja California Norte. 1979.

Comisión Nacional del Agua. Estudios de Nuevas Fuentes de Abastecimiento para las Ciudades Fronterizas del Estado de Baja California Norte. 1998.

Comisión Nacional del Agua. Estudio de Reactivación de Redes de monitoreo Piezométrico de los Acuíferos de los Valles de Mexicali, Tijuana y Tecate, B.C. 1999.

Comisión Nacional del Agua. Efectos del Revestimiento del Canal Todo Americano sobre Territorio Mexicano. 1991.

Comisión Nacional del Agua. Actualización del Estudio Geohidrológico de la Cuenca Baja del Río Colorado, B.C. 1996.

Comisión Nacional del Agua. Estudio de Reactivación de Redes de Monitoreo Piezométrico de los acuíferos de los Valles de Mexicali-Mesa Arenosa, B.C.-Sonora; Río Santa Cruz, Sonora; Tijuana y Tecate, B.C. 1999. Contrato FUMEC-99-01.

Comisión Nacional del Agua. Actualización del estudio geohidrológico del río Sonoyta, Son. 1978.

Comisión Nacional del Agua. Estudio Geohidrológico de Fuentes de Abastecimiento de Agua Potable para el Poblado de Puerto Peñasco, Sonora. 1979.

Comisión Nacional del Agua. Informe de la prospección y levantamientos geológicos y geofísicos en el área de Pinacate-Pápagos, Sonora. 1981.

Comisión Nacional del Agua. Censo de Captaciones de Aguas Subterráneas y Colección de Datos Geohidrológicos en la Zona de Puerto Peñasco, Sonora. 1997.

Comisión Nacional del Agua. Evaluación de la Contaminación del Acuífero de Nogales, Sonora. 1994.

Comisión Nacional del Agua, Comisión Internacional de Límites y Aguas, United States Environmental Protection Agency y Arizona Department of Environmental Quality. Programa Binacional de Monitoreo de Aguas Subterráneas sobre el Arroyo Los Nogales. 1998. Informe Preliminar. 77 p.

Comisión Nacional del Agua. Diagnóstico de la Contaminación en el Acuífero del Arroyo Los Nogales, Sonora. Informe Técnico No. GAS/98/02. 1998. 44 p.

Comisión Nacional del Agua. Estudio de evaluación de la disponibilidad de agua y definición de explotación en el valle de Río Santa Cruz con fines de abastecimiento de agua a la ciudad de Nogales, Sonora. 1989.

Comisión Nacional del Agua. Estudio de Actualización de Condiciones Piezométricas de la Zona Valle de Juárez, Chihuahua. 1999.

Comisión Nacional del Agua. Estudio de Reactivación de Redes de Monitoreo Piezométrico de los acuíferos de los Valles de Mexicali-Mesa Arenosa, B.C.-Sonora; Río Santa Cruz, Sonora; Tijuana y Tecate, B.C. 1999. Contrato FUMEC-99-01

Comisión Nacional del Agua. Condiciones Geohidrológicas Generales en la Cuenca Alta del Río San Pedro, Edo. Sonora. 1987.

Comisión Nacional del Agua. Estudio de Simulación Hidrodinámica y Diseño Óptimo de la Red de Observación en el Acuífero de Ciudad Juárez. 1996.

Comisión Nacional del Agua. Estudio Geohidrológico de la Zona de Allende - Piedras Negras, Coahuila. 1990.

Comisión Nacional del Agua. Estudio Geohidrológico de Actualización en la Zona Bajo Río Bravo - Reynosa. 1980.

Comisión Nacional del Agua. Estudios Geofísicos y Geohidrológicos para Determinar Zonas Adecuadas de Explotación en la Cuenca Baja del Río Bravo de Tamaulipas y Coahuila. 1995.

Comisión Nacional del Agua. Estudio Piezométrico y de Calidad del Agua Subterránea del Corredor Turístico de Cancún-Tulum. 1993.

Comisión Nacional del Agua. Determinación de la Disponibilidad de Agua en el acuífero Península de Yucatán, estado de Yucatán. 2002. Disponible en <http://www.cna.gob.mx/eCNA/Espaniol/Directorio/Default.aspx>

Croxen, F.W. III, C. Shaw, C., Campoy, J. 2000. Vertebrate paleontology, paleobotany and GIS of the Middle Pleistocene Colorado River Delta, Northwestern Sonora, Mexico: a work in progress. En: Thierry Calmus y Efrén Pérez-Segura (eds.).

Cuarta Reunión sobre la Geología del Noroeste de México y áreas adyacentes. Libro de Resúmenes. Publicaciones ocasionales No. 2. Estación Regional del Noroeste, Instituto de Geología, Universidad de Sonora. P. 22.

Dingman L.S. 1994. Physical Hydrology. Macmillan Publishing Company. University of New Hampshire. New York. USA.

ERM de México. Evaluación Geohidrológica de la cuenca que involucra las localidades de Anáhuac y Valle Hermoso, Edo. de Tamaulipas. 1998.

Estudio Geohidrológico de Evaluación y Censo en el Edo de Chiapas Región Soconusco. 1977. Compañía ICG, S.A.

Estudio de Fuentes de Abastecimiento Puerto Madero, Chiapas. 1979. Compañía ICG, Ingenieros Civiles y Geólogos Asociados, S.A.

Estudio de actualización Geohidrológica en los acuíferos de Soconusco y Tuxtla estado de Chiapas. 2001. Compañía Laramide Ingenieros, S.A. de C.V.

Estudio de Factibilidad del Proyecto Huixtla, Chiapas (Estudio Geohidrológico). 1978. Compañía ICATEC, S.A.

Estudio de Gran Visión de la Región Grijalva - Usumacinta, estados de Tabasco y Chiapas. 1976. Compañía ICATEC, S.A.

Estudios hidrogeológicos en Guatemala. 1982. Organización Panamericana de la Salud (OPS)/Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria (ERIS) – Universidad de San Carlos de Guatemala.

Estudios Geohidrológicos en Diversas Zonas del Edo. de Tabasco. 1975. Compañía Ingeniería y Geotecnia, S.A.

Flessa, K.W., Surge, D.; Dettman, D.L.; Téllez-Duarte, M.A.; Goodfriend, G.A.; y Zachos, J.C., 1997. Los isótopos de oxígeno en bivalvos marinos pueden ser utilizados para estimar la afluencia de agua del Río Colorado a su delta. (Resumen)

Fundación México – Estados Unidos Para la Ciencia. Estudio de Actualización de Mediciones Piezométricas del Acuífero Valle de Juárez. 1999.

Grupo México, Mexicana de Cananea, S.A. de C.V. Actualización del Estudio Geohidrológico de las Cuencas del Río San Pedro y Norte del Río Sonora, en Cananea, Sonora. 2000.

Grupo Modelo, S.A. de C.V. Estudio Geohidrológico para Determinar la Factibilidad de Abastecimiento de la Planta Zaragoza, Coahuila. 2003.

GYCSA. “Informe del Estudio Geohidrológico Preliminar en la Zona de los Vidrios San Luis Río Colorado, Son.”, 1981.

Harding, B.L., Sangoyomi, T.B. and Payton, E.A., 1995. Impacts of severe sustained drought on Colorado River water resources. Water Resources Bulletin 31: 815-824.

Hidrogeología – Disponibilidad de agua subterránea en la República de Guatemala, Plan Maestro de Riego y Drenaje, Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA). 1991. Proyecto PNUD/OSP/GUA/88/003 Componente Riego.

INEGI. 2000. Anuario estadístico de Sonora. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México.

Ingeniería Geológica y Computarizada. S.A. de C.V. Estudio Geohidrológico para la Central de Ciclo Combinado Río Bravo III, localizada en Valle Hermoso, Edo. de Tamaulipas. 2001.

Itinerario Excursión Geológica, Chiapas (Oaxaca y Chiapas). 1970. Compañía PEMEX.

Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Ciudad Juárez. Calidad del Agua en la Zona Sur del Acuífero de Conejos-Médanos, Juárez, Chihuahua. (Bolsón de la Mesilla). 1999. Reporte Técnico No. DSGEO-010/99.

Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Ciudad Juárez. Prospección Hidrogeológica e Hidrogeoquímica en el Bolsón de la Mesilla, Chihuahua (Zona de Conejos - Médanos). 2000. Reporte Técnico No. DSGEO-011/00.

Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Ciudad Juárez. Modelo de Simulación Hidrodinámica y de Transporte de Solutos del Acuífero del Bolsón de la Mesilla (Zona de Conejos - Médanos). 2000. Reporte Técnico No. DSGEO-012/00.

Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Ciudad Juárez. Prospección Geofísica en la Zona de Terrazas, Valle de Juárez, Municipio de Juárez, Chihuahua. 2000. Reporte Técnico No. DSGEO-015/00.

Kowalewsky, M., 1995. Quantitative taphonomy, ecology, and paleoecology of shelly invertebrates from the intertidal environments of the Colorado River delta, northeastern Baja California, Mexico. Tesis de Doctorado, Universidad de Arizona, Tucson, 348 p.

Kowalewsky, M., Flessa, K.W. y Aggen, J.A., 1994. Taphofacies analysis of Recent shelly cheniers (beach ridges) northeastern Baja California. *Facies* 31: 209-242.

Kowalewsky, M., Goodfriend, G.A. y Flessa, K.W., 1998. High-resolution estimates of temporal mixing within shell beds: the evils and virtues of time-averaging. *Paleobiology*, v. 24, p. 287-304.

Karl W. Flessa, David L. Dettman, Bernd R. Schöne, David H. Goodwin, Carlie A. Rodriguez, Sarah K. Noggle. *Antes de las Presas: Sedimentología e Historia Ecológica sobre el Delta del Río Colorado, México*. Department of Geosciences, University of Arizona, Tucson, AZ 85721 USA

Kessler J., N.A. DE Rider. 1978. Principios y Aplicaciones del Drenaje. International Institute for Land Reclamation and Improvement/ILRI. Publication 16s. Volumen III, cap.22

Levantamiento Geológicos Geohidrológicos en Areas de Chiapas. 1978. Compañía Estudios Geológico y Obras Civiles S.A.

Levantamientos Geológicos y Geofísicos en el Edo. de Chiapas. 1979. Compañía Estudios Geológico y Obras Civiles S.A.

Levantamientos Geológicos Geohidrologicos en áreas de Chiapas. 1976. Compañía Estudios Geológicos y Obras Civiles, S. A.

López, L.A. 1991. Evolución de la calidad del agua del acuífero del valle de Mexicali

López, L.A. y G. García S. 1995. Uso agrícola del agua en Baja California publicado en *El futuro del agua en Baja California (1995-2020)*. Gobierno del Estado de Baja California.

Maestría en Ciencias. Instituto de Investigaciones en Agricultura y Ganadería. Universidad Autónoma de Baja California, Mexicali, Baja California, México.

Maidment R. David. 1993. Handbook of Hydrology. McGraw-Hill Inc. USA.

Memorias de la IV Reunión sobre Geología de la Península de Baja California, 6-9 de abril, UABC-sociedad Geológica Peninsular.

Olmsted, O. J. Loeltz & Burdge Irelan. "Geohydrology of the Yuma Area, Arizona and California". Geological Survey, professional paper 486-H, US Department of the Interior. 1984.

Paredes, A. E. 1989. Aspectos geohidrológicos del distrito de riego 014, río Colorado.

Pacheco Romero, Martín Francisco. "Estructura y Evolución de la Cuenca de Altar, Sonora, a partir de la Integración de Datos Geofísicos y Geológicos". Ensenada, B. C., Junio 2004. CICESE.

Programa de Sistemas de Miniriego con Agua Subterránea. 1986-1989. DIGESA. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación.

Recopilación de Estudios de Aguas Subterráneas en Algunos Altiplanos y Valles Intermontanos de la República de Guatemala. 1976-1996. Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH).

Revista Impulso Agropecuario. Número 8. Mexicali, Baja California México.

SARH. "Aspectos Generales sobre la Infraestructura de los Ejidos de la Mesa Arenosa de San Luis Río Colorado. 1990.

SARH. "Aspectos Geohidrológicos del Distrito de Desarrollo Rural 002, Río Colorado". 1987.

SARH. "Informe Geohidrológico Preliminar de la porción oriental de la Mesa Arenosa de San Luis Río Colorado". 1990.

SARH / CNA. "Recursos Hidráulicos Subterráneos en el Estado de Sonora Aspectos Generales y Balance Geohidrológico Estatal". 1993.

Secretaría de Recursos Hidráulicos. Dirección General de Estudios. "Resumen del Estudio Geohidrológico del Valle de Mexicali, B.C. y Mesa Arenosa de San Luis, Son." Dirección de Aguas Subterráneas. 1972.

Springall R. 1967. Escurrimiento en cuencas grandes. Secretaría de Obras Públicas. Instituto de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.

Tesis de López, L. A. 1996. Necesidades de drenaje parcelario en el valle de

Mexicali.

Tinajero Gonzalez J.A. 1982. Aspectos Fundamentales en el estudio del Agua Subterránea. Comisión del Plan Nacional Hidráulico. México. D.F.