

DINÁMICA DE LOS CONTAMINANTES INFILTRADOS EN EL ACUÍFERO KARSTICO DE CANCÚN, QUINTANA ROO.

Luis González Hita¹

Resumen - Cancún es uno de los complejos turísticos más importantes del Caribe Mexicano. Se localiza en un terreno geológico kárstico, caracterizado por fallas normales orientadas y conductos de disolución. El acuífero subyacente es de tipo costero de alta permeabilidad, bajo gradiente hidráulico y nivel freático casi estable.

Las aguas residuales generadas en las zonas urbana y turística, son tratadas en cinco plantas antes de ser infiltrarlas en el subsuelo mediante pozos de absorción.

Cerca de la línea de costa, existen varios manantiales subacuáticos que mantienen el balance hidrológico y la calidad de los cuerpos de agua superficiales. Diversas instituciones nacionales han reportado alteraciones temporales y espaciales de la calidad del sistema lagunar Nichhupté (SLN), principal recurso natural de agua superficial.

Con el propósito de evaluar el impacto en la calidad del SLN, se aplicaron trazadores fluorescentes para determinar la dinámica de los contaminantes y la posible interacción entre aguas superficiales y subterráneas.

Los resultados fluorimétricos y sanitarios indican que no existe interconexión por vía subterránea entre las fuentes contaminadoras y el SLN, y muestran que existen componentes de agua residual que alimentan por vía subterránea a varios manantiales subacuáticos localizados en el Mar Caribe.

Palabras-clave - Kárstico, trazador, fluorescente.

1. INTRODUCCIÓN

¹ Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) Paseo Cuauhnahuac 8532, Col. Progreso, Jiutepec, Mor., C.P. 56600 México Tel. (52) 7 3 19 40 00 Ext. 805, Fax: (52) 7 319 43 41, e-mail: lghita@tlaloc.imta.mx

Cancún es uno de los complejos turísticos más importantes del Caribe Mexicano. Se localiza en un terreno geológico kárstico, caracterizado por fallas normales orientadas, cavernas y conductos de disolución.

El acuífero subyacente es de tipo costero de alta permeabilidad, bajo gradiente hidráulico y nivel freático casi estable. El espesor del lente de agua dulce es de 70 m tierra adentro y de algunos metros cerca de la línea de costa.

El sistema lagunar Nichupté (SLN) es uno de los recursos naturales de agua superficial más importantes de la zona. En su rívera oriental, existen varios manantiales subacuáticos, que en conjunto descargan caudales importantes de agua subterránea de origen continental ($5 \text{ m}^3/\text{s}$). Estas surgencias naturales mantienen el balance hidrológico y la calidad apta para la vida acuática y las actividades turísticas y recreativas (figura 4).

En la entidad, la red de servicio de alcantarillado cubre el 100% de la zona hotelera y sólo el 35% de la zona urbana, el resto de la población no cuenta con el servicio y en su lugar se utilizan fosas sépticas o letrinas. La demanda total de tratamiento de aguas residuales se calcula en 1,500 litros por segundo (lps): 38% generados por la zona turística y 62% por la zona urbana. La capacidad de tratamiento de la infraestructura total instalada cubre aproximadamente el 65% de las aguas residuales generadas (Semarnap, 1996).

Las aguas residuales generadas son tratadas parcialmente en cinco plantas e inyectadas en el subsuelo mediante pozos de absorción.

El subsuelo de la zona es de roca caliza karstificada, y está caracterizado por la presencia de fallas normales orientadas, cavernas y conductos de disolución. El acuífero subyacente presenta confinamiento local, bajo gradiente hidráulico y alta permeabilidad.

Por tanto, los contaminantes generados en la superficie se incorporan rápidamente al medio subterráneo.

Desde 1975, diversas instituciones han reportado alteraciones temporales y espaciales de la calidad de las aguas del SLN asociadas al desarrollo de las infraestructuras urbana y turística (CNA, 1996 y SRH, 1975).

Con el propósito de evaluar el impacto causado al SLN por los contaminantes incorporados en el acuífero, se realizó un estudio de la posible interacción geohidrológica entre agua subterránea y agua superficial, mediante pruebas de trazado con rodamina wt y uranina.

2. MARCO FÍSICO

2.1. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La descripción geohidrológica detallada del área de estudio, así como de la geología general de la zona se puede consultar en Exyco (1989). A continuación, sólo se detallarán aquellos aspectos geohidrológicos y climatológicos, que ayuden a precisar el escenario físico en el que se encuentra inmerso el sistema lagunar Nichupté.

2.2. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

La zona de estudio se localiza en la Península de Yucatán, en la porción noreste del Estado de Quintana Roo, en el Municipio de Benito Juárez. Incluye a la Ciudad de Cancún, a la franja aledaña a la carretera Cancún – Aeropuerto, a la playa de Puerto Juárez en la Bahía de Mujeres y al sistema lagunar Nichupté. Geográficamente se ubica en la intersección del paralelo 21° 05' de latitud norte y el meridiano 86° 49' de longitud oeste (UTM2333000N y 16Q0520000E). El área se localiza a 370 kilómetros al noreste de la Ciudad de Chetumal, capital del Estado de Quintana Roo. La superficie del SLN es de 48.3 km² y sus límites son: al norte, la Bahía de Mujeres; al este, la isla de Cancún; al sur, el Mar Caribe y al oeste, la carretera federal Cancún-Chetumal (figura 1).

2.3. GEOLOGÍA

La Península de Yucatán es una plataforma parcialmente emergida, constituida por rocas carbonatadas y evaporíticas de edad Mesozoico Tardío y Cenozoico (Figura 2).

La zona está constituida por sedimentos carbonatados marinos pertenecientes al Terciario y Cuaternario, las rocas más antiguas son calizas dolomitizadas, silicificadas y recristalizadas de coloración clara y con delgadas intercalaciones de margas y yesos.

Localmente, estos materiales están constituidos por carbonatos de calcio de edad cuaternaria. Se presentan en forma de arenas finas re TRABAJADAS por la acción del oleaje, parte de ellas son transportadas tierra adentro y dan lugar a la formación de eolianitas. Interdigitados con las eolianitas se encuentran arcillas calcáreas y lodo de manglar que, en conjunto, forman un paquete que se extiende prácticamente a todo lo largo de la costa, con un espesor medio de 10m. Estas rocas y materiales se encuentran descansando sobre calizas carstificadas de la formación Carrillo Puerto del Terciario.

La Formación Carrillo Puerto se encuentra cubierta por una capa de sedimentos calcáreo-arcillosos, suaves, deleznales, que incluyen fragmentos de conchas y corales, y cuyo origen no ha sido claramente identificado. Este horizonte es característico de toda la Península de Yucatán.

Las márgenes del sistema lagunar Nichupté están formadas de arenas calcáreas sin compactar. Las arenas corresponden a precipitados químicos de carbonato de calcio y minúsculos fragmentos de conchas, y se encuentran en forma de barras, playas y dunas de edad Holoceno. Parte de estas arenas han sido transportadas tierra adentro por el viento depositándolas con una típica estratificación cruzada. En varios sitios se encuentran compactadas formando eolianitas.

El fondo del sistema lagunar está formado por arcillas calcáreas de espesores que varían entre 2 y 10 m, en la literatura se les ha denominado “Lodo Lagunar”, estos materiales no afloran y corresponden al azolve de la laguna (Lesser, 1984).

2.4. HIDROGRAFÍA

En la superficie del terreno no se observan corrientes de agua, debido a que las calizas existentes son de alta permeabilidad, lo cuál propicia la formación de dolinas y que el agua de precipitación pluvial se infiltre rápidamente.

El complejo lagunar se encuentra en una plataforma de carbonatos de bajo relieve topográfico, con mínima cubierta de suelo que propicia la infiltración rápida del agua de lluvia. Los aportes de agua dulce que recibe el SLN, son por escurrimientos de la llanura de inundación adyacente, lluvias y descargas de agua subterránea, que mantienen el balance hidrológico y contribuyen a la renovación significativa de la masa de agua (CNA, 1992).

En la región, el 80 % del agua pluvial es evaporada y casi el 20 % contribuye a la recarga de los acuíferos, los cuales descargan por flujo subterráneo hacia el mar y hacia el sistema lagunar. De acuerdo con EXYCO (1989), en el corredor turístico Cancún-Tulum, la descarga natural subterránea es de aproximadamente 8.6 millones de metros cúbicos por año ($Mm^3/año$) por kilómetro de costa. Por tanto, se estima que a lo largo de los 150 kilómetros del tramo Cancún-Tulum, el caudal que descarga el acuífero hacia el Mar Caribe es de aproximadamente $1,290 Mm^3/año$, equivalente a $41 m^3/s$.

Dentro del SLN, se encuentran el bajo Norte, al norte, y el bajo Zeta, al sur, los cuales dividen al sistema lagunar en tres secciones. Debido al efecto de los bajos topográficos, al viento y al aporte de agua subterránea; en las zonas norte, centro y sur del sistema lagunar, las masas de agua están regionalizadas y presentan comportamientos hidrodinámicos diferentes.

Los lugares más profundos corresponden a los canales de comunicación del SLN con el mar. El canal Playa Linda, al norte de la laguna frente a Isla Mujeres, el canal

Nizuc, al sur, y el canal Zeta que atraviesa el bajo del mismo nombre. Los tres canales tienen fondo irregular y, en algunas partes, alcanzan hasta cinco metros de profundidad (figura 4).

En el estudio de hidrodinámica y transporte de contaminantes en la laguna de Nichupté, realizado por Vizcaíno, L.L. et al (IMTA, 1994), se identificaron claramente ciclos de variación de la marea asociados a los caudales de flujo y reflujos de los canales de comunicación con el mar. Los resultados de este estudio indican que hay correspondencia entre los niveles de marea y los caudales medidos en los canales Playa Linda y Nizuc. Los gastos registrados en ambas bocas se muestran en la tabla 1.

SITIO	GASTO (m ³ /s) *	
	Pleamar	Bajamar
Canal Playa Linda	130	130
Canal Nizuc	23	8

(*): En la pleamar el sentido del flujo es del Mar Caribe hacia el SLN y en la bajamar se invierte (Fuente: IMTA, 1994).

TABLA 1. FLUJOS DE ENTRADA Y SALIDA EN LAS BOCAS DEL SISTEMA LAGUNAR NICHUPTÉ.

Las variaciones en las cotas del SLN y del Mar caribe combinadas con el confinamiento local del acuífero Kárstico, producen cambios en el régimen del flujo subterráneo. Bajo las condiciones hidráulicas prevalecientes, los conductos de flujo preferencial se comportan como sistemas de vasos comunicantes en los cuales las dolinas actúan como fuentes o como sumideros. Cuando se establecen condiciones de equilibrio, la carga hidráulica ejercida por el cuerpo de agua superficial iguala al potencial hidráulico del acuífero interrumpiéndose el flujo de las surgencias de agua subterránea.

El efecto de las mareas en la hidrodinámica de la laguna incide en el régimen hidráulico de los manantiales. Durante la pleamar se anula la resurgencia de agua subterránea e incluso se invierte el flujo y el conducto de disolución actúa como sumidero. Al presentarse la bajamar, se recupera el régimen de flujo con variaciones o

desfasamientos entre los dos fenómenos. Las condiciones de equilibrio o desequilibrio hidráulico, entre la carga hidráulica ejercida por la cota del cuerpo de agua superficial y el potencial hidráulico del acuífero, se presentan en un intervalo reducido de variación en los niveles del SLN y el Mar Caribe de aproximadamente 30 cm.

2.5. LOCALIZACIÓN DE MANANTIALES

Los sitios más significativos de descarga de agua subterránea son los manantiales subacuáticos existentes en la ribera oriental del SLN y a lo largo de la línea de costa de la Bahía de Mujeres. Estas surgencias son alimentadas a través de conductos de disolución en un sistema acuífero de flujo convergente.

Los manantiales se localizan en una franja de orientación SW-NE (figura 4), probablemente como resultado de una zona de debilitamiento o de falla que favoreció la disolución de la roca caliza, en combinación con la actividad química que genera la karstificación del subsuelo en la zona de agua dulce, a lo largo de la línea de costa.

En general, el gasto en los manantiales es proporcional al tamaño de su abertura, pero se ha observado que las máximas velocidades de flujo y reflujo se presentan en los manantiales más grandes de la Bahía de Mujeres (32, 33 y 34).

2.6. CLIMATOLOGÍA GENERAL DE LA ZONA DE TRABAJO

La Península de Yucatán presenta en su mayor parte clima cálido con temperatura media anual de 26°C. La precipitación media anual en la región peninsular es de 1,230 mm y la evaporación potencial varía de 1,500 a 2,000 mm (EXYCO, 1989).

El clima en el área de estudio es cálido subhúmedo (AW), con lluvias en verano (mayo-septiembre). La precipitación media anual es de 1,128 mm, la evaporación potencial, de 1,600 mm y la evapotranspiración, de 805 mm. Las temperaturas varían de acuerdo con la época del año, siendo la media de 26°C.

La península de Yucatán, y en particular la zona costera adyacente a la ciudad de Cancún, presenta tres épocas bien definidas desde el punto de vista climatológico y son las siguientes:

- a) Temporada de lluvias de verano de junio a octubre, caracterizada por la afluencia de aire húmedo tropical que incluye la presencia ocasional de tormentas tropicales y huracanes. Se caracteriza por la presencia de vientos de regular intensidad del este y sureste (vientos alisios) que generan chubascos fuertes durante la tarde

preferentemente en la parte continental de la península. En el área de la costa no se presentan lluvias de importancia excepto durante el paso de los centros de baja presión que propician el desarrollo de chubascos ligeros aislados o generalizados durante la tarde, noche y madrugada por períodos de hasta dos días.

- b) Temporada de lluvias de invierno de enero a marzo. Caracterizada por el descenso sensible de la temperatura ambiente debido a la invasión de masas de aire frío continental polar provenientes de Alaska y Canadá y bastante debilitadas por su travesía por los Estados Unidos y el Golfo de México. Los frentes de estas masas de aire frío provocan vientos del norte de regular intensidad con la formación de chubascos generalizados durante el paso del frente que puede durar de 1 a 2 días. Los frentes fríos se presentan sobre la Península de Yucatán con un espaciamiento de 5 a 7 días durante los cuales se presentan condiciones favorables para la navegación.
- c) Temporadas interestivales que corresponden generalmente a los meses de abril a mayo y de octubre a noviembre. Se caracterizan por presentar afluencia de aire con intervalos de gran variabilidad, predominando los oestes ligeros y las calmas. En general no se presentan lluvias y corresponden a la denominada época de bonanza siendo la mejor época para la localización de los manantiales y el trabajo de muestreo.

3. METODOLOGÍA

La metodología utilizada en el presente estudio se basó en el desarrollo de pruebas de interconexión geohidrológica entre las fuentes contaminadoras y el SLN, mediante la aplicación de trazadores fluorescentes, tanto de origen natural como adicionados artificialmente, en la caracterización del comportamiento hidráulico de los manantiales subacuáticos, y en la determinación de la calidad química y sanitaria del acuífero y de los manantiales.

4. TRABAJOS DE CAMPO

La planeación y diseño de las pruebas de interconexión geohidrológica fueron el punto de partida del trabajo experimental. La magnitud de las principales variables que caracterizan al flujo subterráneo en el acuífero kárstico, fue fundamental para inferir las cantidades iniciales de trazador a inyectar (rodamina WT y uranina). Los tiempos de tránsito del trazador en el acuífero, desde el sitio de prueba hasta el punto de posible afloramiento; la

velocidad del flujo subterráneo; la porosidad secundaria y la conductividad hidráulica, utilizados en el diseño de las pruebas de campo, fueron inferidos de la literatura disponible (Back, W., 1992 y Moore, Y., 1992) y de ensayos cualitativos realizados con anterioridad en la zona (Morales, J.L., 1992).

Los trabajos experimentales correspondientes a monitoreos, mediciones y pruebas de campo más significativas realizadas en el estudio, se resumen a continuación:

- Localización geográfica de manantiales, dolinas, norias y pozos en la ribera poniente de la laguna de Nichupté, entre Alfredo V. Bonfil y las zonas urbanas de Cancún y Puerto Juárez, Q.R. (figura 4).
- Medición de niveles naturales de fluorescencia, temperatura, pH, y conductividad eléctrica en los aprovechamientos y sitios localizados.
- Colocación de boyas de señalamiento y siembra de fluorocaptos de carbón activado en la laguna de Nichupté y Bahía de Mujeres.
- Inyección de trazadores fluorescentes en las plantas de tratamiento de agua residual: Laguna de Oxidación, Pok-Ta-Pok, Gucumatz y El Rey (figura 4).
- Toma de muestras de agua subterránea para análisis fluorimétrico en manantiales subacuáticos, laguna de Nichupté y Bahía de Mujeres.
- Toma de muestras de agua para análisis de coliformes fecales en las principales surgencias de agua subterránea del SLN y de la Bahía de Mujeres.

La campaña de mediciones y observaciones de campo se desarrolló de julio a noviembre de 1997.

5. TRAZADORES ADICIONADOS ARTIFICIALMENTE

Las cantidades inyectadas de trazador permitieron marcar volúmenes de agua suficientemente grandes, para posibilitar la detección evidente en los sitios probables de surgencia (uno o varios órdenes de magnitud por arriba del nivel de fondo).

Los manantiales subacuáticos existentes en el SLN y en la Bahía de Mujeres descargan agua salobre resultante de la mezcla de agua subterránea continental y agua de mar. Los porcentajes de los componentes de las mezclas varían como consecuencia de las oscilaciones en las cotas medias del SLN y del Mar Caribe (influencia de las mareas), a cambios en el régimen del flujo subterráneo y a la inversión en el régimen de los manantiales (fuente-sumidero-fuente), entre otros. El resultado de estos procesos

genera cambios en el caudal y en la calidad química y sanitaria de las surgencias subacuáticas.

Los valores de fluorescencia medidos en las descargas de los manantiales y sitios predeterminados, correspondieron exclusivamente a variaciones naturales en el agua del sistema, durante todo el período de las campañas experimentales. Los niveles de fluorescencia observados (tabla 1), así como los parámetros sanitarios medidos (tabla 2), indican que los manantiales del SLN, no descargan componentes de agua residual. Por tanto, no hay evidencias de que exista interconexión entre el SLN y las fuentes contaminadoras probadas.

Por la magnitud del caudal de los manantiales, la recarga debe originarse en una extensa zona continental, localizada hacia aguas arriba de la línea de costa, de manera que el flujo subterráneo no interacciona con los efluentes de agua residuales infiltrados localmente en el acuífero. Al existir alta densidad de conductos de disolución por la Karstificación de la roca caliza, es muy probable que estos intercepten a los flujos locales contaminados y los descarguen hacia el mar.

En las condiciones geohidrológicas locales, es posible que no exista interconexión del flujo regional, estimado en siete millones de metros cúbicos por año por kilómetro de costa, con el agua de recarga local.

6. TRAZADORES NATURALES DEL AGUA

Los efluentes de las plantas de tratamiento son trazadores gratuitos que están ingresando permanentemente en el subsuelo. Los valores de fluorescencia natural que presentan los diferentes tipos de agua se muestran en la tabla 2.

El comportamiento hidrodinámico típico de los manantiales del SLN se ilustra con la ayuda de los gráficos de las figuras 5 y 6. La variación de la temperatura (T) y de la fluorescencia frente a la conductividad eléctrica (CE) de la descarga del manantial 30 indica, que al decrecer la CE se incrementa la componente de agua dulce continental (figura 6). Por ello, la descarga es más fría y de mejor calidad inclusive que el agua del SLN. Ello se evidencia en valores de fluorescencia natural muy pequeños. A medida que se incrementa la CE de la descarga, aumentan tanto la temperatura, como la fluorescencia del agua, indicando que en el manantial predomina una componente de agua proveniente del mismo SLN en el flujo resurgente.

El comportamiento de la temperatura y de la fluorescencia, en función de la conductividad eléctrica del agua, indica que al aumentar la componente de agua

subterránea (conductividades eléctricas más bajas y temperaturas más frías) disminuye la fluorescencia equivalente del agua y se incrementa la calidad de la descarga.

El manantial 10 es uno de los más caudalosos del SLN, y presenta un comportamiento particular respecto del resto de los manantiales. Se localiza en el interior de una dolina y su descarga es ligeramente más salina y menos fría que el agua de la superficie (figura 5). La variación de la temperatura y de la fluorescencia en función de la conductividad eléctrica del agua, indica que al aumentar la componente subterránea se incrementa la calidad de la descarga.

En el caso de los manantiales de la Bahía de Mujeres, la situación es contraria a la del SLN. Las gráficas de las figuras 7 y 8 muestran que hay interconexión por vía subterránea, entre las fuentes contaminadoras y la Bahía de Mujeres. El comportamiento de la temperatura y de la fluorescencia en función de la conductividad eléctrica de los manantiales 32 y 34 (manantiales más importantes de la Bahía de mujeres), indica que al aumentar la componente subterránea las conductividades eléctricas y las temperaturas de las descargas son más bajas y; por tanto, se incrementa la fluorescencia equivalente de RWT. Este hecho evidencia la interconexión por vía subterránea, entre las fuentes contaminadoras y el cuerpo de agua receptor.

Los niveles de fluorescencia de las descargas de agua subterránea (tabla 2) y los parámetros sanitarios de las descargas subterráneas (tabla 3) indican que los manantiales de la Bahía de Mujeres descargan componentes significativos de agua residual.

Los parámetros sanitarios son consistentes con esta tendencia. Las descargas de los manantiales de la Bahía de Mujeres son las únicas que presentan nitrógeno amoniacal y ácido sulfhídrico, y carecen de nitrato (tabla 3).

7. RESULTADOS

Los resultados de campo muestran que no existe interconexión, por vía subterránea, entre las fuentes contaminadoras y el sistema lagunar Nichupté.

Los manantiales existentes en la Bahía de Mujeres descargan componentes de agua residual, proveniente de las plantas de tratamiento municipales y de las fosas sépticas de la zona.

Las descargas de los manantiales corresponden a mezclas de agua subterránea de origen continental y agua de mar y, bajo ciertas condiciones, de agua superficial local. Los porcentajes de las partes componentes varían de acuerdo con el régimen del flujo subterráneo y las variaciones de nivel de los cuerpos superficiales, provocadas por las

mareas (efectos de la pleamar y bajamar). En promedio, las descargas de la mayoría de los manantiales están compuestas de 30% de agua subterránea y 70% de agua de mar.

La mayor parte de los contaminantes que ingresan al SLN son por vía superficial y subsuperficial, en condiciones de régimen de temporada de lluvias en el flujo subterráneo.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos corresponden a las condiciones hidráulicas imperantes en las cuales se desarrolló el estudio. La modificación del régimen de flujo subterráneo, por la explotación del acuífero y el desarrollo de la infraestructura turística y urbana, pueden incidir en la calidad de las aguas del sistema lagunar. Por ello, se recomienda que las descargas sanitarias municipales y la absorción de aguas residuales en el subsuelo se controlen en el corto plazo.

Es importante definir zonas de uso restringido del suelo en los alrededores del SLN, para proteger los recursos hidráulicos subterráneos, y garantizar la calidad y caudal de los manantiales.

Es necesario reubicar los pozos de absorción de efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales, hacia sitios cercanos a la línea de costa. Ello garantizaría la disposición final y dilución de los efluentes en la zona de agua salina, y evitaría su dispersión en el acuífero y su eventual ingreso en el sistema lagunar Nichupté.

Se recomienda modelar el funcionamiento de los pozos de absorción de las plantas de tratamiento en funcionamiento y proyectadas a futuro, para conocer el comportamiento de los efluentes tratados absorbidos en el sistema cárstico, así como su impacto en los cuerpos de agua superficial. Este punto presenta implicaciones muy importantes, dado que la alternativa más viable para la eliminación de las aguas residuales tratadas en la entidad es por absorción en el subsuelo.

9. BIBLIOGRAFÍA

Back, W., Paloc Henri., (1992). "Coastal Karst Formed by Ground-Water Discharge, Yucatan, Mexico", International Association of Hydrogeologists, Hydrogeology of Selected Karst Regions., Vol. 13, pp. 461-467.

CNA, 1992, *Determinación de la calidad del agua del sistema lagunar Nichupté*, gerencia Estatal de la Comisión Nacional del Agua en Quintana Roo.

CNA, 1996, *Evolución de la calidad del agua del sistema lagunar Nichupté, Quintana Roo (1992-1995)*. Gerencia Estatal en Quintana Roo, Subgerencia Técnica.

- Christensen T. H., Cossu R., Stegmann R., (1992). *Landfilling of Waste : Leachate*. Elsevier Applied Science, cap. 2, 3 y 4.
- Exyco, 1989, *Estudio de exploración geohidrológica en la región costera nororiental del Estado de Quintana Roo (zona Cancún-Coba) y estudios hidrogeoquímicos*.
- IMTA, 1994, *Hidrodinámica y transporte de contaminantes en la laguna de Nichupté*, Proyecto SH 9403, Coordinación de Tecnología Hidráulica.
- Kjeldsen Peter., Bjerg L. Poul., Ruge Kirsten., Christensen Thomas. H., Pedersen Jorn. K., "Characterization of an Old Municipal Landfill (Grindsted, Denmark) as a Groundwater Pollution Source: Landfill Hydrology and Leachate Migration". Waste Management & Research, 1998:16:1:14-22.
- Morales, J.L., Boa, H., Chablé, F.C., y Balmes, E.J., "Estudio de la calidad del agua del sistema laguna Nichupté, Q.R." CNA, Gerencia Estatal en Quintana Roo, 1992.
- Moore Yolanda. H., Stoessell. Ronald. K, Easley Dale. H. "Fresh-Water/Sea-Water Relationship within a Ground-water flow system, Northeastern Coast of the Yucatan Peninsula". Vol. 30, No. 3, Ground Water, May-June 1992.
- S.R.H, Dirección General de Usos del Agua y Prevención de la Contaminación, (1975). *Estudio de la calidad del agua en Cancún, Quintana Roo.*, contrato No. SP-74-C-8.
- Semarnap, Secretaría de Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca. *Programa integral de saneamiento de Cancún, Q.R.*, Junio 1996.

Erro! Indicador não definido. SITIO	AGUA SUBTERRÁNEA				AGUA SUPERFICIAL			
	T (°C)	C.E. (mS/cm)	RWT (ppb)	FL (ppb)	T (°C)	C.E. (mS/cm)	RWT (ppb)	FL (ppb)
<i>LAGUNA DE NICHUPTÉ</i>								
Manantial 2	28.4	18.0	0.028	0.58	31.3	44.3	0.05	0.45
Manantial 8	30.5	36.3	0.045	0.54	31.6	41.0	0.10	0.55
Manantial 9	28.1	21.1	0.026	0.43	31.4	41.1	0.08	0.57
Manantial 14	27.8	25.1	0.043	0.47	31.4	42.9	0.05	0.34
Manantial 15	28.7	35.7	0.031	0.66	30.0	37.5	0.12	0.81
Manantial 29	28.0	31.4	0.027	0.37	30.2	38.1	0.06	0.35
Manantial II	28.4	24.3	0.039	0.61	30.9	32.3	0.07	0.48
Manantial 30	27.5	32.6	0.021	0.44	30.3	39.3	0.04	0.28
Manantial 31	27.9	19.2	0.033	0.66	30.5	32.4	0.08	0.53
<i>LAGUNA DEL AMOR</i>								
Manantial 10	26.1	31.1	0.018	0.38	26.4	29.6	0.16	0.85
Manantial 11	27.1	31.4	0.016	0.39	27.2	32.3	0.14	0.85
<i>BAHÍA DE MUJERES</i>								
Manantial 32	28.0	27.4	0.056	1.30	30.3	50.5	0.024	0.12
Manantial 33	28.4	35.2	0.039	0.53	30.8	52.2	0.024	0.12
Manantial 34	27.9	26.6	0.044	0.98	30.4	50.1	0.029	0.27
Manantial 35	28.0	28.6	0.066	1.05	30.5	51.5	0.028	0.19
Manantial 36	27.7	28.0	0.036	0.58	30.6	52.3	0.018	0.15
<i>PLANTAS DE TRATAMIENTO</i>								
Laguna de Oxidación					28.4	2.1	0.233	8.63
Pok-Ta-Pok					30.5	3.0	0.082	1.23
Gucumatz					31.6	3.1	0.060	1.17
El Rey					30.6	3.0	0.048	0.61

Nota: T= temperatura, C.E.= conductividad eléctrica, RWT = concentración de rodamina WT, FL = concentración de uranina, ppb = partes por billón, mS/cm² = milisiemens por centímetro cuadrado.

TABLA 2. VALORES PROMEDIO DE FLUORESCENCIA Y DE OTROS PARÁMETROS DE CAMPO MEDIDOS DURANTE EL PERÍODO ESTUDIADO.

SITIO	C.F. (ufc/100)		N-NH ₃ (mg/l)		Nitrato (mg/l)		H ₂ S (*)	
	Estiaje	Lluvia	Estiaje	Lluvia	Estiaje	Lluvia	Estiaje	Lluvia
Manantiales del SLN								
Manantial 10	0	4	ND	ND	0.2	0.3	No	No
Manantial 11	1	3	ND	ND	0.3	ND	No	No
Manantial 14	0	0	ND	ND	ND	ND	No	No
Manantial 15	0	3	ND	ND	0.3	ND	No	No
Manantial 29	0	2	ND	ND	1.2	ND	No	No
Manantial 30	0	3	ND	ND	1.7	0.7	No	No
Manantial II	0	3	3.4	ND	0.3	ND	No	No
Cuerpos de agua superficiales								
Laguna del Amor	3	5	ND	ND	0.6	ND	No	No
Isla de Pájaros	0	2	ND	ND	0.3	0.1	No	No
Malecón Cancún	0	0	ND	ND	2.5	ND	No	No
Gemelos	0	3	ND	ND	0.4	ND	No	No
Manantiales de la Bahía de Mujeres								
Manantial 32	-	2	-	5.8	-	ND	Sí	Sí
Manantial 34	0	2	3.4	1.8	ND	ND	Sí	Sí
Manantial 35	0	3	8.4	3.4	ND	ND	Sí	Sí
Manantial 37	1	-	1.5	-	ND	-	Sí	Sí
Manantial 38	-	3	-	4.3	-	ND	Sí	Sí

Nota: C.F.= Coliformes fecales, N-NH₃ = Nitrógeno amoniacal, H₂S = Ácido sulfhídrico, (*) = Detección cualitativa, ND = No detectado.

TABLA 3. PARÁMETROS SANITARIOS DE LOS PRINCIPALES MANANTIALES DEL SISTEMA LAGUNAR NICHUPTÉ Y DE LA BAHÍA DE MUJERES.

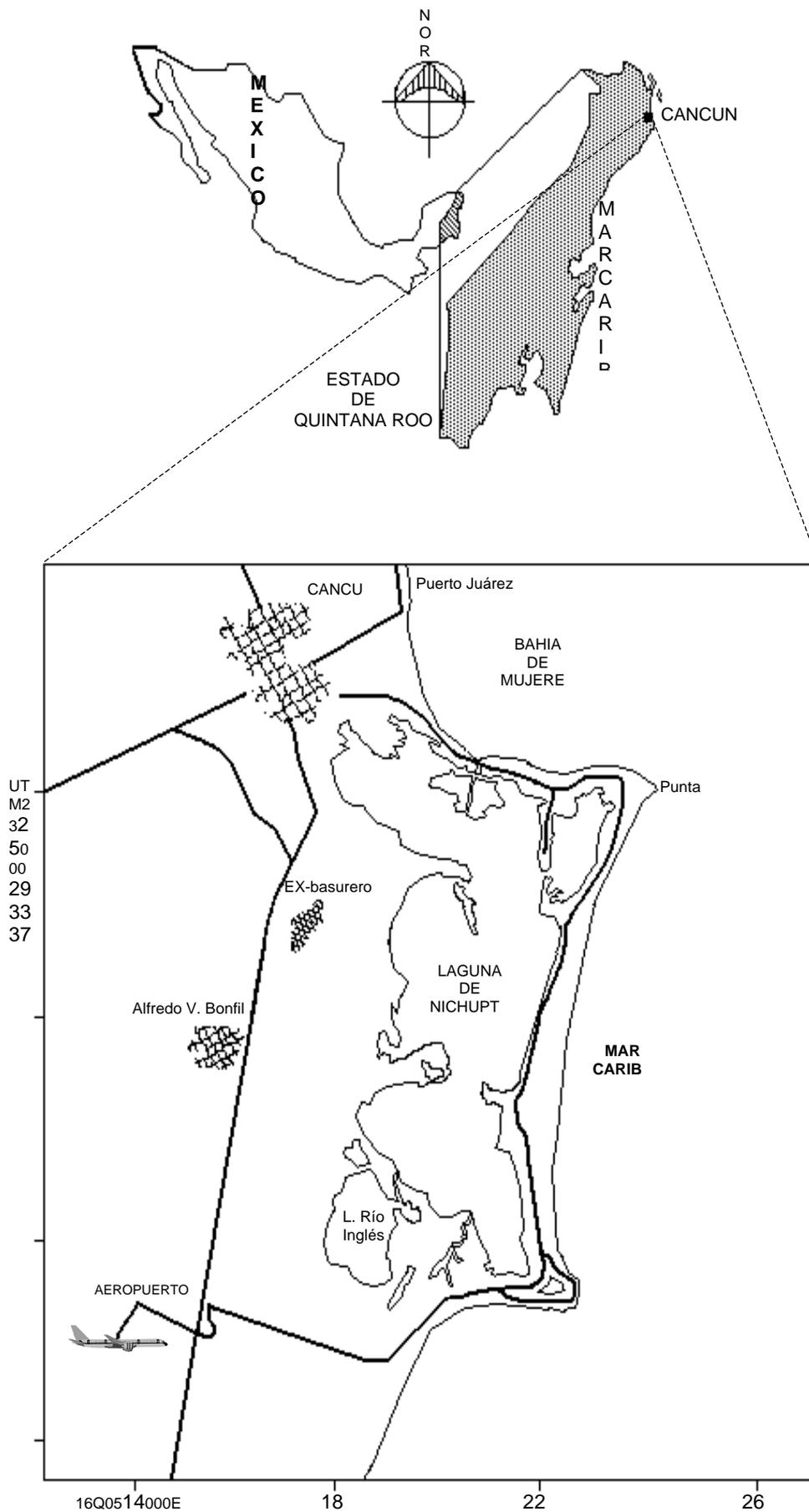


Figura 1. Localización Geográfica del área de estudio

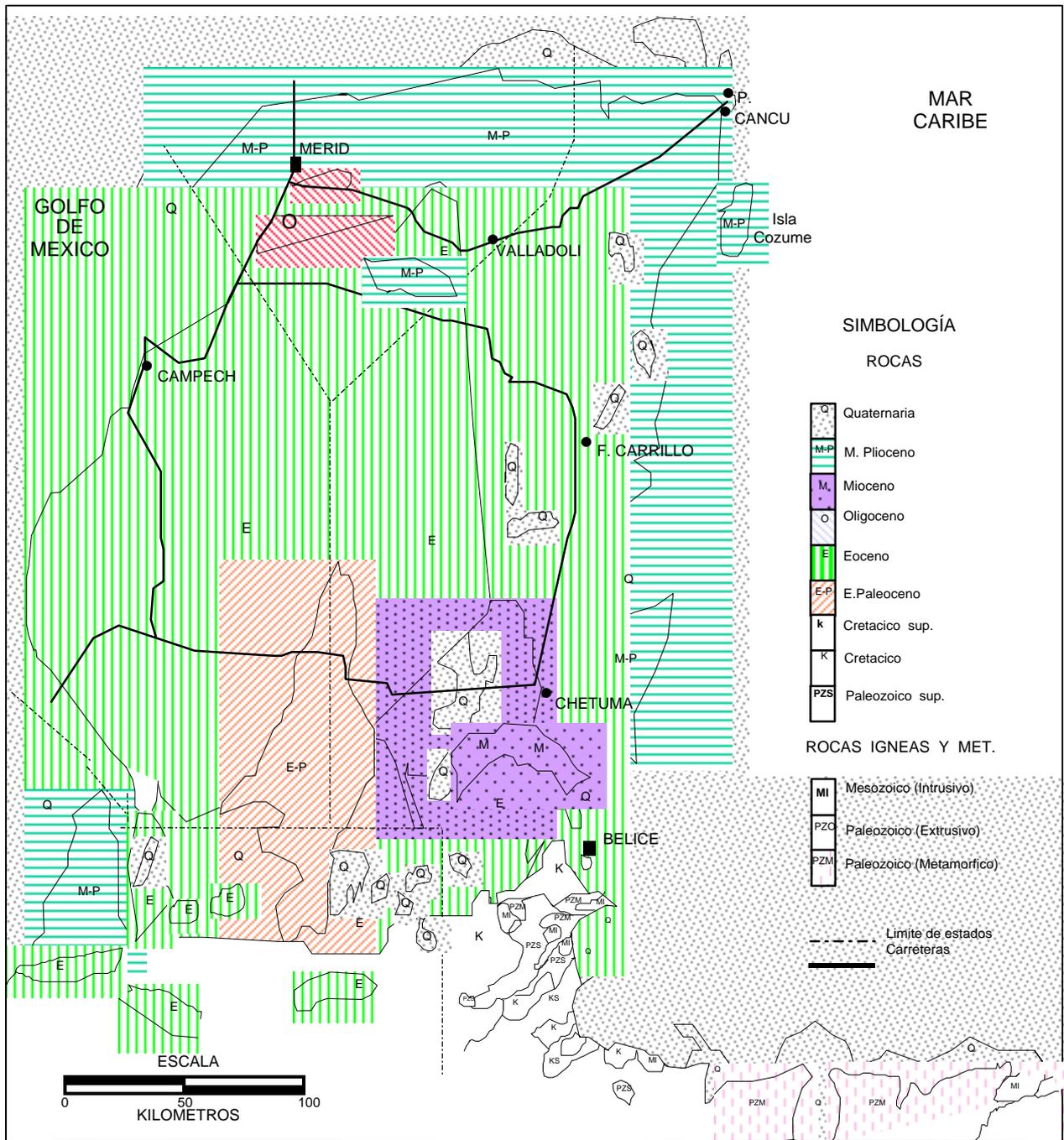


Figura 2. Geología superficial de la Península de Yucatán

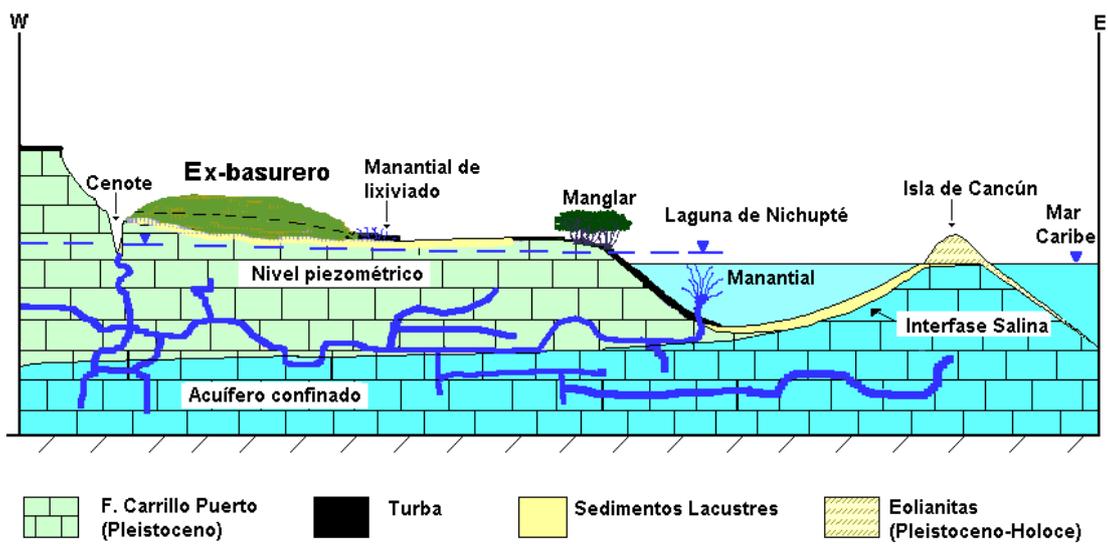
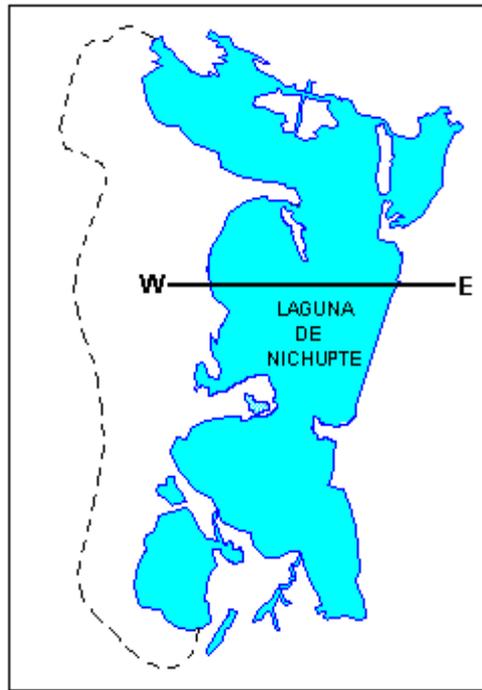


Figura 3. Sección esquemática de la zona aledaña al SLN

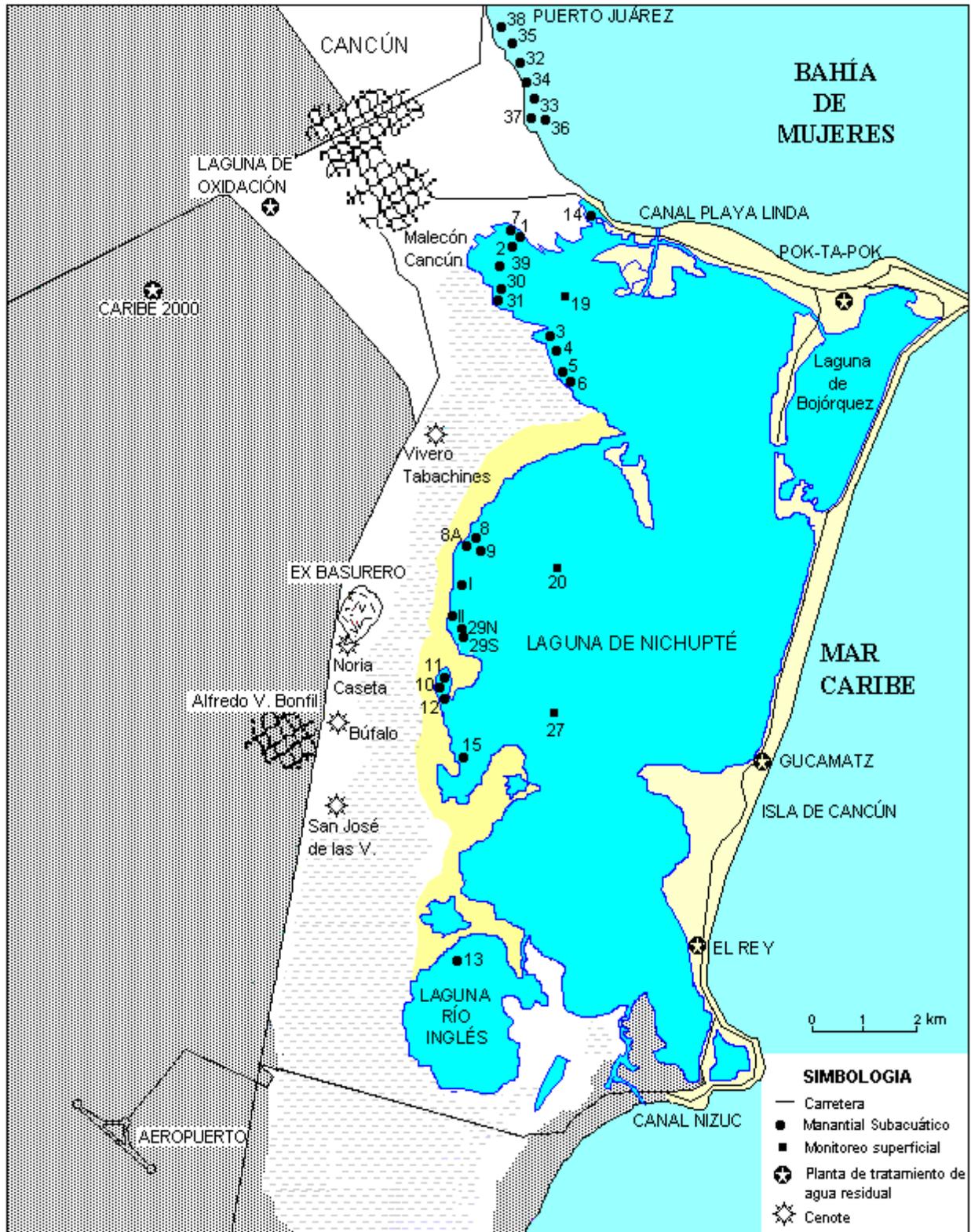


Figura 4. Localización de fuentes de contaminación y los manantiales subacuáticos de la Laguna de Nichupté y de la Bahía de Mujeres, Q. R.

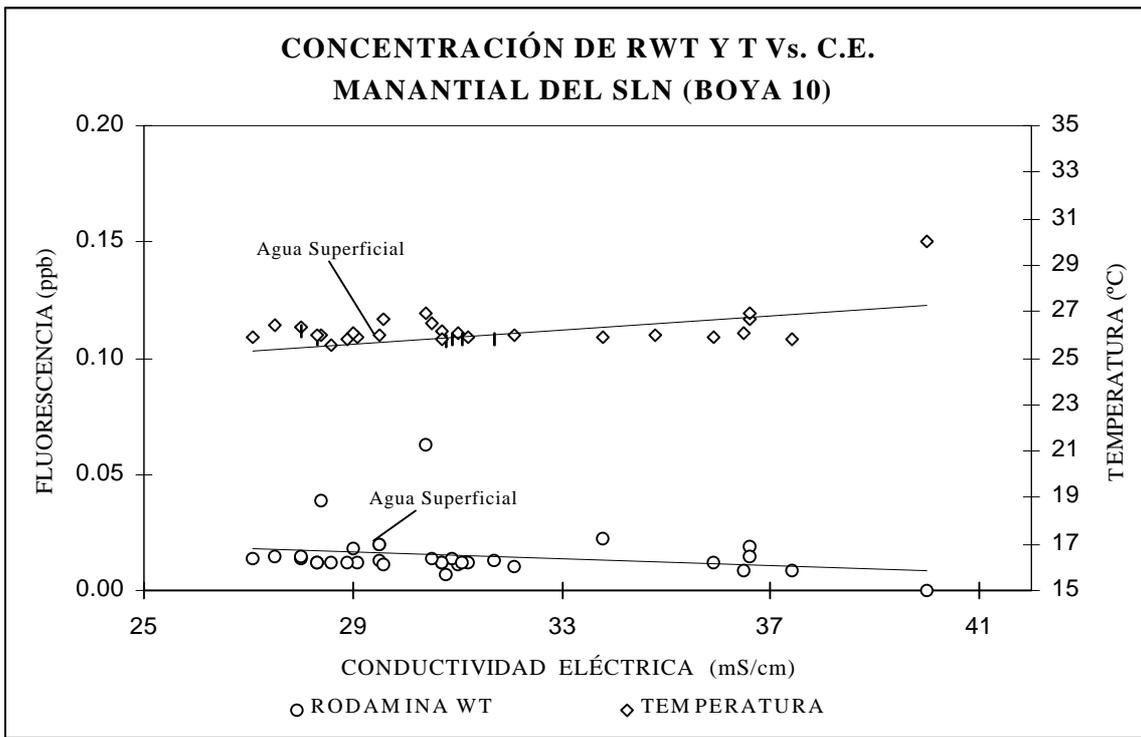


Figura 5. Uno de los manantiales más caudalosos del SLN, descarga agua más salina que la de la superficie. A medida que disminuye la componente superficial se incrementa la calidad de la surgencia.

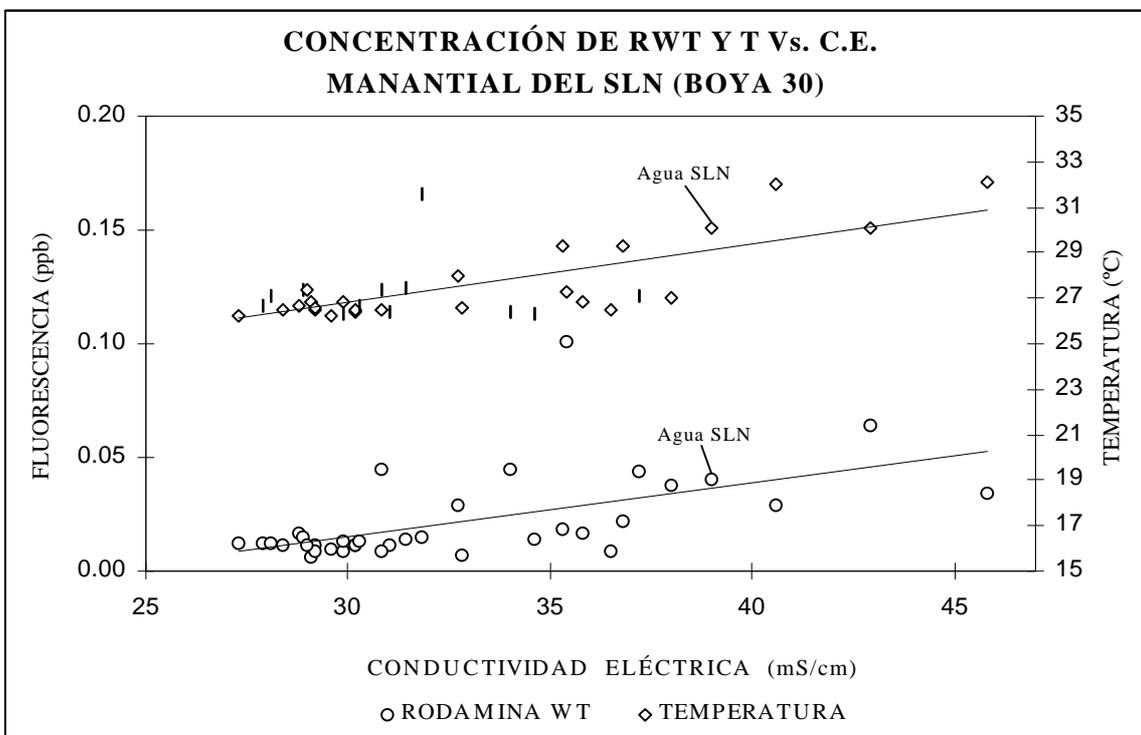


Figura 6. La calidad del agua de los manantiales del SLN depende de las proporciones de los componentes de la mezcla resultante, a mayor porcentaje de agua subterránea se incrementa la calidad de la surgencia.

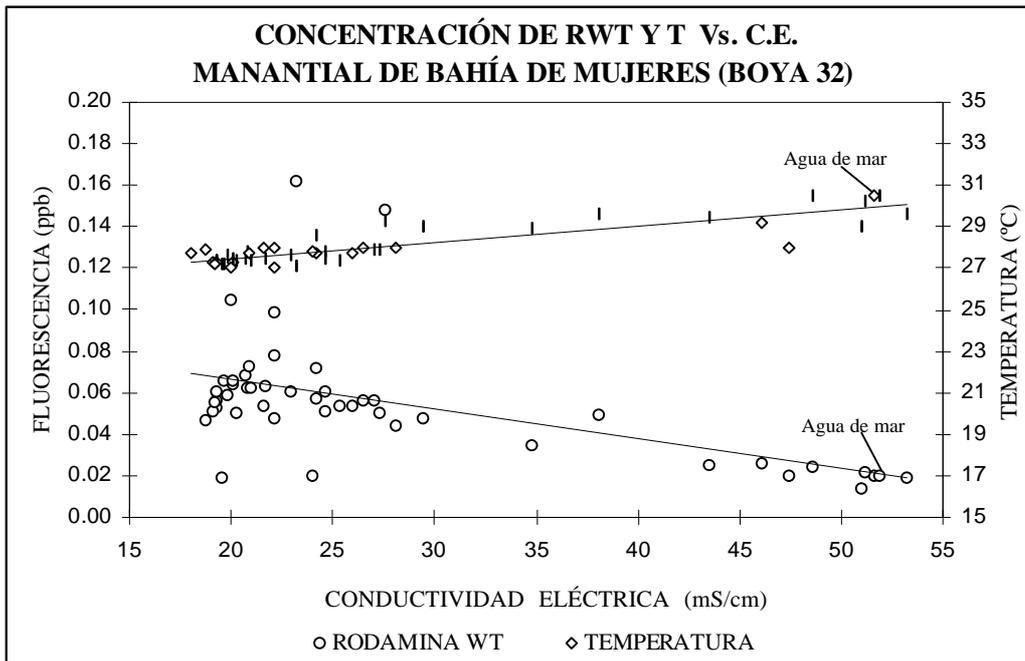


Figura 7. Los manantiales de la Bahía de Mujeres (Mar Caribe) muestran un comportamiento inverso a los del SLN. A medida que se incrementa la componente subterránea decrece la calidad de la surgencia.

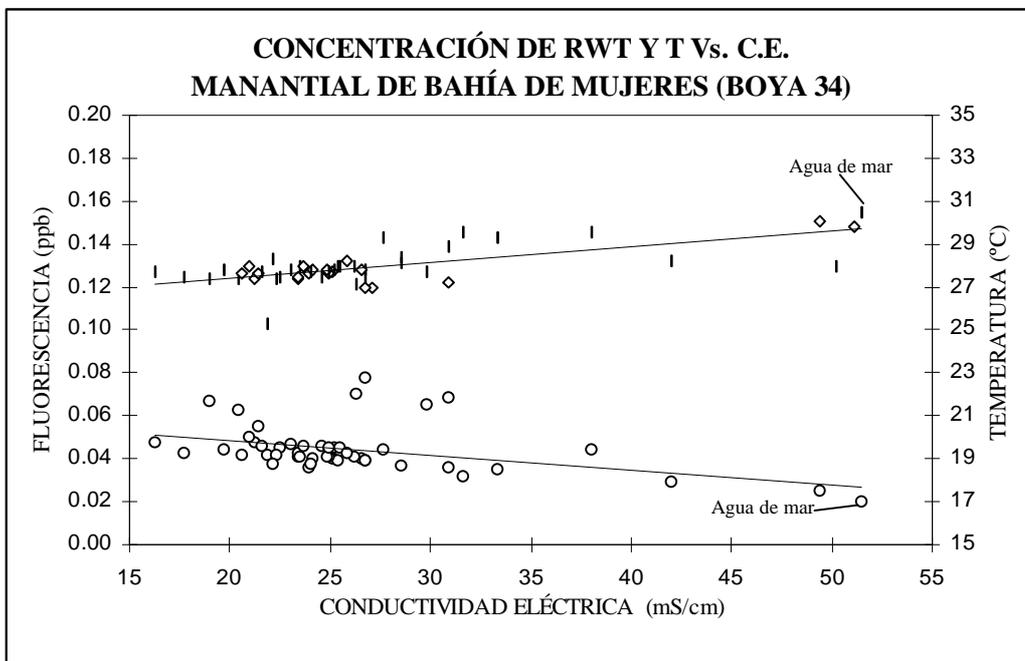


Figura 8. Los resultados de campo muestran que los manantiales de la Bahía de Mujeres (Mar Caribe) descargan componentes de agua residual en el mar; a menor C. E. y temperatura mayor concentración de RWT.