

**UNIVERSIDAD DE SONORA.**

**División de Ciencias Exactas y Naturales**

**Departamento de Geología**

**HIDROESTRATIGRAFIA DEL ACUIFERO  
DEL VALLE DEL RIO YAQUI, SONORA.**

**TESIS PROFESIONAL**

**Que para obtener el Título de:  
GEÓLOGO**



**P R E S E N T A:**

**ADRIAN GRIJALVA MONTOYA.**

**Hermosillo, Sonora, Marzo de 2008**

# 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

*“.....y algunos corren colina arriba y valle abajo rompiendo las rocas con un martillo, como otros tantos peones camineros que se hubieran vuelto locos; dicen que es para ver cómo está hecho el mundo”*

*Sir Walter Scott, < St. Ronan's – Well > 1911*

## HIDROESTRATIGRAFIA DEL ACUIFERO DEL VALLE DEL RIO YAQUI, SONORA.

Cap.	CONTENIDO	Pag.
	Resumen	
I	<b>Introducción</b> .....	2
I.1	Presentación.....	2
I.2	Estudios Previos.....	3
I.3	Objetivo.....	4
I.4	Metodología.....	4
II	<b>Generalidades</b> .....	6
II.1	Localización del Área de Estudio.....	6
II.2	Vías de Acceso.....	6
II.3	Climatología.....	7
II.4	Vegetación.....	8
II.5	Edafología.....	9
II.6	Unidades de Suelo.....	10
III	<b>Fisiografía y Geomorfología</b> .....	14
III.1	Fisiografía.....	14
III.2	Geomorfología.....	14
IV	<b>Geología</b> .....	17
IV.1	Geología Superficial y Tectónica.....	17
IV.2	Geología del Subsuelo.....	19
V	<b>Hidrogeología</b> .....	23
V.1	Tipo de Acuífero.....	23
V.2	Importancia de la Zona Vadosa.....	24
V.3	Acuífero Superior.....	25
V.4	Acuífero Regional.....	25
V.5	Piezometría Histórica.....	26
V.6	Piezometría Actual.....	27
VI	<b>Modelo Conceptual Hidrogeológico</b> .....	30
VI.1	Condiciones de Frontera.....	30
VI.2	Morfoestructura.....	31
VI.3	Hidrogeología.....	32
VII	<b>Hidroestratigrafía</b> .....	34
VII.1	Unidades Hidroestratigraficas.....	34
VII.2	Correlaciones Hidroestratigraficas.....	35
VIII	<b>Conclusiones y Recomendaciones</b> .....	46
VIII.1	Conclusiones.....	46
VIII.2	Recomendaciones.....	47
IX	<b>Referencias Citadas</b> .....	49

## RESUMEN

Con el objetivo de definir unidades hidroestratigráficas en el acuífero del Valle del Río Yaqui, se realizó este trabajo, buscando analizar los factores geológicos, geomorfológicos e hidroestratigráficos para contribuir al entendimiento de un modelo conceptual hidrogeológico de la cuenca del Valle del Río Yaqui.

Para el logro de este objetivo, se recopiló inicialmente información del Valle del río Yaqui, tanto de trabajos realizados anteriormente, como de bases de datos existentes, después se prosiguió con el análisis de la litología de los pozos, generando secciones litológicas para realizar correlaciones entre estas secciones.

Con los resultados obtenidos de las correlaciones litológicas, se vio la necesidad, se interpreta que el ambiente característico de los sedimentos depositados en la cuenca del Valle del Río Yaqui corresponde, a ambientes sedimentarios fluviales. De acuerdo a las fosas tectónicas existentes (Monreal y otros 2003) en donde una fosa se encuentra por debajo del Arroyo Cocoraque y otra que pasa por el centro del Valle, casi orientada Norte-Sur y a la interpretación de las correlaciones litológicas de pozos, la fosa tectónica, orientada Norte-Sur, podría corresponder a uno de los paleocauces del Río Yaqui. También con la interpretación de la hidroestratigrafía, se determinaron los tipos de sedimentos existentes, a diferentes profundidades, por lo que se puede reconocer la presencia, del antiguo cauce del Río, el delta y zonas de planicie de inundación.

## I. INTRODUCCIÓN

### I.1 Presentación

El Valle del Río Yaqui es una de las zonas de producción agrícola más importante del país, queda comprendido dentro de la Región Hidrológica RH9 Sonora Sur. Su extensión aproximada es de 5000 km<sup>2</sup>, abarcando parcialmente los municipios de Cajeme, Bacum, Guaymas, y San Ignacio Río Muerto. Entre las poblaciones más importantes que se localizan dentro del valle se encuentran: Ciudad Obregón, Esperanza, Benito Juárez y Bacum.

La corriente del Río Yaqui es la más importante de la región, tiene un volumen medio anual escurrido alrededor de 2,800 millones de metros cúbicos (Monreal y otros 2003). Presentándose los mayores gastos con las lluvias de verano en la parte alta de la sierra, sin dejar de tener importancia las lluvias de invierno y las nevadas. Se considera que el Río Yaqui termina su escurrimiento en la presa Álvaro Obregón.

El Río Yaqui, ha sido a través de los años, el principal vehículo de transporte del material reciente de relleno del valle, cuya principal fuente de material proviene de las rocas que rodean la enorme cuenca, rellena por depósitos aluviales que se han prolongado hasta la costa.

El acuífero ha sido alimentado por las infiltraciones del Río Yaqui, de los canales y de las filtraciones del agua de riego vertida en los suelos agrícolas, teniendo así una recarga total inducida de 646.73 Hm<sup>3</sup> (Monreal y otros, 2003).

En este trabajo se busca aportar información hidroestratigráfica que ayude a la integración actualizada del modelo conceptual del acuífero del Valle del Río Yaqui, a través de la interpretación de correlaciones litológicas y la definición de unidades hidroestratigráficas.

## I.2. Estudios Previos

- 1) Geólogos Consultores Asociados, S.A. (1979), llevó a cabo el “Estudio de las condiciones geohidrológicas, sitios adecuados para la perforación y delimitación de acuíferos terciarios de los Valles intermontanos de Yecora, Río Chico, Los Cedros, Jincore y Cocoraque, Estado de Sonora”.
- 2) Oscar Rubén Gómez Aldama (1992) desarrolló la tesis de maestría “Un modelo de programación por redes para planear la operación del uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas en el Valle del Yaqui, Sonora”.
- 3) Luis Manuel Lozano Cota (1992), desarrolló la tesis de maestría “Un modelo de programación lineal para la planeación del uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas en el Valle del Yaqui, Sonora”.
- 4) El Instituto Tecnológico de Sonora (1996), llevó a cabo el estudio “Planeación del uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas en el Valle del Yaqui, Sonora”.
- 5) Técnicas Geológicas y Mineras, S.A. de C.V., (1996), realizó el estudio para el diseño de redes de monitoreo de los acuíferos de los valles de El Yaqui, Hermosillo y Caborca, en el Estado de Sonora. Elaborado para la Comisión Nacional Del Agua. Son., México.
- 6) Técnicas Geológicas y Mineras, S.A. de C.V. (1997), llevó a cabo la “Actualización de mediciones piezométricas de los acuíferos reactivados en 1996 (PROMMA), en los Estados de Sonora y Chihuahua”.
- 7) María Esther Martínez Uribe (1999), desarrolló la tesis de maestría “Caracterización hidrogeológica de las formaciones volcánicas y sedimentarias en el Valle de Boca Abierta, Sonora”.
- 8) Julio César Ansaldo Leyva (1999), desarrolló la tesis de maestría “Estimación de la aportación media por infiltración del canal principal bajo en la sección de la batería de pozos que abastecen a Guaymas-Empalme en el Acuífero del Valle Aluvial del Río Yaqui”.

- 9) El Instituto Tecnológico de Sonora (2000), realizó el “Estudio de disponibilidad y actualización hidrogeológica en los acuíferos de los valles de: El Yaqui, El Mayo, Boca Abierta y Guaymas, Sonora”.
- 10) Lizzeth A. Navarro Ibarra (2001), tesis de maestría “Modelo de optimización-simulación para generar políticas de extracción en el acuífero del Valle del Yaqui, Sonora”.
- 11) Un autor inédito presenta un “Informe sobre suelos del Valle del Yaqui”.
- 12) El Departamento de Geología de la Universidad de Sonora Monreal y Otros (2003), llevó a cabo el “Estudio de Actualización Geohidrológica del Acuífero Valle del Yaqui Municipio de Cajeme, Sonora”.
- 13) Gutiérrez Heredia Rosa Elvira (2004), tesis de Licenciatura Departamento de Geología “Evolución Geomorfológica del Valle del Yaqui”.

### **I.3 Objetivo**

El Objetivo Primordial de este estudio, es determinar mediante el análisis de la litología y correlaciones litoestratigráficas de los pozos, así como de la información obtenida de estudios anteriores, las unidades hidroestratigráficas presentes y así aportar información relevante para actualizar el modelo conceptual hidrogeológico del acuífero del Valle del Río Yaqui.

### **I.4 Metodología**

La metodología seguida en este estudio, consiste en lo siguiente:

- 1) Recopilación de información bibliográfica, trabajos previos y bases de datos del área de estudio.
- 2) De acuerdo a datos tomados en campo, y trabajos previos, se prosiguió con la realización de una nueva base de datos, de acuerdo a las necesidades de este estudio en el software Microsoft Excel.



- 3) Con la base de datos, se prosiguió con la realización de secciones litológicas y la definición de unidades litológicas e hidroestratigráficas, así como correlaciones litoestratigráficas.
- 4) Se hizo una interpretación de la geología del subsuelo con las correlaciones litoestratigráficas y con información litológica de pozos e información geofísica.
- 5) Después se hizo una relación de los resultados de la interpretación de las correlaciones litoestratigráficas y la adecuación del modelo conceptual hidrogeológico.
- 6) Se prosiguió con el análisis y descripción de resultados y conclusiones.
- 7) Finalmente se hacen algunas recomendaciones sobre el área de estudio.

## **II. GENERALIDADES**

### **II.1 Localización del área de estudio**

El área de estudio se encuentra ubicada en la parte Sur del Estado de Sonora entre los paralelos 27°00' y 27°40' de latitud Norte y entre los meridianos 109°40' y 110°25' de longitud Oeste, dentro del municipio de Cajeme. Limita al norte con la sierra El Bacatete, al sur con el Golfo de California o Mar de Cortés, al oriente con la cuenca del Río Mayo y al poniente con las Colonias Yaquis y el Mar de Cortés. Geográficamente, el área de estudio queda comprendida en el polígono que forman las siguientes coordenadas: (1) 109.888° y 27.8201°, (2) 105.533° y 27.1758°, (3) 109.761° y 26.9315°, (4) 110.525° y 27.3264° (Figura II.1).

### **II.2 Vías de Acceso**

La carretera número 15 México-Nogales, comunica las porciones sur-occidental y centro norte, de relieve predominantemente llano, del Estado de Sonora, esta carretera pasa al noreste del área de estudio por Cd. Obregón.

Las rutas que constituyen la infraestructura ferroviaria son: la del Pacífico, que recorre de Guadalajara, Jalisco a Nogales, Sonora, y se extiende en dicho tramo paralela a la Carretera Federal número 15. Comunica en el Estado varias zonas agrícolas de trascendencia, como son los distritos de riego del Río Mayo, del Río Yaqui, Colonias Yaquis y del Valle de Guaymas.

Con respecto a la comunicación aérea, la ciudad Obregón cuenta con un aeropuerto, con servicio a vuelos internacionales y nacionales y tiene capacidad para recibir naves de corto y mediano alcance.

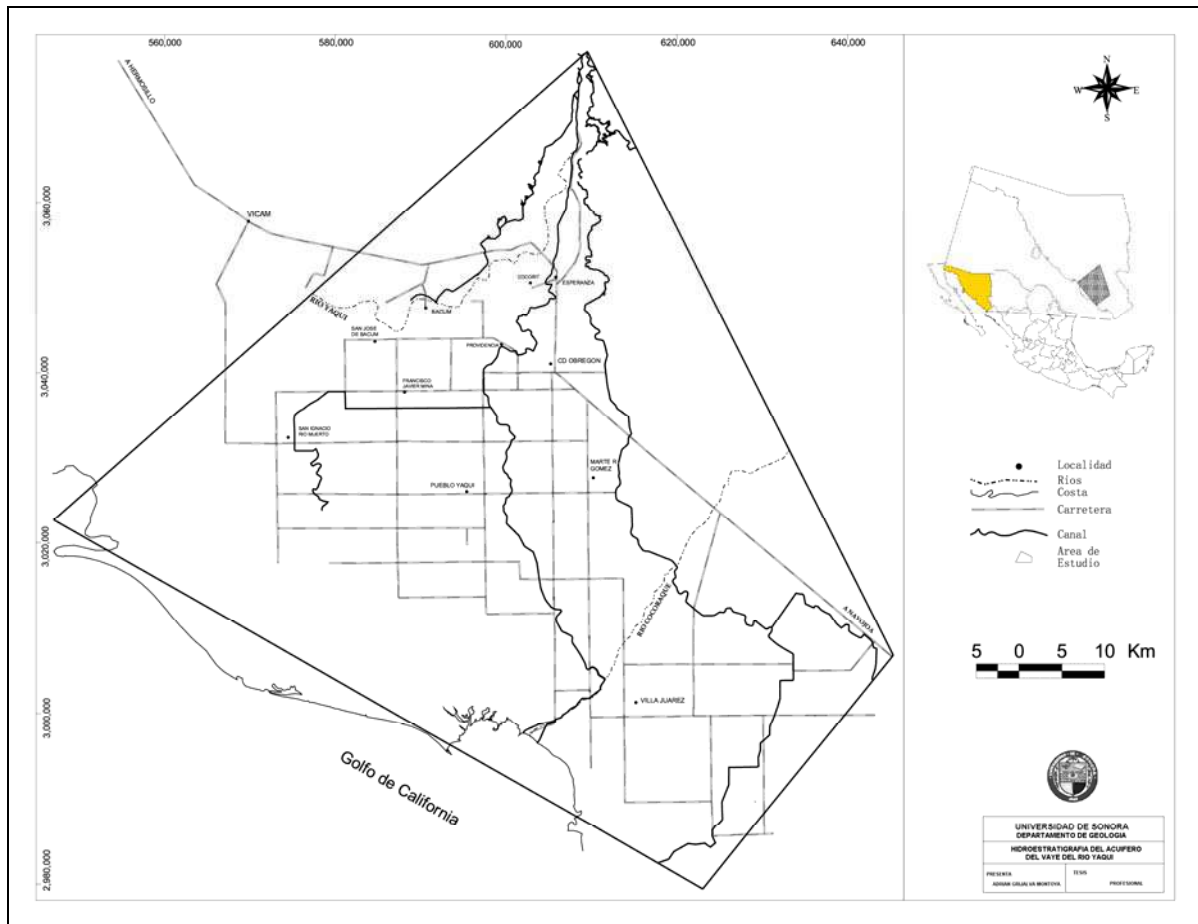


Figura II.1. Localización del área de estudio.

### II.3 Climatología

**Temperatura.** La temperatura media anual es de 22.6°C. La temperatura promedio mensual mayor es la del mes de julio, con 31.3°C. Los meses más fríos son enero y diciembre, con promedios de 16.6 y 17.1°C (Monreal y otros, 2003).

**Precipitación.** La precipitación en el Valle del Yaqui es variable, la precipitación mayor es de 512.7 mm al año. La estación climatológica que registra la precipitación mayor es la del Kilómetro 39, y la mínima de 190.8 mm al año. Se registra en la estación del Kilómetro 91 y es la precipitación media mensual máxima en agosto, donde se promedia una lámina de agua de 91.1 mm, las menores

precipitaciones son en abril y mayo, la mínima es la del mes de mayo, con un promedio de 0.6 mm (Monreal y otros, 2003).

**Evaporación.** La evaporación potencial es de 2061.51mm, de acuerdo con información de la estación climatológica CIANO que es la más representativa del valle (Monreal y otros, 2003).

**Evapotranspiración Real.** Las variaciones mensuales en evapotranspiración son similares a las de precipitación, el valor máximo es el del mes de agosto, donde el valor calculado es de 95.5 mm, seguido del mes de julio donde la evapotranspiración calculada es de 78 mm. Con respecto a los meses con evapotranspiraciones mínimas son, al igual que en la precipitación, abril y mayo con valores de 1.4 y 0.6 mm (Monreal y otros, 2003).

**Precipitación Efectiva.** Los valores para la precipitación efectiva son números negativos, lo cual indica que la cantidad de agua evapotranspirada es mayor que la precipitada, el valor mínimo obtenido es de -4.4 mm en el mes de Agosto y el máximo es el del mes de mayo con -0.03 mm, este último valor nos indica que la cantidad precipitada durante el mes de mayo es casi igual a la evapotranspirada (Monreal y otros, 2003).

## II.4 Vegetación

El tipo de vegetación característico de esta zona ha sido provocado por la alta evaporación y la poca precipitación, y consiste en choya, huizache, mezquite, y otros tipos regionales como el palo fierro, palo verde, pitahaya y sagnera. La agricultura que prevalece en el área de estudio es: trigo, soya, maíz, algodón, alfalfa y buffel.

## II.5 Edafología

En la región de estudio, la mayor parte de los suelos son jóvenes y poco desarrollados, tales como el **regosol**. Otras unidades que se consideran intermedias entre suelos jóvenes y los propiamente maduros, son el **yermosol** y el **xerosol**; estos suelos han tenido un incipiente desarrollo debido a las condiciones climáticas, ya que la escasa precipitación y la alta evapotranspiración en las zonas ocupadas por ellos limita los procesos formadores. En algunas bajadas y en las áreas húmedas se ubican los suelos más evolucionados, como el **feozem**, que presenta migración de arcillas a la capa sub-superficial, formando un horizonte **b**. Los suelos con relación porcentual de arena, limo y arcilla, son los dominantes en el área de estudio y abarcan toda la porción oriental, los de textura gruesa, arenosa, comprenden una amplia zona de la faja costera.

Los suelos presentan "fases" (impedimentos, que limitan el desarrollo de la vegetación), ya sea físicas, química o ambas; dentro de las primeras, la lítica es la mas abundante, seguidas por los *litosoles*. Los suelos con fase gravosa se localizan en el noroeste del área de estudio, en tanto los que tienen fase pedregosa, se distribuyen en forma dispersa. Las fases químicas, se encuentran con mayor frecuencia en las áreas costeras, con influencia de agua salada así como en terrenos con drenaje deficiente, tal es el caso de las cuencas donde ha ocurrido un proceso de acumulación de sales debido a la alta evapotranspiración.

Algunos suelos con fase salina se localizan en zonas interiores, sin embargo dentro de este tipo de fase se consideran las unidades de *solonchak*, cuya área de distribución corresponde a la zona costera (Figura II.2).

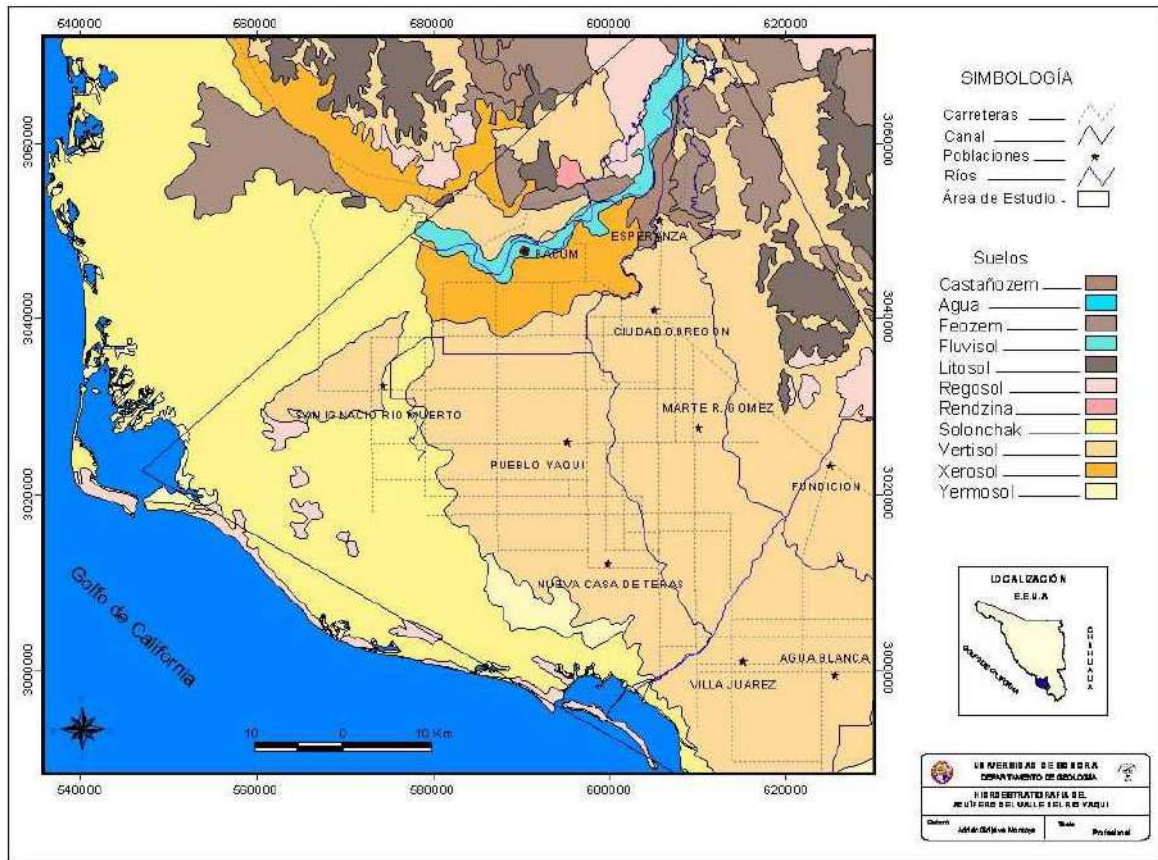


Figura II.2. Edafología del Valle del Río Yaqui. Tomada de Cartas del Consejo de Recursos Minerales, escala 1:250,000.

## II.6 Unidades de Suelo

**Regosoles.** Los regosoles se han formado a partir de rocas ígneas ácidas y básicas, como también de algunas rocas sedimentarias como conglomerado y lutita-arenisca. Algunos otros son de origen residual (*in situ*), es decir, que se encuentran en el mismo sitio que el material del cual se derivan; otros son de origen aluvial, coluvial o eólico; en los cuales el material intemperizado que los constituye ha sido acarreado de otras zonas, por medio del agua, la gravedad y el viento, respectivamente (INEGI 1970).

Estos suelos son muy parecidos a la roca de donde se originan, solo presentan una capa superficial de colores pardo amarillento o pardo rojizo que pertenece al horizonte **a, ocríco** y carecen de estructura. Son muy pobres en materia orgánica, sus texturas van de arena a migajón arenoso y su capacidad de intercambio catiónico total (cict) es baja o muy baja. En general, los distribuidos en la porción noroeste y en la franja costera, son moderadamente alcalinos, los ubicados en la parte central son neutros, y los que se localizan en zonas de mayor humedad son ligeramente ácidos. En el área del Distrito de Riego se encuentran cubiertos de matorral subinermé.

**Yermosoles y Xerosoles.** Estos suelos son característicos de zonas áridas. tienen una capa superficial llamada horizonte **a, ocríco**, de colores claros, pardo rojizo y pardo claro, cuyo porcentaje de materia orgánica es bajo a muy bajo (de 1.2 a 1.5 % para **xerosoles** y de 0.1 a 0.5 % para **yermosoles**). Además en ellos se efectúa un proceso de acumulación de arcilla en las capas sub-superficiales, dando origen a un horizonte b, que cuando el contenido de dicho material es mínimo, es denominado **b, cambico**, pero al incrementarse ese contenido recibe el nombre de **b, argílico**. En algunos casos se encuentran acumulaciones de carbonatos de calcio o cristales de yeso.

En general son moderadamente alcalinos, con pH entre 7.9 y 8.3; pero en suelos que presentan fase salina, sódica o salina/sódica, el pH sube de 8.4 hasta 9.3. Las texturas de estos suelos son de migajones arenosos en la superficie y de migajones arcillosos o arcilla en los horizontes subsuperficiales, por lo que su potencial para absorber iones (cict) va de moderada a alta, siendo mas baja en los **yermosoles**. La saturación de bases es mayor de 50%, predominando el calcio sobre el potasio, su fertilidad es alta cuando se dispone de agua para riego, como sucede en el área cubierta por este estudio. En las zonas que no están dedicadas a esta actividad la vegetación que se desarrolla es de matorral sarcocaulé y mezquital

**Solonchaks.** Estos suelos son de elevada salinidad, se localizan principalmente en la zona costera. Son suelos jóvenes de origen litoral y aluvial que han desarrollado un horizonte **a, ocríco**, el cual sobreyace a un **b, cambico**.

Presentan color pardo o gris con tinte rojizo, su textura va de migajones arenosos a arcillosos. Gran parte del complejo de intercambio se encuentra saturado con sodio, motivo por el cual, son extremadamente alcalinos, con pH hasta de 10.3. Su salinidad varía de moderada a fuertemente salinas, los iones más comunes son cloruros, sulfatos, carbonatos, sodio y fósforo. Sobre ellos se desarrolla vegetación halófila.

**Vertisoles.** Se localizan principalmente en la parte sur del estudio, sobre algunos valles, llanuras y bajadas. Estos suelos se caracterizan por tener un horizonte **a, umbrico**, que posee más de 30% de arcilla, al menos en los primeros 50cm del perfil; dicha arcilla (*montmorilonita*) cuando está húmeda se expande y cuando se seca se contrae, lo que propicia la formación de grietas de 1cm o más de grueso y más de 50cm de profundidad. Este proceso da como resultado la mezcla continua de materiales de las capas superiores con los de las inferiores, lo que impide la formación de otros horizontes.

La textura que presentan es de migajón arcilloso o de arcilla, con estructura masiva y agregados estructurales en forma de cuña, son de colores pardo rojizo y en algunos casos gris rojizo, de ligera a moderadamente alcalinos, y en algunos casos a medida que aumenta la profundidad aumenta el contenido de sales en forma moderada, así como el sodio, pues su potencial de adsorción es alto.

Los contenidos de cationes disponibles de calcio y magnesio son altos, al igual que los de potasio, los cuales son más bajos con la profundidad. La fertilidad natural de estos suelos es alta, pero el elevado contenido de arcilla expansible impone limitantes para su utilización agrícola, ocasionando que tengan un drenaje interno lento y se produzcan encharcamientos si están muy mojados, como también que sean difíciles de manejar por ser extremadamente duros, si están secos. Cuando su manejo es adecuado se obtienen rendimientos altos. Otras áreas con el mismo tipo de suelo sustentan diferentes asociaciones vegetales.

**Fluvisoles.** Están formados de materiales aluviales recientes, que han sido depositados en los lechos de ríos, o bien en las bajadas de las sierras, hacia donde escurre el agua. Los constituyen capas superpuestas de horizontes c y son sueltos o



de estructura laminar, pero algunas veces llegan a desarrollar en la superficie, o cerca de ella, un horizonte **a, ocríco** sumamente permeable y de colores claros. La vegetación que presentan es de matorral, sarcocaulé en los alrededores de la presa Alvaro Obregón y de matorral subinermé, en el resto de las localidades.

**Feozems.** La mayor parte de estos suelos se localizan en valles intermontanos, donde la vegetación aporta mayor cantidad de materia orgánica, proporcionándoles los colores pardo oscuro y gris oscuro del horizonte superficial. Esta subunidad, denominada horizonte **a, molíco**, contiene entre 1.2% y 3.3% de materia orgánica, es rico en nutrientes y de consistencia suelta y esponjosa.

En la superficie, la textura va de migajón arenoso a franca, mientras que en el subsuelo es de migajón arcillo-arenoso, pues como se distribuyen en zonas de mayor humedad el intemperismo de las partículas del suelo es más acelerado y algunas de ellas, como la arcilla, migra de la parte superior hacia la inferior para formar un horizonte **b, argílico**. Estos suelos fluctúan entre moderadamente alcalinos hasta ligeramente ácidos. En general su potencialidad para adsorber cationes es moderada. La cantidad de calcio disponible va de moderada a alta, pero en el caso del **feozem calcaríco**, puede llegar a ser muy alta. El magnesio se encuentra también en cantidades de moderadas a altas y el potasio va de bajas a moderadas.

### **III. FISIOGRAFÍA Y GEOMORFOLOGÍA**

#### **III.1 Fisiografía**

La cuenca del Río Yaqui se encuentra ubicada en tres subprovincias fisiográficas: 1) Subprovincia de la Altiplanicie Lávica Riolítica, 2) Subprovincia de las Sierras Alargadas y 3) Subprovincia de Sierras de Piamonte; correspondiendo las dos primeras a la Provincia de la Sierra Madre Occidental y la última a la de Sierras Sepultadas de Raisz y Humphrey (1964) (modificada por Lugo-Hubp, 1989, 1990).

De acuerdo con la división fisiográfica establecida por Lugo Hubp & Córdova Fernández (1990), el área de estudio se localiza en tres subprovincias: 1) Cadenas montañosas paralelas separadas por cuencas intermontanas, 2) Planicies acumulativas y erosivas con elevaciones montañosas, 3) Valles intermontanos y superficies de piedemonte.

El área de estudio (cuenca baja) se localiza en la Provincia Cadenas Montañosas separadas por cuencas intermontanas y a la Provincia de Planicies acumulativas y erosivas con elevaciones montañosas.

Esta compuesta principalmente por roca sedimentaria, roca ígnea extrusiva e intrusiva de composición variable, rocas metamórficas y roca vulcanosedimentaria, con edades que varían desde el Paleozoico al Reciente. Dentro de esta subprovincia se encuentra la mayor porción de la parte baja de la cuenca que topográficamente llega hasta el nivel del mar. (Figura III.1).

#### **III.2 Geomorfología**

El área de estudio se encuentra ubicada dentro de tres principales Unidades Geomorfológicas de Sonora (Propuesta por Lugo Hubp & Córdova Fernández, 1990), en mayor proporción pertenece: 1) Planicies acumulativas y erosivas con elevaciones montañosas de rocas volcánicas, sedimentarias y metamórficas, 2) Cadenas

montañosas esencialmente volcánicas terciarias, paralelas, separadas por cuencas intermontanas, 3) Valles intermontanos y superficies de piedemonte.

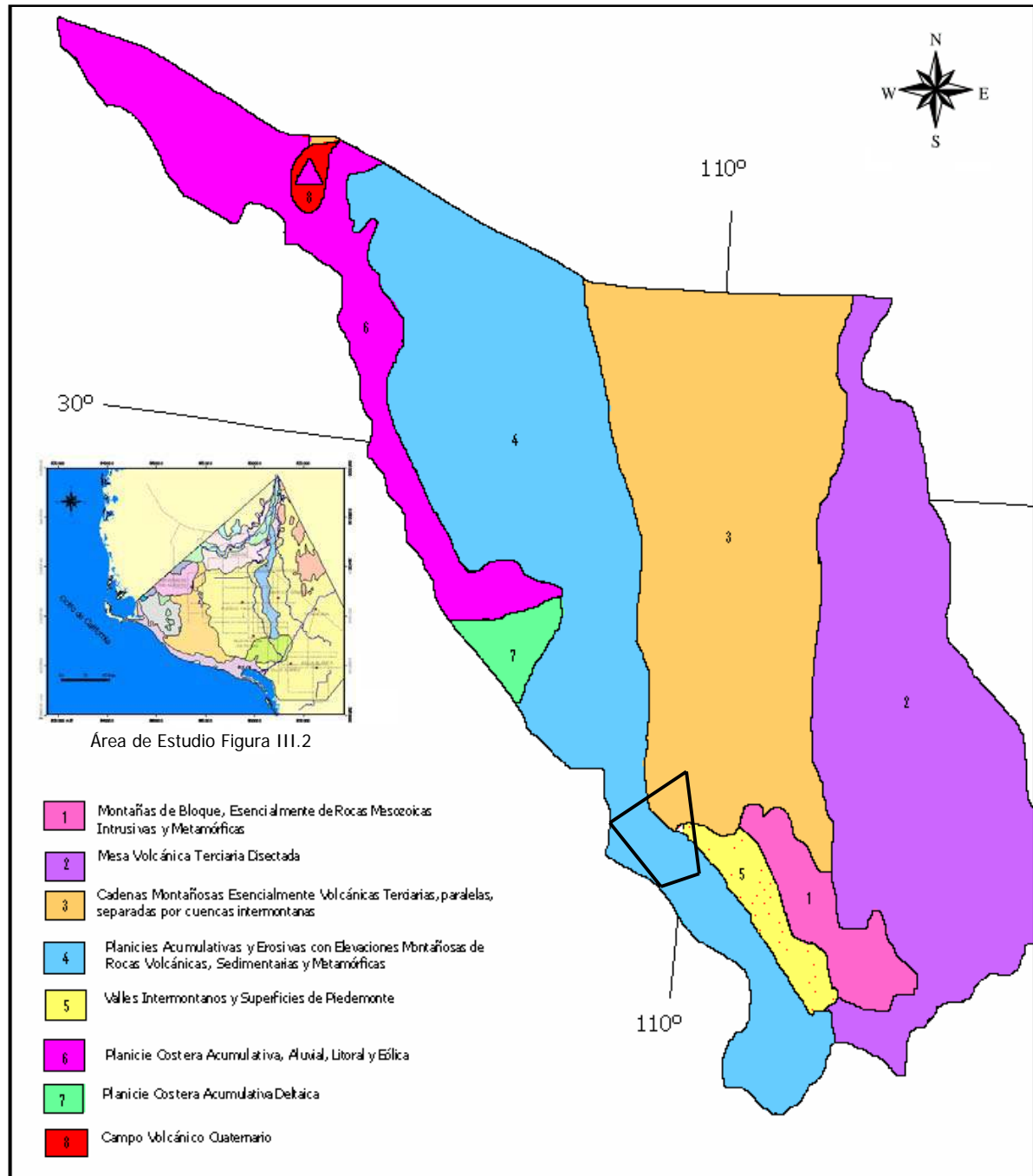


Figura III.1. Provincias Fisiográficas del Norte de Sonora. Modificado de Lugo Hubp & Córdova Fernández (1990).

En 2003, Monreal y otros proponen la Geomorfología del Valle del Río Yaqui donde se propone un paleocauce y un paleodelta, como resultado de las reinterpretaciones de la geología del subsuelo y de la geofísica (gravimetría y resistividad). En el área de estudio se observan 14 unidades geomorfológicas: al Sur de la Ciudad de Obregón se encuentra la Planicie costera interdeltáica de Pueblo Yaqui a Villa Juárez. En la parte de Bacum y Esperanza, se encuentra el Cauce Fluvial y la planicie Deltáica. En San Ignacio Río Muerto se observa la parte del Cauce Fluvial Modificado, al Sur la Planicie Deltáica Marginal y Barras Arenosas (Figura III. 2)

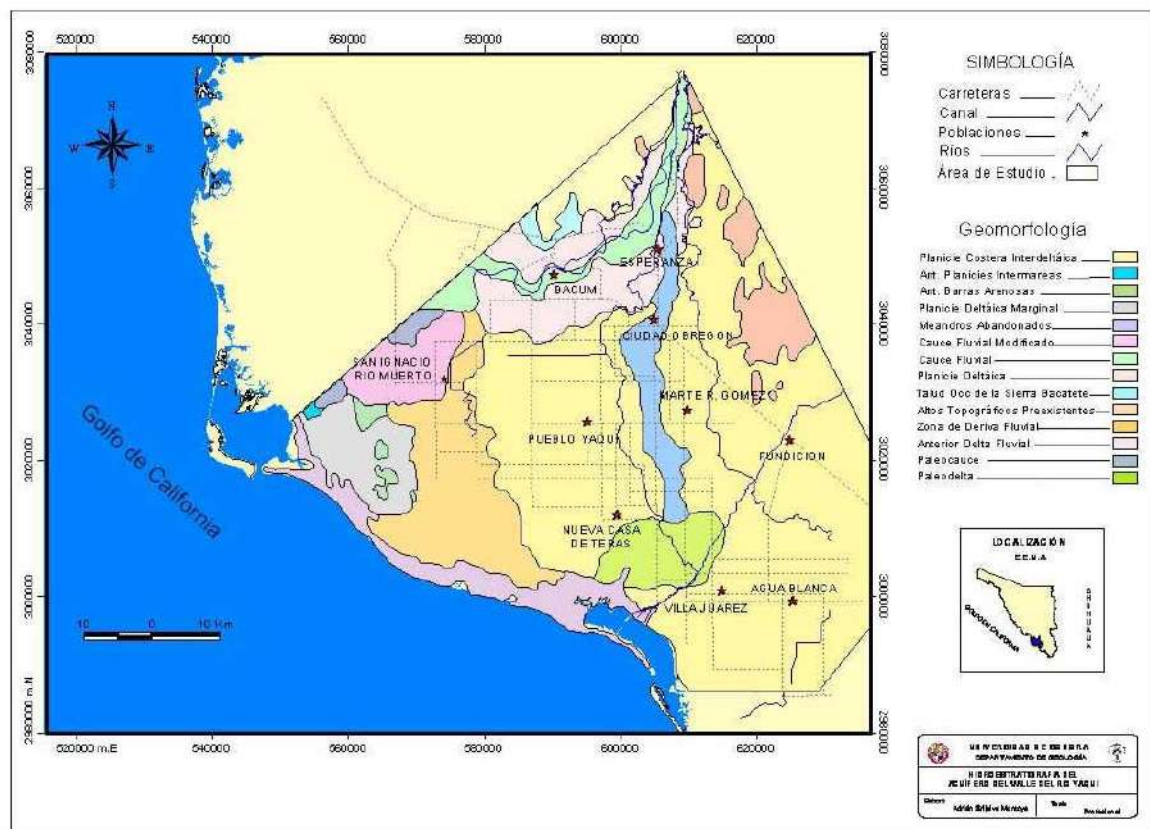


Figura III.2 Geomorfología del Valle del Río Yaqui. Tomado de Gutiérrez (2004).

## **IV. GEOLOGÍA**

### **IV.1 Geología Superficial y Tectónica**

Según Monreal y Otros (2003), las unidades de roca que afloran en el área de estudio, son: del Cretácico Superior granito-granodiorita; del Oligoceno-Mioceno, toba e ignimbrita; del Mioceno, conglomerado, roca volcanoclástica y basalto; del Terciario Indiferenciado, roca volcánica; del Cuaternario-Pleistoceno, conglomerado y arenisca; y del Reciente grava, arena y arcilla (Figura IV.1).

La parte topográficamente más alta de la cuenca del Río Yaqui alcanza 3,200 m.s.n.m., en la Sierra Madre Occidental donde nacen los principales escurrimientos, allí predominan rocas volcánicas extrusivas de composición ácida a intermedia, generalmente ignimbrita, solo existen pequeñas áreas muy localizadas de basalto hacia el límite con los Estados Unidos (Monreal y Otros, 2003). En la parte media de la cuenca, las principales elevaciones están constituidas por mármol y caliza silicificada y roca intrusiva granítica de edad cretácica. En esta parte de la cuenca existen fosas tectónicas, cuyos límites con los otros elementos presentan contrastes topográficamente notables; tal es el caso de la falla El Novillo, que constituye el límite septentrional de la fosa de ese nombre, y que en la parte noroeste de la región delimita un quiebre topográfico que separa relieves de menos de 500 m.s.n.m. de otros que llegan a superar los 1,700 m.s.n.m.

En su recorrido, el río Yaqui corre a través de varios elementos tectónicos, cortando macizos rocosos homogéneos o corriendo a lo largo de discontinuidades o fallas; únicamente en un 45% de su desarrollo corre a través de las fosas tectónicas, lo que quiere decir que la orogenia que dio origen a las fosas antes citadas tuvo lugar antes de que se llevara a cabo el desarrollo del río. Los mayores gradientes del río se observan dentro de las fosas tectónicas, que es donde se localizan los "rápidos", lo que confirma que el cauce del río dentro de estos elementos es más joven que en el resto de su desarrollo (Monreal y Otros, 2003).



## IV.2 Geología del Subsuelo

De acuerdo a los cortes litológicos de pozos se identificó que, la litología del subsuelo del Valle del Río Yaqui consta de diferentes niveles de estratos de: grava y arena (permeabilidad alta), arena fina (permeabilidad mediana), arena arcillosa, limo y arcilla (permeabilidad baja) y arcilla (permeabilidad nula).

La interpretación de las secciones litológicas de pozos del Valle del Río Yaqui se basó en datos geológicos y geofísicos, se observaron columnas de pozos que estaban compuestas en general por grava, arena, arena arcillosa, y arcilla, que en base a los ambientes sedimentarios propuestos por R.C. Selley (1970), corresponden ambientes sedimentarios fluviales (Figura. IV.2).

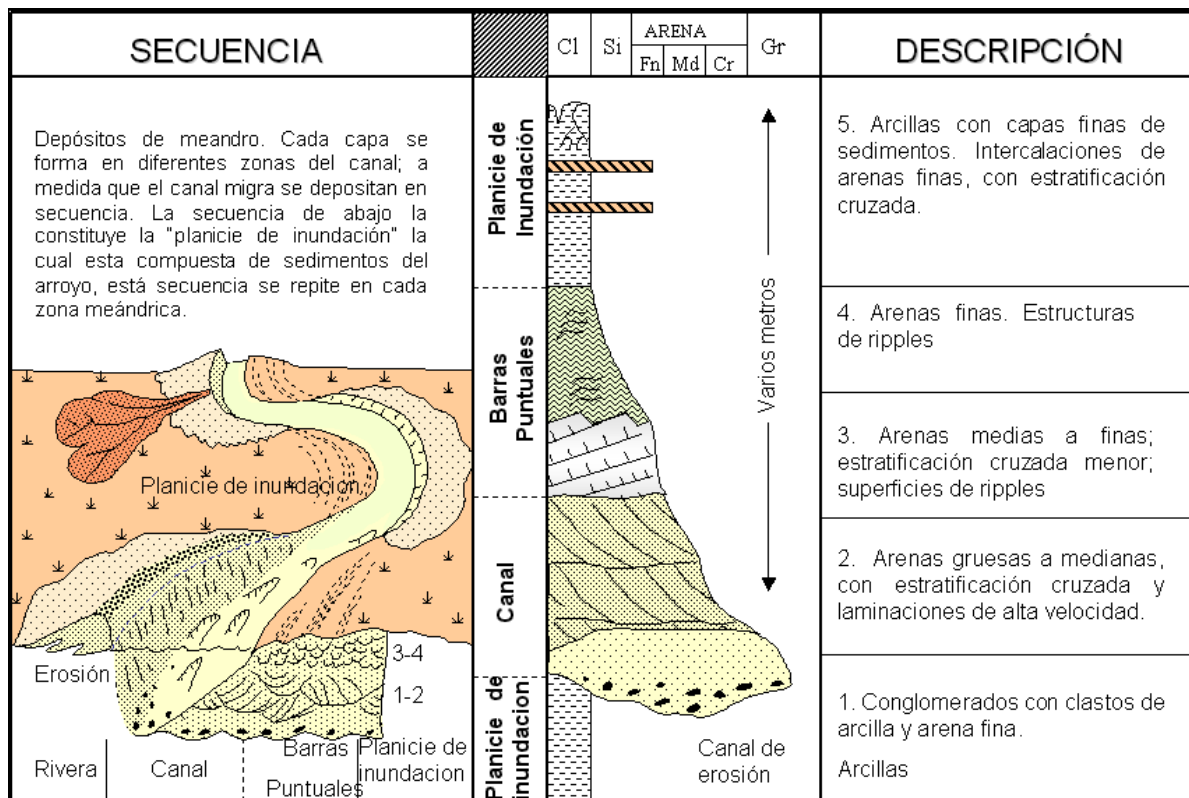


Figura IV.2. Columna estratigráfica de un río del tipo meándrico. Modificado de R.C. Selley (1970).

Monreal y otros (2003), en el estudio geohidrológico del Valle del Río Yaqui utilizaron dos métodos geofísicos: 1) el método eléctrico de resistividad, que permite definir las características geoeléctricas de los materiales del subsuelo, con lo cual podemos interpretar sus probables condiciones geohidrológicas; y 2) la gravimetría, método mediante el cual se define, con alto grado de certeza, la configuración o profundidad del basamento, y con ello, el espesor del relleno sedimentario, aportando las siguientes observaciones.

### **Resistividad**

La distribución del comportamiento de la resistividad a diferentes profundidades muestra una distribución completamente heterogénea para los materiales que albergan al sistema acuífero. Para las diferentes profundidades se observan amplias zonas con valores inferiores a los 5 ohm-m, típico de materiales arcillosos o bien, saturados con agua de mala calidad lo cual restringe fuertemente las zonas favorables para nuevas perforaciones. Para profundidades someras (100m), las zonas más favorables se localizan a lo largo de la planicie fluvial del río Yaqui y del arroyo Cocoraque

### **Gravimetría**

Del análisis de la información obtenida por el método gravimétrico se deduce lo siguiente, (Figura IV.3): El subsuelo del Valle del Río Yaqui está conformado por una gran fosa tectónica (fosa Obregón) orientada Norte-Sur. El arroyo Cocoraque representa una fosa tectónica que pierde continuidad hacia el suroeste y solo en los niveles freáticos someros se conecta con la fosa Obregón. El delta del Río Yaqui se localiza, como puede observarse en la Figura IV.3 en territorio de la Tribu Yaqui y su influencia hacia el sur está prácticamente ausente. Los espesores de los materiales de relleno superan los 1000 metros, pero el espesor del acuífero es del orden de los 200 a 300 metros.



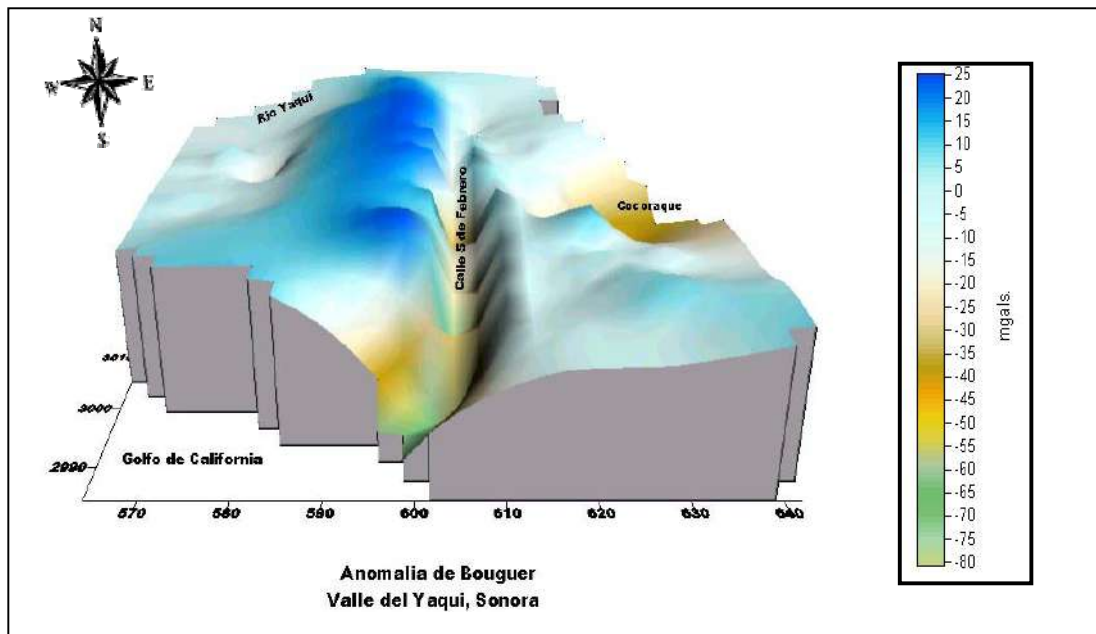


Figura IV.3. Bloque tridimensional de anomalías de bouguer del Valle del Río Yaqui. Tomado de Monreal y Otros (2003).

De la Figura IV.3 y de la información de la gravimetría, se observan 3 fosas tectónicas en el basamento, una por debajo del Arroyo Cocoraque, otra por donde pasa el cauce actual del Río Yaqui, y una tercera fosa tectónica orientada casi Norte-Sur (fosa Obregón), por la calle 5 de Febrero, que al igual que el Río Yaqui y el Arroyo Cocoraque, están dentro de una fosa tectónica. La fosa Obregón podría corresponder a un fallamiento importante en el basamento con reactivaciones posteriores que afectaron al relleno sedimentario. Como se verá mas adelante, en el apartado de “Hidrogeología”, algunas de estas fallas se evidencian en el relleno sedimentario.

De los trabajos de resistividad, se puede tener una idea de los tipos de rocas o sedimentos del subsuelo, y de sus condiciones, ya sea que las rocas o sedimentos se encuentren secos o con agua, de buena o mala calidad.

Si se observa el mapa de resistividad a 250 metros de profundidad (Figura IV.4), los colores amarillos de 120 ohms\*m, según la resistividad (Burger, 1992), indican grava y arena, y al ser estas mas resistivas, pueden indicar lugares para contener agua de mejor calidad y/o de mas fácil extracción, en los colores verdes se tienen resistencias de 100 a 50 ohms\*m, que nos indican arena y arena arcillosa, los colores azules de 20 a 5 ohms\*m son indicativos de arcilla, y por lo tanto indican lugares con agua de mas mala calidad y/o mas difícil extracción.

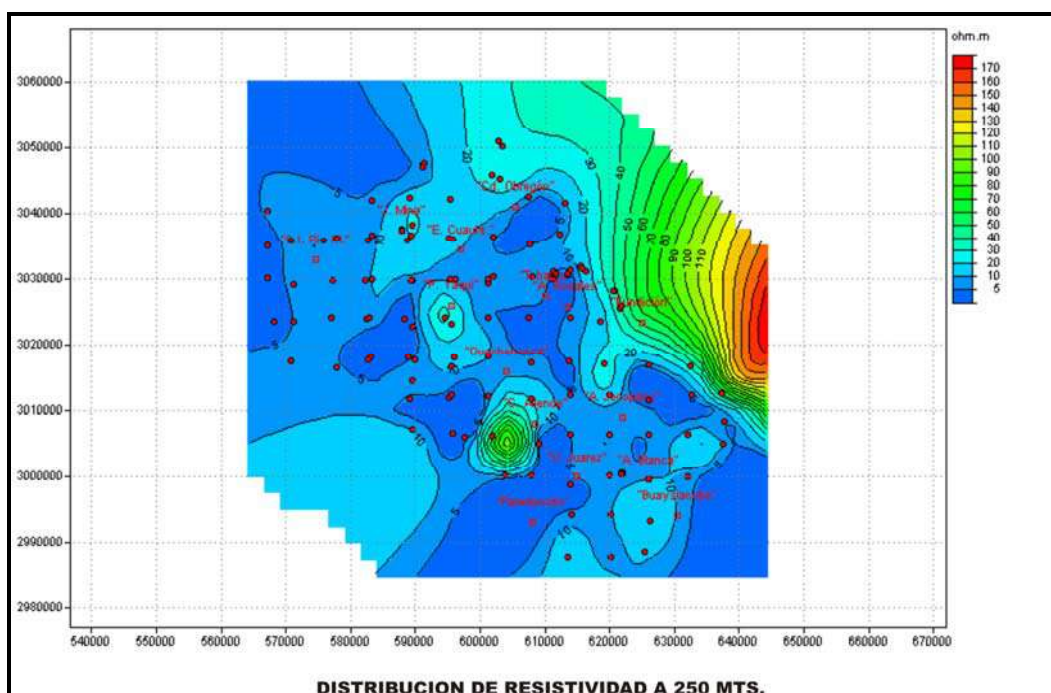


Figura IV.4. Distribución de resistividad a 250 m de profundidad. Tomado de Monreal y Otros (2003).

## V. HIDROGEOLOGÍA

### V.1 Tipo de Acuífero

El área de estudio se encuentra dentro de la cuenca baja del Río Yaqui, formando parte de la compleja distribución de las planicies fluvio-aluvial y deltáica del río, elementos hidrogeomorfológicos que han definido la amplia variedad de características hidrogeológicas del área de estudio. Dentro de estas áreas están incluidos los acuíferos denominados Valle del Río Yaqui y una porción del acuífero denominado Villa Juárez “Cocoraque”, de acuerdo con los límites de acuíferos establecidos por la Comisión Nacional del Agua. La mayor superficie del Distrito de Riego del Río Yaqui y la actividad agrícola principal se encuentran dentro del *Sistema Acuífero Río Yaqui*. Según Monreal y Otros (2003), en el área de estudio existe un sistema compuesto por dos acuíferos; uno de tipo libre (freático) en la zona próxima a la superficie, denominado acuífero superior y por debajo de este, un acuífero regional, de amplia extensión y de espesor y composición variable, por lo tanto, su tipo varía de libre, semiconfinado a confinado. Ambos acuíferos, constituyen un sistema hidráulicamente interdependiente (Figura V.1).

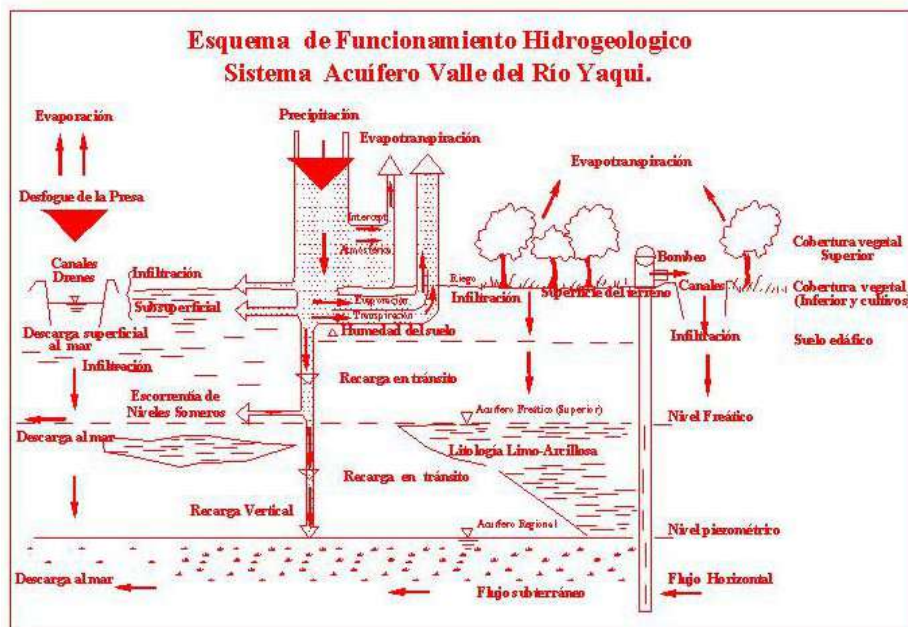


Figura V.1. Esquema de funcionamiento hidrodinámico del Acuífero de Valle del Río Yaqui. Tomado de Monreal y Otros (2003).

## V.2 Importancia de la Zona Vadosa

La zona vadosa que cubre al acuífero superior varía en espesores, tiene un carácter generalmente antropogénico moderno, alterado por la agricultura y responde hidráulicamente como medio anisotrópico. Su conocimiento es importante para entender el mecanismo de recarga por infiltración vertical y la vulnerabilidad a la contaminación del nivel freático. En el área existen 4 tipos generales de suelos, siendo las arcillas las más ampliamente distribuidas (Figura V.2)

Se han reportado velocidades de infiltración del orden de 0.123 m/año (Verduzco, 2002). Esto significa que a una recarga local desde los canales o drenes, o bien del retorno de riego le podría tomar varios meses o años atravesar la zona vadosa para alcanzar un nivel freático somero de entre 2 y 7 metros de profundidad. Condición que se refleja en la freaticimetría del acuífero contra los ciclos estacionales.

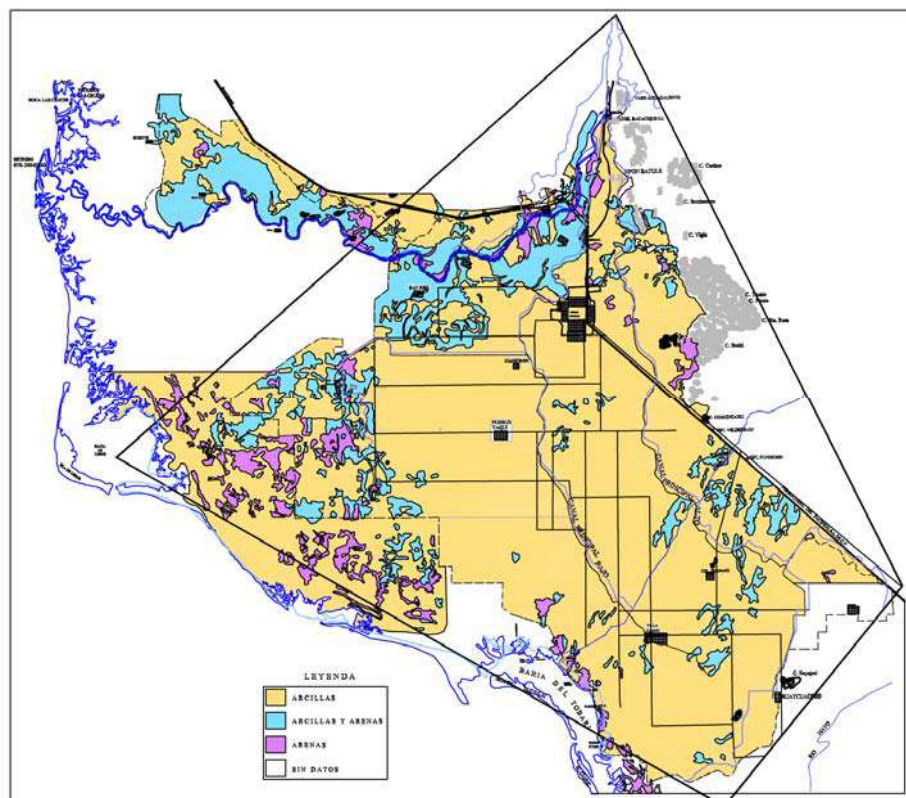


Figura V.2. Tipos de suelos existentes en el Valle del Río Yaqui.  
Tomado de Monreal y Otros (2003).

### **V.3 Acuífero Superior**

Dado que el nivel freático del acuífero superior es muy somero, esto lo hace altamente vulnerable en zonas específicas, puesto que en este tipo de acuíferos se pueden presentar fenómenos de ascensión capilar del agua a la zona de aireación por una evaporación activa proveniente del suelo, de aquí su salinización. Sin embargo, el acuífero no se extiende en todo el valle, se presenta sólo por áreas de diversos tamaños, dado que fue originado en forma de relleno sedimentario de zonas topográficamente bajas, por lo que presenta múltiples acuñamientos, de aquí la variedad de sus sedimentos tanto en espesores como en textura y la amplia variación en permeabilidad vertical y horizontal (Monreal y Otros, 2003).

Este acuífero yace sobre estratos arcillosos a limo-arcillosos no consolidados de baja permeabilidad, de espesor variable con múltiples acuñamientos a través de los cuales el tránsito de la recarga vertical fluye lentamente mientras se infiltra, ya sea desde el acuífero superior, directamente de las superficies de riego, de los canales, de los drenes no revestidos o bien, el agua puede quedar atrapada por largos periodos de tiempo a diferentes profundidades.

### **V.4 Acuífero Regional**

El acuífero regional se encuentra en todo el valle, generalmente debajo del estrato descrito, pero puede encontrarse también como libre. De aquí que en general se le ha considerado como de tipo semiconfinado, puesto que en algunas localidades los estratos arcillosos actúan como estratos impermeables. Los espesores del acuífero son muy variables, el espesor máximo observado en los perfiles de pozos es de 250m, sin embargo en ellos no se muestra que el basamento se encuentra al final del pozo. No obstante, con los estudios geofísicos realizados, así como con la descripción de perfiles de múltiples pozos del Distrito, se definió su geometría permitiendo reconocer su textura y un espesor promedio de 300m (Monreal y otros, 2003).

La textura y estructura de los materiales que constituyen el acuífero regional varían también lateralmente, lo cual se refleja en los valores de transmisividad. La variedad de valores de parámetros hidráulicos lo ubican como libre, semiconfinado y confinado, dependiendo del sitio donde se haya realizado la prueba de bombeo.

## V.5 Piezometría Histórica

De acuerdo a Monreal y otros (2003), para el año de 1968 se tenía la información del nivel estático de 138 pozos monitores, los cuales promediaban 19.71 metros de profundidad al nivel estático. Para el año 2001 ya se tenían datos piezométricos de 297 pozos que promedian 13.64 metros de profundidad al nivel estático. Los números de pozos anteriores no eran el total existente para esos años, ya que para los primeros años estaban registrados aproximadamente 500 pozos y para el 2001 se tiene registro de 750 pozos; sin embargo, no se dispone de medidas del nivel estático para todos los pozos.

El año con el mayor promedio de profundidad del nivel estático corresponde al año de 1968. El año con el promedio menor es 1978 con una profundidad promedio al nivel de 7 metros, obtenido de una muestra de 297 pozos. Finalmente se tienen 7,356 lecturas de niveles estáticos con un total de 750 pozos (1968 a 2001), los cuales promedian en general 13.04 metros de profundidad al nivel estático.

El plano de elevación del nivel estático para 1996 (Figura V.3.) muestra, que en la línea de costa las elevaciones son más someras y oscilan entre 0 y 5m., y se encuentran en una franja paralela a línea de costa de 11 a 14 km de amplitud, mientras que hacia la porción suroeste tiende a disminuir, principalmente para la zona del Arroyo Cocoraque. Para la porción noroeste el área que cubre esta superficie es amplia, alrededor de 13 km, en este lugar los aprovechamientos que se están explotando son mínimos o bien no se extrae agua (Monreal y Otros, 2003).

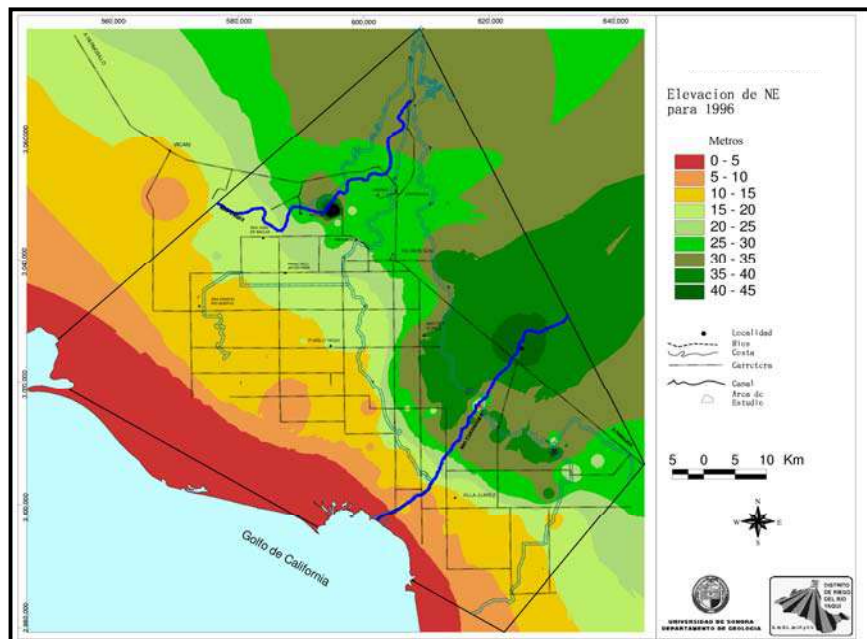
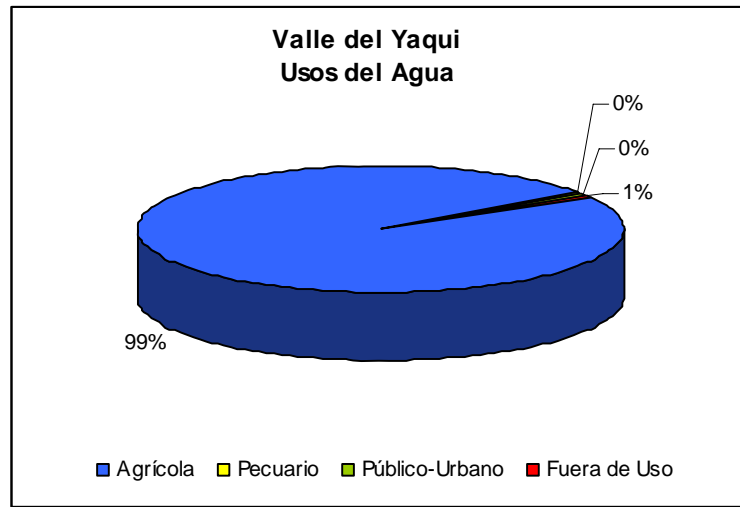


Figura V.3. Elevación del Nivel Estático para el Año 1996 en el Sistema Acuífero del Valle del Río Yaqui. Tomado de Monreal y Otros (2003).

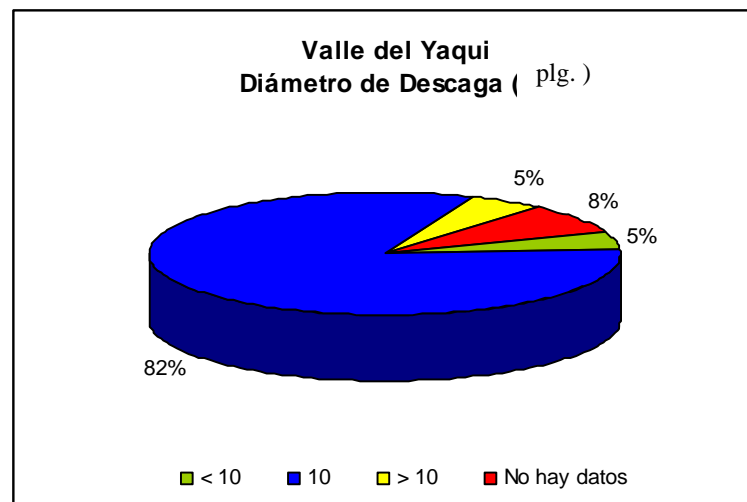
## V.6. PIEZOMETRÍA ACTUAL

Los aprovechamientos de agua subterránea en el Valle del Yaqui, se tienen registrados un total de 1526 aprovechamientos subterráneos de acuerdo al REPDA año 2003, de los cuales tienen diversos usos, de ellos un 44% se destina para público urbano, seguido por la agricultura con un 22%, y en menor proporción el industrial con un 2%, el resto del porcentaje es para distintos fines. En contraste con los datos obtenidos en el censo (Minjarez y Otros 2004), donde tenemos que el 99% del agua se destina para uso agrícola y el resto esta fuera de uso, los usos público urbano y pecuario son mínimos como se muestra en la Gráfica V.1.



Gráfica V.1 Uso principal del Agua. Tomado de Minjarez y otros (2004).

El diámetro de descarga de los aprovechamientos, en su mayoría esta representado por tuberías de 10plg. en un 82%, siendo este el diámetro predominante en el Valle. Los diámetros menores y mayores a 10plg. aparecen con un 5% respectivamente. El 8% restante no tiene datos (Gráfica V.2). En comparación con los datos del REPDA, donde el diámetro de descarga predominante esta representado por tuberías menores a 3 plg. en un 35%.



Gráfica V.2 Diámetro de Descarga (plg.). Tomado de Minjarez y otros (2004).



En los meses de enero y octubre del 2005 se realizó la actualización del censo de captaciones de aguas subterráneas en el Valle del Yaqui (Figura V.4) del Distrito de Riego del Valle del Yaqui, con base en las disposiciones y procedimientos que maneja la Comisión Nacional del Agua. Esto consistió en visitar cada uno de los pozos para actualizar los datos relativos como: tipo de obra, volumen de agua extraída anualmente, nombre del predio, nombre del propietario, uso al que se destina el agua extraída, profundidad del nivel del agua del pozo, incremento o disminución en la profundidad del pozo y georeferenciación mediante un posicionador GPS.

La situación de obra de los Pozos, el total de aprovechamientos censados, 124 están en proceso de equipamiento, ya que son de reciente construcción (2004 por el DRRY); 3 están inactivos, es decir sin equipo, posiblemente fueron relocalizados o abandonados por la mala calidad del agua. Los aprovechamientos están a cargo de Distrito de Riego del Valle del Río Yaqui en sus distintos módulos. Los pozos están distribuidos a lo largo del Valle, predominando en los márgenes tanto del Canal Alto como del Canal Bajo.

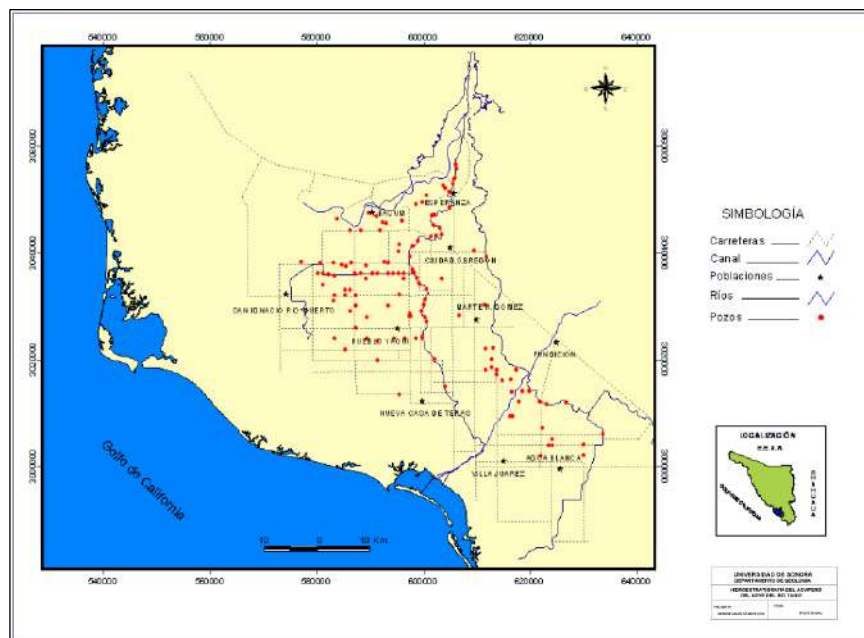


Figura V.4 Localización de los aprovechamientos censados durante el 2005.

Tomado de Cirett Galan 2006.

## VI. MODELO CONCEPTUAL HIDROGEOLÓGICO

El modelo conceptual es una simplificación esquemática de la naturaleza, en la que se intenta representar las condiciones hidrogeológicas reales en la cuenca y que hacen del modelo conceptual de funcionamiento del sistema, un modelo más acorde a la realidad. El modelo conceptual del Valle del Río Yaqui se plantea a partir del análisis conjunto de la información geológica, hidrogeológica (hidroestratigráfica) y geofísica, todos ellos parámetros indicadores del comportamiento del flujo y la hidráulica de pozos, fundamentales para que el modelo resultante sea congruente con la pretendida simulación de la naturaleza. El modelo conceptual es por lo tanto un paso importante durante el desarrollo e implementación de esquemas de planeación y aprovechamiento óptimo de recursos hídricos subterráneos (Monreal y otros, 2003).

Para la integración del modelo conceptual del acuífero del Valle del Río Yaqui, se consideraron los siguientes elementos: Morfoestructura, Hidrogeología e Hidroestratigrafía.

### VI.1 Condiciones de Frontera

**Frontera Horizontal.** Al noroeste se encuentra el basamento de rocas extrusivas a profundidades someras, porciones de frontera con cargas nulas o impermeables. Al suroeste el mar del Golfo de California, que actúa como un nivel de carga constante. Al norte como entradas al acuífero la alimentación de la cuenca del Río Yaqui que se definen como niveles de carga variable, al noreste el flujo de ladera y el proveniente del Arroyo Cocoraque. Al este y sureste el basamento de rocas extrusivas a profundidades someras, porciones de frontera con carga nulas o impermeables (Monreal y Otros, 2003).

**Frontera Vertical.** Sedimentos arcillo-limosos marinos de probable edad miocénica, interestratificados con sedimentos lacustres con espesor promedio de 400m a más de 3000m, este es el substratum del acuífero. Tienen baja permeabilidad

y distribución lenticular variable, predominan en la zona de planicie costera interdeltáica (Monreal y Otros, 2003). Acuífero regional granular, es un sistema multicapa, con espesor promedio de 300 m, predominante de tipo semiconfinado a libre y confinamientos locales (Monreal y Otros, 2003).

**Entradas.** Se considera como entradas: (1) la recarga horizontal al acuífero que consiste de  $121.2 \text{ Hm}^3/\text{año}$ ; la recarga natural que se distribuye del noroeste con el denominado flujo Bacatete en  $13.38 \text{ Hm}^3/\text{año}$ ; al noreste el flujo Río Yaqui con  $72.5 \text{ Hm}^3/\text{año}$ ; por el noreste el flujo Bachoco con  $26.6 \text{ Hm}^3/\text{año}$  y del arroyo Cocoraque al sureste, el Flujo Cocoraque consistente de  $8.72 \text{ Hm}^3/\text{año}$ . (2) La recarga vertical natural histórica de  $646.7 \text{ Hm}^3/\text{año}$  (1969-2001); por concepto de lluvia la precipitación efectiva resulta negativa en el balance hidrometeorológico con  $28.66 \text{ Hm}^3/\text{año}$  y la recarga por ladera de montaña en  $19.8 \text{ Hm}^3/\text{año}$  y, (3) La recarga inducida por el sistema hidroagrícola y los retornos de riego, que es la más significativa, dada la eficiencia media del riego de 64.5%, que genera niveles freáticos someros menores a 5m de profundidad y potenciométricos altos en zonas permeables, donde igualmente son influidos por el bombeo de pozos en las áreas próximas a canales (Monreal y Otros, 2003).

**Salidas.** La descarga horizontal natural al mar consiste de  $40 \text{ Hm}^3/\text{año}$ , mientras que la evaporación y evapotranspiración alcanza los  $954.18 \text{ Hm}^3/\text{año}$  (período 1969-2001) (Monreal y Otros, 2003).

## VI.2 Morfoestructura

La morfoestructura del basamento, sistema acuífero Valle del Río Yaqui está constituida por una gran fosa tectónica (Fosa Obregón) orientada Norte–Sur, mientras que el arroyo Cocoraque se encuentra en otra fosa tectónica que pierde cierta continuidad en profundidad hacia el suroeste, ya que solamente con niveles freáticos someros se conecta con la Fosa Obregón (Figura IV.2). Los sedimentos rellenan elementos geomorfotectónicos propios de una zona marginal tectónicamente activa,

posiblemente relacionada con la apertura del Golfo de California durante el Terciario superior, su espesor varía desde pocos metros hasta más de mil metros en las zonas costeras marginales.

La zona que compone el Valle del Río Yaqui, se encuentra asentada en áreas marginales del delta del río Yaqui, el cual se localiza en territorio de la Tribu Yaqui, donde existe la mejor granulometría de origen continental, pero al sur, donde se asienta el Valle del Río Yaqui, su influencia está prácticamente ausente.

### VI.3 Hidrogeología

El sistema acuífero se divide en dos: Acuífero Superior que comprende dos unidades estratigráficas (1 y 2) y Acuífero Regional, constituido por tres unidades (3, 4 y 5). El acuífero superior formado por relleno reciente con niveles freáticos someros, de baja transmisividad, limitado lateral y verticalmente, que no cubre totalmente a un acuífero regional y que a su vez no es homogéneo (Figura VI.1).

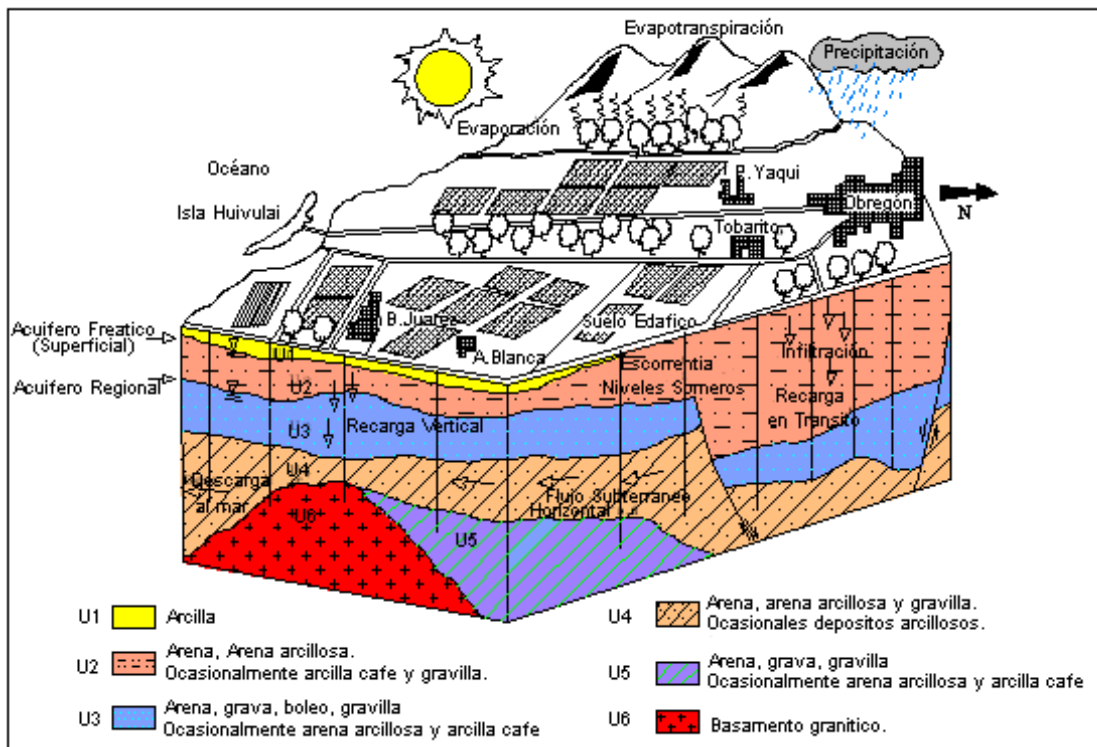


Figura VI.1. Bloque Tridimensional del Acuífero del Valle del Río Yaqui.

Este acuífero superior está formado por sedimentos cuaternarios de granulometría media a fina que alterna con abundantes lentes de arcilla o zonas de baja permeabilidad, y que proporcionan una abundante mezcla de niveles piezométricos. Por debajo de estos sedimentos y a veces intercalados, se encuentra el Acuífero Regional, constituido por material sedimentario semi-consolidado del Terciario-Mioceno, de muy baja permeabilidad y que contienen agua salobre y/o salina.

## VII. HIDROESTRATIGRAFIA

### VII.1 Unidades Hidroestratigraficas

Las unidades hidroestratigraficas definen, las características de la depresión, el relleno y los límites espaciales de las zonas acuíferas en dos sentidos; laterales y verticales. Estas unidades han sido propuestas en base a datos de litología y correlaciones litológicas de pozos, estudios previos y de estudios geológico-geofísicos existentes y los realizados para el presente estudio. Con esta información se identificó la existencia de las 5 unidades hidroestratigrafica antes mencionadas descansando sobre un basamento cristalino.

**Unidad 1.** Esta unidad comprende las capas superiores de sedimentos que cubren el Valle del Río Yaqui, consistente principalmente de arcilla de color café, de baja permeabilidad. Sus profundidades varían de 1 a 20 m.

**Unidad 2.** Esta unidad hidroestratigrafica, es netamente fluvio-aluvial. y esta constituida principalmente por sedimentos no consolidados: arena, arena arcillosa, y ocasionalmente arcilla café y gravilla. La arena varía de grano fino a medio y está conformada por granos de cuarzo, fragmentos de roca, muscovita y biotita. Esta unidad inicia prácticamente desde la superficie o desde los 3 m hasta 195 m de profundidad, con espesores que varían de 20 a 200 m.

**Unidad 3.** Paquete de sedimentos formado por complejos fluviales de la derivación del Río Yaqui, constituido principalmente por arena, grava, boleo, gravilla, y ocasionalmente por arena arcillosa y arcilla café. La arena varía de grano fino a medio y grueso y está conformada por granos de cuarzo, fragmentos de roca, moscovita y biotita. Los materiales de relleno varían de profundidad de 20 m hasta 230 m, con espesores de 20 m a 180 m. La geometría del medio granular muestra un sistema compuesto por horizontes de sedimentos detríticos de espesores variables que constituyen acuíferos libres, semiconfinados y confinados. La fuerte presencia

local de interestratos semi-confinantes puede restringir el movimiento lateral y vertical del flujo subterráneo disminuyendo su velocidad.

**Unidad 4.** Unidad constituida principalmente de sedimentos no consolidados característicos de depósitos fluvio-aluviales, consistentes de arena, arena arcillosa y gravilla y ocasionales depósitos arcillosos, originados en lagunas costeras aisladas, evidenciados por paquetes de espesores considerables de arcilla (60m en el pozo P99 y 140 m en el pozo P97). La parte mas somera de esta unidad se encuentra a 80 m (pozo P104) y la parte más profunda a 250m (pozo P94R), y su espesor varia de 15 a 150m.

**Unidad 5.** Unidad no consolidada y constituida principalmente por arena, grava, gravilla, ocasionalmente por arena arcillosa, y arcilla café. Corresponde posiblemente a sedimentos característicos de ambientes fluviales; desde sedimentos aluviales, depositados en las laderas de antiguos cerros y sedimentos fluviales depositados por paleocanales. Esta unidad varia en profundidad; el nivel mas somero se encuentra a 115m (P102) y la máxima profundidad a 260m (P93), su espesor varía de 50 a 150m.

**Unidad 6.** Esta unidad se considera el basamento y en esta cuenca corresponde a rocas graníticas y volcánicas (riolita) que se encuentra, a diferentes profundidades: a 100 m (P104), 164 m (P129), 180 m (P 138), y 240 m (P104 RR). Este basamento posiblemente corresponda a las unidades de roca descritas en la geología superficial (Figura IV.1)

## VII.2 Correlaciones Hidrostratigráficas

En el area de estudio se ubicaron 7 secciones hidrostratigraficas, 3 paralelas a la costa, con una orientación NW-SE, aproximadamente de unos 60 km. y 4 secciones perpendiculares a la costa, con una orientación SW-NE con diferentes longitudes de 16 a 28 km (Figura VI.2).

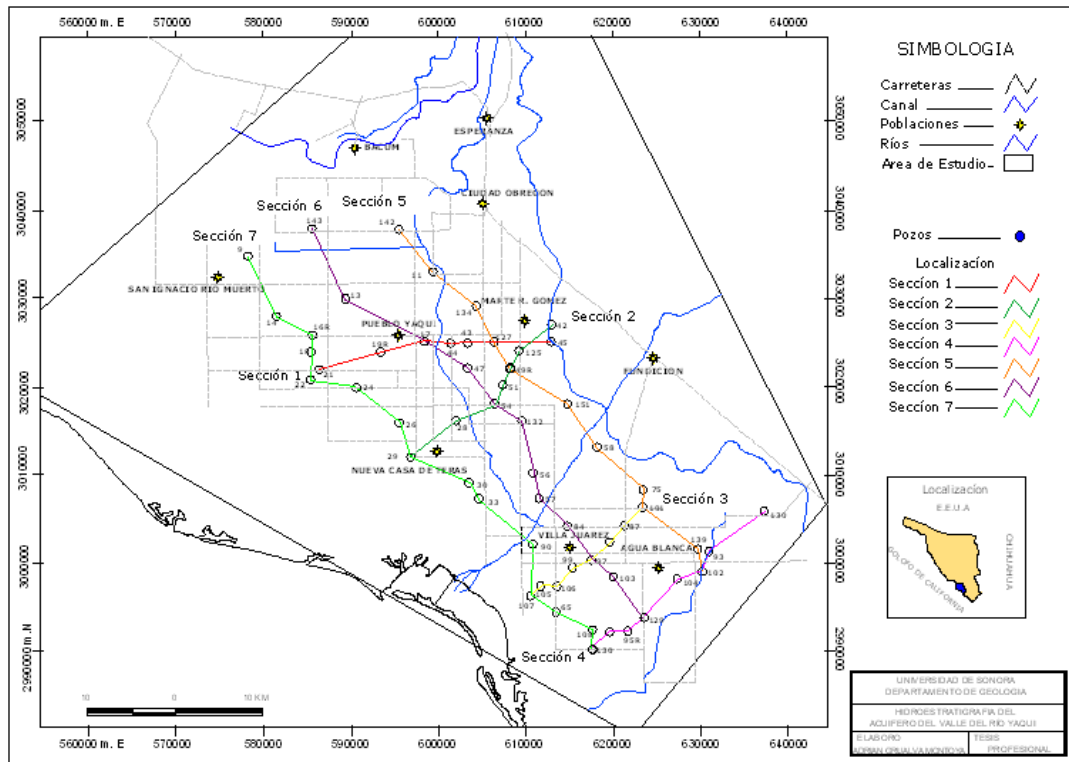


Figura VI.2. Localización de Secciones Estratigráficas en el Área del Valle del Río Yaqui.

**SECCION 1.** Esta sección, esta constituida por 10 pozos, distribuidos en una longitud de aproximadamente de 28 km. con una orientación W-E; esta compuesta por 3 unidades hidroestratigraficas (Figura VI.3). En general la **unidad 2** en esta sección tiene espesores que van de 10m (P21) a 45m (P43) y hasta 150m (P127) y 190m (P125). En el pozo 22R en la **Unidad 2** se observa una variación en su litología, ya que se encuentran capas de grava con un espesor de 12 m. al igual que en el pozo (P17) y (P44). Esta variación en litología, es posiblemente debido a la migración del antiguo cauce del río Yaqui. En la **Unidad 3** en los pozos P22R y P17 se encuentra una grava con espesor de 27m y 32m, respectivamente. Mientras que en el pozo P45 se encuentra un paquete de arena arcillosa con un espesor de 35m. En general la unidad 3 tiene espesores de 180m (P22), 167m (P43), 100m (P127) y 40m (P45).



La diferencia de espesores en la unidad 2 indica la presencia de una falla que tiene una orientación norte-sur, que pasa entre los pozos P43 y P127, denominada Fosa Obregón (Monreal y Otros, 2003) que produjo que el bloque del lado este de dicha falla cayera produciéndose un profundo graben que fue rellenado por la unidad 2.

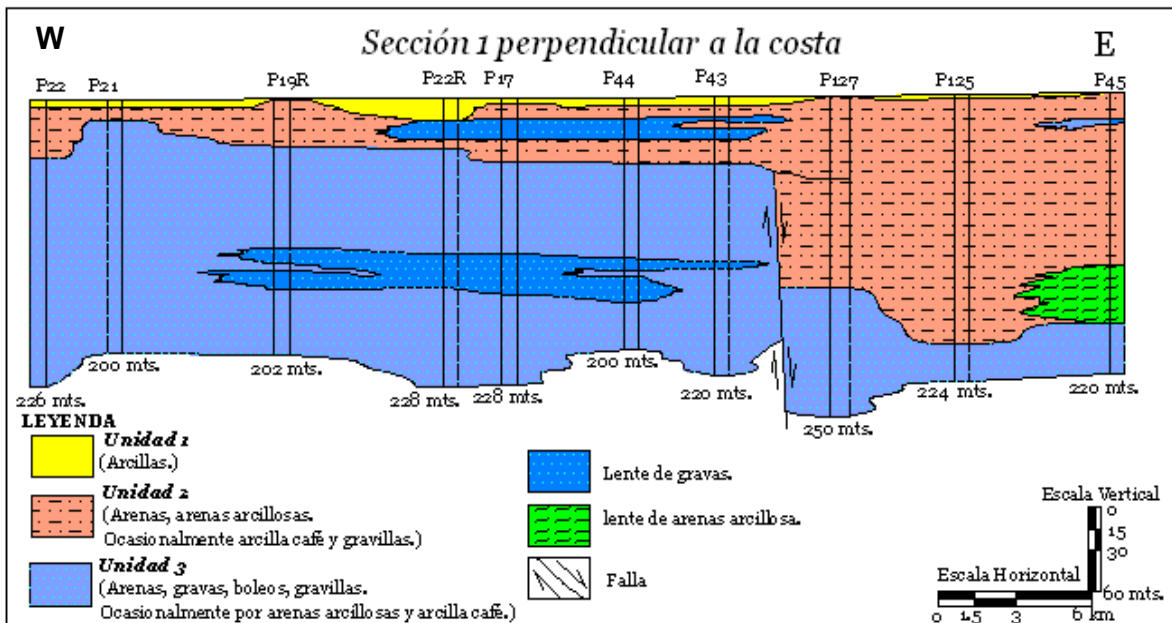


Figura VI.3. Sección 1 Perpendicular a la costa orientada W-E.

**SECCION 2.** La sección 2 esta construida a través de 7 pozos, distribuidos a lo largo de 16 km aproximadamente y con una orientación SW-NE; compuesta por 3 unidades hidroestratigraficas (Figura VI.4.). En esta sección el espesor general va de 88m (P28), 162m (P54) y hasta 190m (P125). La constituyen paquetes de arena arcillosa con espesores de 30m en los pozos P29, P28, P54, P51 y un espesor de 66m en el pozo P49R. La **Unidad 3** esta constituida principalmente por arena, grava, boleto, gravilla, y ocasionalmente por arena arcillosa y arcilla café y con espesores generales de 142m (P28) y 68m (P54) (Figura VI.4).

Se interpreta la presencia de una falla que tiene una orientación norte-sur y que pasa entre los pozos P28 y P54, denominada Fosa Obregón (Monreal y Otros, 2003)

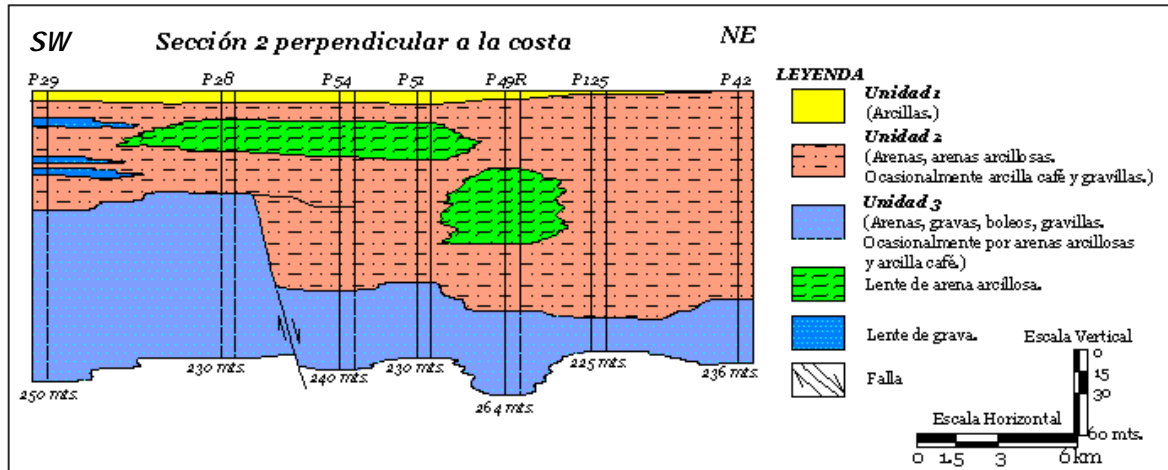


Figura VI.4. Sección 2 Perpendicular a la costa orientada SW-NE.

**SECCION 3.** Esta sección esta constituida por 10 pozos, distribuidos a lo largo de 19Km. aproximadamente, con una orientación SW-NE y esta compuesta por 4 unidades hidroestratigraficas (Figura VI.5). La **Unidad 2** tiene espesores generales que van de 54m (P87) a 86m (P99) y se encuentra un paquete de arena arcillosa con espesor de 30m (P67). En la **Unidad 3** se tienen espesores generales de 23m (P99) y 46m (P87). Tambien en esta unidad se encuentra un paquete de arena arcillosa con un espesor de 40m (P87). La **Unidad 4** esta constituida principalmente de sedimentos no consolidados, característicos de depósitos fluvio-aluviales. En general la unidad 4 varía en espesores de 85m (P87), 125m (P99) y 148m (P67). En el pozo P106 y P99 se encuentra un paquete de arena de grano fino a medio con un espesor de 40m y 50m, respectivamente. También se observó un depósito arcilloso compactado, con espesores de 70m (P99) a 150m (P97) con pequeñas intercalaciones de arena fina. En los pozos P101 y P67 se observan espesores de 50m de arena arcillosa. La **Unidad 5** esta constituida principalmente por arena, grava, gravilla, arena arcillosa, y ocasionalmente arcilla café, con espesores de 15m (P87) y 42m (P105).

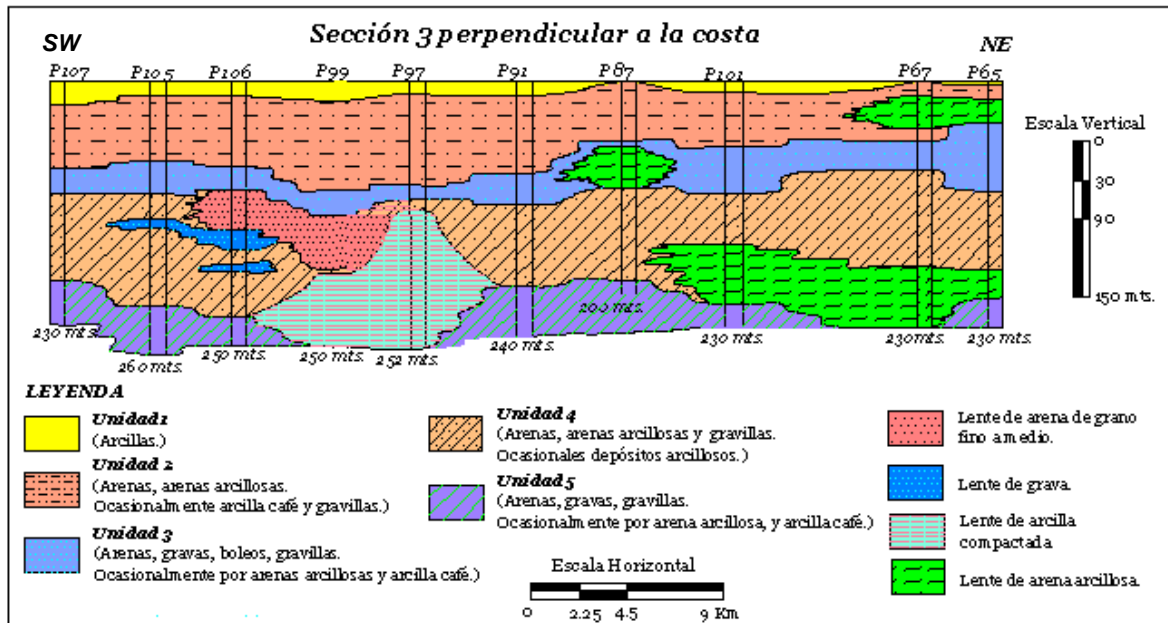


Figura VI.5. Sección 3 Perpendicular a la costa orientada SW-NE.

**SECCION 4.** Esta sección esta constituida por 8 pozos, distribuidos a lo largo de 20 km., aproximadamente, con una orientación SW-NE. y esta compuesta por 4 unidades hidroestratigraficas (Figura VI.6). La **Unidad 2** tiene espesores generales que van de 26m (P93) a 44m (P104). En el pozo P129 se observa una variación en su litología, ya que se encuentra un paquete de grava con un espesor de 12m. La **Unidad 3** esta constituida principalmente por arena, grava, boleó, gravilla, y ocasionalmente por arenas arcillosa y arcilla café. Con espesores de 31m (P104) a 70m (P129). La **Unidad 4** esta constituida principalmente de sedimentos no consolidados, característicos de depósitos fluvio-aluviales. En general los espesores de la unidad 4 van de 16m (P104) a 50m (P93) y 138m (P94R). Se observa una variación en su litología, consistente de grava con un espesor de 15m a 20m en los pozos P94R y P95R, respectivamente. La **Unidad 5** esta constituida principalmente por arena, grava, gravilla, arena arcillosa, y arcilla café, con espesores generales de 50m (P122) a 127m (P93). La **Unidad 6** corresponde al basamento en esta cuenca consistente de rocas graníticas y volcánicas (riolita) y se encuentra a diferentes profundidades, desde 100 m (P104) hasta 164 m (P129).

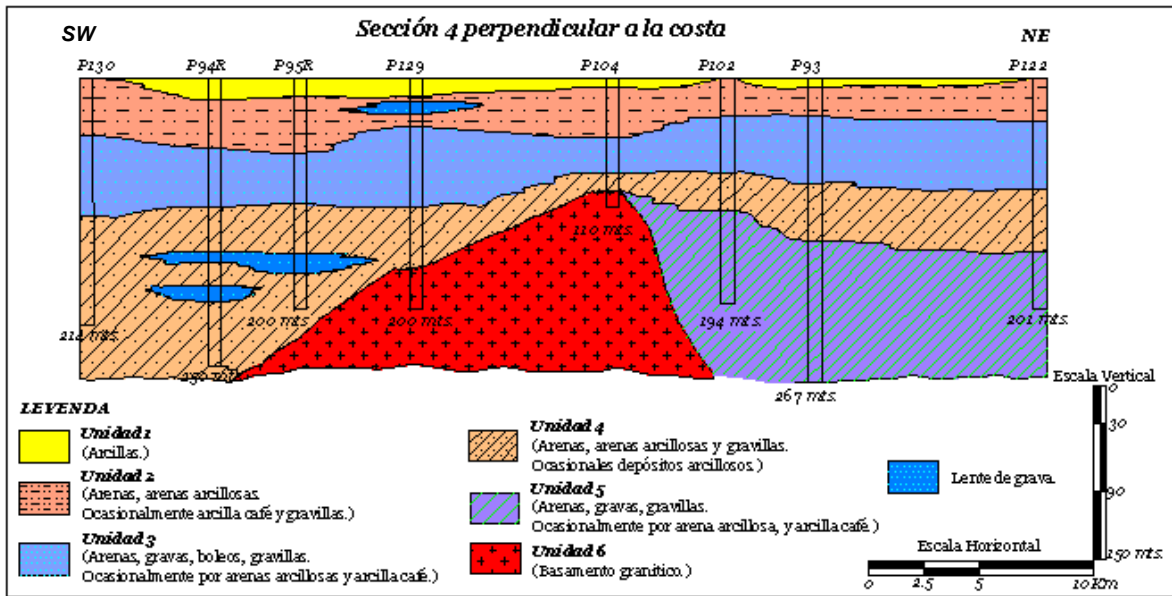


Figura VI.6. Sección 4 Perpendicular a la costa, orientada SO-NE.

**SECCION 5.-** Esta sección esta constituida por 11 pozos, distribuidos a lo largo de 52 km. aproximadamente, con una orientación NW-SE. y compuesta por 5 unidades hidroestratigráficas (Figura VI.7). La **Unidad 2** tiene espesores generales que van de 12m (P142) a 150m (P127), constituida principalmente por arena y arena arcillosa. En el pozo P49R se observa una variación en su litología, ya que se encuentra un paquete de arena arcillosa con un espesor de 65m. La **Unidad 3** esta constituida principalmente por arena, grava, boleas, gravilla, y ocasionalmente por arena arcillosa y arcilla café, con espesores de 15m (P58) a 238m (P142). La **Unidad 4** esta constituida por arena, arena arcillosa y gravilla. En general los espesores de la unidad 4 van de 33m (P102) a 133m (P58). Esta unidad se encuentra al SE de la falla Cocoraque, que desplaza los sedimentos de las unidades 3 y 4. Esta constituida principalmente de sedimentos no consolidados, característicos de depósitos fluvio-aluviales. La **Unidad 5** esta constituida principalmente por arena, grava, gravilla, arena arcillosa, y arcilla café, con espesores generales de 22m (P101) a 100m (P139).

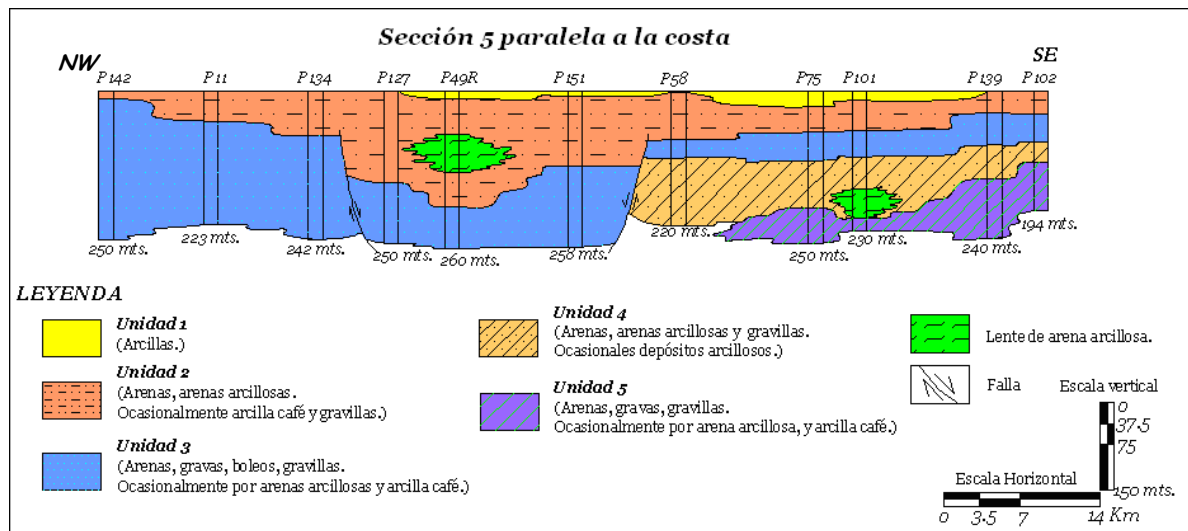


Figura VI.7. Sección 5 Paralela a la costa, orientada NW-SE.

**SECCION 6.** Esta sección constituida por 12 pozos, distribuidos a lo largo de 57 km., aproximadamente, con una orientación NW-SE. y esta compuesta por 6 unidades hidroestratigraficas (Figura VI.8). La **Unidad 2** esta constituida por arena, arena arcillosa ocasionalmente arcilla café y gravilla. Y presenta espesores generales que van de 38m (P103) a 106m (P132). En los pozos P143 y P17 se observa una variación en su litología ya que se encuentra un paquete de grava con un espesor de 14m debido probablemente a la migración del antiguo cauce del Río Yaqui. La **Unidad 3** tiene espesores que van de 60m (P58) a 179m (P143) y esta constituida principalmente por arena, grava, boleas, gravilla, y ocasionalmente por arena arcillosa y arcilla café. La **Unidad 4** esta constituida principalmente de sedimentos no consolidados, característicos de depósitos fluvio-aluviales, con espesores que varían de 60m (P129) a 132m (P56). Se observa una variación en su litología, consistente de arcilla compactada con un espesor de 166m en el pozo P97. La **Unidad 5** solo se encuentra en el pozo P103 y esta constituida principalmente por arena, grava, gravilla, arena arcillosa, y arcilla café, con un espesor de 50m. La **Unidad 6** corresponde al basamento que consistente de roca volcánica (riolita) y se encuentra a una profundidad de 170 m (P129) (Figura VI.8).

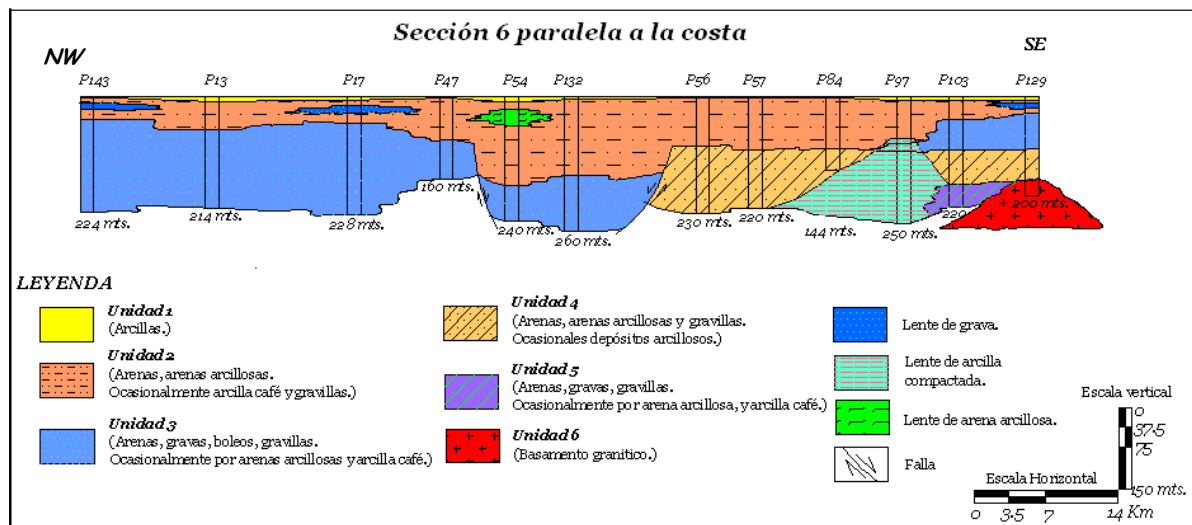


Figura VI.8. Sección 6 Paralela a la costa orientada NW-SE.

**SECCION 7.** Esta sección constituida por 15 pozos, distribuidos a lo largo de 66 Km., aproximadamente, con una orientación NW-SE. y compuesta por 5 unidades hidroestratigráficas (Figura VI.9). La **Unidad 2** esta constituida por arena, arena arcillosa y ocasionalmente arcilla café y gravilla. Esta unidad tiene espesores generales que van de 2m (P9) a 138m (P30). En los pozos P29 y P18 se observa una variación en su litología, ya que se encuentra un paquete de grava con espesores de 16m y 8m respectivamente, debido a la migración del antiguo cauce del Río Yaqui. La **Unidad 3** esta constituida principalmente por arena, grava, boleas, gravilla, y ocasionalmente por arena arcillosa y arcilla café, con espesores de 84m (P30) a 222m (P14). La **Unidad 4** esta constituida principalmente de sedimentos no consolidados, característicos de depósitos fluvio-aluviales. En general los espesores de la unidad 4 varía de 67m (P108) a 132m (P90) y se observa una variación en su litología, consistente de grava con un espesor de 14m (P94). La **Unidad 5** esta constituida principalmente por arena, grava, gravilla, arena arcillosa, y arcilla café, con un espesor de 46m (P107).

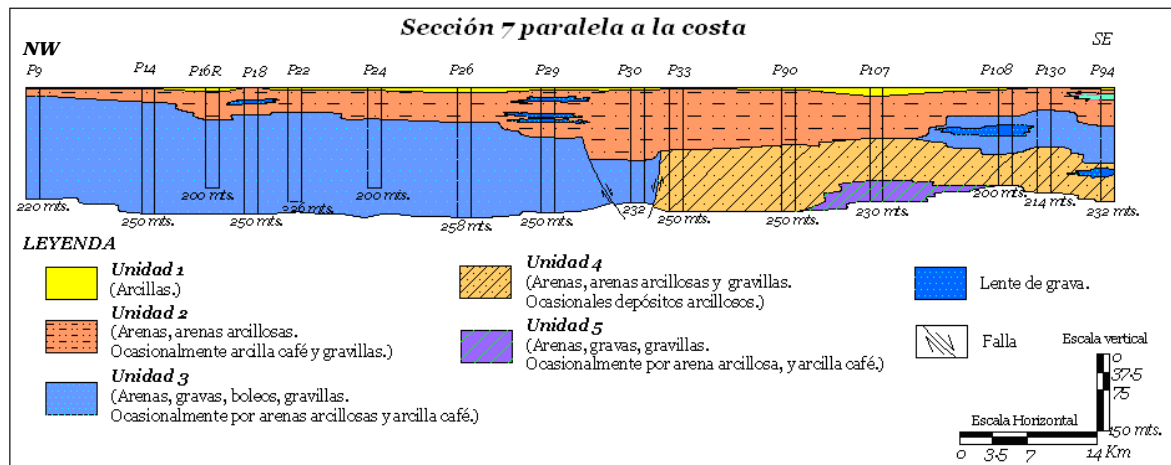


Figura VI.9. Sección 7 Paralela a la costa Orientada NW-SE.

Un análisis mas detallado de las 7 secciones, permite identificar lo siguiente: Los mayores volúmenes de acarreo se localizan en los cauces más antiguos, donde el río tiene mayor tiempo de depositación. Esto ha sido corroborado por medio de cortes litológicos en pozos, con los que se observó, que los mayores espesores de sedimentos se localizan en los poblados de San Ignacio Río Muerto, Fco J. Mina, Pueblo Yaqui, Atotonilco y Morelos 2, que podrían ser los acarreo acumulados en el antiguo cauce del río (paleocauce), con amplitud menor a 300m, mientras que los menores espesores se localizan en las proximidades de los poblados Benito Juárez, Tesopaco y Agua Blanca.

El análisis de la información de cortes litológicos de pozos y correlaciones litoestratigráficas indican claramente que el subsuelo del Valle del Río Yaqui está conformado por una gran fosa tectónica (fosa Obregón) orientada Norte-Sur (Monreal y Otros, 2003). El arroyo Cocoraque, con orientación SW-NE representa una segunda fosa tectónica que pierde continuidad hacia el suroeste y solo con niveles freáticos someros se conecta con la fosa Obregón (Monreal y Otros, 2003).

Las secciones descritas en la zona del Valle del Río Yaqui nos muestran, como va aumentando el espesor de material de captación acuífera de este a oeste alcanzando un promedio de 200 m, donde al inicio se tiene tan solo 20 m de espesor

en las unidades 2 y 3, comprendidas por arena y grava, respectivamente, con intercalaciones de arena arcillosa. Este espesor se amplía en la parte media del valle a 250 m. En la parte sureste del Arroyo Cocoraque se tiene una diferencia tanto en espesores como en unidades, por lo que las mejores unidades para captación de agua son las unidades 2, 4 y 5 comprendidas por arena, gravilla arenosa y arena gravosa respectivamente (Figura VI.10).

La Sección 6 exhibe una variación litológica, hacia el extremo "SE" la cual se considera zona de transición donde hay un espesor mayor de sedimentos y materiales porosos, paquete en los cuales la presencia arcillosa se hace presente, revelando el ambiente de sedimentación de baja energía en el depósito que ha proporcionado la concentración de sedimentos arcilloso (Figura VI.8).

El agua subterránea de los almacenamientos en medio granular puede presentar una o varias de las siguientes condiciones:

1) La circulación de flujo subterráneo se compone de recarga moderna (infiltrada hace menos de 50 años) principalmente proveniente de la infiltración vertical desde el sistema hidroagrícola y el retorno de riego y una recarga premoderna (infiltrada hace más de 50 años) proveniente del sistema del flujo regional (Monreal y Otros, 2003).

2) En sentido vertical el flujo subterráneo tiene movimiento cuya velocidad, que varía de lenta a rápida, depende de la hidrodinámica inducida por el bombeo. El flujo proveniente desde la superficie cede agua al acuífero superficial y desde éste constituye la recarga vertical en tránsito al acuífero regional. En las zonas de flujo lento, predominantes en sedimentos finos, el agua puede permanecer estacionalmente y es evapotranspirada y/o desalojada como salida subterránea horizontal y por el sistema de drenes.



Con base en lo anterior y los elementos fisiográficos descritos, las áreas más importantes desde el punto de vista hidrogeológico para captación y almacenamiento de agua subterránea son: a) los cauces abandonados del Río Yaqui, b) entre canales y cauces modernos (Cocoraque), c) entre canales no revestidos y la zona comprendida entre la Presa Álvaro obregón (Oviachic) y el poblado de Hornos.

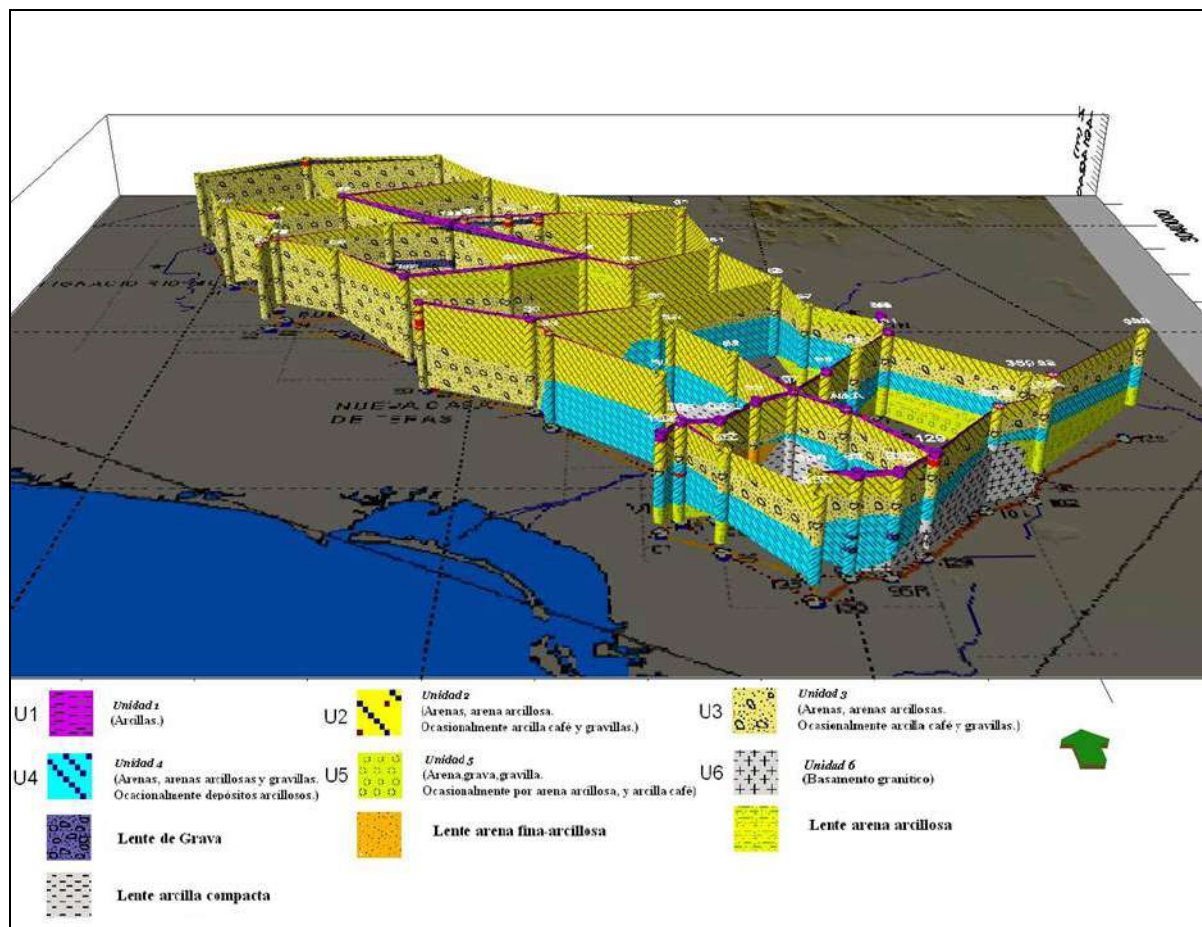


Figura VI.10. Esquema tridimensional que muestra las unidades hidroestratigráficas presentes en el acuífero del valle del Río Yaqui.

## VIII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### VIII.1 Conclusiones

El Valle del Río Yaqui se encuentra en una región tectónicamente activa, resultante del proceso de apertura del Golfo de California, por lo tanto, la configuración del basamento y en consecuencia el relleno de sedimentos que constituyen el sistema acuífero del valle obedecen a tal característica. El área forma parte de una compleja distribución de planicies de origen fluvio-aluvial y deltáica en donde existe un sistema compuesto por dos acuíferos; uno de tipo libre (freático) en la zona próxima a la superficie, denominado aquí acuífero superior (unidades 1,2) y por debajo de este, existe un acuífero regional (unidades 3, 4 y 5), de amplia extensión, espesor y composición variable, por lo tanto, su tipo varía localmente de libre, semiconfinado a confinado. Ambos acuíferos, constituyen un sistema hidráulicamente interdependiente.

El nivel freático del acuífero superior es muy somero, esto lo hace altamente vulnerable en zonas específicas, dado que se pueden presentar fenómenos de ascensión capilar del agua a la zona de aireación por una evaporación activa proveniente del suelo, de aquí que mantenga una salinización activa. Este acuífero yace sobre estratos arcillosos a limo-arcillosos no consolidados de baja permeabilidad, de espesor variable con múltiples acuñamientos a través de los cuales el tránsito de la recarga vertical fluye lentamente mientras se infiltra, ya sea desde el acuífero superior, directamente de las superficies de riego, de los canales, de los drenes no revestidos o bien, el agua puede quedar atrapada por largos periodos de tiempo a diferentes profundidades en este sustrato.

El acuífero regional se encuentra en todo el valle, ya sea debajo del estrato descrito como tipo semiconfinado, pero puede encontrarse también como confinado o libre. Los espesores son variables, con un promedio de 300m.

Existe correspondencia hidrogeológica entre la tectónica de la región del Valle del Yaqui, representada por la interpretación hidroestratigráfica, geológica y geofísica, lo que se refleja en los rendimientos específicos del acuífero. En los poblados de Fco. J. Mina, Pueblo Yaqui, P. Atotonilco y sus alrededores, se aprecia una mejor granulometría y mayores espesores de horizontes arenosos. Esto influye igualmente en una mejor calidad del agua, debido a menores tiempos de residencia del agua proporcionados por una mayor velocidad horizontal y de infiltración vertical, por lo que los sedimentos depositados en esta zona constituyen una unidad hidrogeológica multicapa que funciona hidráulicamente como acuífero libre.

En consecuencia se considera representativo de estos poblados, las zonas de acuífero libre, pero varía en zonas de mayor transmisividad, para el resto del área, en los poblados de M. R. Gomez, Jecopaco, Benito Juárez, Agua Blanca y sus alrededores, donde se pueden encontrar horizontes limo arenosos intercalados con limos arcillosos semiconfinantes, donde el acuífero varía su condición desde semiconfinado a confinado. En estas zonas, la velocidad vertical sea menor.

## **VIII.2 Recomendaciones**

Se recomienda realizar, un estudio hidrogeológico mas detallado del acuífero freático (superior) con el objeto de evaluar la posibilidad de que pueda ser utilizado como una fuente potencial de agua subterránea para la agricultura. Al utilizar parte de la pérdida del agua que se va la atmósfera, se contribuye además a abatir los altos niveles freáticos y evitar el incremento de la salinización de los suelos.

El área que cubre la porción del Distrito de Riego 018, de la comunidad Yaqui, requiere ser evaluada mediante un estudio hidrogeológico, ya que esta porción tiene un potencial que se desconoce y que se asumió únicamente en el presente estudio. La zona aporta una entrada horizontal importante de flujo subterráneo al sistema, el cual debe ser considerado para fines de disponibilidad del acuífero y su definición

resulta en beneficio de los usuarios ya que soportará la extracción que se realice en el Distrito de Riego 041.

Se recomienda llevar a cabo el control y seguimiento de los acuíferos con el objeto de generar un Catalogo de Pozos del Distrito de Riego 041, en el cual se vierta la información confiable y necesaria para generar nuevos modelos de operación y control del recurso. La base de datos deberá incluir los datos de Piezometrías semestrales (febrero y octubre) y calidad del agua. Ambos tienen por objeto conocer en forma espacial y temporal la evolución de los niveles freáticos, piezométricos y la calidad del agua, la cual probablemente se verá modificada al incrementar la extracción.

## IX. REFERENCIAS CITADAS

- Anderson, T.W., Freethey, G.W. y Tucci, Patrick, 1992, Geohydrology and water resources of alluvial basins in south-central Arizona and New Mexico. U.S. Geological Survey Professional Paper, 1406-B, 67 p.
- Ansaldo Leyva, Julio Cèsar, 1999, Estimación de la aportación media por infiltración del canal principal bajo en la sección de la batería de pozos que abastecen a Guaymas – Empalme en el Acuífero del Valle alluvial del Rio Yaqui. Tesis de Maestría en Ingeniería, Administración de Recursos Hidráulicos. ITSON, Cd. Obregón, Son., Mèxico.
- Canales E.A.G. y S. Díaz, 1986, Planeación del uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas en el Valle del Yaqui. Informe técnico, ITSON-Diep para SARH e IMTA, Cd. Obregón, Son. Mex.
- Comisión Nacional del Agua, 2000, Proyecto de Norma PROY-NOM-011-CAN-2000, Conservación del recurso agua que establece la especificaciones y método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales.
- Comisión Nacional del Agua, 2003, Comunicación verbal Subgerencia de Aguas Subterráneas, Hermosillo, Sonora.
- Custodio, E., M.R.Llamas, J. Samper eds., 1997, La evaluación de la Recarga a los acuíferos en la planeación hidrológica. Textos del Seminario celebrado en Las Palmas de Gran Canaria, Instituto Tecnológico Geominero de España, AIH, Grupo español. 453 p.
- Esquer Villalobos, Noel Osvaldo, (2001). Localización de la interfase salina en los valles de Boca Abierta y Guaymas, Sonora y una propuesta de manejo para sus acuíferos. Tesis de Maestría en Ciencias de Recursos Naturales. ITSON, Cd. Obregón, Son., México.
- Fetter C.W., 1994, Applied Hydrogeology, Third ed. University of Wisconsin, Prentice Hall, USA., 592p.
- Flores Tapiz, Reyna Isabel, 2001, La calidad del agua para riego agrícola de pozos profundos del Valle del Yaqui con énfasis en toxicidad de Boro, Cloruros y

- Sodio. Tesis de Maestría en Administración con especialidad en Recursos Hidráulicos. ITSON, Cd. Obregón, Son., México.
- Geólogos Consultores Asociados, S.A., 1979, Estudio de las condiciones geohidrológicas, sitios adecuados perforación y delimitación de acuíferos terciarios de los Valles intermontanos de Yecora, Río Chico, Los Cedros, Jincora Y Cocoraque, Estado de Sonora. Volumen I. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Subdirección de Geohidrología y zona áridas. Sonora, México.
- Gómez Aldama, Oscar Rubén, 1992, Un modelo de programación por redes para planear la operación del uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas en el Valle del Yaqui, Sonora. Tesis de Maestría en optimización de sistemas productivos. ITSON, Cd. Obregón, Son., México.
- Gonzalez E. Rodrigo M.I., 1992, Evolución de la salinidad y contaminación por agroquímicos en el acuífero del valle del yaqui, Sonora. Anexo Trece. Convenio celebrado entre "IMTA-ITSON-GRNO". Primer informe bimensual.
- Gutiérrez Heredia, Rosa Elvira, (2004). "Evolución Geomorfológica del Valle del Yaqui". Tesis de Licenciatura. Universidad de Sonora, Departamento de Geología, Hermosillo, Son., México.
- ICATEC, Consultores, 1970, Estudio Geohidrológico del valle del yaqui, Sonora, (Distrito de Riego 041). Informe Interno para la Dirección de Aguas Subterráneas, Secretaría de Recursos Hidráulicos.
- IEISACH (Instituto de Estudios, Investigaciones y Servicios Agrícolas Chapingo, S.C.), 1986, Evaluación de la eficiencia hidráulica y electromecánica de los pozos del distrito de riego del Río Yaqui, Sonora. Secretaría de infraestructura hidráulica. Dirección General de Seguimiento y control de obras hidráulicas. Memoria Técnica. México, D.F.
- Informe sobre suelos del Valle del Yaqui. (No presenta Título, ni ningún dato bibliográfico referente a él mismo) Primera hoja Capítulo II.- Irrigación Del Distrito., p. 11- 112).
- Instituto Tecnológico de Sonora, 1996, Planeación del uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas en el Valle del Yaqui, Sonora. Convenio celebrado

- entre el Consejo Nacional de Ciencia Y Tecnología y El ITSON. Informe IX. Son., México.
- Instituto Tecnológico de Sonora, 1997, Alternativas para reducir la presencia de Fierro y Manganeso que exceda los límites establecidos en las normas para el agua potable, en el abastecimiento de la zona de Guaymas – Empalme. Comisión Nacional Del Agua. Gerencia de Agua Subterráneas. Informe Final. Cd. Obregón, Son., México.
- Instituto Tecnológico de Sonora, 2000, Estudio de disponibilidad y actualización hidrogeológica en los acuíferos de los valles de : El Yaqui, El Mayo, Boca Abierta y Guaymas, Sonora. Tomo I y Tomo II. Comisión Nacional del Agua. Subdirección General Técnica. Gerencia de Aguas Subterráneas. Cd. Obregón, Sonora, México.
- Kalinski, R.J., William E. Kelly, Istvan Bogardi, Richard L. Ehrman and Paul, D. Yamamoto, 1994, Correlation between DRASTIC Vulnerabilities and incidents VOC contamination of Municipal wells in Nebraska, Vol. 32, no. 1, Groundwater, January-February, p 31-34.
- Lozano Cota, Luis Manuel, 1992, Un modelo de programación lineal para la planeación del uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas en el Valle del Yaqui, Sonora. Tesis de Maestría en Ingeniería , especialidad en Administración de Recursos Hidráulicos. ITSON, Cd. Obregón, Son., México.
- Martinez Uribe, Maria Esther, 1999, Caracterización hidrogeológica de las formaciones volcánicas y sedimentarias en el Valle de Boca abierta, Sonora. Tesis de Maestría en Ingeniería, especialidad en Administración de Recursos Hidráulicos. ITSON, Cd. Obregón, Son., México.
- Minjarez S. y otros, 2004, Monitoreo de Niveles en el Valle del Río Yaqui. Municipio de Cajeme, sonora.
- Monreal R. y otros, 2003, Estudio de Actualización Geohidrológica del acuífero “valle del yaqui” municipio de Cajeme, sonora.

- Navarro Ibarra, Lizzeth Aurora, 2001, Modelo de optimización – simulación para generar políticas de extracción en el acuífero del Valle del Yaqui, Sonora. Tesis de Maestría en Ingeniería, en Administración de Recursos Hidráulicos. ITSON, Cd. Obregon, Sonora, México.
- Pool, D.R. y A. L. Coes, 1999, Hidrogeologic investigations of the Sierra Vista Subwatershed of the upper San Pedro Basin, Cochise County, Southeast Arizona. USGS.
- Rangel, M.M., 1997, Hidrogeología ambiental aplicada a los sistemas acuíferos La Colorada y Mátape-Empalme: Implicaciones sobre la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea.
- Rangel, M. M. y Otros, 2002, Estudio Hidrogeológico de la Cuenca Alta del Río San Pedro, Repercusiones Ambientales en el Hábitat de Aves Migratorias por Explotación de Acuíferos, Proyecto de Investigación, Informe Inédito. Convenio World Wildlife Fund-Dpto. Geol. UNISON.
- Técnicas Geológicas y Mineras, S.A. de C.V., 1996, Estudio para el diseño de redes de monitoreo de los acuíferos de los valles de : El Yaqui, Hermosillo y Caborca, en el Estado de Sonora. Elaborado para la Comisión Nacional Del Agua. Son., México.
- Técnicas Geológicas y Mineras, S.A. de C.V., 1997, Actualización de mediciones piezométricas de los acuíferos reactivados en 1996 (PROMMA), en los Estados de Sonora y Chihuahua. Elaborado para La comisión Nacional del Agua.
- Técnicas Modernas de Ingeniería, S.A., Estudio Geohidrologico de prospección de la zona Oriental de las cercanías de Ciudad Obregón, Sonora. Secretaría de Fomento Agropecuario. Son. México.
- Verduzco, H. M., 2002, Estudio de la calidad del agua subterránea y vulnerabilidad a la contaminación del área de Tamazula, Guasave, Sinaloa, México, Tesis de grado Maestría, CIIDIR-IPN, Unidad Sinaloa.



Willeminck, J., 1988, Estimating natural recharge of groundwater by moisture accounting and convolution, Institute for Groundwater Studies. I. Simmers (ed.), Estimation of Natural Groundwater Recharge, 283-299 pp. D. Reidel Pub. Co., South Africa.

Zapuche Moreno, Ivette Concepción, 2000, Hidrogeoquímica de la franja costera del acuífero del Valle del yaqui, Sonora. Tesis de Maestría en Ingeniería, especialidad en Administración de Recursos Hidráulicos. ITSON, Cd. Obregón, Son., México.