



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO NOGALES (2650), ESTADO DE SONORA**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1. GENERALIDADES.....	2
Antecedentes	2
1.1. Localización.....	2
1.2. Situación administrativa del acuífero.....	4
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	5
3. FISIOGRAFÍA.....	6
3.1 Provincia fisiográfica.....	6
3.2 Clima.....	7
3.3 Hidrografía.....	9
3.4 Geomorfología.....	15
4. GEOLOGÍA.....	16
4.1 Estratigrafía.....	16
4.2 Geología estructural	19
4.3 Geología del subsuelo.....	21
5. HIDROGEOLOGÍA.....	22
5.1 Tipo de acuífero.....	22
5.2 Parámetros hidráulicos.....	23
5.3 Piezometría.....	23
5.4 Comportamiento hidráulico.....	24
5.4.1 Profundidad al nivel estático.....	24
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	25
5.4.3 Evolución del nivel estático.....	26
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea	26
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	27
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	27
7.1 Entradas.....	28
7.2 Salidas	28
7.2.1 Extracción por bombeo (B).....	28
7.2.2. Evapotranspiración (ETR).....	28
7.2.3 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	28
7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS)	29
7.3.1 Salida por flujo subterráneo horizontal (Sh).....	30
7.3.2 Recarga total (R)	30
8. DISPONIBILIDAD	31
8.1 Recarga total media anual (R).....	31
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	31
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	32
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	32
9. BIBLIOGRAFÍA	33

1. GENERALIDADES

Antecedentes

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) y su Reglamento contemplan que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) debe publicar en el Diario Oficial de la Federación (DOF), la disponibilidad de las aguas nacionales, en el caso de las aguas subterráneas esto debe ser por acuífero, de acuerdo con los estudios técnicos correspondientes y conforme a los lineamientos que considera la “NORMA Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua- Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales”.

Esta norma ha sido preparada por un grupo de especialistas de la iniciativa privada, instituciones académicas, asociaciones de profesionales, gobiernos estatales y municipales y de la CONAGUA.

La NOM establece para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas la realización de un balance de las mismas donde se defina de manera precisa la recarga, de ésta deducir los volúmenes comprometidos con otros acuíferos, la demanda de los ecosistemas y el volumen de extracción de aguas subterráneas.

Los resultados técnicos que se publiquen deberán estar respaldados por un documento en el que se sintetice la información, se especifique claramente el balance de aguas subterráneas y la disponibilidad de agua subterránea susceptible de concesionar.

La publicación de la disponibilidad servirá de sustento legal para la autorización de nuevos aprovechamientos de agua subterránea, transparentar la administración del recurso, planes de desarrollo de nuevas fuentes de abastecimiento, resolver los casos de sobreexplotación de acuíferos y la resolución de conflictos entre usuarios.

1.1. Localización

El acuífero Nogales, definido con la clave 2650 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción norte del Estado de Sonora, entre las coordenadas geográficas 31° 13' y 31° 20' de latitud norte, y 110° 53' y 111° 04' de longitud oeste, figura No. 1, cubriendo una superficie de 120 km².

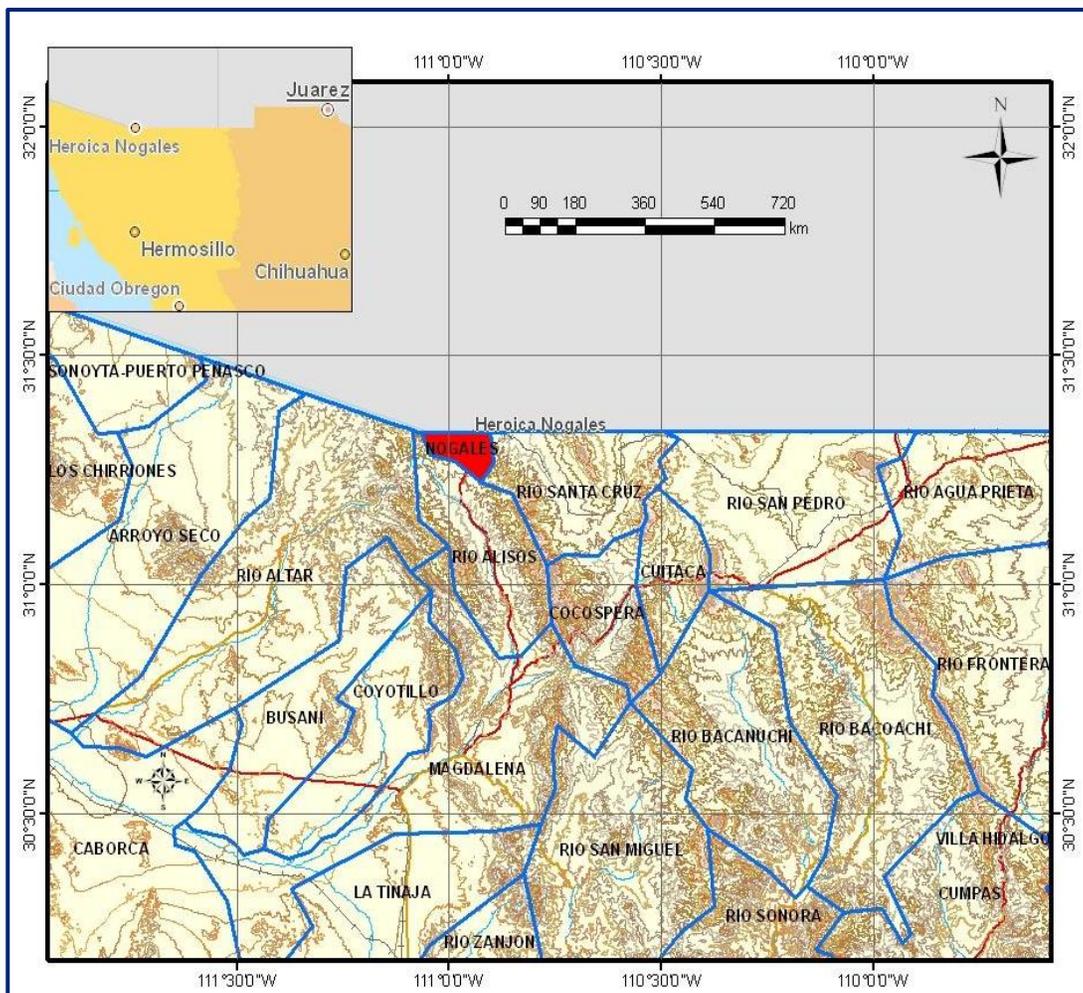


Figura 1. Localización del acuífero

Dentro de los límites del acuífero se localiza la ciudad de Nogales, Sonora, la cual ocupa una porción muy importante de la pequeña superficie del área total del acuífero, con una población de 156,854 habitantes según datos del INEGI, Censo 2000. El acuífero queda completamente dentro del municipio de Nogales, Sonora.

El área tiene por límites: al norte la línea divisoria internacional con los Estados Unidos de América; al poniente las sierras de Cordón Maestro, Las Avispas y Cíbuta; al oriente las estribaciones de la sierra El Pinito, y al sur la prolongación de la sierra de Cíbuta y los lomeríos de la sierra Guanconiena.

Dentro de los límites del acuífero se localiza la ciudad de Nogales, Sonora, la cual ocupa una porción muy importante de la pequeña superficie del área total del acuífero, con una población de 156,854 habitantes según datos del INEGI, Censo 2000. El acuífero queda completamente dentro del municipio de Nogales, Sonora.

La poligonal simplificada que delimita el acuífero se encuentra definida por los vértices cuyas coordenadas se muestran en la tabla 1.

Tabla No.1. Coordenadas de la Poligonal simplificada del acuífero Nogales

ACUÍFERO 2650 NOGALES							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	111	3	56.4	31	19	56.2	DEL 1AL 2 POR EL LIMITE INTERNACIONAL
2	110	54	13.9	31	19	58.9	
3	110	53	45.0	31	15	58.4	
4	110	55	24.8	31	13	24.9	
5	110	59	10.5	31	16	13.3	
6	111	2	42.8	31	16	54.2	
1	111	3	56.4	31	19	56.2	

1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero se encuentra bajo el Decreto que establece veda por tiempo indefinido para alumbramiento de aguas del subsuelo en la región denominada cuenda del Río Santa Cruz, municipio de Nogales y Santa Cruz, estado de Sonora, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 25 de enero de 1961.

La veda queda clasificada como zona de veda en las que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros, la cual establece que *“Excepto cuando se trate de alumbramientos de agua para usos domésticos, desde la vigencia de este Decreto, nadie podrá extraer aguas del subsuelo dentro de la zona vedada, ni modificar los aprovechamientos existentes sin previo permiso escrito de la Secretaría de Recursos Hidráulicos”*.

Esta dependencia podrá conceder los permisos de que se trata únicamente en los casos en que, de los estudios relativos, se advierta que no se causarán los perjuicios que con el Decreto de veda se evitan.

A este efecto, los interesados en extraer agua del subsuelo dentro de la zona vedada, inclusive las dependencias del Gobierno e Instituciones descentralizadas, así como particulares y contratitas, no podrán llevar a cabo los alumbramientos sin contar previamente con el permiso correspondiente.

En caso de obtener el permiso, permanecerán obligados a ejecutar las obras conforme a las especificaciones que se establezcan en el documento relativo por la Secretaría de Recursos Hidráulicos.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 1.

El aprovechamiento del agua subterránea del acuífero se destina principalmente para los usos Público Urbano e Industrial. En el acuífero no se localiza distrito o unidad de riego alguna, ni tampoco se ha constituido el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS)

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

CODIPSA, Evaluación de la contaminación del acuífero Nogales, Sonora, Volúmenes I y II, México, D. F., 1994. La empresa CODIPSA realizó un estudio referente a la evaluación de la contaminación en el acuífero de Nogales; en él se presenta el marco geológico y geohidrológico de la zona, e incluye un análisis de la climatología, geomorfología, piezometría, parámetros hidráulicos, y de la calidad del agua subterránea. Presenta, además, los resultados de la prospección geofísica realizada.

Programa binacional de monitoreo de las aguas subterráneas en el acuífero aluvial del arroyo los nogales, en la zona de ambos nogales. Informe final, agosto de 2001

Con base en un acuerdo binacional entre México y los Estados Unidos en el seno de la Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA), plasmado en el “Informe Conjunto de Ingenieros Principales Relativo al Monitoreo Conjunto de la Calidad de las Aguas Subterráneas para Determinar la Presencia de Contaminantes Antropogénicos en el Acuífero Transfronterizo en el Área de Nogales, Son. - Nogales, Az.”, de fecha 25 de enero de 1996, se llevó a cabo un estudio conjunto de calidad de aguas subterráneas a lo largo del acuífero aluvial del Arroyo Los Nogales.

Dicho arroyo se origina a 8.6 km (5.4 mi) al sur de la frontera internacional entre México y Estados Unidos y fluye hacia el Norte a través de Nogales, Sonora y Nogales, Arizona. El programa permitió obtener datos confiables de calidad de las aguas subterráneas y suelos a lo largo del Arroyo Los Nogales.

La obtención de esta información podrá documentar la posibilidad de que las actividades en la superficie y las descargas al Arroyo Los Nogales hayan impactado la calidad de dichas aguas subterráneas.

Este programa se desarrolló de manera conjunta por parte de especialistas en calidad del agua de ambos países, durante los años de 1997 y 1998.

Consistió en el monitoreo y análisis del agua de pozos y norias distribuidos en la faja fronteriza entre ambos países, con el objetivo de determinar la presencia y distribución espacial de contaminantes antropogénicos.

Como resultado, se identificó la presencia en las aguas subterráneas someras de cinco contaminantes: percloroetileno, nitratos, coliformes fecales y totales, hierro y manganeso, en Nogales, Sonora; y percloroetileno, nitratos y arsénico en Nogales, Arizona.

En el estudio participan por parte de México: representantes de la Sección Mexicana de la CILA, de la Comisión Nacional del Agua (CNA) y de la Comisión de Agua Potable y Alcantarillado del Estado de Sonora (COAPAES); por parte de los Estados Unidos: la Sección Estadounidense de la CILA, la Agencia para la Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) Región IX, el Departamento de Calidad Ambiental de Arizona (ADEQ), el Departamento de Salud del Condado de Santa Cruz (SCCDH) y la ciudad de Nogales, Arizona.

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

La cuenca del arroyo Los Nogales se encuentra localizada en la Provincia de la Sierra Madre Occidental (RAISZ, 1959), quedando comprendida en la subprovincia Sierras y Valles del Norte.

La provincia de la Sierra Madre Occidental se inicia prácticamente en la frontera con Estados Unidos, dentro de los cuales tiene una muy pequeña penetración, y se extiende de NW a SE hasta sus límites en el sur de la provincia del Eje Neovolcánico. Hacia el oeste limita con la provincia del Desierto Sonorense y de la Llanura Costera del Pacífico, y hacia el este con la provincia de Sierras y Bolsones, la extensión occidental de la Sierra Madre Oriental y la Mesa Central.

Es un gran sistema montañoso que tiene sus orígenes en el terciario inferior o medio, cuando se inició la extrusión en escala colosal de los materiales volcánicos que lo integran cuyos espesores oscilan entre 1,500 y 1,800 m. Predominan rocas ácidas (altas con sílice) e intermedias (medias en sílice).

La sierra, que se levanta hasta los 2,500 ó 3,000 msnm presenta, hacia el occidente, un importante escarpe, en tanto que hacia el oriente va bajando más gradualmente a las regiones llanas del centro. En esta franja oriental se tienen cadenas y valles de orientación NE-SW, producto de los fallamientos que acompañaron a los procesos de levantamiento del Pleistoceno.

Sobre el dorso central de la sierra los materiales volcánicos se encuentran en amplios mantos tendidos que dan conformación a las elevadas mesetas que son típicas de la provincia. Una particular conjunción de actividad tectónica, rasgos litológicos, distribución de fracturas y procesos erosivos hídricos propició la excavación de profundísimos cañones cuyos ejemplos más espectaculares se dan sobre las vertientes occidentales de la sierra.

En las alturas del extremo norte de la provincia imperan climas secos y semisecos que van, según la elevación, de cálidos a semicálidos, propios estos últimos de los profundos cañones. Los flancos de la sierra presentan condiciones semisecas cálidas y semicálidas en el noroeste, y subhúmedas cálidas y semicálidas en el centro y suroeste. Sobre los declives occidentales, el clima varía de subhúmedo a semiseco cálido y semicálido.

Subprovincia Sierras y Valles del Norte: El área de la subprovincia en territorio sonorense es de aproximadamente 32,689 km², abarca parcialmente el municipio de Nogales, dentro del cual se encuentra localizada la cuenca del arroyo Los Nogales.

Esta región está formada principalmente por sierras entre las cuales se localizan amplios valles paralelos con orientación norte-sur. La altitud de los sistemas montañosos decrece hacia el sur, de tal forma que en la sierra Los Ajos, al este de Cananea, se localiza la mayor altitud, con 2 620 m; al norte de Mazocahui gran parte de las elevaciones exceden los 1,000 msnm, mientras que al sur de esta población la mayoría de las cimas quedan por debajo de esa altitud.

3.2 Clima

La época de lluvias de verano abarca de julio a septiembre, registrándose otro período lluvioso en los meses de noviembre y diciembre, principalmente; en el resto del año las precipitaciones son esporádicas, siendo por lo general el período de abril a junio el más seco.

Al igual que la información de precipitaciones, los datos de temperatura corresponden a la estación climatológica localizada en la ciudad de Nogales, Sonora. Con este registro, se tiene una temperatura media anual de 17.7° C.

La temperatura media máxima se registra durante el mes de julio y alcanza los 26.3° C, mientras que la temporada más fría se presenta durante el mes de diciembre, con una temperatura media de 9.6° C.

Se cuenta con datos de precipitaciones de la estación climatológica localizada en la ciudad de Nogales, Sonora. Con esta información, se tiene una precipitación media anual de 500.5 mm.

La mayor cantidad de precipitación se registra durante el período de lluvias de verano, en los meses de julio a septiembre, en el cual se presenta el 63 % de su media anual; mientras que la temporada de estiaje corresponde a los meses de abril a junio con el 5 % de precipitación media. Considerando que el área del valle es de 73 km², el volumen medio anual precipitado es de 36.5 millones de metros cúbicos por año (hm³/año).

Evapotranspiración real media anual (ETR)

La evaporación es el proceso mediante el cual el agua cambia del estado líquido al gaseoso debido a la radiación solar; se estima que en este proceso del ciclo hidrológico entre el 75 y 95% de la precipitación total anual que ocurre sobre los continentes retorna a la atmósfera en forma de vapor.

En el cálculo de este parámetro, no existen los suficientes datos para utilizar metodologías más complejas donde el margen de error sea mínimo, por lo que se utilizó la ecuación del método empírico de L. Turc. El cálculo de la Evapotranspiración Real (ETR) por medio de la ecuación empírica de L. Turc, se lleva a cabo con la siguiente ecuación:

$$ETR = [P / (0.9 + (P^2/L^2))]^{1/2}$$

Donde:

ETR = Evapotranspiración real (mm)

P = precipitación media anual (mm)

L = 300 + 25T + 0.05T³

T = temperatura media anual (° C)

Por lo tanto, el volumen evaporado se obtiene multiplicando la evapotranspiración real por el área de la cuenca.

En la tabla No. 2 se presenta el resultado del cálculo de la ETR media anual.

Tabla No. 2. Evapotranspiración real utilizando el método de L. Turc

Año	Lluvia media (mm)	T Media (° C)	L	ETR (mm)
1986	538.3	17.5	1,002.7	493.82
1987	438.2	16.9	966.1	416.72
1988	574.2	17.5	1,007.2	518.80
1989	399.0	18.5	1,079.1	391.87
1990	659.5	17.2	982.7	567.52
1991	523.2	16.9	966.1	478.96
1992	622.5	17.2	983.8	545.90
1993	467.5	17.6	1,009.0	442.80
1994	571.7	17.9	1,031.8	520.38
1995	464.9	18.2	1,052.7	444.27
1996	376.6	18.6	1,082.9	372.72
1997	381.8	18.1	1,051.5	375.86
1998	508.5	17.2	983.8	470.69
1999	331.6	17.4	1,001.7	330.02
2000	622.0	17.6	1,013.0	550.41
2001	604.5	17.2	982.9	534.68
2002	593.0	19.0	1,114.3	545.16
2003	332.1	18.1	1,049.1	332.06
Promedio	500.5	17.7	1,020.0	462.9

Utilizando la metodología propuesta por Turc, se obtiene una lámina de evapotranspiración real de 462.9 mm, que multiplicados por 73 km² de área del valle, arroja como resultado un volumen de 33.8 millones de metros cúbicos por año (hm³/año).

Con ello, la evapotranspiración representa el 92.6% de la precipitación.

3.3 Hidrografía

La cuenca del arroyo Los Nogales pertenece a la Región Hidrológica 7, Río Colorado, en la cuenca de los ríos Santa Cruz y San Pedro, y tiene su origen en las elevaciones del orden de 1,500 msnm, localizadas en el extremo sur del acuífero, siguiendo su curso hacia el norte hasta descargar sus aguas en territorio de Los Estados Unidos de América;

El área del valle es de 73 km² en el lado mexicano, hasta la línea internacional con los Estados Unidos de Norteamérica y su área total, incluyendo la parte norteamericana, es de 110 km².

El arroyo Los Nogales tiene un régimen torrencial efímero, característico de las pequeñas cuencas montañosas. En el lado mexicano, sus afluentes principales por la margen izquierda son los arroyos Chimeneas (Tecnológico), El Ranchito (5 de febrero), Vázquez (Cocodrilo) y Cementerio (Internacional) con un área de 36.2 km².

Por la margen derecha del arroyo Los Nogales se localizan los arroyos Buenos Aires, Héroes, Celaya, Villaseñor, 5 de Mayo, Jesús García, Orizaba, Ferrocarril y Barbosa, con un área de drenaje de 36.8 km².

Geológicamente, la cuenca está compuesta por materiales de baja permeabilidad representada por rocas ígneas intrusivas graníticas; además, por material conglomerático de permeabilidad media, con afloramientos de rocas extrusivas de composición riolítica.

La cobertura vegetal de la cuenca, excepto en la zona urbana, está compuesta principalmente por matorrales, mezquites y encinos.

La infraestructura hidráulica existente en la cuenca, corresponde a las fuentes de abastecimiento de agua para uso público urbano e industrial.

Además, existe un bordo sobre el arroyo Tecnológico, el cual tiene una capacidad aproximada de 0.3 millones de m³, que actualmente tiene la función de controlar avenidas en la cuenca.

Fuentes de abastecimiento a la ciudad de Nogales, Sonora La ciudad de Nogales, Sonora, es abastecida por 4 diferentes fuentes de abastecimiento, entre las que se encuentran las captaciones:

Paredes

Mascareñas

Los Alisos

Urbana (acuífero Nogales)

La capacidad instalada es de 1,303 lps, mientras que su producción es de 689 lps.

En la Tabla No. 3 se presenta un resumen que incluye el tipo de fuente, así como el gasto por capacidad instalada y producción.

Tabla No. 3. Fuentes de abastecimiento a la ciudad de Nogales, Sonora

Fuente	Cantidad	Gasto (lps)	
		Capacidad Instalada	Producción
Pozos	35	996	382
Galería	1	160	160
Norias	6	147	147
TOTAL	42	1,303	689

Escurrecimiento superficial

Se llevó a cabo el análisis de escurrecimientos superficiales utilizando dos diferentes metodologías: 1) el método de Langbein, y 2) transporte de información hidrométrica de la cuenca del río Santa Cruz, considerando la información existente en la estación hidrométrica cercana a Nogales, Arizona, Estados Unidos.

Método de Langbein

El método de Langbein consiste en una relación única, basada en información de precipitaciones y temperaturas medias anuales en la cuenca; P / Ft y V' / Ft , donde P es la precipitación anual, V' el escurrecimiento específico anual y Ft es un factor de temperatura. Cuando P y V' se toman en milímetros y T , la temperatura media del año se expresa en ° C, la expresión de Ft es la siguiente:

$$Ft = 10 (0.027 T + 1.886)$$

La relación entre P/Ft y V'/Ft está dada en la tabulación siguiente:

P/Ft	V'/Ft	P/Ft	V'/Ft	P/Ft	V'/Ft	P/Ft	V'/Ft
0	0.009	3	0.200	6	1.9	10	5.0
1	0.026	4	0.475	7	2.7	12	7.0
2	0.075	5	1.000	8	3.4	14	9.0

Este método se considera más confiable en zonas secas que en regiones cálidas húmedas; además, la Organización Meteorológica Mundial considera que las relaciones tienen una aplicación mundial.

En la tabla No. 4 se muestran los resultados obtenidos del análisis utilizando este método.

Con este análisis se obtuvo un escurrimiento medio anual de 1.790 millones de metros cúbicos por año ($\text{hm}^3/\text{año}$); con ello, el escurrimiento superficial representa el 4.9 % de la precipitación.

Tabla No. 4 Escurrimiento anual en la cuenca del arroyo Nogales. Método de Langbein

Año	Lluvia Media mm	Temp. Media ° C	Escurrimiento Medio m^3
1986	538.3	17.5	2'011,614
1987	438.2	16.9	1'190,569
1988	574.2	17.5	2'320,132
1989	399.0	18.5	1'010,876
1990	659.5	17.2	3'168,470
1991	523.2	16.9	1'962,830
1992	622.5	17.2	2'812,071
1993	467.5	17.6	1'337,405
1994	571.7	17.9	2'233,542
1995	464.9	18.2	1'266,764
1996	376.6	18.6	942,863
1997	381.8	18.1	970,758
1998	508.5	17.2	1'782,068
1999	331.6	17.4	797,318
2000	622.0	17.6	2'734,322
2001	604.5	17.2	2'662,738
2002	593.0	19.0	2'225,569
2003	332.1	18.1	795,803
Promedio	500.5	17.7	1'790,317

Método de Transporte de Información Hidrométrica

El transporte de información hidrométrica es una metodología que se aplica cuando no se tienen datos de escurrimientos en la cuenca, pero se cuenta con información de otro tipo que posee características similares a las de la cuenca por analizar y que tiene control hidrométrico.

El arroyo Los Nogales pertenece a la cuenca del río Santa Cruz, y es un afluente de este último; a una distancia de 8.9 km al este de la ciudad de Nogales, Arizona, existe una estación hidrométrica que mide los escurrimientos del río Santa Cruz y que se localiza 1.3 km aguas abajo de la línea internacional. Con los datos hidrométricos proporcionados por la Comisión Internacional de Límites y Aguas, CILA, se cuenta con un registro de datos en el período de 1950 a 2001, en el cuál el volumen medio anual escurrido es de 24.471 millones de metros cúbicos por año (hm³/año).

Considerando que la cuenca del río Santa Cruz hasta la estación hidrométrica es de 1,380 km², y que la cuenca del arroyo Los Nogales tiene un área de 73 km², se obtiene un factor de transporte de 0.053.

A continuación, en la tabla No. 5, se muestra el resumen del análisis realizado con el método de transporte de información hidrométrica.

Tabla No 5. Escurrimiento anual. Método de información hidrométrica.

Estación Hidrométrica Nogales, Arizona, Cuenca del Río Santa Cruz		
Escurrecimiento medio anual:	24.471	millones de m ³
Área de cuenca:	1,380	km ²
CUENCA DEL ARROYO LOS NOGALES		
Área de cuenca (Ac):	73	km ²
Factor de transporte (F.T.):	0.053	
Escurrecimiento cuenca Los Nogales (F.T.*Ac):	1.294	millones de m ³

Considerando la información analizada, con esta metodología se obtiene un escurrimiento de 1.294 millones de metros cúbicos por año (hm³/año) para la cuenca del arroyo Los Nogales.

Escurrecimiento superficial medio anual adoptado

Existe una buena correlación entre los resultados obtenidos con las dos metodologías (Langbein y transporte de información hidrométrica); sin embargo, considerando que el período de información utilizado en el método de Langebein corresponde a 18 años de información, y que los resultados obtenidos con el método de transporte de información hidrométrica son obtenidos de un período de datos de 52 años; además, que la cuenca del arroyo Los Nogales es afluente del río Santa Cruz y pertenece a la misma región y tipo de clima, se consideró adecuado adoptar para la cuenca del arroyo Los Nogales un escurrecimiento medio anual de 1.294 millones de metros cúbicos por año ($\text{hm}^3/\text{año}$). Por lo anterior, el escurrecimiento representa el 3.5 % de la precipitación.

Volumen potencial de infiltración en la cuenca

Con base en la ecuación de balance, se obtuvo el volumen de infiltración en la cuenca. Para ello, se utilizaron los resultados de precipitación media, escurrecimiento superficial y evapotranspiración real. Utilizando la ecuación de balance, se tiene:

$$\mathbf{VINF = VLL - VETR - VESC - VUC}$$

Donde:

VINF = Lluvia infiltrada

VLL = Volumen de precipitación

VETR = Volumen de evapotranspiración

VESC = Escurrecimiento

VUC = Uso consuntivo de aguas superficiales

Los volúmenes considerados en el balance superficial, son:

Volumen llovido:	36'536,858	m^3
Volumen de escurrecimiento medio anual:	1,294,480	m^3
Volumen de evapotranspiración real:	33'793,473	m^3
Volumen de uso superficial:	0	m^3
Volumen de infiltración:	1'448,905	m^3

De este análisis, se estima un volumen de infiltración de 1.45 millones de metros cúbicos por año ($\text{hm}^3/\text{año}$), lo que representa el 4.0% de la precipitación.

Por otra parte, la ciudad de Nogales se abastece exclusivamente de aguas subterráneas procedentes de las captaciones Paredes, Mascareñas, Los Alisos, Cíbuta, Pozos urbanos (Acuífero Nogales).

En conjunto, estas fuentes producen un gasto medio de 689 lps, que representa un volumen de 21.73 millones de metros cúbicos por año ($\text{hm}^3/\text{año}$).

La ciudad de Nogales cuenta con una red de distribución de agua potable en la que se estima un 35% de pérdidas, debido principalmente a las malas condiciones de la tubería de conducción.

Considerando este porcentaje, el volumen de pérdidas es de 7.60 millones de metros cúbicos por año ($\text{hm}^3/\text{año}$); por otra parte, de acuerdo a los análisis efectuados, se estimó un coeficiente de infiltración de 4.0 % en la cuenca, por lo que la recarga vertical proveniente de las pérdidas en la red de distribución del orden de 0.30 millones de metros cúbicos por año ($\text{hm}^3/\text{año}$).

Entonces, la recarga vertical total estimada corresponde a la suma de la infiltración proveniente de la precipitación más las pérdidas de la red de agua potable de la ciudad, con lo cual se obtiene una recarga vertical potencial de 1.75 millones de metros cúbicos por año ($\text{hm}^3/\text{año}$).

3.4 Geomorfología

La Sierra Madre Occidental está formada por una extensa meseta volcánica afectada por grabens y fallas normales que la privan, sobre todo en los flancos, de su apariencia homogénea y seudohorizontal.

El borde oriental de la sierra varía gradualmente hacia la Provincia de Cuencas y Sierras de Chihuahua, en tanto que el borde occidental constituye una terminación abrupta con fallas normales de grandes desplazamientos y zonas de profundas barrancas.

Compuesta por dos importantes secuencias ígneas, cuyo contacto marca un periodo intermedio de calma volcánica. La secuencia más antigua la forman rocas volcánicas, principalmente intermedias, y cuerpos ígneos. La más reciente está integrada por ignimbritas riolíticas y riodacíticas en posición generalmente horizontal, o ligeramente inclinada.

El complejo volcánico inferior posee una forma dominante de derrames y unidades piroclásticas de composición andesítica, pero también cuenta con intercalaciones de ignimbritas silíceas. Este complejo inferior contrasta en gran medida con el superior, por su carácter ligeramente deformado e intensamente afallado y alterado.

4. GEOLOGÍA

En el área del acuífero afloran rocas sedimentarias y volcánicas, cuyo registro estratigráfico abarca del Cretácico al Reciente, (figura No. 2).

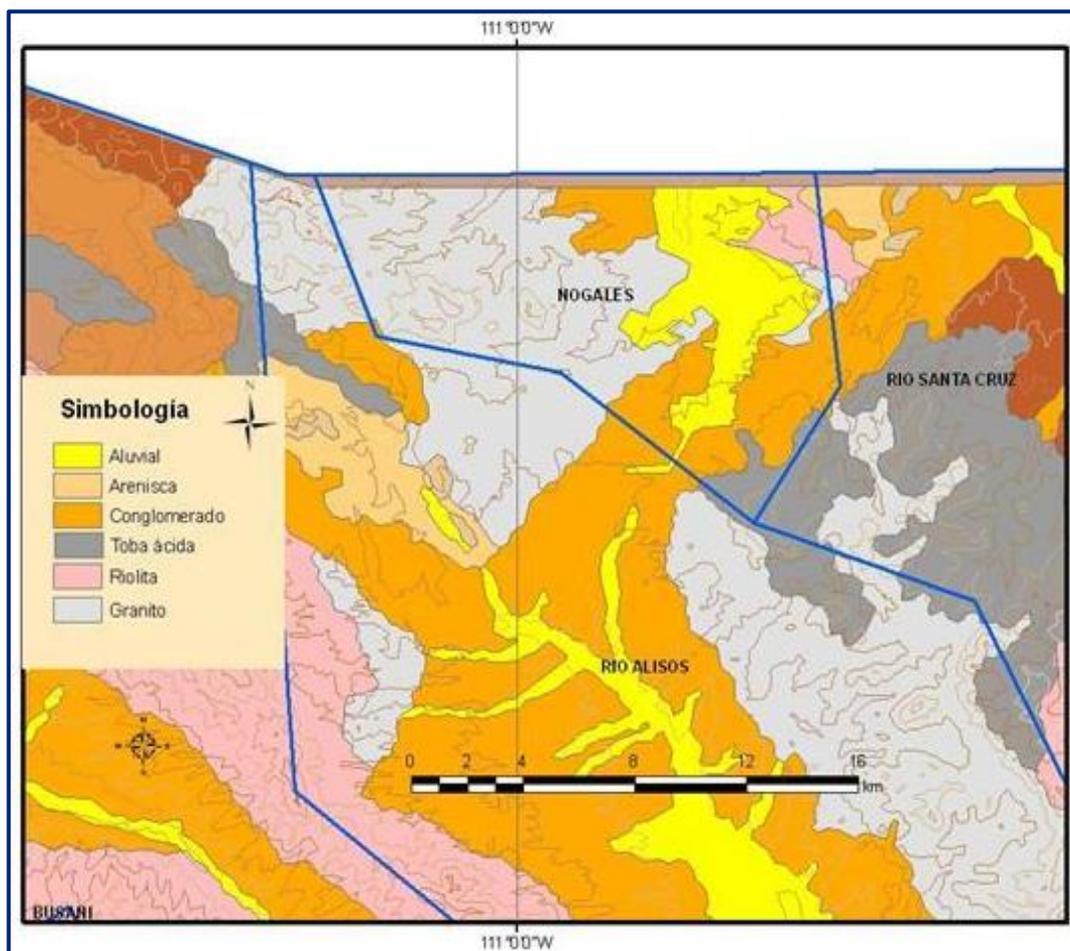


Figura 2. Geología general del acuífero

4.1 Estratigrafía

MESOZOICO

Cretácico Superior (kg)

Son las rocas más antiguas del área, constituyen el basamento de unidades suprayacentes y se distribuyen de manera irregular en su parte central con orientación noreste-suroeste.

Se trata de un cuerpo basáltico granítico-granodiorítico compacto, de textura fanerítica a porfídica en la que se distinguen minerales primarios de cuarzo, oligoclasa, ortoclasa y moscovita, con algunos cristales de minerales secundarios de apatita, la unidad está fuertemente fracturada en dirección noroeste-sureste como primario y perpendicular como secundario, el color varía de gris, café y morado al fresco y anaranjado-amarillo y gris al intemperismo.

CENOZOICO

Terciario Volcánico Acido (Tva)

A fines del Cretácico y principios del Terciario como consecuencia de los efectos de la Revolución Larámide se origina esta unidad formando un verdadero complejo volcánico que incluye tobas, tobas líticas, brechas volcánicas e ignimbritas.

Rocas de composición ácida y andesítica están dispuestas en forma masiva con diferente grado de compactación y pseudoestratificación delgada a media entre 5 y 60 cm, presentan gran variedad textural y de color, afectadas por intrusivos. El contenido de líticas en las tobas es variable al igual que el tamaño de los mismos.

Estas rocas afloran en el extremo suroriental, formando una franja cuya orientación es noroeste y este.

Terciario Volcánico Superior (Tvs)

Esta unidad se originó debido a eventos volcánicos y sedimentarios, el primero parece corresponder con las últimas emisiones que formaron la Sierra Madre Occidental.

Las rocas del Terciario Volcánico Superior sobreyacen en forma discordante a las volcánicas ácidas, constituidas por conglomerados, arenas y arcillas depositados en un medio lacustre. Afloran en el extremo suroccidental del área presentando una tendencia general al noroeste.

Terciario Continental (Tc)

Formación definida por Heynes (1912). A fines del Terciario se produce el relleno aluvial de las grandes depresiones causadas por el fallamiento de bloques con rumbo norte-sur. Este depósito se constituye por arenas, conglomerados y gravas con diferente grado de consolidación, derivadas de la erosión de rocas preexistentes, predominando las batolíticas, con clastos de 1 a 20 cm de diámetro, subangulosos a subredondeados, mal clasificados y semiconsolidados en una matriz areno-arcillosa de color rojiza.

Afloran ampliamente en el área en forma discordante a las rocas preexistentes. Por la similitud de la forma de depósito y en edad, estos sedimentos continentales pueden correlacionarse con la formación Baucarit.

Cuaternario Aluvial (Oal)

Los depósitos Cuaternarios son producto de actividad fluvial, consisten en gravas, arenas y arcillas que están ocupando las partes bajas de los valles, con una reducida extensión y poco espesor.

Estratigrafía de depósitos cuaternarios

Se identifican dos tipos de depósitos continentales cuaternarios: aluviales y coluviales.

Los aluviales de ambiente de depósito subacuoso, se depositan en un ambiente sedimentario llamado "abanicos aluviales", que a su vez se subdivide en dos subambientes: canales distributarios y planicie aluvial. Los coluviales se clasifican como depósitos de Talud.

Como zona de depositación de los aluviales de planicie se considera sólo la parte más amplia del valle, sus componentes son: gravas subangulosas, de tamaño entre 2 y 5 cm; arenas subredondeadas de diferente tamaño y arcillas de color amarillento, como estructura se observa la imbricación norte-sur que es contemporánea, indica el movimiento del agua que los arrastra y deposita, pero se infiere en el subsuelo cierta estratificación cruzada.

El porcentaje volumétrico de cada componente es aproximadamente 15% para las gravas, 50 % para las arenas y 35 % para las arcillas. La roca fuente principal es el depósito continental Terciario.

Los canales distributarios son los cauces del arroyo Nogales y sus arroyos afluentes; su ambiente de depósito es de baja sinuosidad.

Los afluentes tienen una amplitud de cauce entre 4 y 10 m, sus sedimentos detríticos están medianamente clasificados, resultado de un depósito rápido y periódico, los componentes predominantes son las arenas medianas aunque también existen las brechas angulosas y subangulosas.

La roca madre principal es el Conglomerado Terciario, como estructura se observa la imbricación. El arroyo Nogales, de sección entre 2 y 7 m de ancho y 0.50 a .5 m de profundo, muestra mejor clasificación de sus detritos por el más continuo flujo de agua, ya sea residual, de lluvias o flujo base, está constituido por arenas en un 60 % con minerales de cuarzo y feldespato, arcillas con 25%, y guijarros de material ígneo extrusivo (tobas) e intrusivo (Batolito granito-granodiorítico) como fragmentos.

Estas características indican que sobre los cauces se depositan arenas inmaduras composicional y texturalmente, de poco arrastre con áreas fuente cerca de los depósitos.

En las paredes de los arroyos afloran directamente las rocas del Terciario, lo que indica reducido espesor de material Cuaternario.

Los depósitos coluviales están restringidos generalmente a los taludes del cuerpo batolítico. Siendo un material muy fracturado e intemperizado, fácilmente se desprenden brechas depositadas al pie del intrusivo, sin transporte.

De las observaciones en campo, no se pueden diferenciar edades específicas de los depósitos, más bien se consideran contemporáneas en depósito del Pleistoceno hasta nuestros días.

4.2 Geología estructural

Desde Durante el Cretácico, el estado de Sonora, registra una historia rica en procesos geodinámicos de deformación compresiva que afectaron las rocas del Cretácico Inferior: la primera, conocida como fase mesocretácica, tiene como origen la colisión de microcontinentes contra el continente de América del Norte, en el noroeste de México, produciendo plegamiento y cabalgamiento hacia el noreste (Rangin, 1984); y, la segunda, corresponde a la fase Laramide que ocurrió durante el Cretácico Tardío-Eoceno, acompañada por magmatismo calcoalcalino que migró del poniente hacia el oriente del Estado (Anderson y Silver, 1974).

La deformación Laramide produjo plegamientos y cabalgamientos locales con dirección noroeste-sureste con asimetría y transporte tectónico, respectivamente, tanto hacia el nororiente como hacia el surponiente, bien conocido en el noreste de Sonora (Rangin, 1977) y sureste de Arizona (Davies, 1979).

Durante el Terciario, varios eventos volcánicos cubren en gran medida los terrenos y estructuras geológicas existentes. En el Mioceno Temprano se inició un episodio de fallamiento extensivo (fallas normales) que cortaron todas las estructuras y unidades existentes, éstos continúan hasta la fecha, originando la disposición fisiográfica actual del estado de Sonora; el resultado fue un sistema de fallas noroeste-sureste y la depositación de sedimentos continentales de origen fluvial y lacustre con intercalaciones de volcanismo basáltico en sus niveles inferiores, de varios cientos de metros de espesor.

El último evento de vulcanismo fue de tipo basáltico alcalino, ocurrió a finales del Terciario y principios del Cuaternario, formando mesetas extensas relacionadas con la tectónica distensiva de fallas normales, con episodios de la apertura del Golfo de California (Clark et al., 1980; Rangin, 1979).

A continuación, se hace una descripción de las estructuras existentes en el área:

Estructuras Postlaramídicas

Estas se expresan como fallas normales de rumbo noroeste-sureste, y son asignadas a la deformación distensiva que se inicia a principios del Mioceno y que dieron origen al sistema de cuencas y sierras.

Las más representativas a nivel tanto local como regional, son las fallas normales que afectan a las rocas graníticas-granodioríticas. En los planos de cizallamiento no se visualizaron las estrías de dirección de desplazamiento, sólo se encontraron las brechas tectónicas angulosas de 0.05 hasta 3.0 m. de diámetro. La longitud de las fracturas con la misma dirección de las fallas varía entre 0.8 y 3.5 km.

Al término de estos esfuerzos distensivos, se generaron las fracturas perpendiculares que afectan no sólo a las rocas plutónicas, sino también a las volcánicas riolíticas. Su longitud es de 0.7 a 2.3 km.

Estructuras del Terciario-Cuaternario

Tienen dirección noreste-suroeste, se manifiestan como fallas normales y fracturas que afectan a los depósitos continentales. Su longitud varía entre 0.7 y 10.5 km. Las fracturas más indicativas forman los cauces de arroyos intermitentes afluentes del arroyo Nogales.

En la falla localizada al noroeste de Nogales-México que se prolonga a territorio de Estados Unidos, se observan bloques caídos de rocas ígneas intrusivas, con las mismas características anteriormente mencionadas, en contacto discordante entre ambas rocas.

Como resultado del término de estos esfuerzos, se producen fracturas con dirección noreste-suroeste de diferentes longitudes.

4.3 Geología del subsuelo

De acuerdo con el estudio de CODIPSA, Evaluación de la contaminación del acuífero Nogales, Sonora, para el acuífero de Nogales, se clasifican tres unidades hidrogeológicas.

Unidad con permeabilidad moderada o buena: Constituida por aluvión (gravas, arenas y arcillas no consolidadas), en los cauces de arroyos define buena permeabilidad; por depósitos continentales Terciarios (conglomerados medianamente consolidados); y por depósitos volcánicos Terciarios (tobas, derrames e ignimbritas), que en conjunto presentan permeabilidad media por fracturamiento.

El aluvión y los depósitos continentales conforman el acuífero principal de tipo libre de Nogales, de permeabilidad moderada o buena; los depósitos volcánicos funcionan a profundidad como acuíferos semiconfinados.

Unidad con baja permeabilidad: Constituida por el batolito granítico Cretácico, generalmente considerada impermeable, Aunque presenta intenso fracturamiento superficial en diferentes direcciones presenta baja permeabilidad, reduciéndose a profundidad por el sellamiento de dichas fracturas.

Unidad impermeable: Constituida por depósitos volcano-sedimentarios del Terciario donde la arcilla es su principal componente litológico. Su funcionamiento hidrogeológico es de la siguiente manera:

Sobre las rocas ígneas intrusivas fracturadas descansan rocas del Terciario; las rocas de mayor permeabilidad sobreyacen al granito, excepto las volcano-sedimentarias. El acuífero principal lo conforman conglomerados y aluviones, de tipo libre, pero con condiciones locales de semiconfinamiento.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

Dentro del área de la ciudad de Nogales se puede considerar que el acuífero se encuentra constituido, en su parte superior, por los sedimentos aluviales de los arroyos La Granja y Los Nogales, cuyo espesor promedio es de 30 m, y en su porción inferior por las rocas intrusivas y metamórficas alteradas que alcanzan un espesor superior a los 100 m. Ambas unidades se encuentran conectadas hidráulicamente, teniendo los mismos mecanismos de recarga y descarga.

La profundidad al nivel estático en los materiales de acarreo es de 5 a 10 m, y de 10 a 75 m para el acuífero alojado en la porción alterada de las rocas graníticas. Ambos tipos de acuíferos funcionan como un solo sistema, en el cual el mecanismo de recarga y descarga se encuentra regulado por las características hidrogeológicas de las dos unidades mencionadas.

La recarga a este sistema, se efectúa a través de la infiltración del escurrimiento superficial en el arroyo La Granja y el que se lleva a cabo directamente en las fracturas de las rocas graníticas y en los numerosos arroyos que las disectan. Una vez infiltrada el agua se define en ambos acuíferos, un nivel de saturación cuyas elevaciones del nivel estático van de 1,260 a 1,200 m respecto al nivel del mar en los arroyos, y de 1,230 a 1,185 en la roca alterada, conformándose un esquema de flujo cuya tendencia es la de converger hacia el arroyo Los Nogales, donde el nivel de saturación puede funcionar como un regulador del sistema.

El esquema de flujo subterráneo indica que existe un flujo de salida hacia el territorio de Estados Unidos, susceptible de ser aprovechado sobre el arroyo Los Nogales. En las áreas de roca alterada este esquema no se define con claridad, debido a la distribución de las captaciones; sin embargo, como se dijo anteriormente, este tiende a mostrar una circulación hacia el arroyo Los Nogales.

De acuerdo a la distribución de las profundidades al nivel estático en la porción alterada de las rocas graníticas, a la geometría del área y a la historia geológica de la región, puede inferirse que el espesor de alteración de 150 m detectado en ambos márgenes del valle guarda una continuidad en el área; lo cual puede permitir, en este caso, un almacenamiento de agua subterránea que quizá no haya sido explotada debido a la poca profundidad de la mayoría de los pozos existentes.

5.2 Parámetros hidráulicos

Coefficiente de almacenamiento

El coeficiente de almacenamiento, S , numéricamente se aproxima al rendimiento específico, S_y , o mejor dicho, el primero es despreciable en comparación con el segundo, el cual indica la cantidad de agua drenada por la acción de la gravedad del material poroso interconectado, y también se le conoce como porosidad efectiva, n_e . De acuerdo con el estudio de CODIPSA, Evaluación de la contaminación del acuífero Nogales, Sonora, para el acuífero de Nogales, S_y es del orden de 0.14.

Conductividad hidráulica en la zona no saturada

Utilizando como referencia el estudio mencionado en el párrafo anterior, se obtuvo KH para materiales de grano medio con intercalaciones de finos, parecidos a los encontrados en Nogales, con $\theta = 0.2$, $K\theta = 3.33 \times 10^{-8}$ m/s, valor muy inferior al estimado en saturación.

Capacidad de infiltración

Con base en el análisis y clasificación de suelos de Nogales, la capacidad de infiltración de los mismos en su estado natural es moderada o alta, depende de la permeabilidad del terreno no saturado, es máxima al inicio, y disminuye exponencialmente con el tiempo hasta alcanzar un índice constante.

Este concepto empírico basado en observaciones de campo, depende también de la intensidad del aporte, de las condiciones iniciales de humedad del suelo, y de las curvas características en flujo no saturado del mismo, se ha demostrado que la capacidad de infiltración constante final es numéricamente equivalente a la conductividad hidráulica saturada del suelo.

5.3 Piezometría

En 1994, la empresa CODIPSA llevó a cabo un estudio que incluyó la piezometría en el acuífero Nogales, y realizó mediciones durante el período de abril a julio del mismo año.

En el estudio se encontró que el nivel en el extremo noroeste de la ciudad era de 100 m de profundidad; varía entre 5 y 30 m en la porción centro-norte, entre 7 y 40 m en su parte centro-sur, entre 60 y 140 m en la zona industrial, y entre 100 y 140 m en su límite sur.

En ese año, a lo largo del arroyo Los Nogales los niveles freáticos estaban cerca de la superficie del terreno; encontrándose que la influencia del bombeo era insignificante en la evolución de los niveles.

Posteriormente, en 2002 y 2005 se tomaron los niveles piezométricos en aprovechamientos de agua potable de la ciudad de Nogales. En ambos casos se tomaron datos de profundidad a los niveles estáticos y en algunos pozos niveles dinámicos. En el año 2005 se recopiló menos información que en el año 2002, debido principalmente a la restricción en los accesos a los pozos.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

En la Figura No. 3 se observan las curvas de igual profundidad al nivel estático para el año 2002 en el acuífero Nogales, con datos de los pozos de agua potable de la ciudad. Los valores varían de 10 a 80 m para toda la zona, con los valores mayores al centro del valle. Al sur de la zona urbana existe una pequeña región donde se registran niveles del agua subterránea inferiores a los 10 m de profundidad.

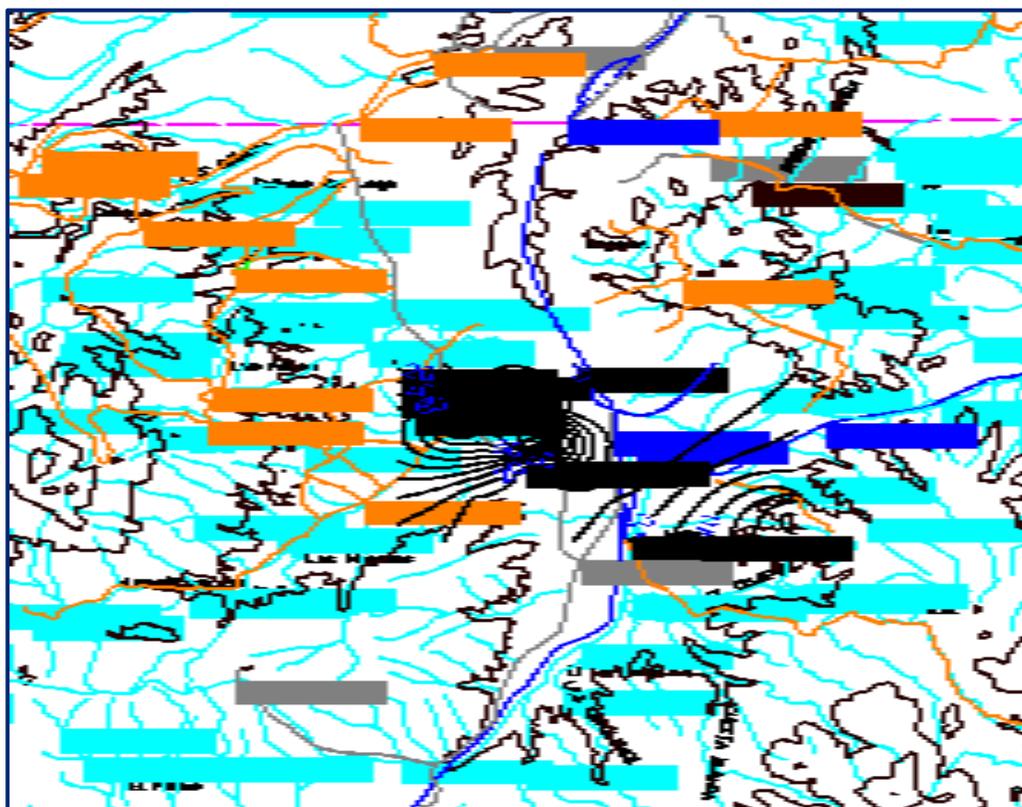


Figura No. 3. Profundidad al nivel estático en m (noviembre 2002), en pozos de agua potable de la ciudad de Nogales, Sonora

5.4.2 Elevación del nivel estático

De acuerdo con los datos recopilados en el año 2005, las elevaciones mayores se presentan en la parte este de la ciudad de Nogales, con elevaciones que alcanzan los 1,290 m. En la figura No. 4 se puede observar como las menores elevaciones se localizan al norte de Nogales, con 1,190 m.

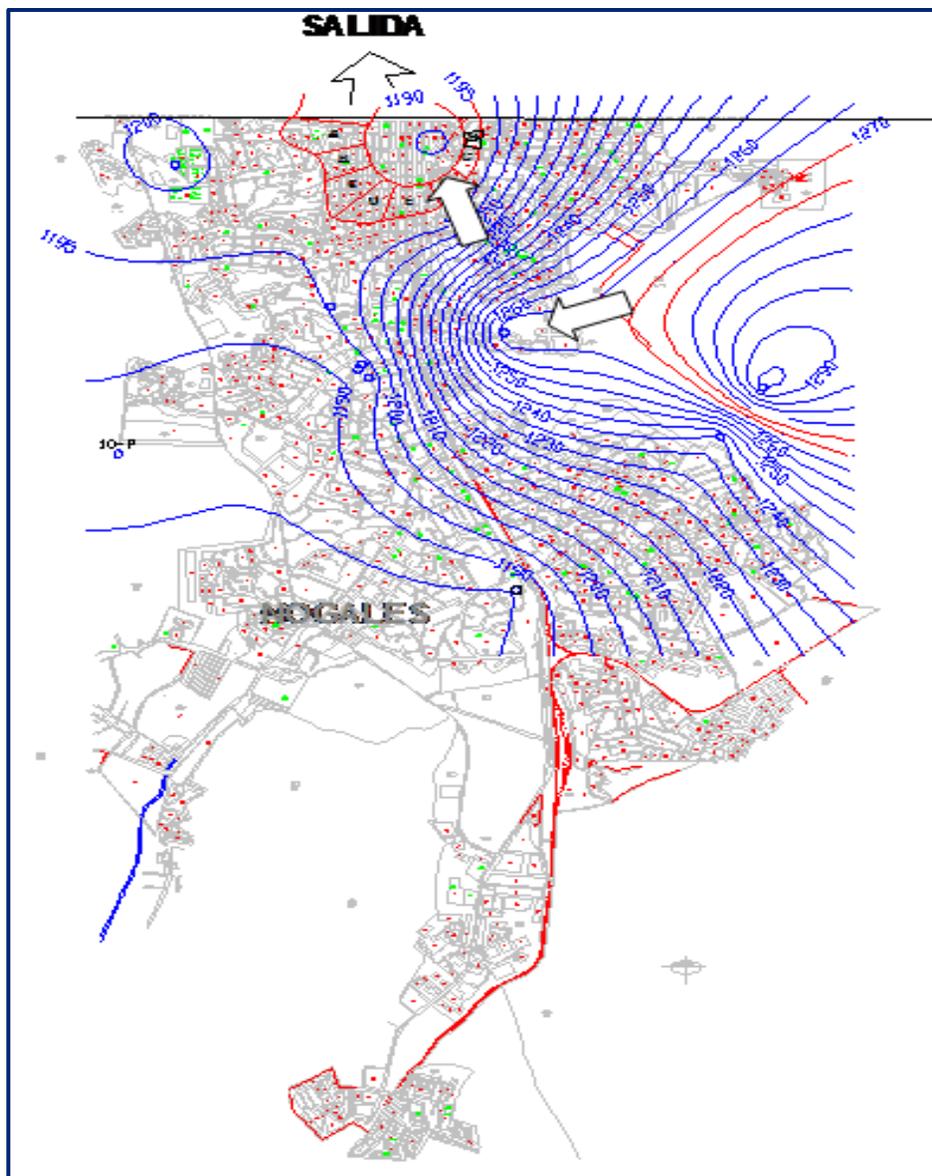


Figura No. 4. Elevación del nivel estático (msnm) noviembre de 2005

La dirección preferencial del flujo subterráneo es de sur a norte, con alimentaciones provenientes de las sierras localizadas tanto al este como al oeste. Se identifica una salida por flujo horizontal en el extremo norte del acuífero.

5.4.3 Evolución del nivel estático

En la tabla No. 6, se muestra la evolución del nivel estático en pozos del acuífero de Nogales, correspondiente al período de 1994 a 2005. Se puede observar que en la mayor parte de los aprovechamientos existen evoluciones positivas. Los abatimientos observados son puntuales.

Tabla No. 6. Evolución del nivel estático en el acuífero Nogales

No. y tipo de Aprovechamiento	Coordenadas UTM		1994	2005	Evolución
	X	Y	NE	NE	NE
2-N	504,415	3,465,889	4.51	4.13	-0.38
8-N	504,778	3,464,270	6.94	8.33	1.39
10-P	503,215	3,463,598	7.42	17.00	9.58
11-P	503,585	3,465,891	27.34	20.02	-7.32
36-N	504,423	3,465,829	5.04	5.00	-0.04
37-N	504,803	3,464,309	6.80	7.57	0.77
41-N	504,597	3,464,766	7.05	7.68	0.63
44-N	504,846	3,464,202	7.04	8.33	1.29
47-N	504,413	3,466,081	5.01	8.07	3.06
48-N	504,386	3,466,106	6.93	8.72	1.79
50-N	505,732	3,464,566	3.12	3.84	0.72
51-N	505,319	3,466,069	10.11	9.06	-1.05
53-N	504,487	3,466,227	4.94	8.31	3.37
55-N	504,509	3,466,257	5.77	8.26	2.50
60-P	507,411	3,464,125	31.82	34.86	3.04
67-P	507,130	3,463,735	59.47	75.57	16.10
68-P	505,804	3,462,517	55.30	36.07	-19.23

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

El acuífero Nogales, Sonora, atraviesa el área urbana, fluye de sur a norte y se comparte con Nogales, Arizona, en los Estados Unidos de América.

Los Gobiernos de México y Estados Unidos, en el marco del Acta 289 de la Comisión Internacional de Límites y Aguas relativo al monitoreo conjunto de la Calidad de las Aguas Subterráneas en el Área de Ambos Nogales, han llevado a cabo un programa de observación conjunta de las aguas subterráneas en Nogales, Sonora y Nogales, Arizona. A fin de atender y evitar en lo posible problemas de contaminación en el acuífero.

De acuerdo a los resultados del Monitoreo Conjunto de la Calidad de las Aguas Subterráneas, para determinar la Presencia de Contaminantes Antropogénicos en el Acuífero Transfronterizo en el Área de Nogales Son.-Nogales, Ariz. (1998), realizado por la CNA, Comisión de Agua Potable y Alcantarillado del Estado de Sonora, en coordinación con la Comisión de Límites y Aguas y su contraparte americana U. S. Environmental Protection Agency, Arizona Department of Environmental Quality, Santa Cruz County Health Department, se concluyó que los pozos monitoreados presentaban concentraciones de percloroetileno (PCE), nitratos, coliformes totales y fecales.

Derivado de lo anterior surgió la necesidad de realizar nuevos muestreos en el sistema de distribución de agua potable y fuentes de abastecimiento en Nogales, Sonora, con el fin de determinar la presencia de PCE e implementar medidas para dar solución a esta posible contaminación que pudiera poner en riesgo a la población; lo que llevó a la clausura de cinco pozos en los que se detectó la presencia del contaminante (5 de Mayo, Unidad Deportiva, La Esperanza, Mariposas y Noria COAPAES); estos pozos aportaban a la red 32 lps. Asimismo, se llevaron a cabo cinco campañas de monitoreo en el sistema de distribución de agua potable y fuentes de abastecimiento en la ciudad de Nogales. Las campañas se realizaron de junio a noviembre de 1998.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con la información de aprovechamientos ubicados dentro de los límites del acuífero de Nogales, existen 41 pozos para usos doméstico, industrial, múltiple, pecuario, público urbano y de servicios.

De acuerdo con información del REPDA al 30 de abril de 2007, el volumen concesionado a estos pozos es de 380,850 m³ anuales.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas es un método de evaluación de la potencialidad de un acuífero.

Se basa en el principio de conservación de la materia y tiene por objeto principal la determinación del volumen de recarga. La ecuación de balance tiene la siguiente forma.

$$R_v + E_h - B - S_h - D_m - ETR = \pm \Delta V \text{ ----- (1)}$$

Donde:

Eh: entradas subterráneas por flujo horizontal

Rv: recarga vertical

B: extracción por bombeo

Sh: salidas subterráneas por flujo horizontal

Dm: descarga por manantiales

ETR: descarga por evapotranspiración

ΔV : cambio de volumen en el acuífero

7.1 Entradas

Las entradas en el acuífero Nogales están integradas por las recargas naturales por infiltración de agua de lluvias y recargas inducidas producto de fugas en la red de agua potable. Para el cálculo de la recarga se obtuvo primero el cambio de almacenamiento y conociendo las salidas totales, las entradas (recarga total) quedaron como una incógnita en el sistema.

7.2 Salidas

Las salidas del acuífero ocurren principalmente por flujo horizontal subterráneo, evapotranspiración y bombeo.

7.2.1 Extracción por bombeo (B)

Tomando como base las estimaciones de la extracción de agua subterránea, se ubicaron los pozos que se encuentran físicamente en el acuífero, y se obtuvo un volumen de bombeo de **0.8 millones de metros cúbicos por año** ($\text{hm}^3/\text{año}$).

7.2.2. Evapotranspiración (ETR)

Tomando como base las estimaciones de la extracción de agua subterránea, se ubicaron los pozos que se encuentran físicamente en el acuífero, y se obtuvo un volumen de bombeo de **0.6 millones de metros cúbicos por año** ($\text{hm}^3/\text{año}$).

7.2.3 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Con base en la configuración de curvas de igual elevación del nivel estático con respecto al nivel del mar registrado en 2005, se seleccionaron los canales de flujo para aplicar la Ley de Darcy y calcular el caudal "Q" que sale del acuífero, como se muestra a continuación:

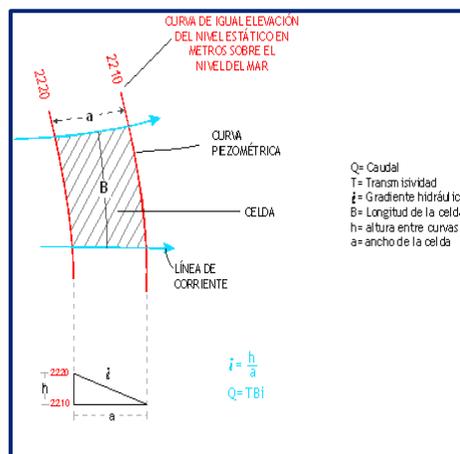
$$Q = T * B * i$$

Donde:

T: Transmisividad (m^2/s) en el canal de flujo

B: Ancho (m) del canal de flujo

i: Gradiente hidráulico ($i = h / L$); h y L son la diferencia de elevaciones y distancia respectivamente entre las equipotenciales que conforman el canal de flujo.



La descarga por flujo horizontal de aguas subterráneas se calculó en la parte Norte del valle, limitada por la línea internacional México / EUA, con volumen estimado de **3.4 hm³/año**.

En la Figura 4 se muestra la ubicación de las celdas consideradas, y en la Tabla No. 7 se presenta el cálculo del volumen de salidas para las 8 celdas.

Tabla No. 7. Salidas del acuífero Nogales hacia E. U. A.

Celda	Ancho	Largo	h_1-h_2	Gradiente Hidráulico	Transmisividad	Caudal	Volumen
	(B)	(L)		(i)	(T)	(Q)	
	(m)	(m)	(m)		(m^2/s)	(m^3/s)	($hm^3/año$)
A	250	425	5	0.012	0.0028	0.008	0.3
B	120	330	5	0.015	0.0028	0.005	0.2
C	210	390	5	0.013	0.0028	0.007	0.2
D	200	380	5	0.013	0.0028	0.007	0.2
E	300	250	5	0.020	0.0028	0.017	0.5
F	250	165	5	0.030	0.0028	0.021	0.7
G	220	116	5	0.043	0.0028	0.027	0.8
H	120	110	5	0.046	0.0028	0.015	0.5
Volumen Total							3.4

7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS)

Considerando las entradas totales al acuífero y las salidas totales del sistema, aplicando la ecuación de balance se tiene:

$$\text{Cambio de Almacenamiento} = \text{Entradas} - \text{Salidas}$$

El cambio de almacenamiento se obtuvo al evaluar las siguientes expresiones:

Volumen = Área x Evolución de los niveles ($V = A \cdot \Delta H$)

Cambio de almacenamiento = Volumen x Porosidad Efectiva

$$\Delta V(S) = A \cdot \Delta H \cdot n_e$$

El cambio de almacenamiento en el acuífero de Nogales fue obtenido en el área definida por los aprovechamientos que cuentan con información para los años 1994 y 2005. Entonces, en el acuífero Nogales, Sonora, el cambio de almacenamiento es igual a **0.4 hm³/año**).

7.3.1 Salida por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Dado que no existe información piezométrica confiable fuera de la zona urbana de la ciudad de Nogales, se optó por considerar incluida a las entradas por flujo subterráneo dentro del total de la recarga vertical que recibe el acuífero.

7.3.2 Recarga total (R)

La recarga total (Rt) que recibe el acuífero representa la suma de las entradas calculadas al acuífero (Rv + Eh), resultan de aplicar la ecuación de balance:

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

$$R = 0.8 + 3.4 + 0.6 + 0.4 = 5.2$$

R = 5.2 millones de metros cúbicos por año (hm³/año)

En la Tabla No. 8 se presenta el resumen del balance de aguas subterráneas

Tabla No. 8. Balance de aguas subterráneas

Área total del acuífero		km ²	120
RECARGA			
Entradas Totales		hm ³ /año	5.2
RECARGA TOTAL		R	5.2
DESCARGA			
Salidas horizontales		hm ³ /año	3.4
Manantiales		hm ³ /año	0
Evapotranspiración		hm ³ /año	0.6
Extracción total		hm ³ /año	0.8
Industrial		hm ³ /año	0.7399
Servicios		hm ³ /año	0.0441
Pecuario		hm ³ /año	0.03
Múltiples		hm ³ /año	0.01
Público		hm ³ /año	0.0083
Urbano		hm ³ /año	0.0007
Domestico		hm ³ /año	0.0007
DESCARGA TOTAL		St	4.7
Cambio de Almacena miento		ΔV	0.4

8. DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua-que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales; en su fracción relativa a las aguas subterráneas, menciona que la disponibilidad se determina por medio de la expresión siguiente:

$$\begin{array}{rcccc} \text{DISPONIBILIDAD} & = & \text{RECARGA} & - & \text{DESCARGA} & - & \text{EXTRACCIÓN DE} \\ \text{MEDIA ANUAL DE} & & \text{TOTAL} & & \text{NATURAL} & & \text{AGUAS} \\ \text{AGUA DEL SUBSUELO} & & \text{MEDIA} & & \text{COMPROMETIDA} & & \text{SUBTERRÁNEAS} \\ \text{EN UN ACUÍFERO} & & \text{ANUAL} & & & & \end{array}$$

Donde:

- DMA** = Disponibilidad media anual de agua del subsuelo en un acuífero
- R** = Recarga total media anual
- DNC** = Descarga natural comprometida
- VEAS** = Volumen de extracción de aguas subterráneas

8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero. Para este caso, su valor es de **5.2 hm³/año**,

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

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 de ser sostenidas para no afectar a las unidades hidrogeológicas adyacentes.

En el acuífero de Nogales, el volumen de descarga natural comprometida es la suma de las salidas horizontales hacia el acuífero de Arizona, a fin de no afectar la recarga que recibe el acuífero hacia el territorio de los EUA, más el 50% de la Evapotranspiración que se requiere para mantener las condiciones actuales en el valle, obteniéndose un volumen comprometido de **3.7 hm³/año**.

8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

La extracción de aguas subterráneas se determina sumando los volúmenes anuales de agua asignados o concesionados por la Comisión mediante títulos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), los volúmenes de agua que se encuentren en proceso de registro y titulación y, en su caso, los volúmenes de agua correspondientes a reservas, reglamentos y programación hídrica, todos ellos referidos a una fecha de corte específica.

En el caso de los acuíferos en zonas de libre alumbramiento, la extracción de aguas subterráneas será equivalente a la suma de los volúmenes de agua estimados con base en los estudios técnicos, que sean efectivamente extraídos aunque no hayan sido titulados ni registrados, y en su caso, los volúmenes de agua concesionados de la parte vedada del mismo acuífero.

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **2,362,652 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

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 referida anteriormente, se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de extracción de aguas subterráneas.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= \text{R} - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 5.2 - 3.7 - 2.362652 \\ \text{DMA} &= -0.862652 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario el déficit es de **862,652 m³ anuales**.

9. BIBLIOGRAFÍA

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA, 2002. Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000, México, D. F.

SEISMOCONTROL, 1995. Diagnóstico de las Condiciones Geohidrológicas de la Zona de los Alisos-Santa Cruz, Nogales, Sonora.