

---

---

## Caracterización y problemáticas generadas por los sedimentos arrastrados en el escurrimiento pluvial

Oscar Javier López De la Rosa<sup>1</sup>, Dr. David Zúñiga De León<sup>2</sup>, Mtro. Alberto Rodríguez Esparza<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Estudiante del programa de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

<sup>2,3</sup>Docente del programa de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

### Resumen

El presente artículo está enfocado a la caracterización de sedimentos y el agua pluvial como su vehículo de transporte. Se adjunta información documental que trata sobre su comportamiento espacial y temporal, refiriéndose a su composición química y bacteriológica que sirven de evidencia para determinar el origen de los mismos. Se incluyen ejemplos en los que se aprecian problemáticas generadas, y se presentan opciones para evitar y solucionar otras así como ejemplos de programas mediante los cuales se pueden realizar los modelos geo-hidrológicos y la evaluación de los volúmenes de sedimentos. Por último, se adjuntan resultados de una investigación para el análisis tanto del agua como de sedimentos presentes en un evento de precipitación.

**Palabras clave:** agua pluvial, caracterización, sedimentos.

### Introducción

Para que se produzca erosión y transporte de sedimentos así como el depósito de los mismos, se requiere al menos de dos condiciones hidráulicas. Por un lado, con relación a la erosión y transporte es necesario que se tenga una velocidad superior a la resistencia al corte del suelo de la cama del canal y a la velocidad de sedimentación del mismo. Esto es posible, cuando se presentan lluvias intensas y de corta duración capaces de producir escurrimientos. Por otro lado, para que se desarrolle el depósito de sedimentos, la velocidad del agua debe declinar de manera tal que sea inferior a la velocidad requerida para el transporte de éstos. Esta etapa de

depósito conlleva el riesgo de que se depositen suelos finos (comúnmente arcillas y limos) que son retenedores de grasas y bacterias, representando riesgo para la calidad del agua que finalmente llegará a un depósito de infiltración. Esta infiltración, puede causar a la vez un aumento de la escorrentía superficial en las pendientes. Fenómeno similar al que ocurre durante el deshielo de la primavera. Esto, debido a que el agua o nieve derretida produce una escorrentía de agua generando la erosión superficial, extrayendo partículas del suelo que se depositan en las partes más bajas de la ladera, en un valle, o se transportan en los cursos de agua (Konecna, et al, 2014).

Como ejemplo paralelo al que se ocupa en el área de estudio, la afectación de la precipitación se explica que con la finalidad de analizar el nivel de contaminación del río y la probable infiltración de contaminantes al acuífero del Valle de Aguascalientes, México, se tomaron muestras de agua y sedimentos de 50 sitios seleccionados aleatoriamente a lo largo del río. Todos los sedimentos contaron con presencia de Arsénico (As); el 50 % de los mismos por Plomo (Pb) y Zinc (Zn), el 25 % con Cobre (Cu) y aproximadamente el 13 % con Manganeso (Mn) y Cromo (Cr). Tres muestras presentaron contenido moderado de Fierro (Fe) y otros tres por Mercurio (Hg). Los resultados obtenidos en los pozos de agua no mostraron evidencia concluyente de contaminación del acuífero por aguas superficiales (Guzmán, 2011).

Así como el aspecto químico, los procesos de degradación también se encuentran relacionados íntimamente con los hidrológicos, que se desarrollan a nivel de cuenca hidrográfica y pueden ser controlados o reducidos gracias al contacto inhibitorio de cuerpos forestales. Estos aminoran las causas de erosión hidrológica, así como también reducen períodos de retorno de inundación, produciendo a la vez una disminución de la erosión del suelo por interceptación de las gotas de lluvia y el escurrimiento superficial, mejorando la estructura del suelo, la infiltración y acumulación de agua en el mismo (Besteiro, 2012).

Las zonas forestales no solo ayudan a controlar el nivel de agua en las cuencas, también se debe tomar en cuenta que el efecto de los incendios forestales en las

cuencas hidrológicas se clasifica como de primer orden por ejemplo, la vegetación quemada y la reducción de la infiltración del suelo. En lo que se refiere a los impactos de segundo orden se clasifican como: Aumento de la escorrentía, la erosión de laderas, la sedimentación corriente, y la alteración significativa del hábitat terrestre y acuático. La erosionabilidad post-incendio se relaciona con una multitud de factores, entre ellos la gravedad de la quemadura, la topografía, la geología subyacente, y la naturaleza de los suelos, por lo que los posibles impactos de sedimentación son difíciles de predecir (Ryan, et al, 2011).

El riesgo de arrastre de bacterias de diversa índole dentro de los suelos finos tales como limos y arcillas es evidente. Estas se producen por varias especies de cianobacterias que pueden dañar los microorganismos acuáticos tanto como a los seres humanos. Los sedimentos tienen el potencial de contribuir a la eliminación de bacterias disueltas en el agua pluvial a través de cualquier adsorción para sedimentar partículas biodegradables por las colonias bacterianas del suelo depositado. Sin embargo, la contribución relativa de estos dos procesos de eliminación es incierta y de poca claridad en virtud de que se sabe poco acerca de la importancia de la contribución general de los sedimentos (Song, 2013).

Para el estudio de los sedimentos, el establecimiento de una descripción cuantitativa de los flujos fluviales globales, es uno de los grandes objetivos de la hidrología y geomorfología contemporáneas. Además, se estudian cambios en el flujo global de agua fluvial y

flujo de sedimentos en suspensión (Cohen, 2014).

Las cantidades enormes de precipitación se dan por un fenómeno mundial, y es generalmente aceptado que el cambio climático probablemente conducirá a cambios en las precipitaciones estacionales e intensificar los fenómenos extremos. En cuanto a los recursos hídricos, el cambio climático puede ser caracterizado mayormente por las variaciones en las precipitaciones y la temperatura, que afectan el ciclo hidrológico y alteran los patrones de caudal y carga de sedimentos, así como los contaminantes del agua (Chen, 2014).

Por otra parte, las condiciones cambiantes podrían afectar a los sistemas de aguas residuales de diversas maneras. Los niveles del mar constituyen una preocupación obvia en las zonas costeras, donde las aguas han rebasado las de Estados Unidos hasta por 20 cm e incluso más en algunos lugares. Las aguas elevadas y las olas de tormentas pueden inundar o dañar las plantas de tratamiento costeras o sumergir las tuberías de desagüe, inhibiendo el vertido y provocando que retroceda hacia los sótanos y calles. Sin embargo, el principal motivo de preocupación puede ser que las precipitaciones se han vuelto más frecuentes e intensas en todo Estados Unidos, y según las predicciones, esta tendencia va en aumento. Entre 1958 y 2007 el número de días con precipitaciones muy intensas se incrementaron en 8% en Hawái, en el extremo más bajo, y en 58% en el Noreste, en el extremo más alto (Kessler, 2011).

Dentro de las ciudades, el desarrollo económico y una población humana cada vez mayor juegan un papel importante en el crecimiento de las áreas urbanizadas y por lo tanto la cantidad de áreas impermeables en el sistema de alcantarillado. A medida que la urbanización aumenta, se incrementa el escurrimiento directo resultando en inundaciones. Así mismo, disminuye la tasa de infiltración provocando una reducción en la recarga y abatimiento del nivel de aguas freáticas del acuífero. Los planes relativos a la gestión de riesgos de inundación indican la limitación de las zonas impermeables (pavimentadas). Esto con el fin de disminuir que las aguas pluviales y de escorrentía se filtren al sistema de alcantarillado u otros receptores (por ejemplo, ríos). Un aumento en la cantidad de áreas verdes es una de las medidas más importantes para proteger y aumentar la retención de agua en las zonas urbanizadas (Barazcz, 2014).

Además, el desarrollo de áreas urbanas afecta significativamente el ciclo hidrológico natural. Lo anterior se debe a que mayor factor de cambio en el proceso de urbanización que evoluciona en varias etapas en el desarrollo de una Ciudad. Cada etapa afecta de manera particular y significativa a los acuíferos. El proceso de recarga se modifica principalmente por la impermeabilización o pavimentación de la superficie, debido a la urbanización se produce una recarga indirecta que es diferente a la recarga que se produce en zonas rurales (Dávila Pórcel, 2011).

A simple vista, cada año son evidentes las consecuencias de los efectos de la gestión pluvial inadecuada en las principales ciudades de México,

encharcamientos, inundaciones, problemas de tráfico, desborde de ríos o canales y el rebose del drenaje combinado en zonas urbanas habitadas. En su origen, el agua de lluvia es un recurso de muy buena calidad, sin embargo su pureza también depende en gran medida de la superficie por la que escurre, como techos o calles, que contienen partículas que se encuentran adheridos a estas y que pueden ser tóxicas. Estudios realizados por la Organización Mundial de la Salud (OMS) demuestran que techos de viviendas urbanas y rurales, construidos con materiales que contienen metales pesados contaminan el agua pluvial que escurre por ellos. También algunos análisis han detectado niveles altos de coliformes totales y fecales, producidas por el excremento depositado por aves, roedores y otros animales. A esto hay que sumarle que las superficies por las que escurre el agua en las ciudades, existen niveles más altos de basura, químicos, hidrocarburos y otros tóxicos. Por esta razón, si se quiere aprovechar el recurso pluvial, se recomienda que el líquido pase por un proceso que retire los contaminantes y sustancias que arrastran los escurrimientos (Serrano, 2014).

Para iniciar con el estudio de los sedimentos se toma en cuenta que la elección del modelo depende básicamente de la información deseada y los datos disponibles para el área de estudio. Modelos hidrogeológicos basados en procesos ofrecen varias ventajas sobre los modelos empíricos. Estos incluyen: (a) la capacidad para estimar la distribución espacial y temporal de la pérdida neta de suelo. La extrapolación más precisa a los sitios no

aforados, y (c) una mayor capacidad para predecir la producción de sedimentos que incluye información de tamaño de partícula (Maalim, et al, 2013).

Para la simulación de los suelos arrastrados por el agua pluvial en el área de estudio se usará el software HEC-RAS, el cual es un programa informático que hace la modelación hidráulica de flujo de agua a través de ríos naturales y otros canales. El programa es unidimensional, lo que significa que hay modelado directo del efecto hidráulico de los cambios en la forma de la sección transversal, curvas, y otros aspectos tridimensionales de flujo. El programa fue desarrollado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos, el Cuerpo de Ingenieros del Ejército con el fin de gestionar los ríos, puertos, y otros trabajos públicos bajo su jurisdicción (Belicci, 2014).

El modelo HEC-RAS 4.0 ha sido ampliado para incluir una componente de la calidad del agua que puede simular la temperatura del agua y el movimiento de los contaminantes en los ríos, por ejemplo, un pequeño arroyo del sur de Ontario se modela en HEC-RAS 4.0 para explorar las capacidades de modelado de temperatura (Drake, 2010).

Se considera a la erosión hídrica como uno de los procesos de degradación ambiental más importantes, y se compone de riachuelos y el desprendimiento laminar. El desprendimiento laminar se produce cuando las partículas del suelo se separan por las gotas de agua y son transportados por el flujo superficial de poca profundidad, mientras que la erosión en surcos es el

desprendimiento y transporte de partículas del suelo por flujo concentrado. A continuación, estas impurezas desprendidas se transportan y se depositan como sedimentos aguas abajo en la desembocadura de las cuencas hidrológicas (Marques, et al, 2013).

En adición al cambio climático la ocurrencia de fenómenos extremos naturales y antropogénicos hace que la comunidad mundial preste más atención a su medio ambiente así como a los impactos económicos. La erosión del suelo es uno de ellos y es un problema creciente en el sureste de Europa, en especial en los países mediterráneos. La degradación del suelo causada por la erosión es especialmente grave en Montenegro. La erosión producida por el agua en el suelo ha afectado a 95% del total del territorio de Montenegro. Los impactos fuera del sitio de la escorrentía y erosión del suelo, la sedimentación, la pérdida de capacidad de los embalses y las inundaciones están aumentando en esta región (Spalevic, et al, 2014).

Una gran parte de los métodos de erosión aplicados a escala de cuencas se basan en una representación espacialmente agregada, es decir en la subdivisión del espacio en superficies a las que se supone un comportamiento homogéneo (sub cuencas, unidades hidrológicas, entre otros). Esta aproximación conlleva una deseable simplificación de los cálculos, pero presenta dificultades para abordar problemas relacionados con el transporte de sedimentos y la identificación de áreas fuente de sedimento, que deben tratarse mediante una representación espacial continua (Alatorre, et al, 2013).

Para la interpretación del área de estudio, el uso de cuencas experimentales se estableció firmemente en la década de 1960 y proporcionó información valiosa sobre el control de la escorrentía y los procesos erosivos que operan dentro de la cuenca de drenaje (Burt & Walling, 1984). Durante la década de 1980, se mostró un gran interés en la vigilancia de cuencas pequeñas con el fin de recopilar datos para establecer los presupuestos de agua y sedimentos en España. Las cuencas son el mejor escenario para la comprensión de la dinámica geomorfológica y el movimiento de sedimentos, que en su caso era una cuenca de 22 km<sup>2</sup> situada en el Pre-pirineo. Esta situación hace uso de la tierra, uno de los factores con la mayoría de los efectos directos sobre la respuesta hidrológica, y este hecho es uno de los que más estudiaron aspectos importantes en todo el mundo (Pacheco, et al , 2011).

Los problemas a nivel de costa también son una realidad como lo es la descarga de agua y sedimentos de flujo de carga del río en el mar, que son factores dominantes que controlan la evolución del delta costero (desembocadura de un río en el mar), es decir, la forma de relieve de la boca del río, el proceso de la playa y el entorno ecológico de la zona costera. Los impactos del transporte de sedimentos y depósitos de los grandes ríos del mundo sobre la morfología delta-costa han sido los principales temas de investigación en las últimas décadas, y los procesos de aprobación de la gestión del agua y la carga de sedimentos en el mar se han convertido en un problema mundial de interés común. Este problema, es apreciable en El río

Amarillo, que es el segundo río más grande en China, se origina en la meseta Qinghai-Tíbet, fluye hacia el Este a través de la meseta de loess y el norte de China (Yu, et al, 2011).

Un claro ejemplo de problemas ocasionados por sedimentos se relata en una investigación de sedimentos depositados en alcantarillado unitario, en el ámbito europeo. Un sistema unitario está diseñado para transportar la combinación de agua pluvial y residual originada en núcleos urbanos e industriales. Las condiciones de flujo de aguas sólo residuales en tiempo seco y las características de diseño de los conductos unitarios de alcantarillado, provocan la sedimentación de partículas sólidas dentro de las conducciones. Como resultado, se produce una acumulación progresiva de sedimentos, de alto contenido

orgánico, en el interior del sistema durante el tiempo sin lluvia. A su vez, los depósitos de sedimentos actúan como acumuladores de contaminantes. El material depositado no sólo disminuye la capacidad de transporte de las redes, sino que además tiene un efecto importante en la resistencia hidráulica debido al incremento de rugosidad de los contornos. Estos cambios, sumados a escasas o inadecuadas tareas de mantenimiento pueden provocar la entrada de carga en el sistema, problemas de inundación y el aumento en la frecuencia de los eventos vertidos a medios receptores. También, la permanencia de depósitos de sedimentos durante tiempos prolongados, por sus características químicas y biológicas, pueden causar la degradación en la estructura interna del sistema (Seco, et al, 2012).

## Metodología

El proceso metodológico para la realización de este artículo llevó varias etapas, la primera fue la selección del título para dicho artículo, el cual debe ser un tema en general del que se obtenga información referente a él a nivel mundial. Para esto se tomó como referencia el enfoque específico del autor, que está basado en el estudio de los sedimentos en el vaso de captación Parque Central (Figura 1), ubicado en Ciudad Juárez, Chihuahua. México. Estas

partículas arrastradas por el agua pluvial traen consigo problemáticas a la comunidad en general donde se presentan los fenómenos pluviales. Por lo anterior, se definió el tema del artículo que engloba en si los problemas y la caracterización de los sedimentos sobre los que se realizó esta investigación que plantea dar solución a las especificaciones mencionadas de calidad de agua.



Figura 1. Dique Parque Central.

Definido el tema se procedió a buscar información confiable y veraz, aquella que cumpla con varios requisitos para ser válida como referencia dentro de esta investigación.

Se llevó a cabo una investigación documental, teniendo en cuenta artículos de revistas, artículos científicos, informes de congresos, extractos de libros, y cualquier documento que cumpliera con los requisitos de veracidad en la información que proporcionan. Para encontrar artículos relevantes y con buen contenido fue necesario pensar en donde buscar los datos indicados, con tal de evitar usar información apócrifa.

Se usó principalmente la base de datos de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Biblioteca Virtual, en la cual se encontraron la mayoría de los artículos consultados para la realización de este artículo. Los demás fueron encontrados en la red mediante filtros de búsqueda como una antigüedad máxima de 5 años, que los artículos estuvieran relacionados con el tema de investigación y que fueran de verdadero aporte. De los cientos de artículos encontrados, se tomaron aquellos que en el título y en el resumen contuvieran palabras clave del tema, así como información veraz y que se demostrara su verdadera procedencia.

## Resultados

Después de consultar varias fuentes de información acerca de las características, análisis y comportamiento de los sedimentos, se analizó una muestra de agua

pluvial que ocurrió el 17 de marzo del presente año, obteniéndose algunos parámetros (ver tabla 1) para su clasificación que resultó en agua tipo

bicarbonatada cálcica, con una gran cantidad de coliformes fecales contenida en ella, alrededor de 24,000 colonias por cada 100 mililitros muestreados. Adjuntado a la

calidad del agua, los sólidos disueltos tenían presencia de 260 mg/L por lo que cae en el rango de agua dulce (ver tabla 2).

Parámetro	Valor obtenido
Alcalinidad (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	189,41
Conductividad Eléctrica (µs/cm)	299,7
Dureza Total (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	176,0
Dureza Cálcica (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	45,41
Sólidos Disueltos Totales (mg/L)	260,0
Sólidos Susp. Totales (mg/L)	94,0
Grasas y Aceites (mg/L)	54,1
Cloruros (mg/L)	21,68
Nitratos (mg/L)	0,27
pH	7,27
Sulfatos (mg/L)	73,3
Magnesio (mg/L)	31,73
Potasio (mg/L)	8,096
Sodio (mg/L)	28,07
Coliformes fecales (NMP/100ml)	?24000
Coliformes totales (NMP/100ml)	?24000

Tabla 1. Parámetros de un caso analizado (17 de marzo, 2015. Cd. Juárez, Chih.)

Clasificación	Total de sólidos disueltos (ppm)
Agua dulce	0-1000
Agua salobre	1000-10000
Agua salada	10000-100000
Salmuera	> 100000

Tabla 2. Clasificación del agua de acuerdo a sólidos disueltos (Custodio & Llamas, 2001).

También, se obtuvo un promedio de la cantidad de sedimento presente en el agua (ver tabla 3), teniendo 0.689 kilogramos de material por cada mil litros que ingresan al vaso de captación.

Muestras obtenidas en recipientes de polietileno							
Muestra	Radio menor (cm)	Radio mayor (cm)	Altura del agua (cm)	Volumen de agua (lt)	Sedimento capturado (gr)	Relación (gr/lt) o (kg/m <sup>3</sup> )	Promedio relación (gr/lt) o (kg/m <sup>3</sup> )
1-1	13	13.92	21.5	12.243	7.99	0.653	0.689
1-2		13.86	20.1	11.394	7.23	0.635	
1-3		14.4	32.8	19.365	15.12	0.78	

Tabla 3. Datos de la precipitación del 17 de Marzo del 2015.

## Conclusión

Las partículas sólidas o sedimentos transportados por el agua sin duda implican una gran problemática para la infraestructura pluvial ya que ocasiona la obstrucción de las líneas que capturan la misma y provocan erosión en las superficies donde circula debido a los impactos de los sedimentos con la misma, causando una degradación y desprendimiento de partículas. El agua de lluvia que ingresa al vaso de captación, al catalogarse como

bicarbonatada cálcica, es decir, compuesta principalmente de bicarbonatos y calcio, haciendo este último que la tonalidad varíe en el sedimento dependiendo su concentración. Además, el agua incluye una gran cantidad de coliformes fecales, a una razón de 24,000 colonias por cada 100 mililitros de agua depositados en el dique, generando un gran foco de infección cuando el agua permanece estancada.

## Referencias

- Alatorre, L. C., Beguería, S., Lana-renault, N., Navas, A. 2013. Modelización espacialmente distribuida de la erosión y el transporte de sedimento en cuencas de montaña del pirineo aragonés: retos para la calibración y validación. Universidad de La Rioja, Logroño, España.
- Barszcz, M. 2014. Influence of applying infiltration and retention objects to the rainwater runoff on a plot and catchment scale. Polish journal of environment studies v. 24, 57-65.
- Belicci, R. 2014. Advance Hydraulic modeling using HEC-RAS, Baraolt river, Romania. Research journal of agricultural science.
- Besteiro, S. I. 2012. Modelización de la emisión de sedimentos en una cuenca con forestaciones del Noreste Pampeano. Ciencias Agrarias, 111-127.
- Chen, X. 2014. Climate change impact on runoff and sediment loads to the apalachicola river at seasonal and event scales. Coastal Research, 35-42.
- Cohen, S. 2014. Global suspended sediment and water discharge dynamics between 1960 and 2010: Continental trends and intra-basin sensitivity. In global and planetary change, 44-58.
- Custodio, E., & Llamas, R. 2001. Hidrología Subterránea. Barcelona: Editorial Omega.
- Dávila Pórcel, R. A. 2011. Importancia de la hidrogeología urbana; ciencia clave para el desarrollo urbano sostenible. Boletín de la sociedad geológica mexicana, 463-477.
- Drake, J. 2010. Application of HEC-RAS 4.0 temperature model to estimate groundwater contributions to Swan Creek, Ontario, Canada. In journal of hydrology, 390-398.
- Guzmán, G. 2011. Evaluación de contaminantes en agua y sedimentos del río san pedro en el estado de Aguascalientes. Universidad y ciencia, 17-32.
- Kessler, R. 2011. Stormwater strategies: Cities prepare aging infrastructure for climate change. Environmental health perspectives, 514-519.
- Konecna, J., & Podhrazka, J. K. 2014. Erosion processes and sediment transport during extreme rainfall-runoff events in an experimental catchment. Polish journal of environment studies v. 23, 1195-1200.
- Maalim, F. K., & Melesse, A. M. 2013. Modelling the impacts of subsurface drainage on surface runoff and sediment yield in the Le Sueur Watershed, Minnesota, USA. Hydrological Sciences journal v. 58, 570-586.

- Marques, R., Guimares, C., de Lima, V., & Pereira, L. 2013. Erosivity, surface runoff, and soil erosion estimation using GIS-coupled runoff-erosion model in the Mamuaba catchment, Brazil. *Environmental monitoring and assessment*, 8977-8990.
- Pacheco, E., Farguell, J., Ubeda, X., Outeiro, L., & Miguel, A. 2011. Runoff and sediment production in a mediterranean basin under two different land uses. *Cuaternario y geomorfología*, 103-114.
- Ryan, S. E., Dwire, K. A., & Dixon, M. K. 2011. Impacts of wildfire on runoff and sediment loads at little granite creek, western Wyoming. *Geomorphology* v. 129, 113-130.
- Seco, R. I., & Gómez, M. 2012. Transporte de sedimentos depositados en alcantarillado unitario. XXV Congreso latinoamericano de hidráulica (pág. 10). San José, Costa Rica: Grupo de investigación FLUMEN.
- Serrano, S. 2014. Sistema de captación de agua de lluvia. *Impluvium*, pág. 41.
- Song, H. 2013. Contribution of sediments in the removal of microcystin-LR from water. In *toxicon*, 23-47.
- Spalevic, V., Railic, B., Djekovic, V., Andjelkovic, A., & Curovic, M. 2014. Calculation of soil erosion intensity and runoff of the Lapnjak watershed, Polimlje, Montenegro. *Agriculture and forestry*, 261-271.
- Yu, J., Fu, Y., Li, Y., Han, G., Wang, Y., Zhou, D., . . . Meixner, F. X. 2011. Effects of water discharge and sediment load on evolution of modern Yellow River Delta, China, over the period from 1976 to 2009. *Biogeosciences*, 2427-2435.