

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA**

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA

PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS QUÍMICAS



RELACIÓN ENTRE SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES Y CONTAMINANTES EN  
ESCURRIMIENTOS PLUVIALES EN TIJUANA B.C.

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

**MAESTRO EN CIENCIAS QUÍMICAS**

PRESENTA

**Sebastián Martínez Huato**

**Universidad Autónoma de Baja California**  
**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA**  
**COORDINACIÓN DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

FOLIO No. 102  
Tijuana, B. C., a 27 de mayo de 2013

**C. Sebastián Martínez Huato**  
Pasante de: **Maestro en Ciencias Químicas**  
Presente

El tema de trabajo y/o tesis para su examen profesional, en la  
Opción TESIS

Es propuesto, por los **C. Dres. Fernando Toyohiko Wakida Kusunoki y Enrique**  
**García Flores**

Quienes serán los responsables de la calidad de trabajo que usted presente,  
referido al tema **RELACIÓN ENTRE SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES Y**  
**CONTAMINANTES EN ESCURRIMIENTOS PLUVIALES EN TIJUANA, B.C.**

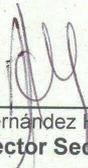
el cual deberá usted desarrollar, de acuerdo con el siguiente orden:

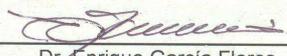
- I.- INTRODUCCIÓN
- II.- MARCO TEÓRICO
- III.- DESCRIPCIÓN DE SITIOS DE MUESTREO
- IV.- METODOLOGÍA
- V.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN
- VI.- CONCLUSIONES
- VII.- REFERENCIAS
- VIII.- ANEXOS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
DE BAJA CALIFORNIA



  
Dr. Fernando Toyohiko Wakida Kusunoki  
Director de Tesis

  
Q. Noemí Hernández Hernández  
Sub-Director Secretario

  
Dr. Enrique García Flores  
Co-Director de Tesis

  
Dr. Luis Enrique Palafox Maestre  
Director

## **AGRADECIMIENTOS**

**A Dios, le agradezco el permitirme cumplir con éste proyecto.**

**A mi esposa e hijas, por su apoyo y paciencia.**

**A la Universidad Autónoma de Baja California, que me ha brindado el espacio y los conocimientos para cumplir con éste proyecto de vida.**

**A la Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería y sus maestros, que han contribuido a mi desarrollo profesional.**

**A mi asesor de tesis, Dr. Fernando Toyohiko Wakida Kusunoki y al Dr. Enrique García Flores, a quienes agradezco el haberme guiado durante todo este tiempo para el buen cumplimiento de ésta tesis.**

**Al M.I Pastrana Corral Miguel Ángel, por enriquecer el documento de tesis y aportar sus útiles observaciones.**

**A mis padres, que los llevo siempre en mi corazón.**

**Finalmente, agradezco a todas aquellas personas que han estado cerca de mí, desde distintos espacios aportando sus palabras de aliento. Gracias por la sinceridad, el respeto y su aprecio. Gracias a todos.**

# ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCION</b>	<b>1</b>
1.1 Antecedentes	1
1.2 Justificación	4
1.3 Objetivo general	6
1.4 Objetivos específicos	6
1.5 Organización de la tesis	6
<b>2. MARCO TEÓRICO</b>	<b>7</b>
2.1 El ciclo hidrológico	7
2.2 Esgurrimientos pluviales	9
2.3 Coeficientes de escurrimiento	10
2.4 Otros parámetros importantes en el escurrimiento pluvial	13
2.5 Contaminantes en escurrimiento pluviales	15
2.5.1 Principales contaminantes en escurrimientos pluviales urbanos	15
2.5.2 Sólidos	18
2.5.3 Demanda química de oxígeno (DQO)	21
2.5.4 Nutrientes	22
2.5.5 Metales pesados	23
2.5.6 Aceites y grasas	24
2.6 Fuentes de contaminantes	24
2.6.1 Pavimento de calles	26
2.6.2 Vehículos de motor	26
2.6.3 Deposición atmosférica	26
2.6.4 Vegetación	27
2.6.7 Cubierta de suelo	27
2.6.6 Basura	27
2.6.7 Sustancias antiderrapantes y otros compuestos químicos	28

2.6.8	Sitios de construcción	28
<b>3.</b>	<b>DESCRIPCIÓN DE SITIOS DE MUESTREO</b>	<b>29</b>
3.1	Descripción de sitios de muestreo de escurrimiento pluviales	29
3.1.1	Sitio SR1: Parte baja	30
3.1.2	Sitio SR2: Tomas Aquino calle	31
3.1.3	Sitio SR3: Tomas Aquino canal	32
3.1.4	Sitio SR4: Altabrisa	33
3.1.5	Sitio SCT: Central camionera	34
3.1.6	Sitio SI1: Zona industrial 1	34
3.1.7	Sitio SI2: Zona industrial 2	35
<b>4.</b>	<b>METODOLOGÍA.</b>	<b>36</b>
4.1	Muestreo	36
4.2	Métodos utilizados en el análisis de las muestras	37
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>39</b>
5.1	Caracterización de fracciones de sólidos	39
	Suspendidos	
5.2	Sólidos Suspendidos Totales	40
5.3	Turbidez	41
5.4	Fósforo total	42
5.5	Nitrógeno total	43
5.6	Demanda química de oxígeno	44
5.7	Relación entre contaminantes y tamaño de partícula	45
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>49</b>
<b>7.</b>	<b>REFERENCIAS</b>	<b>50</b>
<b>8.</b>	<b>ANEXOS</b>	<b>58</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Ciclo hidrológico.	7
Figura 2.2	Comparación de escurrimientos pluviales en superficies impermeables y con cubierta vegetal.	8
Figura 2.3	(a) Comparación entre un sitio sin superficie impermeable y (b) uno con superficie impermeable.	9
Figura 2.4	Diagrama del escurrimiento.	10
Figura 2.5	Determinación de los umbrales de los eventos de riesgo.	12
Figura 2.6	Clasificación de los sólidos de acuerdo al tamaño.	19
Figura 2.7	Fuentes de sólidos en escurrimientos pluviales. a) Escurrimientos sobre calles sin pavimentar. b) Taludes con pendientes muy pronunciadas. c) Escurrimientos a través de lotes baldíos provocando erosión.	20
Figura 2.8	a) Derrame de aceite de motor en una calle de la ciudad de Tijuana. b) Manchas de aceite en un estacionamiento. (c) Desbordamiento del sistema de drenaje sanitario durante una lluvia (indicado con la flecha amarilla). (d) Emisión de grasas e hidrocarburos por establecimientos de carne y pollos asados (se observa gran cantidad e grasa escurriendo de las chimeneas.	25
Figura 3.1	Sitios de muestreo en la ciudad de Tijuana.	30
Figura 3.2.	(a) Taller mecánico de motocicletas (b) negocios de comida cercanos al sitio SR1.	31
Figura 3.3	Vista de sur a norte del sitio SR1 (a) sin escurrimiento, (b) durante el muestreo.	31
Figura 3.4	(a) Taller mecánico y (b) algunos negocios por la parte superior del sitio SR2.	32
Figura 3.5	Vista de sur a norte del sitio SR2 (a) sin escurrimiento, (b) durante el muestreo	32
Figura 3.6	(a) Parte inicial del canal (b) calle lateral izquierda de terracería	32
Figura 3.7	(a) Toma de muestra en el sitio SR3, (b) escurrimiento en calle de terracería.	33
Figura 3.8	Vista del sitio SR4 (a) descendente, (b) ascendente.	33
Figura 3.9	(a) Toma de muestra en el sitio SR4, (b) vista del sitio sin escurrimiento.	33
Figura 3.10	(a) Sitio SCT con escurrimiento de la calle, (b) vista del sitio sin escurrimiento.	34

Figura 3.11 (a) Uno de los estacionamientos y (b) algunas instalaciones industriales cercanas al sitio SI1.	34
Figura 3.12 (a) Vista del sitio SI1 de norte a sur y (b) toma de muestra en el sitio.	35
Figura 3.13. (a) Vista del sitio SI2 hacia el este, calle arriba. (b) Vista del sitio SI2 hacia el oeste calle abajo.	35
Figura 5.1. Fracciones de tamaño de particular en las muestras de agua de lluvia.	40

## INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Coeficientes de escurrimientos	13
Tabla 2.2. Posibles fuentes contaminantes en escurrimientos pluviales	16
Tabla 2.3. Posibles fuentes contaminantes en escurrimientos pluviales	17
Tabla 2.4. Medianas de las concentraciones de los sitios por uso de suelo en la ciudad de Tijuana y los datos de calidad de escurrimientos pluviales nacionales de E.U. (NSQD),	18
Tabla 2.5. Tipo de suelo	20
Tabla 2.6. Erosión de escurrimientos en sitios de construcción característicos	21
Tabla 3.1 Características de los sitios de muestreo de escurrimientos pluviales.	30
Tabla 4.1. Datos de los eventos de lluvia muestreados.	36
Tabla 4.2 Métodos usados para análisis de muestras	37
Tabla 5.1. Concentraciones de SST en los sitios de muestreo.	41
Tabla 5.2. Valores de turbidez analizados en los sitios de muestreo.	42
Tabla 5.3. Concentraciones de FT en los sitios de muestreo.	43
Tabla 5.4. Concentraciones de NT en los sitios de muestreo.	44
Tabla 5.5. Concentraciones de DQO en los sitios de muestreo	45
Tabla 5.6. Porcentaje de los parámetros medidos asociados con partículas de materia.	46
Tabla 5.7 Porcentaje de los parámetros medidos asociados con tamaños de partículas superiores a 10 y 0.45 $\mu\text{m}$ .	48

# 1. INTRODUCCION

## 1.1 Antecedentes

El abastecimiento de agua de la ciudad de Tijuana proveniente de fuentes superficiales y en menor medida, de fuentes de agua subterránea. El agua de origen superficial proviene de dos presas y de acueductos. Entre estas se encuentra la presa Abelardo L. Rodríguez, que recoge agua de origen pluvial y recibe agua de los Ríos Las Palmas y la presa El Carrizo, que recibe agua conducida por el acueducto Rio Colorado-Tijuana, la cual es transportada desde el valle de Mexicali hasta el mencionado embalse con un costo de 1.00 dólar por m<sup>3</sup> de agua (Implan 2002; Sánchez, 2006).

Por la tendencia de crecimiento demográfico, observada en años anteriores, la expansión territorial, la continua concentración de la economía y de los poderes políticos en los núcleos urbanos, se puede suponer que la misma dinámica continuaría en las próximas décadas (Conagua, 2007), con lo cual la demanda del agua se incrementará inexorablemente en una proporción de asignación a futuro de 70 a 80% al riego agrícola, 20% a la industria y 6% al consumo doméstico (CNUMAD, 1992), afectando su disponibilidad natural y, en general, el ciclo hidrológico.

Una de las características de los escurrimientos pluviales es que “arrastran” contaminantes que se han acumulado en las superficies no permeables durante la temporada de estiaje (sin lluvias) como: Aceite usado de motor, líquidos de frenos, detergentes, deposición atmosférica, organismos patógenos provenientes de excremento y desechos de perros, gatos y otros animales, basura y sedimentos provenientes de sitios de construcción. Estos contaminantes son conducidos hacia una red de drenaje pluvial o directamente a un lago, río, arroyo, humedal o el mar, produciendo contaminación en dichos cuerpos de agua. Existe un concepto creado por los expertos de aguas superficiales llamado “first flush” que es el primer flujo, que tiene importancia debido a que es la parte del escurrimiento pluvial con una mayor concentración de contaminantes. Este primer flujo puede llegar a tener una cantidad mayor o igual de contaminantes que el agua residual doméstica.

Los escurrimientos pluviales urbanos son una fuente importante de contaminantes a los cuerpos de agua, desafortunadamente en nuestro país no existen ninguna regulación para el control de su

calidad. En particular en Tijuana y en todo el país, se le ha dado un énfasis mayor al control de las avenidas para reducir el riesgo de inundación, sin tratar de darle una solución más integral en el cual se tome en cuenta ambos enfoques.

Los contaminantes considerados como “estándares” para la evaluación de la calidad de escurrimientos pluviales son: a) Sólidos suspendidos (sedimentos); b) nutrientes; c) las sustancias demandantes de oxígeno d) metales pesados; e) grasas y aceites y f) organismos patógenos.

La contaminación de aguas pluviales es un problema grave en las zonas urbanas. La carga y concentración de contaminantes hídricos tales como sólidos suspendidos, nutrientes y metales pesados son típicamente más altos en escurrimientos pluviales urbanos que en escurrimientos de zonas rurales (Vaze y Chiev, 2004). Los escurrimientos pluviales se han convertido en un significativo contribuyente de contaminantes para cuerpos de agua. Estos contaminantes pueden ser inorgánicos (por ejemplo metales pesados y nutrientes) y/o orgánicos, tales como hidrocarburos aromáticos policíclicos y fenoles producto de degradación y desgaste de pavimento de asfalto (Sansalone y Buchberger, 1999).

Por ejemplo, los escurrimientos pluviales contribuyen 75-90% de la contaminación del Rio Anacostia, uno de los principales afluentes tributarios de la Bahía Chesapeake (NRDC, 2002). Factores tales como el uso de la suelo, el porcentaje de superficie impermeable (estacionamientos y carreteras) pueden afectar la calidad de escurrimientos pluviales. Se han encontrado que porcentajes de áreas impermeables tan bajas como 10 a 15% degradan la calidad de las corrientes (Bochis-Micu y Pitt, 2005). Existe otro límite entre 25 a 30% de área de superficie impermeable donde sus escurrimientos pluviales han tenido un efecto negativo en los cuerpos de agua receptoras (Schueler, 1994). Booth y Jackson (1997) analizaron datos para corrientes de agua en el oeste de Washington y concluyeron que desarrollos que tenían aproximadamente el 10% del área impermeable producían una degradación en la vida acuática de dichos cuerpos de agua.

Los sólidos suspendidos totales es uno de los más importantes parámetros medidos en escurrimientos pluviales porque su concentración y caracterización son frecuentemente la base para la selección y diseño de instalaciones para tratamiento de dichos escurrimientos pluviales,

tales como estanques de retención y humedales. Por otra parte, los sólidos suspendidos están vinculados a contaminantes como el fosfato, compuestos orgánicos y algunos metales pesados ya que tienden a ser adsorbidos en las partículas. Los sólidos suspendidos juegan un papel importante en el transporte de nutrientes antropogénicos y metales pesados en corrientes hídricas (Ramírez, 1991). La concentración de contaminantes de sedimento varía con el tamaño de partícula, con grandes cantidades asociadas con las partículas más finas (Sartor y Gaboury, 1984; Hvitved-Jacobsen y Yousef, 1991). Hvitved-Jacobsen et al. (1994) encontraron que el 60 al 80% del fósforo y plomo, de 50–60% de nitrógeno, y de 30- 40% de zinc en escurrimientos en carretera asociadas con las partículas.

Pitt et al. (1998) analizaron 550 muestras en alcantarillas de telecomunicaciones y que fueron afectadas por aguas pluviales. Encontraron que la demanda química de oxígeno (DQO) y las concentraciones de zinc se asocian más a la fracción filtrable (14% y 30%, respectivamente). Morquecho y Pitt, (2003) estudiaron los escurrimientos de techos y áreas pavimentadas. Encontraron una reducción del 47% de DQO; 23% de nitrógeno total (NT), 17% de nitrato, 92% de fósforo total (FT) cuando los sólidos suspendidos fueron removidos. Para los metales pesados se encontró una reducción del 82% para el plomo y el 72% de zinc. Estos últimos resultados muestran que las concentraciones de plomo y zinc están asociadas con sólidos suspendidos. Vaze y Chiev (2004) encontraron que la carga contaminantes en distintos rangos de tamaño de partícula de diferentes muestras de aguas pluviales mostraron una gran variabilidad para NT y FT. De acuerdo a estos autores todas las partículas FT y NT en muestras de aguas pluviales se unen a sedimentos entre 11 y 150  $\mu\text{m}$ . El porcentaje del NT disuelto osciló entre 20-50% y FT de 20-30%.

Mijangos-Montiel et al. (2010) encontraron altas concentraciones de SST en escurrimientos pluviales de gasolineras y sitios con uso de suelo habitacional en Tijuana. El rango de concentración de TSS para gasolineras fue entre 204 y 11 561 mg/L y para los sitios residenciales de 121 a 6717 mg/L. También encontraron altas concentraciones de DQO, con rangos de 75 a 22 600 mg/L para gasolineras y de 60 a 2 135 mg/L para los sitios residenciales.

Dominguez-Chica et al. (2004) midieron la velocidad de sedimentación de sólidos en muestras de aguas pluviales de cuatro sitios en Ciudad Juárez, México. Encontraron que la cantidad de sólidos suspendidos y la velocidad de sedimentación están relacionadas con la urbanización. Se reduce la cantidad de sólidos suspendidos y se aumenta la velocidad de sedimentación con la urbanización.

Hansen et al. (2007) encontró que el sedimento de escurrimientos y las descargas de aguas residuales urbana en la Laguna Cencalli en Villahermosa, México fue de 5300 m<sup>3</sup>/año. La producción de sedimento de estas descargas se estimó mediante el análisis del uso de suelos y de la densidad de población de la cuenca.

Poca investigación ha sido publicada sobre la calidad de escurrimientos pluviales urbanos en México y menos aún en las ciudades de frontera México-Estados Unidos donde existen especiales características urbanas que afectan la calidad de escurrimiento de pluviales urbanos. Estas especiales características urbanas de Tijuana incluyen: un alto porcentaje de automóviles que circulan en Tijuana son usados importados de U.S.A.; 78% de los automoviles en Tijuana son de más de 13 años de antigüedad (INE, 2000); uso del suelo urbano no planificado donde un número de calles sin pavimentar todavía puede encontrarse en áreas que se consideran totalmente urbanizadas. En estas áreas, el suelo puede ser transportado a caminos pavimentados por los neumáticos de los coches y luego transportados por los escurrimientos. Otra característica urbana de Tijuana es el número de lotes baldíos en el área urbana y los cortes con alta pendiente de laderas en las colinas expuestas a la erosión, que en eventos de lluvia puede contribuir con sólidos suspendidos a los escurrimientos pluviales. Según la autoridad municipal de planeación el 22% de la superficie en Tijuana es de lotes baldíos y aproximadamente el 36% del total de los lotes baldíos tienen pendientes de más del 35% (Implan, 2002).

## 1.2 Justificación

El agua es un recurso de vital importancia, y merece especial atención en las ciudades con escasez en las fuentes de abasto de este líquido, como lo es Tijuana (González-Estévez, 2008). Sabemos que la disponibilidad de agua en nuestra región, y en particular en la ciudad de Tijuana, está basada

en suministros externos, ya que no se cuenta con fuentes que tengan la capacidad para abastecer a la población por periodos a largo plazo. Frente a la limitada disponibilidad de las fuentes de agua y los escenarios de escasez fuerte, proyectados en la región para 2030 (Semarnat, 2006), representan un gran desafío para el manejo eficiente de los recursos hídricos de la ciudad.

El incremento en la demanda y la disminución en la disponibilidad, fundamentalmente por deterioro en su calidad, han generado y generan problemas cada vez más graves para el abastecimiento tanto a nivel local como regional, e incluso a nivel global (González-Estévez, 2008). Esta problemática, se vino manifestando en forma creciente durante el pasado siglo, y de acuerdo a la tendencia actual, es previsible que continúe en ascenso (Auge, 2006). El vertiginoso aumento de las actividades humanas, a consecuencia del crecimiento poblacional, el cual ha traído aparejado, un incremento en el consumo de agua para la producción de bienes y un aumento consecuente en la contaminación generada; han comprometido la disponibilidad de ese recurso (Yoshinaga y Albuquerque, 2002). Dentro de este contexto se inserta la ciudad de Tijuana, en Baja California. En ésta, el agua constituye uno de los factores de desarrollo urbano más importante a tener en consideración, sobre todo por la ubicación geográfica y las condiciones climáticas, las cuales favorecen la escasez de este recurso en la región (SEDUM, 2002). La escasez y la competencia cada vez mayor por el agua podrían cambiar la forma en que valoramos y usamos el agua, así como la forma en que movilizamos y administramos los recursos hídricos (Mijangos, 2009).

El recurso hídrico en nuestra región, y en particular Tijuana, es limitado, de ahí que sea prioritario contar con agua en óptimas condiciones de uso, para ello se requiere tomar acciones que permitan identificar las fuentes de contaminación en el agua que limiten su uso para consumo humano, industrial y agropecuario.

La contaminación en los cuerpos de agua y zonas costeras es un problema agudo y complejo, que ha crecido considerablemente, y en la ciudad de Tijuana no es la excepción, por lo tanto, resulta necesario identificar y cuantificar la carga de contaminantes, para definir la calidad del agua en los

escurrimientos pluviales. Esto es importante para plantear el posible tratamiento y aprovechamiento del recurso hídrico.

El presente proyecto propone el estudio de la asociación de contaminantes en escurrimientos pluviales urbanos con los sólidos suspendidos. Los contaminantes analizados fueron: la demanda química de oxígeno, nutrientes (como fósforo total y nitrógeno total), turbidez, sólidos suspendidos totales. Con el fin de proponer el tratamiento de este recurso para su posible reúso y el de aminorar la contaminación de las playas y cuerpo de agua.

### 1.3 Objetivo general

Evaluar la asociación de contaminantes con sólidos suspendidos en escurrimientos pluviales en la ciudad Tijuana.

### 1.4 Objetivos específicos

1. Cuantificar concentración de nitrógeno total y fósforo total, así como el contenido de los sólidos suspendidos totales en los escurrimientos pluviales en el periodo de lluvia 2009-2010.
2. Determinar las concentraciones de demanda química de oxígeno, nitrógeno total, fósforo y turbidez asociados a diferentes tamaños de partículas.

### 1.5 Organización de la tesis

Este documento consta de siete capítulos. 1 Introducción; el capítulo 2 corresponde al marco teórico en el que se basa la investigación; en el capítulo 3 se presenta una descripción detallada de los sitios de muestreo; en el capítulo 4 se describe la metodología de muestreo y análisis; en el capítulo 5 se presenta una discusión de los resultados obtenidos. En el capítulo 6 se presentan las conclusiones de la tesis y finalmente en el capítulo 7 se presentan las referencias utilizadas en la tesis.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 El ciclo hidrológico

En circunstancias naturales el ciclo hidrológico es de la siguiente manera. El sol calienta los océanos y cuerpos de agua continentales y parte del agua se evapora, esta agua junto con el agua de evapotranspiración, que es el agua procedente de las plantas y la evaporación del suelo regresa a la superficie en forma de nieve o lluvia. La mayor parte de la precipitación cae sobre los océanos o la tierra, donde, debido a las pendientes, fluye sobre la superficie. Una parte de esta agua entra en los ríos y regresa a los océanos. Otra parte de la lluvia se infiltra y alcanza los mantos acuíferos, que almacenan cantidades enormes de agua dulce durante períodos largos del tiempo. Algunas infiltraciones permanecen cerca de la superficie de la tierra y pueden emerger, acabando como agua superficial (y oceánica). Con el tiempo, el agua sigue fluyendo, para entrar de nuevo en el océano, donde el ciclo se renueva (Figura 2.1).



Figura 2.1. Ciclo hidrológico (Wakida-Kusunoki, 2011)

Sin embargo, en áreas urbanas el ciclo hidrológico es afectado en muchas formas, por ejemplo el caudal de los escurrimientos pluviales es mayor debido a que existe una mayor área con superficie impermeable como los son las calles pavimentadas, techos, estacionamientos y banquetas. El tiempo donde ocurre el caudal máximo es también menor (Figura 2.2) a un área sin urbanización. De igual forma la evaporación es mayor y la recarga natural a los acuíferos disminuye al existir una menor infiltración. Cabe señalar que aunque disminuye la recarga y la infiltración natural, la

recarga antropogénica aumenta, debido a que fugas en las redes de agua potable de las ciudades tienen una pérdida de no menor del 20%, lo cual es una fuente importante de recarga en acuíferos urbanos como se ha demostrado en algunos estudios (Lerner, 1986, Yang et al. 1999). La importancia del ciclo hidrológico radica en que por su medio se representa el balance o equilibrio de los recursos de agua del planeta. Además, es el instrumento mediante el cual la naturaleza regenera el agua para que ésta sea reutilizada. Cualquier alteración del ciclo puede tener efectos sobre el resto de los recursos y en especial sobre los ecosistemas y el medio ambiente (Rojas, 2009).

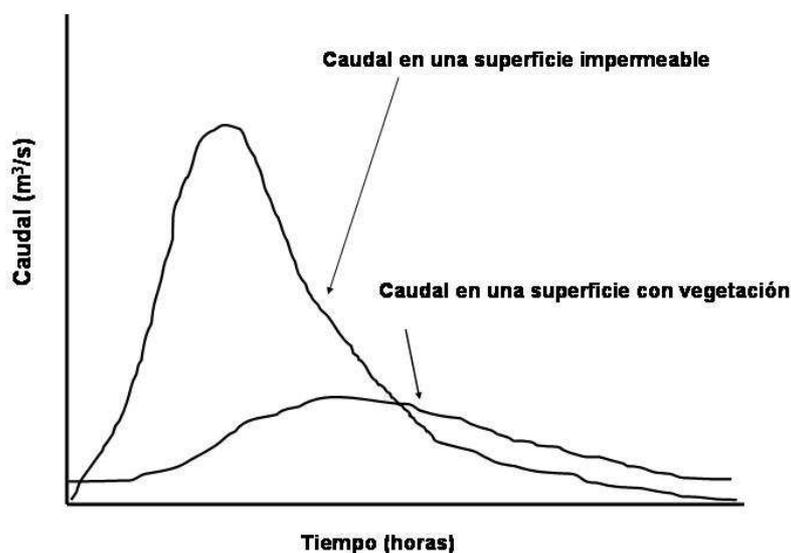


Figura 2.2. Comparación de escurrimientos pluviales en superficies impermeables y con cubierta vegetal (Mijangos, 2009).

Este comportamiento es muy diferente a la de una zona con cubierta natural donde el caudal máximo es mucho menor y el tiempo de escurrimiento es más largo. En áreas urbanizadas la evaporación es mayor, debido a que por lo general, la cubierta vegetal es menor que la de áreas naturales. La recarga natural a los acuíferos disminuye al existir una menor infiltración debido al aumento de áreas impermeables (Figura 2.3).

La escorrentía proveniente de zonas urbanas transporta contaminantes directamente a los cuerpos de agua, lo que tiene el impacto en la modificación y destrucción de hábitats. El aumento de la velocidad y volumen de la escorrentía debido a la urbanización tiene también como consecuencia la degradación de suelos debido a la erosión y pérdidas económicas debido a inundaciones. Si se

tiene una cubierta vegetal esta incrementa la infiltración, el paso del agua a través del suelo remueve contaminantes a través del mecanismo de filtración y la acción de microorganismos que ayudan a biodegradar dichos contaminantes. Esta infiltración sirve de recarga a los mantos acuíferos y por lo tanto, para mantener ecosistemas importantes como los humedales.

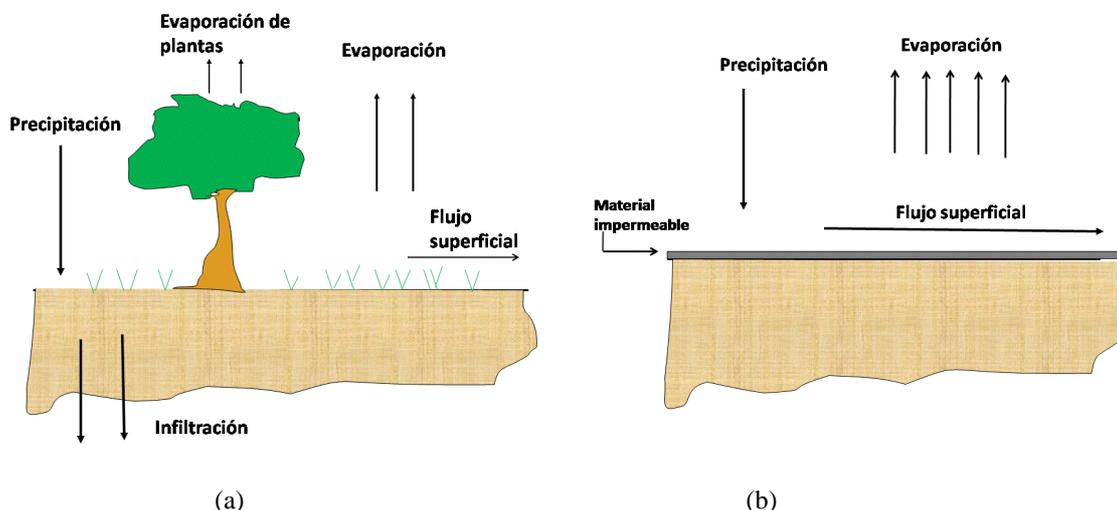


Figura 2.3. (a) Comparación entre un sitio sin superficie impermeable y (b) uno con superficie impermeable (Wakida-Kusunoki, 2011).

## 2.2 Escurrimientos pluviales

El escurrimiento superficial o escorrentía es la parte del agua de precipitación que se escurre sobre el suelo y después por los cauces de los ríos; además, está la escorrentía urbana, aguas procedentes de las calles de las ciudades con propiedades domésticas que transportan contaminantes al sistema de alcantarillado. Por otro lado, el escurrimiento subsuperficial, que es la parte del agua infiltrada en la superficie y que se desliza a través de los horizontes superiores del suelo (sin movimiento lateral) hacia las corrientes; una parte entra rápidamente a formar parte de las corrientes superficiales y a la otra le toma bastante tiempo el unirse a ellas. Por último, el escurrimiento subterráneo, que corresponde a una profunda percolación del agua infiltrada en el suelo, se lleva a cabo en los mantos subterráneos y que, posteriormente, por lo general, descarga a las corrientes fluviales. El escurrimiento subterráneo se forma de la parte de la precipitación que se infiltra a través del suelo una vez que éste se ha saturado. La contribución del escurrimiento subterráneo al total varía muy lentamente con respecto al superficial (Chow, 1964).

Para analizar el escurrimiento total, se puede considerar parte de la precipitación que contribuye directamente al escurrimiento superficial se le llama precipitación en exceso. La parte de agua de escurrimiento que entra rápidamente en el cauce de las corrientes se le llama escurrimiento directo y es igual a la suma del escurrimiento subsuperficial más la precipitación que cae directamente en los cauces. El escurrimiento subterráneo y la parte retardada del escurrimiento subsuperficial constituyen el escurrimiento base (Figura 2.4).

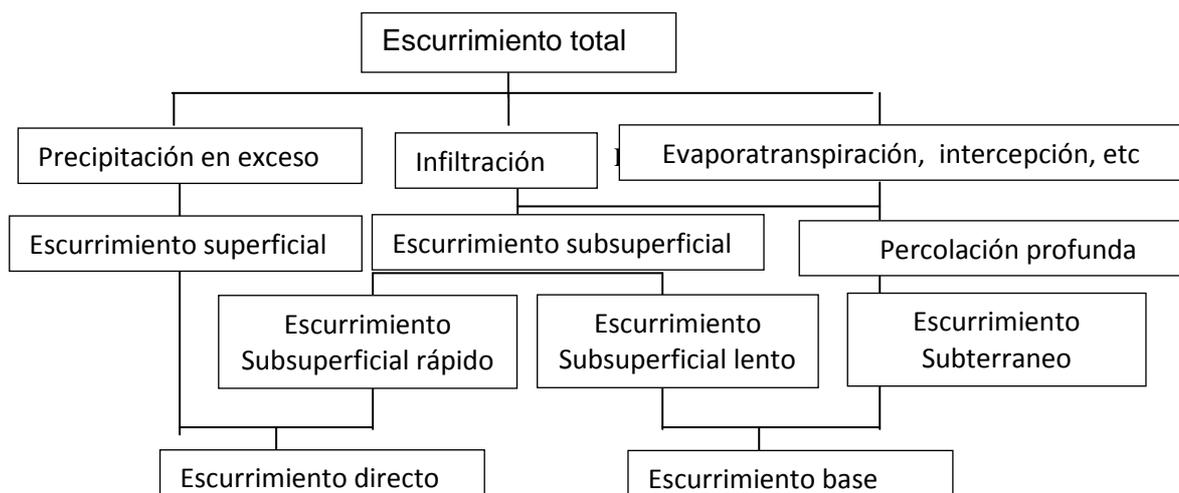


Figura 2.4. Diagrama del escurrimiento (Chow, 1964).

### 2.3 Coeficientes de escurrimientos

Los parámetros como: coeficientes de escurrimiento  $C$ , así como altura de precipitación media  $h_p$ , periodo de retorno  $T_r$  y tiempo de concentración  $T_c$ , están íntimamente ligados para estimar la intensidad de precipitación  $I$ , ya que la precipitación se caracteriza por la variación de las intensidades de lluvia dentro de la cuenca respecto a la duración de las tormentas que las generan con diferentes periodos de retorno ( $T_r$ ) (S.C. T., 2000). De la medición de éstos parámetros radica la importancia de las precipitaciones, tienen un efecto en el correcto dimensionamiento del drenaje, garantizar la vida útil de una carretera, una vía férrea o un aeropuerto. El conocimiento de las precipitaciones pluviales extremas y el consecuente dimensionamiento adecuado de los órganos extravasores de las represas garantizará su seguridad y la seguridad de las poblaciones y demás estructuras que se sitúan aguas abajo de la misma. El conocimiento de las lluvias intensas, de corta duración, es muy importante para dimensionar el drenaje urbano, y así evitar inundaciones en los

centros poblados (Casas- Torres e Higuera-Arnal, 1977). El coeficiente de escurrimiento está dado por la relación entre la lámina de precipitación sobre una superficie y la lámina de agua que escurre superficialmente, (ambas expresadas en mm) (Linsley y Franzini, 1978); Éste coeficiente es un indicador de las pérdidas que se tienen en el en el escurrimiento por infiltración, evaporación y almacenamiento de agua en depresiones (SIDUE, 2009).

En la aplicación de los modelos matemáticos lluvia-escurrimiento se considera un valor del coeficiente de escurrimiento; éste valor es modificado de acuerdo con las condiciones de humedad del suelo y de la lluvia que se esté presentando. Sin embargo, para precisar su valor es conveniente medir el gasto en algunos sitios y asociarlos con la lluvia que se presentó.

Para el caso particular de Tijuana, no se cuenta con datos de lluvia y los escurrimientos que genera, sólo se realizan estimaciones de escurrimientos con la elaboración de hidrogramas unitarios sintéticos y datos de lluvia en las estaciones pluviométricas, según el sistema de alerta hidrometeorológica de Baja California, que comenzó su operación, en su primera fase, en febrero de 1999 (DEPBC, 2000).

Dentro de un estudio piloto de la hidrología superficial en Tijuana y la caracterización de un Sistema de Información Geográfica (SIG) de los riesgos resultantes de las precipitaciones extremas asociadas al evento de El Niño de Octubre de 1997 a Junio de 1998, se modeló el escurrimiento pluvial empleando el modelo conceptual espacial ATHYS-MERCEDES (Bouvier, 1994; Bouvier et al. 1994; Bouvier et al. 1996) para escurrimientos superficiales; considerando cuatro elementos: la precipitación, la topografía, el tipo de uso de suelo y las condiciones hidrológicas de las aguas subterráneas. La figura 2.5 muestra la gráfica que relaciona las precipitaciones y coeficientes de escurrimiento en Febrero 7 de 1998. El tamaño del símbolo en función de la densidad de los eventos, relacionado para la superficie del desarrollo urbano (Winckell y Le Page, 2003).

Tamaño en función de la densidad del evento en el área urbana

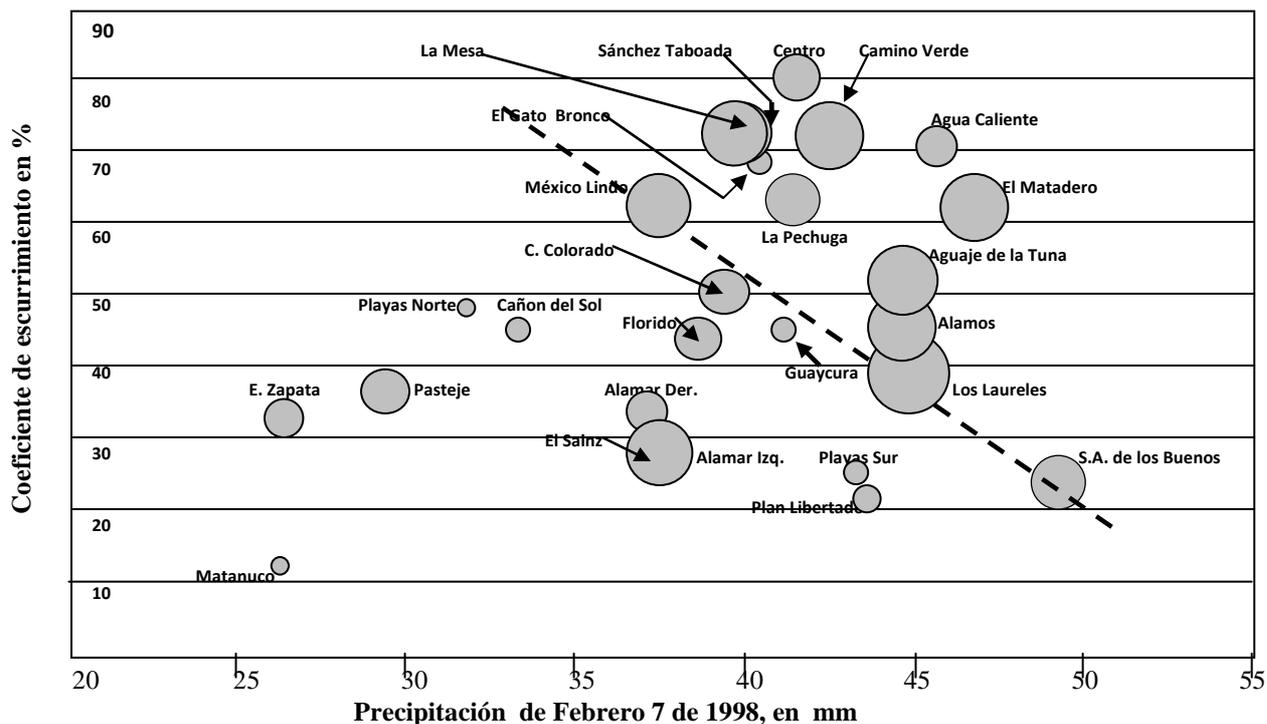


Figura. 2.5. Determinación de los umbrales de los eventos de riesgo (Winckell y LePage, 2003).

El valor del coeficiente de escurrimiento se determina por la expresión  $C = E_s / P_r$ .

Donde:  $P_r$  = Precipitación (en mm) y  $E_s$  = Lámina escurrida (en mm). El valor del parámetro C varía mucho en función del tipo de uso del suelo. En la Tabla 2.1 se presentan algunos valores generalmente aceptados para precipitaciones de larga duración.

Tabla 2.1 coeficientes de escurrimientos (Guzman, 1955).

<u>TIPO DEL ÁREA DRENADA</u>	$C_{\text{mín}}$	$C_{\text{máx}}$
<b>ZONA COMERCIAL</b>		
Zona comercial	0.75	0.95
Vecindarios	0.50	0.70
<b>ZONAS RESIDENCIALES</b>		
Unifamiliares	0.30	0.50
Multifamiliares espaciados	0.40	0.50
Multifamiliares compactos	0.60	0.75
Semiurbanas	0.25	0.40
Casas habitación	0.50	0.70
<b>ZONAS INDUSTRIALES</b>		
Espaciado	0.5	0.80
Compacto	0.60	0.90
Cementerios y parques	0.10	0.25
Campos de juego	0.20	0.35
Patios de ferrocarril	0.20	0.40
Zonas suburbanas	0.10	0.30
Asfaltadas	0.70	0.95
De concreto hidráulico	0.80	0.95
Adoquinados	0.70	0.85
Estacionamientos	0.75	0.85
Techados	0.75	0.85
<b>PRADERAS</b>		
Suelos arenosos planos (Pendientes 0.02)	0.05	0.10
Suelos arenosos con pendientes medias (0.02-0.07)	0.10	0.15
Suelos arenosos escarpados (0.07 o más)	0.15	0.20
Suelos arcillosos planos (0.02 o menos)	0.13	0.17
Suelos arcillosos con pendientes medias (0.02-0.07)	0.18	0.22
Suelos arcillosos escarpados (0.07 o más)	0.25	0.35

Observando estos valores determinados por medio de experimentos de campo, se puede apreciar fácilmente por qué la tala de bosques y la urbanización provocan crecidas mucho mayores.

#### 2.4 Otros parámetros importantes en el escurrimiento pluvial

La intensidad de la lluvia y duración de la lluvia: estas dos características están asociadas. Para un mismo tiempo de retorno, al aumentarse la duración de la lluvia disminuye su intensidad media, la formulación de esta dependencia es empírica y se determina caso por caso, con base en datos observados directamente en el sitio estudiado o en otros sitios vecinos con las mismas características orográficas. Las precipitaciones pluviales extremas, es decir con tiempos de retorno

de 500, 1000 y hasta 10000 años, o la precipitación máxima probable, o PMP, son determinadas, para cada sitio particular, con procedimiento estadísticos, con base en observaciones de larga duración (Casas-Torres e Higuera-Arnal, 1977). El tiempo de retorno es el tiempo que, en promedio, debe transcurrir para que se presente un evento igual o mayor a una cierta magnitud. Normalmente, el tiempo que se usa son años. En general, el evento analizado no ocurre exactamente en el número de años que indica el periodo de retorno, ya que éste puede ocurrir el próximo o dentro de muchos años (Eslava et al., 2006).

Se entiende por intensidad de lluvia (I) como la relación entre un incremento de altura de precipitación ( $H_p$ ) ocurrida y el tiempo de concentración (también llamado tiempo de duración) ( $T_c$ ) que la generó y su variación se representa en forma gráfica mediante curvas de intensidad-duración-periodo de retorno, las que se determinan en función de los datos hidrológicos disponibles. La Secretaria de Comunicaciones y Transporte (SCT, 2000), México, en su proyecto con el tema: Carreteras y con título: Estudios Hidráulicos-Hidrológicos para Puentes, muestra el procedimiento para trazar las curvas de intensidad-duración-periodo de retorno. La intensidad de lluvia I se define por medio de la siguiente expresión:

$$I = (60H_p)/T_c$$

donde:

I: Intensidad de precipitación, en mm/hr

$H_p$ : Altura de precipitación media para un periodo de retorno  $T_r$  y una duración  $d$ , en mm.

$T_c$ : Tiempo de concentración, en min.

Altura de precipitación:

Según el Compendio de Geografía General (Casas-Torres e Higuera-Arnal, 1977) para realizar la medición de la altura del agua de lluvia (en mm) que cubriría la superficie del suelo, en el área de influencia, la medición se efectúa por medio de pluviómetros o pluviógrafos, si pudiese mantenerse sobre la misma sin filtrarse ni evaporarse.

García (1982) propone la determinación del periodo de retorno  $T_r$  y la duración de la tormenta, de acuerdo a la zona donde se ubique el proyecto; para determinar la altura de precipitación base, se deberán consultar las tablas correspondientes, de acuerdo con el periodo de retorno y la duración de la tormenta establecidos.

El tiempo de concentración  $T_c$ , es el tiempo de viaje de una porción de agua desde el punto más distante de la cuenca hasta el sitio en consideración, el tiempo de concentración es muy importante ya que determina la duración de la lluvia de diseño en las estimaciones de los caudales máximos, se calculará con la siguiente expresión con el método de Kirpich (Rojas , 2009; Kirpich, 1940):

$$T_c = 0.0207 L^{1.155} \Delta H^{-0.385}$$

donde:

$T_c$ : Tiempo de concentración, en min.

$L$ : Longitud total del cauce principal (longitud desde el punto más alejado del punto de captación ), en metros.

$\Delta H$ : Desnivel entre el punto más alejado y el punto de captación, en metros.

## 2.5 Contaminantes en escurrimiento pluviales

### 2.5.1 Principales contaminantes en escurrimientos pluviales urbanos

En tiempos recientes los escurrimientos pluviales urbanos y sus fuentes contaminantes no puntuales asociados han sido considerados como uno de las mayores fuentes de contaminación de aguas (Estebe et al., 1997; Fisher et al., 1999). El escurrimiento pluvial urbano es una fuente de contaminación no puntual, y es responsable en la contribución en el exceso de nutrientes, bacterias, y metales tóxicos en los cuerpos receptores de agua. Los contaminantes no puntuales resultantes de los escurrimientos pluviales han sido identificados como una de las mayores causas de deterioro de la calidad en las aguas receptoras. Los sólidos de calles y el material depositado por el alcantarillado son los mayores contaminantes en escurrimientos urbanos (Field et al., 1982; Novotny y Olem, 1994; Bang et al., 1997). Adicionalmente, el escurrimiento de desarrollos y construcciones urbanas es reportado como una fuente de contaminación para 14 de los 18 Estuarios

Nacionales en los Estados Unidos (USEPA, 1994). Tradicionalmente las fuentes puntuales, son fácilmente identificables y medibles, mientras que las fuentes contaminantes no puntuales son difíciles de caracterizar y cuantificar por ser altamente variables (Ashley et al., 1999; Gromaire et al. 2001). Los contaminantes no solamente se originan por el uso de suelo sino también por deposición atmosférica. El impacto de los contaminantes de lluvias sobre cuerpos de agua dependen de un cierto número de factores, tales como: la naturaleza de los contaminantes, sus concentraciones, mezcla de los contaminantes, y la carga total de estos. Las categorías mayores son: (i) sólidos suspendidos totales (SST), (ii) metales pesados, (iii) hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs) y (iv) nutrientes (Aryal et al. 2010).

La Tabla 2.2 resume los contaminantes comúnmente encontrados en agua de lluvia y sus posibles fuentes. La Tabla 2.3 resume los contaminantes en escurrimientos en calles. Las tablas muestran qué contaminantes tienen diversas fuentes.

Tabla 2.2. Posibles fuentes contaminantes en escurrimientos pluviales (Aryal et al., 2010).

	Suelos Erosionados	Vehículos	Residuos humanos/animales	Fertilizantes	Sustancias químicas domésticas	Procesos industriales	Pinturas y conservadores
Sólidos							
Metales							
Aceites, grasas y orgánicos							
Nutrientes							

Muchos estudios realizados para la evaluación de la calidad de agua de los escurrimientos pluviales realizados en diversas partes del mundo, han establecido que la concentración de contaminantes en los escurrimientos es muy variable de ciudad a ciudad y de sitio a sitio. Dentro de las causas de esta variabilidad se pueden mencionar diferencias entre la intensidad y frecuencia de la precipitación, diferencia de climas, diferencias en tipo de suelo así como del uso del mismo, y por último el tipo e intensidad de las actividades humanas dentro la cuenca. En Tijuana se han realizado estudios sobre la calidad de escurrimientos pluviales provenientes de diferentes usos de suelo (Mijangos, 2009; García-Flores 2008), en los cuales se han detectado altas concentraciones de contaminantes (Tabla 2.4). Una de las diferencias más significativas se encontró en los valores de concentración para demanda química de oxígeno (DQO). Las medianas encontradas en áreas

habitacionales y comerciales de Tijuana fueron de 16 y 7 veces mayores, respectivamente, que los valores de mediana de los datos nacionales de calidad de escurrimientos pluviales (NSQD, por sus siglas en inglés) para áreas residenciales (55 mg/L) y áreas comerciales (60 mg/L). Esto puede darse como resultado de las altas cantidades de grasas y aceites así como de sólidos suspendidos totales. La mediana de valores de concentraciones para grasas y aceites en áreas habitacionales y comerciales fueron de 34 y 13 veces mayores, respectivamente, que las medianas reportadas en el NSQD para áreas habitacionales (4 mg/L) y áreas comerciales (5 mg/L).

Tabla 2.3. Posibles fuentes contaminantes en escurrimientos pluviales (Aryal et al., 2010).

	Frenos	Llantas	Chasis	Combustible y aceite	Pavimento	Sal para deshielo	Basura
Cadmio							
Cromo							
Cobre							
Hierro							
Plomo							
Níquel							
Zinc							
Sólidos orgánicos							
Sólidos inorgánicos							
HAPs							

Las concentraciones de sólidos en escurrimientos pluviales de los sitios muestreados en Tijuana son mucho más altos que aquellos reportados por el NSQD, como resultado de una más alta densidad de población, mayor cantidad de basura en las calles, ninguna actividad de limpieza de las mismas, fugas de aceite de los motores de automóviles, la venta callejera de comida y escurrimientos provenientes de lotes baldíos.

Tabla 2.4. Medianas de las concentraciones de los sitios por uso de suelo en la ciudad de Tijuana y los datos de calidad de escurrimientos pluviales nacionales de E.U. (NSQD), todas las concentraciones en mg/L con excepción del pH y la conductividad eléctrica en  $\mu\text{S}/\text{cm}$

Parámetro	Habitacional	Comercial	NSQD habitacional	NSQD comercial
pH	7.3	7.0	7.5	7.30
SST	628	691	49	42
SDT	320	290	72	74
CE	620	560	97	119
NO <sub>3</sub> -N	0.9	0.5	0.6*	0.6*
SO <sub>4</sub>	110	70	-	-
FT	4	2.5	0.30	0.22
DQO	906	433	55	60
Aceites y grasas	138	66	4	5
Cr	0.025	0.018	0.0045**	0.002
Ni	0.008	0.007	0.0055	0.003
Cd	0.0014	0.002	0.0005**	0.0003
Pb	0.0 67	0.040	0.0030	0.005

\*NO<sub>3</sub> + NO<sub>2</sub>, \*\* Concentración total, SST: sólidos suspendidos totales; SDT: sólidos disueltos totales; CE: Conductividad eléctrica; NO<sub>3</sub>: nitrato; SO<sub>4</sub>: sulfatos; FT: fósforo total; DQO: demanda química de oxígeno; Fuente: Mijangos et al (2009), Maestre y Pitt, (2005)

### 2.5.2. Sólidos

Las inundaciones vienen siempre acompañadas de arrastre de material proveniente de las partes altas de la cuenca, cuya cantidad depende de las características de la cubierta vegetal, tipo de suelo y pendiente. Asimismo, dichas características nos ayudan a definir las áreas de depósito del material de arrastre (Eslava et al., 2006).

Según Fair et al. (1987) dicen que: las sustancias se encuentran en suspensión cuando son tan gruesas que se pueden remover por sedimentación (sólidos sedimentables) o por retención sobre papel filtro o la capa de asbesto de un crisol de Gooch (sólidos filtrables); con un límite inferior de

tamaño entre 0.1 y 1µm. Este límite se aproxima al tamaño de las bacterias y a la longitud de onda de la luz visible (0.4 a 0.8 µm) y por ello representa también el límite inferior de la visibilidad microscópica. Una categoría importante son los sedimentos suspendidos, porque causa una disminución en la absorción de la luz por el agua y de las partículas se separan compuestos peligrosos adsorbidos en éstas tales como pesticidas a través del agua. En la Figura 2.6 se muestran la clasificación de los sólidos en cuanto a su tamaño.

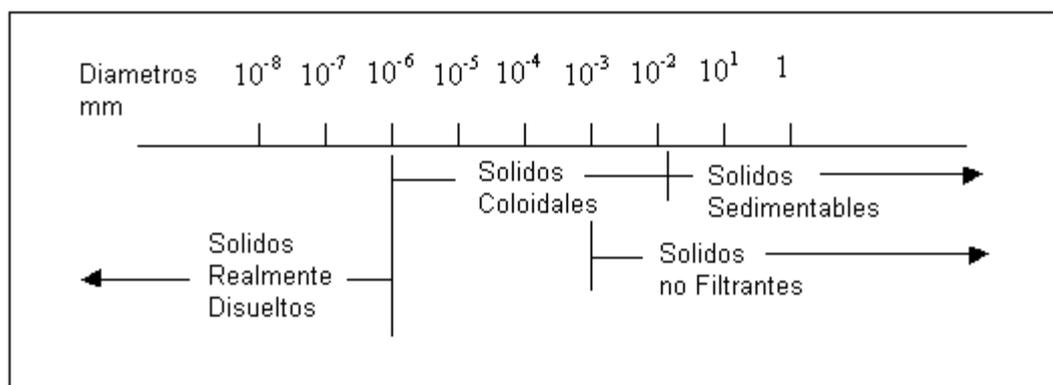


Figura 2.6. Clasificación de los sólidos de acuerdo al tamaño (I. A. y M. A., 2000).

Los sólidos suspendidos o sedimentos están conformados por arena, limo, arcilla y materia orgánica, cuyo tamaño de partículas se dice son más grandes que las moléculas disueltas en el agua. En términos prácticos se dice que aquellas partículas que son atrapadas por un filtro con un tamaño de poro de 0.45 micrómetros (µm). Los sólidos suspendidos son generados principalmente por la erosión producida por los escurrimientos sobre la superficie del suelo. La erosión ocurre hasta cierto nivel en la naturaleza, pero las actividades humanas aceleran y aumentan este fenómeno como es el caso de la tala de bosques o actividades de construcción. El mayor impacto de los sólidos suspendidos en los cuerpos de agua es el asolvamiento de los mismos, lo que puede sepultar las comunidades bióticas que viven en el fondo de los mismos ocasionando la pérdida de habitats. Además, algunos contaminantes como el fósforo, compuestos orgánicos como los hidrocarburos, metales como el cromo y el níquel están estrechamente relacionados con los sólidos debido a que estos son adsorbidos en la superficie de las partículas. La erosión en zonas urbanas puede ocurrir en calles no pavimentadas (Figura 2.7a); en taludes con pendientes muy pronunciadas (Figura 2.7b) o de lotes baldíos (Figura 2.7c).

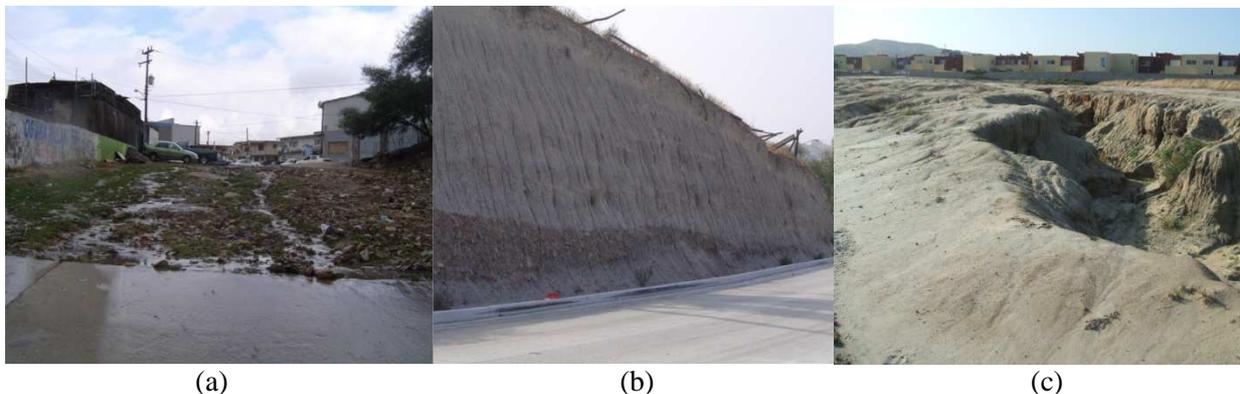


Figura 2.7. Fuentes de sólidos en escurrimientos pluviales. a) Escurrimientos sobre calles sin pavimentar. b) Taludes con pendientes muy pronunciadas. c) Escurrimientos a través de lotes baldíos provocando erosión (Wakida-Kusunoki, 2011).

Dentro de las características para definir las áreas de depósito del material de arrastre por escurrimiento pluvial, está el tipo de suelo; los suelos se clasifican en finos y gruesos, como se observa en la Tabla 2.5. Los gruesos se refieren a material que varía desde rocas, gravas hasta arenas con muy poco material fino (menos del 15% del suelo) y los finos se refieren a las arcillas y limo con nula o muy poca arena (Eslava et al., 2006).

Tabla 2.5. Tipo de suelo (Eslava et al., 2006)

Gruesos	Macizo Rocoso Roca Disgregada ( $100 < \phi < 500 \text{ mm}$ ) Gravas ( $3.5 < \phi < 100 \text{ mm}$ ) Arena gruesa ( $2.4 < \phi < 3.5$ ) Arena mediana ( $1.22 < \phi < 2.4 \text{ mm}$ ) Arena fina ( $0.075 < \phi < 1.22 \text{ mm}$ ) Arena Limosa Arena arcillosa
Finos	Limo arenoso Arcilla arenosa Limo Arcilla

Donde  $\phi$  es el diámetro medio de las partículas del suelo.

Las características de los sitios de construcción pueden contribuir con grandes cantidades de sedimentos debido a la erosión. Además, el mantenimiento del equipo pesado en sitios de construcción puede contribuir con contaminantes como aceites y grasas. Si la construcción tiene lugar en arroyos, puede generar problemas considerables de contaminación de agua (Pitt R., 2001). Gran cantidad de datos está disponible para ilustrar la magnitud del potencial de la erosión de los sitios de construcción. Como ejemplo, la Tabla 2.6 lista las magnitudes de las concentraciones de sólidos en suspensión y tamaños de partículas para sitios de construcción supervisados en el área de Birmingham, AL, (Nelson 1996). Como se muestra en esta tabla, las lluvia de altas intensidades

están asociadas con concentraciones de sólidos en suspensión considerablemente mayor y partículas de mayores tamaño, mientras que lluvias de menor intensidad se asocian con tamaños de partículas más pequeñas y una concentración menor de sólidos en suspensión. Las tasas de erosión pueden variar enormemente, con valores típicos de cerca de 20 a 30 toneladas por acre cada año en la mayoría de las áreas de los Estados Unidos, pero pueden aumentar a 100 a 300 toneladas por acre cada año en las zonas del sureste, que presentan lluvias muy intensas (Barrett, et al. 1995).

Tabla 2.6. Erosión de Ecurrimientos en Sitios de Construcción Característicos (Nelson, 1996).

	Lluvia de baja intensidad (<0.25in/hr)	Lluvia de intensidad moderada (cerca de 0.25in/hr)	Lluvia de intensidad alta (>1in/hr)
Sólidos suspendidos (mg/L)	400	2,000	25,000
Tamaño de partícula, mediana (µm)	3.5	5	8.5

### 2.5.3 Demanda química de oxígeno (DQO)

La concentración de materia orgánica se mide con los análisis DBO y DQO. La DBO es la cantidad de oxígeno empleado por los microorganismos a lo largo de un periodo de cinco días para descomponer la materia orgánica de las aguas residuales a una temperatura de 20 °C. De modo similar, la DQO es la cantidad de oxígeno necesario para oxidar la materia orgánica por medio de dicromato de potasio en una solución ácida y convertirla en dióxido de carbono y agua; bajo condiciones específicas de agente oxidante, temperatura y tiempo. El valor de la DQO es siempre superior al de la DBO (aproximadamente doble) porque muchas sustancias orgánicas pueden oxidarse químicamente, pero no biológicamente. La DBO suele emplearse para comprobar la carga orgánica de las aguas residuales municipales e industriales biodegradables, sin tratar y tratadas. La DQO se usa para comprobar la carga orgánica de aguas residuales que, o no son biodegradables o contienen compuestos que inhiben la actividad de los microorganismos.

#### 2.5.4. Nutrientes

El término de nutrientes se denomina al fósforo y nitrógeno, debido a que son sustancias indispensables para el crecimiento de las plantas. Estos tienen como fuentes más importantes en los escurrimientos los fertilizantes usados en jardines, detergentes, residuos animales y vegetales, aguas residuales y la deposición atmosférica del nitrógeno generado de la combustión de motores de autos. El principal efecto sobre el ambiente de los nutrientes es un fenómeno denominado eutroficación, que es el crecimiento desmedido de algas en un cuerpo de agua. Los nutrientes vegetales que pueden estimular el crecimiento de las plantas acuáticas. Éstas, a su vez, interfieren con los usos a los que se destina el agua y al descomponerse, agotan el oxígeno disuelto y producen olores desagradables; productos químicos, incluyendo los pesticidas, varios productos industriales, las sustancias tensoactivas contenidas en los detergentes, y los productos de la descomposición de otros compuestos orgánicos; derivados del petróleo, especialmente el procedente de los vertidos accidentales o desprendimiento asfáltico; minerales inorgánicos y compuestos químicos; así como sedimentos formados por partículas del suelo y minerales arrastrados por las escorrentías pluviales procedentes de tierras de cultivo, los suelos sin protección, las explotaciones mineras, las carreteras y centros urbanos (Rigola, 1989).

El nitrógeno es un nutriente clave en aguas naturales, pero su exceso puede llevar a la eutroficación (Buró et al., 2003). Las especies de nitrógeno inorgánico disuelto (amonio, nitrato y nitrito), nitrógeno orgánico disuelto (la mayor fracción está compuesta por aminoácidos péptidos y a menudo se le llama nitrógeno amino) y nitrógeno particulado orgánico e inorgánico (Badr et al., 2003). Las fuentes de nitrógeno orgánico disuelto (NOD) (como las aminos alifáticas, son productos de degradación de proteínas y aminoácidos; que pueden formar nitrosaminas cancerígenas cuando reaccionan con algunos compuestos nitrogenados) son resultado de procesos biológicos autótrofos, así como también de efluentes industriales y atmosféricos (Simon y Lemacon, 1987).

Los nitritos, representan la forma intermedia, metaestable y tóxica del nitrógeno inorgánico en el agua. Dada la secuencia de oxidación bacteriana: proteínas -a amonio - a nitritos--a nitratos, los

nitritos se convierten en importante indicador de contaminación, advirtiendo sobre una nitrificación incompleta. La existencia nitratos en aguas superficiales no contaminadas y sin aporte de aguas industriales y comunales, se debe a la descomposición de materia orgánica (tanto vegetal como animal) y al aporte de agua de lluvia ( 0,4 y 8 ppm ). Los valores de nitratos y nitritos suelen generarse por el uso masivo de abonos minerales o la filtración de purines. El nitrógeno aplicado de esta manera, que no es asimilado por las plantas es transformado por los microorganismos del suelo en nitrato y luego arrastrado por el agua de lluvia al nivel freático.

#### 2.5.5. Metales pesados

Los metales pesados son elementos químicos con peso molecular entre 63.546 y 200.590 (Kennish, 1992). Los metales con estas características son: mercurio, cadmio, zinc, plomo, cromo, níquel, arsénico, aluminio, talio, cobre, selenio, mercurio y antimonio.

Los organismos vivientes requieren de pequeñas cantidades de estos metales, pero en cantidades elevadas pueden ser perjudiciales. La presencia de metales pesados en ciertas dosis es perjudicial al cuerpo humano, provocando reacciones que van desde alergias hasta un cáncer.

Las fuentes de metales pesados en los escurrimientos pluviales están en su mayoría relacionadas con el uso de automóviles. Por ejemplo, el desgaste de las llantas genera cadmio y zinc; el desgaste de los frenos genera cobre, cromo y níquel. Las fugas de aceite usado de motor de automóvil es una de las fuentes más importantes de metales pesados en escurrimientos pluviales. Es común en los estacionamientos y calles un gran número de manchas de aceite producto de fugas de aceites en motores de autos en mal estado (Figura 2.8a y 2.8b). Además existe una mala práctica de algunas personas de disponer el aceite usado en el suelo. Los metales pesados pueden crear problemas de toxicidad de corto y largo plazo en los ecosistemas acuáticos en donde se descargan los escurrimientos pluviales. Estos pueden bioacumularse en los tejidos de los animales, por lo que pueden terminar en los seres humanos por el consumo de especies acuáticas comestibles

### 2.5.6. Aceites y Grasas

El término de aceite y grasas abarca un gran número de sustancias como aceites de motor, benceno y tolueno de la gasolina, detergentes sintéticos, plaguicidas y un amplio rango de sustancias sintéticas (Harper, 1998). Además de las sustancias enumeradas anteriormente también se incluyen aceites y grasas de origen vegetal y animal, un ejemplo de lo anterior es la emisión de grasas provenientes del gran número de puestos de ventas de tacos y pollos asados en la ciudad (Figura 2.8d). El origen de estas sustancias en los escurrimientos pluviales son, como ya se menciono anteriormente, las fugas de aceite de motor y frenos de autos en mala condiciones, la deposición atmosférica proveniente automóviles y establecimientos de expendio de comidas, vegetación, talleres mecánicos y derrames de aguas residuales provenientes de desbordamiento de los sistemas de alcantarillado combinados (Figura 2.8c).

Dentro de esta categoría, están sustancias llamadas ‘contaminantes persistentes’ debido a que son altamente resistentes a la descomposición, por lo cual se pueden bioacumular en los animales y pueden tener efecto tóxico agudos y crónicos a los seres humanos. Algunos plaguicidas están dentro de esta categoría, así como también los PCBs (policloruros bifenilos). Otros compuestos son los hidrocarburos policíclicos aromáticos (HPA), los cuales existen mas de 100 clases diferentes, pero solo 16 han sido clasificados por la USEPA (Agencia de protección ambiental por sus siglas en inglés) como prioritarios por ser considerados cancerígenos.

### 2.6 Fuentes de Contaminantes

Un número de estudios han vinculado los contaminantes presentes en los escurrimientos pluviales con sus fuentes. Pitt et al. (1995) realizó una revisión bibliográfica sobre fuentes de contaminantes y sus efectos, y también de la toxicidad de muestras de una amplia variedad de fuentes urbanas de áreas permeables e impermeables, las mas altas concentraciones de compuestos orgánicos fueron en escurrimientos provenientes de azoteas, corrientes urbanas, desbordamientos provenientes de drenajes combinados. Las concentraciones mas altas de zinc fueron encontradas en escurrimientos de azoteas debido a las canaletas galvanizadas; las de níquel de áreas de estacionamientos.

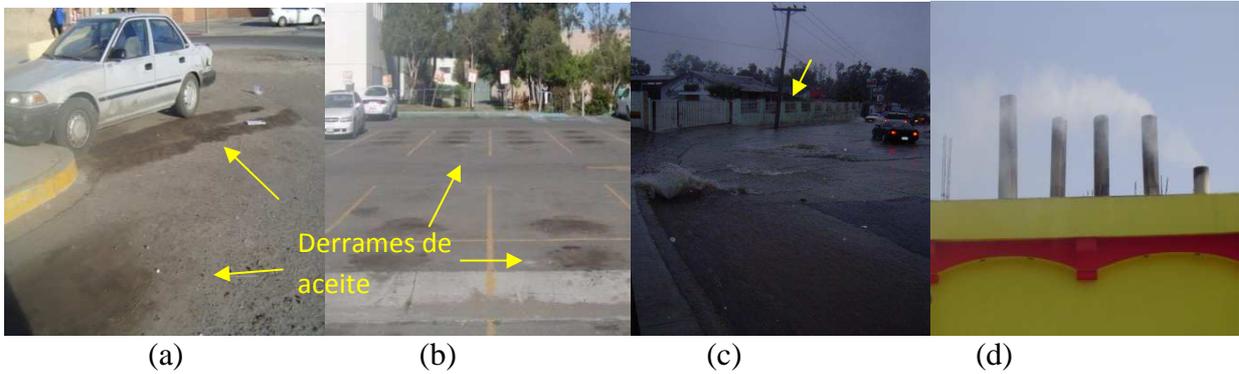


Figura 2.8. a) Derrame de aceite de motor en una calle de la ciudad de Tijuana. b) Manchas de aceite en un estacionamiento. (c) Desbordamiento del sistema de drenaje sanitario durante una lluvia (indicado con la flecha amarilla). (d) Emisión de grasas e hidrocarburos por establecimientos de carne y pollos asados (se observa gran cantidad de grasa escurriendo de las chimeneas (Wakida-Kusunoki, 2011).

Mientras que las áreas utilizadas para servicios de automóviles produjeron las concentraciones más altas de cadmio y plomo. Generalmente la mayoría de los metales en escurrimientos pluviales se originan de calles y áreas de estacionamiento. Otras fuentes de metales son los conservadores para madera, la corrosión de metales, alquicidas, sal para deshielo de caminos, baterías, pinturas y residuos industriales de electroplatinado. Un estudio realizado por la United States Environmental Protection Agency (USEPA, 1983) encontró trece sustancias orgánicas que se detectaron en al menos 10% de las muestras, los compuestos más comunes fueron 1,3-diclorobenceno y fluoranteno (23% de las muestras). Los compuestos orgánicos tóxicos más comunes provienen del uso de automóviles (hidrocarburos policíclicos), combustión de madera y carbón (hidrocarburos policíclicos), uso industrial y doméstico de solventes (alifáticos halogenados y otros compuestos volátiles), conservadores de madera (hidrocarburos policíclicos, creosota, pentaclorofenol), y una variedad de compuestos derivados de la agricultura, carreteras y plaguicidas. Las fuentes urbanas de contaminación más importantes son los sitios de construcción, fosas sépticas, calles, campos de golf, parques, estaciones de servicio, estacionamientos (Pitt et. al. 1995), los contaminantes más importantes de los sitios de construcción provienen de los suelos erosionados (sólidos suspendidos, sólidos disueltos y turbidez), seguidos por hidrocarburos, metales y fertilizantes.

Durante las últimas décadas, una considerable cantidad de investigación se ha realizado para identificar y cuantificar las fuentes de contaminación en escurrimientos pluviales. Se han identificado ocho principales fuentes que son descritas en las siguientes secciones.

### 2.6.3 Pavimento de calles

La degradación de los componentes de la superficie de calles son compuestos comunes en escurrimientos pluviales urbanos. El componente más abundante en los pavimentos de calle es el material agregado con más pequeñas cantidades de asfalto y sustancias aplicadas a las superficies. La cantidad de material que se origina de las superficies de calles depende del tipo y antigüedad de la superficie, clima, promedio diario y tipo de tráfico (Harper 1998).

### 2.6.2 Vehículos de motor

Los vehículos de motor contribuyen con una amplia variedad de materiales a los escurrimientos. Entre los contaminantes comunes generados por estos se incluyen combustibles, lubricantes, partículas provenientes de llantas o frenos, emisiones de los escapes que se colectan de la superficie del camino, productos de la corrosión y partes que caen de los automóviles en movimiento. Aunque la cantidad actual de material generado por la operación de vehículos de motor es relativamente pequeña, la contaminación potencial es significativa ya que muchos de estos materiales son tóxicos a la vida acuática. Se ha encontrado que los vehículos de motor son la principal fuente no puntual contribuyente de asbesto y muchos metales incluyendo plomo, zinc y cobre. Sin embargo no todos los contaminantes generados por los vehículos durante los eventos pluviales son originados por el vehículo mismo, una parte importante de la carga de contaminantes consiste de sustancias orgánicas, nutrientes y sólidos suspendidos que se han adherido a la superficie del vehículo o bajo de este y que son lavados hacia la superficie del camino por la acción de la lluvia o por salpicaduras del escurrimiento de la calle.

### 2.6.3 Deposición atmosférica

Esta se origina como contaminación del aire, polvo y partículas provenientes de procesos industriales, ácidos y metales del combustible fósil utilizado en plantas generadoras de energía, emisiones de polvo de aviones y automóviles, y de tierra sin vegetación. Una gran cantidad de la deposición atmosférica se deposita sobre la superficie del suelo y se incorpora al escurrimiento

durante los eventos pluviales. Otra fracción significativa de la deposición atmosférica consiste en pequeñas partículas que junto con contaminantes tales como óxidos de nitrógeno y azufre se incorporan a la lluvia antes de alcanzar la superficie del suelo. En algunas áreas, las descargas atmosféricas de metales y nutrientes generados por la lluvia exceden las contribuciones generadas en la superficie del suelo.

#### 2.6.4 Vegetación

El material proveniente de los residuos vegetales es una fuente importante de nutrientes y contaminantes orgánicos en los escurrimientos pluviales urbanos. El material orgánico, tal como hojas, pasto y otros que se depositan en áreas urbanas pueden formar parte del escurrimiento pluvial. Estudios recientes sugieren que nutrientes solubles, particularmente fósforo, son liberados rápidamente del material vegetal después de incorporarse al agua.

#### 2.6.5 Cubierta de suelo

El uso de suelo en una cuenca es un factor primario para determinar las características del escurrimiento pluvial generado en esa cuenca. El tipo de cubierta de suelo encontrada en el área de captación de la cuenca así como la cantidad de tráfico vehicular y peatonal es función del uso de suelo y puede tener un efecto directo en la calidad del escurrimiento pluvial generado en esa área.

#### 2.6.6 Basura

La basura consiste en diferentes tipos de material desechado tal como recipientes de comida, material de empaque y desechos animales. Muchos tipos de basura producida por el hombre no constituyen fuentes importantes de contaminación, sin embargo la basura es muy visible y puede llegar a ser estéticamente desagradable cuando es descargada a aguas receptoras. En algunas áreas, los desechos de animales han llegado a ser un principal contribuyente de nutrientes y contaminación bacteriana en los escurrimientos pluviales.

### 2.6.7 Sustancias antiderrapantes y otros compuestos químicos

Las ciudades en regiones con clima frío utilizan grandes cantidades de sales, arena y cenizas para fundir el hielo o proporcionar mejor tracción a los vehículos de motor durante los meses del invierno. Esos materiales se acumulan a lo largo del camino durante esos meses y forma parte del aguanieve cuando la primavera llega. Además compuestos químicos como fertilizantes, insecticidas y herbicidas son usados en el mantenimiento de áreas verdes a los bordes de la carretera. Aunque las cantidades utilizadas de esas sustancias son relativamente pequeñas, la acumulación y sus efectos tóxicos toman importancia en un escurrimiento.

### 2.6.8 Sitios de construcción

La erosión a partir de superficies con suelos removidos durante actividades de construcción es una fuente muy visible de material suspendido en los escurrimientos pluviales. La erosión del suelo es una de las fuentes principales de sólidos en los escurrimientos pluviales en áreas urbanas y suburbanas.

### **3. DESCRIPCION DE SITIOS DE MUESTREO**

#### 3.1 Descripción de sitios de muestreo de escurrimiento pluviales

Siete sitios de muestreo fueron seleccionados en la zona norte de la ciudad de Tijuana en el área de la Mesa de Otay, de los cuales cuatro sitios tienen un uso de suelo predominantemente habitacional (SR1, SR2, SR3 y SR4), dos sitios con uso de suelo industrial (SI1 y SI2) y un sitio con uso de suelo comercial y de transporte (SCT). Los principales criterios en la selección de estos sitios fue la accesibilidad y seguridad, así como que estos sitios representaran los principales usos de suelo de la ciudad de Tijuana. Las características descritas en esta sección son producto de visitas de campo y observaciones. Las pendientes se calcularon mediante la medición de distancias y alturas de los sitios de muestreo.

El sitio SR1 es un sitio con uso de suelo principalmente habitacional en la cual existen un número de puestos ambulantes de comida. Los sitios SR2 y SR3 drenan un área con casas de familias de clase media. La densidad de población es aproximadamente 63 habitantes por hectárea. Existen en el área de la cuenca de estos sitios talleres mecánicos y de carrocería. El sitio SR4 tiene una cuenca aproximada de 13 hectáreas con una densidad de población mayor a los sitios SR2 y SR3 (92 habitantes por hectárea). Los sitios SI1 y SI2 drenan área con uso de suelo industrial. El tipo de industria predominante en estos sitios es la llamada maquiladora.

El sitio SCT está localizado en una zona en donde existen varias terminales de transporte foráneo. Las características específicas de los sitios de muestreo son presentados en la Tabla 3.1 y los sitios de muestreo son marcados en la Figura 3.1. Una descripción detallada de los sitios de muestreo es dada más adelante.

Tabla 3.1 Características de los sitios de muestreo de escurrimientos pluviales.

Sitio	Uso de suelo	Área (ha)	% de superficie permeable	Promedio de pendiente (%)
SR1	Habitacional	3.8	25	12.2
SR2	habitacional	8.0	12	4.0
SR3	habitacional	13.0	10	3.4
SR4	habitacional	13.9	17	3.2
SCT	Comercial y transporte	3.9	7	1.8
SI1	Industrial	3.5	9	0.7
SI2	Industrial	69.1	8	5.1



Figura 3.1. Sitios de muestreo en la ciudad de Tijuana.

### 3.1.1 Sitio SR1: Parte baja

Este sitio se encuentra localizado en la Colonia Rio Parte Baja, en la esquina de las calles Rodolfo Gaona y Silvia de Maldonado. Sus coordenadas son: 32°31'49.34"N, 116°59'30.56"O con una altitud de 123 metros sobre el nivel del mar. Se encuentra en una zona principalmente habitacional, al final de una calle con una pendiente pronunciada de 12.2%. En la cuenca de este sitio se puede observar un taller de motocicletas y de radiadores, puestos ambulantes de comida, así como

negocios de ventas de tacos (Figura 3.2). En estos talleres se observó en la visita a los sitios un mal manejo de sustancias como solventes. En la Figura 3.3 se muestra fotos del sitio.



Figura 3.2. (a) Taller mecánico de motocicletas (b) negocios de comida cercanos al sitio SR1.



Figura 3.3 Vista de sur a norte del sitio SR1 (a) sin escurrimiento, (b) durante el muestreo.

### 3.1.2 Sitio SR2: Tomas Aquino calle

Este sitio se localiza en el fraccionamiento Tomas Aquino al final de la calle Veracruz y la rampa descendente hacia la colonia Buena Vista llamada Volcán Toluca. Sus coordenadas son  $32^{\circ}31'39.13''N$ ,  $116^{\circ}59'05.56''W$  con una altitud de 125 metros sobre el nivel del mar. La zona tiene un uso de suelo predominantemente habitacional, en el sitio de toma de muestra con una pendiente ligera de 4.0 %. En la parte alta (cercana a la calzada Tecnológico) predominan talleres de carrocería y pintura, llantera, fondas, comercios, así como casas-habitación (Figura 3.4). Cerca de la toma de muestra (Figura 3.5) está un estacionamiento para camiones de carga de un almacén de dulces, con tráfico vehicular continuo.



(a)



(b)

Figura 3.4 (a) Taller mecánico y (b) algunos negocios por la parte superior del sitio SR2.



(a)



(b)

Figura 3.5 Vista de sur a norte del sitio SR2 (a) sin escurrimiento, (b) durante el muestreo

### 3.1.3 Sitio SR3: Tomas Aquino canal

El sitio localizado en el fraccionamiento Tomas Aquino, a unos 20 metros del sitio SR2, el canal pluvial donde escurren las aguas en la “y griega” de las calles Veracruz y la calle Sierra Mojada (Figura 3.6b), que desciende lateralmente del lado izquierdo hacia la Colonia Buena Vista. Sus coordenadas son 32°31'38.86''N, 116°59' 05.13''W con una altitud de 142 metros sobre el nivel del mar. La zona tiene un uso de suelo predominantemente habitacional, con talleres de carrocería y pintura, llantera, fondas y comercios de los descritos en el sitio SR2. El punto de muestreo fue en la parte alta del canal con una pendiente ligera de 3.4 %. (Figura 3.7).



(a)



(b)

Figura 3.6 (a) Parte inicial del canal (b) calle lateral izquierda de terracería



(a)



(b)

Figura 3.7 (a) Toma de muestra en el sitio SR3, (b) escurrimiento en calle de terracería.

### 3.1.4 Sitio SR4: Altabrisa

Este sitio se encuentra localizado en el Fraccionamiento Altabrisa, en un canal pluvial localizado en la parte media de la calle Constituyentes, al inicio de su descenso con una pendiente ligera de 3.2 % y adyacente a un parque (Figuras 3.8 y 3.9). Sus coordenadas son 32°32'06.35''N, 116°58'20.31''W con una altitud de 131 metros sobre el nivel del mar. Es una zona predominantemente habitacional con algunos comercios establecidos y ambulantes en la parte de arriba de la calle de la Independencia.



(a)



(b)

Figura 3.8 Vista del sitio SR4 (a) descendente, (b) ascendente.



(a)



(b)

Figura 3.9 (a) Toma de muestra en el sitio SR4, (b) vista del sitio sin escurrimiento.

### 3.1.5 Sitio SCT: Central camionera

Este sitio está localizado en la colonia Guadalupe Victoria. El punto de muestreo se localiza en la desembocadura de una boca de tormenta en la Avenida Juan Ojeda Robles a un lado de la central de autobuses Estrella de Oro, con una pendiente de 3.9 % (Figura 3.10). Sus coordenadas son  $32^{\circ}30'59.26''N$ ,  $116^{\circ}57'48.30''W$  con una altitud de 43 metros sobre el nivel del mar. Es una zona de alto flujo vehicular; además, predominan negocios como fondas y comercio ambulante, con algunos talleres mecánicos y llanteras (Figura 3.10).



Figura 3.10 (a) Sitio SCT con escurrimiento de la calle, (b) vista del sitio sin escurrimiento.

### 3.1.6 Sitio SII: Zona industrial 1

El sitio se encuentra ubicado en la zona industrial de la Mesa de Otay cercano a la garita comercial, el canal pluvial está al costado de la avenida de ingreso a dicha garita con una pendiente de 3.5%, en ambos lados existen naves industriales. Sus coordenadas son  $32^{\circ}32'59.07''N$ ,  $116^{\circ}54'26.52''W$  con una altitud de 143 metros sobre el nivel del mar. La zona tiene un uso de suelo predominantemente industrial, con tráfico de vehículos de carga y numerosos estacionamientos de las instalaciones de las naves industriales (Figura 3.11). En la Figura 3.12 se muestran fotografías SII.



Figura 3.11 (a) uno de los estacionamientos y (b) algunas instalaciones industriales cercanas al sitio SII.



(a)



(b)

Figura 3.12 (a) Vista del sitio SII de norte a sur y (b) toma de muestra en el sitio.

### 3.1.7 Sitio SI2: Zona industrial 2

El sitio se encuentra ubicado en la zona industrial de la Mesa de Otay cercano en los linderos con la colonia Murua, en la calle Francisco I. Madero en ambos lados existen naves industriales. Sus coordenadas son  $32^{\circ}31'38.89''N$ ,  $116^{\circ}54'51.49''W$  con una altitud de 68 metros sobre el nivel del mar. La zona tiene un uso de suelo predominantemente industrial, con tráfico de vehículos ya que esta calle es el acceso de la colonia Murua con la zona Industrial y numerosos estacionamientos de las instalaciones de las naves industriales. En las Figuras 3.13a y 3.13b se muestran las vistas del sitio del muestreo.



(a)



(b)

Figura 3.13. (a) Vista del sitio SI2 hacia el este, calle arriba. (b) Vista del sitio SI2 hacia el oeste calle abajo.

## 4. METODOLOGÍA

### 4.1 Muestreo

Se seleccionaron 7 diferentes sitios en la zona urbana de la ciudad de Tijuana, en el área de la Mesa de Otay. Se realizaron siete muestreos en cada uno de los sitios durante la temporada de lluvias correspondiente al periodo 2009-2010. La Tabla 4.1 muestra los datos de los eventos pluviales. En todos los sitios las muestras fueron tomadas directamente de las corrientes de las calle o de los pluviales (como el caso de los sitios SR3 y SI1). Se tomaron dos muestras en cada sitio en las primeras dos horas después del comienzo de la precipitación, cuando los contaminantes están más concentrados. Las muestras fueron transportadas en recipientes de polietilenos de alta densidad prelavados y analizados dentro de las 24 horas siguientes.

Tabla 4.1. Datos de los eventos de lluvia muestreados.

Evento pluvial	Fecha (mes-día-año)	Intensidad promedio de precipitación (mm/hr)	Máxima intensidad de precipitación (mm/hr)	Precipitación total (mm)	Días sin lluvias previos al evento muestreado (días)
1	11-28-2009	1.6	4.0	10.4	39
2	12-12-2009	4.5	6.0	48.8	13
3	1-18-2010	3.8	9.0	14.5	27
4	2-05-2010	2.3	4.0	6.9	17
5	2-20-2010	2.2	3.0	8.9	14
6	2-27-2010	2.2	5.0	26.4	6
7	3-06-2010	1.0	1.0	2.5	6

Para homogeneizar el procedimiento de toma de muestras siempre se siguieron los siguientes pasos. Se eligió previamente un punto de cada sitio de muestreo para la toma de escurrimiento pluvial. El muestreador de plástico, se enjuago tres veces con el agua del escurrimiento antes de tomar la muestra, la que se depositó en recipientes de plástico previamente lavados en el laboratorio, enjuagados primero con una solución diluida de ácido nítrico y finalmente con agua desionizada.

## 4.2 Métodos utilizados en el análisis de las muestras

Los métodos de análisis utilizados se enlistan en la Tabla 4.2. El esquema de análisis de cada muestra de escurrimiento pluvial fue hecha de la siguiente manera: La muestra primeramente fue separada en dos partes.

Tabla 4.2 Métodos usados para análisis de muestras

Parámetro	Método
Conductividad/Sólidos Totales Disueltos	120.1 de USEPA/2510-B de APHA
Nitrógeno Total	Método de de digestión de persulfato. Método HACH No. 10071
Nitrato	4500-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> E de APHA, 1995 8039 – Método de Reducción de Cadmio
Fósforo total	365.2 de USEPA/4500-P B,5 de APHA 10127 – Método Molibdovanadato c/digestión persulfato ácido 8190 – PhosVer3 c/digestión persulfato ácido
Demanda Química de oxígeno	Adaptación de Jirka y Carter, 1975 8000 - Método de Reacción por Digestión
Sólidos Suspendidos Totales	2540 D de APHA, 1995
Turbidez	Standard methods 2130B

Una parte de la muestra fue separada y marcada como la muestra no filtrada. La otra parte de la muestra fue primero pasada a través de tamices de 300, 150 y 63  $\mu\text{m}$  y después filtradas usando filtros de tamaño de poro 10, 1.2 y 0.45  $\mu\text{m}$ . Cada una de las fracciones resultado de las tamizada y filtraciones fueron analizadas para la demanda química de oxígeno, fósforo total, nitrógeno total, nitratos y turbidez, con el fin de calcular el contenido de contaminantes asociados con los diferentes tamaño de partícula en los escurrimientos pluviales.

Los métodos utilizados y tiempos de preservación de las muestras se realizaron conforme a Hach Water Analysis Handbook 3er Edition. La descripción detallada de los métodos citados puede consultarse en los anexos.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1 Caracterización de fracciones de sólidos suspendidos

Los porcentajes de fracciones de partícula acumulativas se muestran en la Figura 5.1. Los resultados han demostrado que la mayoría de las partículas en las muestras de escurrimientos pluviales están en la fracción de tamaño entre  $10\mu\text{m}$  y  $62\mu\text{m}$ . Esta fracción de partícula representa entre 56 a 82% de los sólidos totales en suspensión en todas muestras. El sitio residencial SR1 tiene el porcentaje más bajo de partículas entre 10 a  $62\mu\text{m}$  (56%) y tiene el mayor porcentaje de tamaño de partícula entre 62 a  $150\mu\text{m}$  (20%). Esto puede ser producto de la alta pendiente encontrada en los alrededores del sitio de muestreo, resultando en una alta velocidad de flujo de los escurrimientos los cuales pueden acarrear grandes partículas del suelo. Otra característica de este sitio es el alto porcentaje de la superficie de área sin recubrimiento (terrenos baldíos y calles sin pavimentar). Esto produce grandes tasas de sólidos en suspensión debido a la erosión producida por las condiciones urbanas de escurrimiento en el sitio SR1.

Para los sitios industriales (SI1 y SI2), como en todos los sitios muestreados, los porcentajes más altos de los sólidos en suspensión fueron entre 10 a  $62\mu\text{m}$ . El mayor porcentaje de la fracción de partícula entre 1.2 y  $10\mu\text{m}$  fue en sitio SI1 (19% aproximadamente), este valor es tres veces más que el valor promedio encontrados en los otros sitios (5.2%). El sitio SR1 también mostró los más altos porcentajes de fracción de partícula en el rango de 1.2 a  $0.45\mu\text{m}$  (20%) y SR2 (8%), esto es debido al alto porcentaje de la superficie sin recubrimientos y el tipo de suelo arcilloso.

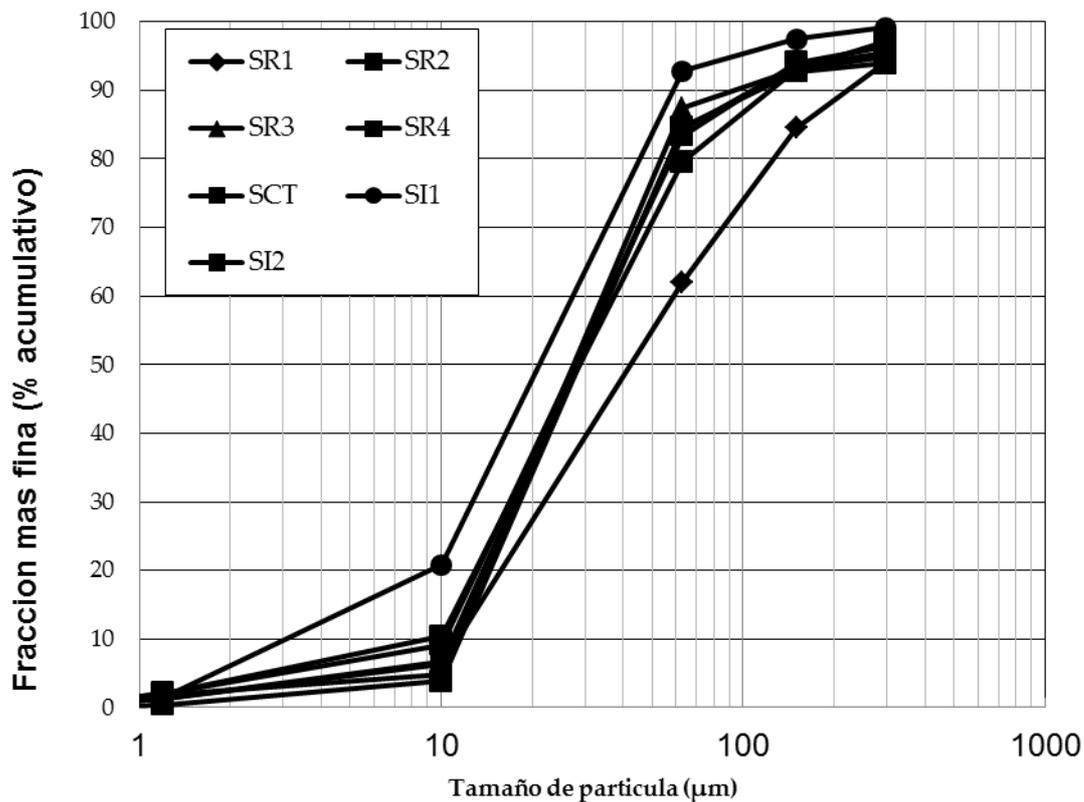


Figura 5.1. Fracciones de tamaño de particular en las muestras de agua de lluvia.

## 5.2 Sólidos Suspending Totales

El rango de los promedios de SST en los sitios de muestreo fue entre 725.1 a 4 411.6 mg/L, la más alta concentración de SST observada corresponde al sitio SR1 (Tabla 5.1). Las concentraciones promedio de SST en los SR1 y SR4 son 65 y 10 veces más altas, respectivamente, que los promedios reportados por la National Stormwater Data Quality (NSDQ) (Pit et al. 2004), para sitios de uso de suelo habitacional. Esta alta concentración de SST en el sitio SR1 es debido, probablemente, a la alta pendiente de la zona y a la proximidad de calles sin pavimentar localizadas en el área de la cuenca del sitio que transporta altas cantidades de sedimentos debido a la erosión. Este sitio (SR1) también tiene la mayor concentración media de fosfatos totales, turbidez y DQO. El promedio de concentración de SST en el sitio SR4 (725 mg/L) fue la más baja. Este sitio con uso de suelo habitacional tiene características que otros sitios no tienen. Primeramente, no existe ninguna avenida principal en la cuenca. Además, la mayoría del área permeable en la cuenca consiste de un parque y no existen calles sin pavimentar. Debido a un

nivel socioeconómico más alto de los residentes, los jardines reciben un mejor mantenimiento, a diferencia de los otros sitios habitacionales donde la mayoría de los patios no cuentan con jardines y generalmente no cuentan con vegetación.

Tabla 5.1. Concentraciones de SST en los sitios de muestreo.

	28/11/9	7/12/9	18/01/10	5/2/10	20/2/10	27/2/10	6/3/10	Promedio
SR1	5407.7	4994.6	484.2	1023.4	3082.5	4765.1	11123.5	4411.6
SR2	1731.9	3624.8	604.1	2130.1	474.1	1618.9	2444.5	1804.1
SR3	1539.0	1219.2	740.2	1038.4	1067.6	840.1	3059.6	1357.7
SR4	1162.2	656.4	292.5	455.5	617.9	658.9	1232.5	725.1
SCT	1136.2	1964.7	7491.1	1058.7	1023.7	4673.5	9273.7	3803.1
SI1	936.1	2076.2	411.2	1159.4	1607.9	1606.0	1541.5	1334.0
SI2	5407.7	1140.2	4582.8	216.2	322.4	922.7	1280.0	1981.7

### 5.3 Turbidez

El intervalo de los valores promedios de turbidez están entre 454 NTU a 2061.4 NTU (Tabla 5.2), se observa que el sitio SR1 presenta el promedio más alto en la turbidez con un valor de 2061.4 NTU, esto debido al tipo de terreno altamente erosionado y a las condiciones de su superficie (ya descrito en el apartado anterior). El sitio SR4 contrasta con el sitio SR1 que presenta el promedio más bajo de 454 NTU que concuerda con la de una zona habitacional en mejores condiciones de sus calles pavimentadas y de áreas verdes bien atendidas. Los valores de turbidez concuerdan con los resultados de los SST correspondientes a los sitios SR1 y SR4. El valor de turbidez encontrado en el sitio SR1 es alrededor de 34 veces más alto que los valores reportados por Morquecho (2005).

Tabla 5.2. Valores de turbidez analizados en los sitios de muestreo.

	28/11/9	7/12/9	18/01/10	5/2/10	20/2/10	27/2/10	6/3/10	Promedio
SR1	6840.0	1448.0	258.0	964.0	1922.0	936.7	na	2061.4
SR2	1466.0	990.0	611.0	1250.4	569.0	1441.0	na	1054.6
SR3	2252.0	3356.0	642.0	797.0	1172.0	764.0	na	1497.2
SR4	1094.0	347.0	222.0	361.0	406.0	294.0	na	454.0
SCT	996.0	862.0	4284.0	1026.0	1109.2	3576.0	na	1975.5
SI1	1292.9	2483.6	135.0	96.4	2265.7	2260.6	na	1422.4
SI2	2264.0	500.0	1323.0	183.0	355.0	993.0	na	936.3

#### 5.4 Fósforo total

Las concentraciones promedio de FT en los escurrimientos pluviales estuvieron en el intervalo de 7.5 a 25.7 mg/L (Tabla 5.3). Las mayores concentraciones de FT fueron encontradas en sitios SR1 y SCT (25.7 y 23.4 mg/L, respectivamente). Las posibles fuentes de las altas concentraciones de FT en el sitio SR1 son los sedimentos depositados en las calles y los residuos de un mercado sobre ruedas que se instala una vez por semana en el área de la cuenca del sitio. Para el sitio SCT, el posible origen es un pequeño lienzo charro con un establo localizado a 50 metros del sitio de muestreo SCT. Altas concentraciones promedio de FT también fueron encontradas en los sitios SR2 y SR3 (17 y 12 mg/L, respectivamente); las fuentes podrían ser las mismas que aquellas mencionadas para el sitio SR1. En adición a las fuentes de FT mencionadas anteriormente, el FT puede originarse de partículas de suelo arrastradas por los escurrimientos. Las más altas concentraciones de FT fueron encontradas en los sitios con más altos porcentajes de área sin recubrimiento (o permeable). Los sitios SR4 y SCT fueron la excepción a esto. El sitio SR4 tiene un alto porcentaje de área permeable, pero el fósforo no es tan alto como los sitios SR1, SR2 y SR3 debido a que la gran mayoría de su área permeable es un parque en el cual no existe erosión. Por otro lado, el sitio es SCT tiene un bajo porcentaje de área permeable y una alta concentración

de FT fue encontrada en sus escurrimientos. La razón es la presencia de un establo que es una fuente puntual de fósforo y de nitrógeno.

Tabla 5.3. Concentraciones de FT en los sitios de muestreo.

	28/11/9	7/12/9	18/01/10	5/02/10	20/02/10	27/02/10	6/03/10	Promedio
SR1	66.3	22.8	2.3	12.2	36.8	16	23.5	25.7
SR2	9.2	40.0	4.5	28.2	6.8	13.7	17.6	17.1
SR3	8.1	16.0	3.4	9.8	10.8	13.6	22.5	12.0
SR4	10.7	6.2	2.9	8.9	11	5.7	9.7	7.9
SCT	10.2	17.3	23.7	25.6	15.4	28.7	42.9	23.4
SI1	5.4	10.8	2.62	9.6	8.8	8.8	6.7	7.5
SI2	10.7	5	9.7	4.5	5.8	6.8	14.3	8.1

### 5.5 Nitrógeno total

Las concentraciones de NT obtenidas en los muestreos, así como los promedios son presentadas en la Tabla 5.4. El promedio más alto de la concentración de NT fue en el sitio Parte Baja SR1 (15.7 mg/L); la causa más probable de esta alta concentración es la basura de origen vegetal que dejan los vendedores de verdura del mercado sobre ruedas que se instala en la cuenca de este sitio. Las concentraciones de NT fueron también altas en los sitios SCT y SR4 (14.1 y 13.4 mg/L, respectivamente). La fuente de NT en el sitio SCT, como se mencionó anteriormente, es el establo y el lienzo charro donde los caballos son mantenidos durante los eventos. Para el sitio SR4 restos de vegetación pueden ser la fuente principal, debido a que este sitio drena escurrimientos procedentes de un parque. Los valores de NT encontrados en los sitios de muestreo fueron alrededor de 3 a 7 veces más altos que los reportados por Taylor et al. (2005) y la NSQD (Pit et al. 2004).

Tabla 5.4. Concentraciones de NT en los sitios de muestreo.

	28/11/9	7/12/9	18/01/10	5/02/10	20/02/10	27/02/10	6/03/10	Promedio
SR1	23.9	23.9	5.2	18.6	12.4	13.4	12.4	15.7
SR2	10.6	8.6	4.8	13.4	5.6	11.7	14.9	9.9
SR3	11.6	9.3	6	8.3	5.8	8.7	9.4	8.4
SR4	14.2	7.6	7.4	18.8	4.6	21.3	18.2	13.2
SCT	9.6	NA	8.7	NA	9.9	27	15.4	14.1
SI1	9.8	3.2	4.5	3.2	5.6	7.6	17.2	7.3
SI2	11.2	NA	5.6	7.1	2.6	5	7.2	6.5

### 5.6 Demanda química de oxígeno

El rango de los promedios de DQO fue de 236.4 a 765 mg/L (Tabla 5.5), la concentración más alta fue el en sitio SR1, producido por el alto contenido de SST en las muestras, así como también de aceite y grasa producto de los vendedores ambulantes de alimentos y el taller de reparación de motocicletas situado en el área de la cuenca de este sitio. Los valores promedio de DQO para los otros sitios residenciales fueron entre 319 y 421 mg/L, aproximadamente 5 a 8 veces más alto que los valores promedio reportados por los datos de NSQD (Pitt et al. 2004). Los altos valores de DQO pueden ser resultado de fugas de aceite de motor de autos con pobre mantenimiento que terminan sobre las superficies de las calles y estacionamientos (Mijangos et al. 2010). García-Flores et al. (2013) encontraron altas concentraciones de hidrocarburos aromáticos poli cíclicos en los mismos sitios muestreados: 4866 µg/L para el sitio SR4 y 3483 µg/L para el sitio SCT. García-Flores et al. (2009) encontraron altas concentraciones de aceites y grasas en muestras de escurrimientos pluviales para los sitios con uso de suelo habitacional (promedio de 20 mg/L), para los sitios industriales (14 mg/L) y para el sitio SCT (19 mg/L). Estos valores son 5 y 3 veces más altos, respectivamente, que los valores de las medianas reportados por la NSDQ (Pitt et al. 2004) para sitios de uso de suelo habitacional e industrial.

Tabla 5.5. Concentraciones de DQO en los sitios de muestreo

	28/11/9	7/12/9	18/01/10	5/02/10	20/02/10	27/02/10	6/03/10	Promedio
SR1	1360	1071	324	452	997	509	643	765.1
SR2	598	642	190	490	258	423	347	421.1
SR3	589	482	254	416	302	315	474	404.6
SR4	651	385	95	247	283	261	314	319.4
SCT	735	590	774	522	254	774	560	601.3
SI1	346	232	117	227	317	271	145	236.4
SI2	710.4	205	711	85	181	305	440	376.8

### 5.7 Relación entre contaminantes y tamaño de partícula

La Tabla 5.6 muestra los porcentajes de los parámetros medidos asociados con partículas en las muestras de escurrimientos pluviales. El porcentaje de DQO asociado con partículas varía de 75 a 82 %, el porcentaje más alto corresponde al sitio SCT y el más bajo al SR4. Las muestras de los otros sitios (SR1, SR2, SR3, SI1 y SI2) muestra un poco de variación en el porcentaje de DQO asociado con partículas (76 al 81%). Los porcentajes de concentración de DQO asociados con las fracciones de partículas en este estudio fueron más altos que los valores reportados en otros estudios (Pitt et al. 1998; Morquecho 2005). Estos autores reportaron concentraciones de DQO asociados a partículas en el rango de 14 a 63%. Estas diferencias en el porcentaje asociados a partículas puede ser el resultado de que los contaminantes sean adsorbidos en las superficies de las partículas. Manchas de aceite de motor son comúnmente vistas sobre las superficies de las calles y estacionamientos en Tijuana, donde el sedimento se deposita. Estas partículas son transportadas por los escurrimientos y una pequeña cantidad de los hidrocarburos será desadsorbidas en el agua. García-Flores et al. (2009) encontraron concentraciones de hidrocarburos totales en sedimentos depositados en calles en el rango de 1870 a 7069 mg/kg.

Los valores de porcentaje de FT asociados a partículas fueron entre 82 y 93%, mostrando una mayor asociación con SST. El porcentaje más bajo de FT asociado a las partículas fue encontrado en el sitio SR4 donde las superficies permeables son en su mayoría jardines y un parque.

Tabla 5.6. Porcentaje de los parámetros medidos asociados con partículas de materia.

Sitio	DQO		NT		PO <sub>4</sub> -P		Turbidez	
	% asociado con partículas	% fracción filtrable	% asociado con partículas	% fracción filtrable	% asociado con partículas	% fracción filtrable	% asociado con partículas	% fracción filtrable
<i>SR1</i>	79	21	59	41	93	7	99.9	0.1
<i>SR2</i>	76	24	66	34	93	7	99.8	0.2
<i>SR3</i>	76	24	67	33	91	9	99.9	0.1
<i>SR4</i>	75	25	49	51	82	18	99.5	0.5
<i>SCT</i>	82	18	60	40	92	8	99.9	0.1
<i>SII</i>	78	22	81	19	92	8	99.9	0.1
<i>SI2</i>	81	19	68	32	88	12	99.7	0.3

El porcentaje de FT asociado a partículas fue superior al 90% en la mayoría de las muestras. Estos valores muestran que la mayoría del fósforo en las muestras de escurrimientos pluviales están ligados a partículas que pueden tener su origen en partículas de suelos erosionados. El porcentaje de FT asociado a partículas fue también más alto que en otros estudios. Whaschbusch et al. (1999) encontraron que el 42 al 79% del FT estuvo asociado con partículas en escurrimientos pluviales de dos cuencas residenciales. La mayor fuente de FT hacia los escurrimientos pluviales fueron escurrimientos de los jardines con pasto. Los escurrimientos de jardines de pasto fueron el 55% del total de la carga de FT de estas cuencas. Morquecho (2005) encontró un rango entre 44 y 64% de FT asociado a partículas en escurrimientos pluviales provenientes de techos y superficies impermeables.

El porcentaje de NT asociado con SST en las muestras de escurrimientos pluviales fueron más bajas que aquellas observadas para DQO y FT. Los valores de porcentaje fueron entre 49 a 81%, la mayoría de las muestras estuvieron entre 59 y 68%. Estos valores son similares a los valores reportados por Vaze y Chiew (2004) cuyos valores tuvieron un rango entre 50 y 80% del total de

nitrógeno asociado a partículas. Taylor et al. (2005) reportaron un valor menor de porcentaje para nitrógeno orgánico particulado (24%) en escurrimientos pluviales.

Los porcentajes de los valores de turbidez como se esperaba están altamente asociados con partículas y los valores turbidez asociados con partículas fueron casi el 100%. Los resultados muestran una alta asociación de las concentraciones de DQO y FT con sólidos suspendidos en las muestras. Sin embargo no se observó una alta asociación entre sólidos suspendidos y NT en las muestras de escurrimientos pluviales.

La Tabla 5.7 muestra el porcentaje de los parámetros medidos asociados con la fracción de partículas superiores a 0.45 y 10 $\mu$ m en las muestras de escurrimientos pluviales. Debido a que la mayoría de las partículas en las muestras estuvieron en la fracción entre 10 y 62 $\mu$ m, un alto porcentaje de los parámetros medidos se asoció con este rango de fracción de partícula. El porcentaje de DQO de partículas mayores a 10  $\mu$ m varían entre 55 a 82% del total de DQO. La fracción de partícula entre 0.45 a 10  $\mu$ m en los sitios SR4 y SCT fueron solamente de 5% del total de los sólidos suspendidos, pero contribuyeron con el 28 y 30% del total de DQO. En el resto de los sitios, esta fracción de partículas (0.45 a 10  $\mu$ m) contribuyó entre 6 y el 12% (tabla 5.7).

Los porcentajes de concentración NT asociados con la fracción de partícula mayores a 10  $\mu$ m fueron entre 26 y 56%. Los porcentajes de NT soluble y NT particulado no siguen una tendencia como en el DQO y FT. Por ejemplo, el 30% y el 36% del NT medido en los sitios SI1 y SR3 están asociado con la fracción de partícula entre 0.45 y 10 $\mu$ m. El NT asociado con formas solubles de nitrógeno en las muestras fue entre 42 y 67%. El fósforo total medido en las muestras fue principalmente en la fracción de partículas mayores a 10  $\mu$ m, los valores tuvieron un rango entre 75 a 92%. Los valores de los porcentajes de NT asociados con la fracción de partícula entre 0.45 a 10  $\mu$ m fueron entre 1 y 8%.

Los resultados sugieren que para remover efectivamente el DQO, el FT, la turbidez y el NT asociado a partículas, las instalaciones de tratamiento de escurrimientos pluviales tendrían que remover la fracción partículas 10  $\mu$ m. Aún así estas instalaciones solamente removerían un poco más de la mitad del NT para los sitios SR1, SR2, SR4 y SI2. Y cerca de una tercera parte del NT

para los sitios SR3, SCT y SI1, debido a que gran cantidad de NT presente en los escurrimientos se encuentra en solución.

Dada la disponibilidad biológica de nitrógeno disuelto, su concentración puede ser reducida mediante el uso de sistemas que combinen la nitrificación y una subsecuente desnitrificación. Los humedales para escurrimientos pluviales o sistema de biofiltración pueden ser apropiados para este tratamiento (Taylor et al. 2005).

Tabla 5.7 Porcentaje de los parámetros medidos asociados con tamaños de partículas superiores a 10 y 0.45  $\mu\text{m}$ .

Sitio	DQO		NT		PO <sub>4</sub> P		Turbidez	
	10	0.45	10	0.45	10	0.45	10	0.45
<i>SR1</i>	78.2	84.0	52.9	58.8	89.3	93.2	86.4	99.9
<i>SR2</i>	76.1	82.1	48.7	66.2	91.5	92.7	95.6	99.8
<i>SR3</i>	67.8	77.7	31.1	66.7	86.7	90.5	96.2	99.9
<i>SR4</i>	55.8	84.3	51.0	59.5	74.5	81.6	92.8	99.5
<i>SCT</i>	55.1	85.1	25.9	42.0	89.1	92.0	95.5	99.9
<i>SI1</i>	79.4	85.8	26.0	56.0	87.2	92.3	81.9	99.9
<i>SI2</i>	81.6	94.1	55.9	57.5	80.1	87.8	96.4	99.7

## 6. CONCLUSIONES

Los resultados muestran gran asociación de SST con FT, turbidez y DQO. Entre el 82 y 93% de FT, y 75 a 82% del DQO están asociados con partículas suspendidas en escurrimientos pluviales. Las concentraciones de TN en muestras de agua de lluvia no están totalmente ligadas a partículas ya que entre el 19 a 51% del TN se encuentra en disolución. Es importante conocer la proporción entre los contaminantes y los TSS porque la selección del método de tratamiento de aguas pluviales debe tener en cuenta que la eliminación de TSS también eliminaría una gran proporción de los contaminantes asociados con las partículas. Los resultados sugieren que para eliminar con eficacia la turbidez, DQO y TP, las instalaciones de tratamiento de aguas pluviales deben ser capaces de remover la fracción de partículas menores de 10  $\mu\text{m}$ . Además, estas instalaciones deben ser capaces de combinar la nitrificación y desnitrificación con el fin de eliminar el nitrógeno, ya que un alto porcentaje de nitrógeno está en forma disuelta.

Los escurrimientos pluviales urbanos son una fuente importante de contaminantes a los cuerpos de agua, desafortunadamente en nuestro país no existe ninguna regulación para el control de su calidad. En particular en Tijuana y en todo el país, se le ha dado un énfasis mayor al control de las avenidas para reducir el riesgo de inundación, sin tratar de darle una solución más integral en el cual se tome en cuenta ambos enfoques. Una herramienta sería la planeación del uso del suelo que permitiría la inclusión de ciertas prácticas que podrían disminuir el caudal y los contaminantes descargados a los cuerpos de agua. Estas prácticas podrían incluir el uso de pavimento permeable en estacionamientos o un incremento de zonas permeables para disminuir el volumen de los escurrimientos; la construcción de lagunas de retención haciendo uso de espacios comunes, por ejemplo, parques o áreas verdes o el uso de canales con vegetación para la retención de contaminantes.

## 7. REFERENCIAS

- Aryal R, Vigneswaran S, Kandasamy J, Naidu R (2010). Urban stormwater quality and treatment  
Korean journal of chemical engineering 27 (5):1343-1359
- Ashley JTF, Baker JE (1999). Hydrophobic organic contaminants in surficial sediments of  
Baltimore harbor: inventories and sources. Environmental toxicology and chemistry  
18(5):838-849.
- Auge M (2006). Agua subterránea. Deterioro de calidad y reserva. Buenos Aires, Facultad de  
Ciencias Exactas y Naturales. Departamento de ciencias geológicas. Cátedra de  
Hidrogeología, Universidad de Buenos Aires.
- Badr A, Achterberg EP, Tappin AL, SJ Hill, CB Braungardt (2003). Determination of dissolved  
organic nitrogen in natural waters using high temperature catalytic oxidation. Trends in  
analytical chemistry 22:819-827.
- Bang KW, Lee JH, Yu MJ (1997). A study of runoff characteristics of nonpoint sources in small  
urban watersheds. Journal of the korean society water quality 13(1):79-100.
- Barret ME, Zuber R, Collins ER, Malina JF, Charneneau R, Ward GH (1995). A review and  
evaluation of literature pertaining to the quality and control of pollution from highway  
Runoff and Construction. The University of Texas at Austin, Center for Research in Water  
Resources, CRWR Technical Report 239, second edition. Austin, TX, April 1995.
- Bochis-Micus C, Pitt RE (2005). Impervious surfaces in urban watersheds. Proceedings of the 78th  
annual water environment federation technical exposition and conference. 2005. Washington,  
D.C.
- Booth DB, Jackson CR (1997). Urbanization of aquatic systems: Degradation thresholds,  
stormwater detection and the limits of mitigation. Journal of the american water resources  
asociation 33: 1077-1090.
- Bouvier C (1994). MERCEDES: Principes du modèle et notice d'utilisation (Features of the model  
and tutorial). Rapport Internet ORSTOM.

- Bouvier C, Delclaux F (1996). ATHYS: A hydrological environment for spatial modelling and coupling with a gis. In: Proceedings HydroGIS '96, Vienna, Austria, 19-28, IAHS publication n°235.
- Bouvier C, Fuentes Mariles G, Domínguez Mora R (1994). MERCEDES, Un modèle hydrologique D'Analyse et de prévision de crues en milieu hétérogène. 4p., 23è Journées de l'Hydraulique – Congrès de la SHF, Nîmes (France), Septembre 1994, pp.257-260.
- Buró TP, Heathwaite AL, Trudgill ST (2003). Nitrate: Processes, patterns and management. John Wiley & Sons, NY
- Casas Torres JM, Higuera AA (1977). Compendio de geografía general, páginas 54 y 55. Ediciones RIALP Madrid. ISBN 84-321-0249-0
- Chow VT (1964). Handbook of applied hydrology, McGraw-Hill, New York, USA.
- Chow VT , Maidment DR, Mays LW (1994). Hidrología aplicada. Santafé de Bogotá: McGraw-Hill.
- CNUMAD (1992). Agenda 21: Programa de acciones para el desarrollo. Rio de Janeiro, Brasil. Disponible en: <http://agenda21ens.cicese.mx/40capitulos.htm>, consultado 10 de Febrero de 2013.
- Conagua (2007a). Estadística del agua en México. México. Disponible en: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/EAM2010.pdf>, consultado 12 de Noviembre de 2012.
- Dirección Estatal de Protección Civil de Baja California (DEPCBC) (2000). Sistema de alerta hidrometeorológica de Tijuana.
- Domínguez-Chicas A, Kretschmar T, Núñez-Sánchez F (2004). Velocidades de sedimentación en aguas pluviales de Cd. Juarez, Chihuahua, Mexico. Revista mexicana de ciencias geológicas 21(3):412-420.
- Eslava Morales Héctor, Jiménez Espinosa Martín, Salas Salinas Marco Antonio, García Jiménez Fermín y Vázquez Conde María Teresa (2006). elaboración de mapas de riesgo por inundaciones y avenidas súbitas en zonas rurales, con arrastre de sedimentos. fenómenos

- hidrometeorológicos. Centro de Prevención de Desastres (CENAPRED), Secretaría de Gobernación (SEGOB).
- Estebe A, Boundries H, Mouchel JM, Thevenot DR (1997). Urban runoff impacts on particulate metal and hydrocarbon concentrations in river Seine: Suspended solid and sediment transport. *Water science technology*, 36(8-9): 185.
- Field R, Masters H, Singer M (1982). Status of porous pavement research. *Water research*. 16: 849-858.
- Fisher TS, Hayward DG, Stephen RD y Stenstrom MK, J. (1999). dioxins and furan in urban runoff. *Journal of environmental engineering ASCE*, 125(2): 185.
- García-Flores E (2008). Concentración de hidrocarburos policíclicos aromáticos. Coloquio de posgrado, UABC. Tijuana, Baja California.
- García SJ (1982). Manual de hidráulica urbana. Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica del Departamento del Distrito Federal. Secretaría de Obras y Servicios. México.
- García-Flores E, Herrera-Castañón I, Vega-Cruz DA, Lopez-Laureano E, Rodriguez-Ventura G, Espinoza-Gomez H, Wakida FT (2009). Sources of oil and grease in stormwater in Tijuana, Mexico. 13th International conference on diffuse pollution and integrated watershed management. 12-15 October 2009, Seoul, Korea. pp. 388-390.
- García-Flores E, Wakida FT, Espinoza-Gomez JH (2013). Sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban stormwater runoff in Tijuana, Mexico. *International journal of environmental research* 7(2):387-394.
- González Estévez M. (2008). Evaluación del peligro de contaminación del acuífero del arroyo Alamar, Tijuana, Baja California. Tesis de maestría en administración integral del ambiente. El Colegio de la Frontera Norte y el CICESE. Tijuana, B.C. México.
- Gourou P, Papy L (1977). Compendio de geografía general. Editorial: RIALP 1977. ISBN 84-321-0249-0
- Gromaire MC, Gamaud S, Gonzáles A, Chebbo G (2001). Characterisation of urban runoff pollution in Paris. *Water research* 35(2): 521.

- Guzmán, MA (1955). Escurrimientos de aguas pluviales. Revista hidráulica en México, órgano oficial de la Secretaria de Recursos Hidráulicos: Normas técnicas complementarias para el diseño y ejecución de obras e instalaciones hidráulicas. México.
- Hansen AM, Van Afferden M, Torres-Bejarano F (2007). Remediation of the Cencali lagoon, Villahermosa, Tabasco. I. Pollution and sediment reuse. Ingeniería Hidráulica de México 22: 87-102.
- Harper HH (1998). Stormwater chemistry and water quality. Environmental research and design, Inc. 3419 Trentwood Blvd., Suite 102, Orlando, FL 32812. Consultado el 23 de mayo de 2008. <http://www.stormwaterauthority.org/library/library.aspx?id=200>.
- Hvitved-Jacobsen T, Johansen NB, Yousef YA (1994). treatment systems for urban and highway runoff in Denmark. Science of the total environment 146/147: 499–506.
- Hvitved-Jacobsen T, Yousef YA (1991). Road runoff quality, environmental impacts and control in: Hamilton RS, Harrison RM (Eds.), Highway pollution. Elsevier, London, pp. 165–208.
- Implan (2002). Programa de Desarrollo urbano del centro de población Tijuana 2002-2025 (Program of urban development of the city of Tijuana). Periódico oficial del estado de Baja California, 13 de diciembre de 2002, No. 54.
- INE (2000) Instituto Nacional de Ecología. Programa de calidad del aire Tijuana-Rosarito 2001-2005, INE, Mexico. <http://www.epa.gov/Border2012/infrastructure/tijuana-airplans/tijuanarosaritospa.pdf>. Consultado: Octubre 23, 2009.
- Ingeniería Ambiental y Medio Ambiente (I.A. y M.A). Copyright ©2000. Noviembre 2000. <http://www.fortunecity.es/expertos/profesor/171/agua.html>
- Fair GM, Okun DA, Geyer GC (1987). Ingeniería sanitaria y de aguas residuales Vol.3. Ediciones Ciencia y Técnica, S.A. Ed. LIMUSA.
- Kennish MJ (1992). Ecology of estuaries: anthropogenic effects. Boca Raton. CRC Press.
- Kirpich ZP (1940). Time of concentration of small agricultural watersheds. Civil engineering. 10(6): 362.
- Lerner DN (1986). Leaking pipes recharge ground water. Ground Water, (24): 654-662.

- Linsley RK, y Franzini JB (1978). *Engenharia de recursos hídricos..* Editora da Universidade de Sao Paulo e Editora McGraw-Hill do Brasil, Ltda.
- Maestre A, Pitt R (2005). *The National Stormwater Quality Database, Version 1.1, a Compilation and analysis of NPDES stormwater monitoring information.* U.S. EPA Final Report. Retrieved from <http://rpitt.eng.ua.edu/Publications/Publications.shtml>. (Consultado 15 Abril 2007).
- Mijangos-Montiel JL (2009). *Tesis de doctorado: evaluación de contaminantes en escurrimientos pluviales de estaciones de gasolina y otros usos de suelo en la Cd. De Tijuana, B.C. México.* Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería. UABC.
- Mijangos-Montiel JL, Wakida FT, Temores-Peña J, García-Flores E (2010). *Characterization of stormwater runoff quality from gas stations in Tijuana, Mexico.* *International journal environmental research* 4:777-784.
- Morquecho R, Pitt R (2003). *Stormwater heavy metal particulate associations.* *Proceedings Water Environment Federation's Annual Exhibition and Conference. (WEFTEC), Los Angeles, Calif., Water Environment Federation, Alexandria, Va.*
- Morquecho R (2005). *Pollutant associations with particulates in stormwater.* *Dissertation.* The University of Alabama. <http://rpitt.eng.ua.edu/Publications/Renee.dissertation.pdf>. Consultado: 14 October 2012.
- Natural Resources Defense Council (NRDC) (2002). *Cleaning up the anacostia river.* <http://www.nrdc.org/water/pollution/fanacost.asp> . Consultado el 4 Agosto de 2010.
- Nelson J (1996). *Characterizing erosion processes and sediment yields on construction sites.* MSCE thesis. Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Alabama at Birmingham. 94 pp.
- Novotny V, Olem H. (1994). *Water quality prevention, identification and management of diffuse pollution.* Van Nostrand Reinhold, New York.
- Pitt R, Clark S, Lantrip J, Day J (1998). *Telecommunication manhole water and sediment study.* Special report SR-3841. Vol 2: Water and sediment characteristics.

- Pitt R, Maestre A, Morquecho R (2004) The National Stormwater Quality Database (NSQD, version 1.1). Tuscaloosa, AL: University of Alabama.  
<http://rpitt.eng.ua.edu/Research/ms4/Paper/MS4%20Feb%2016%202004%20paper.pdf>.  
Consultado: 20 October 2012
- Pitt R (2001). Stormwater. Management for highway projects. symposium on the pollution of water sources from-off. March 19, 2001. Tel Aviv University, Israel.
- Pitt RE, Field R , Lalor M, Brown M (1995). Urban stormwater toxic pollutants: Assessment, sources and treatability. *Water environmental research*. 67(3): 260-275.
- Ramirez AJ (1991). Fluvial nutrient and heavy metals transport to the Caribbean Sea of Venezuela. *Revista internacional de contaminación ambiental* 7:67-73.
- Rigola-Lapeña M (1989). Tratamiento de aguas industriales: Aguas de proceso y residuales. Alfaomega- Marcombo, Barcelona.
- Rojas R (2009). Hidrología aplicada al manejo de cuencas. universidad de los andes. facultad de ciencias forestales y ambientales. Edición provisional sujeta a revisión.  
<http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/rojas.r/cap1a3c.pdf>
- Sánchez Munguia, Vicente (2006). La gestión del agua en Tijuana, Baja California. En: Bakin D. (Coordinador), *La Gestión del Agua Urbana en Mexico: retos, debate y bienestar*, Guadalajara, Universidad de Guadalajara, pp. 265-285.
- Sansalone JJ, Buchberger GA (1999). An infiltration Device as a Best Management Practice for Immobilizing Heavy Metals in Urban Highway Runoff. *Water science and technology* 32(1):119–125.
- Sartor JD, Gaboury DR (1984). Street sweeping as a water pollution control measure: lessons learnt over the last ten years. *Science of the total environment* 33: 171–183.
- Schueler T (1994). The Importance of imperviousness. *Watershed protection techniques*. Center for Watershed Protection 1:100-111.

[http://yosemite.epa.gov/R10/WATER.NSF/840a5de5d0a8d1418825650f00715a27/159859e0c556f1c988256b7f007525b9/\\$FILE/The%20Importance%20of%20Imperviousness.pdf](http://yosemite.epa.gov/R10/WATER.NSF/840a5de5d0a8d1418825650f00715a27/159859e0c556f1c988256b7f007525b9/$FILE/The%20Importance%20of%20Imperviousness.pdf)

Consultado: Julio 11 de 2012.

Secretaria de Comunicaciones y Transporte (SCT) (2000). Libro: Proyecto, Tema: Carreteras,

Título: Estudios Hidráulicos-hidrológicos para puentes.

Secretaria de Infraestructura y Desarrollo Urbano del Estado (SIDUE) (Septiembre de 2009):

Normas de proyecto para obras de alcantarillado en el Estado de Baja California.

Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat) reporte (2006). La gestión ambiental en México, México, D.F., 436 p.

SEDUM (Secretaria de Desarrollo Urbano Municipal-XIX Ayuntamiento de Tijuana) (2002).

Programa de desarrollo urbano del centro de poblacion de tijuana 2002-2025, Mexico.

Simon P, Lemacon C (1987). Determination of aliphatic primary and secondary amines and polyamines in air by high-performance liquid chromatography. Analytical chemistry 59:480-484.

Taylor GD, Fletcher TD, Wong TH, Breen PF, Duncan HP (2005). Nitrogen composition in urban runoff-implications for stormwater management. Water research 39(10):1982-1989.

United States Environmental Protection Agency (USEPA), (1983). Results of the Nationwide Urban Runoff Program. Water Planning Division, PB 84- 185552, Washington D.C. 20460.

United States Environmental Protection Agency (USEPA) (1994). determination of metals and trace elements in water and wastes by inductively couple plasma-atomic emission spectrometry. Environmental monitoring systems laboratory. U.S. Environmental Protection Agency. Cincinnati, Ohio. [http://www.epa.gov/waterscience/methods/method/files/200\\_7.pdf](http://www.epa.gov/waterscience/methods/method/files/200_7.pdf).

Vaze J, Chiew FHS (2004). Nutrient loads associated with different sediment sizes in urban stormwater and surface pollutants. Journal of environmental engineering 130:391-396.

Wakida-Kusunoki FT (2011). Contaminantes en escurrimientos pluviales. Revista Universitaria. Universidad Autónoma de Baja California. No 73. 12-21.

- Waschbusch RJ, Selbig WR, Bannerman RT. (1999). Sources of phosphorus in stormwater and street dirt from two urban residential basins in Madison, Wisconsin, 1994-95, U.S. Geological survey water-resources investigation Report 99-4021.
- Winckell A, Le Page M (2003). El Niño in the City: Vulnerability Assessment in Tijuana during the Winter of 1997-98. *Geofísica internacional*, 42(3): 553-565
- Yang Y, Lerner DN, Barret MH, Tellam JH (1999). quantification of groundwater recharge in the city of Nottingham, UK. *Environmental geology*, 38:183-198.
- Yoshinaga-Pereira S, Albuquerque-Rocha G (2002). Recursos hídricos. En: Repetto L, Fernando y Claudia Karez C (Editores), II Curso internacional de aspectos geológicos de protección ambiental, Campinas, SP- Brasil, Oficina Regional de Ciencia de la UNESCO para América Latina y el Caribe, pp. 138-178.

## 8. ANEXOS

### APÉNDICE I

#### Métodos de análisis de laboratorio

##### 1. DETERMINACIÓN DE CONDUCTIVIDAD/ SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES.

Las mediciones de conductividad en mS/cm y de sólidos disueltos totales en g/L se llevaron a cabo simultáneamente en cuanto las muestras llegaron al laboratorio, a temperatura ambiente, con un conductímetro marca Hach.

Se utilizó el método 8160 de medición directa de Hach, equivalente al método 120.1 de USEPA y al método 2510-B de APHA, 1995.

Siempre se midió la conductividad de agua destilada antes de efectuar las mediciones de las muestras, su valor nunca fue mayor de 0.05 mS/cm.

##### 1.1 Conductividad. Método de Medición Directa (0.01 $\mu$ S/cm a 200.00 mS/cm).

Método 8160.

Uso del conductímetro.

1. Referirse al manual para la operación de medidor y prepararlo con el electrodo de conductividad. El medidor seleccionará el rango automáticamente. Para mayor precisión en los resultados, calibrarlo antes consultando el manual.
2. Prueba de laboratorio: Sumergir la sonda en un vaso de precipitado que contenga la solución muestra. Mover la sonda arriba y abajo para remover burbujas del electrodo.
3. Encender el medidor. Seleccionar la medición de conductividad.
4. Enjuague la sonda cuidadosamente con agua desionizada después de cada medición. Para mostrar la medición de Sólidos Disueltos Totales (SDT), referirse al manual del usuario.

## 2. DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)

Se utilizó el método 8000 de digestión en reactor con dicromato de potasio y aprobado por USEPA, en volúmenes de 2 ml de muestra sin filtrar previamente homogenizada. Los resultados en mg DQO/L son definidos como los mg de O<sub>2</sub> consumidos por litro de muestra bajo las condiciones del procedimiento. La muestra es calentada por dos horas con un agente oxidante fuerte, dicromato de potasio. Los compuestos orgánicos oxidables reaccionan, reduciendo el ión dicromato (Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub><sup>-2</sup>) al verde ión crómico (Cr<sup>+3</sup>). Al usar medidas colorimétricas menores o iguales a 150 mg/L, la cantidad remanente de Cr<sup>+6</sup> es determinada. Cuando los rangos a medir son más amplios (0-1500 mg/L o 0-15000), la cantidad de Cr<sup>+3</sup> producida es determinada. El reactivo para DQO también contiene Ag<sup>+</sup> y Hg<sup>+2</sup>. La plata es un catalizador y el mercurio es utilizado para evitar interferencias por ión cloruro (Cl<sup>-1</sup>).

1. Homogenizar 100 ml de muestra durante 30 segundos en una mezcladora (licuadora).

Nota: Para muestras con grandes cantidades, aumentar el tiempo de homogenización.

Para mejorar la exactitud y la reproducibilidad, verter la muestra homogenizada en un vaso de precipitado (v.p.p.) de 250 ml y agitar con una placa agitadora magnética.

Nota: Leer las instrucciones y advertencias del manual de usuario para evitar accidentes. Trabajar con protección.

2. Conectar el reactor de DQO (DRB200). Precalear a 150°C. Colocar el escudo plástico enfrente del reactor.

Nota: Que los dispositivos de seguridad estén en su lugar.

3. Extraer la tapa de un tubo de reactivo para digestión de DQO para el rango apropiado.

Nota: Mantener los frascos de la mezcla de reactivo aún sin utilizar, en el recipiente de envío opaco; si es posible en el refrigerador. La luz que dé en los frascos durante la prueba no afectará los resultados.

4. Sostener el tubo en un ángulo de 45°. Colocar con la pipeta volumétrica 2.00 ml ( 0.2ml para el rango 0 a 15000mg/L, con pipeta TenSette) de la muestra.

Nota: Para obtener mayor exactitud, realizar un mínimo de 3 ensayos y promediar.

Nota: Si se derrama reactivo la prueba será inexacta y es peligroso para la piel y otros materiales. No utilizar frascos que han sido derramados.

5. Colocar la tapa del tubo bien ajustada. Enjuagar la parte exterior del tubo con agua desionizada y secar con una toalla de papel.
6. Sostener el tubo por la tapa y colocarlo sobre una tina. Invertir suavemente varias veces para mezclar los contenidos. Colocar el tubo en el Reactor de DQO precalentado.
7. Preparar un blanco repitiendo los pasos 3 a 6, colocando 2.00 ml de agua desionizada.

Nota: Se debe de preparar un blanco para cada juego de muestras. Utilizar los tubos del mismo lote.

8. Calentar los tubos durante dos horas.
9. Desconectar el reactor. Esperar aproximadamente 20 minutos hasta que los tubos se enfríen a 120°C o menos.
10. Invertir cada tubo varias veces aún calientes.
11. Colocar en una gradilla y enfriar a temperatura ambiente.

#### Determinación Colorimétrica:

1. Seleccione el programa almacenado según el rango de concentración (para 150 mg/L es el programa 430 COD LR). Presionar: 430 ENTER. La pantalla mostrará: Fijar nm par 420.

2. Girar el cuadrante de longitud de onda hasta que la pantalla pequeña muestre: 420 nm.  
Cuando se ajuste la longitud de onda correcta, en la pantalla aparecerá rápidamente:  
Muestra cero; luego: mg/L COD LR.
  3. Colocar el adaptador para tubos de DQO en el soporte de celdas con el marcador hacia la derecha.
  4. Limpiar exteriormente al tubo del blanco con una toalla húmeda y después con una seca.
  5. Colocar el blanco en el adaptador con el logotipo de Hach hacia el frente del instrumento.  
Colocar la tapa en el adaptador.
  6. Presionar: ZERO. La pantalla mostrará: luego: 0 mg/L COD LR.
  7. Limpiar la parte externa del tubo de muestra con una toalla.
  8. Colocar el tubo en el adaptador con el logotipo de Hach hacia el frente del instrumento.  
Colocar la tapa en el adaptador.
  9. Presionar: READ. La pantalla mostrará: Leyendo..., luego aparecerá el resultado en mg/L de DQO.
- Nota: Para obtener resultados óptimos con muestras cercanas a los 150 mg/L de DQO, repetir el análisis con una muestra diluida.

### 3. DETERMINACION DE NITROGENO TOTAL

Nitrógeno Total rango bajo 0.5 a 25 ml. Método de digestión de persulfato. Método 10071, por medio de test n tubes

1. Encender reactor DRB200 a una temperatura de 105 °C.
2. Mediante un embudo agregar el contenido de una almohadilla el polvo del reactivo de persulfato para nitrógeno total a dos viales de digestión hidróxido.
3. Muestra preparada: adicionar 2 mL de muestra a uno de los viales. Blanco: adicionar 2 ml de agua desionizada al otro vial.
4. Cerrar ambos de viales y agitar vigorosamente por al menos 30 segundos para mezclarlos.  
El agente de persulfato podrá no disolverse completamente después de la agitación. Esto no afectara la exactitud.

5. Colocar los viales en el reactor y calentar por exactamente 30 minutos
  6. Remover los viales y dejar enfriar a temperatura ambiente.
  7. Seleccionar el número correspondiente al análisis en el espectrofotómetro.
  8. Abrir los viales y agregar a cada uno el contenido de una almohadilla del reactivo A para nitrógeno total.
  9. Cerrar los tubos y agitar por al menos 15 segundos
  10. Esperar 3 minutos de reacción
  11. Después de los tres minutos, abrir los viales y agregar a cada uno de los viales el contenido de una almohadilla del reactivo B de nitrógeno total.
  12. Cerrar los viales y agitar por 15 segundos
  13. Esperar 2 minutos de reacción
  14. Pasar dos mL de la muestras digeridas de cada tubo a tubos de reactivo ácido para nitrógeno total.
  15. Invertir 10 veces lentamente, los viales se calentaron por la reacción.
  16. Esperar 5 minutos de reacción, el color de la solución se tornara amarilla.
  17. Limpiar el blanco e insertar en el espectrofotómetro y oprimir el botón de cero.
  18. Insertar vial de muestra y hacer lectura.
4. DETERMINACIÓN DE FÓSFORO TOTAL

4.1 Fosfatos como fósforo total bajo rango 0.06-3.5 mg/L  $\text{PO}_4^{-3}$ .

Método de PhosVer 3; digestión con persulfato ácido (Método 8190)

1. Encender el reactor de DQO (Demanda química de oxígeno). Calentar a 150°C.
2. Ingresar número de programa almacenado
3. Utilizar la pipeta TenSette para agregar 5,0 ml de muestra a un tubo para fósforo total e hidrolizable con ácido.
4. Con un embudo, agregar los contenidos de una bolsa de polvo de persulfato de potasio para fosfonato al tubo.
5. Tapar herméticamente y agitar para disolver.

6. Calentar el tubo durante 30 minutos a 150°C.
7. Retirar cuidadosamente el tubo del reactor. Colocarlo en un soporte para tubos de ensayo y dejar enfriar a temperatura ambiente.
8. Utilizar una pipeta TenSette para agregar 2 ml de hidróxido de sodio 1,54 N al tubo. Tapar y mezclar.
9. Colocar el adaptador de DQO en el soporte de la celda con el indicador a la derecha.
10. Limpiar el exterior del tubo con una toalla.
11. Colocar el tubo de muestreo en el adaptador con el logotipo de Hach de cara al frente del instrumento
12. Colocar la tapa en el adaptador.
13. Presionar: ZERO En la pantalla se leerá: Puesta a cero... luego: 0.00 mg/L PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> TNT
14. Con un embudo, agregar los contenidos de una bolsa de polvo de reactivo de fosfato PhosVer 3 en el tubo.
15. Tapar herméticamente y agitar durante 10 a 15 segundos.
16. Presionar: SHIFT TIMER Comenzará un período de espera de 2 minutos.
17. Cuando suene el cronómetro, limpiar el exterior del tubo de muestreo con una toalla.
18. Colocar el tubo de muestreo preparado en el adaptador con el logo de Hach de cara al frente del instrumento. Tapar el adaptador.
19. Presionar: READ. En la pantalla se leerá: Leyendo... luego en la pantalla aparecerán los resultados en mg/l de PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>.

#### 4.2 Fosfatos como fósforo total alto rango (HR) 1.0-100 mg /L PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>

Método Molibdovanadato con de persulfato ácido (Método 10127).

1. Encender el reactor DRB 200. Calentar a 150°C.
2. Seleccionar la prueba con el número 542 P Total HR TNT.

3. Preparación del blanco: Usar la pipeta TenSette para agregar 5.0 mL de agua desionizada a un tubo para la prueba de fósforo total.
4. Preparación de la muestra: Usar una pipeta TenSette para agregar 5.0 mL de muestra a un tubo para la prueba de de fósforo total.
5. Usar un embudo para agregar los contenidos de una almohadilla de Persulfato de Potasio a cada vial. Colocar los tapones y agitar hasta disolver.
6. Insertar los viales en el Reactor DRB 200. Cerrar con la cubierta protectora.
7. Calentar por 30 minutos.
8. Al terminar el tiempo de calentamiento, retirar los viales con cuidado del reactor. Insertarlos en una gradilla y dejar enfriar a temperatura ambiente (18-25 °C).
9. Usar una pipeta TenSette para agregar 2.0 mL de hidróxido de sodio 1.54N a cada vial. Tapar e invertir el vial para mezclar.
10. Utilizar un gotero de polietileno para agregar 0.5 ml de Molibdovanadato Reactivo a cada vial. Tapar e invertir para mezclar.
11. Encender el instrumento. Un periodo de reacción de 7 minutos. Leer las muestras entre siete y nueve minutos después de agregar el Molibdovanadato Reactivo.
12. Limpiar los viales con una toalla húmeda, secar con otra toalla, para remover huellas u otras manchas.
13. Cuando el tiempo expire, insertar el blanco en el orificio de la celda de 16-mm.
14. El instrumento mostrará cero:  $0.0 \text{ mg/L PO}_4^{-3}$  .
15. Insertar la muestra preparada en la celda de 16-mm.
16. Leer el resultado en  $\text{mg/L PO}_4^{-3}$  .

## 5. DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES

Método 2540 D de APHA, 1995, basado en la Norma Oficial Mexicana: NMX-AA-034-SCFI-2001 (Cancela a la NMX-AA-034-1981)

Analíticamente se define el contenido de sólidos suspendidos, como el residuo que es

retenido después de pasar un volumen conocido de líquido por un filtro de fibra de vidrio de tamaño de poro nominal ( $1.2\mu\text{m}$ ) y secado a  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Sólidos suspendidos fijos: corresponden a los residuos sólidos remanentes del muflado a  $550 \pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante 1 hora.

Sólidos suspendidos volátiles: corresponden a los compuestos perdidos durante la calcinación a  $550 \pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$  se determinan por diferencia de peso.

El método 2540-D de APHA, 1995 es Gravimétrico. Consiste en la filtración de la muestra (se realizó con volúmenes de 150 ml de muestra) a través de filtros de fibra de vidrio tipo GF/C de  $1.2\mu\text{m}$  y secado a  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Procedimiento:

Preparación del medio filtrante.

1. Colocar un disco de fibra de vidrio en el crisol Gooch con la superficie rugosa hacia arriba, teniendo cuidado de que el disco cubra completamente las perforaciones del Gooch.
2. Colocar el crisol y el disco en un aparato de filtración, aplicando vacío. Lavar el disco con agua, dejando que el agua se drene totalmente.
3. Suspender el vacío y llevar el crisol a masa constante en la mufla a una temperatura de  $823\text{ K} \pm 25\text{ K}$  ( $550 \pm 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) durante 15 a 20 minutos. Sacar el crisol, dejar enfriar y determinar su masa ( $G_1$ ).

Preparación de la muestra.

4. Colocar el crisol con el disco en el aparato de filtración y aplicar vacío.
5. Humedecer el disco con agua.
6. Medir con una probeta o pipeta volumétrica según proceda, un volumen adecuado de la cantidad seleccionada de muestra previamente homogenizada la cual depende de la concentración de sólidos suspendidos.
7. Filtrar la muestra a través del disco y aún aplicando vacío, lavar el disco tres veces con  $10\text{ cm}^3$  de agua, dejando que el agua drene totalmente en cada lavado.

8. Suspender el vacío y secar el crisol en la estufa a una temperatura de 376 K a 378 K (103 a 105 °C) durante una hora. Sacar el crisol, dejar enfriar en un desecador a temperatura ambiente y determinar su masa ( $G_2$ ).
9. Expresión de resultados.
10. El contenido de Sólidos Suspendedos Totales (SST), se calcula con la fórmula:

$$SST = [(G_2 - G_1) \times 1000] / V$$

En donde:

SST: Sólidos Suspendedos Totales, en  $\text{mg}/\text{dm}^3$

$G_1$ : Masa del crisol con el disco, en mg

$G_2$ : Masa del crisol con el residuo, en mg

V: Volumen de muestra, en  $\text{cm}^3$

#### 6. Determinación de turbidez

Procedimiento basado en Standard Methods 2130B (Método USEPA 180.1): Método Nefelométrico. Rango de aplicación de 0 a 40 Unidades de Turbidez Nefelométricas (NTU). (NOM-AA-038-1981).

Se emplea el polímero Formazina, con propiedades reproducibles de dispersión de la luz, su turbiedad de una concentración dada de suspensión es de 40 unidades nefelométricas.

Materiales y reactivos:

1. Turbidímetro ( tipo Bench Top, como el modelo Hach 1720D de rango bajo (0-100 UTN)
2. Celdas para el turbidímetro
3. Matraces aforados de 100 ml
4. Pipetas aforadas de 5 y 10 ml

5. Balanzas analíticas de precisión [ de 0.01g y de 0.0001g]
6. Baño ultrasonido
7. Agua destilada grado reactivo de lata pureza.
8. Preparación de soluciones:

A). Suspensión patrón concentrada de turbiedad:

Solución I: Disolver 1.0 g de Sulfato de Hidracina  $(\text{NH}_2)_2 \cdot \text{H}_2\text{SO}_4$ , en agua destilada y aforar a 100ml.

Solución II: Disolver 10.0 g de haxametilenotetraamina  $(\text{CH}_2)_6\text{N}_4$ , en agua destilada y aforar a 100 ml.

En un matraz volumétrico de 100 ml mezclar 5.0 ml de la solución I con 5.0 ml de la solución II. Dejar reposar 24 hr a  $25 \pm 3$  °C, (aforar) mezclar. La turbiedad de esta suspensión es de 4000 UTN. Transferir esta suspensión a un frasco ámbar o similar con bloqueo de luz UV, para su almacenamiento.

Nota: Preparar la solución y suspensión mensualmente.

B). Suspensión patrón de turbidez: Diluir 10.0 ml de la suspensión patrón concentrada a 100 ml con agua destilada, libre de turbiedad. Preparar semanalmente. La turbiedad de esta suspensión es de 40 UTN.

C). Patrones de turbiedad diluidas: Diluir porciones de la suspensión patrón de turbiez (B) con agua destilada. Preparar semanalmente.

Procedimiento:

1. Calibrar el turbidímetro:

Dejar encendido el turbidímetro por 20 minutos antes de la calibración o el tiempo que el manual del equipo establezca para estabilizarlo.

Colocar en la celda agua libre de turbidez, medir la turbidez ajustando a cero con la perilla, este será el blanco de la determinación, o utilizar las soluciones de referencia cero que incluya el equipo.

Calibrar el equipo según las instrucciones del manual. Correr al menos un estándar en cada rango del equipo que se emplee.

Si la escala no está precalibrada, preparar curvas de calibración para cada rango del instrumento. Corroborar la exactitud de las escalas proporcionadas para los instrumentos precalibrados, usando el patrón apropiado.

## 2. **Medición de la turbidez menor de 40 UTN:**

Agitar perfectamente la muestra. Esperar hasta que las burbujas desaparezcan y vaciar la muestra en la celda del aparato. Leer la turbiedad directamente de la escala del instrumento y la curva de calibración apropiada.

## 3. **Medición de la turbidez mayor a 40 UTN:**

Diluir la muestra con agua hasta que la turbiedad dé valores entre 30 y 40 UTN. Calcular la turbiedad de la muestra original con el **factor de dilución** correspondiente.

Usar la suspensión patrón concentrada de turbiedad de 4000 UTN, cuando se tenga turbiedad mayor de 40 NTU.

### **Cálculos:**

$$\text{Unidades Nefelométricas de Turbidez (UTN)} = (A) ( B + C )/C$$

$$\text{o ésta otra: Turbidez (UTN)} = A \times FD$$

$$FD = C/B$$

En donde:

A: es el UTN encontrado en la muestra diluida

B: es el volumen de dilución, en ml

C: es la cantidad de muestra en ml tomada para la dilución.

FD: factor de dilución de la muestra.