

## Velocidades de sedimentación en aguas pluviales de Cd. Juárez, Chihuahua, México

Angelina Domínguez-Chicas<sup>1,\*</sup>, Thomas Kretzschmar<sup>1,2</sup>, Francisco Núñez-Sánchez<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Instituto de Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Cd. Juárez, Av. del Charro 450 Nte, 32310 Cd. Juárez, Chih., México.

<sup>2</sup>Dirección actual: Departamento de Geología, División de Ciencias de la Tierra, Centro de Investigación Científica y de Enseñanza Superior de Ensenada CICESE, Carretera Tijuana-Ensenada Km.107, 22760 Ensenada, B.C., México.

<sup>3</sup>Instituto Municipal de Investigación y Planeación (IMIP) de Ciudad Juárez, Av. B. Franklin 4185, Circuito Pronaf, 32310 Cd. Juárez, Chih., México.

\* adomingu@uacj.mx

### RESUMEN

La utilización de aguas pluviales presenta beneficios numerables para obtener un uso sustentable del recurso hídrico. La acumulación de lluvias esporádicas incidentes en zonas con climas extremos y áridos para su posterior recuperación y utilización no es de uso común en regiones de América Latina, en comparación con otras regiones con condiciones climáticas similares, por ejemplo Australia y el suroeste de los Estados Unidos, donde la escorrentía de la mancha urbana es aprovechada frecuentemente. Sin embargo, las aguas pluviales son consideradas posibles fuentes no puntuales de contaminación de cuerpos superficiales y subterráneos de aguas. Dependiendo del uso de suelo de una región, las aguas pluviales presentan características particulares. Así, la mayoría de los contaminantes en escorrentías de áreas urbanizadas corresponden a material particulado, grasa y aceites. Dando suficiente tiempo de retención en un pozo, un 80–85% del material particulado puede sedimentar. Dadas las características hidráulicas de los pozos convencionales de retención, el proceso de sedimentación que sucede es del Tipo I, donde la velocidad de sedimentación depende del diámetro y densidad de la partícula. Debido a que las partículas en el agua pluvial son de tamaño y densidad heterogénea, la velocidad promedio de sedimentación sólo puede ser determinada a partir del conocimiento de su distribución de tamaño. Se puede apreciar en los datos de partículas suspendidas y remoción de las mismas, que las velocidades de sedimentación son directamente proporcionales al grado de urbanización de área en la cual se localiza el sitio de muestreo. También se aprecia una menor cantidad de sólidos suspendidos y mayor velocidad de sedimentación conforme se incrementa el grado de urbanización. Esto pudiera ser indicativo de que, en el caso de aguas pluviales de áreas urbanizadas, el tipo de partícula es de mayor densidad y por tanto al momento del muestreo ya ha habido una precipitación parcial en caso de baja turbulencia. Las velocidades de sedimentación de partículas suspendidas por etapa ( $\text{g/m}^3/\text{min}$ ) en muestras de aguas pluviales de Cd. Juárez, Chih. indican altos valores al inicio, con disminuciones considerables después de los 32 y 128 minutos obtenidas de los sitios PEMEX y MORELIA, respectivamente. En los otros sitios, las velocidades de precipitación son bajas, lo cual indica presencia de partículas de baja densidad que habrán de ser manejadas con algún agente que facilite la precipitación de los sólidos suspendidos.

Palabras clave: escorrentía, sedimentación, sólidos suspendidos, agua pluvial, Cd. Juárez, México.

### ABSTRACT

*The use of storm water presents a wide range of benefits to achieve a sustainable management of the resource. The accumulation of water during sporadic rain events in zones with arid climates for its subsequent recovery and utilization is not usual in Latin America. In other regions with similar climatic conditions, for example Australia and the Southwest of the United States, the storm water runoff of urban areas is frequently recovered for use. Nevertheless, storm water is considered a possible contamination source for subterranean and superficial water bodies. Depending on the urbanization of the area, the surface water runoff presents site specific characteristics. Nevertheless, the major contaminant in the runoff consists in particulate material. Giving a well sufficient retention time, 80–85% of the particulate material will be able to settle. Giving the hydraulic characteristics of common retention structures, the occurring sedimentation process is of Type I, where the sedimentation velocity depends on the diameter and density of the particle. Due to the variable size and density of particles in storm waters, the mean sedimentation velocity can only be estimated if the size distributions of the particles is known. The data regarding suspended particles and its removal suggest that the sedimentation velocities are directly proportional to the level of urbanization of the studied sites. Additionally, it is shown that a lesser content of suspended solids and higher sedimentation velocities correlate with the increase in urbanization. This could indicate that the particles in urbanized areas present a higher density, which could cause partial precipitation in the case of low turbulences in the runoff. The sedimentation velocities based on time steps ( $\text{g/m}^3/\text{min}$ ) indicate high sedimentation rates at the beginning for the samples taken in Cd. Juárez following a significant decrease at 32 and 128 minutes for the sites PEMEX and MORELIA, respectively. In the other sites, the measured precipitation velocities are low, which indicates the presence of particles of low density, which have to be treated with an agent to initiate the precipitation of the suspended solids.*

*Key words: runoff, sedimentation, suspended solids, pluvial water, Cd. Juárez, Mexico.*

## INTRODUCCIÓN

La preocupación por encontrar fuentes de abastecimiento de agua ha generado que en la actualidad exista gran interés en el aprovechamiento de aguas pluviales, sin importar los volúmenes. Con frecuencia se piensa que el aprovechamiento de aguas pluviales solamente es aplicable en áreas húmedas, con altos volúmenes de precipitación; sin embargo se han combinado tecnologías disponibles para acumular las lluvias esporádicas incidentes en zonas con climas extremos y áridos, para su posterior recuperación y utilización (Heaney *et al.*, 1999).

Heaney *et al.* (1999) claramente exponen los beneficios de la utilización de aguas pluviales: representa fuente alterna de suministro de agua, elimina la necesidad de perforar nuevos pozos de abastecimiento, representa un recurso local (independiente de dependencias estatales o federales), disminuye o elimina gastos de operación derivados de sistemas de tratamiento de aguas residuales y su posterior distribución, elimina impactos económicos por construcción de sistemas de almacenamiento de agua a gran escala, evita o minimiza los costos por tratamiento de aguas a un nivel requerido para descarga a cuerpos receptores y/o drenaje. Por su parte, Herrmann *et al.* (1996) afirman que la utilización de aguas pluviales puede proveer hasta en un 30–50% del agua residencial. El Distrito de Florida visualiza

el aprovechamiento de aguas pluviales como una manera de incrementar la eficiencia de los sistemas de tratamiento: una etapa de almacenamiento del influente y tiempos de residencia de 14 días previenen una remoción del 50–70% de los sólidos antes de entrar al sistema de tratamiento.

El aprovechamiento de aguas pluviales requiere de controles técnicos tanto a nivel de almacenamiento, como de pretratamiento y tratamiento (Heaney y Wright, 1997), los cuales permitan determinar los efectos causados por la concentración inicial de sólidos en el agua pluvial, el cambio de concentración por efecto de almacenamiento y del régimen de mezclado, la naturaleza de los sólidos suspendidos y la infraestructura de control del sistema de tratamiento.

Dependiendo del uso de suelo de una región, las aguas pluviales presentan características particulares. Así, la mayoría de los contaminantes en escorrentías de áreas urbanizadas corresponden a material particulado, grasa y aceites. Cuando se da suficiente tiempo de retención en un pozo, un 80–85% del material particulado puede sedimentar. Dadas las características hidráulicas de los pozos convencionales de retención, el proceso de sedimentación que sucede es del Tipo I (Grady, 2000), donde la velocidad de sedimentación depende del diámetro y densidad de la partícula (Figura 1). Debido a que las partículas en aguas pluviales son de tamaño y densidad heterogénea, la

velocidad promedio de sedimentación sólo puede ser determinada a partir del conocimiento de su distribución de tamaño. No obstante, existe la opción de analizar el comportamiento de sedimentación de una muestra representativa de agua de lluvia (Grimberg, 2002).

El Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés) ha elaborado protocolos para la colección de datos de sedimentos (Edwards y Glysson, 1999) y para los análisis de laboratorio de muestras de sedimentos suspendidos (Guy, 1969; Matthes *et al.*, 1991; Knott *et al.* 1992 y 1993; U.S. Geological Survey, 1999).

Para la solución de problemas prácticos relacionados con la determinación de tamaño de partículas y de velocidades de sedimentación y, con base en estos datos de suspensión, con el diseño de sistemas de tratamiento de agua, se han desarrollado técnicas experimentales que utilizan columnas de sedimentación para simular prototipos de clarificadores. En general, las columnas se llenan con la suspensión acuosa, se obtienen muestras a una profundidad específica y determinada a diferentes tiempos para determinar la remoción de sólidos suspendidos totales (Grady, 2000). En un procedimiento de laboratorio de sedimentación, la determinación de la velocidad promedio de sedimentación está basada en la obtención de 20 mL de muestra de una columna de agua de 500 mL a diferentes tiempos, la medición de la turbiedad, y su graficado en función del tiempo. El cambio de pendiente en una gráfica obtenida al representar la remoción de turbiedad en función de la velocidad de sedimentación a cada tiempo específico, constituye el tiempo de retención que se requiere para la remoción del 80–85% de partículas suspendidas, valor a ser considerado en el diseño de la estructura para retención.

El presente estudio tiene como objetivo el determinar las velocidades de sedimentación en las aguas pluviales contenidas en pozos de absorción para Ciudad Juárez, Chihuahua, México.

## PUNTOS DE MUESTREO

Los sitios a monitorear fueron establecidos por el Instituto Municipal de Investigación y Planeación (IMIP) con base en las necesidades y expectativas propias del proyecto (Figura 2). Criterios importantes de inclusión fueron principalmente la existencia de pozos de absorción, el grado de urbanización del área y el cauce natural del influente al pozo. Otros aspectos considerados fueron la facilidad de instalación de las estaciones de monitoreo de agua pluvial y el acceso a las mismas. Las características de los tres sitios seleccionados para realizar los muestreos de aguas pluviales son:

Sitio 1: Bordo PEMEX. Posee características de área de infiltración de aguas pluviales provenientes de cauce natural sin influencia urbana. Se localiza al suroeste de la ciudad en la cuenca del Arroyo El Jarudo, al norte de las instalaciones de almacenamiento de combustibles de

PEMEX, y recibe de forma directa 206,770 m<sup>3</sup> por año de escorrentías de la Sierra de Juárez (el agua pluvial llega al Bordo 2:40 horas después de iniciada la lluvia). El bordo de absorción es de tipo no compactado, sin vertedor y desfogue, con un área de drenado de 7.73 km<sup>2</sup> y una capacidad estimada de 40,000 m<sup>3</sup> (Figura 2) (IMIP, 2002).

Sitio 2: Pozos de absorción del Fraccionamiento ROMA. Los pozos se localizan en uno de los fraccionamientos relativamente más nuevos de la ciudad, por lo que poseen características de pozos con captación de aguas pluviales provenientes de cauce natural con influencia urbana. Se distingue un área de infiltración hacia la parte norte (zona urbana) y otro hacia la parte sur (cerros y lomerío), delimitados por terreno natural, y con pozos de absorción. Los pozos se localizan al suroeste de la ciudad en la Microcuenca ZIV.4.6 del Plano de Zonificación Hidrológica para Cd. Juárez, y reciben indirectamente parte de las escorrentías de la Sierra de Juárez, y en menor proporción escorrentías de áreas con bajo grado de urbanización, localizadas a lo largo del cauce natural de las escorrentías de la Sierra de Juárez (Figura 2). En su trayectoria, el cauce pasa por áreas de bajo grado de urbanización. Los pozos en su conjunto tienen un área de 4.68 km<sup>2</sup>, y el tiempo de concentración (máxima acumulación de agua) es a las 0.77 horas (46.2 minutos) después de iniciada la lluvia (IMIP, 2002).

Sitio 3: Vaso de contención Vista del Valle. Posee características de un pozo con captación de aguas pluviales provenientes de cauce con influencia urbana. Se localiza al poniente de la ciudad, en el Parque Hundido de la calle Morelia, dentro de la subcuenca del Arroyo Morelia (Zona de influencia ZIV.3) (Figura 2). Las aguas pluviales captadas en el vaso de contención Vista del Valle resultan del cauce por áreas de bajo y alto grado de urbanización. El pozo de absorción tiene un área de 3.103 km<sup>2</sup>, una capacidad de retención de 130,880 m<sup>3</sup>, y el tiempo de concentración (máxima acumulación de agua) es a las 0.55 horas (33 minutos) después de iniciada la lluvia (IMIP, 2002).

Adicionalmente se realizó un muestreo en el DIQUE I, localizado al sur de la ciudad., kilómetro 23.5, para la

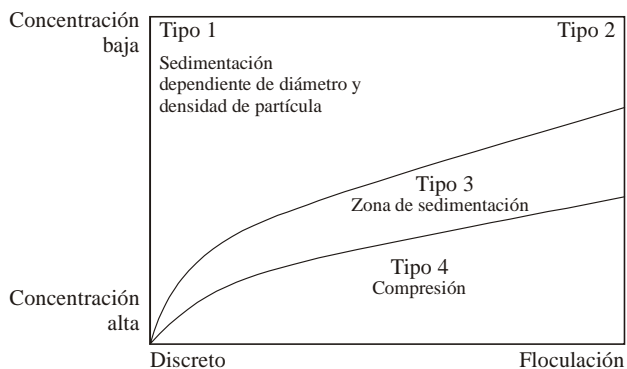


Figura 1. Diagrama para tipos de procesos de sedimentación.

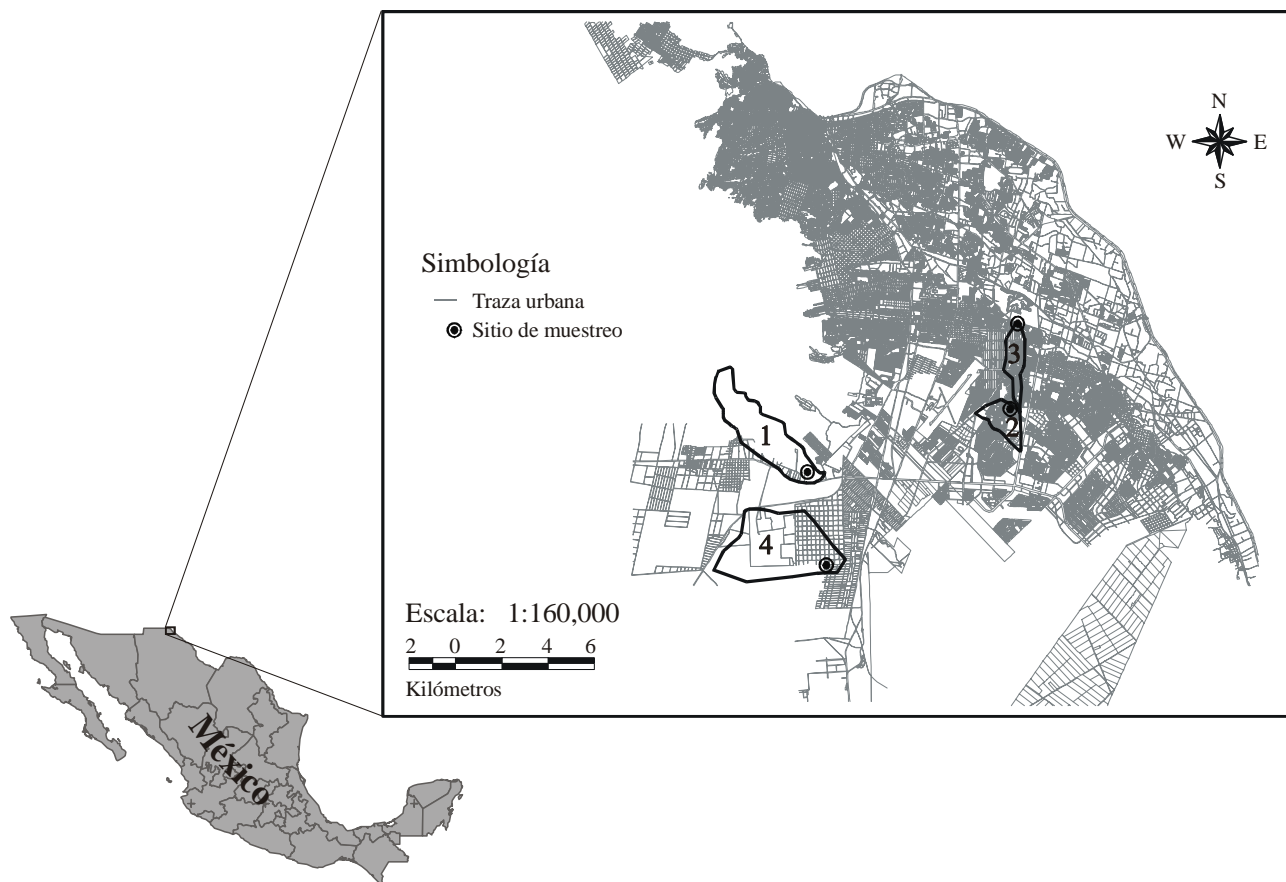


Figura 2. Ubicación de la área de estudio con las micro-cuencas en la mancha urbana de Cd. Juárez, Chihuahua y los sitios de muestreo. 1: ZIII 4.4 PEMEX; 2: ZIV4.4 ROMA; 3: ZIV4.3 MORELIA; 4: DIQUE I (mapa modificado de Chávez, 2002).

determinación de sólidos. Este dique presentó una alta capacidad de acumulación de agua para los eventos de lluvia durante el año en que se realizó el presente estudio.

## MÉTODO

Se tomó al azar una muestra de agua pluvial por cada sitio de captación. Posteriormente se aplicó el método propuesto por Grady, para la determinación de la remoción total de partículas suspendidas de una muestra acuosa, cuando se desconoce la distribución de tamaño de partículas (Grady, 2000). Se colocaron 550 mL de la muestra de agua pluvial homogeneizada en una probeta de 500 mL, y se marcó una pipeta volumétrica de 50 mL para tomar cada muestra a 3.5 cm por debajo del nivel superior de muestra (menisco). Se tomaron muestras de 50 mL a los 2, 4, 8, 16, 32, 64 y 128 minutos, y se determinó la cantidad de sólidos totales en las muestras. Adicionalmente se determinó el contenido de sólidos totales en la muestra original (0 min). Finalmente se obtuvieron gráficos para establecer las relaciones de remoción de sólidos y velocidades de sedimentación.

## RESULTADOS

Las muestras analizadas corresponden a las indicadas en la Tabla 1. Los resultados para las muestras R02-106 (PEMEX), R02-105 (ROMA), y R02-107 (MORELIA) corresponden al mismo evento de lluvia (19 de julio del 2002). R02-107 y R02-083 corresponden a eventos de lluvia del 19 de julio del 2002 y 14 de junio del 2002, respectivamente, de intensidad similar, aunque en la segunda fecha hubo una mayor precipitación.

En la Tabla 2 se presentan los contenidos de sólidos suspendidos totales determinados para cinco diferentes muestras de aguas pluviales (en gramos y en gramos por metro cúbico). Las lecturas base son los sólidos suspendidos determinados en 50 mL de muestra a los 0, 2, 4, 8, 16, 32, 64 y 128 minutos después de disponer la muestra en una probeta de 500 mL. Los sólidos removidos de la suspensión, los cuales son considerados sólidos sedimentables, se determinaron por diferencia respecto al contenido inicial de sólidos suspendidos de la muestra. A partir de esta información se realizaron los cálculos y conversiones pertinentes según las siguientes relaciones, para obtener datos de turbiedad y remoción de turbiedad (total y por

Tabla 1. Muestras de agua pluvial analizadas para determinar la velocidad de sedimentación.

Localización y características de las muestras	Grado de urbanización del sitio de muestreo	Identificación de la muestra
Bordo PEMEX (agua acumulada)	Área de infiltración de aguas pluviales provenientes de cauce natural sin influencia urbana.	Muestra R02-106
Fraccionamiento ROMA (agua acumulada)	Área de infiltración de aguas pluviales provenientes de escorrentías con baja influencia urbana.	Muestra R02-105
Vaso de almacenamiento e infiltración MORELIA (muestra instantánea, final de evento de lluvia, antes de entrar al pozo de absorción)	Área de infiltración de aguas pluviales provenientes de escorrentías que tienen contacto con superficies de bajo y alto grado de urbanización.	Muestra R02-083
Vaso de almacenamiento e infiltración MORELIA (muestra compuesta, final de evento, agua acumulada)		Muestra R02-107
DIQUE I (agua acumulada)	Área de infiltración de aguas pluviales provenientes de cauce natural sin influencia urbana.	Muestra R02-114

etapa), para posteriormente generar las gráficas de velocidades de sedimentación de partículas suspendidas total y por etapa:

Sólidos suspendidos (g) =  
Peso filtro con sólidos – Peso filtro solo

Remoción de sólidos suspendidos (g) =  
Sólidos suspendidos  $t=0$  – Sólidos suspendidos  $t=n$

Turbiedad ( $g/m^3$ ) =  
[Sólidos suspendidos (g)/ $V_{muestra}$  (mL)] x 1,000,000

Remoción total de turbiedad ( $g/m^3$ ) =  
Turbiedad  $t=0$  – Turbiedad  $t=n$

Velocidad de sedimentación total de partículas suspendidas ( $g/m^3/min$ ) =  
Remoción total de turbiedad ( $g/m^3$ ) / Tiempo (min)

Remoción de turbiedad por etapa ( $g/m^3$ ) =  
Turbiedad  $t=n-1$  – Turbiedad  $t=n$

Velocidad de sedimentación de partículas suspendidas por etapa ( $g/m^3/min$ ) =  
Remoción por etapa de turbiedad ( $g/m^3$ ) / Tiempo (min)

El parámetro de turbiedad permite darnos una idea de la cantidad de sólidos que permanecen en el cuerpo de almacenamiento y/o receptor de aguas pluviales. Considerando que de forma general una etapa de tratamiento, que consiste en un sistema de sedimentación, permite la remoción del 80–85% de sólidos, el conocer la turbiedad a tiempo real permitirá determinar el tiempo máximo de retención de las aguas pluviales y su liberación hacia la siguiente etapa de aprovechamiento. En el caso del parámetro remoción de sólidos, es importante conocer este valor debido a que permite prever la cantidad de sólidos

que estarán sedimentándose, por consiguiente constituyen una guía para los programas de mantenimiento y limpieza que habrán de implementarse con el fin de evitar problemas por azolvamiento del cuerpo de almacenamiento y/o receptor de aguas pluviales.

La persistencia de partículas suspendidas en las muestras analizadas, en gramos, es equiparable al concepto turbiedad (Figura 3). En este gráfico se aprecian pendientes negativas, en orden de mayor a menor, para las muestras R02-106 (PEMEX) – R02-114 (DIQUE I) – R02-083 (MORELIA, muestra instantánea de escorrentía). En DIQUE I se aprecia una disminución considerable en el contenido de sólidos después de 32 minutos y una eliminación de aproximadamente del 79% (de 0.24 a 0.05 g) después de 2 horas. Para los sitios PEMEX y MORELIA, la disminución de sólidos suspendidos sucede desde los primeros minutos, siendo del 95% y 87%, respectivamente, a las 2 horas. En ROMA (R02-105) y MORELIA- muestra de agua acumulada (R02-107) no se aprecian disminuciones considerables de los sólidos suspendidos. Una posible explicación para estas diferencias en persistencia de sólidos suspendidos es que, en el caso de MORELIA, la muestra con alta persistencia de sólidos corresponde a una muestra de agua pluvial acumulada, por lo que la sedimentación ya pudo haber sucedido, de hecho los valores iniciales y finales de persistencia de sólidos suspendidos a los 0 y 128 minutos son muy similares. Para la muestra de ROMA pudiera ser el tipo de material, aunque serían necesarias más pruebas de sedimentación para confirmar esta posibilidad.

En la Figura 3 se puede ver el comportamiento global de sedimentación a un tiempo. Se aprecian velocidades de sedimentación acentuadas en la muestra de PEMEX, seguida de DIQUE I y MORELIA-muestra instantánea; nuevamente ROMA y MORELIA-muestra compuesta de agua acumulada presentan bajos valores de sedimentación. Se hubiera esperado un orden análogo a lo observado en persistencia de sólidos y turbiedad, sin embargo el hecho de que la muestra de DIQUE I presentara sedimentación

Tabla 2. Datos para cálculo de velocidades de sedimentación en aguas pluviales de Cd. Juárez, Chih.

Tiempo (min)	Sólidos suspendidos (g)	Remoción de sólidos suspendidos (g)	Turbiedad (g/m <sup>3</sup> )	Remoción total de turbiedad (g/m <sup>3</sup> )	Remoción por etapa de turbiedad (g/m <sup>3</sup> )
<i>Bordo PEMEX. Muestra R02-106.</i>					
0	0.4197	0	8,394	0	0
2	0.2608	0.1589	5,216	3,178	3,178
4	0.2487	0.1710	4,974	3,420	242
8	0.2066	0.2131	4,132	4,262	842
15	0.1671	0.2526	3,342	5,052	790
32	0.0718	0.3479	1,436	6,958	1,906
64	0.0306	0.3891	612	7,782	824
128	0.0159	0.4038	318	8,076	294
<i>Fraccionamiento ROMA. Muestra R02-105.</i>					
0	0.0257	0.0000	514	0	0
2	0.0240	0.0017	480	34	34
4	0.0231	0.0026	462	52	18
8	0.0217	0.0040	434	80	28
15	0.0203	0.0054	406	108	28
32	0.0201	0.0056	402	112	4
64	0.0143	0.0114	286	228	116
128	0.0172	0.0085	344	170	-58
<i>Vaso de almacenamiento e infiltración MORELIA. Muestra R02-083.</i>					
0	0.1889	0	3,778	0	0
2	0.1486	0.0403	2,972	806	806
4	0.1349	0.054	2,698	1,080	274
8	0.1323	0.0566	2,646	1,132	52
15	0.1192	0.0697	2,384	1,394	262
32	0.0762	0.1127	1,524	2,254	860
64	0.0385	0.1504	770	3,008	754
128	0.0241	0.1648	482	3,296	288
<i>MORELIA. Muestra R02-107.</i>					
0	0.0117	0.0000	234	0	0
2	0.0088	0.0029	176	58	58
4	0.0083	0.0034	166	68	10
8	0.0077	0.0040	154	80	12
15	0.0039	0.0078	78	156	76
32	0.0059	0.0058	118	116	-40
64	0.0041	0.0076	82	152	36
128	0.0050	0.0067	100	134	-18
<i>DIQUE I. Muestras R02-114.</i>					
0	0.2414	0.0000	4,828	0	0
2	0.2420	-0.0006	4,840	-12	-12
4	0.2377	0.0037	4,754	74	86
8	0.2447	-0.0033	4,894	-66	-140
15	0.2453	-0.0039	4,906	-78	-12
32	0.2392	0.0022	4,784	44	122
64	0.1227	0.1187	2,454	2,374	2,330
128	0.0553	0.1861	1,106	3,722	1,348

posterior a los 30 minutos de iniciada la prueba fue contundente en el cambio de orden.

Las Figuras 4 y 5 presentan velocidades de sedimentación de partículas suspendidas en unidades de g/m<sup>3</sup>/min. La Figura 4 esta permite ver el proceso de velocidad de sedimentación global, en tanto que la Figura 5 permite ver el proceso de velocidad de sedimentación por etapas, es

decir entre cada período de tiempo considerado para toma de muestra durante el experimento (de los 0 a los 2 minutos, de los 2 a los 4 minutos, etc.). Este parámetro de alguna manera indica el momento en el cual el sistema llega a un equilibrio de sedimentación, ya que existe una mínima diferencia entre las velocidades de sedimentación de una etapa a otra. Nuevamente se comprueba que las muestras

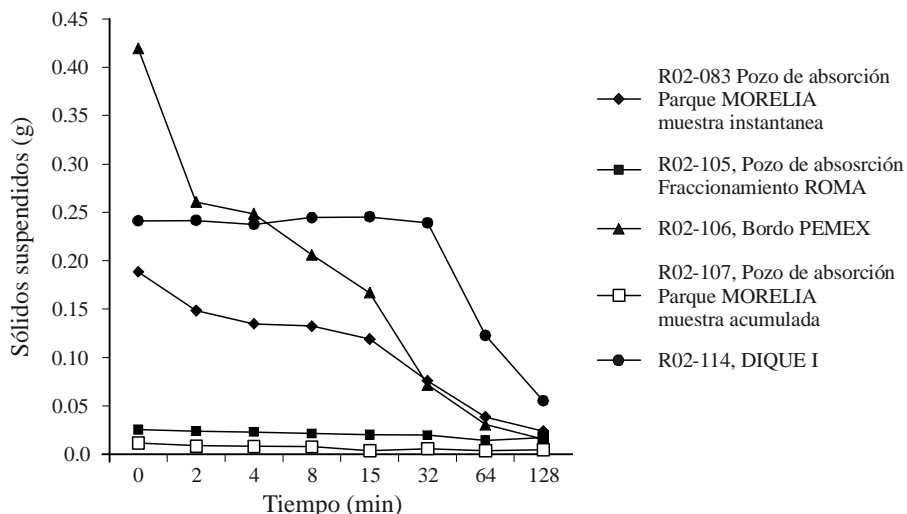


Figura 3. Persistencia de partículas suspendidas (g) en muestras de aguas pluviales para Cd. Juárez, Chih. Datos experimentales.

R02-105 y R02-107 (ROMA y MORELIA) son sistemas que han llegado a un equilibrio (anteriormente estas muestras presentaron bajas pendientes en las gráficas de persistencia de sólidos, turbiedad y remoción de turbiedad). Para PEMEX, si no se consideran los valores a 2, 32, y 128 minutos, la estabilización del sistema ocurre a los 8 minutos; en MORELIA a los 32 minutos (eliminando los valores a los 2 y 4 minutos), y en DIQUE I hasta los 128 minutos.

**DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES**

Los resultados para las muestras R02-106 (PEMEX), R02-105 (ROMA) y R02-107 (MORELIA) corresponden

al mismo evento de lluvia (19 de julio del 2002). Se puede apreciar en los datos de partículas suspendidas y remoción de las mismas, que las velocidades de sedimentación son directamente proporcionales al grado de urbanización del área en la cual se localiza el sitio de muestreo. También se aprecia una menor cantidad de sólidos suspendidos y mayor velocidad de sedimentación conforme se incrementa el grado de urbanización. Esto pudiera ser indicativo de que, en el caso de aguas pluviales de áreas urbanizadas, el tipo de partícula es de mayor densidad y por tanto al momento del muestreo ya ha habido una precipitación parcial en caso de baja turbulencia. La explicación se fortalece al comparar los resultados para las muestras del pozo de absorción MORELIA (R02-107 y R02-083), correspondientes a

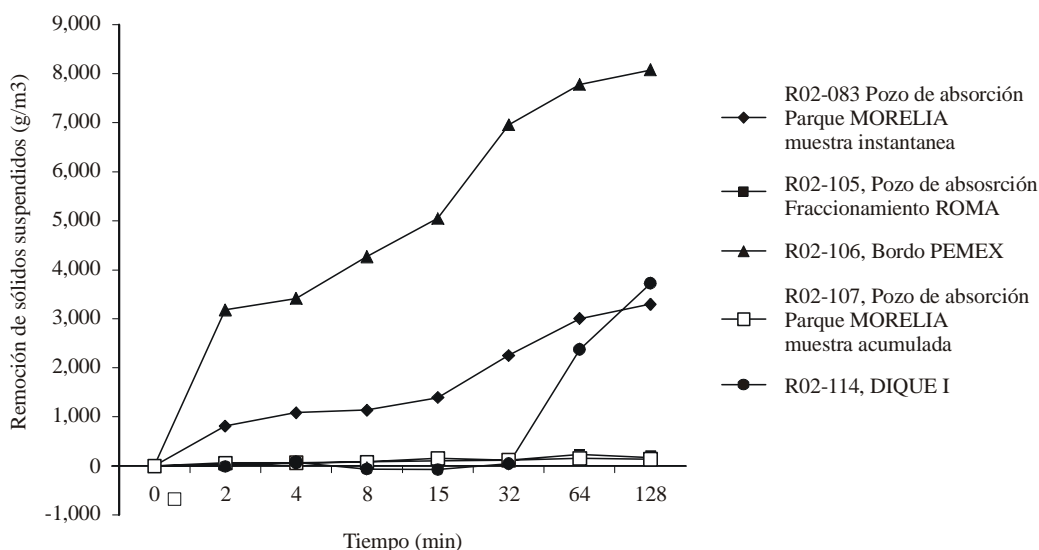


Figura 4. Velocidad de sedimentación de partículas suspendidas (g/m³/min) en muestras de aguas pluviales para Cd. Juárez, Chih.

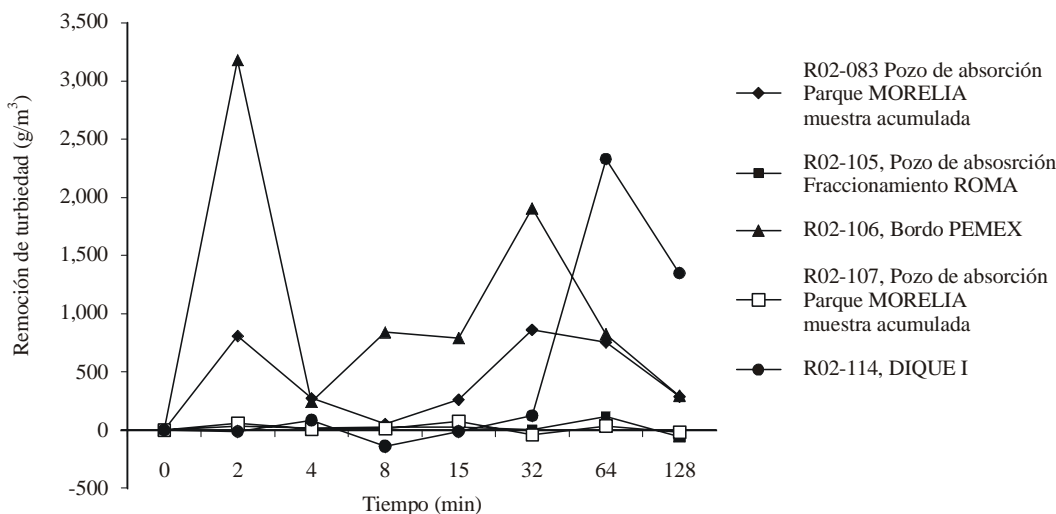


Figura 5. Velocidad de sedimentación de partículas suspendidas por etapa ( $\text{g/m}^3/\text{min}$ ) en muestras de aguas pluviales para Cd. Juárez, Chih.

eventos de lluvia del 19 de julio del 2002 y 14 de junio, respectivamente, de intensidad similar, pero con mayor precipitación el 14 de junio. La muestra del DIQUE I (de nula urbanización) cae dentro de la misma tendencia de comportamiento.

En la Figura 3 se observa que el contenido de sólidos suspendidos disminuye en un 50% con respecto a la concentración inicial a los 64 minutos para el sitio DIQUE I y en los primeros 8 minutos para PEMEX. En las muestras de los sitios ROMA y MORELIA-muestra acumulada existen desde un inicio menos del 10% de los sólidos presentes que en PEMEX, por lo que la remoción de partículas es inapreciable. No así para la muestra instantánea de MORELIA, en la que hubo una mayor cantidad de sólidos y la turbiedad disminuyó al 50% después de aproximadamente 30 minutos.

Referente a los gráficos de velocidad de sedimentación de partículas suspendidas en muestras de aguas pluviales para Cd. Juárez, Chih., se aprecia una mayor velocidad de precipitación en el bordo PEMEX, seguido del sitio MORELIA alta precipitación, ROMA bajos contenidos de sólidos. Obviamente, una alta velocidad de sedimentación se reflejaría en la disminución de problemas técnicos para la eficiencia del sedimentador.

Las velocidades de sedimentación de partículas suspendidas por etapa ( $\text{g/m}^3/\text{min}$ ) en muestras de aguas pluviales para Cd. Juárez, Chih. indican altos valores al inicio, con disminuciones considerables después de los 32, y 128 minutos para las aguas pluviales obtenidas de los sitios PEMEX y MORELIA, respectivamente. En los otros sitios, las velocidades de precipitación son bajas, lo cual indica presencia de partículas de baja densidad que habrán de ser manejadas con algún agente que facilite la precipitación de los sólidos suspendidos. Finalmente, en las zonas urbanizadas el tipo de partícula fue de mayor

densidad, posiblemente por la adsorción de grasas y aceites sobre las partículas suspendidas.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto Municipal de Investigación y Planeación de Cd. Juárez su interés y financiamiento de este estudio. Además agradecen al personal de laboratorio ambiental de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ) su apoyo durante el muestreo y análisis de las muestras presentadas.

## REFERENCIAS

- Chávez, J., 2002, Actualización del eje central de la traza urbana de Ciudad Juárez, Chihuahua [en línea]: Cd. Juárez, Chihuahua, Universidad Autónoma de Cd. Juárez, Centro de Información Geográfica, <<http://cig.uacj.mx/modules/Proyectos/TrazaJuarez/PROYECTO7.htm>> [Consulta: 1 de enero, 2003].
- Edwards, T.K., Glysson, G.D., 1999, Field methods for measurement of fluvial sediment: U.S. Geological Survey, Techniques of Water-Resources Investigations, book 3, Applications of Hydraulics, C2, 89 p.
- Grady, L. Jr., 2000, Notes prepared to accompany Unit Process in Environmental Engineering: Boston, MA., PWS Publishing Co., Clemenson University, 2nd Edition, 26 p. Grady, L. Jr., 2000, Notes prepared to accompany Unit Process in Environmental Engineering, 2nd Edition, Clemenson University, PWS Publishing Co., Boston, MA. 26 pp.
- Grimberg, S., 2002, Settling Laboratory [en línea]: Potsdam, NY, Clarkson University, Department of Civil and Environmental Engineering, Introduction to Engineering Design, <<http://www.clarkson.edu/~grimberg/CE212/Hw4-00.PDF>> [Consulta: 20 de julio, 2002].
- Guy, H.P., 1969, Laboratory theory and methods for sediment analysis: U.S. Geological Survey, Techniques of Water-Resources Investigations, book 5, Laboratory Analysis, C1, 58 p.
- Heaney, J.P. Wright, L.T., 1997, Integrating statistical methods and



- continuous simulation for evaluating urban stormwater systems, *in* James, W. (ed.), *Stormwater and Water Quality Management Modeling: Guelph, Ontario, Canadá, Computational Hydraulics Press*, 129–153.
- Heaney, J.P., Wright L., Sample, D., 1999, Research needs in urban wet-weather flows: *Water Environmental Research*, 7(2), 241–250.
- Herrmann, T., Schmida, U., Klaus, U., Huhn, V., 1996, Rainwater utilization as component of urban drainage schemes: hydraulic aspects and pollutant retention (resumen), *in* Proceedings of the 7th International Conference on Urban Storm Drainage, Hannover, Alemania, Septiembre 9-13: International Association of Hydraulic Engineering and Research/International Association for Water Quality (IAHR/IAWQ) Joint Committee on Urban Storm Drainage, 406 p.
- Instituto Municipal de Investigación y Planeación (IMIP), 2002, Estudio para el Manejo Integral de las Aguas Pluviales de Cd. Juárez y las Nuevas Áreas de Crecimiento: Cd Juárez, Chihuahua, Instituto Municipal de Investigación y Planeación, 223 p.
- Knott, J.M., Sholar, C.J., Matthes, W.J., 1992, Quality assurance guidelines for the analysis of sediment concentration by U.S. Geological Survey Sediment Laboratories: U.S. Geological Survey, Open-File Report 92-33, 30 p.
- Knott, J.M., Glysson, G.D., Malo, B.A., Schroder, L.J., 1993, Quality assurance plan for the collection and processing of sediment data by the U.S. Geological Survey, Water Resources Division: U.S. Geological Survey, Open-File Report 92-499, 18 p.
- Matthes, W.J. Jr, Sholar, C.J., George, J.R., 1991, A quality-assurance plan for the analysis of fluvial sediment by laboratories of the U.S. Geological Survey: U.S. Geological Survey, Open-File Report 91-467, 31 p.
- U.S. Geological Survey, 1999, Guidelines from the 1998 sediment laboratory chiefs workshop [en línea]: U.S. Geological Survey, Office of Surface Water, Technical Memorandum 99.04, <<http://water.usgs.gov/admin/memo/SW/sw99.04.html>> [Consulta: 6 de Julio, 1999].
- Manuscrito recibido: Septiembre 19, 2003  
Manuscrito corregido recibido: Septiembre 10, 2004  
Manuscrito aceptado: Septiembre 19, 2004