



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO SAN PEDRO TUXPAN (1802), ESTADO
DE NAYARIT**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1. GENERALIDADES.....	2
Antecedentes	2
1.1 Localización	2
1.2 Situación administrativa del acuífero	6
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	6
3. FISIOGRAFÍA.....	8
3.1 Provincia fisiográfica	8
3.2 Clima	9
3.3 Hidrografía.....	11
3.4 Geomorfología.....	12
4. GEOLOGÍA.....	15
4.1 Estratigrafía.....	18
4.2 Geología estructural	20
4.3 Geología del subsuelo.....	21
5. HIDROGEOLOGÍA.....	22
5.1 Tipo de acuífero.....	22
5.2 Parámetros hidráulicos	23
5.3 Piezometría.....	24
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	28
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	29
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	29
7.1 Entradas.....	30
7.1.1 Recarga vertical (Rv)	30
7.1.2 Entradas subterráneas horizontales (Eh).....	31
7.1.3 Recarga Inducida (Ri)	32
7.2 Salidas	32
7.2.1 Evapotranspiración	33
7.2.2 Bombeo (B).....	35
7.2.3 Salidas subterráneas (Sh).....	35
7.3 Cambio de Almacenamiento (ΔV_S).....	36
8. DISPONIBILIDAD	37
8.1 Recarga total media anual (R).....	37
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	37
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	38
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	38
9. BIBLIOGRAFÍA	39

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 San Pedro-Tuxpan, definido con la clave 1802 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción centro-noroeste del estado de Nayarit, a aproximadamente 50 km al noroeste de la ciudad de Tepic, cubre de manera total al municipio de Tuxpan y de manera parcial a los municipios de Santiago Ixcuintla, Ruiz y Rosamorada, abarcando una superficie aproximada de 9,032 km². Limita al norte con el acuífero Valle Acaponeta Cañas, al este y sur con el acuífero Valle Santiago-San Blas, en el estado de Nayarit, y al oeste con el Océano Pacífico (figura 1).

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero.

ACUÍFERO 1802 SAN PEDRO-TUXPAN							OBSERVACIONES
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	104	44	33.1	22	32	15.2	
2	104	50	53.5	22	27	15.2	
3	104	50	58.7	22	23	20.6	
4	104	52	36.8	22	22	27.0	
5	104	48	19.9	22	18	17.7	
6	104	48	12.7	22	13	47.5	
7	104	47	2.3	22	9	41.2	
8	104	43	2.6	22	8	4.0	
9	104	41	52.6	22	3	0.6	
10	104	43	51.2	21	59	31.3	
11	104	49	28.1	21	58	46.0	
12	104	52	12.3	21	54	56.4	
13	104	54	9.6	21	54	7.8	
14	105	4	31.0	21	53	28.1	
15	105	27	39.3	21	40	3.5	DEL 15 AL 16 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
16	105	39	7.0	22	1	44.3	
17	105	26	44.8	21	58	48.8	
18	105	22	33.4	22	1	35.7	
19	105	19	51.9	21	58	36.8	
20	105	8	24.5	21	58	41.7	
21	104	59	1.7	22	4	33.7	
22	105	1	7.9	22	11	28.8	
23	105	3	53.4	22	16	12.1	
24	105	10	31.7	22	22	11.1	
25	105	6	16.5	22	24	14.5	
26	105	6	37.8	22	27	15.7	
27	105	10	28.9	22	35	9.2	
28	105	10	8.7	22	38	24.4	
29	105	11	11.5	22	43	13.8	
30	105	10	49.1	22	48	19.0	
31	105	9	14.8	22	51	56.7	
32	105	6	44.5	22	53	37.6	
33	105	4	53.6	22	56	36.6	
34	105	4	52.4	22	57	16.5	
35	105	4	42.7	22	57	40.6	
36	105	2	23.7	23	11	11.7	
37	104	56	16.3	23	12	17.3	
38	104	51	1.4	23	16	13.5	
39	104	48	36.6	23	23	55.8	
40	104	51	13.3	23	26	24.5	
41	104	48	56.3	23	31	56.3	
42	104	41	19.8	23	31	39.0	
43	104	41	30.7	23	26	36.7	
44	104	41	1.3	23	21	19.8	
45	104	39	50.3	23	16	41.9	
46	104	35	58.7	23	19	36.3	
47	104	30	32.9	23	17	23.6	
48	104	31	20.8	23	11	14.6	
49	104	28	31.0	23	12	50.3	
50	104	27	29.2	23	9	15.7	
51	104	21	15.6	23	9	57.4	
52	104	21	7.9	23	15	15.4	
53	104	16	22.1	23	22	12.0	
54	104	17	50.0	23	25	41.0	
55	104	17	3.9	23	26	46.9	
56	104	15	36.0	23	24	0.0	
57	104	5	1.0	23	24	11.4	DEL 57 AL 58 POR EL LIMITE ESTATAL
58	104	10	24.0	22	59	6.4	
59	104	15	34.2	23	0	49.2	
60	104	18	9.5	23	3	29.0	
61	104	20	21.3	22	58	17.7	
62	104	22	42.1	22	59	55.1	
63	104	23	0.1	22	57	56.0	
64	104	31	14.7	22	58	14.0	
65	104	35	41.9	22	51	58.6	
66	104	41	10.4	22	52	38.3	
67	104	42	51.5	22	50	24.7	
68	104	43	24.0	22	45	46.7	
69	104	44	54.3	22	44	49.0	
70	104	42	29.9	22	40	57.9	
71	104	43	14.5	22	34	35.4	
1	104	44	33.1	22	32	15.2	

El estado de Nayarit se localiza al noroeste de la República Mexicana, limitando al sur con el estado de Jalisco, al norte con el Estado de Sinaloa, al oriente con los Estados de Durango y Zacatecas y al poniente con el Océano Pacífico y Golfo de California. Cubre una superficie territorial aproximada de 27,621 km², ocupando el 25vo lugar a nivel nacional.

El estado está conformado por 20 municipios y su población total es de 949,684 habitantes (INEGI-2005). Los municipios más importantes y donde se concentra la mayor población son: Tepic, con el 29.4 % de la población total; Santiago Ixcuintla con el 8.9%; Bahía de Banderas con el 8.8%; Compostela con el 6.6%; Xalisco con el 4.5%, el resto de los municipios abarcan en conjunto el 31.8%.

La infraestructura carretera permite un buen enlace entre las principales poblaciones de la zona. La principal vía acceso es la Carretera Federal No. 15 (Carretera Internacional México-Nogales), en su tramo Tepic, Nayarit- Mazatlán, Sinaloa, la cual atraviesa la región transversalmente de Sur a Norte.

Además de la infraestructura carretera, se cuenta con servicio ferroviario de escaso tránsito, cuya estación más cercana se localiza en el poblado de Ruiz. En las cabeceras municipales de Santiago Ixcuintla, Tuxpan y Ruiz existen pequeñas aeropistas de tránsito local y regional. Como se mencionó anteriormente, las principales poblaciones que se encuentran dentro del acuífero son: Santiago Ixcuintla, Tuxpan y Ruiz, las cuales gozan de servicio de energía eléctrica, telégrafos, teléfono, servicio de agua potable y alcantarillado, servicio médico y educacional hasta nivel superior.

Además, existen varias localidades y comunidades de menor densidad poblacional que también representan gran importancia económica para la región; entre éstas están San Vicente, Coamiles, Pozo de Ibarra y Sentispac entre otras.

Las principales actividades a las que se dedica la población económicamente activan son, en primera instancia, las agrícolas y pesqueras, y en menor escala la ganadería y la minería. En la agricultura, existen superficies de riego y de temporal, siendo ésta última la más importante. Los principales cultivos son maíz, frijol, trigo, forrajes y árboles frutales, destacando por su importancia el mango. En cuanto a la pesca, las especies marinas que más se capturan son el camarón, atún, sardina, huachinango, lisa, sierra, entre otros.

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero San Pedro-Tuxpan pertenece a la Región Hidrológica Administrativa III Pacífico Norte que se localiza en el noroeste de la República Mexicana y comprende el Estado de Sinaloa en su totalidad, ocho municipios de Chihuahua (Guadalupe y Calvo, Morelos, Batopilas, Guachochi, Urique, Chinipas, Guazapares y Maguarichi), 16 municipios del estado de Durango (Topia, Canelas, Tamazula, Otaez, San Dimas, Pueblo Nuevo, Mezquital, Durango, Nuevo Ideal, Canatlán, Panuco de Colorado, Guadalupe Victoria, Poanas, Nombre de Dios, Vicente Guerrero y Súchil), 2 municipios de Zacatecas (Sombrerete y Chalchihuites) y 7 municipios de Nayarit (Huajicori, Acaponeta, Tecuala, Rosamorada, Santiago Ixcuintla, Ruiz y Tuxpan). Su extensión territorial es de 167,821 km² y representa el 8.2% del territorio nacional.

Específicamente dentro de la zona que comprende el acuífero San Pedro-Tuxpan, existe un Decreto Presidencial publicado en el Diario Oficial de la Federación el 23 de mayo de 1972, mediante el que se crea el Distrito de Acuacultura No. 1 y se establece veda de control para nuevas obras de alumbramiento, extracción y aprovechamiento de aguas subterráneas; el resto de la superficie del acuífero, que no está considerada dentro de los límites de dicho Distrito de Acuacultura, opera todavía como zona de libre alumbramiento. De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 3.

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

De la región en donde se ubica el acuífero San Pedro-Tuxpan, se cuenta con un estudio geohidrológico realizado en el año de 1981 por la empresa Rocha y Asociados, S. A., denominado "Estudio de Prospección y Levantamientos Geológicos y Geofísicos en la Zona del Valle del Río San Pedro, Estado de Nayarit", el cual sirvió para establecer los análisis comparativos de comportamiento y evolución de los niveles estáticos del acuífero.

En el año 2005, la empresa SPIC Servicios y Proyectos de Ingeniería Civil, S.A. de C.V., realizó el "Estudio de Actualización de las Condiciones Hidrogeológicas del Acuífero San Pedro-Tuxpan, Nayarit; el cual tuvo como objetivo principal evaluar las condiciones hidrogeológicas prevalecientes, mediante el conocimiento del comportamiento y evolución del acuífero San Pedro-Tuxpan, de acuerdo a su geometría y funcionamiento, con la finalidad de servir de sustento para proponer las políticas de manejo adecuadas y estar en condiciones de realizar un mejor aprovechamiento del recurso.

Dentro de sus resultados principales están: la definición del marco geológico-geohidrológico; la actualización del censo de aprovechamientos hidráulicos y la determinación de sus características constructivas, equipamiento y régimen de operación; se establecieron 25 pozos piloto para la implementación de una red de monitoreo piezométrico, cuya nivelación de sus brocales se llevó a cabo con un GPS de alta precisión.

Se determinó la posición del nivel estático del acuífero y el conocimiento de su evolución en el período 1981 al 2005.

Adicionalmente, se determinó la composición química del agua subterránea, su distribución y se identificaron las zonas con mejores condiciones en cuanto a calidad y cantidad, susceptibles de aprovechamiento para todos los usos.

Para ello se realizaron 8 muestreos en igual número de pozos, seleccionados con base en criterios geológicos e hidrogeológicos.

Mediante 4 pruebas de bombeo de corta duración se determinaron los parámetros hidrogeológicos del acuífero y se realizó un balance de aguas subterráneas para el cálculo preliminar de la disponibilidad.

En el año 2006, la Gerencia Estatal de Nayarit, a través de la Jefatura de Proyecto de Aguas Subterráneas de la Subgerencia Técnica, llevó a cabo recorridos de campo piezométricos en la actual zona de explotación del acuífero San Pedro-Tuxpan, las mediciones se realizaron sobre pozos piloto establecidos mediante los trabajos realizados en el estudio anteriormente descrito.

Con la información piezométrica recabada, se elaboraron las configuraciones del nivel estático correspondientes y se planteó el balance de aguas subterráneas para estimar la recarga media anual. Asimismo, se determinó su disponibilidad conforme a la norma NOM-011-CNA-2000.

Estos dos últimos trabajos fueron la base para la elaboración del presente documento, por lo que sus resultados y conclusiones se presentarán en los apartados correspondientes.

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

Por su extensión y posición geográfica, el acuífero San Pedro–Tuxpan se puede dividir en dos secciones; la primera, que es la de mayor extensión, se localiza en las zona serrana entre los estados de Nayarit y Durango, dentro de la Provincia de la Sierra Madre Occidental, que es donde se genera la mayor parte de la recarga; la segunda, de menor superficie, corresponde a la actual zona de explotación, y se ubica fisiográficamente dentro de la provincia fisiográfica Llanura Costera del Pacífico.

La Llanura Costera del Pacífico se extiende desde Ciudad Obregón, en el estado de Sonora, hasta Nayarit y la superficie que la constituye se localiza entre la Sierra Madre Occidental y el Océano Pacífico.

Al norte se encuentra limitada por la Provincia del Desierto de Sonora, la que también cuenta con su propia planicie costera; al sureste por la Provincia del Eje Neovolcánico; al este por la provincia de la Sierra Madre Occidental y al oeste por el Océano Pacífico.

La provincia de la Sierra Madre Occidental está situada en la parte oriental del estado de Nayarit, tiene un ancho medio de 30 a 50 km; el promedio de elevación en esta región varía de 2,000 a 2,700 msnm y se caracteriza por su constitución ígnea. El rasgo fisiográfico más importante de esta provincia se encuentra representado por las subprovincias que a continuación se mencionan:

La subprovincia Altas Mesetas Riolíticas incluye un área extensa y tiene grandes elevaciones que presentan ondulaciones e inclinaciones preferentemente al occidente. La mayor parte de estas mesetas están formadas por derrames piroclásticos de composición riolítica, con una topografía abrupta debido al gran número de cañones que la disectan.

La subprovincia Sierras Sepultadas se extiende a lo largo de las costas de Sonora, Sinaloa y Nayarit, con una dirección NW-SE. Los acarreos provenientes del flanco oeste de la Sierra Madre Occidental sepultan gran parte de la región montañosa del borde occidental, de tal manera que solamente las cimas y picos de las sierras sobresalen como cerros aislados. Estas se localizan entre las Altas Mesetas Riolíticas y la Planicie Costera, son montañas sepultadas parcialmente que adquieren hacia al oriente elevaciones del orden de 150 m.

Las rocas de esta franja son jóvenes y en ellas es fácil reconocer sobre las lavas los centros de emisión de las erupciones, cuyas formas están bien conservadas.

Según la clasificación de provincias fisiográficas de México, realizada en el año de 1959 por Erwin Raisz, gran parte de la provincia costera queda comprendida dentro de la provincia denominada "Cordilleras Sepultadas". Debido a que la provincia de la Llanura Costera del Pacífico cubre la totalidad de las costas del Estado de Sinaloa, los estudios geológicos, geohidrológicos e investigaciones realizadas con anterioridad, han sido enfocados a ese estado.

La descripción de la tectónica de dicha provincia es válida para las condiciones del estado de Nayarit.

La fisiografía de la Llanura Costera está caracterizada por abanicos aluviales, antiguos valles fluvio-deltaicos, pequeñas colinas constituidas por rocas pre-deltaicas, deltas actuales, estuarios, complejos lagunares, cauces de ríos y arroyos, rías, depósitos eólicos y marinos; los cuales pueden ser agrupados en unidades fisiográficas en cuanto al ambiente de formación como: continentales, fluviales, mixtos o de transición, eólicos y marinos.

3.2 Clima

Dentro de la Región Hidrológico-Administrativa Pacífico Norte, el notable contraste entre las elevaciones topográficas de la porción costera y de la zona montañosa, y la situación geográfica de la misma respecto del trópico de Cáncer, originan que en la zona se diferencien varios tipos de climas en áreas de forma irregular, paralelas entre sí, orientadas sensiblemente de norte a sur y ubicadas en forma diagonal a la línea de costa.

Con base en la clasificación climática de Köppen, modificada por Enriqueta García en 1981 para las condiciones particulares de la República Mexicana, el clima que prevalece en la cuenca hidrológica en que se localiza el acuífero, se caracteriza por una variedad de climas.

En general, el clima predominante en la región del Valle del Río San Pedro es cálido subhúmedo, con temperatura media anual entre 24° y 26°C. El régimen de lluvias es de verano con un porcentaje invernal menor del 5% de la lluvia total anual.

Con el fin de conocer las características atmosféricas de la zona, se recopilaron datos climatológicos de las estaciones que se encuentran emplazadas en la zona de interés, para diferentes períodos comprendidos desde 1946 al 2005. Dentro de la superficie que abarca el acuífero se encuentran localizadas las estaciones “Mexcaltitán”, “Santiago Ixcuintla”, “Ruiz”, “El Capomal” y “Puerta de Platanares”, en el estado de Nayarit, cuyos datos de localización se muestran en la tabla No. 2

La temperatura media anual oscila entre los 25 y 27° C, exhibiendo sus valores más bajos en los meses de enero y febrero, mientras que las temperaturas más altas se registran en el periodo junio-agosto, coincidiendo con los meses de las lluvias de verano, siendo el mes de junio el que registra la mayor temperatura. El valor de la temperatura media anual obtenido, mediante el método de Polígonos de Thiessen, es de 26.5° C.

Con los valores de precipitación obtenidos de las 5 estaciones climatológicas en la zona, se puede establecer que su valor se incrementa de la zona costera hacia la zona de lomeríos y hacia la Sierra Madre Occidental.

De acuerdo con las áreas de influencia y los registros de precipitación para cada una de las estaciones, se determinó que el valor de la precipitación media anual es de 1337 mm, que está por encima del promedio nacional. La distribución estacional muestra que, durante la temporada de lluvias, que va de junio a septiembre, se concentra la mayor parte de la precipitación.

Observando los datos de la estación de más largo período de registro, se tiene que los valores mensuales son de hasta 448 mm, registrados en el mes de agosto; mientras que, durante la época de estiaje, comprendida de febrero a mayo, la lluvia disminuye considerablemente, hasta tomar valores prácticamente nulos, menores a 1 mm, registrados en el mes de abril y un valor acumulado menor a los 25 mm, para el todo el período de estiaje.

Con respecto a la evaporación potencial, se puede observar en la tabla 2 que las estaciones muestran una continua evaporación durante todo el año, con valor medio anual de 1,417 mm, variando desde 1096 mm a 1906 mm. Los valores más pequeños se presentan durante el mes de enero y los más altos en mayo, registrando estos últimos, una relación directa con el incremento de la temperatura.

Tabla 2. Ubicación de estaciones climatológicas.

No	ESTACIÓN	UBICACIÓN		ALTITUD	AREA DE INFLUENCIA	
		LATITUD	LONGITUD	msnm	km ²	%
1	MEXCALTITAN	21.91	105.48	4.00	719.32	50.74
2	SANTIAGO IXCUINTLA	21.81	105.20	11.00	353.83	24.96
3	RUIZ	21.96	105.14	24.00	236.53	16.68
4	EL CAPOMAL	21.83	105.11	27.00	3.65	0.26
5	PUERTA DE PLATANARES	21.92	104.98	110.00	104.42	7.36

3.3 Hidrografía

La estructura hidrológica del Delta del Río Grande de Santiago está integrada por los ríos Acaponeta, San Pedro y el Grande de Santiago, siendo este el mayor y más importante. Estos escurrimientos nacen en la Sierra Madre Occidental y descargan sus aguas en las zonas de marismas del Océano Pacífico.

La red hidrográfica de la zona, por orden de jerarquía, la constituyen los Ríos Grande de Santiago y San Pedro; ambas corrientes superficiales representan gran importancia para la agricultura y la ganadería regional.

A partir del año de 1993 las aguas del Río Grande de Santiago son almacenadas y reguladas para ser empleadas en la generación de energía eléctrica, por medio de la Presa Hidroeléctrica "Aguamilpa".

El escurrimiento medio anual de estas corrientes, de acuerdo a datos estadísticos de las estaciones hidrométricas localizadas en El Capomal y en Ruíz es de 6,541,263 y 2,829,440 m³/año, respectivamente y su sistema de drenaje en la zona de piedemonte está formado por una gran cantidad de afluentes constituidos por escurrimientos torrenciales de carácter temporal y algunos perennes que integran en conjunto una red de drenaje de tipo dendrítico y subparalelo.

Hacia la planicie, por la escasa inclinación o pendiente del terreno, desaparece el sistema dendrítico permaneciendo sólo el sistema subparalelo.

En la desembocadura del río San Pedro y junto a la línea costera, a lo largo del acuífero, existen lagunas de agua salada y marismas comunicadas con el Océano Pacífico por medio de esteros (estuarios).

El río San Pedro nace en el Estado de Durango y sigue una dirección sur hasta el inicio de la zona de explotación, a escasos kilómetros del cruce con la vía del ferrocarril del Pacífico, en donde cambia su curso en dirección hacia el oeste, manteniéndolo hasta la desembocadura, la cual tiene lugar en una planicie de inundación, conocida localmente como zonas de marismas, localizadas entre las cuencas de los ríos Acaponeta y Santiago, en el estado de Nayarit.

De acuerdo con la división territorial en regiones hidrológicas, la Gerencia Regional Pacífico Norte, está conformada por las regiones números 10 y 11; el acuífero San Pedro-Tuxpan se localiza dentro de esta última, denominada “Quelite-San Pedro”.

Esta región es la más chica de las dos, abarca la porción sur del estado de Sinaloa y parte de Zacatecas, Durango y Nayarit, en ella se encuentran las cuencas de 6 ríos, 4 en Sinaloa y 2 en Nayarit, siendo los más importantes los ríos Presidio, Baluarte y San Pedro; el río Cañas es el más pequeño de esta zona. Todas estas corrientes superficiales escurren hacia el Océano Pacífico.

Para fines de planeación, Región Hidrológico-Administrativa Pacífico Norte se dividió en cinco subregiones: Subregión Norte, Subregión Centro-Norte, Subregión Centro-Sur, Subregión Tuxpan y Subregión Valle del Guadiana. La cuenca del río San Pedro pertenece a la Subregión Tuxpan.

La cuenca a la que pertenece el acuífero San Pedro-Tuxpan se denomina Río San Pedro, presenta condiciones de disponibilidad y abarca la parte centro-norte de Nayarit.

3.4 Geomorfología

La subprovincia del delta del Río Grande de Santiago abarca desde el municipio de Tecuala hasta el de San Blas, comprendiendo en su totalidad el municipio de Tuxpan y parte de Acaponeta, Rosamorada, Ruiz y Santiago Ixcuintla, con una superficie aproximada de 4,166.031 km². Se caracteriza por presentar variados sistemas geomorfológicos, los cuales se describen a continuación:

Llanura Deltaica, se observan tres llanuras en esta subprovincia, la del Río Acaponeta, la del Río Grande de Santiago y la del Río San Pedro, su relieve es casi plano. Las llanuras están formadas por materiales aluviales y fluviales depositados por los ríos; en la zona comprende su parte central, desde Santiago Ixcuintla hasta Sentispac en el

sur, y desde Coamiles hasta Tuxpan en el norte.

Marismas, son extensiones muy planas que están sujetas a inundación por efecto de las mareas y forman pantanos y lagunas de agua salobre, corresponden a una gran extensión en la porción occidental del área, los materiales que las constituyen son palustres, conformados por arcillas, limo y materia vegetal en descomposición.

Barras Paralelas, son formadas por antiguas líneas de costas que aíslan a las lagunas del mar, al igual que las marismas, ocupan la porción occidental del área de interés, se componen de material arenoso depositado por las variaciones de pleamar y bajamar.

Pequeña Sierra de Laderas Tendidas, es la superficie compuesta de estructuras de piedemonte de la porción oriental de la zona, se inicia con los Cerros de Coamiles y de Peñas, formados por tobas riolíticas con interdigitaciones de basaltos calco-alcalinos. Estas dos estructuras presentan elevaciones de hasta 350 metros sobre el nivel del mar y son representativas de la zona, se encuentran asociadas con lomeríos dómicos, pequeños llanos aislados y cadenas de colinas de rocas ígneas ácidas.

Dentro de la zona del acuífero se distinguen las siguientes unidades geomorfológicas: lomeríos, sierras, mesetas, abanicos aluviales, cauces fluviales, valles deltaicos, rías, estuarios, lagunas litorales, bermas, manglares, dunas y playas, las cuales se describen a continuación:

Lomeríos, se encuentran prácticamente en toda el área y se han desarrollado a partir de rocas graníticas y clásticas. Presentan formas suaves de relieve moderado, alcanzando alturas máximas de 50 m.

Sierras, formadas por rocas volcánicas, presentan pendientes fuertes y formas abruptas e irregulares, que constituyen las estribaciones de la Sierra Madre Occidental.

Mesetas, las rocas volcánicas que forman la región, en ocasiones presentan sus estructuras primarias poco erosionadas, originando la formación de mesetas con leves inclinaciones hacia el poniente y flancos abruptos.

Abanicos aluviales, desarrollados entre las partes altas y los valles, son de extensión reducida y debido a su forma suelen confundirse con depósitos de talud.

Cauces fluviales, los cauces de los ríos llegan a medir varios metros de ancho que son inundados durante lluvias extraordinarias, presentan forma plana y bajo gradiente, lo cual ocasiona que dentro de ellos el río divague y propicie la formación de meandros. Dentro de los cauces se han desarrollado terrazas debido a la erosión y depósito de material que efectúa el río dentro del cauce.

Valles deltaicos, estos se forman en las márgenes de los cauces, son de forma plana, pendiente suave hacia el mar y sobre ellos se han desarrollado meandros, los cuales en ocasiones contienen agua, dando lugar a la formación de pequeñas lagunas semicirculares de escasa profundidad.

Ríos, corresponden a zonas bajas inundables, localizadas en las desembocaduras de las corrientes hacia el mar o lagunas litorales.

Estuarios, la desembocadura de los ríos al mar produce ensanchamientos en forma de embudo, debido a la influencia de las mareas y a las crecientes de los ríos.

Lagunas litorales, representan cuerpos de agua aislados del Océano formados por la acumulación de sedimentos transportados por los ríos y retrabajados por el mar.

Bermas, dentro de la zona costera, fuera de la desembocadura de los ríos, se presentan las bermas o antiguas líneas de costa. Son franjas de 50 a 300 m de ancho que forman leves ondulaciones cuyas partes bajas se encuentran por lo general encharcadas.

Manglares, los bosques de manglar no están bien desarrollados, se encuentran restringidos principalmente al área de estuarios, esteros, cauces y porción de tierra adentro de barreras arenosas de las lagunas litorales.

Dunas, las dunas constituyen depósitos eólicos de sedimentos aportados por el mar y transportados por el viento; constituyen cordones continuos de alturas variables. Existen dos tipos predominantes: *activas* y *estabilizadas*.

Las activas son formas acrecionales originadas por la acción del viento al actuar sobre material aportado recientemente por el mar. Bajo condiciones normales se localizan en la parte inferior de la playa subaérea y fuera de la influencia del oleaje y de las mareas, son inestables y migran rápidamente al impulso del viento.

Las dunas estabilizadas están constituidas por sedimentos arenosos alejados de la costa y fuera de la fuente de sedimentos, han sido invadidas por la vegetación y adoptan formas parabólicas.

Playas, en general son amplias, de pendiente suave y uniforme, constituidas por sedimentos arenosos de grano fino a grueso. El aporte marino de material sedimentario en las costas es suficiente, por lo que las playas siempre mantienen sus características arenosas.

4. GEOLOGÍA

El marco geológico del estado de Nayarit está conformado por litologías muy complejas con variaciones espacio-temporales muy marcadas en su distribución, las cuales cubren desde el Mesozoico hasta el reciente (figura 2).

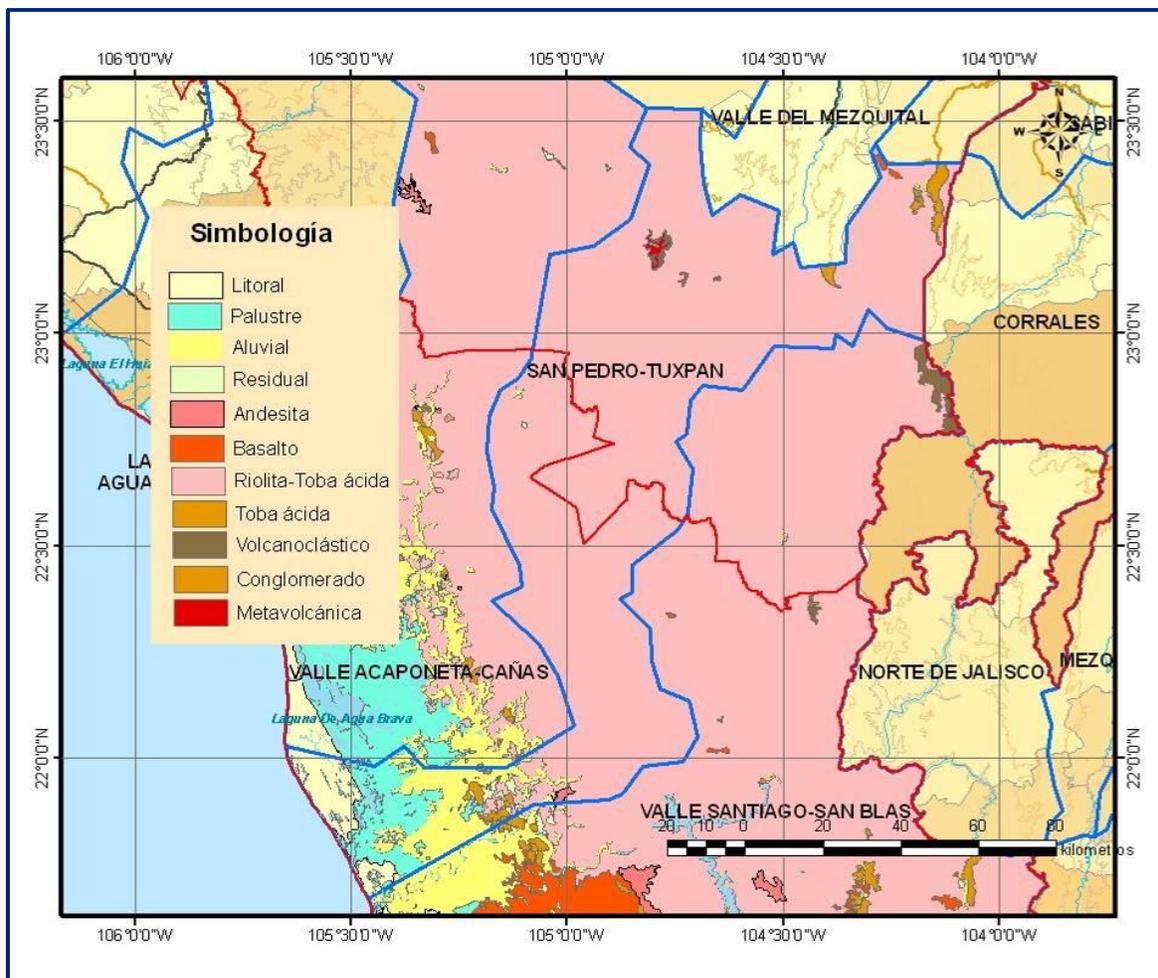


Figura 2. Geología general del acuífero.

El Paleozoico es el evento más antiguo en el estado de Nayarit y se encuentra representado por rocas metasedimentarias, probablemente calizas, lutitas y grauvacas, inter-estratificadas, depositadas en el Geosinclinal Mexicano, las cuales fueron posteriormente plegadas y recristalizadas por metamorfismo regional, transformándolas en mármoles, esquistos y gneises.

Etapas posteriores a esta sedimentación y deformación del Paleozoico son desconocidas y es hasta el Cretácico Superior en que se depositan sedimentos calcáreos en mares neríticos, formándose calizas arrecifales que se encuentran aflorando en los límites entre Nayarit y Jalisco.

Casi finalizando el periodo Cretácico, y como respuesta a la fase compresiva originada por el hundimiento de la Placa de Farallón por debajo de la Placa Norteamericana, inician las emanaciones volcánicas en el noroeste de México, estas manifestaciones lávicas son de tipo andesítica, generándose también intrusiones batolíticas de composición intermedia. Estos eventos forman la base del edificio ígneo extrusivo ácido de la Sierra Madre occidental.

Estas manifestaciones de tipo andesítico continúan durante el Cenozoico temprano (Oligoceno) en el centro y sur del estado de Nayarit y hay un período de erosión que da lugar a la formación de conglomerados y brechas andesíticas. La Sierra Madre Occidental se destaca por contener las mayores emanaciones de riolitas en todo el mundo, originadas durante el Oligoceno y el Mioceno Inferior.

Este paquete ignimbrítico resulta, probablemente, del fenómeno de fusión de la corteza terrestre, que ha generado magmas andesíticos, ocasionada por la subducción de la Placa de Farallón y de la Cordillera Oceánica del Pacífico Oriental. Aunque en esta última no se conozca bien el mecanismo de desaparición en una zona de subducción, es factible pensar en un flujo importante de calor que existe en la cordillera, que facilita mucho los fenómenos de fusión siálica.

El arco magmático existente en esta zona experimentó una regresión hacia la costa durante el periodo Oligoceno-Mioceno, ya que el ángulo de subducción está sufriendo un incremento que se refleja en un desplazamiento de la zona de actividad ígnea hacia las áreas cada vez más cercanas a la costa, efecto causado por el movimiento de la Cordillera Oceánica hacia posiciones cada vez más cercanas a la trinchera o fosa.

El área del acuífero se caracteriza por afloramientos de rocas ígneas, y en menor proporción rocas metamórficas, sedimentarias y depósitos recientes. Las rocas existentes han sido afectadas por movimientos tectónicos y actualmente se encuentran bajo un intenso proceso de intemperismo. Las rocas ígneas extrusivas consisten en derrames lávicos, como brechas y tobas de composición variable, formadas durante el periodo Terciario.

Por lo que respecta a las rocas sedimentarias, éstas consisten en conglomerados, areniscas y clásticos de diversos tamaños los cuales forman los piedemonte y abanicos aluviales. Se distinguen también gravas y arcillas de origen fluvial que forman deltas, bermas y dunas. Las rocas metamórficas del área corresponden a corneanas y rocas metavolcánicas.

Con excepción de los materiales del reciente, las demás unidades se consideran impermeables para fines hidrogeológicos. Dentro del marco geológico conceptual las rocas que conforman estratigráficamente el subsuelo del acuífero, por sus características morfológicas, geológicas y físicas, pueden clasificarse en unidades permeables, poco permeables e impermeables.

Son consideradas como unidades permeables los depósitos de aluvión (Qal), esta unidad se encuentra cubriendo principalmente la porción occidental de la zona y en las márgenes de los ríos, debido a su constitución arenosa y al poco contenido arcilloso, presenta un medio propicio para el almacenamiento y circulación del agua subterránea.

Los niveles estáticos de los aprovechamientos perforados en ella fluctúan de 4 a 10 m, con gastos que varían de 8 a 30 lps. Geohidrológicamente esta unidad es la que presenta mayor importancia, ya que en ella se localiza la potencialidad del acuífero.

Las rocas básicas (Tb), son basaltos que presentan un intenso fracturamiento originado por el tectonismo en que se encuentra sujeta la zona, así como también por su rápido enfriamiento; dando lugar a una permeabilidad secundaria que permite la circulación del agua a través de ellas.

Los afloramientos de esta unidad son pequeños por lo que su explotación acuífera se encuentra restringida.

Como unidades poco permeables se encuentran los conglomerados (Tsc), esta unidad se encuentra constituida por materiales granulares gruesos y medios, heterogéneos y anisotrópicos, que se presentan aglutinados dentro de una matriz arcillo-arenosa y pobremente cementados.

Sus características físicas hacen que esta unidad sea considerada como un acuífero con posibilidades de extracción de gastos pequeños. Debido a que con frecuencia contiene arcillas, puede ser la fuente principal de aportación de los iones de fierro y manganeso.

Las rocas ácidas (Tia), es el grupo de mayor distribución en la zona y está formado por ignimbritas y tobas riolíticas; el comportamiento hidrogeológico de estas unidades puede mostrar algunas variaciones de acuerdo a sus características físicas.

Estas rocas presentan una permeabilidad secundaria que es debida al fracturamiento y son susceptibles de formar acuíferos en las zonas de fallas o de fracturas. Presentan evidencias de termalismo.

Depósitos palustres, lacustres y de litoral (pa, la, li). - Estas unidades están compuestas de estratos delgados de arenas finas, con intercalaciones de horizontes arcillosos. Geohidrologicamente los sedimentos presentan poca permeabilidad debido a la granulometría de los materiales y saturación con agua salobre.

Debido al escaso espesor de estos depósitos, no constituyen barreras para la intrusión salina hacia el continente.

Como unidad impermeable se encuentran las rocas ácidas (Tia), de acuerdo a las condiciones estructurales, se considera que el basamento impermeable de la zona está constituido por las rocas riolíticas, que también afloran en el área, las cuales a profundidad no presentan fracturamiento y alteración.

4.1 Estratigrafía

Como puede observarse en el plano geológico, las unidades litológicas expuestas en el acuífero corresponden eminentemente al Cenozoico, variando en edad del Terciario Inferior hasta el Reciente.

Las rocas ígneas extrusivas de carácter ácido constituyen poco más del 55% de las

rocas aflorantes; el resto son rocas sedimentarias continentales. Las unidades litológicas se describen a continuación de acuerdo a su orden cronológico.

Rocas Ígneas Extrusivas Ácidas (Tia)

Es una unidad sin nombre formaciones que está constituida por tobas líticas y pumíticas semiconsolidadas, ignimbritas soldadas y lavas riolíticas; la porción superior se caracteriza por presentar un gran espesor de material volcánico ácido, con predominancia de tobas líticas, pumíticas, vitrófidos y brechas volcánicas, ocasionales lahares y tobas arenosas de caída libre, variando su composición de riolítica a riodacítica.

Afloran en toda la porción oriental de la zona, desde Coamiles hasta las estribaciones del piedemonte, y representan el inicio de las estructuras de la Sierra Madre Occidental, su edad corresponde al periodo comprendido entre el Oligoceno y Mioceno Superior. En el Cerro de Peñitas se observan intercalaciones de derrames de basaltos calcoalcalinos de estructura amigdaloides rellena de calcita y zeolita. En las inmediaciones del poblado de Ruíz, las tobas se encuentran argilizadas, probablemente debido a procesos de hidrotermalismo.

Conglomerados (Tsc)

También es una unidad sin nombre formacional que aflora de manera discontinua en varias partes de la zona, principalmente al noroeste de Ruíz, en las inmediaciones del poblado Paso Real del Bejuco, al noreste de Santiago Ixcuintla, en los poblados de Ojos de Agua, Paredones y Pantano Grande.

Es una unidad sedimentaria continental constituida por un conglomerado polimíctico que contiene lentes de arenisca y fragmentos de rocas volcánicas ácidas, principalmente de ignimbritas riolíticas, tobas pumíticas, tobas líticas y ocasionales fragmentos de andesita. Todos los fragmentos se presentan bien redondeados y varían en tamaño desde 8 a 2 centímetros, encontrándose aglutinados dentro de una matriz areno-limosa, pobremente consolidada y con estratificación masiva.

Esta unidad sobreyace en forma discordante sobre las rocas volcánicas ácidas y la relación de su afloramiento con esta, muestra que se originó como relleno de pequeñas cuencas, se le ha asignado una edad del Plioceno Superior.

Depósitos de Aluvión (Qal)

Es una unidad de edad reciente que está ampliamente expuesta en la zona, corresponde a suelos granulares que han sufrido transporte principalmente fluvial, sus fragmentos heterogéneos son productos de la erosión de rocas pre-existentes.

En los cauces de los ríos estos depósitos están conformados por clastos, gravas y arenas limpias; en tanto que, en la planicie deltaica, entrelazada de los Ríos Grande de Santiago y San Pedro, los materiales son de granulometría fina, de tipo limo-arenosos.

De las unidades aflorantes en la zona, estos depósitos cubren a los conglomerados y su espesor no ha sido determinado.

Depósitos Lacustres, Palustres y de Litoral (Qla, Qpa, Qli)

Se trata de suelos originados por materiales transportados en suspensión por el agua, y acumulados en las depresiones, afloran ampliamente en la zona; en las áreas limítrofes con los aluviones deltaicos, la textura de la unidad lacustre-palustre, cambia transicionalmente a arcillo-arenosa.

Los materiales de litoral se localizan en la zona ubicada entre la alta y baja marea de la costa y están dispuestos en largas y angostas fajas de terreno en toda la porción occidental.

4.2 Geología estructural

En las unidades presentes en la región, especialmente en las rocas que constituyen las sierras, es posible identificar estructuras que corresponden a dos tipos de esfuerzos.

Esfuerzos de Compresión (Deformaciones y plegamientos): Estos rasgos son observables en rocas precámbricas, paleozoicas y mesozoicas, disminuyendo su intensidad en relación inversa a su edad. Parte de la secuencia cenozoica muestra deformaciones incipientes, expresadas por cambios de inclinaciones de los estratos, pudiendo variar de 5° a 32°.

Esfuerzos de Tensión (Fallas normales y fracturas): La mayoría de estas estructuras se asignan al Terciario Medio, Tardío y Cuaternario. De la misma forma afectan tanto a las ignimbritas que forman las mesetas altas como los basaltos del Pleistoceno, los cuales presentan sistemas poco desarrollados de fracturas y fallas.

Los principales rasgos estructurales de este tipo presentan tres rumbos: noroeste,

noroeste-noreste, así como este-oeste y norte-sur; manifestándose, en general, por fallas de tipo normal de poco desplazamiento.

El principal sistema de fallas, con rumbos noroeste de 5° a 36° está representado por un gran número de fallas de carácter regional, su actitud es marcadamente paralela a la línea de costa. Estas fallas constituyen a menudo el contacto entre dos tipos distintos de roca (contacto por falla).

La secuencia de rocas volcánicas conformada por andesitas, riolitas y dacitas con sus tobas respectivas, se encuentran también deformadas principalmente por esfuerzos de compresión vertical.

Aparentemente esta deformación fue favorecida por una gran cantidad de apófisis de intrusivos, provocando en algunos casos estructuras dómicas.

El resto de las rocas que forman la parte superior de la columna estratigráfica, formada por rocas clásticas continentales, piroclásticos, ignimbritas y derrames de rocas básicas, no presentan evidencias de deformación causada por esfuerzos de compresión.

A nivel regional, se pueden observar efectos de esfuerzos de compresión en las rocas desde el Precámbrico hasta el Mesozoico Tardío o Cenozoico Temprano, disminuyendo rápidamente de intensidad hacia las unidades más jóvenes, expresadas en estas últimas por pequeñas fallas inversas de compresión y corto desplazamiento, así como plegamientos.

4.3 Geología del subsuelo

Con base en la información recopilada, se puede deducir que el acuífero San Pedro-Tuxpan, se aloja en materiales granulares depositados sobre un estrato de rocas ígneas generalmente impermeables y ocasionalmente con permeabilidad anisótropa debido al fracturamiento. La principal fuente de suministro de estos materiales son afloramientos de rocas ígneas que constituyen las serranías que forman las estribaciones de la Sierra Madre Occidental, los cuales en el área se presentan de manera aislada en la proximidad del litoral costero.

Los materiales que tienen su origen en esta fuente están presentes en la porción media y alta de la cuenca, así como en sitios alejados del río, donde se observan

depósitos de llanura deltaica y de llanura de inundación.

En la proximidad del litoral costero estos depósitos son producto de las regresiones del mar, originando depósitos de playa, dunas y bermas, que son materiales de granulometría más fina que los depósitos de llanura, constituidos principalmente por gravas, arenas y boleos.

Esta unidad se encuentra limitada al norte y oriente por el Valle de Acaponeta, y al occidente por la zona de inundación en la que se ubican las lagunas costeras; al sur y oriente, su límite es el Valle de Santiago-San Blas.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

Como ya se mencionó anteriormente, el acuífero se extiende ampliamente desde el municipio de Tuxpan hasta el municipio de Ruiz, Rosamorada y Santiago Ixcuintla, y comprende tanto al valle o llanura costera, en donde se encuentra su porción más favorable para la captación y almacenamiento de agua, como a la zona montañosa de la cuenca, que constituye la principal porción receptora y transmisora de recarga.

El acuífero está constituido por depósitos aluviales y conglomeráticos dispuestos en estratos de geometría irregular y granulometría variada, cuyo espesor varía entre 100 y 120 metros.

Localmente, hacia la planicie costera, la presencia de sedimentos palustres y lacustres crea condiciones locales de semiconfinamiento. También de manera local, los depósitos aluviales cubren a rocas basálticas.

Sus límites físicos son al norte el Río San Pedro, al sur el Río Grande de Santiago, al este el parteaguas de la Sierra Madre Occidental y al oeste la zona de marismas del Océano Pacífico.

La frontera superior del acuífero es la superficie freática, cuya profundidad es de 4 a 8 metros en el valle y se incrementa hasta 35 metros en las estribaciones de la sierra, en tanto que su basamento y fronteras laterales están constituidos por rocas riolíticas de baja permeabilidad.

La recarga natural se produce por la infiltración de la lluvia, por flujo horizontal

subterráneo proveniente del piedemonte de la Sierra Madre Occidental y por aportación de los ríos Grande de Santiago y San Pedro. De manera inducida, por retornos de los excedentes del riego y por agua que se infiltra en los drenes y canales no revestidos de las Unidades de Riego.

La descarga natural del acuífero se lleva a cabo por flujo subterráneo horizontal hacia el mar; por evapotranspiración en áreas con nivel freático somero y por aportación al flujo base de los ríos Grande de Santiago y San Pedro. De manera artificial, mediante la extracción por bombeo en pozos y norias (figura 3).

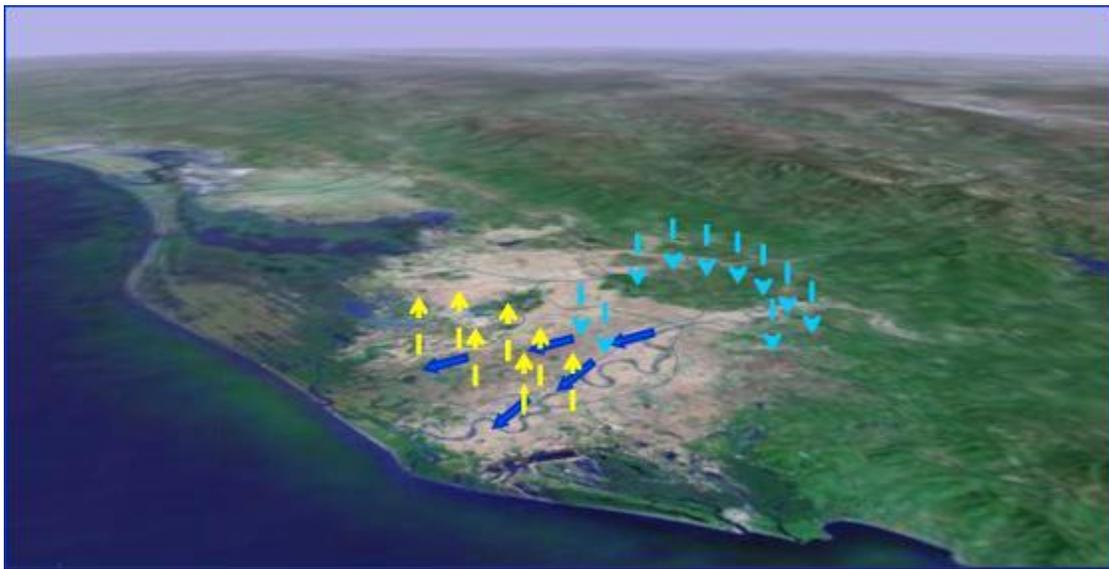


Figura 3. Modelo conceptual de funcionamiento del acuífero

5.2 Parámetros hidráulicos

Datos básicos para cuantificar la disponibilidad de agua subterránea y conocer el comportamiento de un acuífero, son los relativos a las propiedades hidráulicas del mismo, representadas por medio de los coeficientes de permeabilidad, transmisividad y almacenamiento. En el estudio realizado en el 2005, “Estudio de Actualización de las Condiciones Hidrogeológicas del Acuífero San Pedro-Tuxpan, Nayarit”, se llevaron a cabo algunas pruebas de bombeo de corta duración, cuya interpretación revela que los valores de transmisividad varían en el rango entre $2.6 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ y $2.9 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, registrándose los valores más altos ($0.0124 - 0.0259 \text{ m}^2/\text{s}$) hacia el centro y norte del acuífero, desde el poblado de Tuxpan hasta Sentispac, asociados con materiales granulares y basaltos fracturados.

Los valores más bajos ($0.00200 - 0.000289 \text{ m}^2/\text{s}$) corresponden a la porción sur, donde

el relleno acuífero es de menor permeabilidad. Los valores de la conductividad hidráulica presentan una configuración similar a la transmisividad, los valores más bajos se localizan en la porción oriental de la zona y se van incrementando hacia la costa, reflejo del cambio de rocas densas con fracturamiento a depósitos granulares gruesos.

Los abatimientos en esa área son mínimos varían de 1.4 a 16.0 m, lo que se ve reflejado en las capacidades específicas de hasta 16.4 lps por metro de abatimiento en Sentispac, hasta 0.7 lps/m en La Presa. El valor del coeficiente de almacenamiento no se pudo evaluar debido a que las pruebas de bombeo no contaron con pozo de observación.

Como el acuífero que nos ocupa es de tipo "libre", el coeficiente de almacenamiento es igual, numéricamente, al rendimiento específico, siendo este de 0.005 a 0.3, dependiendo de su granulometría, sin embargo, como en el área estudiada existen materiales finos hacia la zona de lagunas, se estimó un valor representativo del rendimiento específico no mayor de 0.10.

5.3 Piezometría

La información piezométrica es muy escasa y se encuentra dispersa espacial y temporalmente, se recabó durante el estudio realizado en el año 2005 y la que se obtuvo por administración en el 2006 cubren la mayor parte de la zona de explotación actual.

Las configuraciones del nivel estático elaboradas para estos años no presentan cambios significativos, razón por la que únicamente se describe la que corresponde al año 2006.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

De acuerdo con la información existente, los niveles piezométricos varían de 1 a 30 metros de profundidad.

Los valores más bajos (1 a 10 m) se registran en la zona comprendida entre la costa y las poblaciones Ruíz, El Tamarindo, Ojos de Agua y Puerta Azul.

A la altura de la vía de ferrocarril, hacia el pie de monte; los valores se incrementan de

20 a 30 m (figura 4), realizándose la explotación mediante captaciones tipo noria, jagüeyes, pozos radiales y pozos profundos.

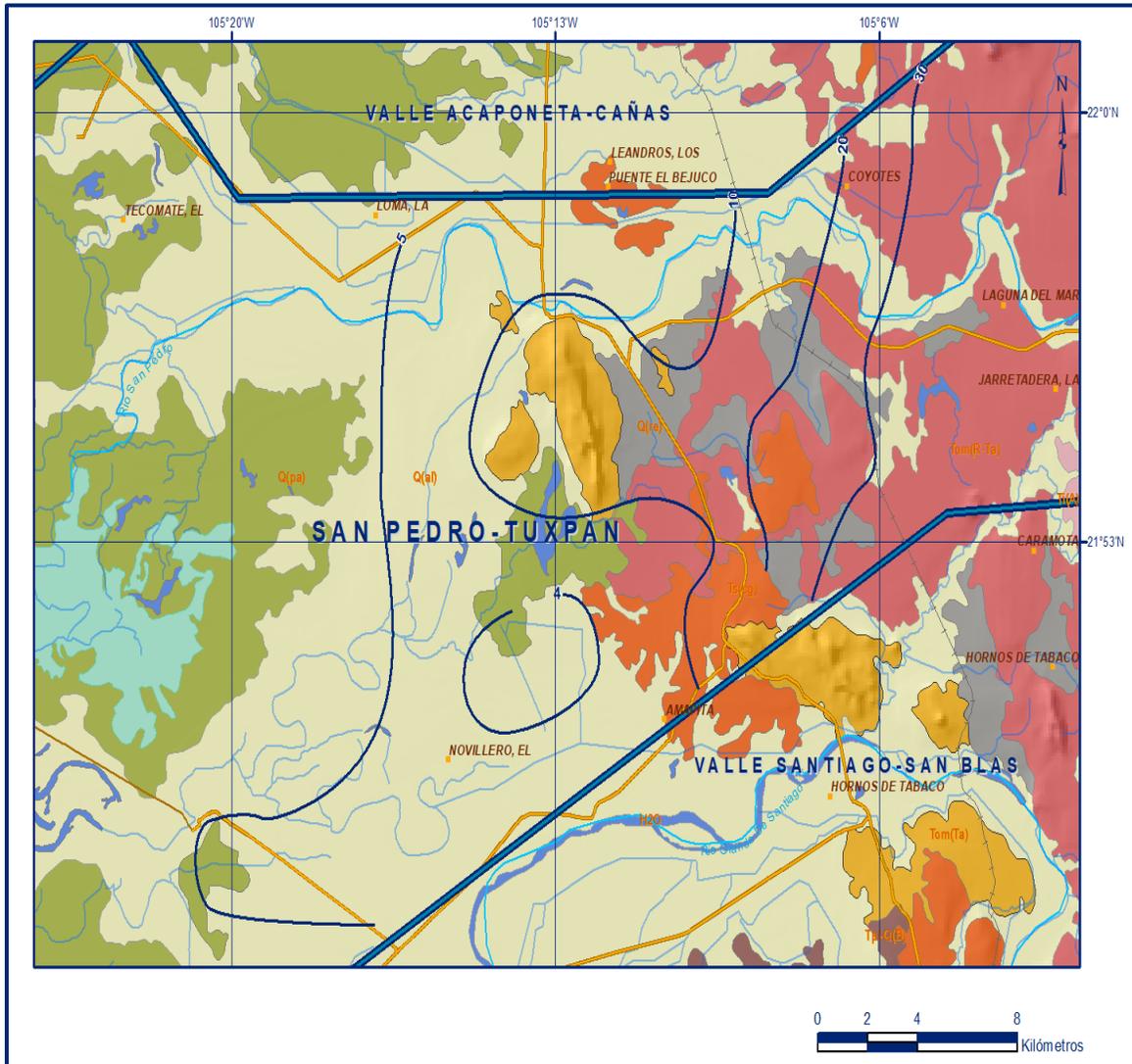


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2006).

5.4.2 Elevación del nivel estático

Para el caso de la configuración de la elevación del nivel estático (2006) los valores varían de 2 a 5 msnm, en los alrededores de los poblados El Tamarindo, Coamiles, Valle Morelos, El Novillero y Amapa, en dirección hacia las zonas de lagunas y bermas; incrementándose a 10 msnm en la zona de Peñitas, Ruíz, Paredones y La Presa, hasta valores entre 20 y 30 msnm que se registran en las inmediaciones de las poblaciones Coyotes, Pantano Grande, Puerta Azul y San Lorenzo.

Las elevaciones más grandes se registran hacia las estribaciones de las sierras que

limitan al oriente el acuífero, identificando de esta manera la dirección preferencial del flujo subterráneo. La figura No. 5 muestra la configuración de los niveles estáticos, las líneas de flujo subterráneo y las celdas definidas para el cálculo de las entradas y salidas subterráneas del acuífero. La elevación fluctúa de 2 a 30 msnm, las entradas de flujo se presentan entre las elevaciones 20 y 30, y 15 y 20 msnm; las salidas entre las elevaciones 3 y 2 msnm.

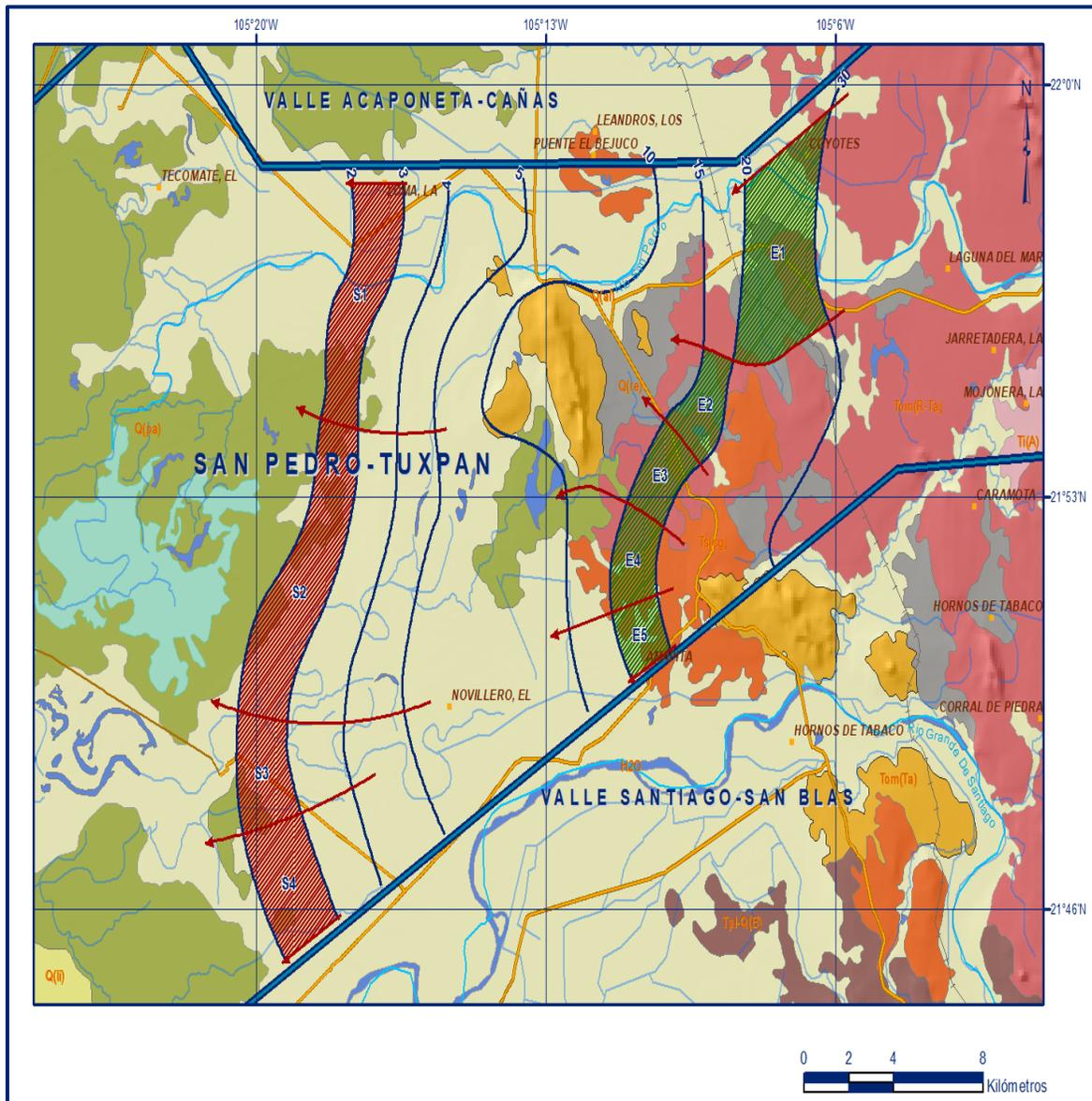


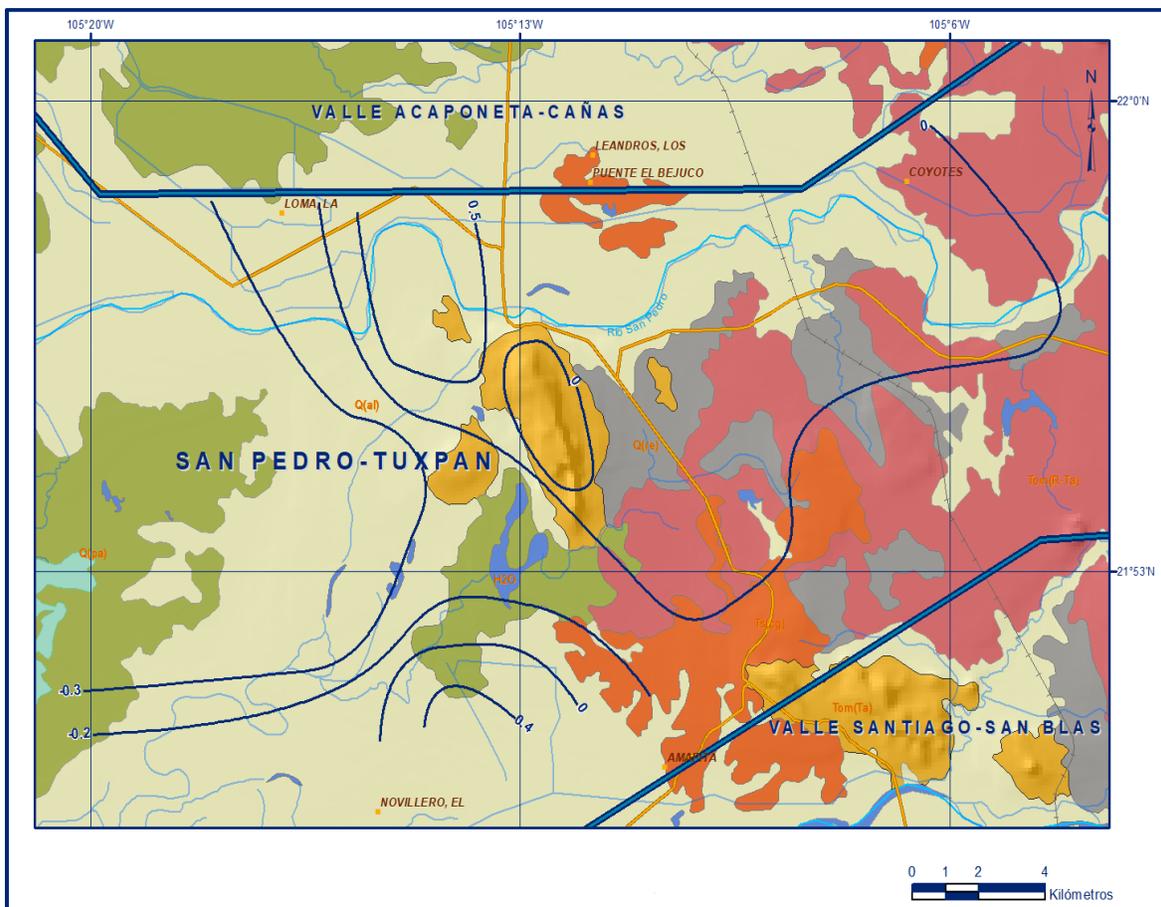
Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2006)

5.4.3 Evolución del nivel estático

Con respecto a la evolución del nivel estático, no se cuenta con información

piezométrica que permita la configuración para periodos largos. La configuración de la elevación del nivel estático para el periodo 2005-2006 sólo muestra variaciones pequeñas de tipo puntual, tanto positivas como negativas, y no se presentan alteraciones del flujo natural del agua subterránea que indiquen la presencia de conos de abatimiento causados por la concentración de pozos.

El volumen de extracción es muy inferior a la recarga más conservadora que pudiera estimarse. Por estas razones, se puede afirmar que las variaciones en el nivel del agua subterránea no sufren alteraciones importantes en el transcurso del tiempo, por lo que el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo (figura No. 6). Los abatimientos se incrementan conforme avanzan los meses en la temporada de estiaje, mismos que se recuperan al infiltrarse parte de los escurrimientos originados en la temporada de lluvias.



5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en el año 2005, se tomaron muestras de agua subterránea para su análisis físicoquímicos correspondiente. Las determinaciones incluyeron iones mayoritarios, temperatura, conductividad eléctrica, pH, Eh, Nitratos, dureza total y sólidos totales disueltos, fierro y manganeso. Con respecto a la calidad química del agua, tomando en cuenta los resultados de los análisis físicoquímicos, se puede determinar que el agua subterránea de muy buena calidad ya que la concentración de Sólidos Totales Disueltos (STD) varía de 200 a 600 ppm, que la hacen apta para el consumo humano.

Sin embargo, no se descarta la posible contaminación antropogénica debido a la existencia de niveles freáticos someros en las zonas aledañas a los núcleos de población. Con respecto a la calidad biológica del agua, se detectó la presencia de Coliformes Totales y Fecales, en casi todos los aprovechamientos que abastecen a las poblaciones, sólo los correspondientes a H. Batallón de San Blas, Tuxpan, Sentispac, Gavilán Grande, y Santiago Ixcuintla están exentos de la presencia de estos contaminantes.

En cuanto al contenido de fierro, sólo las fuentes que abastecen a H. Batallón de San Blas, Juan Escutia, Paredones y Santiago Ixcuintla no sobrepasan el límite máximo permisible de 0.30 ppm que establecen las normas oficiales. La concentración máxima de manganeso que establecen las normas oficiales (0.15 ppm) se sobrepasa ligeramente en los aprovechamientos que abastecen a las poblaciones de Tuxpan, Gavilán Grande y Santiago.

El tipo o familia de agua predominante en la zona es la bicarbonatada cálcica, la cual debe su origen a la presencia de rocas de tipo granítico y volcánicas ácidas, por las que se circula el agua subterránea, desde las zonas de recarga

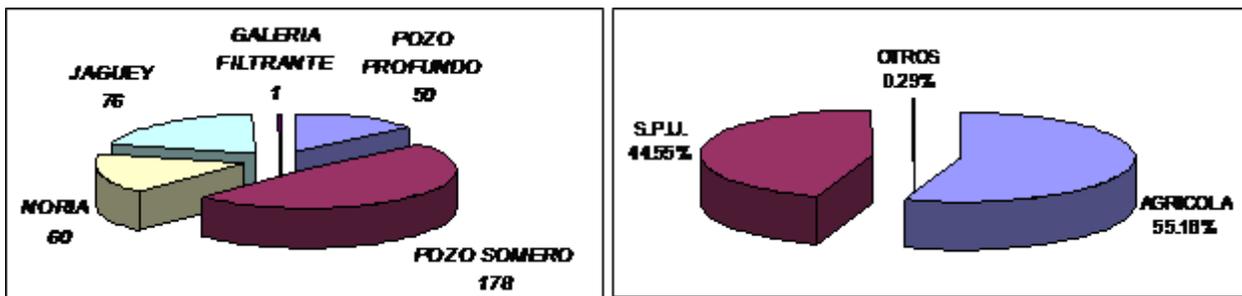
. De acuerdo a la clasificación de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), para el agua destinada al uso agrícola, se observó que la gran mayoría de las aguas muestreadas corresponden a C₂-S₁, es decir aguas de salinidad media con bajo contenido de sodio intercambiable, que pueden ser utilizadas en todo tipo de suelos para cultivos tolerantes a la salinidad si se realizan lavados moderados del suelo. Solo en la zona de Sentispac el agua es mala calidad, de tipo C₃-S₃, que representa agua con altas concentraciones de sales y alto contenido de sodio intercambiable.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

Durante el censo realizado en el “Estudio de Actualización de las Condiciones Hidrogeológicas del Acuífero San Pedro-Tuxpan, Nayarit” (2005), se registró la existencia de 450 obras hidráulicas subterráneas, de las cuales se censaron 365, consideradas como representativas de toda el área que cubre el acuífero.

El censo incluyó norias someras excavadas a mano (circulares y cuadradas), galerías filtrantes, pozos someros con ademe de P.V.C., jagüeyes o excavaciones que alumbran el nivel freático y pozos profundos. El volumen de extracción estimado es del orden de los 3.9 hm³ anuales, de los cuales el 55.2 % (2.7 hm³) se destinan al uso agrícola, y el 44.5 % restante (1.2 hm³) para el abastecimiento de agua potable a los centros de población; el volumen destinado a otros usos es muy bajo (0.01 hm³).

De acuerdo con el tipo de obra, los aprovechamientos censados pueden clasificarse de la siguiente forma:



7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

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

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

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

Recarga total - Descarga total = Cambio de almacenamiento

El balance de aguas subterráneas se definió en una superficie de 504 km², que corresponde a la porción baja de la cuenca, donde se localiza la gran mayoría de los aprovechamientos del agua subterránea.

No se tiene registro histórico confiable de la piezometría que cubra toda la superficie del acuífero, por lo que el balance considera el periodo 2005-2006, ya que durante éste se tiene mayor cobertura espacial y una mejor confiabilidad de las mediciones.

7.1 Entradas

La recarga total (R) al acuífero San Pedro-Tuxpan está integrada básicamente por las entradas subterráneas (Eh) y la recarga vertical por lluvia (Rv).

Dentro de esta también se incluyen las infiltraciones que se producen a lo largo del cauce del río San Pedro y otros arroyos.

7.1.1 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 $\Delta V(S)$, así como las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance.

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

Donde:

Eh: Recarga por flujo horizontal

Rv: Infiltración por lluvia

Ri: Recarga inducida

B: Bombeo

Sh: Salidas por flujo horizontal

ETR: Evapotranspiración real

$\Delta V(S)$: Cambio en el volumen almacenado

De esta manera:

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

7.1.2 Entradas subterráneas horizontales (Eh)

Una fracción del volumen de lluvias 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 depósitos granulares de piedemonte, para posteriormente circular de manera horizontal y recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación localizada en la planicie.

En el acuífero San Pedro -Tuxpan, la recarga por flujo horizontal de aguas subterráneas ocurre en la zona comprendida entre el piedemonte y la costa, a la altura de la vía del ferrocarril, en las inmediaciones de los poblados Coyotes, San Lorenzo, Pantano Grande y Puerta Azul, como se observa en la configuración de elevación del nivel estático para el 2006 (figura No. 6). Con base en esta configuración se seleccionaron canales de flujo y se aplicó la ley de Darcy para calcular el caudal “Q” que recarga al acuífero. La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada uno de los canales establecidos, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$Q = B * i * T$$

Donde:

B: Ancho (m) del canal de flujo.

i: Gradiente hidráulico ($i = h_2 - h_1 / L$); h y L son la diferencia y distancia respectivamente entre las equipotenciales (h) que conforman el canal de flujo.

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

La configuración de elevación para los años 2005 y 2006 es prácticamente la misma, debido a que no se registran variaciones importantes en la posición de los niveles del agua subterránea. Por esta razón, para calcular las entradas y salidas subterráneas se utilizó únicamente la configuración del 2006.

La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada uno de los canales establecidos. En la tabla 3 se pueden observar los valores obtenidos para cada año, de la que se desprende que el valor de esta variable es de **4.5 hm³/año**.

Los valores de T fueron obtenidos del “Estudio de Actualización de las Condiciones Hidrogeológicas del acuífero San Pedro-Tuxpan, Nay”, realizado para la Comisión Nacional del Agua por la empresa SPIC, S.A. de C.V. (2005).

Tabla 3. Entradas por flujo subterráneo horizontal (junio 2006)

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradient e i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN N (hm ³ /año)
E1	4000	2400	10	0.0042	0.0020	0.0333	1.1
E2	2800	900	5	0.0056	0.0020	0.0311	1.0
E3	2400	1000	5	0.0050	0.0020	0.0240	0.8
E4	2800	700	5	0.0071	0.0020	0.0400	1.3
E5	2400	1000	5	0.0050	0.0013	0.0156	0.5
TOTAL							4.5

7.1.3 Recarga Inducida (Ri)

En esta variable se incluyen los volúmenes de infiltración de agua que se producen exclusivamente por concepto de los excedentes del riego ya que en la región no existen asentamientos humanos importantes cuya infraestructura hidráulica pueda generar fugas en los sistemas de abastecimiento de agua potable y/o de alcantarillado.

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 un valor del 15 %:

El volumen de agua que se destina al uso agrícola asciende a los 48 hm³ anuales, principalmente de aguas superficiales, que multiplicado por el 15% arroja un volumen de 7.2 hm³ anuales de recarga inducida por retornos de riego.

Adicionalmente, si se considera un valor de 2.2, hm³ destinados al uso público-urbano, el valor de las infiltraciones por fugas en las redes de abastecimiento es del orden de los 0.2 hm³ anuales. De esta manera el valor total de la recarga inducida es de **7.4 hm³ anuales**

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B), las salidas subterráneas hacia el mar (Sh) y la evapotranspiración (ETR). Se considera que no existen manantiales ni descarga de flujo base a lo largo del río.

7.2.1 Evapotranspiración

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.

En el acuífero San Pedro-Tuxpan, esta componente es la variable más importante de descarga, debido a lo somero de los niveles freáticos. La evapotranspiración tiene dos componentes: la evaporación directa del agua subterránea y la transpiración de las plantas. La primera tiene lugar, donde aflora la superficie freática, así como en las áreas adyacentes a ésta, donde la misma superficie está poco profunda.

En el subsuelo, el agua puede ascender, a partir del nivel freático, hasta una altura (“la altura capilar”) cuyo valor depende del tamaño de los poros o fisuras; en los materiales granulares esa altura es inversamente proporcional al tamaño de los granos, variando entre unos cuantos decímetros en las gravas, y cerca de tres metros en los materiales limo-arcillosos.

Este mecanismo de descarga se presenta en la zona donde los niveles freáticos están a profundidades no mayores a 3 metros.

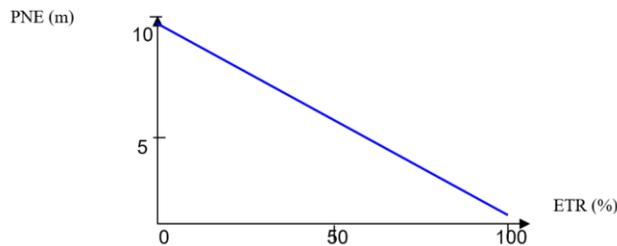
En la mayor parte del área de balance los niveles estáticos se encuentran a profundidades menores a 10 m, que se considera el límite de extinción para que se produzca el fenómeno de evapotranspiración. Se aplicó el método de Turc para calcular la lámina de Evapotranspiración real, la cual es de 1130.4 mm anuales, considerando valores medios anuales de temperatura de 26.5 °C y precipitación de 1337 mm.

Fórmula de Turc:

$$ETR(mm) = \frac{P(mm)}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2(mm)}{L^2}\right)}} \quad L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

T (°C) =	26.5		
P(mm) =	1337	P ² =	1787569
L =	1892.98125	L ² =	3583378.01
ETR (mm)	1130.4		

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



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

Suponiendo una profundidad límite de extinción de 10 m para el fenómeno de ETR, a menor profundidad mayor será el % de ETR, de tal manera que a 10 m el valor de ETR es nulo y a 0 m el valor es del 100 %, a 5 m el 50%, a 2 m el 80% etc.

De la configuración de profundidad al NE mostrada en la figura 5, correspondiente a junio del 2006, se observa que la mayoría de los valores son menores a 10 m; se calcula el área entre ellas y se toma el valor promedio (entre las curvas de 2 y 3 metros en valor promedio será 2.5, por ejemplo).

El resultado de multiplicar el valor promedio por el área entre las curvas, deberá

ponderarse de acuerdo a la relación lineal mencionada anteriormente, en este caso particular de este ejemplo, como el valor medio de profundidad es de 2.5 m, se multiplicará por 0.75 (que significa que, a esta profundidad, el 75 % es susceptible de evapotranspirarse. Lo mismo se hace para cada área comprendida entre dos curvas de profundidad menor a 10 m. Al final se obtendrá la suma de los volúmenes evapotranspirados.

Tabla 4. Salidas por evapotranspiración (ETR)

RANGOS DE PROFUNDIDAD (m)	PROFUNDIDAD MEDIA (m)	ÁREA (km ²)	LÁMINA ETR (m)	PROFUNDIDAD MÁXIMA DE EXTINCIÓN DE LA ETR	% ETR	VOLUMEN ETR (hm ³ /año)
0 A 5	2.5	141.6	1.1304	0	0.75	120.1
4	4	14.3	1.1304	0	0.6	9.7
5 A 10	7.5	93.7	1.1304	0	0.25	26.5
Total		249.6				156.3

De esta manera, se obtuvo un valor de **156.3 hm³ anuales**, al considerar 249.6 km² de área expuesta a la evapotranspiración y correcciones por profundidad de los niveles estáticos, conforme a lo que se indica en la tabla 4.

7.2.2 Bombeo (B)

Con base en la información recopilada en los recorridos de censo de obras y piezométricos realizados por administración, se ha estimado un volumen extraído por bombeo del orden de los **3.9 hm³ anuales**.

La mayoría de los aprovechamientos identificados son norias, y pequeños pozos para uso agrícola, aunque también existen jagüeyes, galerías filtrantes y algunos pozos utilizados para dotación de agua potable, operados por la Junta Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de los Municipios de Rosamorada, Santiago Ixcuintla y Ruíz.

7.2.3 Salidas subterráneas (Sh)

Las salidas subterráneas que ocurren como descarga hacia el mar fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir también de la configuración de elevación del NE para el año 2006.

El valor promedio estimado es de **6.5 hm³ anuales**.

7.3 Cambio de Almacenamiento ($\Delta V(S)$)

Como se menciona en el apartado de evolución del nivel estático, los registros de piezometría de estudios previos se encuentran dispersos en tiempo y espacio y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero. La evolución mostrada en la figura No. 7 sólo muestra variaciones puntuales.

Por otra parte, debido a que el volumen de extracción es menor a la recarga que recibe el acuífero, todavía no se registran alteraciones en la dirección natural del flujo subterráneo ni conos de abatimiento.

Bajo estas consideraciones, se considera que la posición del nivel del agua subterránea no sufre alteraciones importantes en el tiempo. Adicionalmente, el cambio de almacenamiento calculado es muy pequeño.

Por estas razones, para fines del balance de aguas subterráneas el cambio de almacenamiento se considera nulo.

$$\Delta V(S) = 0$$

Solución de la ecuación de balance

Una vez calculadas las componentes de la ecuación de balance, procedemos a evaluar la recarga vertical por lluvia y por las infiltraciones a lo largo del río San Pedro, algunos arroyos importantes, mediante la expresión (2):

$$\begin{aligned} R_v &= S_h + B + ETR - \Delta V(S) - E_h - R_i \quad \text{----- (2)} \\ R_v &= 7.3 + 3.9 + 156.3 - 0 - 4.5 - 7.4 \\ R_v &= 155.6 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

Este valor incluye a los volúmenes de infiltración que se producen por efecto de la lluvia en el valle y a los que se originan como producto de los escurrimientos a lo largo del cauce del Río San Pedro y otros arroyos. De esta manera, la recarga total media anual es igual a la suma de todas las entradas:

$$\begin{aligned} R &= R_v + E_h + R_i \\ R &= 155.6 + 4.5 + 7.4 \\ R &= 167.5 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

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:

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

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 **167.5 hm³/año**, todos ellos son de recarga natural.

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que está comprometido como agua superficial, alimentados por el acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar a los acuíferos adyacentes; sostener el gasto ecológico y prevenir la migración de agua de mala calidad hacia el acuífero.

Para el caso del acuífero San Pedro-Tuxpan, su valor es de **131.5 hm³ anuales**, que corresponden a las salidas subterráneas hacia el mar, que se deben dejar escapar para mantener el equilibrio de la interfase marina, y a la evapotranspiración que debe comprometerse para preservar el ecosistema costero y sostener el gasto ecológico.

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 (REPGA), 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 **32,116,769 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 167.5 - 131.5 - 32.116769 \\ \text{DMA} &= 3.883231 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **3,883,231 m³ anuales**.

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 2005. "Estudio de actualización de las Condiciones Hidrogeológicas del Acuífero San Pedro-Tuxpan, Nayarit". Realizado por la empresa SPIC Servicios y Proyectos de Ingeniería Civil, S.A. DE C.V.

Comisión Nacional del Agua. Norma Oficial Mexicana CNA. NOM-011-CNA-2000, que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1981. "Estudio de Prospección y Levantamientos Geológicos y Geofísicos en la Zona del Valle del Río San Pedro, Estado de Nayarit ". Realizado por la empresa Rocha y Asociados, S. A.,

Diario Oficial de la Federación, de fecha 23 de mayo de 1972. "Decreto Presidencial, mediante el cual se crea el Distrito de Acuacultura No. 1, Nayarit, y se establece Veda de Control para nuevas obras de alumbramiento, extracción y aprovechamiento de aguas subterráneas.