

***Actualización de la disponibilidad media anual
de agua en el acuífero Río San Pedro (2616),
Estado de Sonora***

Publicada en el Diario Oficial de la Federación
20 de abril de 2015

Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea

Publicada en el diario oficial de la federación el 20 de Abril de 2015

El artículo 22 segundo párrafo de la Ley de Aguas Nacionales (LAN), señala que para el otorgamiento de una concesión o asignación, debe tomarse en cuenta la disponibilidad media anual del agua, que se revisará al menos cada tres años; sujetándose a lo dispuesto por la LAN y su reglamento.

Del resultado de estudios técnicos recientes, se concluyó que existe una modificación en la disponibilidad de agua subterránea, debido a cambios en el régimen natural de recarga, volumen concesionado y/o descarga natural comprometida; por lo que se ha modificado el valor de la disponibilidad media anual de agua.

La actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea publicada en este documento corresponde a una fecha de corte en el **Registro Público de Derechos de Agua al 30 de junio de 2014.**

CLAVE	ACUÍFERO	R	DNCOM	VCAS	VEXTET	DAS	DÉFICIT
		CIFRAS EN MILLONES DE METROS CÚBICOS ANUALES					
ESTADO DE SONORA							
2616	RÍO SAN PEDRO	41.0	17.0	31.490552	22.3	0.000000	-7.490552

R: recarga media anual; DNCOM: descarga natural comprometida; VCAS: volumen concesionado de agua subterránea; VEXTET: volumen de extracción de agua subterránea consignado en estudios técnicos; DAS: disponibilidad media anual de agua subterránea. Las definiciones de estos términos son las contenidas en los numerales “3” y “4” de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015.



Comisión Nacional del Agua

Subdirección General Técnica

Gerencia de Aguas Subterráneas

Subgerencia de Evaluación y Ordenamiento de Acuíferos

***DETERMINACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD
DE AGUA EN EL ACUÍFERO
RIO SAN PEDRO,
ESTADO DE SONORA.***

DETERMINACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA EN EL ACUÍFERO RIO SAN PEDRO, ESTADO DE SONORA

CONTENIDO

	Página
1. GENERALIDADES.....	2
Antecedentes.....	2
1.1. Localización.....	2
1.2. Situación administrativa del acuífero.....	4
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD.....	4
3. FISIOGRAFÍA.....	10
3.1 Provincia fisiográfica.....	10
3.2 Clima.....	10
3.3 Hidrografía.....	11
3.4 Geomorfología.....	11
4. GEOLOGÍA.....	11
4.1 Estratigrafía.....	12
4.2 Geología estructural.....	15
4.3 Geología del subsuelo.....	16
5. HIDROGEOLOGÍA.....	17
5.1 Tipo de acuífero.....	17
5.2 Parámetros hidráulicos.....	17
5.3 Piezometría.....	17
5.4 Comportamiento hidráulico.....	18
5.4.1 Profundidad al nivel estático.....	18
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	19
5.4.3 Evolución del nivel estático.....	21
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	22
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA.....	23
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	24
7.1 Entradas.....	24
7.1.1 Recarga natural.....	24
7.1.2 Flujo subterráneo horizontal.....	25
7.1.3 Recarga inducida.....	26
7.2 Salidas	27
7.2.1 Evapotranspiración.....	27
7.2.2 Bombeo.....	28
7.2.3 Flujo subterráneo horizontal.....	28
7.2.4 Descargas Naturales por Flujo base	28
7.3 Cambio de almacenamiento.....	28
8. DISPONIBILIDAD.....	31
8.1 Recarga total media anual.....	31
8.2 Descarga natural comprometida.....	31
8.3 Rendimiento permanente.....	31
8.4 Volumen concesionado de aguas subterráneas.....	31
8.5 Disponibilidad de aguas subterráneas.....	31
9. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.....	32

1. GENERALIDADES

Antecedentes

La Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento (LAN) contemplan que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) debe publicar en el Diario Oficial de la Federación (DOF), la disponibilidad de las aguas nacionales, por acuífero en el caso de las aguas subterráneas, de acuerdo con los estudios técnicos correspondientes y conforme a los lineamientos que considera la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000 “Norma Oficial Mexicana que establece el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales”. Esta norma ha sido preparada por un grupo de especialistas provenientes de la iniciativa privada, instituciones académicas, asociaciones de profesionales, organismos de los gobiernos de los estados y municipios, y de la CONAGUA.

El método que establece la NOM indica que para calcular la disponibilidad de aguas subterráneas deberá de realizarse un balance de las mismas, donde se defina de manera precisa la recarga de los acuíferos, y de ésta deducir los volúmenes comprometidos con otros acuíferos, la demanda de los ecosistemas y los usuarios registrados con derechos vigentes en el Registro Público de Derechos del Agua (REPDa).

El cálculo de la disponibilidad obtenida permitirá una mejor administración del recurso hídrico subterráneo ya que el otorgamiento de nuevas concesiones sólo podrá efectuarse en acuíferos con disponibilidad de agua subterránea. Los datos técnicos que se publiquen deberán estar respaldados por un documento en el que se sintetice la información necesaria, en donde quede claramente especificado el balance de aguas subterráneas y la disponibilidad de agua subterránea susceptible de concesionar, considerando los volúmenes comprometidos con otros acuíferos, la demanda de los ecosistemas y los usuarios registrados con derechos vigentes en el REPDa. La publicación de la disponibilidad servirá de sustento legal para fines de administración del recurso, en la autorización de nuevos aprovechamientos de agua subterránea, en los planes de desarrollo de nuevas fuentes de abastecimiento, y en las estrategias para resolver los casos de sobreexplotación de acuíferos y la resolución de conflictos entre usuarios.

1.1 Localización

La Cuenca del Río San Pedro se encuentra localizada al noreste del Estado de Sonora, en la parte intermedia entre los desiertos de Sonora y Chihuahua. La zona tiene una superficie de 2,105 km², figura No. 1. El acuífero Río San Pedro, definido con la clave 2616 del Sistema de Información Geográfica para el Manejo del Agua Subterránea (SIGMAS) de la CONAGUA, se ubica en el extremo norte del estado de Sonora, limitando al norte con la línea que define la frontera con los EUA, al oeste con los acuíferos Río Santa Cruz y Cuitaca, al este con el acuífero Río Agua Prieta y al sur con el acuífero Río Bacoachi (Figura No. 1).

Geográficamente, el área se ubica aproximadamente entre los paralelos 30° 50' y 31° 20' de latitud norte y entre los meridianos 109° 50' y 110° 30' de longitud Oeste, a partir del Meridiano de Greenwich, abarcando una superficie de 1750 km², que comprende parcialmente los municipios de Santa Cruz, Cananea y Naco, de los cuales las poblaciones de Cananea y Naco son las de mayor importancia por su número de habitantes.

Las poblaciones de Cananea y Naco, están comunicadas tanto por la Carretera Federal No.2, como por ferrocarril. Así mismo, existe una terracería que comunica a Cananea con Nogales a través del municipio Santa Cruz y cuyo recorrido es paralelo a la vía del ferrocarril, desprendiéndose una extensión hacia Naco, Son. A su vez, la carretera federal

atraviesa por la parte meridional de la cuenca y es una ruta importante de tráfico entre los estados de Sonora y Chihuahua.

Las principales actividades económicas que se desarrollan en la región son: la minería, la agricultura y la ganadería, y en menor escala están la industria y el comercio.

La economía del municipio de Cananea gira alrededor de la minería, ya que la población depende directa o indirectamente de la actividad de la compañía minera Mexicana de Cananea. Según el censo de 1990, el 46% de la población que se encuentra en el área de la Cuenca del Río San Pedro se dedica a actividades en el sector terciario, 48% al secundario y sólo el 5.8% de la población trabaja en actividades primarias, principalmente agricultura y ganadería.

Por lo que respecta a la agricultura, se puede mencionar que en Naco existen 1085 ha de cultivo, de las cuales 880 están activas, 380 en el ejido Naco y 500 en Cuauhtémoc. En Cananea, la superficie abierta al cultivo es de aproximadamente 1500 ha, de las cuales se explotan únicamente 590; de éstas, aproximadamente 400 se encuentran en la Cuenca del Río San Pedro, y el resto no se siembran por falta de recursos financieros. Dentro de los cultivos de siembra se pueden mencionar alfalfa, maíz, frijol, sorgo, papa, avena, cebada, ajo y praderas artificiales. La ganadería, constituye la actividad económica más importante de las comunidades rurales del área. Existen en la región 104 unidades productivas que tienen como actividad principal, la crianza de especies animales, principalmente el bovino.

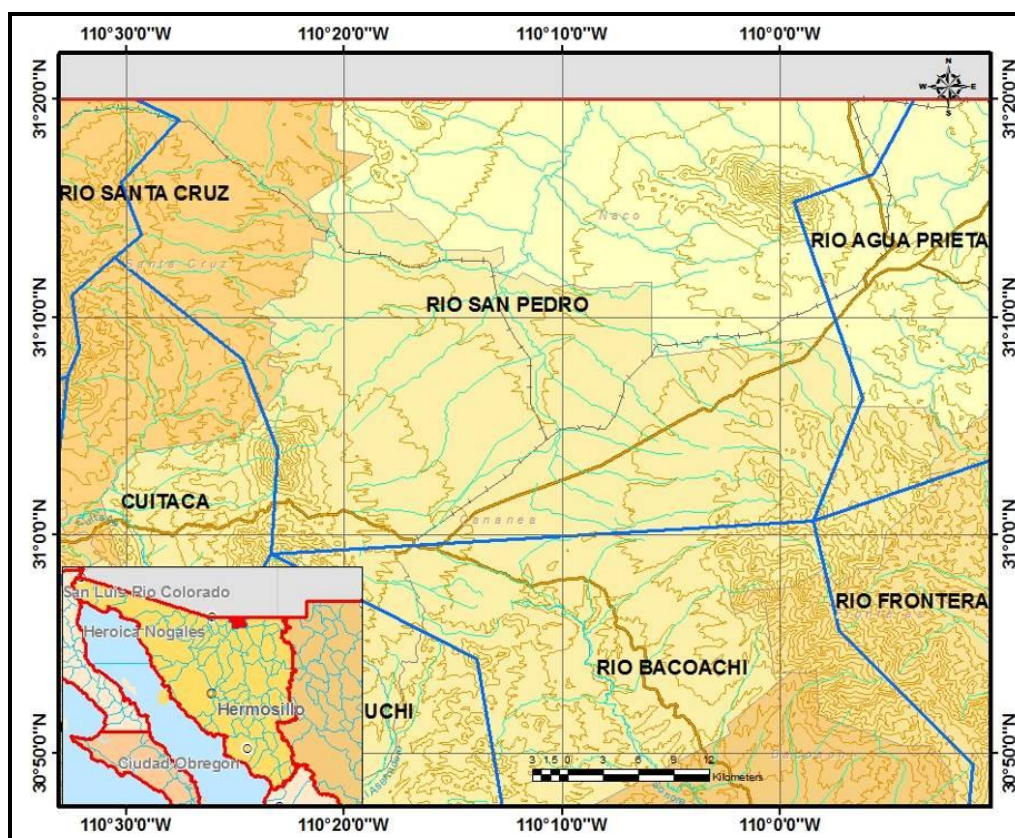


Figura No. 1. Localización del acuífero Río San Pedro.

La poligonal simplificada que delimita el acuífero se encuentra definida por los vértices cuyas coordenadas se muestran en la tabla No.1.

Tabla No.1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUIFERO 2616 RIO SAN PEDRO							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	110	29	36.7	31	20	1.4	DEL 1 AL 2 POR EL LIMITE INTERNACIONAL
2	109	53	51.6	31	20	2.3	
3	109	55	44.9	31	16	35.0	
4	109	59	23.0	31	15	19.2	
5	109	56	14.0	31	6	17.4	
6	109	58	27.6	31	0	39.8	
7	110	23	21.1	30	59	6.8	
8	110	23	3.9	31	3	54.3	
9	110	24	40.8	31	8	3.3	
10	110	30	32.1	31	12	45.5	
11	110	29	17.7	31	13	47.7	
12	110	30	13.7	31	16	12.0	
13	110	27	36.4	31	19	4.1	
1	110	29	36.7	31	20	1.4	

1.2 Situación Administrativa del Acuífero.

El acuífero Río San Pedro pertenece a la Región Hidrológica – Administrativa II Noroeste y se encuentra sujeto a las disposiciones de los decretos de veda tipo II “Conservación de los mantos acuíferos del estado de Sonora, en la parte oeste del Meridiano 110° de Greenwich”, y “Diversos Municipios del Estado de Sonora”, entre los cuales se incluyen Naco y Agua Prieta, publicado en el DOF el 19 de septiembre de 1978 y el 24 de septiembre de 1984, respectivamente; los cuales establecen que *“Excepto cuando se trate de extracciones para usos doméstico y de abrevadero que se realicen por medios manuales, desde la vigencia de este Decreto, nadie podrá efectuar obras de alumbramiento de aguas del subsuelo dentro de la zona vedada, sin contar previamente con el correspondiente permiso de construcción otorgado por la Autoridad del Agua, ni extraer o aprovechar las aguas mencionadas, sin la concesión o asignación que expida”*; adicionalmente, dispone que: *“... concederá permiso de construcción para obras, únicamente en los casos en que de los estudios relativos se concluya que no se causarán los perjuicios que con el establecimiento de la veda tratan de evitarse”*.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua (2007), el municipio de Cananea se localiza en zona de disponibilidad 4, Santa Cruz en zona 6 y Naco en zona 7. Los usuarios mayores del agua son los sectores agropecuario e industrial. En el acuífero no se localiza distrito o unidad de riego alguna, ni tampoco se ha constituido hasta la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD.

Debido a su importancia como fuente abastecimiento para los usos industrial (actividad minera), público – urbano, agrícola, pecuario y de servicios, el acuífero Río San Pedro ha sido objeto de diversos estudios que han tenido como objetivo determinar su potencial, características geohidrológicas, etc. A continuación se mencionan los más relevantes y sus principales conclusiones.

- **Estudio para el Abastecimiento de Agua a la Compañía Minera de Cananea, S.A., (Primera Parte) realizado para la empresa Ingeniería y Procesamiento Electrónico, S.A., (IPESA), para la Compañía Minera S.A., 1980.**

Como aspectos importantes del estudio, se mencionan los siguientes:

En la Cuenca del Río San Pedro existen 11 pozos que proporcionan aproximadamente un caudal conjunto de 200 lps. En la Cuenca del Río Sonora se tienen 2 pozos y una galería que proporcionan en conjunto aproximadamente 185 lps.

Del estudio de nueve sitios donde era factible la construcción de vasos de almacenamiento, se optó por la construcción de un almacenamiento de 12 Mm³ en el Río San Pedro, a una distancia de 44 km de Cananea para obtener un caudal de 317 lps. El agua potable adicional, deberá bombearse desde la estación de bombeo del río hasta Cananea a partir de la construcción de dos tuberías.

- ***Planteamiento de Alternativas y Definición de Parámetros Para el Abastecimiento de Agua, de la Cía., Minera de Cananea, S.A., (Segunda Parte) elaborado por la empresa Ingeniería y Procesamiento Electrónico, S.A. (IPESA), para la Compañía Minera de Cananea, S.A., 1981.***

Establece una demanda de 1158 lps para satisfacer los requerimientos de producción y agua potable para enero de 1984, año en el que se esperaba alcanzar el nivel de producción de 82,000 ton/día.

Para satisfacer esta demanda, se plantea la explotación del acuífero subyacente en la Cuenca Alta del Río San Pedro, así como en la Cuenca del Río Sonora, en las cuales existían para esa fecha 11 pozos que proporcionan alrededor de 200 lps y 2 pozos que proporcionan 185 lps, respectivamente.

- ***Estudios Geohidrológicos Complementarios de los Acuíferos Río San Pedro, realizado en 1982, por la Empresa Ingeniería y Procesamiento Electrónico, S.A. (IPESA), para la Compañía Minera de Cananea, S.A.***

En los años 1978 y 1979 la empresa IPESA, Consultores, realizó un estudio geohidrológico preliminar en los acuíferos del Río San Pedro, en donde establecieron la necesidad de efectuar estudios geohidrológicos complementarios y mediciones de campo que le permitieran estimar con mayor detalle el comportamiento del acuífero.

Dentro de la actividad del censo de captaciones, se consignan un total de 83 aprovechamientos de agua subterránea, de los cuales un 48% son pozos, 50% papalotes y el resto norias. En cuanto al uso, 50% se dedican al uso ganadero, 17% al uso agrícola, 13% al industrial, 2% al doméstico y el resto corresponde a pozos inactivos, de observación o en construcción.

La extracción anual promedio era en aquel entonces de 334 lps, de este total 66% correspondía al consumo industrial con 220 lps, el 29% al consumo agrícola con 98 lps, y el 5% restante al uso ganadero.

De acuerdo a la información piezométrica, concluyen que la dirección del flujo es de sur a norte, a partir del parteaguas topográfico que se encuentra al sur de la carretera que conduce a Agua Prieta.

Del censo de aprovechamientos se seleccionaron 54 pozos piloto, a los cuales se les determinó la elevación del brocal con respecto al nivel medio del mar.

Se llevaron a cabo 2 pruebas de bombeo, obteniéndose como resultados valores de transmisividad de 1.36 y 1.67 x 10⁻³ m²/s, respectivamente. Así mismo, concluyen que de los meses de julio a septiembre de 1980, se tiene recarga y en los otros meses la extracción se realiza a costa del almacenamiento.

Como resultado del estudio se definen cuatro zonas en donde puede incrementarse la explotación del agua subterránea con propósitos de abastecimiento industrial: Laguna de Patos, Ojo de Agua, Ampliación Riecito y Ampliación del Río.

- ***Segundo Estudio Geofísico, Informe No. 315, realizado en 1982, por la Empresa Investigaciones Técnicas del Suelo, S.A., para la Compañía Minera Cananea, S.A.***

El objetivo del estudio fue ampliar el conocimiento que se tiene de la estructura geológica subterránea existente en el Valle del Río San Pedro, prestando atención especial a los estratos acuíferos captados por los pozos de bombeo.

Establecen que el relleno del Valle del Río San Pedro, corresponde con los depósitos terciarios continentales de la Formación Baucarit, los cuales sobreyacen a una secuencia volcánica, en donde predominan las rocas de composición riolítica. Geohidrológicamente, estos rellenos se dividen en dos grupos, el primero con resistividades inferiores a 20 ohm-m y superiores a 45 ohm-m, donde la permeabilidad va de muy baja a casi impermeable, y el segundo con resistividades comprendidas entre 20 y 45 ohm-m, constituido por material con una mejor permeabilidad.

- ***Modelo Matemático para Representar el Acuífero de los Alrededores de Cananea, Sonora con el fin de Incrementar el Abastecimiento de Agua Subterránea a la Compañía Minera de Cananea (Informe Parcial). Estudio realizado en 1983, bajo el contrato NNG-157 por la Empresa Hidrolegro, S.A., para la Compañía Minera de Cananea, S.A.***

A partir del análisis piezométrico mencionan que las curvas de igual elevación no mostraron cambios de 1946 a 1980 y establecen tres periodos significativos en los cuales la explotación del acuífero fue en aumento: de 1945 a 1966, con un bombeo anual de 5.1 Mm³; 1967-1978, con 6.17 Mm³ de extracción anual y 1979-1983, con volumen anual extraído fue de 10.5 Mm³.

A partir de un espesor máximo del acuífero de 1000 m, se modeló como acuífero confinado; estimando una transmisividad promedio de 1.56×10^{-3} m²/s; un coeficiente de almacenamiento de 0.013; y una cubicación del acuífero del orden de 445.78 km³.

- ***Comportamiento del Acuífero Río San Pedro, Cananea, Sonora. Tesis profesional elaborada en 1986 por Francisco Manuel Contreras Montijo para obtener el título de Geólogo en la Universidad de Sonora.***

Este trabajo describe el comportamiento del Acuífero Río San Pedro, analizando sus características geológicas y su hidrología subterránea. Como aspecto sobresaliente de este trabajo se puede mencionar que de las pruebas de bombeo se determinó un valor del coeficiente de almacenamiento de 0.0275 que corresponde a un acuífero libre, y un valor promedio para la transmisividad de 0.00988 m²/s. Considerándose buenos valores para estos dos parámetros.

Se realiza un balance de agua subterránea en un área que abarca la mayor parte del valle para el periodo de febrero de 1985 a enero de 1986, calculándose una extracción por bombeo de 11.3 Mm³ y una recarga de 16.2 Mm³.

- ***Monitoreo de la Calidad del Agua y Sedimento en la Cuenca del Río San Pedro, inicio de la Cuenca del Río Sonora, y en los Municipios de Naco y Agua Prieta, Sonora. Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas. Universidad de Sonora, 1988.***

En este estudio se realizó una distribución de las estaciones de monitoreo que obedeció a la captación de posibles contaminantes derivados de la industria minera, la influencia urbana y prácticas agrícolas que puedan manifestarse en las corrientes superficiales y subterráneas del Río San Pedro. Se establecieron 14 estaciones, 6 de las cuales corresponden a pozos profundos, y el resto a tomas de agua superficial. En todos los casos los análisis incluyeron la determinación de elementos inorgánicos y orgánicos; para el caso las aguas superficiales el muestreo incluyó agua y sedimento.

El Río Sonora fue monitoreado únicamente en la parte más alta de su cuenca, estableciendo dos puntos de muestreo sobre el cauce del arroyo Ojo de Agua de Arvallo, al cual se une un afluente que tiene relación estrecha con las represas de la minera de Cananea.

Como conclusión establecen que en el Río San Pedro se detectan valores excedidos a la norma oficial mexicana únicamente en el Ejido Morelos. Asimismo, se observa la presencia de plomo y zinc en las estaciones de muestreo de Terreros, Arroyo Cananea y Vieja.

En el río San Pedro, entre las estaciones Pozo Saucedá y Los Corrales, se observaron valores de metales como magnesio, níquel, sodio, cobre, fierro, cromo y manganeso que excedieron los valores máximos permisibles en la Norma CE-CCA-001-89.2/.

Respecto al Río Sonora, las dos estaciones monitoreadas presentaron altos valores, que exceden la norma oficial, de hierro, magnesio, manganeso, níquel y plomo.

Del análisis de los resultados, se desprende que la calidad del agua subterránea es en general buena y los casos en que se sobrepasan los límites permisibles, éstos se asocian a contaminaciones muy locales.

- ***Diagnóstico de los Recursos de Agua Subterránea en la Cuenca Alta del Río San Pedro, Cananea, Son. Reporte realizado por la empresa Ingenieros Civiles y Geólogos Asociados, S.A., para Compañía Industrial Minera México, S.A. de C.V., 1997.***

En este estudio se menciona que el aprovechamiento del agua subterránea en las cuencas de los Ríos San Pedro y Norte de Sonora se inicia en territorio de México desde la década de los años 40. Los primeros aprovechamientos en ambos lados de la frontera, localizados cerca y a lo largo de los escurrimientos superficiales y las manifestaciones naturales de la descarga del acuífero, debieron reducir, tanto el drenaje de los ríos, como la pérdida por evaporación del almacenamiento subterráneo. En el área de Cananea se localizaron nuevos aprovechamientos en las zonas de recarga del acuífero, lo que modificó una parte del funcionamiento hidráulico, sin embargo, no evitó que el almacenamiento de agua subterránea siguiera descargándose en forma natural.

Dentro del análisis de la descarga natural del acuífero, establecen que el escurrimiento del Río San Pedro es del orden de $3.5 \text{ Mm}^3/\text{año}$, en tanto que las pérdidas por evaporación son de $10 \text{ Mm}^3/\text{año}$; así mismo, estiman las salidas subterráneas en $10 \text{ Mm}^3/\text{año}$ y la extracción por pozos de $19.5 \text{ Mm}^3/\text{año}$ y una descarga por evapotranspiración de $19 \text{ Mm}^3/\text{año}$.

La piezometría de la zona, indica estabilidad de los niveles del agua subterránea en los últimos 7 años, denotando que la porción norte del Valle del Río San Pedro no ha variado apreciablemente, por lo que la evolución anual calculada muestra un abatimiento de 0.065 m/año .

Finalmente establecen que, de 1990-1996, el Acuífero Río San Pedro ha funcionado con una recarga promedio de $45\text{-}50 \text{ Mm}^3/\text{año}$, en este período las descargas se han presentado por la explotación de agua subterránea en su mitad sur y por el drenaje del río, salidas

subterráneas y evaporación en su porción norte, con una ligera disminución del almacenamiento subterráneo.

La extracción para ese año era del orden de 19.6 Mm³/año, presentándose todavía descargas por flujo base en el cauce del Río San Pedro del orden de los 3.5 Mm³/año, a través de la frontera con los EUA.

- ***Conservación y Enriquecimiento del Hábitat Ribereño del Río San Pedro, Versión Final. Marzo de 1999. Estudio realizado en 1998, por un equipo interdisciplinario de expertos comisionados por el Secretariado de la Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA), la cual fue establecida de conformidad con el Acuerdo de Cooperación Ambiental de América del Norte (ACAAN).***

En el estudio mencionan que el caudal del Río San Pedro tiene sus niveles más bajos de abril a junio, período durante el cual el flujo de la corriente se deriva fundamentalmente de las aguas subterráneas que lo alimentan. El Departamento de Recursos Hidráulicos de Arizona (ADWR) desarrolló modelos que señalan que el bombeo de agua subterránea en la cuenca de Sierra Vista, ha provocado un cono de depresión, el cual reduce la descarga del río en este punto hasta quizás un 30 %, originando que en algunos sitios el gradiente del nivel de agua esté actualmente plano, lo que propicia que el agua subterránea no fluya hacia el río en estos lugares.

Establecen que a partir de este informe, se debe tener conocimiento sobre la manera en que las comunidades en ambos lados de la frontera, puedan con propias iniciativas e instancias gubernamentales, conservar el invaluable hábitat de la Cuenca del Río San Pedro. Concluye diciendo que, a menos que se tomen medidas, las actuales tendencias en el uso del agua finalmente pondrán en peligro este activo natural que enriquece tanto la calidad de la vida en la cuenca como la biodiversidad del hemisferio entero.

Así mismo, evalúan las medidas tanto para aumentar la recarga del acuífero como para reducir las extracciones. Las posibilidades de solución analizadas corresponden a esas dos categorías. Esta combinación de estrategias reduciría sustancialmente el déficit hidrológico. Mencionan tres formas de abordar el déficit residual: 1) reducir el consumo del líquido por debajo de los consumos actuales, lo que implicaría revertir el crecimiento en la cuenca y traería consigo graves consecuencias económicas; 2) importar agua de otras cuencas, lo cual tendría un elevado costo, sería jurídicamente complicado y potencialmente contraproducente si se tradujera en demandas adicionales, o 3) hacer uso del agua almacenada del acuífero, lo que aumentaría el déficit.

- ***Resumen de la Propuesta del Área del Río San Pedro, Documento de Trabajo para la reunión de análisis de la Cuenca del Río San Pedro. Abril de 1999.***

Se menciona la problemática que existe a lo largo de la Cuenca del Río San Pedro, como la utilización del agua subterránea y la disposición de las aguas residuales dentro del área de drenaje de la cuenca, cuya superficie es de 11620 km².

Como propuestas de solución se establecen las siguientes:

- (1) Conservación del corredor de aves migratorias y pastizales.
- (2) Supresión de la agricultura en las zonas del bosque de galería y las actividades compensatorias.
- (3) Conveniencia de formación de grupos de negociación para la extensión de área de conservación binacional.
- (4) Necesidades de infraestructura y la elaboración de un plan de acción para la cuenca y/o los municipios y comunidades ejidales.

- ***Assessment of Water Conditions and Management Opportunities in Support of Riparian Values. BLM San Pedro River properties, Arizona. Project Completion Report. U.S Department of the Interior. Bureau of Land Management.***

El objetivo del estudio de evaluación fue determinar la dependencia del flujo superficial en el río San Pedro, respecto a las contribuciones de agua subterránea. El análisis está basado en las condiciones geológicas existentes y en información hidrológica e hidrogeológica, la cual fue utilizada para la conceptualización del sistema río-acuífero en la cuenca Alta del Río San Pedro.

Las conclusiones a que llegan en el estudio son las siguientes:

La Cuenca Alta contiene varios cientos de metros de depósitos sedimentarios consolidados y no consolidados, capaces de transmitir agua subterránea, los cuales hacia la parte sur, alcanzan espesores mayores a mil metros, en la zona de los bajos estructurales. Las unidades hidroestratigráficas de importancia son las unidades inferiores y superiores del relleno de cuenca y los depósitos sobreyacentes de la planicie de inundación, que forman los acuíferos regional y local respectivamente.

En el reporte se menciona que con el propósito conservar los diversos recursos valiosos a lo largo del Río San Pedro, es esencial el mantenimiento de las condiciones de saturación en el acuífero de la llanura de inundación. Como resultado de esta investigación, la conexión entre el hábitat ripariano, el escurrimiento superficial y el agua subterránea tanto en el acuífero de llanura de inundación como en el relleno de cuenca, quedó bien definida. Otras investigaciones, como la del Servicio Geológico de los Estados Unidos, que fue apoyada con un modelo de simulación, confirma también la relación hidrológica entre ambos sistemas acuíferos concluyendo que el uso consuntivo del agua subterránea ha reducido la cantidad total de descarga hacia los ríos San Pedro y Babocamari, alterado la relación original río-acuífero.

El Departamento de Recursos Hidráulicos de Arizona (ADWR), ha llevado a cabo un estudio detallado del régimen de flujo que incluye un modelo de simulación, estando de acuerdo con las conclusiones que establecen que el flujo de agua subterránea indica algunos cambios en los niveles de agua subterránea proyectados cerca del Río San Pedro que pueden afectar el régimen de escurrimiento del río, especialmente en los flujos más bajos. Esto es concordante con sus investigaciones que concluyen que los flujos bajos son extremadamente vulnerables al abatimiento por bombeo. La contribución de agua subterránea al flujo del río San Pedro es una componente crítica del régimen de flujo durante los periodos de flujo bajo, y una cancelación de esta fuente tendrá un efecto grave en la hidrología del río.

El funcionamiento hidrodinámico real del sistema de agua subterránea se representó con un modelo en el que se procuró conservar las características y procesos reales, de tal forma que se intentó reproducir lo mejor posible las condiciones observadas durante el desarrollo de las etapas previas del presente estudio y sus interpretaciones. Esta representación (modelo conceptual), incluyó entre otros aspectos relevantes, la geometría espacial del sistema, la definición de las unidades hidroestratigráficas y la cuantificación y distribución espacial de sus parámetros hidráulicos, distribución de cargas hidráulicas, zonas de recarga y descarga y esquema de dirección de flujo. Este modelo fue congruente con el entendimiento del sistema de flujo de aguas subterráneas, resultando congruente con el ambiente hidrogeológico y su respectivo régimen de aguas subterráneas.

“Actualización del Estudio Geohidrológico de las Cuencas del Río San Pedro y Norte del Río Sonora, en Cananea, Sonora., 2000. Elaborado por la empresa Consultores en Agua Subterránea, S.A. para GRUPO MÉXICO, MEXICANA DE CANANEA, S.A. de C.V.,

Como parte de sus actividades principales llevadas a cabo para cumplir con los objetivos planteados, se llevaron a cabo las siguientes actividades: actualización del censo de aprovechamientos de agua subterránea, cálculo del volumen de extracción, piezometría, determinar la variación de la calidad del agua subterránea, definición del modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del acuífero, interpretación de pruebas de bombeo, planteamiento del balance de aguas subterráneas y la elaboración de un modelo numérico de simulación hidrodinámica

Los resultados y conclusiones de este estudio fueron la base para la elaboración del presente documento, por lo que se discuten en los apartados correspondientes.

3. FISIOGRAFÍA.

3.1. Provincia Fisiográfica.

De acuerdo a la clasificación de Provincias Fisiográficas hecha por INEGI (1997), el área se encuentra comprendida dentro de dos Provincias Fisiográficas: Sierra Madre Occidental y Sierras y Llanuras del Norte.

La Sierra Madre Occidental Incluye la porción centro y sur del área, constituida principalmente por rocas ígneas intrusivas, extrusivas y en menor proporción por rocas metamórficas, las cuales configuran sierras que presentan elevaciones de 1600 hasta 2645 msnm. Por otra parte, dentro de esta provincia destaca una zona de valle, localizada al sur de Cananea en donde el terreno únicamente alcanza elevaciones de 1550 a 1611 msnm, y está conformada por una secuencia aluvial, predominantemente conglomerática.

La provincia Sierras y Llanuras del Norte comprende aproximadamente el 65% del área del acuífero, abarcando a la porción norte; se encuentra constituida principalmente por rocas sedimentarias y en menor proporción rocas volcánicas, las cuales configuran sierras que alcanzan elevaciones que van de 1400 a 2540 msnm. Dentro de esta provincia también se manifiestan extensas llanuras, cuyas elevaciones varían de 1350 a 1500 msnm, hacia el sector occidental y centro-occidental del área, constituido por aluviones.

3.2. Clima.

Con base en los datos históricos de precipitación y temperatura de la estación climatológica localizada en Cananea y apoyados con la Carta de Climas (Köppen modificada por E, García), se puede concluir que, según su régimen de lluvias, el clima de la región se clasifica como seco semiárido (BS1), con un cociente P/T mayor de 22.9, con lluvias de verano, pero con un porcentaje de lluvia invernal mayor de 10.2 de la precipitación total anual.

Temperatura media anual: De acuerdo a su régimen de temperatura, la zona se considera como templada con verano cálido y una temperatura media anual que varía entre 12 y 18° C, con una temperatura del mes más frío que varía entre -3 y 18° C, y la temperatura del mes más cálido es mayor de 18° C, extremoso, con una oscilación de las temperaturas medias mensuales mayor de 14° C.

Precipitación media anual: La precipitación media anual en el área es de 553.04 mm.

Evaporación potencial media anual: De la información aportada por los evaporímetros, se determinó que en la zona el valor de la evaporación potencial es de 2117 mm anuales.

3.3. Hidrografía.

La zona del acuífero se incluye, casi totalmente, dentro de la Región Hidrológica 07 “Río Colorado”. Una pequeña área de la porción occidental del acuífero pertenece a la Región Hidrológica 08 “Sonora Norte”. El área comprende dos Cuencas Hidrológicas:

(1) Una que corresponde a la Cuenca del Río Colorado dentro de la Región Hidrológica No. 07, corresponde a la Subcuenca del Río San Pedro (subcuenca 1), con un área de aproximadamente 1800 km² dentro del territorio Mexicano. Esta subcuenca tiene su continuación en territorio de los Estados Unidos de América.

(2) La Cuenca denominada Sonora Norte, correspondiente a la Región Hidrológica No. 09, ocupa una pequeña área de aproximadamente 150 km².

Corresponde a la Subcuenca Río San Pedro, perteneciente a la Región Hidrológica 07, la cual, como ya se mencionó, tiene su mayor desarrollo en territorio de los Estados Unidos de América.

Las principales serranías que dan forma a esta subcuenca son: al sur las Sierras de los Ajos y Elenita, al poniente la Sierra Mariquita, la Sierra San José hacia el oriente y finalmente las Montañas Huachuca hacia el norte.

3.4. Geomorfología.

El relieve de la zona se encuentra representado por montañas formadas por rocas sedimentarias, metamórficas y volcánicas, en donde el principal agente erosivo es el agua, constituyendo un sistema fluvial que a través de la precipitación y el escurrimiento en la superficie forma arroyos y ríos que desgastan a las rocas y depositan los volúmenes de sedimentos acarreados.

El área muestra estructuras complejas, que fueron originadas por plegamientos, cabalgamientos (como en la sierra San José), intrusiones y fallamientos, de tipo normal e inverso, que ocasionaron la formación de montañas y valles tectónicos, muy probablemente como el Valle del Río San Pedro, que fueron rellenados por fragmentos derivados del intemperismo y la erosión de las rocas preexistentes, constituyendo potentes espesores de material detrítico. Los esfuerzos distensivos provocaron fallas normales que modificaron los relieves, y originaron la formación de altos estructurales representados por las montañas, en tanto que los amplios y extensos valles caracterizan las fosas tectónicas. Hacia la porción occidental del área se localizan las montañas volcánicas, que adquieren formas irregulares constituidas por flujos de lavas y flujos piroclásticos, que en algunas zonas se encuentran sobre cuerpos graníticos.

4. GEOLOGÍA.

Las rocas que afloran en el área son de origen sedimentario, ígneo y metamórfico, y tienen una amplia distribución estratigráfica con edades que varían desde el Precámbrico hasta el Reciente (Figura No.2).

Las unidades más antiguas se localizan en la Sierra Los Ajos, el distrito minero de Cananea y la Sierra Huachuca; donde también se encuentran los afloramientos de las unidades paleozoicas, descansando discordantemente sobre las rocas precámbricas. El Mesozoico sedimentario se encuentra aflorando en la Sierra San José, localizada en la porción oriental del área, así como en varias localidades ubicadas al occidente; sin embargo, hacia la porción suroeste del área afloran rocas cretácicas de origen ígneo intrusivo y extrusivo. Unidades volcánicas cenozoicas se encuentran aflorando principalmente hacia la porción

occidental y suroccidental del área, aunque algunos afloramientos de rocas ígneas intrusivas se encuentran aflorando en la porción este-noreste.

El Valle del Río San Pedro, se encuentra cubierto principalmente por depósitos conglomeráticos y aluviones de edad terciaria. Los depósitos cuaternarios están representados por algunos conglomerados que afloran en el extremo suroeste del área y por material aluvial depositado como producto de la acción erosiva de los arroyos y ríos y por la disgregación de las unidades existentes, que son depositados al pie de las sierras y en los cauces de los arroyos.

El aspecto estructural en el área es complejo, ya que manifiesta fracturas profundas que permitieron la eyección de material basáltico, fallas normales que han provocado un escalonamiento principalmente hacia los extremos este y oeste del área y fallas inversas o de cabalgadura que ponen en contacto formaciones más antiguas sobre formaciones más jóvenes.

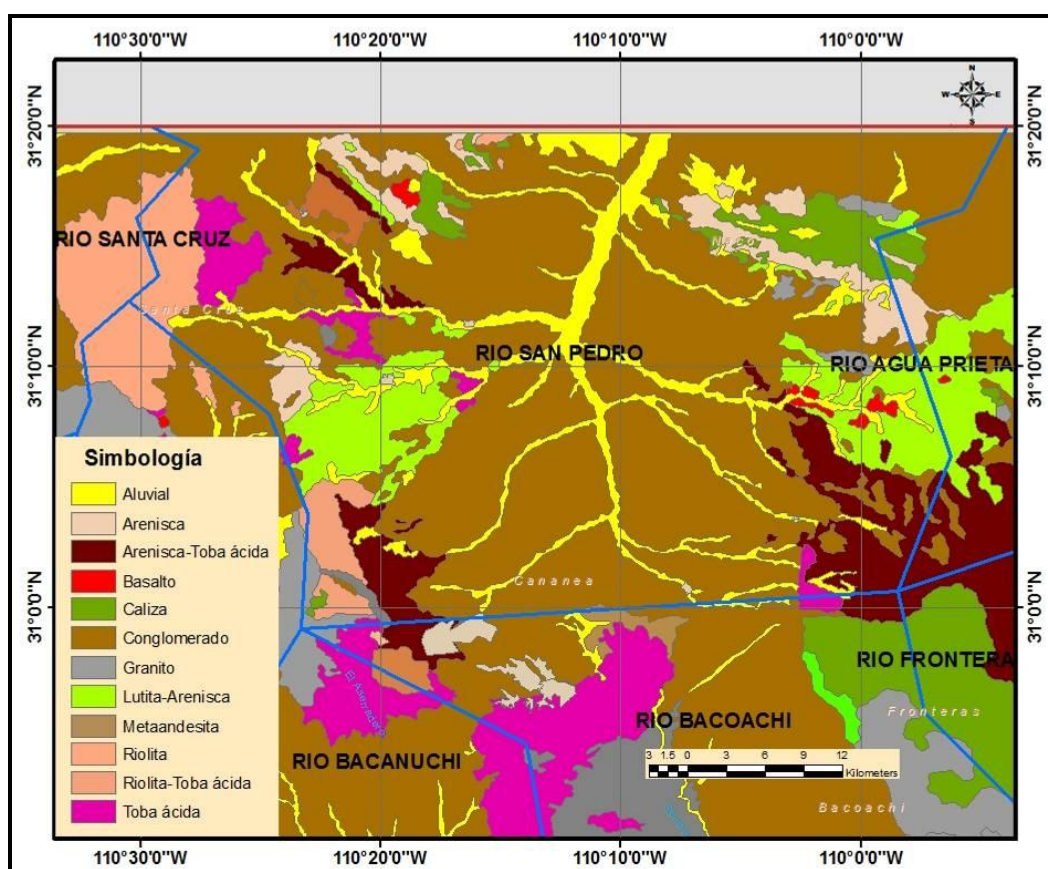


Figura No. 2. Mapa Geológico

4.1. Estratigrafía.

El rango estratigráfico de la columna geológica del área, abarca desde el Precámbrico hasta el Reciente, las cuales serán descritas a continuación iniciando con la más antigua, hasta la más joven.

Precámbrico. Está representado por una secuencia de rocas metamórficas, conformada por cuerpos de esquistos de biotita y sericita, que se encuentran en la sierra Los Ajos, ubicada al este de Cananea; se considera que estos materiales pertenecen al Precámbrico Medio, y son correlacionables con el Esquisto Pinal que aflora en el sector meridional de Arizona

(Contreras, 1986); estas rocas constituyen el basamento de la columna y están en contacto discordante con la secuencia sedimentaria paleozoica.

Por otra parte, en la región localizada al oeste de Cananea los esquistos están intrusionados por rocas graníticas que fueron datadas por Anderson y Silver (1977), determinado una edad de 1425 a 1475 ma.

Paleozoico. Las rocas pertenecientes a la era Paleozoica afloran en diversas partes del área, en donde su depósito representa el inicio de una sedimentación sobre una vasta y extensa plataforma. En la Sierra Los Ajos y en el distrito minero de Cananea se han identificado afloramientos que corresponden a la edad Cámbrico Inferior representados por las formaciones Bolsa y Cuarcita Capote (Valentine, 1936; Mulchay y Velazco, 1954). Ambas formaciones fueron definidas por los autores antes mencionados, de la siguiente manera:

Formación Bolsa. La parte inferior de esta formación es un conglomerado cuarcítico, con clastos de cuarzo lechoso menores de 3 cm de diámetro, la mayoría arredondados aunque hay algunos subangulosos incluidos en una matriz arenosa, en la parte inferior de este conglomerado se observa un gran contenido de micas; hacia la parte superior del conglomerado varía a una cuarcita arenosa de grano grueso con guijarros esporádicos y menor contenido de micas. La porción superior de la Formación Bolsa corresponde a una cuarcita arenosa de textura más fina que la parte media, conteniendo minerales arcillosos. El espesor medido en la Sierra Los Ajos es de 180 m y se encuentra sobreyaciendo discordantemente al esquisto Pinal del Precámbrico.

Cuarcita Capote. Esta unidad, esta compuesta por un paquete de 200 m de espesor de cuarcitas de color rosa dispuestas en capas medias, aflora en el distrito minero de Cananea, descansando discordantemente sobre rocas graníticas precámbricas.

Formación Abrigo. Las rocas de esta unidad corresponden con una secuencia de calizas arcillosas de estratificación delgada, variando hacia la parte superior a una caliza dolomitizada con escasos lentes arenosos y nódulos de pedernal. Se encuentra sobreyaciendo concordantemente tanto a la Formación Bolsa, como a la Cuarcita Capote. El espesor medido en la Sierra Los Ajos es de 175 m, el cual se adelgaza hacia el distrito minero de Cananea, hasta los 90 m. De acuerdo a su contenido fosilífero se le asigna una edad Cámbrico Medio-Superior.

Formación Martín. Su parte basal está compuesta por estratos gruesos y masivos de calizas arenosas que varían a calizas dolomitizadas con intercalaciones de estratos delgados de calizas con lentes arenosos. La formación presenta textura fina y un espesor de 46 m, medido en la zona del distrito minero de Cananea. De acuerdo a la presencia de abundantes corales silicificados, así como de fósiles de pequeños braquiópodos, se le ha asignado una edad que corresponde al Devónico Medio-Superior. La Formación Martín, sobreyace a la Formación Abrigo y subyace a la Formación Escabrosa.

Formación Escabrosa. Consiste de un paquete compuesto por potentes estratos de calizas bastante puras de 2 a 3 m de espesor, de color gris oscuro, que intemperizan a gris claro; hacia la base las rocas corresponden con calizas granulares, que varían hacia la parte superior a calizas incipientemente dolomitizadas con vetillas e inclusiones de calcita. La parte superior de la Formación Escabrosa corresponde a una caliza de grano fino con nódulos de pedernal que contienen abundantes fósiles de restos de crinoides, corales y fragmentos de braquiópodos, asignados al Mississípico. En el distrito minero de Cananea tiene un espesor de 50 m, mientras que en la Sierra los Ajos se incrementa a 180 m y al suroeste de la Sierra Huachuca el espesor es de 100 m. Sus contactos inferior y superior con las formaciones Martín y Horquilla son discordantes y concordantes, respectivamente.

Formación Horquilla. Consiste en una serie de calizas dispuestas en estratos delgados que varían de 0.5 a 1 m de espesor, de color gris rosado, que intemperizan en un gris azulado con tonos rojizos. Se intercalan con calizas arcillosas, dispuestas en estratos delgados de 30 cm de espesor, que contienen abundante pedernal, generalmente en nódulos y masas irregulares. Esta formación tiene la característica de ser muy fosilífera, con presencia de abundantes restos de crinoides, braquiópodos y fusulínidos, conjunto de fósiles que le asignan una edad Pensilvánico. En el distrito minero de Cananea se le determinaron 120 m de espesor y se correlaciona con la Formación Horquilla de la sierra de Palomas y la caliza Pastor de Placer de Guadalupe en Chihuahua.

Mesozoico. Varios autores han descrito afloramientos de rocas correspondientes al Cretácico Inferior (Taliaferro, 1933; Rangin, 1977 y Viveros 1965 localizados en las Sierras San José, sur de la Sierra Huachuca, La Mariquita y las estribaciones de la Sierra Los Ajos.

En la región de Cabullona, situada al noreste de Cananea, el Cretácico Inferior, está representado por el Grupo Bisbee conformado por cuatro formaciones que sobreyacen discordantemente a rocas paleozoicas, litológicamente constituyen una secuencia transgresiva, compuesta por: conglomerados, areniscas, lutitas y calizas. En el área las formaciones que se correlacionan con el Grupo Bisbee corresponden son:

Formación Glance. Consiste de un cuerpo masivo de conglomerados polimícticos y areniscas dispuestas en capas delgadas, cuyo espesor alcanza los 20 m, que sobreyace discordantemente a rocas paleozoicas y subyace a la Formación Morita. Por su posición estratigráfica se le asignó una edad correspondiente al Neocomiano.

Formación Morita. Secuencia de lutitas calcáreas y areniscas cafés, dispuestas en capas medias y delgadas, que hacia la cima tiende a presentar cuerpos de calizas arenosas; conforman un espesor de 540 m. De acuerdo a su contenido faunístico, se le ha asignado una edad Aptiano Superior-Albiano Inferior. Sus contactos inferior y superior con las formaciones Glance y Mural, respectivamente, son concordantes.

Formación Mural. Representa el periodo máximo de la transgresión, en donde se desarrolló un potente cuerpo de calizas de plataforma con desarrollos arrecifales de hasta 200 m de espesor. Las rocas son de color gris claro que intemperizan a gris blanquecino. Su contacto inferior es transicional y concordante con la Formación Morita y el superior es nítido y concordante con las rocas de la Formación Cintura. De acuerdo a su contenido de microfósiles, la Formación Mural abarca casi todo el Albiano y la parte Inferior del Cenomaniano.

Formación Cintura. Esta formación está constituida por una secuencia de intercalaciones de calizas arcillosas, areniscas y lutitas, dispuestas en estratos delgados; presentan una coloración gris que intemperiza en tonalidades anaranjadas y rojizas. La unidad conforma un espesor de 550 m. Debido a su posición estratigráfica y a su carencia de fósiles, se le asigna una edad Cenomaniano Inferior a Medio. En la Sierra San José estas formaciones se encuentran intensamente deformadas, desarrollándose fallas de cabalgadura que ocasionan el engrosamiento estructural de la columna sedimentaria.

Grupo Cabullona. Se encuentra representado por intercalaciones de lutitas y areniscas de coloración rojiza, de origen continental. Las lutitas son deleznales y se encuentran dispuestas en capas laminares y delgadas, con fracturamiento intenso; en tanto que las areniscas son de grano medio, cementadas por carbonato de calcio. Estas rocas afloran principalmente en las estribaciones de la Sierra de San José, Sierra Los Ajos, sur de la Sierra Huachuca y al este de la Sierra La Mariquita. La edad asignada es Turoniano-Maestrichtiano.

Cenozoico. Este periodo está caracterizado por la depositación de grandes volúmenes de material ígneo en casi todo el Estado de Sonora. En el área, Valentine (1936) agrupa a las rocas volcánicas en tres formaciones, siendo la más antigua la Formación Elenita, le sigue la Formación Henrieta y la más joven la Formación Mesa. Estas formaciones se encuentran separadas por discordancias notables; el espesor estimado para este grupo de formaciones es de 5000 m y forman verdaderos complejos volcánicos.

Formación Elenita. Consiste principalmente de traquitas y riolitas que descansan en discordancia sobre la secuencia carbonatada del Paleozoico. Subyace a la Formación Henrietta.

Formación Henrietta. Compuesta de dioritas, latitas, tobas, riolitas y en la cima traquiandesitas, brechas fluidales y tobas.

Formación Mesa. Esta formación es la que constituye la cima, y consiste de tobas y rocas volcánicas fragmentarias gruesas; presenta hacia la porción superior un importante derrame de gran espesor conocido como Andesita San Pedro. Esta unidad muestra un fracturamiento sin dirección preferencial. En las cercanías de las estribaciones de la Sierra Los Ajos se constituye por tobas y hacia el sureste de la Sierra San José por basaltos.

Para el Período **Plio-Cuaternario** se manifiesta el relleno de las cuencas tectónicas por espesores potentes de sedimentos continentales detríticos; representados por grandes y extensos paquetes de material conglomerático y aluviones terciarios provenientes seguramente de la erosión de rocas volcánicas, sedimentarias y metamórficas preexistentes, así mismo se manifiestan algunas eyecciones de material basáltico.

4.2. Geología Estructural.

La complejidad estructural que manifiesta el área está sustentada por la serie de eventos tectónicos que ocurrieron desde el Precámbrico hasta el Reciente. Sin embargo los eventos terciarios y pliocuaternarios son los que enmascaran los más antiguos.

Bajo esta perspectiva Rangin (1978), menciona que en los inicios del Terciario la región central y nor-oriental de Sonora, comienza un emplazamiento conjunto vulcano-plutónico de gran importancia, con alineación NNW-SSE, desde Cananea a Nacozari y fue la responsable de la mineralización de cobre diseminado en la región del distrito minero de Cananea. Este mismo autor menciona (1977), que la sierra San José forma parte de un conjunto de pequeñas serranías alargadas dispuestas en dirección WNW-ESE afectadas por fallas de cabalgadura que, junto con otras sierras, cabalgan la Cuenca de Cabullona en su borde NE.

Muy posiblemente, al igual que la Cuenca de Cabullona, el Valle del Río San Pedro se encuentra afectado principalmente en el extremo NE (Sierra San José) por deformaciones flexibles de gran radio de curvatura que forman anticlinales y sinclinales de orientación WNW-ESE. La Sierra San José se presenta como un anticlinal o monoclinal dividido en escamas que descansa anormalmente sobre el Cretácico Superior al SSW.

La tectónica cortante plio-cuaternaria está dominada por un sistema de fallas normales que cortan de manera independiente a las estructuras anteriores, con una tendencia que varía de NNW-SSW a NW (Rangin, 1977) y da origen a vastas depresiones como el Valle del Río San Bernardino, Valle del Río Agua Prieta y posiblemente al Valle del Río San Pedro; traduciéndose esta tectónica cortante.

4.3. Geología del Subsuelo.

Con base en los resultados de la geología del subsuelo: geofísica de resistividad, descripción de cortes litológicos; la interpretación hidrogeomorfológica, hidrología superficial y la interpretación de pruebas de bombeo, entre otros, fue posible definir un sistema acuífero heterogéneo y anisótropo de tipo libre conformado por dos medios: granular y fracturado.

El medio granular está constituido por materiales del Cenozoico, Terciario y Cuaternario que varían de no consolidados a poco consolidados que se encuentran rellenando la fosa tectónica del río San Pedro. Los cortes litológicos de pozos y la interpretación de sondeos eléctricos verticales, revelan que el espesor promedio del acuífero oscila entre los 250 y 350 metros, siendo mayor en la parte central del valle.

El medio fracturado está formado por rocas sedimentarias marinas del Mesozoico y por rocas volcánicas consolidadas cuya edad corresponde al Cretácico y Terciario. Existe información de pozos perforados en este medio, en la porción Sur del área, en donde la empresa Mexicana de Cananea S.A. de C.V. tiene emplazados sus aprovechamientos. Esta información junto con la geología y la geofísica realizada en el valle del río San Pedro sugieren un espesor del medio fracturado variable, que en algunas zonas puede ser del orden de 500 metros.

Las elevaciones que limitan el valle son las que a profundidad constituyen el medio donde tiene lugar el movimiento del agua subterránea, por lo que no se puede considerar que forman fronteras impermeables, ya que a través de ellas se establece la recarga. A través de las planicies también tiene lugar una recarga vertical al sistema procedente de la precipitación. La descarga del acuífero se realiza en forma de flujo base del río San Pedro, por evapotranspiración y por flujo subterráneo al norte, hacia el estado de Arizona en los Estados Unidos de América.

El granito y la lutita-arenisca, por su composición y escaso fracturamiento, se caracterizan por su baja permeabilidad, por lo que su presencia limitada fundamentalmente a las porciones noreste y noroeste, constituyendo fronteras al paso del agua subterránea. Figura No. 3.

Verticalmente la frontera superior es la posición del nivel freático y son las rocas volcánicas cuando su permeabilidad por fracturamiento desaparece. Esto sucede en la porción sur del acuífero, mientras en el extremo norte está constituida por rocas sedimentarias de baja permeabilidad. La información geológica, geofísica e hidrogeológica, sugiere una profundidad promedio del sistema acuífero de entre 350 y 450 metros.

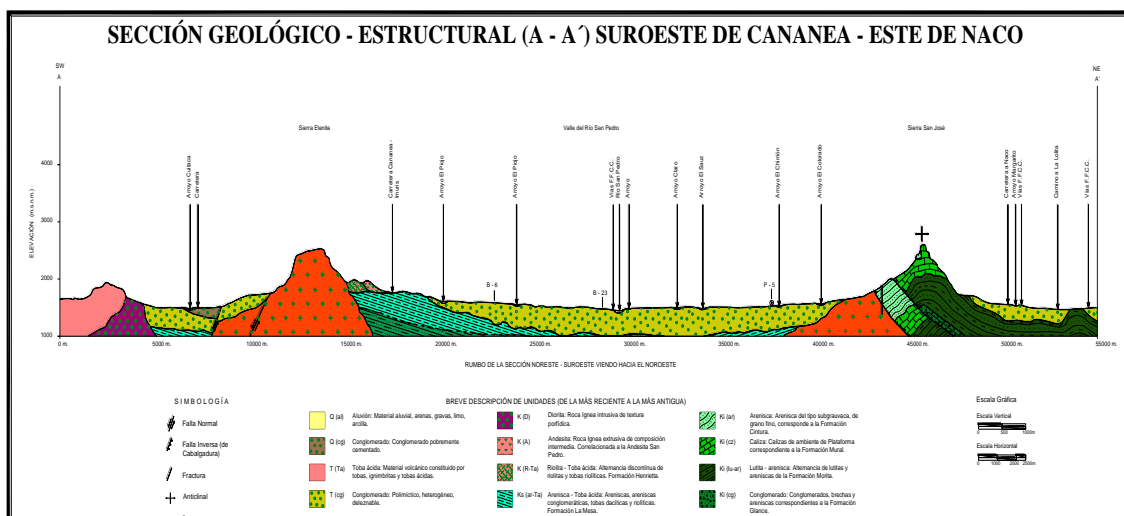


Figura No. 3 Sección geológica esquemática.

5. HIDROGEOLOGÍA.

5.1. Tipo de Acuífero.

Como se mencionó anteriormente, el sistema acuífero es de tipo libre y está constituido, en su parte superior, por un medio granular caracterizado por la presencia de depósitos clásticos no consolidados y poco consolidados del Cenozoico al Cuaternario que se encuentran rellenando la fosa tectónica sobre la cual labró su cauce el río San Pedro. El espesor de estos materiales alcanza los 350 m en el centro del valle. La parte inferior del acuífero está alojada en un medio fracturado, desarrollado tanto en rocas sedimentarias marinas del Mesozoico como en las rocas volcánicas de finales del Cretácico y Terciario.

5.2. Parámetros hidráulicos.

Como parte de las actividades del estudio realizado en el 2000, se ejecutaron 22 pruebas de bombeo, tanto en etapa de abatimiento como de recuperación. De acuerdo con los resultados de su interpretación, se observa que la transmisividad oscila entre 21.80 y 438.50 m²/día para el medio granular y 573.40 y 1008.12 m²/día para el medio fracturado. Los valores mayores corresponden a la porción centro-sur del área del acuífero, sobre todo en aprovechamientos que atraviesan el medio fracturado; en tanto que los valores más bajos se asocian a la presencia de materiales arcillosos en el centro del valle. Los valores de la conductividad hidráulica varían entre 0.11 y 5.1 m/día.

Sólo dos pruebas pudieron contar con pozo de observación, realizadas en aprovechamientos de la empresa Minera de Cananea, obteniéndose un valor de coeficiente de almacenamiento de 0.029.

5.3. Piezometría.

La definición de áreas de recarga y descarga, y consecuentemente trayectorias de flujo de agua subterránea, puede ser lograda mediante diversos indicadores siendo uno de ellos la medición de los niveles piezométricos, mediante los cuales no solo es posible identificar estas zonas sino también componentes verticales de flujo subterráneo, ascendentes y descendentes.

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea se tomó en cuenta la información recabada durante los trabajos previos realizados en noviembre de 1980, enero de 1984, diciembre de 1989, octubre de 1995, abril de 1997, enero de 2000, junio de 2000.

5.4. Comportamiento hidráulico.

5.4.1. Profundidad al nivel estático.

Las configuraciones de la profundidad al nivel estático corresponden a las lecturas piezométricas de noviembre de 1980, enero de 1984, diciembre de 1989, octubre de 1995, enero de 2000 y junio de 2000.

En las configuraciones de profundidad al nivel estático elaboradas para las seis fechas señaladas anteriormente, se observan valores que varían entre 10 y 90 m, correspondiendo las profundidades menores a las obras localizadas en la salida del valle y en las márgenes del Río San Pedro, en su tramo aguas abajo, en tanto que las mayores se registran en los pozos situados en las porciones noroeste y sureste del valle. Las figuras Nos. 4 y 5 muestran la configuración de la profundidad al nivel estático para octubre de 1995 y enero de 2000.

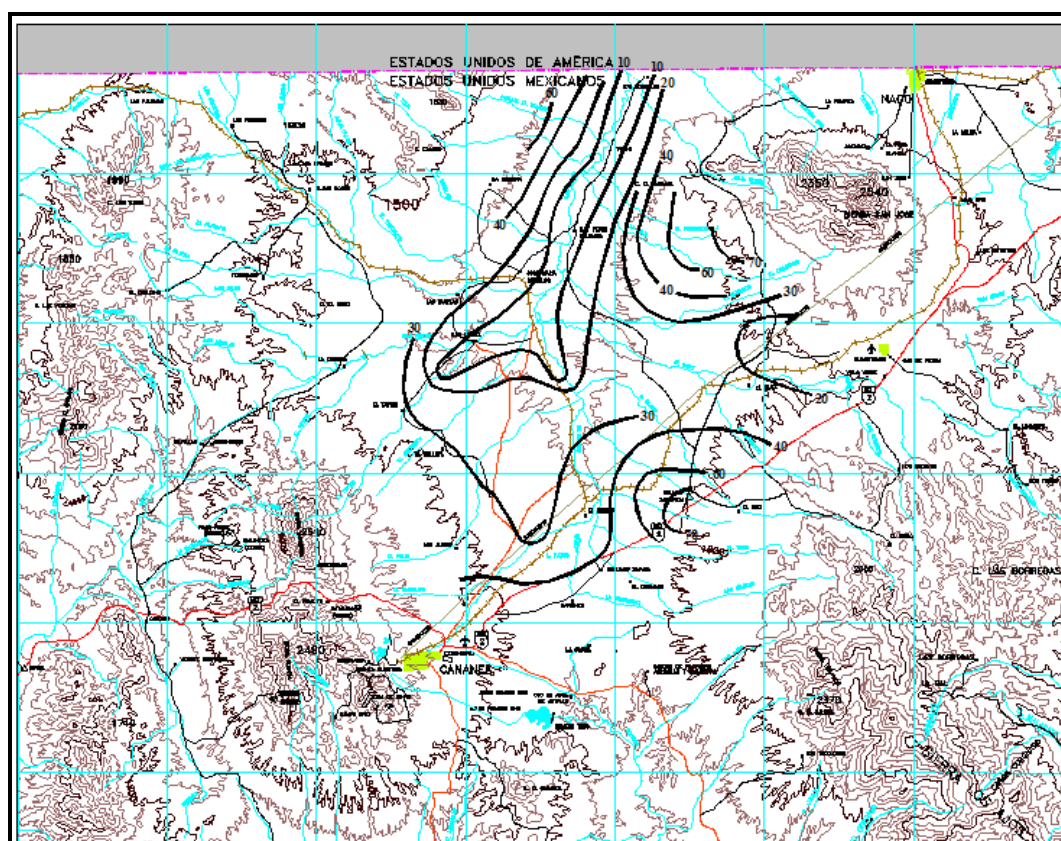


Figura No. 4. Profundidad al nivel estático en m (Octubre de 1995).

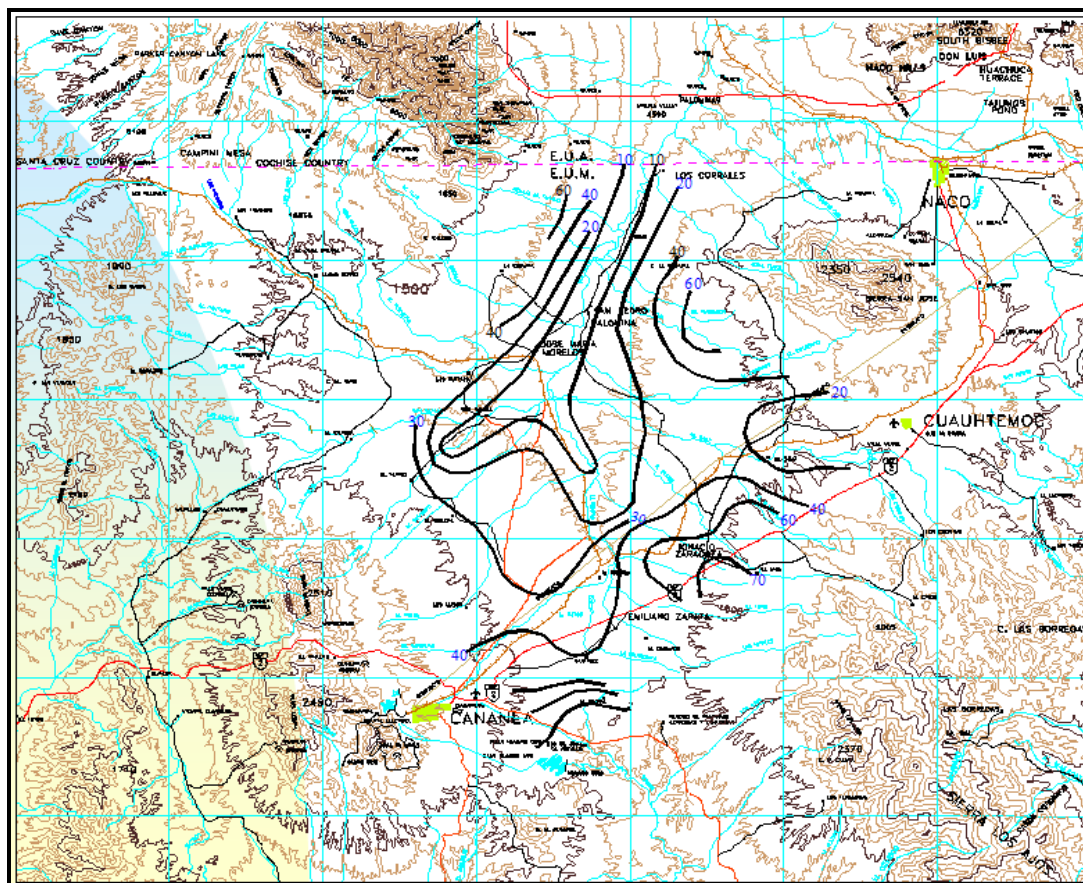


Figura No. 5. Profundidad al nivel estático en m (enero de 2000).

5.4.2. Elevación del nivel estático.

Aunque las configuraciones de la elevación del nivel estático se elaboraron para las mismas fechas de piezometría mencionadas anteriormente para fines del balance de aguas subterráneas sólo se consideran las que corresponde a 1995 y 2000.

En cuanto a la forma general de las configuraciones, se puede decir que es convergente hacia el tramo final del río; se observa que las mayores elevaciones se presentan en las proximidades de las elevaciones que bordean al valle; y las menores en las porciones centro y norte del valle en la porción ripariana del río. Hacia la porción sur de la cuenca, la configuración define un parteaguas subterráneo que es coincidente con el superficial. Para 1989 la muestra hacia la porción sur un pequeño cono de abatimiento localizado en la zona de alta concentración de la extracción, realizada preferentemente por los pozos de la empresa minera Cananea. En las configuraciones de 1995 y 2000 se mantiene este comportamiento (figuras No. 6 y 7).

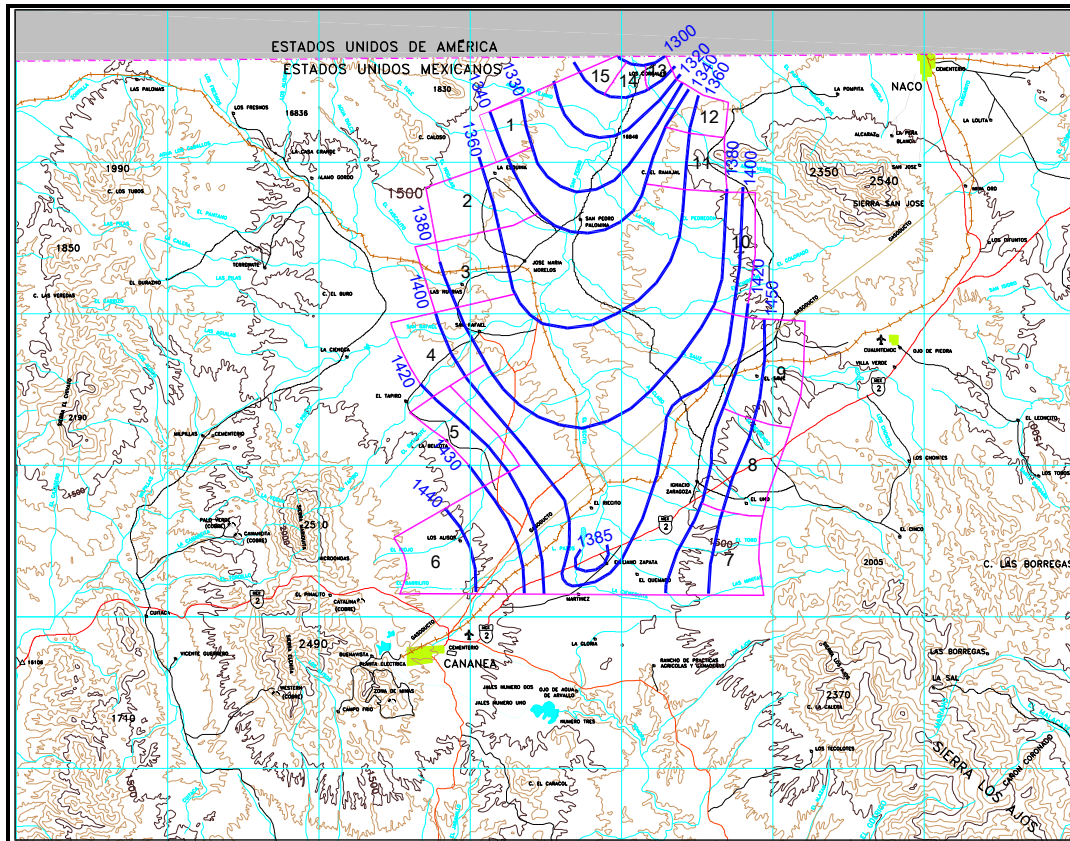


Figura No. 6. Elevación del nivel estático en msnm (octubre 1995).

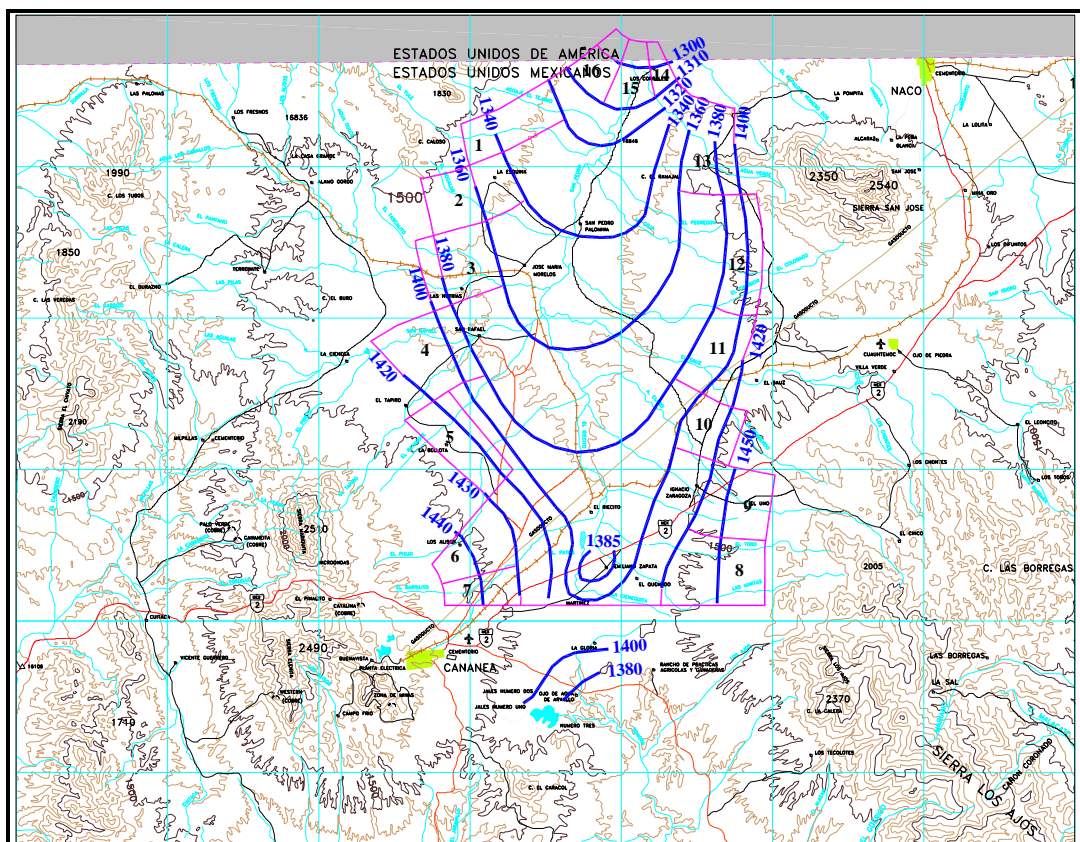


Figura No. 7. Elevación del nivel estático en msnm (enero de 2000).

5.4.3. Evolución del nivel estático.

Se configuraron las curvas de igual evolución del nivel estático para los periodos 1980-1984, 1984-1989, 1989-1995 y 1995-2000. Las zonas de evolución negativa del nivel estático, corresponden con el abatimiento de la superficie freática, generado principalmente por la concentración del bombeo que se realiza a través de pozos, y las positivas a recuperaciones que pueden ocurrir como consecuencia de recargas extraordinarias o disminución de ritmo de bombeo, entre otras causas.

Para el primer periodo, de noviembre de 1980 a enero de 1984, se observan ligeras evoluciones negativas en la porción sureste del valle, ocasionadas por el incremento de la extracción de los pozos para uso industrial de la empresa minera asentada en Cananea; en el resto del valle las variaciones no son notables, en general son poco significativas. Se manifiestan tanto abatimientos como recuperaciones de tipo local.

En el segundo, periodo de enero de 1984 a diciembre de 1989, destacan las evoluciones negativas en un área reducida de la porción sur, en la zona de Patos, llegando a tener valores máximos de 20 m para dicho periodo, que representa un abatimiento de 4 m por año. Este descenso es el resultado del incremento en las extracciones de la batería de pozos de la empresa minera.

Para el tercer periodo, de diciembre de 1989 a octubre de 1995, se presentan nuevamente evoluciones negativas en la porción mencionada anteriormente, pero éstas son menores, además de extenderse hacia el oriente, aparentemente se inicia una estabilización con ritmos de abatimiento cada vez menores. En el resto del área las variaciones son poco significativas.

El cuarto periodo, que comprende de octubre de 1995 a enero de 2000 (Figura No.8), es muy similar al anterior, donde la zona de abatimiento que corresponde a la de extracción mayor, tiende a la estabilización; los abatimientos máximos son de solo 40 cm por año. Nuevamente en el resto del área, los abatimientos y recuperaciones son insignificantes.

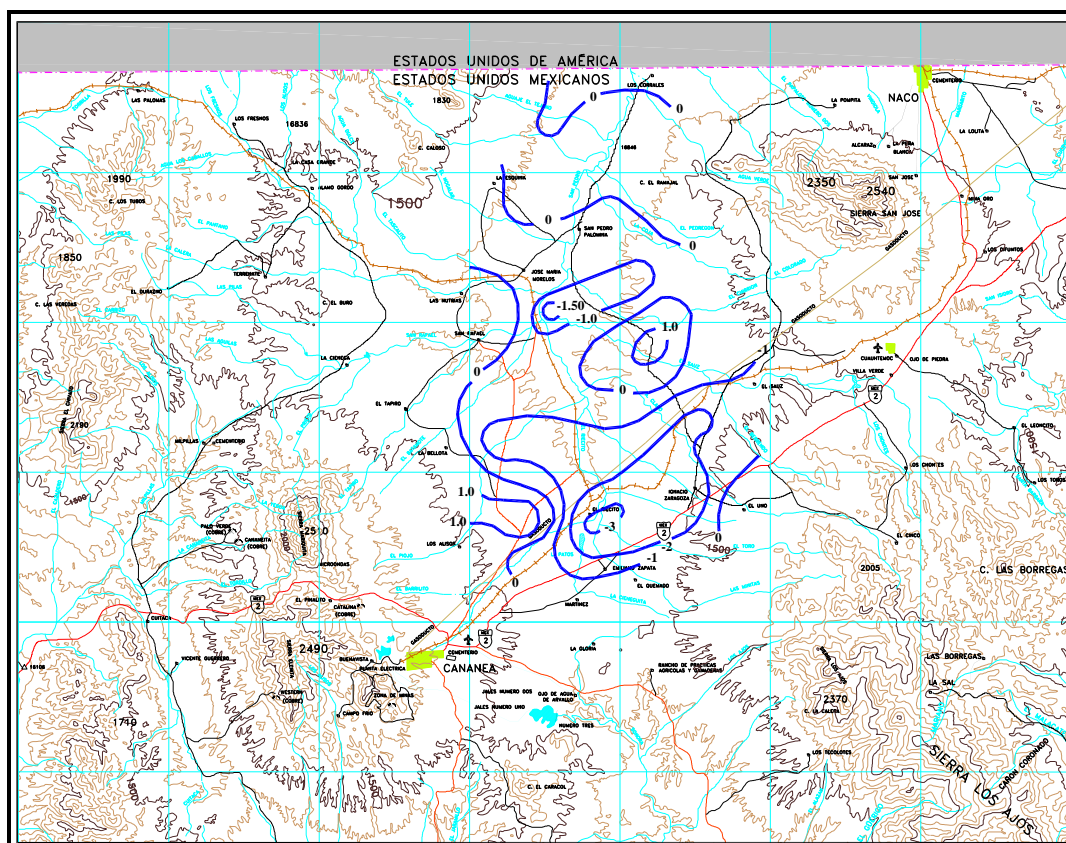


Figura No. 8. Evolución del nivel estático en m (1995 – 2000).

5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.

Con respecto a la hidrogeoquímica, tomando en cuenta los resultados de los análisis físicoquímicos realizados como parte del estudio efectuado en el año 2000 y su interpretación, es importante señalar la diferencia en la composición química que se observa en las aguas muestreadas en la zona de Ojo de Agua (extremo sur del acuífero), lo que indica que su origen es distinto al de las aguas del resto del valle del río San Pedro. Es posible que el agua provenga de las rocas subyacentes a los depósitos granulares a través del sistema de fracturamiento de las rocas volcánicas.

Se puede concluir que, en general, el agua subterránea en el acuífero Río San Pedro es de buena calidad, apta para cualquier uso. Por su contenido iónico se considera agua meteórica de reciente infiltración. Las pequeñas variaciones que se presentan en las concentraciones iónicas no permiten asociar claramente la calidad del agua con el comportamiento hidrodinámico del sistema.

En la zona del Barrilito, se presenta una contaminación incipiente por la descarga de aguas residuales sin tratamiento derivadas del sistema de alcantarillado de la ciudad de Cananea. En la zona de San Pedro Palominas y San Rafael los contenidos de nitratos se asocian con indicios de contaminación causada por las descargas agropecuarias.

De acuerdo con los resultados de los análisis de las muestras de agua tomadas en el año 2000, es posible observar que en general en la mayor parte del valle predominan concentraciones de Sólidos Totales Disueltos (STD) menores de 500 mg/l (Figura No.9); las menores concentraciones de este rango se presentan en la porción centro sur del acuífero, incrementándose ligeramente hacia el norte, hasta llegar a la línea fronteriza. De esta manera, se puede identificar que las zonas de recarga corresponden a las partes altas que

bordean el valle mientras que la zona de descarga corresponde a la zona ribereña del río San Pedro y la porción centro norte de la cuenca. La excepción a este esquema de flujo lo constituye un pozo situado al oriente del área que registra un valor de 600 mg/l de STD, así como la zona del Barrilito que con una concentración de 1100 mg/l que puede tener su origen en focos puntuales de contaminación. La zona de Ojo de Agua, con valores de 590 mg/l de STD, parece constituir un sistema hidráulico subterráneo diferente al del valle del río San Pedro.

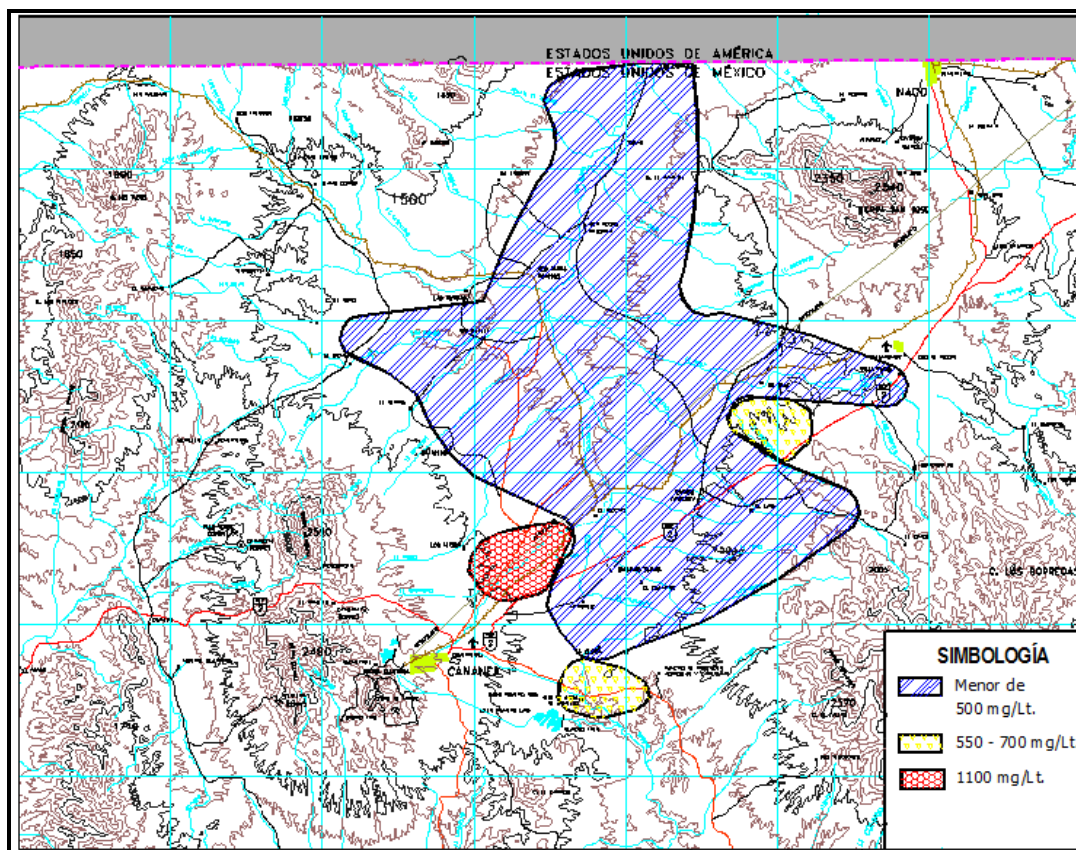


Figura No. 9. Concentración de Sólidos Totales Disueltos para el año 2000 (en mg/l).

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRIA.

El punto de partida para la integración del censo de las captaciones de aguas subterráneas del Valle del Río San Pedro fue el estudio geohidrológico realizado en el año de 1982, que consignó un total de 83 aprovechamientos, de los cuales 14 se destinaban a la actividad agrícola, 44 al uso doméstico y pecuario, 11 al sector industrial y los 14 restantes tenían otros usos.

De acuerdo con los resultados reportados en el último censo realizado en el año 2000, existen en el acuífero un total de 200 obras que aprovechan las aguas subterráneas en el Valle del Río San Pedro, de los cuales el 34% es destinado a uso ganadero, el 27% a uso agrícola, 30% a uso industrial, 6% a uso doméstico-abrevadero, 1% a uso recreativo, 2% destinado a otros usos. En volumen de extracción conjunto estimado asciende a los 22.3 hm³ anuales, de los cuales 5.1 hm³ (22.9%) se destinan a la actividades agrícolas, 5.3 (23.8%) al abastecimiento público-urbano, 10.5 más (47.0%) para el sector industrial y los 1.4 hm³ restantes (6.3%) para satisfacer las necesidades del uso doméstico-abrevadero.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRRANEAS.

La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga), y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero, en el periodo de tiempo establecido. El balance de aguas subterráneas se definió en una superficie de 590 km², que corresponde a la zona donde se localizan los aprovechamientos del agua subterránea. Aunque existe información piezométrica anterior, se consideró el periodo 1995-2000 ya que durante éste se tiene mayor cobertura espacial y una mejor confiabilidad de las mediciones. Además, esto permitirá una evaluación que tome en cuenta condiciones más actuales.

La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de la conservación de la masa es la siguiente:

$$\text{Entradas (E)} - \text{Salidas (S)} = \text{Cambio de almacenamiento}$$

Aplicando esta ecuación al estudio del acuífero, las entradas quedan representadas por la recarga total, las salidas por la descarga total y el cambio de masa por el cambio de almacenamiento de un acuífero:

$$\text{Recarga total} - \text{Descarga total} = \text{Cambio de almacenamiento en el acuífero}$$

7.1. Entradas.

La recarga total que recibe un acuífero está constituida por la recarga natural y la recarga incidental o inducida que se origina por la infiltración del agua, superficial o subterránea, que se destina a las actividades agrícolas y al abastecimiento de agua potable de los centros de población.

7.1.1. Recarga.

De acuerdo con el modelo conceptual definido para el acuífero Río San Pedro, las entradas están integradas por la recarga natural que se produce por efecto de la infiltración de la lluvia que se precipita en el valle y a lo largo de los escurrimientos (Rv) y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (Eh).

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del riego agrícola y del agua residual de las descargas urbana, así como las fugas en el sistema de abastecimiento de agua potable, constituyen otra fuentes de recarga al acuífero. Estos volúmenes se integran en la componente de recarga inducida (Ri).

Recarga vertical (Rv).

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se tiene información para calcular el cambio de almacenamiento (ΔV), así como las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance definida por la siguiente expresión.

$$Eh + Rv + Ri - B - Sh - ETR - Dn = \pm \Delta V(S) \quad \text{---- (1)}$$

Donde:

Eh: Recarga por flujo horizontal
Rv: Infiltración por lluvia
Ri: Recarga inducida

B: Bombeo
Sh: Salidas por flujo horizontal
ETR: Evapotranspiración real
Dn: Descargas naturales por flujo base
 $\Delta V(S)$: Cambio en el volumen almacenado

De esta manera, despejando la recarga vertical:

$$R_v = Sh + B + ETR + Dn - \Delta V(S) - E_h - R_i \text{ ---- (2)}$$

7.1.2. Entradas subterráneas horizontales (E_h).

Una fracción del volumen de lluvia que se precipita en las zonas altas del área se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través de los piedemonte, para posteriormente llegar a recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación localizada en la planicie.

El cálculo de entradas por flujo horizontal se realizó con base en la Ley de Darcy, partiendo de la configuración de elevación del nivel estático para 1995 y 2000 (figuras Nos. 6 y 7) y de los valores de transmisividad obtenida a través de las pruebas de bombeo efectuadas en pozos distribuidos en la zona, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$Q = T * B * i$$

Donde:

Q = gasto que pasa por un determinado canal de flujo;

T = transmisividad;

B = ancho de la celda;

i = gradiente hidráulico

La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada uno de los canales establecidos. En la tabla No.2 se pueden observar los valores obtenidos para cada año, de la que se desprende que el valor promedio para el periodo es de **29.5 hm³/año**.

Entradas Subterráneas (octubre de 1995)							
CANAL	ANCHO B (m)	LONGITUD L (m)	$h_2 - h_1$ (m)	Gradiente i (m)	T (m^2/s)	CAUDAL Q (m^3/s)	VOLUMEN ($hm^3/año$)
1	2988	2679	20	0.0075	0.00116	0.0259	0.8
2	4596	6347	40	0.0063	0.00232	0.0672	2.1
3	4334	5665	40	0.0071	0.000787	0.0241	0.8
4	3944	4443	40	0.0090	0.000787	0.0279	0.9
5	6902	2912	20	0.0069	0.00232	0.1100	3.5
6	6935	5771	20	0.0035	0.00232	0.0558	1.8
7	5235	4673	60	0.0128	0.001736	0.1167	3.7
8	6546	3800	60	0.0158	0.001736	0.1794	5.7
9	7400	3725	60	0.0161	0.00232	0.2765	8.7
10	8258	1905	40	0.0210	0.000037	0.0064	0.2
11	3589	4995	40	0.0080	0.000037	0.0011	0.0
12	3207	3305	40	0.0121	0.000037	0.0014	0.0
Total entradas							28.1
Entradas Subterráneas (enero de 2000)							
CANAL	ANCHO B (m)	LONGITUD L (m)	$h_2 - h_1$ (m)	Gradiente i (m)	T (m^2/s)	CAUDAL Q (m^3/s)	VOLUMEN ($hm^3/año$)
1	3089	6880	40	0.0058	0.00116	0.0208	0.7
2	3977	6396	40	0.0063	0.00232	0.0577	1.8
3	4572	5078	40	0.0079	0.000787	0.0283	0.9
4	4296	4873	40	0.0082	0.000787	0.0278	0.9
5	7982	2899	20	0.0069	0.00232	0.1278	4.0
6	3230	5189	20	0.0039	0.00232	0.0289	0.9
7	2126	4550	20	0.0044	0.00232	0.0217	0.7
8	4228	5752	60	0.0104	0.001736	0.0766	2.4
9	5117	3676	60	0.0163	0.001736	0.1450	4.6
10	4216	3631	40	0.0110	0.001736	0.0806	2.5
11	5424	3526	40	0.0113	0.002373	0.1460	4.6
12	8770	1905	40	0.0210	0.001192	0.2195	6.9
13	6210	3407	40	0.0117	0.0000037	0.0003	0.0
Total entradas							30.9

Tabla No.2. Cálculo de las entradas subterráneas para octubre de 1995 y enero de 2000.

7.1.3 Recarga inducida (R_i)

En esta variable se incluyen los volúmenes de infiltración de agua que se producen por concepto de los excedentes del riego en las zonas agrícolas, las fugas en los sistemas de abastecimiento de agua potable y la que se origina por la descarga de las aguas negras sobre el río.

Retorno del riego (R_r). Aún en sistemas de riego muy eficientes, un cierto volumen del agua aplicada en el riego no es usado como uso consuntivo, se infiltra y eventualmente alcanza la superficie freática. Esta contribución al acuífero se le conoce como retorno de riego y según Jacob Bear (1970) su valor varía entre el 20 y 40 % del volumen usado en la irrigación. Para este caso particular se consideró como:

$$R_r = 0.20 (5.1 \text{ hm}^3/\text{año})$$

$$R_r = 1.0 \text{ hm}^3/\text{año}$$

Recarga debido a la infiltración de aguas negras (R_{an}). En el caso de la zona del acuífero las aguas negras municipales de la ciudad de Cananea se vierten en un arroyo. Esta contribución al acuífero se estima del orden de 75 %. Para la estimación de los volúmenes descargados de aguas negras para diferentes años, se considera que el 75% de la demanda de agua potable se descarga como aguas negras. De esta manera se tiene que:

$$R_{an} = 0.75 (0.75) (5.3 \text{ hm}^3/\text{año})$$

$$R_{an} = 3.0 \text{ hm}^3/\text{año}$$

De lo anterior se concluye que el valor total de la recarga inducida es: $R_i = 4.0 \text{ hm}^3/\text{año}$

7.2. Salidas.

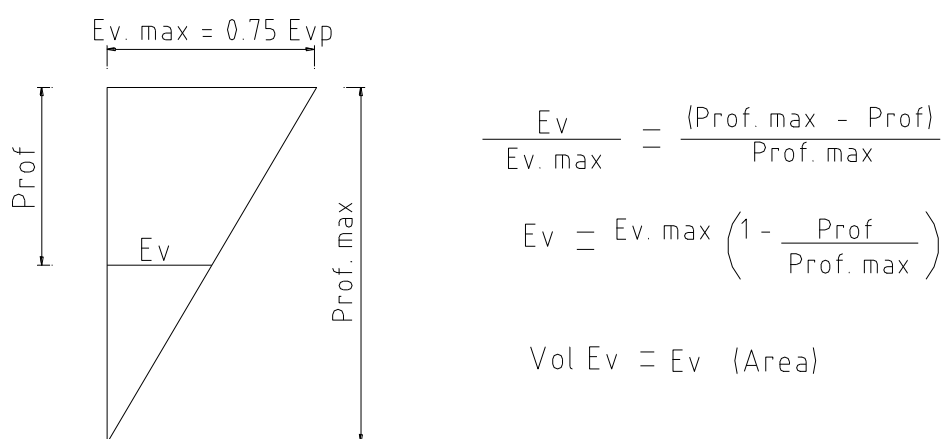
La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B), las salidas subterráneas hacia el mar (Sh), evapotranspiración (ETR) y descargas naturales por flujo base (Dn) del Río San Pedro.

7.2.1. Evapotranspiración real (ETR).

Es otro de los mecanismos por los que puede salir el agua subterránea de un sistema. Este parámetro es la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas, por lo tanto es considerada una forma de pérdida de humedad del sistema. Existen dos formas de evapotranspiración: la que considera el contenido de humedad en el suelo y la que toma en cuenta la etapa de desarrollo de las plantas (Evapotranspiración Potencial y la Evapotranspiración Real), el escurrimiento y el volumen de evapotranspiración real (ETR). Este parámetro es utilizado para la recarga potencial de infiltración. Ésta componente se presenta únicamente en lugares donde existen niveles freáticos someros.

Para el caso particular del acuífero Río San Pedro donde existe una corriente superficial perenne, la evapotranspiración se presenta en las proximidades del río San Pedro donde existen niveles freáticos someros y vegetación natural.

De los datos reportados por evaporímetros en la zona se determina que la evaporación potencial promedio es de 2117 mm. Si tomamos en cuenta que su valor se determina en un almacenamiento pequeño, usaremos un factor de corrección de 0.75. Si consideramos que únicamente en una superficie 12.1km² se presentan niveles freáticos someros, con un valor máximo de 2 m de profundidad y la variación de la evaporación con respecto a la profundidad, la estimación de la evapotranspiración se realiza mediante la siguiente expresión:



$$ETR = \frac{0.75 (Evap. Prom.) (Area)}{2}$$

Esta variable no presenta variaciones significativas con respecto a los diferentes periodos, por lo cual, las salidas por evapotranspiración se consideraron **9.6 hm³/ año** como valor promedio.

7.2.2. Bombeo (B).

Esta componente corresponde a la extracción total por bombeo de agua subterránea que se realiza para los diferentes usos en el área de balance. Para el periodo de 1995-2000, el valor promedio es de **22.3 hm³/año**.

7.2.3. Salidas subterráneas (Sh).

Las salidas subterráneas que ocurren hacia los EUA fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir también de la configuración de elevación del NE presentada para los años 1995 y 2000 (figuras Nos. 6 y 7). En la tabla No. 3 se presenta el valor para cada año, de la que se puede deducir que el valor promedio para el periodo es de **10.8 hm³/año**.

Salidas Subterráneas (octubre de 1995)							
CANAL	ANCHO B (m)	LONGITUD L (m)	$h_2 - h_1$ (m)	Gradiente i (m)	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
13	1598	3066	20	0.0065	0.01505	0.1569	4.9
14	1188	4210	20	0.0048	0.01505	0.0849	2.7
15	1227	4515	20	0.0044	0.01505	0.0818	2.6
Total salidas							10.2
Salidas Subterráneas (enero de 2000)							
CANAL	ANCHO B (m)	LONGITUD L (m)	$h_2 - h_1$ (m)	Gradiente i (m)	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
14	1197	2901	20	0.0069	0.01505	0.1242	3.9
15	1660	4304	20	0.0046	0.01505	0.1161	3.7
16	1895	4700	20	0.0043	0.01505	0.1214	3.8
Total salidas							11.4

Tabla No.3. Cálculo de las salidas subterráneas para octubre de 1995 y enero de 2000.

7.2.4. Descargas naturales por flujo base (Dn).

Para la estimación de las salidas por flujo base del río, que representan el drenado del acuífero, se tienen datos para el periodo que comprende de 1980 a 2000, aforados en la estación Palominas, localizada aproximadamente a 15 km de la línea fronteriza internacional, en territorio de los Estados Unidos de América, sobre el Río San Pedro. De la observación de datos se observa que el volumen ha variado en el transcurso del tiempo, siendo notable su tendencia a desaparecer. Para el periodo 1980-1984, el volumen era de 8.0 hm³/año, en tanto que para el periodo que estamos considerando para el balance de aguas subterráneas, 1995-2000, su valor promedio fue de 1.3 hm³/año.

De esta manera, **Dn = 1.3 hm³/año**.

7.3. Cambio de almacenamiento.

El cambio de almacenamiento representa el volumen ganado o drenado por acuífero y se calcula a partir de la evolución piezométrica observada en el área de balance y del coeficiente de almacenamiento. Para este caso particular, debido a que el valor del coeficiente de almacenamiento (0.029) sólo fue obtenido en dos sitios muy locales y dado que se cuenta con información para plantear ecuaciones de balance para distintos periodos de tiempo, se propone incorporar el coeficiente de almacenamiento como una incógnita de un sistema de ecuaciones.

El cambio de almacenamiento se calcula mediante la siguiente expresión matemática:

$$\Delta V = S \sum a_j (\pm \Delta h_j)$$

En donde **S** es el coeficiente de almacenamiento, **a** es una porción de área con una $\pm\Delta h$ evolución determinada.

Para la obtención de estos valores se presenta la Tabla No.4 en la que a partir de las configuraciones de igual evolución para los distintos periodos de balance, se hace un análisis de la distribución de los valores de evolución, que se aplica al área promedio de balance, de tal manera que el ΔV anual para cada periodo será el coeficiente de almacenamiento **S** multiplicado por el área de balance y la evolución ponderada anual.

PERIODO	Evolución Δh (m)	a_i (km ²)	(%)	EVOLUCIÓN PONDERADA POR PERIODO (m)	EVOLUCIÓN PONDERADA POR AÑO (m)	AREA PROM BALANCE (km ²)	EVOL * AREA (hm ³ /año)
1980 - 1984	-3	5.682	0.97	-0.5836	-0.1459	584.0835	- 85.2
	-2	33.054	5.64				
	-1.5	7.718	1.32				
	-1	285.372	48.71				
	0	220.175	37.58				
	1	25.286	4.32				
	1.5	8.609	1.47				
1984 - 1989	0	209.219	35.39	-1.488	-0.2976	583.2346	- 173.6
	1	65.625	11.10				
	-3	0.793	0.13				
	-1	140.130	23.71				
	-2	96.470	16.32				
	-5	38.199	6.46				
	-8	32.892	5.56				
1989 - 1995	-20	7.782	1.32	-1.0998	-0.1833	588.8528	- 107.9
	-1	163.85	27.72				
	0	208.99	35.35				
	1	11.9	2.01				
	-3	67.6	11.44				
1995 -2000	-2	138.8	23.48	-0.4845	-0.0969	590.2966	-57.2
	-1	141.92	24.01				
	0	328.87	55.64				
	-1.5	3.85	0.65				
	-3	13.65	2.31				
	-2	66.86	11.31				
	1	35.969	6.08				

Tabla No. 4. Estimación del cambio de almacenamiento

Para los cuatro periodos de balance se calcularon las componentes de la ecuación mostradas en la siguiente tabla, en la que R_v fue estimada a partir de un balance hidrometeorológico.

PERIODO	ENTRADAS Mm ³				SALIDAS Mm ³				ΔV Mm ³
	Eh	Rv	Rr	Ran	Sh	B	Dn	ETR	
1980 – 1984	23.4	283.0 α	0.6	2.8	14.6	13.1	8.1	9.6	-85.2 S
1984 – 1989	24.0	319.2 α	0.7	4.3	11.1	21.4	8.3	9.6	-173.6 S
1989 – 1995	26.6	297.9 α	0.9	2.6	10.3	20.2	4.5	9.6	-107.9 S
1995 – 2000	29.6	228.7 α	1.0	3.0	10.9	22.3	0.9	9.6	-57.2 S

Tabla No. 5. Valores de las componentes de la ecuación de balance para distintos periodos

Con esta información se forma el siguiente sistema indeterminado de ecuaciones:

PERIODO	ECUACIÓN
1980 – 1984	$283.0352 \alpha + 85.21778 S - 18.2177876 = 0$
1984 – 1989	$319.2451 \alpha + 173.57062 S - 21.4168100 = 0$
1989 – 1995	$297.9242 \alpha + 107.93672 S - 14.4893200 = 0$
1995 – 2000	$228.7399 \alpha + 57.19974 S - 10.1451300 = 0$

La forma general de la ecuación es: $a_1 \alpha + a_2 S \pm c = 0 + E$

En donde E es igual a un error, el cual debe ser muy pequeño.

Para la determinación de los valores de α y S, se realiza un ajuste por mínimos cuadrados, tal que la función de error sea mínima.

$\phi = \sum \delta_i^2$ sea mínima, siendo $\delta_i = E - E_i$

En donde:

$$E = \sum_{i=1} (a_1 \alpha + a_2 S \pm c - E_i)^2$$

Derivando la ecuación respecto a los parámetros e igualando a cero estas derivadas parciales, se obtiene el siguiente sistema determinado de ecuaciones.

$$\begin{aligned} 646214.37 \alpha + 249544.09 S - 37415.67 &= 0 \\ 249544.09 \alpha + 104621.97 S - 14874.46 &= 0 \end{aligned}$$

La solución de este sistema es: $\alpha = 0.038$ y $S = 0.052$

De esta manera, para el periodo 1995-2000, el valor del cambio de almacenamiento es:

$$\begin{aligned} \Delta V(S) &= -57.2 (0.052) = -3.0 \\ \Delta V(S) &= -3.0 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

Solución a la ecuación de balance

Una vez calculados los valores de las componentes de la ecuación de balance, el único parámetro de los que intervienen y que falta por determinar es la infiltración por lluvia (Rv), por lo que despejando este término de la ecuación definida, se tiene:

$$Rv = Sh + B + ETR + Dn - \Delta V(S) - Eh - Ri \text{ ---- (2)}$$

Sustituyendo valores:

$$Rv = 10.8 + 22.3 + 9.6 + 1.3 - 3.0 - 29.5 - 4.0$$

$$Rv = 7.5 \text{ Mm}^3/\text{año}$$

Por lo tanto la recarga total es igual a $Rt = Rv + Eh + Ri$

$$Rt = 7.5 + 29.5 + 4.0$$

$$Rt = 41.0 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

8. DISPONIBILIDAD.

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento establecido la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000, que establece la Metodología para calcular la disponibilidad media anual de las aguas nacionales, que en la fracción relativa a las aguas subterráneas, menciona que la disponibilidad se determina por medio de la expresión siguiente:

$$DAS = Rt - DNCOM - VCAS \quad ---- \quad (3)$$

Donde:

DAS = Disponibilidad media anual de agua subterránea en una unidad hidrogeológica.

Rt = Recarga total media anual.

DNCOM = Descarga natural comprometida.

VCAS = Volumen de agua subterránea concesionado e inscrito en el REPDA.

8.1. Recarga total media anual (Rt).

La recarga total media anual, corresponde con la suma de todos volúmenes que ingresan al acuífero, en forma de recarga natural (37.0 hm³/año), más la recarga inducida (4.0 hm³/año). Por lo tanto para el caso de este acuífero es de **Rt = 41.0 hm³/año**.

8.2. Descarga natural comprometida (DNCOM).

La descarga natural comprometida, se cuantifica mediante medición de los volúmenes de agua procedentes de manantiales o de caudal base de los ríos alimentados por el acuífero, que son aprovechados y concesionados como agua superficial, así como las salidas subterráneas que deben ser sostenidas para no afectar a los acuíferos adyacentes. Para el caso de la zona en estudio el valor de la descarga natural comprometida es de **17.0 hm³/año**, de los cuales 10.8 corresponden a las salidas subterráneas, 1.3 más al flujo base y los 4.9 hm³ anuales restantes al 50% de la evapotranspiración

8.3. Volumen concesionado de aguas subterráneas (VCAS).

El volumen anual de extracción, de acuerdo con los títulos de concesión inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), de la Subdirección General de Administración del Agua, con fecha de corte al 31 de diciembre de 2005, es de 19'901,501 m³/año.

8.4. Disponibilidad de aguas subterráneas (DAS).

La disponibilidad de aguas subterráneas, constituye el volumen medio anual de agua subterránea disponible en un acuífero, al que tendrán derecho de explotar, usar o aprovechar los usuarios, adicional a la extracción ya concesionada y a la descarga natural comprometida, sin poner en peligro a los ecosistemas. Conforme a la metodología indicada en la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000, se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de aguas subterráneas concesionado e inscrito en el REPDA, que de acuerdo con la expresión (3) resultó ser de **4,098,499 m³/año**.

$$4,098,499 \quad = \quad 41,000,000 \quad - \quad 17,000,000 \quad - \quad 19,901,501$$

La cifra indica que existen volúmenes adicionales para otorgar nuevas concesiones, de 4'098,499 m³ anuales en el Acuífero Río San Pedro.

ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El volumen anual de extracción, de acuerdo con los títulos de concesión inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDa), de la Subdirección General de Administración del Agua, con fecha de corte al 30 de abril de 2007 es de 29'101,501 m³/año.

Por lo tanto, el cálculo de la disponibilidad es de:

$$DAS = 41,000,000 - 17,000,000 - 29,101,501$$

$$DAS = -5,101,501 \text{ hm}^3/\text{año (Millones de metros cúbicos anuales)}.$$

La cifra indica que ya no existen volúmenes adicionales para otorgar nuevas concesiones, si no que, por el contrario, se tiene un déficit de 5'101,501 m³ anuales en el Acuífero Río San Pedro.

9. BIBLIOGRAFIA.

Compañía Minera de Cananea, S.A. 1980. "Estudio para el Abastecimiento de Agua a la Compañía Minera de Cananea, S.A.", (Primera Parte) realizado para la empresa Ingeniería y Procesamiento Electrónico, S.A., (IPESA).

Compañía Minera de Cananea, S.A. 1982. "Estudios Geohidrológicos Complementarios de los Acuíferos Río San Pedro, Son." realizado por la Empresa Ingeniería y Procesamiento Electrónico, S.A. (IPESA).

Compañía Minera de Cananea, S.A. 1983 "Modelo Matemático para Representar el Acuífero de los Alrededores de Cananea, Sonora, con el fin de Incrementar el Abastecimiento de Agua Subterránea a la Compañía Minera de Cananea" (Informe Parcial), realizado por la Empresa Hidrolegro, S.A.

Compañía Industrial Minera México, S.A. de C.V. 1997. "Diagnóstico de los Recursos de Agua Subterránea en la Cuenca Alta del Río San Pedro, Cananea, Son.", realizado por la empresa Ingenieros Civiles y Geólogos Asociados, S.A.

GRUPO MÉXICO, MEXICANA DE CANANEA, S.A. de C.V., 2000. "Actualización del Estudio Geohidrológico de las Cuencas del Río San Pedro y Norte del Río Sonora, en Cananea, Sonora", realizado por la empresa Consultores en Agua Subterránea, S.A.