

# Perspectiva del manejo del drenaje pluvial frente al cambio climático - caso de estudio: ciudad de Barranquilla, Colombia\*

Perspective of the Stormwater Management Facing Climate Change - Case Study: Barranquilla City, Colombia

Humberto Ávila, PhD<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup>PhD. Profesor asistente, Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia. [havila@uninorte.edu.co](mailto:havila@uninorte.edu.co)

Recibido el 1 de octubre de 2012, aprobado 25 de octubre de 2012.

## Palabras claves

Cambio climático, drenaje pluvial, recursos hídricos, manejo sostenible, caudales pico.

## Key words

Climate change, stormwater drainage, water resources, sustainable management, peak flow.

## Resumen

El cambio climático ha impuesto retos sobre el manejo de los recursos hídricos en zonas urbanas. Las políticas y el enfoque de la ingeniería deben considerar la adaptabilidad como parte fundamental de la planeación de proyectos hidráulicos. La ciudad de Barranquilla, Colombia, presenta una de las problemáticas de drenaje pluvial más importantes en el mundo, debido a que cerca de 100 km de la malla vial, incluyendo vías principales, se convierten en ríos urbanos todos los años durante la temporada de lluvia, con caudales entre 30 y 100 m<sup>3</sup>/s. El artículo presenta un diagnóstico general de la problemática y una discusión sobre algunas de las alternativas de manejo sostenible de drenaje urbano aplicables a las condiciones de la ciudad para el control de caudales pico.

## Abstract

Climate change has imposed challenges on the water resources management in urban areas. Policies and engineering should take into account the adaptability of the stormwater systems as a key part for water resources project planning. The city of Barranquilla, Colombia, has one of the most critical stormwater problems in the world, due to close to 100 km of the urban street network, including main streets, become in urban rivers every year during the raining season, with flow rates from 30 to 100 m<sup>3</sup>/s. This article shows a general diagnosis of the problem and a discussion of some alternatives of sustainable urban drainage management applicable to the conditions of the city for controlling peak flow.

## INTRODUCCIÓN

Un sistema de drenaje pluvial en general debe proteger las vidas humanas, la infraestructura urbana, el entorno natural y mantener la movilidad vehicular y peatonal. En Barranquilla, el sistema de drenaje pluvial lo constituye las calles por donde circulan los vehículos, por esto, no se cumple con ninguno de los objetivos requeridos en cuanto

al manejo pluvial. En Barranquilla, el enfoque de manejo integral de drenaje urbano, implica no sólo el manejo de la cantidad de agua y la calidad, sino también la capacidad de adaptabilidad frente al cambio climático del sistema de drenaje que se proyecte para la ciudad.

La cuenca oriental, actualmente urbanizada en más del 90%, carece de alcantarillado pluvial. Por esto, la escorrentía superficial fluye sobre las vías

con caudales muy peligrosos que ponen en riesgo la vida de las personas y generan daños significativos en la infraestructura y la economía de la ciudad. En la cuenca oriental, encontramos los arroyos Don Juan, Rebolo, Hospital, la Paz, Felicidad, Bolívar, Carrera 65, Coltabaco, Country, Siape y Calle 91. La cuenca occidental, en su porción urbanizada, también carece de un alcantarillado pluvial y, a pesar de que algu-

\* Este artículo es el resultado de la ponencia de Humberto Ávila presentada en el foro "Hidrología de extremos y cambio climático", que se llevó a cabo en la Universidad de los Andes el día 28 de junio de 2012.

nos arroyos estén canalizados, muchos de ellos presentan insuficiencias y alto riesgo de inundaciones en zonas bajas. Asimismo, se presentan problemas de inestabilidad del terreno en las zonas altas. Actualmente, se adelantan los trabajos de canalización por parte del Distrito. La zona de expansión urbana se encuentra en esta cuenca, con lo cual la ciudad crecería aproximadamente a 1.5 veces su tamaño actual. Ambas cuencas requieren de un plan maestro de drenaje para las intervenciones futuras.

#### CARACTERÍSTICAS DE CUENCAS Y TOPOGRAFÍA

La ciudad de Barranquilla está dividida por dos grandes cuencas, la oriental y la occidental. La cuenca oriental abarca el mayor porcentaje del casco urbano de la ciudad. A su vez, es donde los arroyos urbanos descargan directamente al río Magdalena. La cuenca occidental, incluye los arroyos que descargan al arroyo León y al arroyo Grande que, finalmente, vierten sus aguas a la Ciénaga de Mallorquín y el mar Caribe. Las pendientes en las vías son empinadas hidráulicamente en la mayor parte del casco urbano. Sólo en las cercanías al río Magdalena y los caños hay pendientes bajas, así como también en sectores aún no urbanizados en la cuenca occidental. La elevación máxima en Barranquilla es aproximadamente 145 m.s.n.m. De esta cota hasta el río Magdalena en la cuenca oriental, se tienen pendientes promedio en las vías o arroyos entre 2 y 5% a lo largo de su recorrido o cauce. Hacia la cuenca occidental, se tienen pendientes superiores al 5% en las partes altas de la cuenca, que luego descargan a los afluentes del arroyo Grande con pendientes bajas. Las pendientes altas condicionan velocidades altas y tiempos de concentración cortos, lo cual tiene como resultado caudales y velocidades altas que, son características, de los arroyos peligrosos y condiciones de amenaza por inundación en zonas bajas.

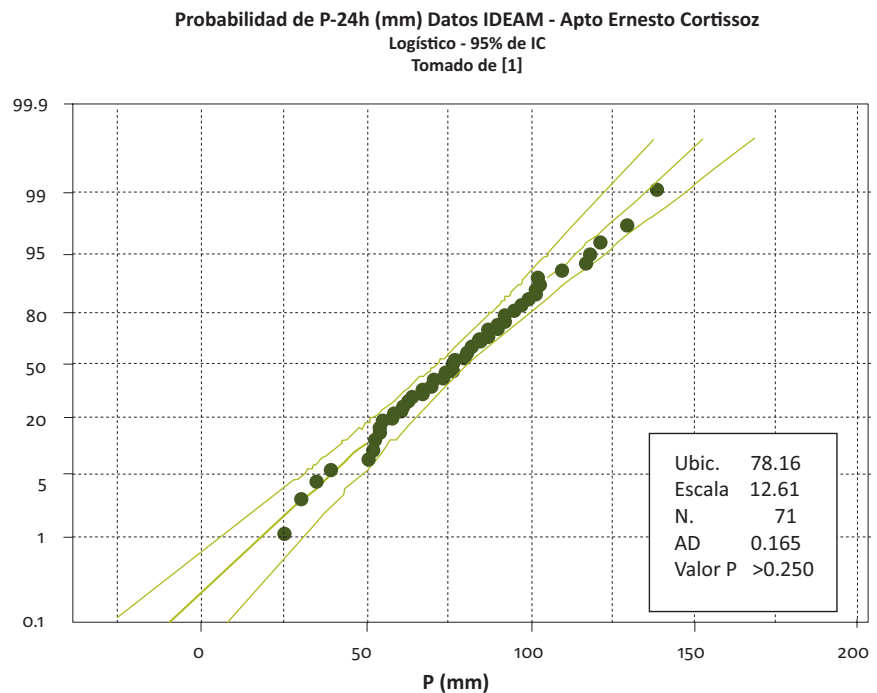
#### PRECIPITACIÓN Y ESTIMACIÓN DE CAUDALES Y VELOCIDADES

La precipitación promedio anual en la ciudad de Barranquilla es de 850 mm aproximadamente, basada en los registros de la estación del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) del aeropuerto Ernesto Cortissoz. De este volumen de precipitación, 420 mm caen entre los meses de agosto, septiembre y octubre, correspondientes a los meses más lluviosos del año. A partir de los registros históricos de precipitación diaria de la estación (IDEAM) del Aeropuerto Ernesto Cortissoz (1970 – 2011), se desarrolló la curva de probabilidad de no excedencia de precipitación diaria que evidencia las magnitudes promedio de 111 mm de precipitación para períodos de retorno de 10 años y eventos de 141 mm para períodos de retorno de 50 años (Figura 1).

Con base en información secundaria, recopilada a partir de algunos paráme-

tros supuestos y criterios soportados por las condiciones de las cuencas urbanas en la ciudad, se realizó una estimación de caudales y velocidades de los arroyos de algunas cuencas principales de la vertiente Oriental. Se tomó, como punto de concentración, la Vía 40 y la Calle 30. Los criterios de cálculo fueron los siguientes:

- Estimación del caudal pico en el punto de concentración de las cuencas mediante el método SCS.
- Datos de precipitación de la estación IDEAM del Aeropuerto Ernesto Cortissoz.
- Número de curva utilizado CN = 85.
- Tiempos de concentración estimados entre 15 y 40 min.
- Períodos de retorno entre 2 y 100 años.
- Estimación de profundidades y velocidades en el punto de concentración mediante la ecuación de Manning.
- Ancho de la vía supuesto  $b=10$  m.
- Rugosidad de Manning  $n=0.015$ .
- Pendiente predominante en los cauces  $S_0 = 2\%$ .



Fuente. Gráfica del autor a partir de [5]

Figura 1. Probabilidad de no excedencia anual de precipitación máxima en 24 horas – Estación)

**Tabla 1.** Caudales pico en puntos de concentración estimados para distintos períodos de retorno.

Cuenca	Area Cuenca (Ha)	Caudal pico estimado en punto de concentración (m <sup>3</sup> /s)					
		2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años
Calle 91	284	35	47	56	67	76	87
Siape	274	34	46	54	64	74	84
Country	534	58	78	92	110	127	144
Coltabaco	121	17	23	27	33	37	42
Carrera 65	369	45	61	72	86	99	113
Felicidad	422	46	62	73	87	100	114
La Paz	78	12	16	19	22	26	29
Hospital	223	27	37	44	52	60	68
Rebolo	543	59	80	94	113	129	147
Don Juan	857	83	112	132	159	183	208

**Tabla 2.** Velocidades estimadas para caudales picos en punto de concentración.

Cuenca	Area Cuenca (Ha)	Caudal pico estimado en punto de concentración (m <sup>3</sup> /s)					
		2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años
Calle 91	284	5.5	6.2	6.6	7.0	7.4	7.7
Siape	274	5.5	6.1	6.5	6.9	7.3	7.6
Country	534	6.7	7.4	7.9	8.4	8.8	9.2
Coltabaco	121	4.2	4.7	5.0	5.4	5.7	6.0
Carrera 65	369	6.1	6.8	7.2	7.7	8.1	8.5
Felicidad	422	6.1	6.8	7.2	7.7	8.1	8.5
La Paz	78	3.7	4.1	4.4	4.7	4.9	5.2
Hospital	223	5.1	5.7	6.0	6.4	6.8	7.1
Rebolo	543	6.7	7.5	7.9	8.4	8.9	9.3
Don Juan	857	7.6	8.4	8.9	9.5	9.9	10.4

La magnitud de caudales y velocidades refleja la peligrosidad de los arroyos asociada a condiciones hidráulicas supercríticas. De los arroyos con mayor peligrosidad se encuentra el de Siape (Calle 84), Country (Calle 76), Rebolo (Carrera 21), Felicidad y Don Juan.

#### RESTITUCIÓN DE CONDICIONES HIDROLÓGICAS DE CUENCAS CONSOLIDADAS

Las tecnologías sostenibles para drenaje urbano son definidos por la Naval Facilities Engineering Command, Atlantic (NAVFAC) como “un conjunto de estrategias de gestión de aguas llu-

vias para mantener o restablecer las funciones hidrológicas naturales de un lugar (...)” [2]. Existe una amplia literatura científica en The U.S. Environmental Protection Agency (USEPA) publicado en el 2000 y 2001 que comprende reglamentos, manuales de aplicación e información comercial sobre estas tecnologías.

Las propuestas para zonas urbanas consolidadas se enfocan en la restitución de las condiciones hidrológicas urbanas de las cuencas, la canalización progresiva de arroyos (calles) y el control de contaminación de escorrentía pluvial. El restablecimiento de las condiciones hidrológicas de las cuencas urbanas consolidadas son de-

terminantes para la reducción del volumen de escorrentía y caudales pico. Este propósito se logra mediante el uso de tecnologías sostenibles de drenaje. Sin embargo, los criterios para la conveniencia, dimensionamiento y uso de estas tecnologías deben ser estudiadas para cada una de las cuencas con el fin asegurar su efectividad y aumentar la relación beneficio/costo, considerando ventajas y limitaciones de las características particulares de cada cuenca, uso del suelo, estructura urbana, entre otros. La regulación, normatividad e incentivos para el manejo de cuencas son puntos estratégicos para iniciar la aplicación del manejo sostenible de las cuencas urbanas en desarrollo. Asimismo, la restitución progresiva de las condiciones hidrológicas y de calidad de agua de zonas urbanas consolidadas. Proporcionar beneficios para los ciudadanos que apliquen las tecnologías estimularía el uso y la efectividad de las medidas propuestas. Este estímulo –cultural o financiero– debe ser valorado en términos económicos. Las propuestas para zonas urbanas en expansión, como la cuenca occidental, se enfocan en la conservación de las condiciones hidrológicas naturales con el fin de evitar el aumento de caudales pico, por efecto de la expansión urbana, el control de erosión en construcciones, el control de la contaminación, la canalización y el control de inundación.

#### LA SOLUCIÓN: EL SERVICIO PÚBLICO

El drenaje pluvial en Barranquilla debe ser concebido como un servicio público con una función integral que contemple el manejo de cuencas, canalización, control de contaminación, control de erosión, sistema de prevención y gestión del sistema de drenaje pluvial. Esto implica que debe consolidarse institucionalmente un organismo que, opere, administre y mantenga el sistema de drenaje pluvial de la ciudad.



Humberto Ávila. Foto: Laura Camacho Salgado

### CANALIZACIÓN Y OBRAS HIDRÁULICAS

Uno de los aspectos que inciden directamente en la viabilidad del proyecto de canalización de los arroyos de la cuenca oriental es la longitud que necesita ser canalizada. Teniendo en cuenta que la mayor parte de la ciudad no posee alcantarillado pluvial, pensar en canalizar todas las calles sería una alternativa ideal pero muy costosa. Sin embargo, se puede empezar por canalizar los cauces principales. Para esto habría que evaluar el nivel de riesgo e impacto económico asociado a la longitud canalizada. Por ejemplo, si se canaliza los arroyos importantes de la ciudad a partir de áreas de 50 ha la longitud de canalización sería de 62 km, mientras que si se canaliza a partir de áreas de 10 ha la longitud aumentaría a 150 km. La decisión de uno u otro debe obedecer a un análisis económico y de riesgo.

Otro aspecto a considerar en la canalización de arroyos está relacionado con el control del aumento de la velocidad de flujo y la reducción de los tiempos de concentración. Si no se maneja esta canalización, se pueden generar inundaciones en los alrededores de las descargas. Sin embargo, se debe tener cuidado con las propuestas de canalización, especialmente para aquellos arroyos que descargan en los caños del mercado, el arroyo Grande y arroyo León. La reducción de los tiempos de concentración causa un aumento del caudal pico y, las velocidades de flujo, pueden afectar a poblaciones o construcciones ubicadas a lo largo del canal y alrededor de las descargas.

### MANTENIMIENTO Y MEJORAMIENTO DE CONDICIONES HIDROLÓGICAS EN NUEVAS CONSTRUCCIONES

Las condiciones hidrológicas naturales deben ser mantenidas o mejoradas a pesar de que se construyan nuevas urbanizaciones, parqueaderos u otro tipo de construcción. No es suficiente con regular el porcentaje de área permeable de una construcción, debido a que esto no asegura que el incremento del caudal pico y el volumen de escorrentía sean mínimos, ni tampoco que la calidad del agua sea igual o mejor a las condiciones originales. El volumen de escorrentía y el caudal pico saliente de nuevas construcciones debe ser igual o menor a los que se tenían originalmente con el terreno natural. De igual forma, la calidad del agua de escorrentía superficial en la salida debe cumplir con características de calidad adecuadas. Esta regulación debe exigir a las nuevas construcciones la inclusión de las tecnologías sostenibles para el manejo y control de cuencas urbanas.

Las licencias de nuevas construcciones deben incluir como parte de los requisitos un estudio hidrológico del sitio que incluya las condiciones originales; el incremento del volumen de escorrentía; el caudal pico generado por la construcción; las condiciones de calidad de agua esperadas y el diseño del sistema de drenaje —orientado al mantenimiento de las condiciones hidrológicas con sistemas sostenibles— que aseguren mantener las condiciones hidrológicas originales del sitio.

### REDUCCIÓN DEL VOLUMEN DE ESCORRENTÍA Y PICO DE CAUDAL

La reducción del pico de caudal, que tiene un impacto directo sobre la reducción de la peligrosidad de los arroyos, se enfoca en la atenuación del pico del hidrograma de caudales mediante el almacenamiento temporal o el aumento del tiempo de concentración. Este propósito se hace posible gracias al uso de tecnologías estructurales como tanques de amortiguamiento, o tecnologías no estructurales, como el aumento de la rugosidad de la superficie o conducción de la escorrentía superficial a jardines especialmente diseñados.

Las acciones tendientes a reducir el volumen de escorrentía, como jardines de lluvia, implican la captura permanente de precipitación y, por lo tanto, la reducción de la escorrentía superficial. Estas acciones no necesariamente implican la reducción de caudal pico, pero tiene un efecto importante sobre el control de contaminación de la escorrentía pluvial, especialmente, para lluvias cortas y de baja intensidad. Los resultados obtenidos en investigaciones realizadas por Ávila y Díaz en [1] mostraron que el caudal pico puede reducirse entre un 20 y 34% utilizando los tanques subterráneos domiciliarios para almacenamiento de agua potable —actualmente sin uso en gran parte de la ciudad—. Esta es una alternativa viable de adaptabilidad y reducción del riesgo mediante el almacenamiento disperso.

### REDUCCIÓN DE CONEXIONES DIRECTAS Y AUMENTO DEL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN

Actualmente en la ciudad de Barranquilla, la escorrentía pluvial que se genera en las viviendas, edificios, parqueaderos y otras construcciones drenan directamente a las calles sin ningún tipo de amortiguamiento. Esta condición hace que el agua se concentre rápidamente y aumente el caudal pico en los arroyos. A pesar de que es inevitable la descarga de escorrentía pluvial a las calles, debido a la ausencia de un sistema de alcantarillado pluvial formal, sí es posible aumentar

el recorrido de viaje del agua antes de que sea descargada a las calles. El aumento de recorrido daría la posibilidad de infiltración, almacenamiento temporal y finalmente el aumento del tiempo de concentración que reduciría el volumen de escorrentía directa y/o el caudal pico.

#### ALMACENAMIENTO TEMPORAL

*Almacenamiento disperso con tanques domiciliarios:* Los tanques de almacenamiento son muy efectivos en la reducción del volumen de escorrentía y el caudal pico. Barranquilla actualmente cuenta con una ventaja histórica relacionada con el sistema de abastecimiento de agua potable. Las viviendas unifamiliares y edificios de menos de 6 pisos poseen tanques de almacenamiento de agua que se utilizaban durante los prolongados períodos de corte del suministro de agua potable. Actualmente, la mayoría de estos tanques están vacíos e inutilizados y pueden usarse para almacenar los picos de caudal que salen de cada una de las viviendas, reduciendo la cantidad de agua escurriendo por las calles. El agua almacenada en los tanques puede infiltrarse lentamente durante un período no mayor a 24 horas para restituir el volumen de almacenamiento.

*Tanques masivos de amortiguamiento:* Estos tanques consisten en grandes estructuras de almacenamiento que deben ser construidas en sectores hidráulicamente e hidrológicamente estratégicos en la ciudad para atenuar caudales pico y retener basuras, flotantes y sedimento arrastrado por los arroyos. Estas estructuras pueden mejorar y reducir los costos de inversión requeridos para la canalización de los arroyos. Los tanques de almacenamiento masivo deben estar ubicados en intersecciones de calles y cerca a parques. Su ubicación y especificaciones deben responder a diseños hidráulicos y geotécnicos.

*Techos de almacenamiento:* Los techos de almacenamiento son efectivos para zonas urbanas con predominio de techos de losa de concreto (edificios principalmente). El área impermeable de las losas puede ser usada para

almacenar hasta 50 mm de precipitación, con las estructuras hidráulicas y condiciones estructurales apropiadas. Es necesario impermeabilizar el techo adecuadamente para evitar inconvenientes con los apartamentos de pisos inferiores. El volumen almacenado sería evacuado lentamente a zonas permeables, zanjas de infiltración, jardines o antejardines previo a la descarga al sistema de alcantarillado o a las calles, en la ausencia del anterior.

*Almacenamiento en jardines:* Los jardines pueden cumplir una función de almacenamiento superficial si su configuración es cóncava y almacenamiento subsuperficial si se modifican las condiciones del suelo a materiales granulares gruesos. Estas medidas son más efectivas en las partes altas y medias de las cuencas urbanas, especialmente si las pendientes no son muy altas.

#### RECUPERACIÓN E INCREMENTO DE ZONAS PERMEABLES

La reducción de la capacidad de infiltración en Barranquilla es una respuesta natural al desarrollo de zonas urbanas. Sin embargo, la pavimentación se ha propagado a zonas donde deberían existir zonas permeables como jardines, antejardines y patios. Los resultados de investigaciones realizadas en la Universidad del Norte [1], han mostrado que, en algunas cuencas de la ciudad, la recuperación de zonas permeables es importante solo para la reducción del volumen de escorrentía para eventos pequeños, pero no tiene un efecto significativo sobre la reducción del caudal pico debido a las características de precipitación y el porcentaje de área recuperable de jardines. Sin embargo, la modificación del suelo para mejorar las capacidades de almacenamiento e infiltración de jardines pueden contribuir de manera significativa en el control de la contaminación de la escorrentía pluvial.

La habilitación de jardines y antejardines consiste en la eliminación de bordillos de confinamiento, cambio en la configuración convexa a una configuración cóncava con cota inferior a la cota del andén, y la restitución o

mejoramiento del material del suelo. La gran mayoría de los jardines y antejardines de la ciudad, a pesar de ser zonas no pavimentadas, no contribuyen con la infiltración de escorrentía superficial. Esto se debe a que están confinados con bordillos, tienen una forma convexa y/o tienen una capa de material impermeable sobre el suelo natural como parte del remanente de materiales de las obras.

#### CONCLUSIONES

La expansión urbana no es la única causa de los impactos sobre el entorno natural. También, la dinámica urbana, genera altos niveles de contaminación que son trasladados a los cuerpos naturales receptores a través de los alcantarillados convencionales.

Por otro lado, los sistemas de alcantarillado pluvial de ciudades consolidadas tienen limitada capacidad de adaptación en capacidad hidráulica y control de la contaminación al mediano y largo plazo. Por lo tanto, es necesario integrar el manejo de cuencas urbanas y el control de descargas como parte de las acciones requeridas hacia una visión de ciudad sostenible. Se deben establecer políticas y reglamentos que controlen el caudal de descarga y el nivel de contaminación de predios urbanos, en función de la capacidad hidráulica y de carga contaminante de los cuerpos receptores. Asimismo, la inversión en educación y cultura ciudadana redundante en la aplicación de alternativas para el manejo de cuencas, el mantenimiento y limpieza de arroyos canalizados y no canalizados, y la reducción del riesgo asociado a inundaciones y arrastre de vehículos y personas.

La adaptabilidad del sistema de drenaje de una ciudad debe ser desde el momento en que el agua toca el suelo hasta el cuerpo receptor. Es decir, el alcantarillado pluvial no es el sistema, sino un componente del sistema de drenaje pluvial. Las tecnologías sostenibles de drenaje urbano, responden a la necesidad de adaptabilidad de las cuencas urbanas para el manejo hidrológico y ambiental frente al cambio climático.

## REFERENCIAS

- [1] H. Avila, y K. Díaz. (2012, septiembre). “Disminución del volumen de escorrentía en cuencas urbanas mediante tecnologías de drenaje sostenibles” Presentado en: XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica 2012, Costa Rica.
- [2] Naval Facilities Engineering Atlantic Command (NAVFAC) & Low Impact Development (LID). *Implementation and Site Development of Navfac Projects*. New York: ASCE, American Society of Civil Engineers: 2010 pp.
- [3] “Low Impact Development (LID) Literature Review and Fact Sheets”. United States Environmental Protection Agency (US EPA) 10-jun-2012, Disponible: <http://water.epa.gov/polwaste/green/lidlit.cfm>
- [4] “Summary of State Stormwater Standards” United States Environmental Protection Agency (US EPA) 15-junio-2011, Disponible: URL. [http://www.aiswcd.org/PD-SWRS\\_WorkGroup/USEPA\\_Summary\\_StormwaterVolumesStateStandards.pdf](http://www.aiswcd.org/PD-SWRS_WorkGroup/USEPA_Summary_StormwaterVolumesStateStandards.pdf)
- [5] Registros IDEAM de la estación del Aeropuerto Ernesto Cortisoz (1970 – 2011)