

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA

QUÍMICO INDUSTRIAL



**ESTUDIO PRELIMINAR DEL IMPACTO DE LA CANALIZACIÓN DEL ARROYO
ALAMAR EN LA CALIDAD DE AGUA DE SU ACUÍFERO SUBYACENTE**

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE

QUÍMICO INDUSTRIAL

PRESENTA

YAIR ALEJANDRO RENOVATO TIRADO

ASESOR

DR. FERNANDO TOYOHICO WAKIDA KUSUNOKI

TIJUANA, BAJA CALIFORNIA

NOVIEMBRE DEL 2014

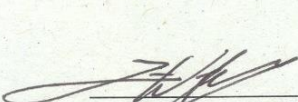
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA

FOLIO No. 066
Tijuana, B. C., a 28 de octubre de 2014.

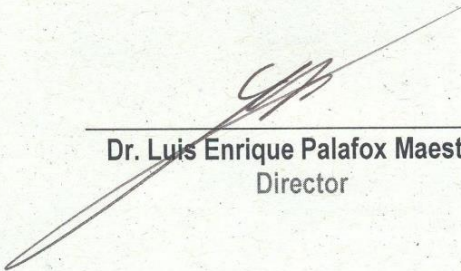
C. Yair Alejandro Renovato Tirado
Pasante de Químico Industrial
Presente

El tema de trabajo y/o tesis para su examen profesional, en la Opción: **Tesis** es propuesto por el **Dr. Fernando Toyohiko Wakida Kusunoki** y **Dr. Miguel Ángel Pastrana Corral** quienes serán responsables de la calidad del trabajo que usted presenta, referido al tema: **"Estudio preliminar del impacto de la canalización del arroyo Alamar en la calidad del agua de su acuífero subyacente"**, el cual deberá desarrollar de acuerdo con el siguiente orden:

- I. Introducción
- II. Antecedentes
- III. Zona de Estudio
- IV. Métodos Experimentales
- V. Resultados y Discusión
- VI. Conclusiones
- VII. Referencias


Dr. Fernando Toyohiko Wakida Kusunoki
M.C. Miguel Ángel Pastrana Corral
Directores de Tesis


Q. Noemí Hernández Hernández
Sub- Directora


Dr. Luis Enrique Palafox Maestre
Director

A mi madre Antonieta y mi abuelita Josefina a la que llevo

siempre en mi corazón. Con su guía me llevaron

por el buen camino; sin ellas esta etapa

de mi vida hubiera sido...

...solo un bonito sueño.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería, que me brindó la oportunidad de pertenecer a tan prestigiosa institución y tener en mi haber una formación de alta calidad.

Al Dr. Fernando Toyohiko Wakida Kusunoki, mi Director de Tesis, muchas gracias por su compromiso con este trabajo, su exigencia constante y su apoyo en los momentos cruciales. También por su amistad y paciencia que ha tenido hacia mi persona, mi eterno agradecimiento.

Al Dr. Enrique García Flores y al Dr. Miguel Ángel Pastrana, mis sinodales, por aceptar ser lectores de este trabajo, por sus críticas constructivas y sobre todo por ayudarme a reconocer mis errores.

Al Dr. Mario del Valle Granados, mi tutor de carrera, gracias por su disposición y sus buenos consejos que siempre me brindo.

Al Dr. Ernesto Vélez, un gran profesor y amigo, por sus buenas enseñanzas y apoyo en los momentos difíciles, mis más amplio agradecimiento.

También muchas gracias a todos los profesores que contribuyeron a mi formación académica, gracias por su paciencia, por su entusiasmo y empeño para enseñar ciencias de la mejor manera posible.

Agradezco totalmente a mi familia, mi tío Santiago, Juan, Julián y Galdina, especialmente a mi Madre Antonieta y a mi abuelita Josefina que no está presente, pero nunca se me olvidaran sus jalones de oreja, su sabiduría y amor incondicional que me llevaron por el buen camino, son todos ellos quienes me han apoyado de todas las maneras posibles que se puede ayudar a alguien en la vida, me han enseñado y forjado las bases para reaccionar positivamente frente a cualquier situación y no rendirme nunca.

A mi esposa Johana (mi flaquita) y mi pequeña Marie, que me brindan toda la fuerza necesaria día a día para luchar en los momentos más difíciles, gracias por su apoyo, su amor y paciencia. Las amo y nunca dejare de agradecer el momento que aparecieron en mi camino.

A mis amigos de la infancia Pancho y Ramón, los quiero como mis hermanos, por su apoyo y consejos en todo momento, he aprendido y disfrutado con ustedes de todos esos buenos y malos ratos de nuestras vidas, gracias por su sincera amistad.

A mis compañeros de carrera quienes también se sumaron a mi vida para hacerme compañía con su sonrisa y ánimo, y a los que dijeron que la Tesis no servía de nada, muchas gracias por sus buenos comentarios, me dieron el coraje para terminarla.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Justificación	5
1.2 Objetivo	6
CAPÍTULO II. ANTECEDENTES	7
2.1 Agua subterránea	7
2.1.1 Importancia	7
2.1.2 Origen de los acuíferos	9
2.2 Relación agua superficial-acuífero	13
2.2.1 Tipos de río	13
2.2.2 Tipos de acuífero	15
2.3 Deterioro del recurso	16
2.3.1 Por sobreexplotación del acuífero	16
2.3.2 Por contaminación del acuífero	17
2.3.2.1 Tipos de contaminación	18
2.4 Canalización de arroyos	19
2.4.1 Objetivos de la canalización de arroyos	19
2.4.2 Desventajas de la canalización de arroyos	20
2.5 Proyecto del encauzamiento del Arroyo Alamar	20
2.6 Otros proyectos de canalización y encausamiento	24
CAPÍTULO III. ZONA DE ESTUDIO	27
3.1 Localización del área	27
3.2 Clima	29
3.3 Uso de suelos	30
3.4 Biodiversidad	32
3.5 Importancia del Acuífero del Arroyo Alamar	34

3.6 Problemática de la zona previo al revestimiento del arroyo	34
3.7 Situación actual de Alamar	35
3.8 Descripción de sitios de muestreo	36
 CAPÍTULO IV. MÉTODOS EXPERIMENTALES	 41
4.1 Muestreo	41
4.2 Análisis de las muestras	43
 CAPÍTULO V. RESULTADOS Y DISCUSIONES	 45
 CAPÍTULO VI. CONCLUSIÓN	 56
 CAPÍTULO VII. REFERENCIAS	 57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1 Secuencias de muestreo y análisis.	41
Tabla 4.2 Localización de los sitios de muestreo.	42
Tabla 4.3. Métodos utilizados para el análisis de muestras.	44
Tabla 5.1 Rangos y promedio de concentraciones de parámetros seleccionados de aguas subterráneas y superficial. (Todos los valores en mg/l, si no es señalado), 2004.	45
Tabla 5.2 Rangos y promedio de concentraciones de parámetros seleccionados de aguas subterráneas y superficial. (Todos los valores en mg/l, si no es señalado), 2013.	46

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Tabla histórica de oferta-demanda de agua potable en la ciudad de Tijuana. (CESPT, 2006)	3
Figura 1.2	Tabla de proyección oferta-demanda de agua potable en la ciudad de Tijuana. (CESPT, 2006)	3
Figura 2.1	Extracción y usos de agua subterránea en México. (CNA, 2011)	9
Figura 2.2	Esquema simplificado de porosidad y permeabilidad. (Elaboración propia)	10
Figura 2.3	Esquema simplificado de la estructura de un acuífero. (Elaboración propia)	11
Figura 2.4	Tipos de río. a) río efluente o ganador, b) río influente o perdedor y c) río desconectado o efecto ducha. (Elaboración propia)	14
Figura 2.5	Tipos de acuífero según su funcionamiento hidráulico. (Elaboración propia)	16
Figura 2.6	Usos de suelo que normalmente generan amenazas de contaminación en las aguas subterráneas. (Foster <i>et al.</i> 2010)	19
Figura 2.7	Imágenes de un posible jardín propuesto para la sustentabilidad del arroyo. (Espinoza <i>et al.</i> 2005)	22
Figura 2.8	Obras de canalización en el Alamar. (Fuente propia)	23
Figura 2.9	Avance de las obras de canalización del Arroyo Santiago (Ayuntamiento de Manzanillo, 2009)	24
Figura 2.10	Aspectos diversos del arroyo seco. (Plan Nacional Desarrollo del Estado de Durango)	25
Figura 2.11	Encauzamiento conservando el hábitat natural en el Río Barxell. (Alarcón, 2009)	26
Figura 3.1	Cuenca del Arroyo Alamar. (Michel y Graizbord, 2002)	27
Figura 3.2	Imágenes de la zona del Alamar a) Puente del Blvd. Clouthier, b) parcelas en la zona I, c) asentamientos humanos irregulares, d) vivero, e) parcelas ubicadas dentro de la zona III, f) parcelas y al norte la Col. 10 de Mayo. (Fuente propia)	29
Figura 3.3	Usos de suelo en la zona del Alamar. (Elaboración Propia)	31

Figura 3.4	Pozo 1, ubicado en la tercer zona de estudio, donde se observa una letrina ubicada a un par de metros de la noria. (Fuente propia)	36
Figura 3.5	Pozo 2, utilizado principalmente para el riego de hortalizas. (Fuente propia)	37
Figura 3.6	Pozo 3, protegido de la intemperie. (Fuente propia)	37
Figura 3.7	Pozo 4, para uso en el riego del vivero. (Fuente propia)	38
Figura 3.8	Pozo 5 la profundidad del nivel freático aumentó posteriormente al revestimiento del arroyo. (Fuente propia)	38
Figura 3.9	Pozo 6, modificado a noria. (Fuente propia)	39
Figura 3.10	Pozo 6b, el cual se encuentra actualmente clausurado por la CONAGUA. (Fuente propia)	39
Figura 3.11	a) Rio 1, b) Rio 2 y c) Rio 3. (Fuente propia)	40
Figura 4.1	Distribución gráfica de los sitios de muestreo.	43
Figura 5.1	Concentraciones de sólidos disueltos totales (SDT) en agua con respecto a sitios de muestreo antes y después de la canalización.	47
Figura 5.2	Conductividad Eléctrica en agua con respecto a sitios de muestreo antes y después de la canalización.	48
Figura 5.3	Concentraciones de Demanda Química de oxígeno (DQO) en agua con respecto a sitios de muestreo antes y después de la canalización.	49
Figura 5.4	Concentraciones de nitratos ($\text{NO}_3\text{-N}$) en agua con respecto a sitios de muestreo antes y después de la canalización.	50
Figura 5.8	Concentraciones de cloruros (Cl^-) en agua con respecto a sitios de muestreo antes y después de la canalización.	51
Figura 5.5	Concentraciones de Nitrógeno Amoniacal ($\text{NH}_3\text{-N}$) en agua con respecto a sitios de muestreo antes y después de la canalización.	52
Figura 5.6	Concentraciones de fosfatos ($\text{PO}_4\text{-P}$) en agua con respecto a sitios de muestreo antes y después de la canalización.	53
Figura 5.7	Parámetros de calidad de agua en las norias con respecto a la Distancia del Arroyo Alamar (a) Sólidos disueltos totales (SDT), (b) Demanda Química de Oxígeno (DQO), (c) Nitrógeno amoniacal ($\text{NH}_3\text{-N}$) y (d) Nitrógeno total (NT).	54

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

El agua es el componente principal de la biósfera y de sus organismos vivos, constituye del 50 al 90% de su masa, de su disponibilidad en cantidad y calidad dependen el bienestar, las actividades de desarrollo de los pueblos y de su entorno. Se ha estimado que existen alrededor de 1400 millones de kilómetros cúbicos de agua en el planeta, de los cuales sólo 2.5% es agua dulce. Este pequeño porcentaje se localiza principalmente en los ríos, lagos, glaciares, mantos de hielo y acuíferos del planeta. (PNUMA, 2002)

La región de Baja California se encuentra en uno de los territorios con menor disponibilidad de agua a nivel nacional, principalmente por la ubicación geográfica y las condiciones climáticas, las cuales favorecen el problema de escases del vital recurso en la región. La creciente demanda de agua en la ciudad debido al excesivo aumento de la población requiere de un mejor aprovechamiento de los recursos hídricos. Tijuana es una de la ciudades con mayor concentración de habitantes a nivel nacional, con un ritmo anual de crecimiento de 4.64% (CESPT, 2006), y se estima que para el año 2020 alcanzara una población de 3.5 millones de habitantes (Pech y Williams, 2000), este acelerado crecimiento demográfico ha sido impulsado por el aumento en el número de maquiladoras lo cual ha propiciado una fuerte inmigración a esta ciudad, produciendo una serie de problemas ambientales, y una alta presión a los recursos naturales locales y regionales, lo que conlleva a un caso en donde el abastecimiento de agua es una preocupación constante. Actualmente, la ciudad de Tijuana se abastece de agua principalmente de fuentes superficiales y en menor cantidad de fuentes subterráneas, más del 90% del abastecimiento de la ciudad proviene de la Presa El Carrizo, localizada en el este de la ciudad de Tijuana, donde su recarga tiene origen en la zona del Río Colorado conducida por el acueducto Río Colorado-Tijuana con una

longitud aproximadamente de 258 km al este de la ciudad de Tijuana, por lo que se requieren grandes gastos energéticos para su bombeo, estas aguas son tratadas por la potabilizadora El Florido la cual provee a la ciudad con un flujo de 4000 l/s. Es entonces que esta región semiárida se ha caracterizado por emplear la tecnología más avanzada, para transportar y abastecer el agua a sus poblaciones.

Según datos de la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Tijuana (CESPT) en una gráfica histórica oferta-demanda de agua potable (Figura 1.1), a partir del año 1991 se observó que la demanda de agua en la ciudad de Tijuana tendió a aumentar casi linealmente, lo que deja una proyección para el año 2024 donde el suministro de agua potable no será suficiente para cubrir la demanda (Figura 1.2), aún con el proyecto pronosticado en funcionamiento de la línea paralela al acueducto Río Colorado-Tijuana con el propósito de ampliar el abastecimiento de agua potable en la ciudad. Teniendo en cuenta esta problemática, la urbanización exponencial de la ciudad, las características semidesérticas y la exposición a la contaminación de las aguas superficiales es notable que el recurso hídrico disponible para la región posiblemente no aumente al mismo ritmo que la demanda, lo que alienta hoy en día a la planeación de proyectos para la protección, aprovechamiento y reúso de los recursos hídricos locales, poniendo atención a los acuíferos con los que cuenta esta urbe, principalmente al aprovechamiento del acuífero del arroyo Alamar.



Figura 1.1 Tabla histórica de oferta-demanda de agua potable en la ciudad de Tijuana. (CESPT, 2006).

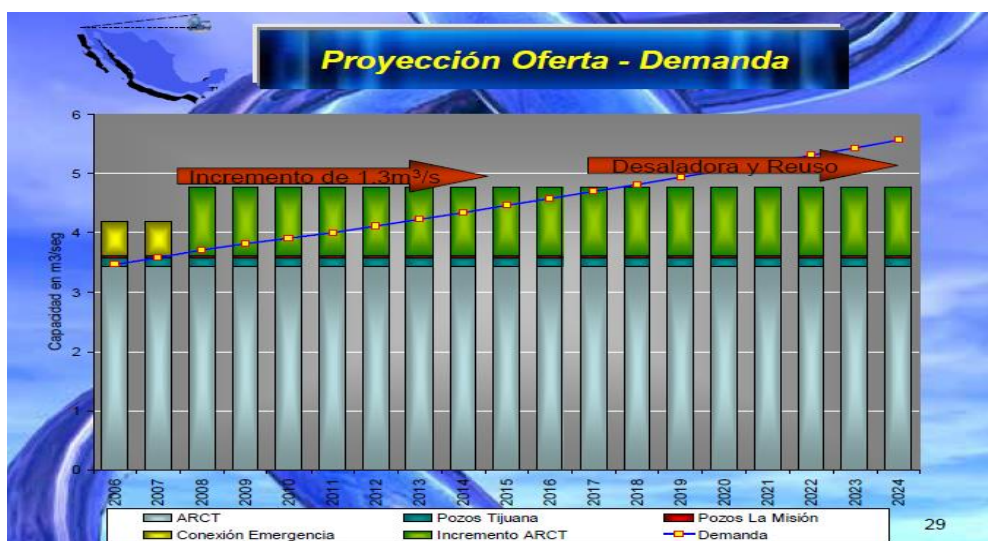


Figura 1.2 Tabla de proyección oferta-demanda de agua potable en la ciudad de Tijuana. (CESPT, 2006).

De acuerdo con la CONAGUA en 1999, el acuífero del Arroyo Alamar aportaba una cantidad importante de agua a la población de la zona, estimada en $14\text{Mm}^3/\text{año}$, lo que representaba casi un 20% del consumo de la ciudad de Tijuana; sin embargo hoy en día más del 90% del suministro de agua proviene del acuífero del Río Colorado.

Hoy en día la condición del acuífero del arroyo Alamar se encuentra amenazado principalmente por los problemas de contaminación que enfrenta, un estudio realizado referente a la calidad del agua del acuífero del arroyo Alamar por Ponce (2006), determinó que la calidad del agua del arroyo Alamar es mermada con respecto a los niveles de urbanización, consecuencia de la falta de planeación en la población de esta área, lo que conlleva también a la conclusión de que su acuífero es altamente influenciado por actividades humanas no reguladas como lo son asentamientos irregulares sin servicios de drenaje, grandes depósitos de basura y escombros, escurrimientos de agua residual no tratada, extracción de grava y arena para su posterior comercialización, siembra de hortalizas y crianza de animales domésticos para su consumo; todas estas actividades entre otras propician el deterioro a la calidad de agua tanto del arroyo como del acuífero. Por las razones antes mencionadas, sumando que las familias asentadas a las márgenes del arroyo viven en condiciones de riesgo, dado que el terreno es susceptible a sufrir condiciones de deslave, inundaciones y estancamientos de agua durante eventos pluviales extraordinarios; en Marzo del 2007 la Delegación de Baja California de la Comisión Nacional del Agua (CNA) presentó ante la SEMARNAT una manifestación de impacto ambiental para su evaluación y autorización de un proyecto eco hidrológico, el cual consistía en la construcción de pequeñas presas con diques y gaviones, este último consiste en una caja de enrejado de malla metálica que una vez colocado en su sitio se rellena de piedra del lugar lo que mantendría la funcionalidad del ecosistema ripario dejando el lecho del Arroyo Alamar en un estado muy natural y rehabilitado, sin afectar la vegetación ni los mantos acuíferos. Tijuana, como otras ciudades mexicanas, carece de áreas verdes y espacios abiertos. Por lo tanto, el parque ribereño sería una valiosa aportación para la comunidad. Pero en 2009, el Instituto Municipal de Planeación (IMPLAN) presentó otra manifestación para la modificación del proyecto del encauzamiento del Alamar presentado en 2007, este con la particularidad del revestimiento en su totalidad del Arroyo (II y III etapa) y la realización de la Vía Rápida Alamar con el propósito de solucionar la

problemática antes mencionada como lo son los asentamientos irregulares donde alrededor de 719 familias viven en condiciones insalubres, descargando sus residuos al arroyo, ocasionando el deterioro de flora y fauna de dicha sección (IMPLAN, 2009). Donde a mediados del 2011 el Gobierno del Estado y la CONAGUA dieron arranque al proyecto de canalización referente a la modificación presentada.

1.1 Justificación

El revestimiento del arroyo Alamar ha ayudado a la disminución de infiltración de sustancias contaminantes de estos asentamientos hacia el mismo, lo que conllevaría a la rehabilitación de la calidad del agua del arroyo y su acuífero subyacente. Pero una investigación por Ponce (2005) estimó en un estudio hidrológico del Arroyo Alamar que 3.01 hm³ /año (95.4 L/s) dejarían de infiltrarse a su acuífero adyacente si el cauce del arroyo se revistiera para su canalización como el Río Tijuana, lo que podría afectar seriamente a los habitantes que cuentan con pozos de extracción de agua a las márgenes del Arroyo utilizada para labores domésticas y horticultura. Los grupos ambientalistas se han inconformado con este proyecto ya que atenta contra las especies de flora y fauna nativas de la zona, además del efecto negativo que este puede causar al acuífero del arroyo. En estos momentos con la mayor parte del proyecto ya terminado se plantea una incertidumbre de una nueva y tal vez diferente relación entre el arroyo Alamar y su acuífero adyacente referente a su hidrología y sustancias contaminantes aportadas por los asentamientos de la zona entre otros factores; para comprobar que realmente el proyecto de la canalización ha tenido un impacto positivo o negativo en la calidad del agua del arroyo y su acuífero es necesario desarrollar un nuevo estudio fisicoquímico del agua a lo largo del cauce y los pozos a las márgenes del arroyo. Esto es de suma importancia ya que el Alamar es una zona vital de recarga de agua con la que

cuenta esta urbe, que aunque puede tener un aporte limitado, tiene gran significado dadas las características de la región.

1.2 Objetivo general

Determinar el impacto que ha provocado la canalización del Arroyo Alamar en la calidad del agua de su acuífero subyacente.

CAPÍTULO II. ANTECEDENTES

2.1 Agua subterránea

Un acuífero es una formación geológica subterránea que se ha creado a lo largo de varios años como resultado de la infiltración del agua de lluvia o del agua de los ríos, lagos y deshielos. A la infiltración que ocurre en los acuíferos se le conoce como recarga y esta puede ser natural, inducida, incidental o artificial; el agua existente en estos se conoce como agua subterránea y representa el 96% del agua dulce no congelada del planeta. Esta fuente resulta importante como abastecimiento para arroyos, manantiales y humedales, así como un recurso fundamental para satisfacer las demandas de agua de muchas sociedades en el mundo, y su extracción se realiza normalmente a través de pozos y/o manantiales. (PNUMA, 2002)

2.1.2 Importancia

El agua subterránea es a nivel mundial la principal fuente hídrica para 2,000 millones de personas que habitan en regiones áridas o semiáridas quienes en su conjunto consumen 20% del agua total del planeta –entre 600 y 700 km³ al año- y de ella depende la tercera parte de la población mundial (PNUMA, 2002).

Las necesidades de agua varían de usuario a usuario, ya que este determina la cantidad de agua utilizada, estas necesidades se clasifican en dos tipos de uso de agua, los usos consuntivos, que son aquellos en los cuales por las características del proceso existen pérdidas volumétricas de agua (doméstico, público urbano, agrícola, industrial, pecuario, servicios y ambiental); y también se encuentran los usos no consuntivos, en los cuales no existe pérdida

de agua en el proceso (energía eléctrica, acuacultura, actividades recreativas, navegación y transporte) (Castelan,2003).

Foster *et al.* (2010), menciona que a pesar de que este recurso natural es vital y fundamental para el bienestar del ser humano, es poco valorado, con demasiada frecuencia los recursos de agua subterránea han sido abandonados a su suerte y quienes los explotan para suministro no han tomado acciones para proteger la calidad del agua. Los acuíferos experimentan a nivel global una creciente amenaza de contaminación ocasionada por la urbanización, el desarrollo industrial, las actividades agrícolas y la explotación minera. Por lo tanto, se requieren campañas proactivas y acciones prácticas que protejan la calidad original del agua subterránea. Algunas ventajas y beneficios de la utilización de las aguas subterráneas son el fácil acceso, se encuentran disponibles cerca de las zonas de demanda, ocupan una inversión mínima y una superficie pequeña.

En México se cuenta con 653 acuíferos registrados, en el 2007 se alcanzó el 37% del total de agua consumida en el país, el número de acuíferos sobreexplotados aumento en estas últimas décadas (32 en 1975, 80 en 1985 y 102 en 2007 (15% del total de acuíferos del país), donde la mayoría de los acuíferos sobreexplotados se encuentran en las regiones hidrológicas de Baja California, Cuencas Centrales del Norte, Río Bravo y Lerma- Santiago-Pacífico. En 2007, la intensidad de uso del agua subterránea excedió de manera significativa a la recarga en algunas regiones: Península de Baja California (145%) y Aguas del Valle de México (126%). En el mismo año 17 acuíferos presentaban problemas de intrusión salina. Respecto a los usuarios del agua subterránea, en el periodo 2000-2007 el sector con el mayor volumen concesionado fue el agropecuario, seguido por el abastecimiento público y el industrial (Figura 2.1) (CNA, 2008).

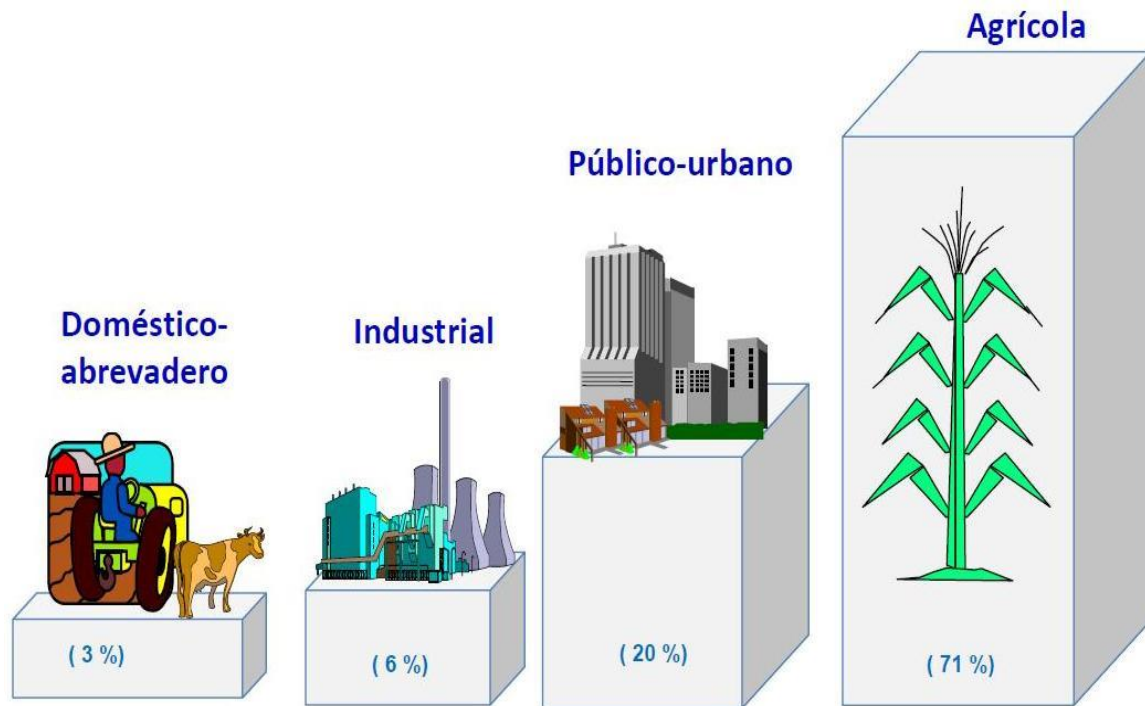


Figura 2.1 Extracción y usos de agua subterránea en México. (CNA, 2011).

La Península de Baja California cuenta con un grado de explotación de acuíferos del 75 al 100%, principalmente en la región del Valle de Mexicali el cual cuenta con un grado de 100 al 125% (CNA, 2011), lo que nos dice que en un futuro el acuífero de dicho valle que suministra a nuestra ciudad puede llegar a agotarse, es por eso la importancia que tiene la sustentabilidad y la buena gestión de estos recursos.

2.1.2 Origen de los acuíferos

Cuando la lluvia cae al suelo esta puede tomar diferentes rutas. El agua de lluvia puede correr por la superficie del suelo y desembocar en ríos, lagos, quebradas y arroyos como escurrimiento superficial, un por ciento del agua va a ser usada por las plantas y animales, otro por ciento se evapora y regresa a la atmósfera según sean las condiciones climáticas

(temperatura, vientos, humedad atmosférica) y el resto se va a infiltrar en el suelo. Esta última ocurre cuando la cantidad de lluvia es mayor que la que se evapora y el material del suelo es permeable, es decir contiene espacios conectados entre sí que permiten el flujo de agua a través de este. Esta agua que se acumula en las capas de la tierra, arena y rocas es conocido como acuífero, la velocidad con la que esta se mueve generalmente es lenta comparada con el agua superficial, puede llegar de hasta unos pocos metros por día o hasta metros por año, ésta depende del tamaño de los espacios en las capas (poros) y de la forma en que estos estén conectados entre sí (permeabilidad), a la relación entre estos espacios vacíos y el material solido que forma la roca se le conoce como porosidad (Figura 2.2). Un ejemplo de esto es la velocidad del agua a través de la arena la cual es mucho mayor que la que se observa a través de la arcilla.

Típicamente los acuíferos están conformados por materiales como gravilla, arena, arenilla, y piedra caliza, estos materiales tienen una alta permeabilidad ya que ofrecen poros grandes que permiten que el agua fluya con mayor rapidez.

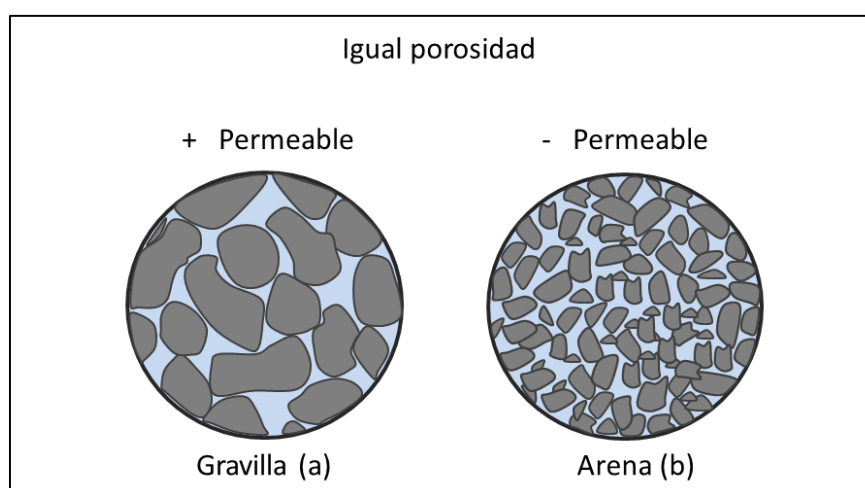


Figura 2.2 Esquema simplificado de porosidad y permeabilidad. (Elaboración propia).

Para explicar este esquema, con respecto a la porosidad, el volumen ofrecido por los poros es igual en el suelo *a* (gravilla) que en el *b* (arena). Los poros de *a* son más grandes pero hay menor número, mientras que en *b* los poros son más pequeños pero son más numerosos. En relación a la permeabilidad, el suelo *b* presenta una permeabilidad más baja ya que el agua fluye por él más lento al ser los poros de menor tamaño. Además, el agua se adhiere a la superficie de los granos dificultando su movilidad. En el suelo *a* la superficie ofrecida por las partículas es menor y los poros son de mayor tamaño.

La estructura de un acuífero se conforma de dos zonas (Figura 2.3), la zona insaturada y la saturada. Al área en donde el agua comienza a infiltrarse en el subsuelo se le conoce como zona insaturada o vadosa, en donde los poros entre las partículas están llenos de aire y otros de agua, en esta se encuentra principalmente el agua de tipo higroscópica (retenida en la superficie de las partículas del suelo), y se sub-divide en tres zonas: la zona de evapotranspiración (donde penetran las raíces de la planta); la zona intermedia y el área capilar, donde se encuentra el agua capilar (excedente de agua higroscópica que existe en el espacio poroso del terreno y queda retenida contra la fuerza de gravedad en un suelo que permite el drenaje libre). Al límite inferior de esta zona se le llama nivel freático o superficie freática, la cual determina el nivel de las aguas subterráneas. Si el acuífero no está confinado, también se le conoce como nivel piezométrico o superficie piezométrica. Por debajo de esta última encontramos la zona saturada, donde todos los poros entre las partículas de roca se encuentran llenos de agua, en esta se encuentra mayormente el agua gravitacional, la cual es la que se encuentra en tránsito dentro de los espacios más gruesos del suelo.

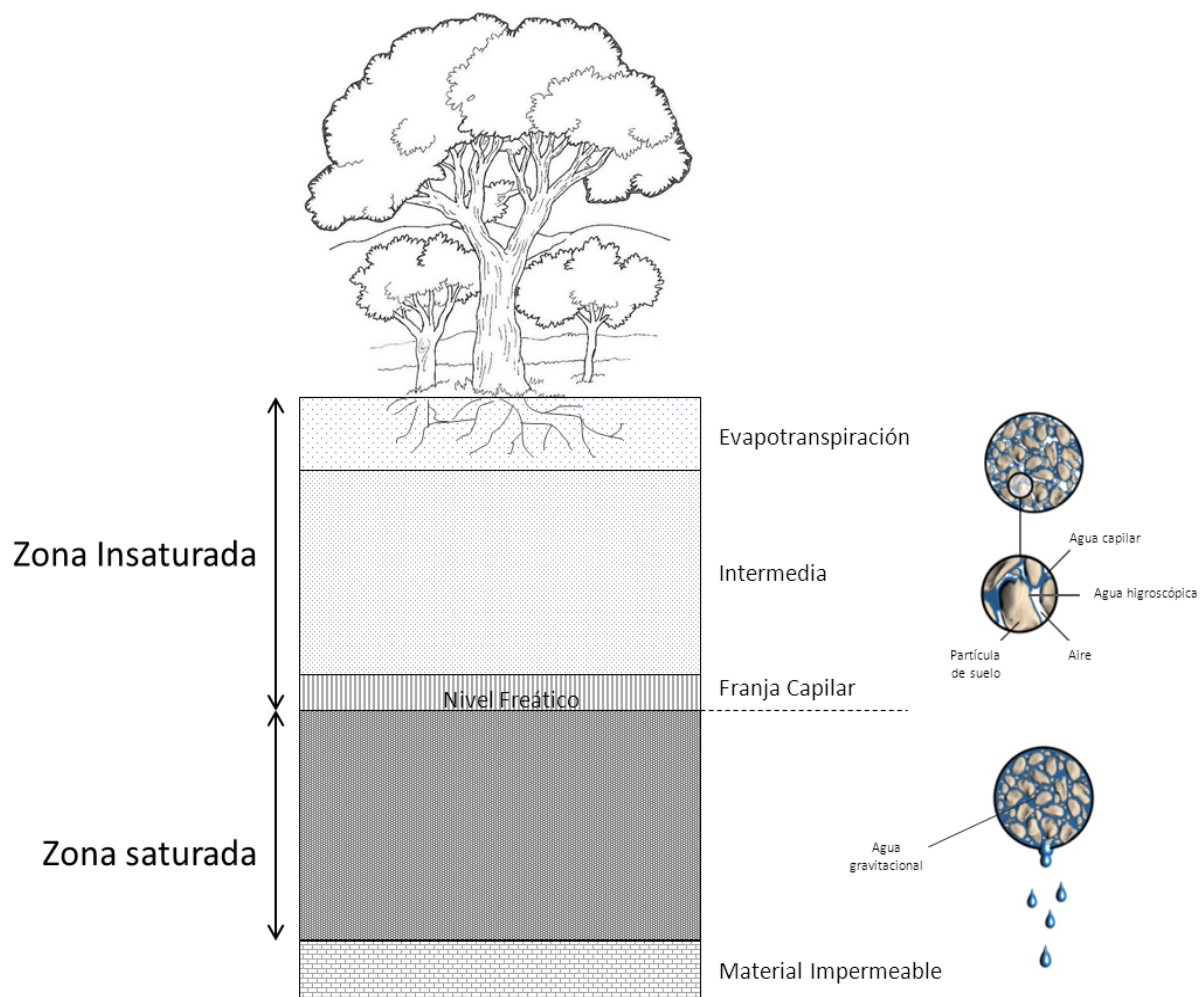


Figura 2.3 Esquema simplificado de la estructura de un acuífero. (Elaboración propia)

A la cantidad de agua infiltrada que forma el acuífero, se le conoce como recarga del acuífero, esta puede tener un origen natural como el que se mencionó anteriormente, o antropogénico (resultado de las actividades humanas), como por ejemplo las fugas del sistema de distribución de agua y drenaje sanitario.

El agua subterránea del acuífero busca salida lentamente hacia corrientes superficiales, manantiales, pozos, surgentes o el mar. Cuando la recarga del acuífero es menor que la de la descarga, ocurre un aumento en la profundidad del nivel freático, lo que significa que hay un déficit entre la recarga por extracción, por el contrario cuando la profundidad del nivel freático disminuye, se dice que la recarga es mayor que la extracción. Las dimensiones de los

acuíferos son muy variadas, van desde unos cuantos metros de espesor hasta decenas y cientos de metros, y su extensión puede llevar desde unas cuantas hectáreas hasta miles de kilómetros cuadrados.

2.2 Relación agua superficial-acuífero

Las interacciones río-acuífero son generalmente complejas y dependen de muchos factores que están directamente relacionados con la topografía, ecología, geología y factores climáticos (Winter, 1999). Con estos factores se puede determinar una amplia relación en la que el acuífero puede aportar agua a los ríos o el acuífero puede recibir agua de las corrientes que circulan por la superficie de la tierra.

En la mayoría de los casos, el agua subterránea de un acuífero puede ser el mayor sustento para ríos y cuencas durante periodos de baja precipitación, produciendo descargas persistentes y continuas al río, no solo en la cabecera del río, sino también a lo largo de todo su cauce. Si bien los flujos de agua subterránea pueden descargar en aguas superficiales, también las aguas superficiales pueden recargar una masa de agua subterránea. La importancia ecológica de los cambios de flujo de la interacción río-acuífero ha desarrollado un problema importante, ya que estos cambios pueden llegar a provocar graves consecuencias para la ecología de un río (Ellis *et al.*, 2006).

2.2.1 Tipos de río

En los acuíferos libres se encuentra una conexión hidráulica con los cursos de las aguas superficiales, cuando se lleva a cabo un flujo de agua desde el acuífero hacia el río, se está hablando de un río efluente, también conocido como río ganador (Figura 2.4a). Como se mencionó anteriormente, en muchos de estos casos, los acuíferos libres constituyen la principal fuente de aporte a dichos ríos. Un ejemplo es cuando se producen bombeos de pozos

cercanos al cauce de un río, la profundidad del nivel freático tendera a aumentar produciendo un impacto relevante en el río, en donde ahora el sentido del gradiente hidráulico se invertirá, lo cual significa que ahora el río pasaría a ser un río influente o perdedor, lo que significa que el río se encuentra aportando agua al acuífero (Figura 2.4b). Si se llega a una sobreexplotación del acuífero en cuestión, la profundidad del nivel freático aumenta a un nivel donde se pierde la conexión entre el río y acuífero, en este punto el río puede llegar a colgarse, a esta situación se le denomina efecto ducha (Figura 2.4c).

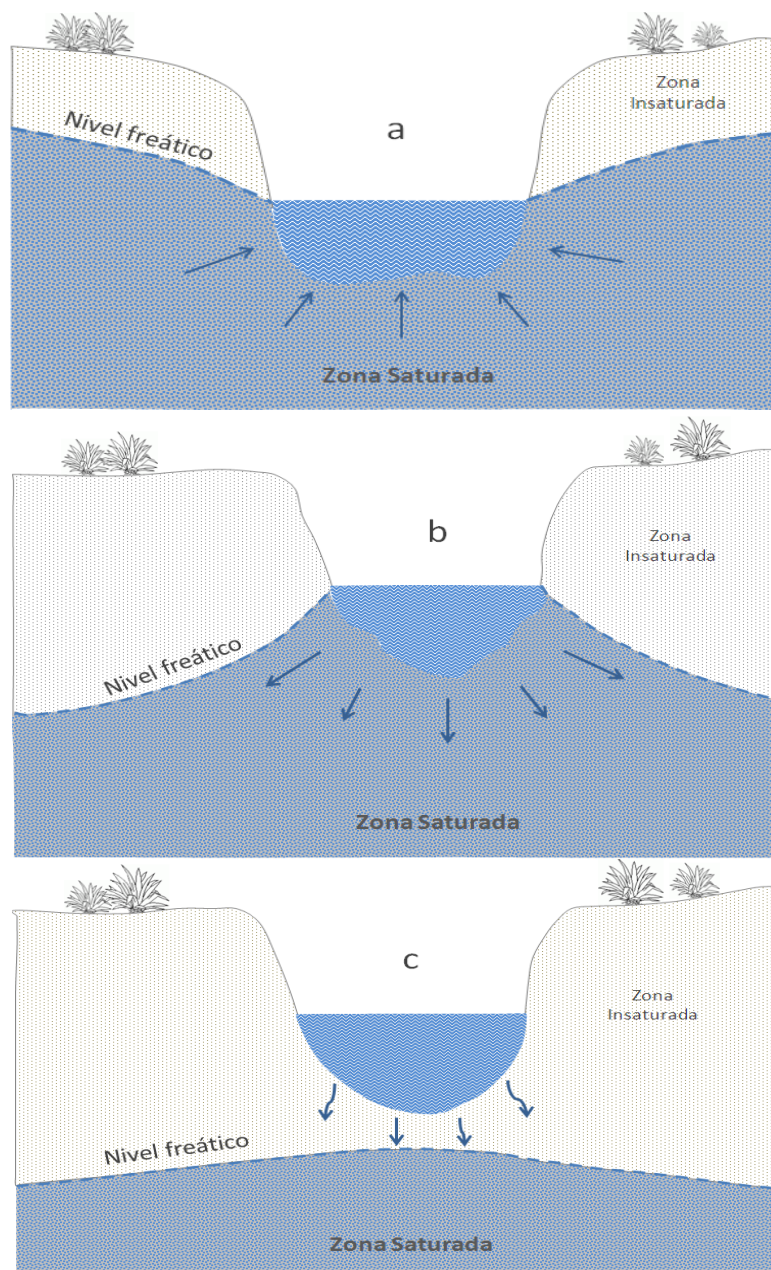


Figura 2.4 Tipos de río. a) río efluente o ganador, b) río influente o perdedor y c) río desconectado o efecto ducha. (Elaboración propia)

2.2.2 Tipos de acuífero

Los acuíferos se pueden clasificar en libres y confinados: los acuíferos *libres* son aquellos en los que el nivel superior de saturación se encuentra a presión atmosférica. Como se había mencionado anteriormente a la superficie piezométrica de un acuífero libre también se le denomina superficie freática. Es por esto que los acuíferos libres también son llamados “acuíferos freáticos”. Por lo tanto esta superficie es la que delimita al acuífero libre de la zona vadosa. Estos acuíferos están conformados principalmente por materiales granulares gruesos como gravas y arenas gruesas (Molinero, 2005). El agua de este acuífero presenta dos direcciones de movimiento, la primera es el movimiento vertical que hace referencia a los cambios de nivel freático efecto de las recargas (precipitaciones, riego, infiltración de cuerpos superficiales de agua y percolación lateral), descargas (evapotranspiración, percolación lateral, descargas en superficie y extracciones por acción del hombre), cambios en la presión atmosférica y temperatura. El movimiento horizontal, hace referencia al movimiento del agua en el medio poroso, de un gradiente mayor a uno menor.

Los acuíferos *confinados* conciernen a formaciones geológicas permeables, completamente saturadas de agua confinadas entre dos capas o estratos impermeables ya sean acuífugos (rocas con porosidad nula, incapaces de almacenar y transmitir agua) o acuicludos (estratos o formaciones porosas pero impermeables que pueden almacenar agua pero no transmitirla). El término de acuífero *semiconfinado* corresponde a situaciones muy similares al confinado, pero con la particularidad de que el estrato confinante refiere a un acuitado (estrato semipermeable que transmite el agua muy lentamente), entonces, los acuíferos semiconfinados pueden recibir una cierta recarga, llamada goteo, a través de la capa semipermeable que los confina. Por ejemplo como se ilustra en la Figura 2.5, si la capa

confinante que se encuentra en el techo del acuífero inferior fuese acuitardo, entonces dicho acuífero sería semiconfinado. (Molinero, 2005)

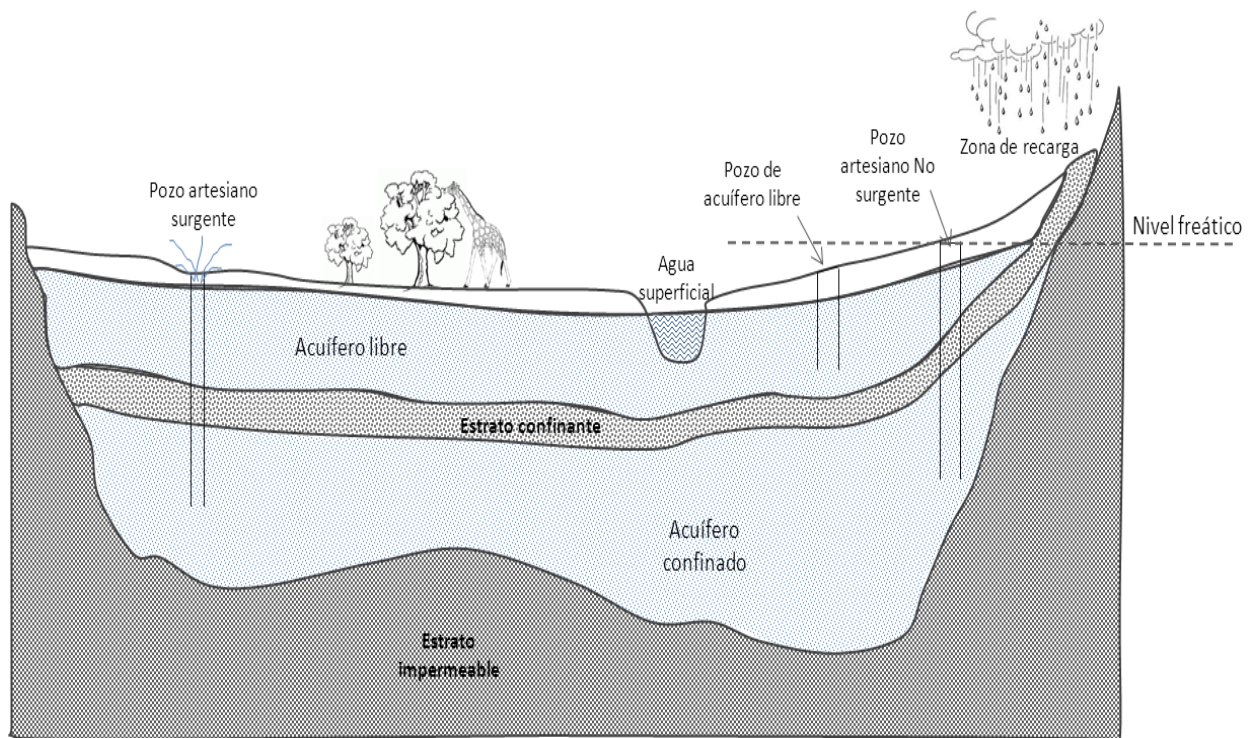


Figura 2.5 Tipos de acuífero según su funcionamiento hidráulico. (Elaboración propia)

2.3 Deterioro del recurso

2.3.1 Por sobreexplotación del acuífero

Un buen uso de las aguas subterráneas exige tener en cuenta que en los lugares en que las precipitaciones son escasas, los acuíferos se van cargando de agua muy lentamente y si se consumen a un ritmo excesivamente rápido, se agotan. Cuando se produce explotación intensiva, sequía u otras causas que van disminuyendo el nivel del agua contenida en el acuífero se derivan problemas ecológicos.

Si los acuíferos no se administran adecuadamente, es decir, si no hay equilibrio en la entrada y extracción del agua pluvial, entonces bajan los niveles de agua y el acuífero se

agota. Cuando esto sucede, el agua salina con frecuencia se infiltra, especialmente en los acuíferos situados cerca del océano. En estos casos, ni las acciones costosas como la inyección de agua dulce pueden restaurar un acuífero a su funcionamiento total. No se puede permitir que los acuíferos desaparezcan (Michel y Graizbord, 2002).

2.3.2 Por contaminación del acuífero

La disponibilidad no es el único problema relacionado con el agua en esta región, la contaminación es otro aspecto importante, ya que agrava el problema de escasez, las aguas de un acuífero pueden contaminarse por actividades humanas que descargan accidental o intencionalmente sus efluentes a un acuífero, algunos ejemplos de estas son las descargas sin tratamiento de aguas municipales e industriales, lixiviados provenientes de tiraderos de basura no controlados, ganadería, actividad agrícola, entre otros, lo que además de perjudicar el ecosistema natural y su biodiversidad, disminuye e impide el uso para el consumo humano.

Foster *et al.* (2010) menciona que puede llevar muchos años antes de que se manifieste un impacto de contaminación por algún compuesto persistente sobre el agua subterránea extraída de pozos profundos, lo cual puede no ser tan crítico para las personas que explotan el acuífero, sin embargo cuando la contaminación del agua subterránea extraída se presenta obvia, generalmente es porque ya han sido afectados grandes volúmenes del acuífero, en este punto las técnicas para la limpieza son complicadas lo que presenta un alto costo económico para su restauración.

2.3.2.1 Tipos de contaminación

Los procesos de contaminación en las aguas subterráneas se distinguen en dos tipos, ambos son esquematizados en la Figura 2.6:

- Fuentes de contaminación puntual: son aquellas que generan una pluma de contaminación claramente definida y concentrada, las cuales facilitan claramente su identificación, afectando zonas muy localizadas y volúmenes reducidos del acuífero extendiéndose en una superficie pequeña, aunque se presenta con elevadas concentraciones se disminuye rápidamente por dilución, si se elimina la fuente de contaminación.

Algunas actividades que provocan esta contaminación son:

- lixiviados de rellenos sanitarios y sitios de confinamiento,
- derrames de estanques de almacenamiento de líquidos y gasolineras con fugas,
- infiltración de residuos industriales,
- derrames accidentales.

- Fuentes de contaminación difusa: son aquellas que no generan una pluma de contaminación claramente definida, por lo que estas afectan volúmenes significativos del acuífero y en general presentan concentraciones relativamente bajas de los contaminantes, pero es más difícil su corrección que la puntual.

Algunas actividades que provocan esta contaminación son:

- uso excesivo de fertilizantes y pesticidas en la agricultura, la ganadería,
- sectores sin cobertura de alcantarillado.

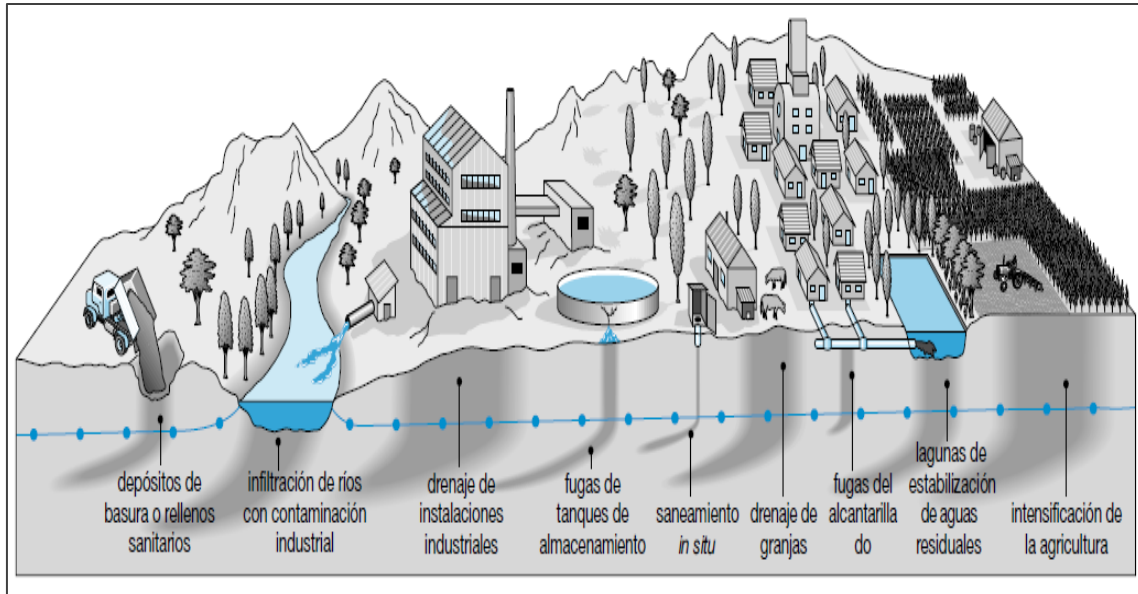


Figura 2.6 Usos de suelo que normalmente generan amenazas de contaminación en las aguas subterráneas. (Foster *et al.* 2010)

2.4 Canalización de arroyos

El propósito de canalizar un río es aumentar la capacidad del canal y la velocidad de flujo para que el agua se mueva de manera más eficiente aguas abajo y de ese modo reduce la inundación. (Michel, 2001)

Ríos y arroyos son ecosistemas muy importantes desde el punto de vista del desarrollo humano, ya que son la principal fuente de agua dulce en todo el mundo.

2.4.1 Objetivos de la canalización de arroyos

La canalización de arroyos consiste en la restauración de una cuenca donde es revestida con concreto hidráulico, algunos de los objetivos son (IMPLAN, 2009):

- Disminuir los riesgos de inundación a las poblaciones a las márgenes del arroyo,
- Controlar los asentamientos irregulares en zona federal,
- Crear condiciones necesarias para la utilización del cauce,
- Eliminar y/o prevenir el deterioro que presenta el arroyo por contaminación ambiental como asentamientos humanos irregulares, depósitos de basura, escombros, agua encharcada durante la temporada de lluvia,
- Disminuir y/o eliminar los escurrimientos de aguas residuales,
- Proporcionar infraestructura adecuada a la ciudad.

2.4.2 Desventajas de la canalización de arroyos

Aunque la canalización de los ríos debe controlar las crecidas, a menudo puede causar inundaciones porque se ha eliminado la planicie aluvial. Otros impactos de la canalización incluyen:

- La destrucción en el hábitat de la vida silvestre y diversidad de especies,
- Nula capacidad de recarga de aguas subterráneas,
- Una reducción en fuentes del agua potable tanto de la superficie como la subterránea,
- Más erosión,
- Más alta concentración y cantidad de contaminantes en el agua.

2.5 Proyecto del encauzamiento del Arroyo Alamar

El Arroyo Alamar representa el 30% de la cuenca del río Tijuana. Hace muchos años, el arroyo era un lugar limpio en el que la gente de las comunidades cercanas podía pescar y

beber agua directamente de su cauce. La presencia de la industria maquiladora y el impacto social contaminó seriamente una parte del arroyo. Todavía hace un par de años, a pesar de los asentamientos irregulares y los desechos de la maquila, la gente de las colonias Chilpancingo, Murúa y Nueva Esperanza podía disfrutar de una vasta vegetación alrededor del arroyo hasta que inició el proyecto de canalización. El Arroyo Alamar es una parte muy importante de la Cuenca del río Tijuana y es parte fundamental de la historia de las comunidades cercanas, es por eso que hay diversos grupos y organizaciones interesadas en trabajar por su preservación.

Los grupos ambientalistas expresan que Tijuana necesita el Arroyo Alamar porque:

- Representa 30% de la Cuenca del Río Tijuana
- Es un ecosistema que sostiene la vida silvestre y la vegetación nativa
- Los mantos acuíferos del Alamar son uno de los tres más importantes en Tijuana
- Es espacio abierto y recreativo valioso para las familias tijuanaenses
- Una vía fluvial natural ayuda a prevenir inundaciones en colonias cercanas
- Toda la gente tiene derecho al acceso a zonas verdes y la obligación a conservarlas

En 2007, se había aprobado el “Programa Parcial de Desarrollo Urbano del Alamar”, realizado por el IMPLAN, con un enfoque eco hidrológico el cual contemplaba la canalización y la construcción de la Vía Rápida Alamar, donde se utilizarían gaviones, diques, y pequeñas presas que dejarían al lecho del arroyo en su estado natural o rehabilitado. De esta forma se retendría el arroyo como zona de recarga acuífera y un corredor ecológico mantendría su riqueza natural de flora y fauna. La zona se convertiría en un área cuidada en donde las familias de Tijuana pudieran disfrutar de ella.

Espinoza, *et al.* (2005) propusieron un proyecto con arquitectura fluvial sustentable para el arroyo Alamar, con un enfoque eco hidrológico que respondía a varios objetivos, entre

estos se incluyen el control de las inundaciones, la protección del área de recarga acuífera, la creación de corredores ecológicos que conecten las ciudades con las áreas naturales, el mejoramiento y mantenimiento del equilibrio ecológico de un sistema tipario, la creación de un área amplia de recreación y conservación para los ciudadanos y la creación de un atractivo para la ciudad (Figura 2.7).



Figura 2.7 Imágenes de un posible jardín propuesto para la sustentabilidad del arroyo. (Espinoza *et al.* 2005)

En contraste, los canales de concreto son principalmente para tratar el problema de las inundaciones en la zona cercana a su estructura (Michel y Graizbord, 2002).

Sin embargo, a mediados del 2011 el Gobierno del Estado y la CONAGUA sin previo aviso a la comunidad dieron arranque a la canalización del Alamar pero con un proyecto

completamente diferente al inicial, pues contemplo cubrir con concreto hidráulico todo el lecho del arroyo y la construcción de una Vía Rápida por ambos lados del cauce (Figura 2.8), lo que implicó la desaparición de toda especie animal y vegetal de la zona e impidiendo la filtración de agua a los mantos acuíferos, además de dividir a la comunidad. Este proyecto modificado por el IMPLAN en 2009 tendría el objetivo de reubicar y prevenir nuevos asentamientos humanos a las riveras del arroyo que sumaban alrededor de 719 familias sin servicios de electricidad y agua potable las cuales vivan en condiciones insalubres descargando sus residuos y aguas residuales sanitarias al arroyo provocando un deterioro considerable del ecosistema, además de las condiciones de riesgo a las que se encontraban propensas estas familias, las cuales eran susceptibles a sufrir inundaciones, deslizos y encharcamientos de agua en eventos pluviales extraordinarios. Al mismo tiempo también con el propósito de establecer una infraestructura adecuada para la integración urbana de esta parte de la ciudad y promover su crecimiento urbano (IMPLAN, 2009).

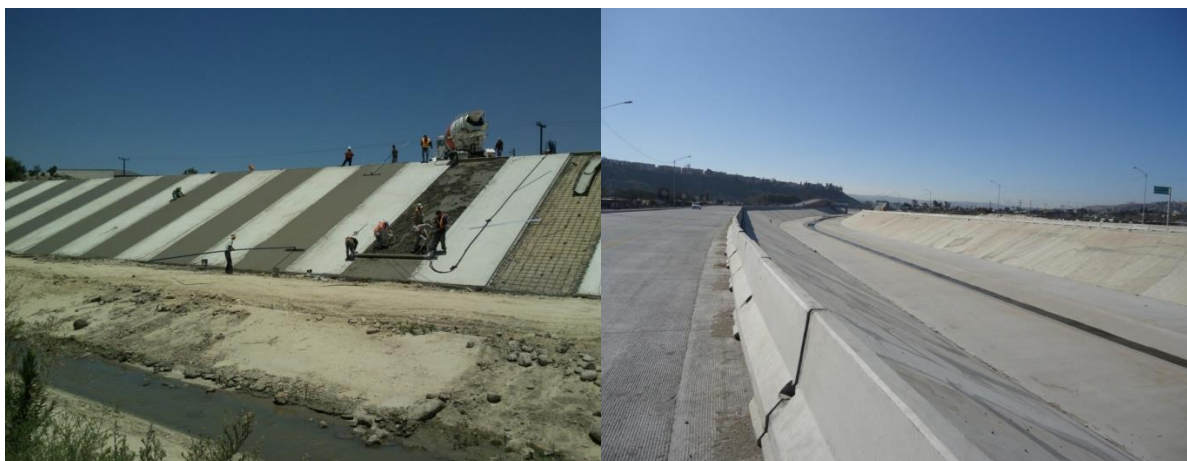


Figura 2.8 Obras de canalización en el Alamar. (Fuente propia)

2.6 Otros proyectos de canalización y encauzamiento

- En 2008, se llevó a cabo la manifestación de impacto ambiental para la canalización del Arroyo Santiago, localizado en el Municipio de Manzanillo, Colima. El arroyo se revistió con concreto hidráulico en una longitud de 3,000 metros. Este cruza por la zona urbana por lo que presenta una variada capacidad hidráulica, contaminación por depósitos de basura ocasionando la reducción de la circulación y el desbordamiento del mismo con las inundaciones provocadas por las lluvias en la zona. Entonces la realización de este proyecto se originó por la necesidad de dar solución a la problemática existente en la zona (Figura 2.9).



Figura 2.9 Avance de las obras de canalización del Arroyo Santiago (Ayuntamiento de Manzanillo, 2009)

- Otro proyecto de canalización fue sobre el Arroyo Seco en la ciudad de Durango, Durango. El cual tiene una longitud de casi 15 Km. Este proyecto tuvo su naturaleza por invasiones en la zona Federal, lo que provocaba extracción de materiales a las márgenes del arroyo para las ladrilleras, colocación de bordos clandestinos para la acumulación y uso del agua, cruces peatonales y viales en forma de vados sin infraestructura apropiada ni protecciones, lo que provoco que al presentarse precipitaciones extraordinarias originaron el desbordamiento de este causando múltiples daños (Figura 2.10).



Figura 2.10 Aspectos diversos del arroyo seco. (Plan Nacional de Desarrollo del Estado de Durango).

- En 2009, el encauzamiento del Río Barxell en Alcoy (Alicante), un proyecto con una opción sustentable, en el cual se llevó a cabo el acondicionamiento y la restauración medioambiental del río conservando el hábitat natural, este tiene como objetivo que el tramo no sufra daños de inundación, estabilizar las laderas dejando espacio para el propio encausamiento y urbanizar la zona del cauce para su uso ciudadano como un espacio de paseo, deporte, entre otros. El río fue revestido con coraza de gaviones con malla y en la parte superior una capa de tierra fértil para dar lugar a la vegetación, y en la parte inferior solera de hormigón armado perforado, permitiendo la infiltración de agua hacia el subsuelo (Figura 2.11).



Figura 2.11 Encauzamiento conservando el hábitat natural en el Río Barxell. (Alarcón, 2009).

CAPÍTULO III. ZONA DE ESTUDIO

3.1 Localización del área

El arroyo Alamar es parte de la cuenca del Río Tijuana, una cuenca compartida por los Estados Unidos de América y México. Este arroyo es formado por la confluencia del Cottonwood Creek y el río Tecate, dentro de California (USA), para luego cambiar de nombre de Arroyo Alamar en su entrada a Tijuana (Ponce, 2001). El llamado Arroyo Alamar recorre desde el puente Cañón del Padre, ubicado en la carretera cuota Tijuana-Tecate, hasta el área de la bocina de concreto que se encuentra a la altura de la central camionera (Espinoza *et al.* 2004), con una longitud de 9.8 Km, confluyendo con el Río Tijuana dentro de la zona urbana de la ciudad del mismo nombre (Figura 3.1). Río que posteriormente cruza nuevamente la frontera, desembocando en el Océano Pacífico a la altura de Imperial Beach, California.

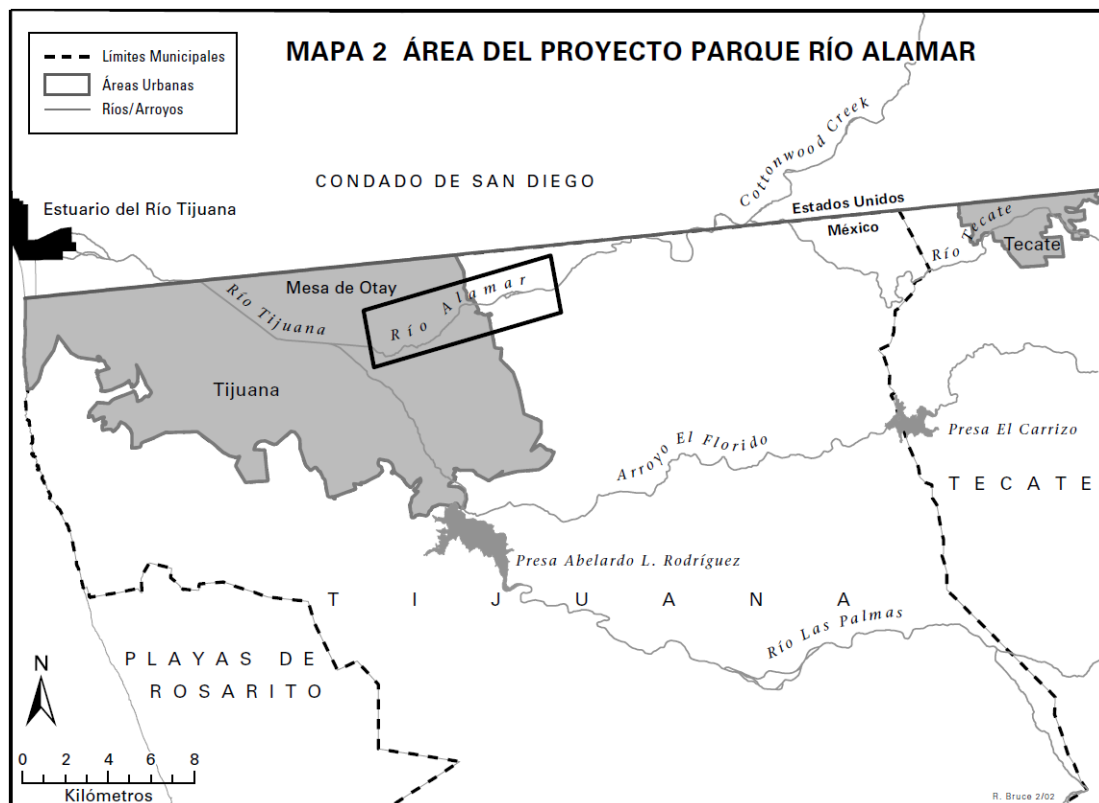


Figura 3.1 Cuenca del Arroyo Alamar (Michel y Graizbord, 2002)

Para el proyecto de canalización, el IMPLAN dividió la zona del Alamar en tres secciones:

- I) La primera que abarca de la zona conocida como la Bocina a la altura de la central camionera hasta el Blvd. Clouthier, esta se encuentra mayormente urbanizada en la margen norte, con todos los servicios públicos y terrenos dedicados a la horticultura (Figura 3.2a y 3.2b).
- II) La segunda zona se encuentra localizada del Blvd. Clouthier hasta el Blvd. Terán Terán, caracterizada por contar con un gran número de asentamientos irregulares en las márgenes del arroyo, viveros y sembradíos de hortalizas en la margen sur (Figura 3.2c y 3.2d).
- III) Por último, la tercera zona abarca desde el Blvd. Terán Terán, hasta la caseta de cobro de la carretera federal Tijuana-Tecate, caracterizada por ser una zona semirural, la cual la margen sur está dedicada a la horticultura, y en la margen norte las colonia 10 de Mayo y Granjas Familiares (Figura 3.2e y 3.2f).



Figura 3.2 Imágenes de la zona del Alamar a) Puente del Blvd. Clouthier, b) parcelas en la zona I, c) asentamientos humanos irregulares, d) vivero, e) parcelas ubicadas dentro de la zona III, f) parcelas y al norte la Col. 10 de Mayo. (Fuente propia).

3.2 Clima

El clima general de la ciudad de Tijuana es del tipo mediterráneo, templado, semiestepario el cual se caracteriza por inviernos fríos y veranos secos, con temperaturas que oscilan de 15°C la más baja y de 36°C la más alta. Su promedio anual de precipitación pluvial

es de 196.2 milímetros. En cuanto a los vientos dominantes, por lo regular provienen todo el año del suroeste al noreste (Gobierno del Estado, 2013). En verano la radiación solar eleva la temperatura al medio día por encima de los 26 °C, mientras que en invierno las masas de aire polar marítimo favorecen los días nublados que atemperan el clima de la región. La tasa de evaporación anual es alta, con una media de 161 cm por año (IMPLAN, 2002).

3.3 Uso de suelos

Las zonas de los ríos en la ciudad de Tijuana se caracterizan por la abundancia de arenas sueltas, de tamaño uniforme, y saturadas por el nivel freático, cuya presencia se localiza generalmente a cuatro o cinco metros de profundidad. Le subyacen a estas capas los materiales del basamento de la ciudad formados por conglomerados y rocas sedimentarias (IMPLAN, 2007).

El uso de suelo en la zona federal del Arroyo Alamar está caracterizado por la falta de ordenamiento. En esta existen secciones en las que el suelo representa una cobertura variada (Figura 3.3), como vegetación riparia, vegetación secundaria, vegetación agrícola y lotes baldíos. En otras secciones se realiza la extracción de pétreos, actividades pecuarias, uso de caminos no pavimentados, desarrollos habitacionales irregulares, tiraderos de basura clandestinos, entre otros (IMPLAN, 2007).

El uso de suelo en las colindancias donde se realizó el proyecto de canalización en la zona del Alamar de acuerdo a las 3 secciones en las que se divide son:

- Sección 1: Esta muestra la mayor variedad y concentración de usos habitacionales industriales, comerciales y equipamiento.

- Sección 2: Esta se caracteriza por la presencia importante de asentamientos humanos irregulares, así como también en menor número las actividades agrícolas, terrenos baldíos, comerciales, equipamiento e industrial.
- Sección 3: Finalmente esta mantiene una mayor superficie de áreas baldías y de conservación, mezcladas con otra como agrícola, área verde, comercial, habitacional, industrial, uso especial y nuevos fraccionamientos (IMPLAN, 2007).

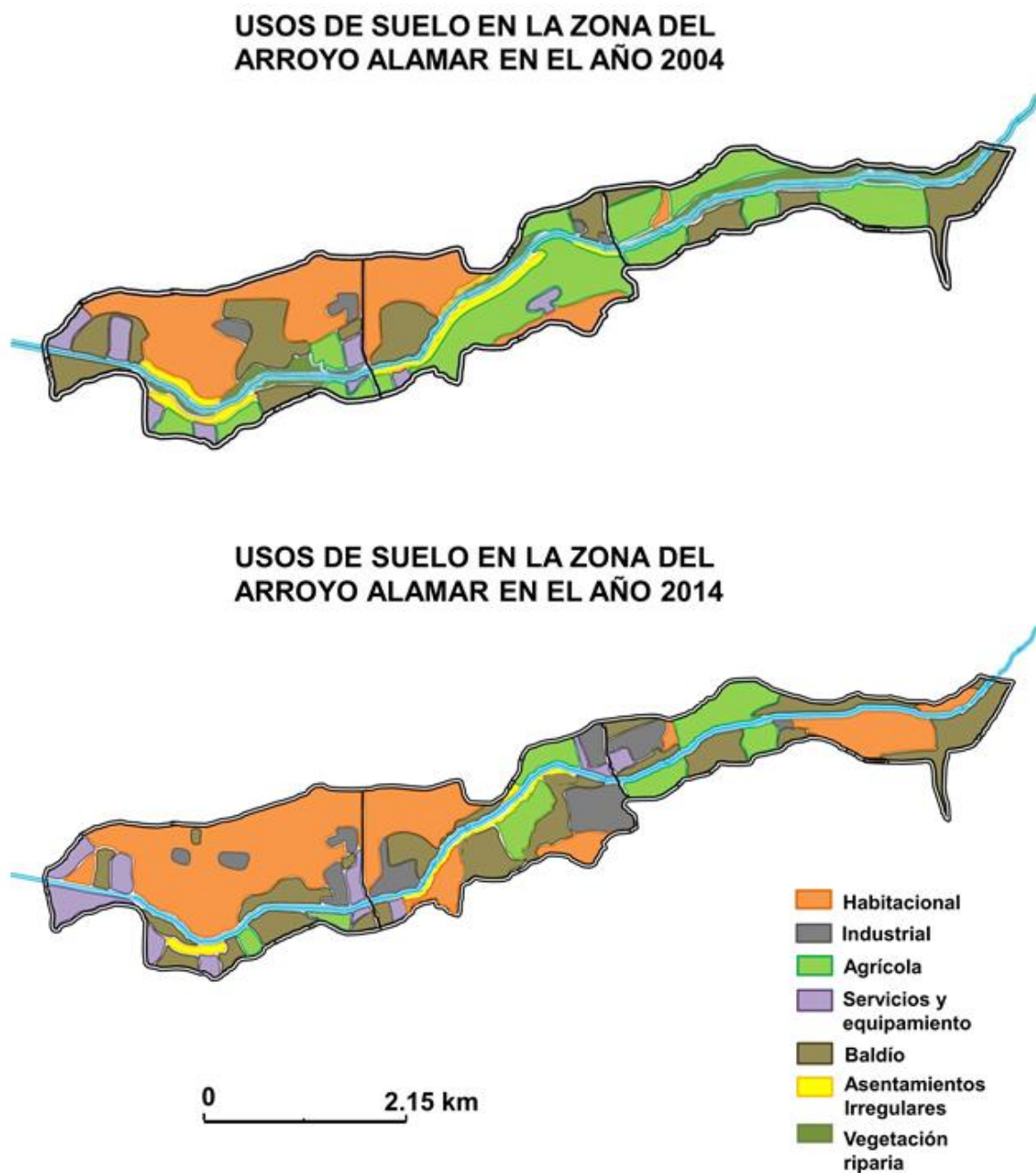


Figura 3.3 Usos de suelo en la zona del Alamar. (Elaboración Propia)

3.4 Biodiversidad

Las áreas donde existen comunidades biológicas a lo largo de arroyos y ríos han sido clasificadas como riparias. Por otra parte, biodiversidad significa la variedad de especies biológicas y sus formas de vida dentro de un ecosistema. El termino alterado, implica un evento que significativamente altera los patrones en la estructura o función de un sistema, y es referido generalmente a las actividades humanas. La canalización de ríos, representa un factor para disminuir las inundaciones, destruye los hábitats riparios, segmentando la ecología y la vegetación. (Delgadillo, 2004)

De manera particular el Arroyo Alamar presenta diferentes grados de contaminación, perturbación y conservación de sus parámetros físicos (por ejemplo: agua, suelo) y sus elementos biológicos (flora, fauna y vegetación), que deben ser analizados de manera integral, con el propósito de contar con la mayor información posible que ayude a la elaboración de un plan para su restauración y conservación como el área natural. (Delgadillo, 2004)

Por lo tanto la vegetación del Arroyo Alamar es de tipo riparia, la cual usualmente como se mencionó, se desarrolla sobre orillas de ríos, arroyos y cañadas, generalmente a manera de un estrecho corredor y proveen de hábitat a comunidades de fauna y flora. En el Arroyo Alamar comúnmente están localizadas especies de flora como: hierba del manzo, apio, carrizo, huatamote, mostacilla, crisantemo, zacate pata de gallo, hinojo, girasol, junco, marrubio, tabaquillo, aliso, álamo, higuera, berro, sauce, entre otros. (Delgadillo, 2004)

La definición de “corredor ecológico” dada al arroyo Alamar se asocia con el tránsito de especies animales, que utilizan estos lugares como sitios de descanso migratorio, o como fuente de suministro de alimento y refugio. Desafortunadamente el impacto provocado por el crecimiento de la ciudad y el incremento de asentamientos humanos y actividades en la zona, han generado, además de problemas de contaminación y disminución del ecosistema ripario, la erradicación de especies de animales silvestres que han visto amenazada o eliminada su

fuelle de alimento y sus lugares de anidación y reposo. Ésto, ha provocado que poco a poco las poblaciones de mamíferos, reptiles y aves en la zona disminuyan. (IMPLAN, 2007b)

Actualmente, hacia la parte Este de la zona de estudio en áreas cercanas al canal, todavía se pueden encontrar algunas especies de mamíferos como: pequeños ratones, ratas, topos, ardillas, liebres, coyotes , reptiles como la lagartija, con estatus de protección especial y amenazada; algunas especies de víboras y culebras muy escasas; también algunos anfibios, y en estatus de protección, algunos sapos como el Bufo boreas y B. californicus. (IMPLAN, 2007b)

Dentro del grupo de las aves, algunas especies reportadas como vistas en la zona son el Gavilán de Cooper el cual se encuentra bajo estatus de protección especial, el Vireo de Bell Californiano, que está amenazada según la NOM-059-ECOL-2001 además de otras aves de categoría migratoria procedentes de los Estados Unidos y Canadá, estas últimas han sido vistas en áreas donde el ecosistema (acuático y terrestre) mantiene todavía algunas de sus condiciones de refugio y alimentación (Mediterránea Consultores, S.C, 2006).

En 2007, el IMPLAN presento un informe donde realizarían actividades rescate y reubicación de fauna, se eligió a los grupos de organismos de reptiles y anfibios. Dicha selección se basó a su capacidad de huida, ya que sus desplazamientos son lentos y pueden ser alcanzados por la maquinaria durante la etapa de preparación y construcción del encauzamiento. Caso contrario de las aves y mamíferos, los cuales poseen una capacidad de desplazamiento mayor. La reubicación de estos grupos de fauna se localizaría al noroeste del cauce, atravesando el puente del Cañón del Padre, ya que en esta zona no se realizará ninguna obra de encauzamiento que pueda poner en peligro los organismos reubicados (IMPLAN, 2007b).

3.5 La importancia del acuífero Alamar

El Arroyo Alamar funciona como área de recarga del acuífero que subyace bajo él y del Río Tijuana. Los canales de concreto eliminan los ecosistemas riparios que funcionan como corredores ecológicos. Los ríos naturales conservan altos niveles de mantos freáticos que sostienen la abundante fauna y flora endémicas, que son especialmente valiosas en las áreas desérticas y áridas, como lo es la ciudad de Tijuana (Michel y Graizbord, 2002).

No obstante a que los escasos pozos ubicados en dicho acuífero proveen una pequeña cantidad de agua, esta es de importancia para el suministro de la ciudad de Tijuana (Michel y Graizbord, 2002). La cantidad de agua que puede suministrar el acuífero, es importante para el abastecimiento de un porcentaje significativo de la población. Este potencial representa aproximadamente un 10 por ciento del consumo actual de la ciudad, sin embargo no se recomienda el uso directo para el consumo humano sino en el riego de áreas verdes y recarga al acuífero para mantener zonas de humedad, entre otras. Las principales aplicaciones de esta agua son el uso doméstico y agrícola (CNA, 1999; Wakida, 2005).

3.6 Problemática de la zona previo al revestimiento del Arroyo.

El área recorrida por el Arroyo Alamar presenta numerosos problemas, principalmente asentamientos irregulares que favorecen la problemática de contaminación hacia éste, como las descargas no controladas de contaminantes y la deposición de basura. Este fenómeno es sin duda proporcional al fenómeno de migración que ha caracterizado a Tijuana a consecuencia de flujos de personas hacia el Norte de la República buscando mejoras económicas, convirtiéndose el Arroyo Alamar en uno de los espacios de la ciudad con mayor

susceptibilidad de asentamientos irregulares, debido a la ausencia de control y vigilancia sobre la zona federal dentro del ámbito municipal (Espinoza et al., 2004).

La actividad agrícola en el Valle del Arroyo Alamar hasta hace unos años incluía cultivos y ganadería; en la zona 1 esta se caracterizaba por ser básicamente de subsistencia, en las zonas 2 y 3 se practican la agricultura comercial y la ranchería. Lo que representaba un riesgo importante de contaminación para las aguas subterráneas, esto es de suma importancia ya que todos estos campos de cultivo son irrigados con agua proveniente del suministro local subterráneo, es decir el acuífero del Arroyo Alamar.

La actividad industrial puede generar una carga contaminante al subsuelo como resultado de la liberación de efluentes líquidos, la inadecuada disposición de residuos sólidos, conjuntamente con accidentes que involucran fugas de productos químicos peligrosos. Es importante señalar que, aunque no se encuentran dentro del área del Alamar, hay que tener en cuenta las industrias que se encuentran en la parte sur de la Mesa de Otay, ya que por la pendiente y cercanía en que se hallan con respecto al Alamar, pueden contribuir al deterioro del lugar (González, 2008). Todos estos factores constituyen las causas primarias de la pérdida del capital natural en el Arroyo Alamar.

3.7 Situación actual del Alamar.

Para el año 2013, la margen sur de la zona 1 se compone en su gran mayoría de terrenos baldos, parcelas de cultivo de hortalizas y una zona de asentamientos sin servicio. Existe sin embargo también un balneario (que ya existía en el 2004) y una empacadora de cebollín.

La zona 2 es la que ha sufrido más cambio con respecto al uso de suelo. En la margen sur, se construyó parte de un conjunto habitacional con todos los servicios, se disminuyó pero

no se eliminó los asentamientos irregulares, se aumentó el área dedicada a la siembra de hortalizas por medio de invernaderos y se construyó en su extremo este colindante con el bulevar Terán Terán varias naves industriales para la industria maquiladora.

En cuanto a la zona 3, el cambio más fuerte además de las obras de revestimiento, es la construcción de un conjunto habitacional en el extremo este de la zona denominada Riberas del Bosque (Figura 3.3). La Figura 2.8 muestra los trabajos de revestimiento del arroyo, así como un tramo terminado de la canalización.

3.8 Descripción de sitios de muestreo

- Pozo 1. Este pozo se encuentra localizado en la tercera zona de estudio, al presentarse las obras de canalización, este tuvo que ser eliminado y posteriormente la maquinaria que se encontraba laborando optó por hacer una noria provisional al margen del arroyo donde no interfiriera con las obras (Figura 3.4), con el propósito de no eliminar por completo la fuente de agua con la que cuentan algunos horticultores y familias en la propiedad.



Figura 3.4 Pozo 1, ubicado en la tercer zona de estudio, donde se observa una letrina ubicada a un par de metros de la noria. (Fuente propia)

- Pozo 2. Este es utilizado principalmente para el riego de hortalizas y uso doméstico. Con visitas de campo y pláticas con las personas residentes del lugar se obtuvo información acerca que posteriormente a las obras de canalización, la profundidad del nivel freático de este pozo había aumentado de 3 a 4 metros (figura 3.5). Por lo que los propietarios optaron por realizar modificaciones al pozo incrementando su profundidad.



Figura 3.5 Pozo 2, utilizado principalmente para el riego de hortalizas. (Fuente propia)

- Pozo 3. Este se encuentra en la segunda zona de estudio, a diferencia de los demás este se encuentra protegido de la intemperie (Figura 3.6), su uso es principalmente doméstico y para el riego de hortalizas.



Figura 3.6 Pozo 3, protegido de la intemperie. (Fuente propia)

- Pozo 4. Localizado dentro de un vivero, el agua extraída de este pozo es principalmente para el riego de plantas y flores del mismo (Figura 3.7), así como también para uso doméstico. En la última visita de campo, se obtuvo información por el dueño del lugar, que el pozo que suministraba agua para el abastecimiento del negocio, se encontraba completamente seco, posiblemente por el aumento en el nivel freático.



Figura 3.7 Pozo 4, para uso en el riego del vivero. (Fuente propia)

- Pozo 5. Este se encuentra localizado en la primera zona, el uso de éste se concentra en el riego de hortalizas, en visitas de campo y comentarios del encargado del terreno, se percató que en ocasiones existían derrames y escurrimientos de agua residual proveniente de una tubería de drenaje en la parte alta del terreno (Figura 3.8), lo que ocasionó varias inundaciones y la destrucción de los sembradíos.



Figura 3.8 Pozo 5 y Tubería de drenaje en malas condiciones. (Fuente propia)

- Pozo 6. Este pozo sólo se muestreó en una ocasión ya que en los siguientes muestreos no se pudo contactar al encargado (Figura 3.9), el agua extraída de éste, principalmente es usada para el riego de hortalizas, residentes del lugar se quejan de la salinidad que existe en dicha agua, a la vez realizaron comentarios similares a los demás sitios sobre el incremento de la profundidad del nivel freático, por lo que se tuvo que realizar una excavación adicional para alcanzar la zona saturada del acuífero. Ya que este punto solo se logró muestrear solamente una vez, se optó por tomar muestras de un pozo ubicado en la propiedad vecina, el cual suministraba agua para el riego de palmas en un vivero, este se encontraba en malas condiciones con escombros, basura, insectos y sin ningún mantenimiento regular, actualmente con información proporcionada por el original dueño del pozo, este se encuentra clausurado por la CONAGUA (Figura 3.10).



Figura 3.9 Pozo 6, modificado a noria. (Fuente propia)



Figura 3.10 Pozo 6b, el cual se encuentra actualmente clausurado por la CONAGUA. (Fuente propia)

- El primer punto de muestreo de agua superficial se encuentra debajo del puente del Cañón del Padre, al final de la tercera zona de estudio, (Figura 3.11a), en este punto la calidad de agua del arroyo no se encuentra impactada por escurrimientos no controlados de aguas residuales de asentamiento irregulares. El segundo punto se encuentra a nivel del pozo 3, en la zona 2, cerca del Bulevar Terán Terán, como se observa en la (Figura 3.11b) este se encuentra totalmente canalizado, en el canal inferior se encontraban restos de tierra, pequeñas rocas y algunas plantas acuáticas. Por último el tercer punto se encuentra enfrente las albercas El Vergel cerca de los pozos 5 y 6, este punto al igual que el segundo se encuentra totalmente canalizado, con restos de basura, tierra y rocas en el canal inferior (Figura 3.11c) , consecuencia de los trabajos de canalización.



Figura 3.11 a) Río 1, b) Río 2 y c) Río 3. (Fuente propia)

CAPÍTULO IV. MÉTODOS EXPERIMENTALES

4.1 Muestreo

Se realizaron tres muestreos de seis pozos y tres puntos de agua superficial a lo largo del cauce (Figura 4.1) que tratan de abarcar las tres zonas de la superficie del acuífero arroyo Alamar en los meses de junio, agosto y octubre del 2013 (Tabla 4.1), para poder analizar el impacto causado por las obras de canalización a la calidad del agua subterránea. La ubicación de los sitios de muestreo, así como sus características son mostradas en la Tabla 4.2. Los promedios obtenidos de los parámetros se compararon con los de un estudio realizado por Ponce en el año 2004 cuyo objetivo fue determinar la calidad del agua del acuífero del Arroyo Alamar.

Tabla 4.1 Secuencias de muestreo y análisis

Secuencia de Muestreo	Fecha de muestreo y análisis
Primer muestreo	19/06/2013
Segundo muestreo	16/08/2013
Tercer Muestreo	25/10/2013

Las muestras fueron colectadas en recipientes de polietileno y vidrio herméticos de 250, 500 y 1000 ml, dependiendo del analito analizado, las cuales se preservaron en una hielera a 4°C en el traslado al laboratorio para su posterior análisis.

Tabla 4.2 Localización de los sitios de muestreo.

Sitio	Coordenadas	Zona	Uso del agua
Pozo 1 (P1)	32°32'4.44"N 116°53'9.50"O	3	Agricultura y doméstico
Pozo 2 (P2)	32°31'52.74"N 116°53'36.85"O	3	Agricultura y doméstico
Pozo 3 (P3)	32°31'51.42"N 116°54'19.96"O	2	Agricultura y doméstico
Pozo 4 (P4)	32°30'52.66"N 116°55'19.35"O	2	Vivero de plantas y doméstico
Pozo 5 (P5)	32°30'47.98"N 116°55'40.86"O	3	Agricultura y doméstico
Pozo 6 (P6)	32°30'46.08"N 116°56'6.50"O	3	Agricultura y doméstico
Rio 1 (R1)	32°32'32.43"N 116°51'26.29"O	3	NA
Rio 2 (R2)	32°31'44.97"N 116°53'54.24"O	2	NA
Rio 3 (R3)	32°30'37.01"N 116°56'42.34"O	1	NA

NA: No Aplica.

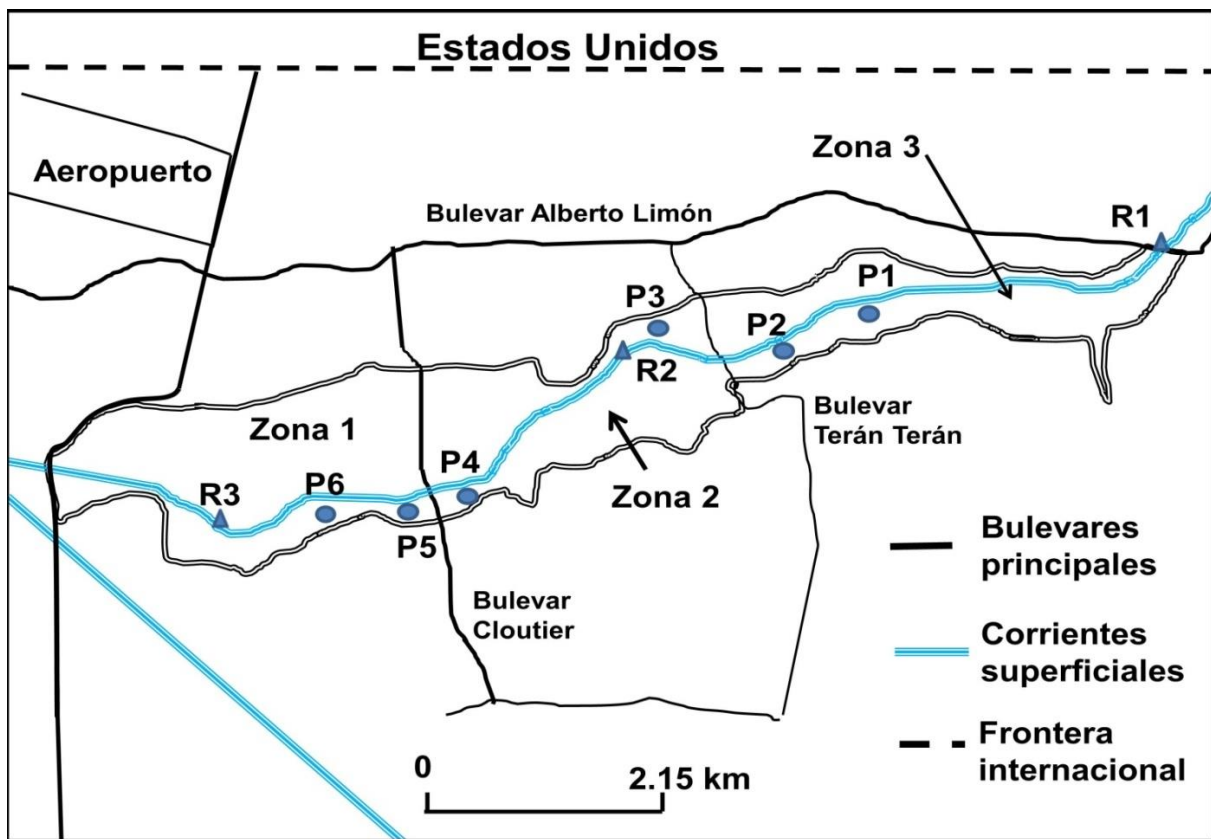


Figura 4.1 Distribución grafica de los sitios de muestreo.

3.2 Análisis de las muestras

A las muestras colectadas se les determinaron parámetros fisicoquímicos como conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales (SDT), potencial de hidrogeno (pH), grasas y aceites y sólidos suspendidos totales (SST); analizados en base a procedimientos de la Normatividad Mexicana vigente (NMX); además de parámetros como demanda química de oxígeno (DQO), nitratos ($\text{NO}_3\text{-N}$), nitritos ($\text{NO}_2\text{-N}$), nitrógeno amoniacal ($\text{NH}_3\text{-N}$), nitrógeno total (NT), fosfatos ($\text{PO}_4\text{-P}$) y cloruros (Cl^-), los cuales fueron analizados bajo la metodología HACH en forma espectrofotométrica (Tabla 4.3).

Para el análisis espectrofotométrico se utilizó un HACH DR-2500, el cual se encontraba dentro de calibración durante su uso.

Tabla 4.3. Métodos utilizados para el análisis de muestras

Parámetro	Metodología empleada
Conductividad Eléctrica	Método potenciométrico
Sólidos Disueltos Totales	Método potenciométrico
Potencial de Hidrógeno	Método potenciométrico
Grasas y Aceites	Método de extracción por Soxhlet
Sólidos Suspendidos Totales	Método gravimétrico
Demanda Química de Oxígeno	Método 8000 HACH Reacción por digestión (0 - 1500 mg/L DQO)
Nitratos	Método 8171 HACH Cadmio reductor (0.1 - 10 mg/l NO ₃ -N)
Nitritos	Método 8507 HACH Diazotización (0.002 – 0.3 mg/L NO ₂ -N)
Nitrógeno Amoniacal	Método 10031 HACH Salicilato (0 - 50 mg/L NH ₃ -N)
Nitrógeno Total	Método 10071 HACH Digestión con persulfato
Fósforo Total	Método 8190 HACH PhosVer3 con digestión en persulfato ácido (0 - 3.5 mg/L PO ₄ ³⁻)
Cloruros	Método 8113 HACH Tiocianato de mercurio (0 - 25 mg/l Cl ⁻)

CAPÍTULO V. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Los promedios de las concentraciones en muestras de pozos localizados al margen del arroyo Alamar en el 2004 (Tabla 5.1) fueron comparados con las concentraciones obtenidas de los muestreos realizados en el año 2013 (Tabla 5.2) con el propósito de observar los cambios que han surgido en la calidad del agua del acuífero del arroyo Alamar con respecto a las obras de revestimiento del mismo. Para comparar los cambios que han surgido en el agua superficial se tomarán en cuenta los resultados de R3 del año 2013 y R2 en el 2004. Para visualizar fácilmente estos cambios los resultados obtenidos fueron promediados y graficados como se muestra a continuación en las siguientes figuras:

Tabla 5.1 Rangos y promedio de concentraciones de parámetros seleccionados de aguas subterráneas y superficial. (Todos los valores en mg/l, si no es señalado), 2004.

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	R1	R2	R3	NOM
Conductividad	2860-2860	2950-2970	3340-3460	3750-4090	5860-6680	3560-3700	2620-2800	3440-3600	2110-2110	NN
	2860	2957	3400	3960	6370	3627	2727	3513	2110	
SDT	1440-1440	1480-1490	1680-1740	1880-2050	2940-3350	1780-1850	1330-1400	1730-1800	2110-2110	1000
	1440	1483	1710	1987	3190	1827	1373	1763	2110	
DQO	24-24	24-28	55-65	64-61	85-100	23-27	45-58	69-102	67-67	NN
	24	25	58	56	92	24	51	81	67	
NO ₃ -N	0.1-0.1	0.2-0.7	0.4-0.6	0.5-0.6	1-1.9	0.2-1.1	0.6-2.3	0.5-2.6	0.8-0.8	10
	0.1	0.4	0.5	0.5	1.6	0.6	1.5	1.2	0.8	
NO ₂ -N	3-3	1-4	1-3	1-4	4-10	0-2	2-7	2-10	2-2	0.05
	3	2	1.7	2.3	6.7	1	5	5.7	2	
NH ₃ -N	7.0-7	4.3-7.6	9.1-13.8	2.7-7	0.7-5.1	1.5-5.2	1.4-7.5	0.6-6	1.0-1	0.5
	7	5.8	11.3	4.1	2.3	2.7	4.7	2.6	1	
NT	30-30	5.0-68	10.0-76	5.0-34	2.0-36	0-38	6.0-26	4.0-32	5.0-5	NN
	30	44	41	18	24	15	15	15	5	
PO ₄ -P	14.1-14.1	7-8.5	10.3-15	4.1-5.2	0.6-0.8	1.05-3.4	13.9-14.4	3.8-17.3	3.5-3.5	NN
	14.1	7.5	12	4.6	0.7	1.9	14.1	10.8	3.5	
Cl ⁻	120-120	144-167	166-194	186-251	374-399	197-263	156-158	227-249	269-269	250
	120	157	178	228	389	224	157	236	269	

Tabla 5.2 Rangos y promedio de concentraciones de parámetros seleccionados de aguas subterráneas y superficial. (Todos los valores en mg/l, si no es señalado), 2013.

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	R1	R2	R3	NOM
Conductividad	3190-3800	3150-4610	7200-7530	6700-7450	6640-6850	4290-4420	2440-10830	3140-8890	3260-10260	NN
	3530	3473	7370	7103	6723	4355	5247	5117	5660	
SDT	2120-2530	2070-3080	4770-4990	4520-4940	4420-4560	2900-2950	1650-7230	2090-5900	2160-6860	1000
	2323	2487	4883	4743	4477	2925	3510	3397	3777	
pH	7.39-7.71	7.34-7.54	6.86-7.03	6.81-7.01	6.76-6.94	6.99-8.05	8.39-8.68	8.03-8.31	8.52-8.8	6.5-8.5
	7.52	7.41	6.93	6.89	6.87	7.52	8.49	8.18	8.68	
DQO	69-413	78-165	215-377	228-470	250-490	130-250	65-154	157-350	138-208	NN
	212	125	275	349	341	190	120	228	180	
NO ₃ -N	0.3-0.6	0.3-0.9	0.5-7.7	1.8-3.3	1.1-1.7	0.5-1	0.2-0.5	0.2-0.6	0.2-1.9	10
	0.4	0.6	3.0	2.4	1.5	0.8	0.3	0.4	1.1	
NO ₂ -N	0-0.08	0.06-0.08	0.04-1.32	0.03-0.38	0.07-0.14	0.19-0.25	0.01-0.04	0.03-0.46	0.12-0.59	0.05
	0.04	0.07	0.47	0.15	0.11	0.22	0.02	0.17	0.31	
NH ₃ -N	1.2-1.8	0.1-0.5	0-0.4	0-0.4	0.2-0.7	0.4-4.1	0.1-0.5	1.2-3	0.7-2.5	0.5
	1.5	0.3	0.4	0.2	0.4	2.3	0.3	2.4	1.5	
NT	0.5-5.7	3.1-11.2	15.6-17.6	18.6-22.6	20.6-24.3	4.5-11.6	0.8-2.8	4.1-6.8	2.4-5.9	NN
	2.8	6.8	16.4	21.1	22.2	8.1	1.6	5.8	4.5	
PO ₄ -P	5.7-7.7	4.1-4.9	0.3-1.1	1.1-3.5	0.3-0.7	0.9-2.4	9.4-14.3	4.8-11	4.5-7.3	NN
	6.5	4.5	0.7	1.9	0.5	1.6	11.7	7.9	5.8	
Cl ⁻	403-719	363-1273	1555-2773	1342-1695	869-2344	709-735	269-355	456-534	414-490	250
	559	670	2063	1535	1390	722	310	486	440	
SST	***	***	***	***	***	***	8-115	27-410	141-312	NN
	***	***	***	***	***	***	45	243	246	
G y A	***	***	***	***	***	***	5.8-14.1	7.6-14	6-11.2	NN
	***	***	***	***	***	***	8.7	10.0	9.6	

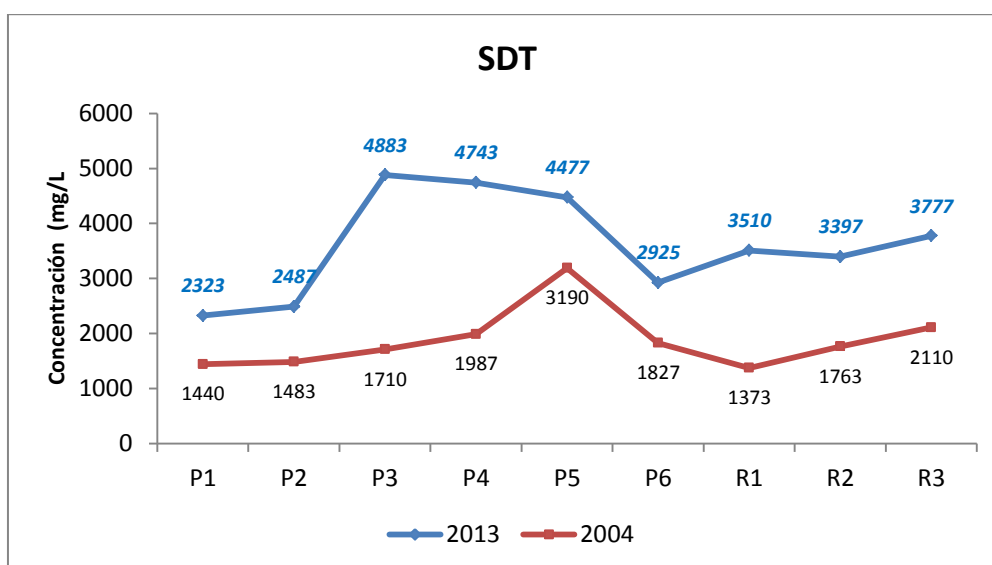


Figura 5.1 Concentraciones de solidos disueltos totales (SDT) en agua con respecto a sitios de muestreo antes y después de la canalización.

Las concentraciones de SDT como se muestran en la Figura 5.1 evidencian un elevado incremento después del revestimiento del arroyo principalmente en el pozo 3 (4883 mg/L) y en el pozo 4 (2743 mg/L) con respecto a las concentraciones en 2004, donde se observan concentraciones en los mismos pozos de 1710 y 1987 mg/L, respectivamente. El pozo 3 y 4 son los más alejados del arroyo. En esto puntos es muy común el uso de estiércol y composta que generan una lixiviación por agua de lluvia y riego, infiltrándose en el suelo hasta llegar al acuífero.

La concentración observada en el arroyo en 2004 fue de 1763 mg/L, mientras que en 2013 el promedio de este parámetro fue de 3777 mg/L, lo que indica un aumento del más del doble (114%) de los sólidos disueltos en el arroyo. Esto puede ser explicado por los trabajos del ayuntamiento, utilización de maquinaria y rampas de tierra provisionales provocando una disolución de solidos que estaban siendo arrastrados por el cauce del arroyo. Todos estos resultados se encuentran por encima de límite máximo permisible (LMP) marcado por la norma oficial mexicana para agua potable (NOM-127-SSA1-1994) (1,000 mg/L).

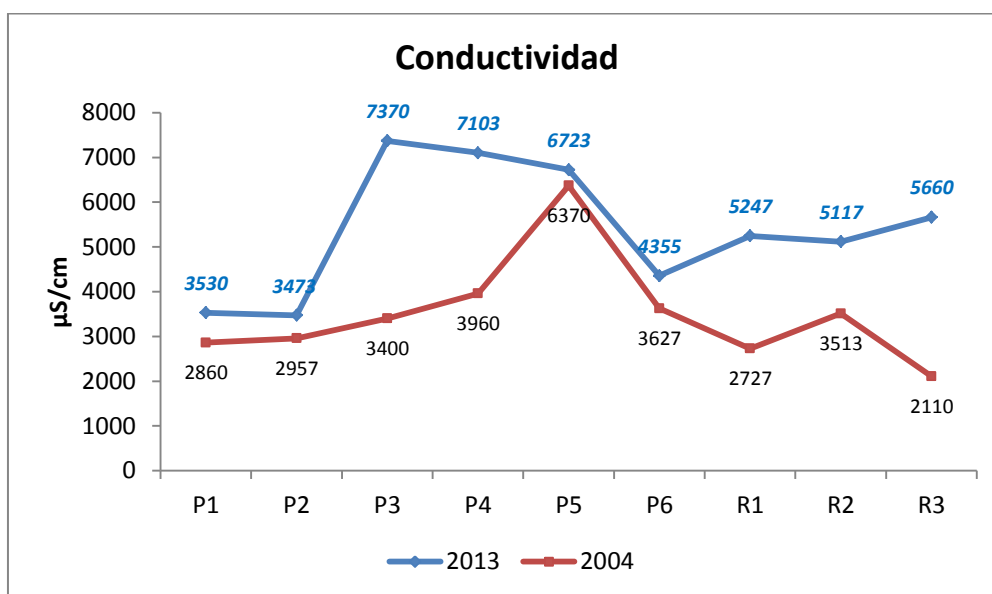


Figura 5.2 Conductividad Eléctrica en agua con respecto a sitios de muestreo antes y después de la canalización.

De la misma manera se obtuvieron lecturas elevadas de la conductividad eléctrica en el agua en los mismos pozos (P3 y P4) en el 2013 con resultados promedio de 7370 y 7103 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y con respecto a 3400 y 3960 $\mu\text{S}/\text{cm}$, en 2004 como se puede apreciar en la Figura 5.2.

En el arroyo se obtuvieron lecturas de 3513 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el 2004 y de 5660 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el 2013, lo cual fue de esperarse debido a que la conductividad eléctrica en muestras de agua esta relacionadas con la concentración de SDT.

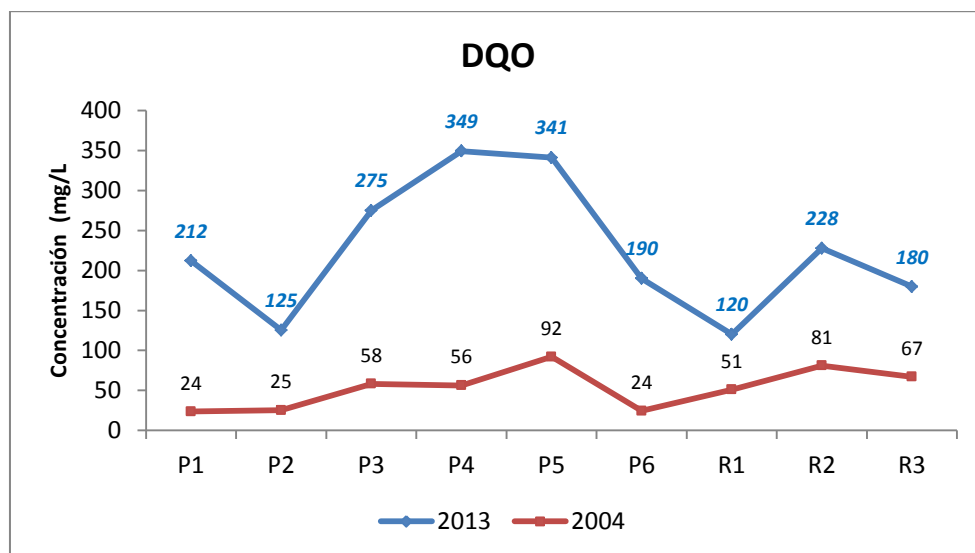


Figura 5.3 Concentraciones de Demanda Química de oxígeno (DQO) en agua con respecto a sitios de muestreo antes y después de la canalización.

En cuanto a las concentraciones de la DQO, en el análisis del 2013 como puede observarse en la Figura 5.3, 125 a 349 mg/L fue el intervalo de concentraciones, los cuales sobrepasaron considerablemente a los resultados obtenidos hace una década cuando el arroyo no se encontraba canalizado con un intervalo de 24 a 92 mg/L. El comportamiento de la concentración de este parámetro en el arroyo se incrementó de 81 mg/L en 2004 hasta 180 mg/L en 2013, teniendo también un incremento de más del doble (123%).

Las actividades que se practican a los alrededores de los puntos de muestreo mayormente está relacionada con el riego de plantas, principalmente sembradíos, donde es común el uso de abono como estiércol, lo que puede consistir en una alimentación continua de materia orgánica a través de la infiltración hacia el suelo por medio del agua de riego.

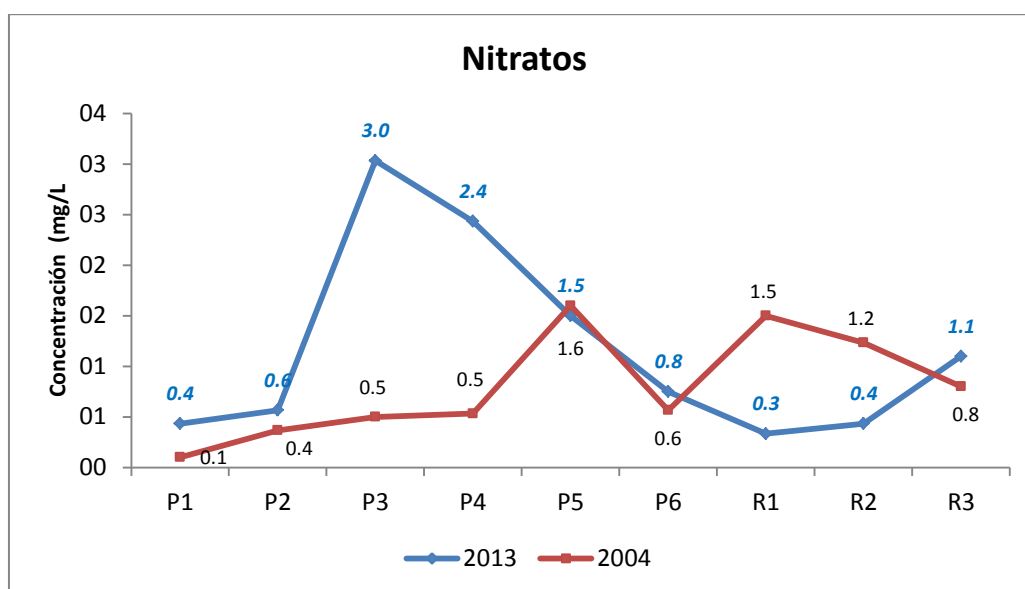


Figura 5.4 Concentraciones de nitratos ($\text{NO}_3\text{-N}$) en agua con respecto a sitios de muestreo antes y después de la canalización.

En las concentraciones de $\text{NO}_3\text{-N}$ en los pozos no se presentaron cambios considerables que rebasaran el límite máximo permisible (LMP) marcado por la norma oficial mexicana para agua potable (NOM-127-SSA1-1994) (10 mg/L), aun sin embargo si se apreció un aumento del doble obteniéndose un intervalo de resultados en el 2013 de 0.4 a 3 mg/L y en el 2004 un intervalo de 0.1 a 1.6 mg/L, el mismo caso se observó en el arroyo donde tampoco presento una gran diferencia entre ambos muestreos (2004 y 2013), con resultados de 1.2 mg/L en 2004 y 1.1 mg/L en 2013.

En niveles naturales los $\text{NO}_3\text{-N}$ no exceden los 0.1 mg/L, pero pueden aumentar por aguas residuales municipales o industriales, incluyendo lixiviados de sitios como tiraderos de basura, además en pláticas con algunos de los horticultores se percató el uso de fertilizantes inorgánicos en zonas de cultivo, principalmente en el pozo 3 como pudo observarse en la Figura 3.6, como se mencionó previamente los niveles encontrados en la zona no sobrepasan el NMP, sin embargo en este pueden observarse los niveles más altos de $\text{NO}_3\text{-N}$ los cuales pueden estar directamente relacionados con la influencia de actividades humanas como las mencionadas anteriormente.

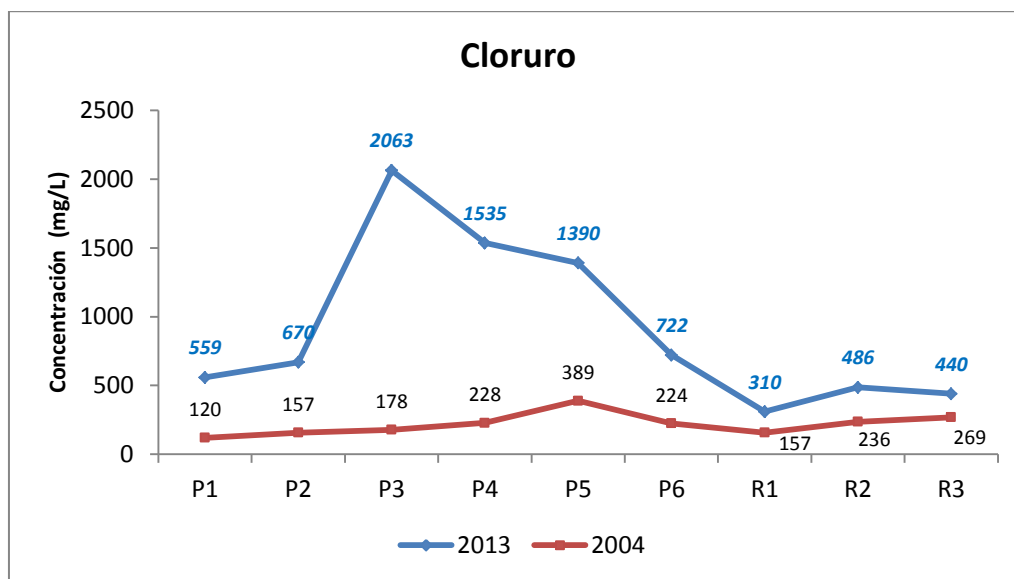


Figura 5.8 Concentraciones de cloruro (Cl^-) en agua con respecto a sitios de muestreo antes y después de la canalización.

El Cl^- es uno de los parámetros más afectado ya que existe una gran diferencia de concentraciones antes y después del revestimiento del arroyo, todos los pozos analizados en 2013 presentaron elevadas concentraciones con respecto al estudio realizado en 2004, con intervalos de 120 a 389 mg/L en el 2004 y de 559 a 2063 mg/L, en 2013. En el arroyo se observó un incremento de 236 mg/L en 2004 a 440 mg/L en 2013 (Figura 5.8).

El perfil de esta grafica muestra una similitud con los parámetros de conductividad, SDT, $\text{NO}_3\text{-N}$ y DQO, lo que hace suponer que estar estrechamente ligados a lo factores de actividades humanas antropogénicas, como el uso de abono, composta y fertilizantes inorgánicos en la siembra, así como también el empleo de letrinas y escurrimientos no controlados de agua residual provenientes de los asentamientos irregulares que carecen de drenaje, principalmente en los pozos donde estos parámetros muestran su pico máximo (P3 y P4). Este aumento de las concentraciones también podría tener su causa en la disminución de la infiltración del agua del arroyo hacia el manto freático, impidiendo de esta manera la dilución de sólidos y sales inorgánicas en el acuífero, lo cual se ve reflejado en los pozos antes mencionados, que también son los más alejados al arroyo.

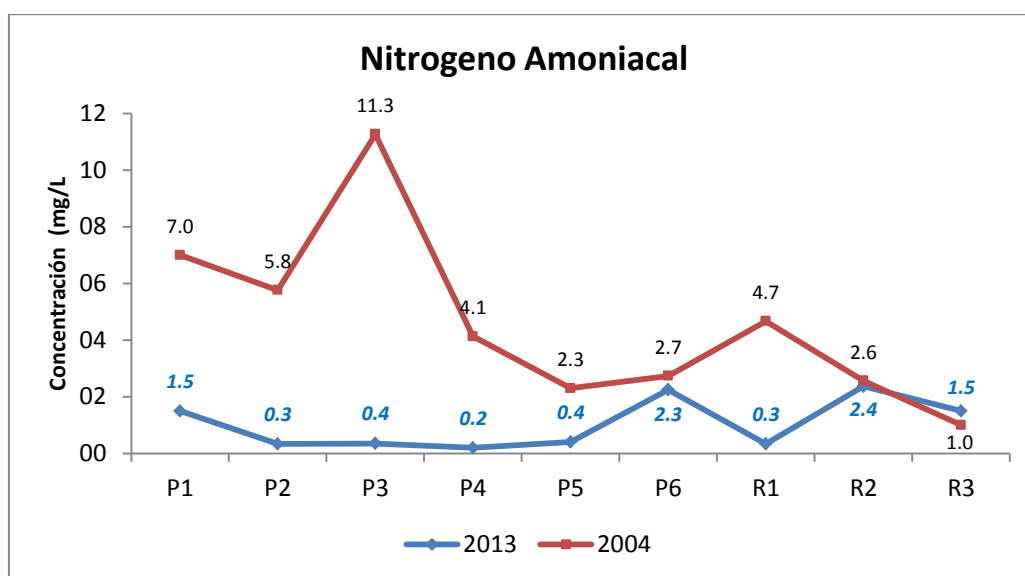


Figura 5.5 Concentraciones de Nitrógeno Amoniacal ($\text{NH}_3\text{-N}$) en agua con respecto a sitios de muestreo antes y después de la canalización.

Contrariamente a los parámetros anteriores, en la Figura 5.5 se presentó un descenso en la concentración de $\text{NH}_3\text{-N}$ principalmente en los pozos del 1 al 5 con un intervalo de 2.3 a 11.3 mg/L en el 2004 a un intervalo de 0.2 a 1.5 mg/L en el 2013, donde la mayoría de estos (P2 al P5) cumple con el límite máximo permisible marcado por la norma oficial mexicana para agua potable (NOM-127-SSA1-1994) (0.5 mg/L). En el pozo 6 se observó un muy ligero cambio en la concentración, 2.3 mg/L en el año del 2004 y de 2.7 mg/L en 2013, esto es posiblemente a la falta de protección y mantenimiento del pozo, lo que puede tener su origen por descomposición de material orgánico, como basura que cae al pozo desde la superficie (figura 3.10).

Antes del revestimiento del arroyo se encontraban un número indeterminado de escurrimientos de agua residual y tiraderos de basura provenientes de los asentamientos humanos irregulares de la zona, los cuales desembocaban al arroyo deteriorando mucho más la calidad del agua, a su vez esta se infiltraba en el subsuelo contaminando también el agua del acuífero, con el arroyo revestido esta disminuyeron pero no en su totalidad, lo que puede tener una relación con la reducción de $\text{NH}_3\text{-N}$ en el acuífero.

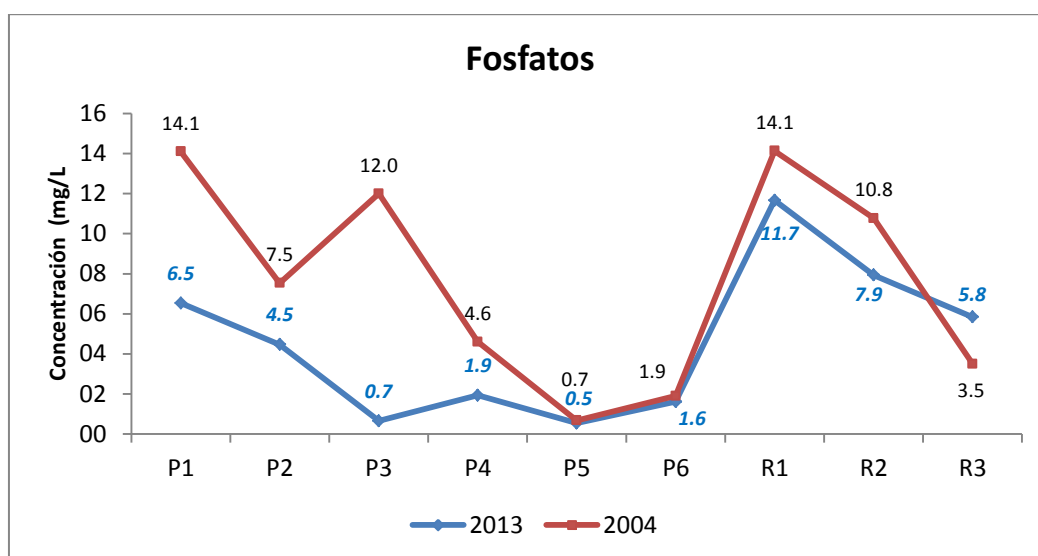


Figura 5.6 Concentraciones de fosfatos ($\text{PO}_4\text{-P}$) en agua con respecto a sitios de muestreo antes y después de la canalización.

También se logró apreciar un decremento de las concentraciones de fosfatos en los pozos, después de la canalización principalmente en los pozos del 1 al 4, obteniéndose intervalos en el 2004 de 0.7 a 14.1 mg/L y de 0.5 a 6.5 mg/L en el 2013, como se observa en la Figura 7. En relación a este parámetro también se encontró una disminución en el arroyo con lecturas de 10.8 mg/L para 2004 a 5.8 mg/L en 2013.

El fósforo es un nutriente esencial para los organismos vivientes de un cuerpo de agua, generalmente es limitante en la eutrofización de cuerpos de aguas superficiales. Posiblemente el incremento artificial de las concentraciones hace ya casi una década fue debido a actividades antropogénicas humanas como la infiltración de aguas residuales domesticas ricas en detergentes hacia el subsuelo, lo cual se muestra en la Figura 5.6 han disminuido su concentración principalmente en los pozos del 1 al 4, probablemente por la reducción de escurrimientos no controlados hacia el arroyo después de su revestimiento. Caso contrario del pozo 5 y 6, los cuales se encuentran cercanos a constantes escurrimientos de agua residual domestica proveniente de un sistema de tuberías en mal estado a la altura de la colonia El Lago, por comentarios de los horticultores se percibió que en ocasiones el terreno se inundó consecuencia del escaso mantenimiento de estas tuberías por parte del ayuntamiento.

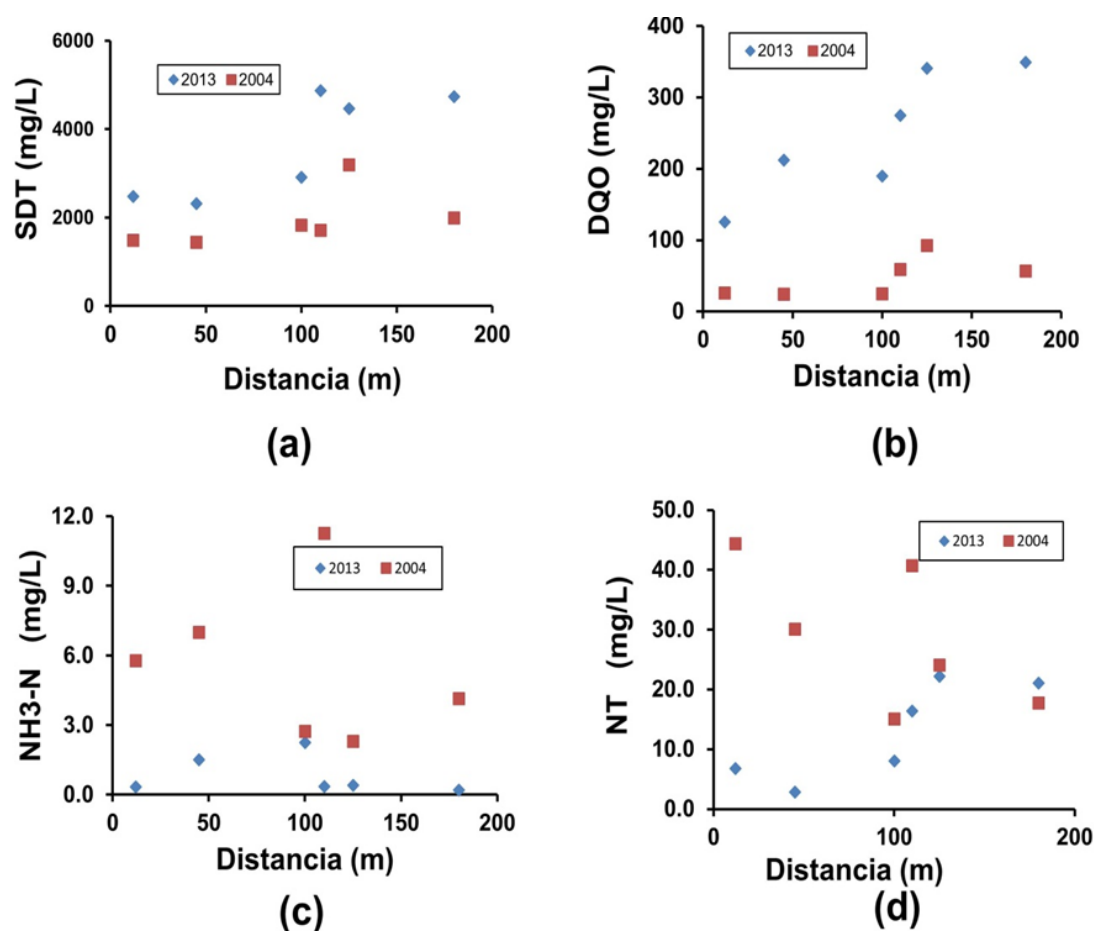


Figura 5.7 Parámetros de calidad de agua en las norias con respecto a la distancia del Arroyo Alamar (a) Sólidos disueltos totales (SDT), (b) Demanda química de oxígeno (DQO), (c) Nitrógeno amoniacal (NH₃-N) y (d) Nitrógeno total (NT).

La Figura 5.7 muestra los promedios de parámetros seleccionados del 2004 y 2013 contra las distancias al arroyo antes de la canalización. Se observa que para las concentraciones de SDT y DQO, las concentraciones promedio del 2004 fueron menores a las concentraciones encontradas en el 2013. Cabe señalar que los puntos más cercanos al arroyo (P1 y P2) que están a 12 y 45 metros del arroyo, se encuentran situados en una zona en la que el revestimiento del arroyo no ha sido concluido, por lo que posiblemente infiltraciones del arroyo hacia el acuífero estuvieran ocurriendo al momento en el que los muestreos se llevaron

a cabo. Es por eso que posiblemente en estos pozos siga existiendo el fenómeno de dilución debido a que estos su concentración de SDT sean casi la mitad de los pozos que están localizados más al oeste, zona en la que el revestimiento lleva más de un año. Las concentraciones de DQO tienen un comportamiento de alta correlación con la concentraciones de SDT ($r^2 = 0.77$) para el 2013 por lo nos indica que un porcentaje de los sólidos disueltos pueden ser oxidables. Todo lo contrario ocurre en las concentraciones de $\text{NH}_3\text{-N}$ y de NT donde se muestra que la los valores del 2013 son más bajos que los observados en el 2004, cabe señalar que los datos de $\text{NH}_3\text{-N}$ no se observa ninguna tendencia en cuanto a la distancia al arroyo. En cuanto a las concentraciones de NT, como se observa en el 2004 una tendencia a disminuir con respecto a la distancia, lo cual nos indicaría la influencia de las infiltraciones del arroyo al acuífero, en el 2013 se observa una tendencia opuesta, lo cual nos podría indicar que las fuentes de nitrógeno son debido a otra fuente diferente a las infiltraciones del arroyo, en este caso a lixiviados de las parcelas de cultivo y letrinas presentes. En ambos casos de los compuestos nitrogenados se observa una disminución indicándonos que la carga de estos compuestos ha disminuido junto con las infiltraciones del arroyo.

CAPÍTULO VI. CONCLUSIÓN

Los resultados han demostrado que el revestimiento del arroyo Alamar ha tenido un impacto negativo en cuanto a la calidad de agua en su acuífero subyacente, con respecto a los sólidos disueltos cuya concentración se incrementó aproximadamente el doble, al igual que las concentraciones de DQO y cloruros que en algunos casos sobrepasan de 8 a 10 veces más, que las reportadas en 2004. Caso contrario fueron las concentraciones de nitrógeno y fósforo que disminuyeron en el mismo periodo de tiempo. Mostrando que el revestimiento del arroyo ha reducido las infiltraciones de agua contaminada al acuífero provenientes del arroyo y los asentamientos irregulares. El proyecto de la canalización del arroyo ha reducido la contaminación producido por escurrimiento de aguas residuales y letrinas de los asentamientos irregulares, sin embargo al parecer su mayor impacto será en la cantidad del recurso, que se está manifestando en el aumento de la profundidad del nivel freático. Ponce (2003) estimó en un estudio hidrológico que 95.4 L/s dejarían de infiltrarse a su acuífero adyacente si el cauce del arroyo se revistiera para su canalización como el Río Tijuana, lo que afectaría seriamente a los habitantes que cuentan con pozos de extracción de agua para su sustentabilidad. Los grupos ambientalistas están en total inconformidad con este proyecto ya que además del efecto negativo que está causando al acuífero atento con todas las especies de flora y fauna de la zona. Lo que una solución ambientalmente más amigable al problema de la zona del arroyo Alamar, habría sido la canalización del arroyo mediante el uso de gaviones que permitieran la infiltración del arroyo y obras de introducción de drenaje de las zonas aledañas para evitar que escurrimientos de aguas residuales sin tratar contaminen el arroyo.

CAPÍTULO VII. REFERENCIAS

Ayuntamiento de Manzanillo (2008). “*Canalización del Arroyo Santiago*”.

Manifestación de Impacto Ambiental.

<http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/col/estudios/2008/06CL2008HD023.pdf>

Alarcón, Jaime; Verdu, Julio (2009). “*Encauzamiento, defensa y urbanización del Río Barxell en Alcoy (Alicante)*”.

En línea: <https://www.ieca.es/Uploads/docs/Realizaciones%20julio%202009.pdf>

Castelán, C. E. (2003). “*El recurso hídrico en México: Análisis de la situación actual y perspectivas futuras*”. Centro del Tercer Mundo para el Manejo del Agua, A.C., Miguel Ángel Porrúa, The Nippon Foundation, México, D.F.

CESPT (Comisión Estatal de Servicios Públicos de Tijuana, México) (2006). “*Abasto en la ciudad de Tijuana Baja California, México*”. Marisol Vázquez medina 2006.

<http://www.congresobc.gob.mx/IELWeb/documentos/AguaenBajaCalifornia.pdf>

CNA (Comisión Nacional del Agua) (2008) “*Estadísticas del Agua en México 2008*”. México D.F.

http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/EAM_2008.pdf

Chávez, R.A. (2004). “*La explotación racional de las aguas subterráneas: comentarios sobre la situación actual*” en: *Hacia una gestión integral del agua en México: Retos y alternativas*, Tortejada, C., Guerrero, V. y R. Sandoval (coords). Serie La gestión de los recursos hídricos. Cámara de Diputados- Centro del Tercer Mundo para el Manejo del Agua, A.C.- Miguel Ángel Porrúa, México, D.F.

CNA (Comisión Nacional del Agua) (2011). “*Las ciencias de la tierra en el estudio de las aguas subterráneas*”. Simposio, México, D.F.

En línea: http://sociedadgeologica.org.mx/pdfs/12_AguaSubterraneaMexico1.pdf

CNA (Comisión Nacional del Agua) (2011). “*Inicia la canalización del arroyo Alamar, a cargo de la CONAGUA, para proteger a más de 40 mil habitantes de Tijuana*”. Comunicado de Prensa No. 158-11.Tijuana, Baja California, México.

<http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/NotaP/Comunicado%20de%20prensa%20158-11.pdf>

Delgadillo, José (2004). “*Biodiversidad en el Arroyo Alamar*”. Tijuana, Baja California. Universidad Autónoma de Baja California.

En línea: <http://groundwater.sdsu.edu/proyectoalamar/proyectoalamarvegetacion.html>

- Ellis P.; Mackay R.; Rivett M. (2006). “*Quantifying urban river–aquifer fluid exchange processes: A multi-scale problem*”. Journal of contaminant hydrology 91 (2007) 58-80. School of Geography, Earth and Environmental Sciences, University of Birmingham.
- Espinoza, A. E.; Magdaleno, Piietro; Ponce, V. M. “*Arquitectura Fluvial Sustentable en el Arroyo Alamar, Tijuana, Baja California, México*”. San Diego State University, San Diego, California (2005).
- En línea: http://ponce.sdsu.edu/alarar_arquitectura_sustentable_reporte1.html
- Foster, S.; Garduño, H.; Kemper, K.; Tuinhof, A.; Nanni, M.; Dumars, C. (2010). “*Protección de la Calidad del Agua Subterránea: definición de estrategias y establecimiento de prioridades*”. Banco Mundial programa asociado de la GWP (2002-2006).
- http://www.wds.worldbank.org/external/default/WDSCContentServer/WDSP/IB/2007/02/28/000090341_20070228154851/Rendered/PDF/301000PAPER0SPANISH0GWMATEBN0801PUBLIC1.pdf
- Gobierno del Estado de Baja California (2013).
- http://www.bajacalifornia.gob.mx/portal/nuestro_estado/municipios/tijuana/tijuana.jsp
- Gonzales, Marnie, (2008). “*Evaluación del peligro de Contaminación del acuífero del Arroyo Alamar, Tijuana, Baja California*”. Tesis de Maestría en Administración Integral del Ambiente.
- IMPLAN (Instituto Municipal de Planeación, Tijuana, B.C., México). (2007) “*Encausamiento del Arroyo Alamar y construcción de la Vía Rápida Alamar*”. Manifestación de impacto ambiental, Tijuana, Baja California, México.
- <http://subcuencaalarar.files.wordpress.com/2012/11/estudio-de-impacto-ambiental-alarar-primer0.pdf>
- IMPLAN (Instituto Municipal de Planeación) (2007b). “*Encausamiento del Arroyo Alamar y construcción de la Vía Rápida Alamar: Acciones de rescate y reubicación de la fauna*”. Tijuana, Baja California, México.
- <http://subcuencaalarar.files.wordpress.com/2012/11/acciones-de-rescate-y-reubicacion-de-fauna.pdf>
- IMPLAN (Instituto Municipal de Planeación, Tijuana, B.C., México). (2009) “*Modificación de encauzamiento del Arroyo Alamar y de la Vialidad Vía Rápida Alamar*”. Tijuana, México.
- <http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/bc/estudios/2009/02BC2009HD036.pdf>
- Leopold, L.B.; Wolman, M.G. and Miller, J.P. (1964). “*Fluvial processes in hydrology*”. San Francisco, Freeman.

Michel, S. y Graizbord, C. (2002). “Los ríos urbanos de Tecate y Tijuana: Estrategias para ciudades sustentables”. San Diego, California, Institute for Regional Studies of the Californias, San Diego State University.

En línea: http://irsc.sdsu.edu/docs/pubs/URIV_SPA.PDF

Michel, Suzanne et al. 2001. “The Alamar River corridor: An urban river park oasis in Tijuana, Baja California, México”. San Diego, California, Institute of the Regional Studies of the Californias, San Diego State University.

En línea: <http://irsc.sdsu.edu/docs/pubs/borderlink/bdrlnk2000.pdf>

Molinero, Jorge (2005). “Hidrología: tipos de acuífero”, *Maestría de las Américas en Ingeniería del Agua*, Universidad de Santiago de Compostela, Sevilla.

En línea: <http://blog.pucp.edu.pe/media/3815/20110520-Tipos%20de%20acuiferos.pdf>

PNUMA (Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente) (2002). “Perspectivas del medio ambiente GEO-3 Pasado, presente y futuro”. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, España.

En línea: <http://www.grida.no/geo/geo3/spanish/pdfs/prelims.pdf>

Ponce Serrano, Luis Enrique. (2006). “Determinación de la calidad del agua del Arroyo Alamar en la ciudad de Tijuana, Baja California”, Tesis de Licenciatura, Tijuana, México, Universidad Autónoma de Baja California.

Ponce, V. M. (2001). “Caracterización hidroecológica del Arroyo Alamar, Tijuana, Baja California, México”. Número de Proyecto: NR-02-01.

En línea: <http://alamar.sdsu.edu/alamar/alamar.html>

Ponce, V. M. (2003). “Flood Hydrology of the Binational Cottonwood Creek-Arroyo Alamar, California and Baja California. San Diego State University” En línea: http://alamar.sdsu.edu/alamar/alamar_english.html

Proyecto Ejecutivo de la Rectificación y Canalización del Arroyo Seco, en el Municipio de Durango, Durango. Manifestación de Impacto Ambiental.

<http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/dgo/estudios/2003/10DU2003HD059.pdf>

Wakida, F.T.; Ponce, L. E.; Pastrana, M. A.; Díaz, G. C. (2007). “Una fuente alternativa de agua para Tijuana, el acuífero del arroyo Alamar”. Tijuana, Baja California, México. Universidad Autónoma de Baja California.

Winter, T.C., (1999). “Relation of streams, lakes and wetlands to groundwater flow systems”. Hydrogeology Journal 7, 28–45.

En línea: <http://rd.springer.com/article/10.1007/s100400050178#page-1>