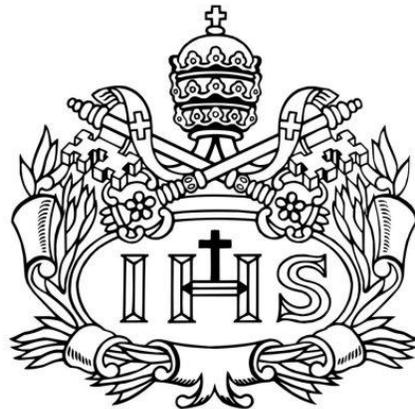


**COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA HUMEDAL-
CONSTRUIDO/TANQUE-REGULADOR PARA APROVECHAMIENTO DE
AGUAS LLUVIAS EN EL CAMPUS DE LA PONTIFICIA UNIVERSIDAD
JAVERIANA SEDE BOGOTÁ**

**STEPHANIE LEÓN BERNAL
JORGE ENRIQUE MEDINA OTERO**



**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL
2013**

**COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA HUMEDAL-
CONSTRUIDO/TANQUE-REGULADOR PARA APROVECHAMIENTO DE
AGUAS LLUVIAS EN EL CAMPUS DE LA PONTIFICIA UNIVERSIDAD
JAVERIANA SEDE BOGOTÁ**

**STEPHANIE LEÓN BERNAL
JORGE ENRIQUE MEDINA OTERO**

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil

**Director:
ANDRES TORRES ABELLO
Ingeniero Civil, M.Sc., PhD.**



**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
2013**

APROBACIÓN

El Trabajo de Grado titulado “COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA HUMEDAL-CONSTRUIDO/TANQUE-REGULADOR PARA APROVECHAMIENTO DE AGUAS LLUVIAS EN EL CAMPUS DE LA PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA SEDE BOGOTÁ”, desarrollado por los estudiantes STEPHANIE LEÓN BERNAL y JORGE ENRIQUE MEDINA OTERO. en cumplimiento de uno de los requisitos dispuestos por la Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil, para optar el título de Ingeniero Civil, fue aprobado por:

Director de Tesis

Andrés Torres Abello

Jurado



DEDICATORIA

A nuestros padres, por su infinito apoyo, dedicación y por todo el amor brindado a lo largo de nuestras vidas.

A nuestros hermanos, por el entusiasmo y por todos los grandes consejos

A Alejandro por demostrarnos que el esfuerzo nos llevará lejos

Diciembre de 2013.



AGRADECIMIENTOS

A nuestras familias por permanecer unidos, por ser modelos a seguir, por confiar en nosotros, por brindarnos hermosas palabras y herramientas necesarias para tener una vida exitosa y feliz.

Al ingeniero Andrés Torres, que con su inagotable conocimiento, supo guiarnos a través del desarrollo de esta investigación.

A la ingeniera Minakshi Brand, por la colaboración prestada durante el desarrollo de este trabajo de grado.

Al ingeniero Edwar Forero, por su pronta asistencia y gran disposición en los momentos más difíciles.

A la ingeniera María Patricia León, por sus grandes consejos y gran disposición a través de esta investigación.

A Lorena, Lina, Clai y Alejandro, por el apoyo incondicional y hermosas palabras de apoyo y amor.

Mil gracias a cada una de las personas que de una u otra manera estuvo presente en el desarrollo de este trabajo de grado, brindándonos apoyo y lindas palabras en los momentos que no veíamos el objetivo cercano.

¡Gracias Dios por darnos la oportunidad!



TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
1 INTRODUCCIÓN	17
1.1 OBJETIVOS	21
1.1.1 Objetivo General	21
1.1.2 Objetivos Específicos	21
2 MATERIALES	23
2.1 CAMPUS DE LA PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA SEDE BOGOTA (PUJB)	23
2.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA HUMEDAL-CONSTRUIDO/TANQUE-REGULADOR	24
2.2.1 Zonas de captación y drenaje	25
2.2.2 HUMEDAL-CONSTRUIDO	29
2.2.3 DESARENADORES	30
2.2.4 TANQUE-REGULADOR	32
2.2.5 VERTEDEROS	33
2.3 SISTEMA DE MEDICIÓN	36
2.3.1 INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN HIDROLÓGICA	36
2.3.2 MEDIDORES DE DISTANCIA (SENSORES DE NIVEL POR ULTRASÓNIDO)	38
2.4 HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES	40
2.4.1 SOFTWARE R	40
2.4.2 EPASWMM (EPA's Storm Water Management Model)	41
2.4.3 STATGRAPHICS Centurion (software libre)	41
3 MÉTODOS	42
3.1 INSTALACIÓN	42
3.1.1 INSTALACIÓN DE ESTACIÓN METEOROLÓGICA	42
3.1.2 INSTALACIÓN SENSORES DE NIVEL POR ULTRASONIDO	43
3.2 MEDICIONES	44
3.2.1 MEDICIONES HIDROLÓGICAS	45

3.2.2	MEDICIONES HIDRÁULICAS	48
3.3	HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES	54
3.3.1	ALGORITMOS DESARROLLADOS	56
3.4	SIMULACIÓN DE MONTECARLO	58
4	RESULTADOS	62
4.1	CARACTERIZACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA HUMEDAL- CONSTRUIDO/TANQUE-REGULADOR	62
4.1.1	CARACTERIZACIÓN DE CAUDALES Y LLUVIAS	62
4.1.2	VERIFICACIÓN DE PRINCIPIOS DE DISEÑO HIDRAULICOS E HIDROLÓGICOS	75
4.1.3	MODELACION MONTECARLO	83
4.1.4	INCERTIDUMBRE Y ESCALA DEL MODELO	84
5	CONCLUSIONES	87
6	RECOMENDACIONES	89
7	BIBLIOGRAFÍA	91

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema Campus Pontificia Universidad Javeriana, sede Bogotá (Fuente: Esquema PUJB, 2013).....	23
Figura 2. Esquema ubicación sistema Humedal-Construido/Tanque-Regulador (Fuente: Campus PUJB imagen satelital, 2013).....	24
Figura 3. Esquema zonas de captación y drenaje de agua lluvia campus PUJB (Fuente: Autores, 2013)	25
Figura 4. . Sección plano del sistema de drenaje de campo de Fútbol y sistema Humedal-Construido/ Tanque-Regulador.....	26
Figura 5. Esquema del sistema de drenaje del Campo de fútbol sintético de la PUJB.....	27
Figura 6. Esquema de área de captación y drenaje correspondiente a las zonas verdes	28
Figura 7. Esquema del flujo del agua a través del sistema Humedal-Construido/Tanque-Regulador	29
Figura 8. Zonificación del material de drenaje a lo largo del sistema H-T (Amarillo: grava de 4 pulgadas, Rosado: grava de 1 y $\frac{3}{4}$ de pulgada, Azul: grava de $\frac{3}{4}$ y $\frac{1}{2}$ de pulgada, Verde: grava de $\frac{1}{2}$ de pulgada)	29
Figura 9. Esquema de distribución de piezómetros en el humedal construido (vista en planta sistema Humedal-Construido/Tanque-Regulador)	30
Figura 10. Desarenador de mayor capacidad (costado occidental del humedal) sentido de flujo del agua captada de las zonas permeables y de la cubierta del CJFD, vista en planta	31
Figura 11. Desarenador de menor capacidad (costado oriental del humedal) sentido de flujo del agua lluvia captada del edificio 115, vista en planta.....	32
Figura 12. Corte general del tanque regulador y del humedal construido en donde se resalta la ubicación de la zona de bombeo y el sistema de rebose que posee	33

Figura 13. Corte general del desarenador de menor capacidad y detalle del vertedero 1	33
Figura 14. Corte general de la salida del humedal construido y detalle del vertedero 2	34
Figura 15. Corte general del desarenador de mayor capacidad y detalle del vertedero 3	34
Figura 16. Diagrama general del sistema Humedal-Construido/Tanque-Regulador	35
Figura 17. Estación meteorológica y Display de la consola del equipo Ambient Weather WS-2080A Wireless.....	36
(*) Figura 18. Instrumento de medición de precipitación (Fuente: Autor, 2013)	38
(**)Figura 19. Balanza electrónica y soporte de caneca (Fuente: Rodriguez Maria, 2013)	38
Figura 20. Montajes de sensores de nivel por ultrasonido ubicados en el sistema Humedal-Construido/Tanque-Regular.....	38
Figura 21. Esquema ubicación medidores de distancia en el Sistema Humedal-Construido/Tanque-Regulador	39
Figura 22. Esquema para nombrar archivos de mediciones de lluvia según el día y el mes.....	45
Figura 23. Esquema del formato de los datos obtenidos por el instrumento de medición de precipitación.....	46
Figura 24. Esquema de transformación de datos obtenidos por el instrumento de medición de precipitación.....	48
Figura 25. Formato inicial de los datos medidos por los sensores de nivel por ultrasonido.....	49
Figura 26. Esquema para nombrar archivos obtenidos de los medidores de distancia	49
Figura 27. Esquema para nombrar archivos obtenidos de los medidores de distancia	50
Figura 28 Esquema de metodología general para el análisis de datos hidráulicos	51

Figura 29. Esquema de un vertedero triangular de pared delgada y sus parámetros	52
Figura 30. Esquema de obtención de aforos volumétricos y caudales (Δt = delta de tiempo; Q= caudal; Δh = delta de lámina de agua obtenido de las mediciones).....	53
Figura 31. Forma de nombrar un archivo para uso del algoritmo medidores_humedal.R (ejemplo vertedero 1 en el evento 1).....	55
Figura 32. . Formato de los datos obtenidos por los sensores de nivel por ultrasonido para uso del algoritmo medidores_humedal.R (ejemplo).....	56
Figura 33. Fotografía del desarenador de mayor capacidad durante el evento 1 (fuente: autor, 2013).....	64
Figura 34. Hidrograma vertedero 1 y 2.....	67
Figura 35. Comportamiento de alturas en los piezómetros 1, 2 y 3 por el evento del 28 de octubre 2013	69
Figura 36 Comportamiento de altura en el tanque por el evento del 28 de octubre 2013	70
Figura 37 Comportamiento de los caudales 1 y 2 contra la variación de la altura entre los piezómetros por el evento del 28 de octubre 2013.....	71
Figura 38 Caudales promedios vs variaciones de la altura en el evento del 28 de octubre 2013	72
Figura 39 Corrección caudales promedios vs variaciones de la altura en el evento del 28 de octubre 2013.....	72
Figura 40. Grafica del volumen acumulado del vertedero 1,2 y Tanque-Regulador	73
Figura 41. Grafica de caudal del vertedero 3	74
Figura 42. Grafica de volumen a través del vertedero 3.....	75
(*) Figura 43. Funcionamiento vertedero 2 durante el evento 1	78
(**) Figura 44. Inundación del Humedal-Construido final del evento 1	78
Figura 45. Display y montaje del modelo lluvia escorrentía generado #Tesis evento 1.inp”.....	80

Figura 46. Caudal en el Tanque Modelo Tesis evento 1 ($C_e=0.85$) 81

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1: Áreas y coeficientes de escorrentía de las zonas de drenaje que alimentan el sistema Humedal-Construido/Tanque-Regulador de la PUJ.....	26
Tabla 2: Rango, precisión y resolución de la estación meteorológica, para tener en cuenta en la instalación.....	37
Tabla 3: Formato de los datos obtenidos del software Easy Weather.....	43
Tabla 4: Ejemplo de transformación de información obtenida en bruto del instrumento de medición de precipitación.....	46
Tabla 5: Ejemplo de aplicación del filtro inicial.....	47
Tabla 6: Tabla resumen alturas fijas empleadas para hacer el análisis hidráulico	50
Tabla 7: Funciones principales algoritmo para el análisis hidrológico.....	57
Tabla 8: Funciones principales algoritmo para el análisis Hidráulico.....	58
Tabla 9: Funciones principales algoritmo para obtención de parámetros estadísticos.....	58
Tabla 10: Resumen de información obtenida al final de realizar el método de Montecarlo.....	60
Tabla 11: Características de cada evento mes, día, año, hora de inicio, hora fin y duración [mm: mes; dd: día; yy: año; hh: Hora inicial; min: minutos inicial; hhf: hora final; minf: minutos final; dur [min]: duración del evento; ipico [mm/s]: intensidad máximo; iprom[mm/s]: Intensidad promedio (corresponde al promedio de todos los datos de intensidad obtenidos) ; itotal [mm/s]:intensidad total; httotal [mm]: altura lámina de agua; tcentro [min]: tiempo al centroide; tpicoeven[min]: tiempo al pico del evento; adwp [min]: tiempo anterior seco.....	63
Tabla 12: Características de las mediciones obtenidas de los medidores de distancia en el sistema Humedal-Construido/Tanque-Regulador (qpico1 [m ³ /s]:Caudal pico vertedero 1; qpico2[m ³ /s]: Caudal pico vertedero 2; tpico1[min]: tiempo al pico caudal sobre vertedero 1;tpico2[min]:tiempo al pico caudal sobre	

vertedero 2; tcm1[min]: tiempo del centroide del hidrograma producido por el evento en el vertedero 1; tcm2[min]: tiempo del centroide del hidrograma producido por el evento en el vertedero 2; vol1[m^3]: Volumen total medido sobre el vertedero 1; vol2 [m ³]: Volumen total medido sobre el vertedero 2; tdur [min]: tiempo de duración de toma de datos; TretencHumedal [min]: Tiempo de retención hidráulico entre el vertedero 1 y el vertedero 2.....	65
Tabla 13: Tabla resumen de los tiempos de retención y concentración del Humedal-construido y de las microcuencas (Tcentrohietograma [min]: Tiempo al centroide del hietograma generado por cada evento; tcm1 [min]: tiempo del centroide del hidrograma producido por el evento en el vertedero 1; tcm2 [min]: tiempo del centroide del hidrograma producido por el evento en el vertedero 2; tcm3 [min]: tiempo del centroide del hidrograma producido por el evento en el vertedero 3.....	66
Tabla 14: Tabla coeficientes de descarga y de escorrentía para el vertedero 1 y la cubierta del edificio 115 (Cd: coeficiente de descarga vertedero 1, Ce: coeficiente de escorrentía cubierta ed.115, NA: no registrado).....	76
Tabla 15: Tabla coeficientes de escorrentía para Cubiertas CJFD (Cubierta nor CJFD y Cubierta sur CJFD), Campo de fútbol, Zonas verdes y parqueadero (edf. 115) (Cd: coeficiente de descarga vertedero 1, Ce: coeficiente de escorrentía cubierta ed.115, NA: no registrado).....	77
Tabla 16: Tabla coeficientes de escorrentía de diseño	78
Tabla 17: Tabla Caudales m^3/s aportados al sistema en los eventos 1, 3 y 4 con los coeficientes de escorrentía de diseño y con los coeficientes iterados.....	82
Tabla 18: Tabla Caudales m^3/s aportados al sistema en los eventos 5,6, 7 y 8 con los coeficientes de escorrentía de diseño y con los coeficientes iterados.....	82
Tabla 19: Tabla resumen de los coeficientes de escorrentía y caudal promedio obtenidos a través de la modelación de Montecarlo	83

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. Tabla de coeficientes de escorrentía de diseño y áreas de drenajes

ANEXO B. Plano estructural del instrumento de medición de precipitación

ANEXO C. Manual estación meteorológica (Ambient Weather WS-2080^a)

ANEXO D. Obtención de los datos hidrológicos e hidráulicos empleando el software TeamViewer.

ANEXO E. Algoritmo Humedal_Medidores

ANEXOF. Montecarlo para método racional y áreas de drenaje

ANEXO G. Resultados de los eventos 2, 3, 4, 5, 6,7 y 8



1 INTRODUCCIÓN

El aprovechamiento de aguas lluvias es un concepto que en los últimos años ha incrementado su popularidad, no solo por la rentabilidad económica que estas técnicas brindan a los usuarios, sino por la concientización masiva naciente en el planeta sobre la conservación de los recursos hídricos (C A Booth et al. 2003); por lo cual, es importante comprender que el agua captada tiene múltiples usos y beneficios enfocados a la conservación del medio ambiente y al mejoramiento de la salud pública, ayudando a la rehabilitación de suelos, paisajismo y como fuente alternativa de agua potable (Yuen et al. 2001).

A nivel mundial, existe una serie de proyectos (Mitchell et al. 2007) que tienen como objetivo la reutilización de aguas lluvias. Por consiguiente nuevas teorías, metodologías e ideas han permitido que el agua lluvia ya no sea considerada como un desecho, sino por el contrario, un recurso (J. Lara B et al. 2007). Países como Estados Unidos, China, Australia, Indonesia, son considerados líderes en la implementación de estas técnicas, ya sea por condiciones climáticas difíciles o como medida para mitigar los efectos del cambio climático, lo que ha generado el desarrollo y uso de sistemas hidráulicos sostenibles para fines de aprovechamiento (Lara B et al., 2007; Imteaz et al., 2012). El uso que se le ha dado a estos sistemas principalmente va de la mano del déficit de agua potable en las zonas áridas o por el contrario para mitigar inundaciones generadas por eventos extremos de precipitación (Yuen et al. 2001; Campisano and Modica, 2012; Imteaz et al., 2012), creando así sistemas de infraestructura que se adecúan a las necesidades específicas de la población. Este es el caso de algunas estaciones petroleras, universidades, barrios cuyas experiencias se reportan para ciudades como Brasilia (Ghisi, Tavares, and Rocha 2009), Melbourne (Imteaz, Rahman, and Ahsan 2012), Sicilia (Campisano and Modica 2012); Hawkesbury (C A Booth et al. 2003), en las cuales se ha incorporado el concepto de sostenibilidad (Fewkes and Wam, 2000; Ghisi, Tavares, and Rocha 2009; Ward et al., 2009; Campisano and Modica, 2012).

En Colombia, a pesar de no tener grandes experiencias en este ámbito, se han desarrollado algunos trabajos de investigación; fundamentalmente para el riego de jardines, lavado de fachadas, descargas de sanitarios y orinales, etc. (Montoya Araujo and Suárez Esparragoza 1987), los cuales han tenido como objetivo mitigar el déficit del sector público y privado en el suministro de agua para la población. Asimismo, múltiples investigaciones de universidades como la Universidad EAFIT en Medellín (Palacio C 2010), Universidad de Los Andes (Pérez Murillo, Gabriel 2013), Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá y Pontificia Universidad

Javeriana sede Bogotá (PUJB) (Duarte and Echeverri, 2004; J. Lara B et al. 2007; Torres et al. 2012), son ejemplo de la aplicación de dicha tecnología en el país. En la PUJB, desde el año 2004, se inició el estudio y análisis de disponibilidad de recursos hídricos dentro del campus, generando balances hídricos de los cuales fue posible concluir la existencia de un volumen de agua lluvia apto para suplir diferentes demandas de la universidad. Posteriormente se llevó a cabo el análisis de calidad de agua lluvia de escorrentía en diferentes zonas de la PUJB para definir posibles usos; además se determinaron los requerimientos de infraestructura aptos para la universidad (Galarza M. 2011; Torres et al. 2012). A partir de esta serie de estudios teórico-prácticos, fue posible en el año 2012, empezar la proyección de lo que se concebiría en el año 2013 como el sistema Humedal-Construido/Tanque-Regulador. El pre-diseño del sistema estuvo a cargo del grupo de investigación de la PUJB, Grupo de investigación Ciencia e Ingeniería del Agua y el Ambiente, apoyado de la firma Indracol encargada de hacer el diseño detallado del sistema de aprovechamiento. En la actualidad, el sistema está en funcionamiento y posee un sistema de medición en continuo (toma de datos cada minuto) y en tiempo real; dicho montaje es único en el país y posee gran interés para la comunidad científica nacional e internacional interesada en sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias.

Sin embargo, a pesar de que existe una amplia experiencia en investigación en el campo de la sostenibilidad y el aprovechamiento de aguas lluvias a nivel mundial, cabe resaltar que los estudios van dirigidos principalmente a sistemas simples, por ejemplo cubierta-tanque u optimización de dimensiones de tanques basada en el área de captación en cubiertas planas o buscan analizar el desempeño hidráulico a nivel doméstico (Gires and de Gouvello, 2009; White 2010; Zhou, Shao, and Zhang 2010). Por esta razón, la falta de herramientas y metodologías de diseño hidrológico e hidráulico enfocados al aprovechamiento con aguas lluvias, dan lugar a la búsqueda y evaluación del comportamiento hidráulico de sistemas con múltiples área de captación.

Este documento está compuesto por el capítulo de materiales (Capítulo 2) en el cual se hace la descripción de cada uno de los equipos empleados para el desarrollo de esta investigación, ya sean los equipos para la medición pluviométrica o los sensores instalados a lo largo del sistema Humedal-Construido/Tanque-Regulador, además de la descripción de la zona de estudio (Campus de PUJB) y del sistema de aprovechamiento de aguas lluvias, incluyendo cada uno de sus estructuras, entre las cuales se encuentran: desarenadores, tanque regulador, humedal construido, vertederos, etc. En el

capítulo de métodos (Capítulo 3), se hace una descripción de cada una de las metodologías empleadas para la instalación y calibración de los sensores instalados en el sistema, además se explica la metodología para la adquisición de datos pluviométricos o de láminas de agua, junto con la descripción de los códigos desarrollados en el software R y descripción de hojas de cálculo, para el análisis de información obtenida in-situ. En la siguiente parte del documento, se encuentra el capítulo de resultados, en el cual se hace una explicación de los datos obtenidos especificando la metodología empleada para el tratamiento y análisis de los mismos, en este se incluyen tablas comparativas de resultados tanto hidrológicos como hidráulicos, en donde se resalta información básica como lo son caudales picos, caudales promedio, tiempos secos, duración, etc., adicionalmente, se muestran los resultados obtenidos de la calibración de los coeficientes de escorrentía y descarga, que permiten generar análisis estadísticos y de confiabilidad. Finalmente, se encuentran los capítulos de conclusiones y recomendaciones, en los cuales se recopilan cada uno de los resultados obtenidos y sus respectivos análisis, con el objetivo de generar recomendaciones de tipo Hidráulico e hidrológico, generadas del análisis previo basadas en las limitantes del sistema.



1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo General

Describir el comportamiento hidráulico de un sistema Humedal-Construido/Tanque-Regulador utilizado como componente del sistema de aprovechamiento de aguas lluvias de la PUJB durante un evento de lluvia.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar el funcionamiento hidráulico del sistema Humedal-Construido/Tanque-Regulador durante un evento de lluvia
- Verificar principios de diseño hidrológico e hidráulico del sistema Humedal-Construido/Tanque-Regulador a la luz de los resultados medidos en campo durante un evento de lluvia.

2 MATERIALES

El presente capítulo muestra la metodología y las herramientas utilizadas para el desarrollo del trabajo de grado, en donde se incluye la localización del sistema Humedal-Construido/Tanque-Regulador en el campus universitario de la PUJB, la experimentación en campo que se desarrolló y la captura de datos hidráulicos e hidrológicos, empleando el instrumento de medición pluviométrica ubicado en la cubierta del edificio 67, José Rafael Arboleda S.J (Ver figura 1) y los sensores ultrasónicos de medición de distancia instalados en el sistema Humedal-Construido/Tanque-Regulador, para obtener un registro en continuo de la altura de la lámina de agua en piezómetros y sobre vertederos.

2.1 CAMPUS DE LA PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA SEDE BOGOTA (PUJB)

El campus de la PUJB (Ver Figura 1) está ubicado en la carrera séptima entre las calles 40 y 45, en la ciudad de Bogotá. El campus cuenta con 16 hectáreas de terreno y aproximadamente 90000 m² de construcción, entre los cuales se encuentran 26 edificios académicos, bibliotecas, emisora, estudio de televisión, tres instituciones hospitalarias, instituciones bancarias, diez cafeterías, tres auditorios, coliseo cubierto, campo de fútbol, edificio de parqueaderos, 17000 m² de plazuelas peatonales, 74000 m² de jardines, arboles, zonas verdes. El 50% del área total del campus está conformada por zonas verdes, zonas de circulación y áreas deportivas, el 23.5% del área total está ocupada por edificaciones, el 22.5% por áreas de expansión y 4% por afectaciones viales (GALARZA et al. 2013)



Figura 1. Esquema Campus Pontificia Universidad Javeriana, sede Bogotá (Fuente: Esquema PUJB, 2013)

2.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA HUMEDAL-CONSTRUIDO/TANQUE-REGULADOR

El sistema Humedal-Construido/Tanque-Regulador (ver figura 2), está ubicado en el costado norte del campo de fútbol del campus de la PUJB. Tiene una superficie aproximada de 270 m² y tiene como objetivo captar el agua de los eventos de lluvia que se presenten en la zona, para ser utilizada en el sistema de riego empleado en las laderas adyacentes y el lavado de zonas duras y fachadas.

El sistema (ver figura 16) está compuesto por un humedal construido, un tanque regulador y 2 desarenadores de flujo horizontal con diferentes capacidades, los cuales serán explicados más adelante.

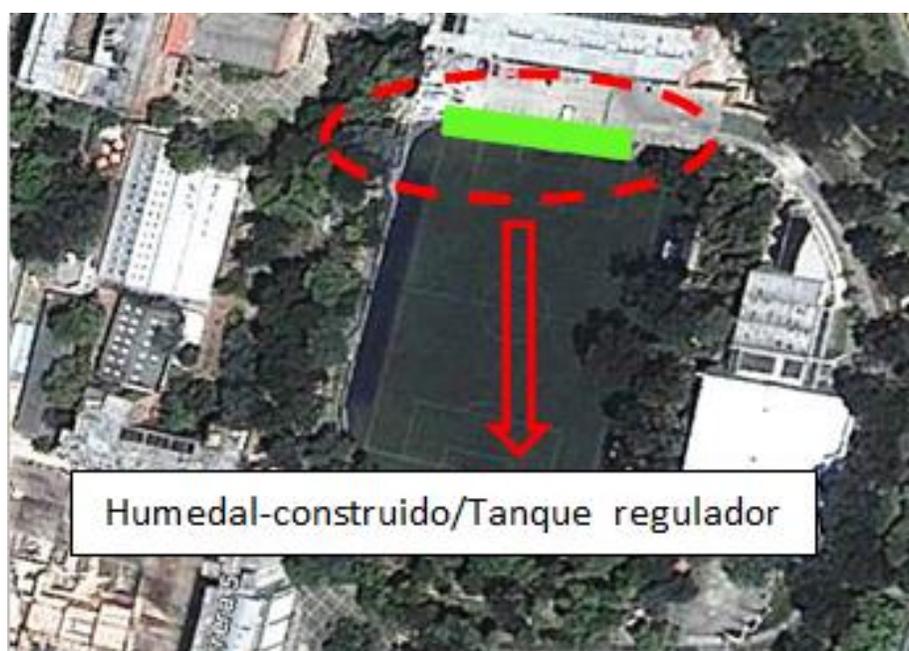


Figura 2. Esquema ubicación sistema Humedal-Construido/Tanque-Regulador (Fuente: Campus PUJB imagen satelital, 2013)

2.2.1 Zonas de captación y drenaje



Figura 3. Esquema zonas de captación y drenaje de agua lluvia campus PUJB (Fuente: Autores, 2013)

Para el desarrollo de este proyecto, fue importante definir las áreas de captación y recolección del agua lluvia (Ver figura 3) en las zonas adyacentes al campo de futbol del campus universitario, empleando AutoCAD 2013 (versión estudiantil). Las áreas de drenaje que pertenecen a la micro-cuenca analizada, corresponden a amplias zonas permeables y zonas no permeables para las cuales se estimó un coeficiente de escorrentía ponderado de 0.52 (ver anexo A), empleando valores extraídos de la literatura (Chow 1994)

A continuación se presenta la Tabla 1, donde se observan las áreas y los coeficientes de escorrentía usados para cada zona de drenajes (Galarza M S and Torres A 2013), las cuales fueron utilizadas para hacer la calibración y optimización de los coeficientes de escorrentía.

Tabla 1: Áreas y coeficientes de escorrentía de las zonas de drenaje que alimentan el sistema Humedal-Construido/Tanque-Regulador de la PUJ
(C: Coeficiente de escorrentía, CJFD: Centro Javeriano de Formación Deportiva)

	ZONAS DE DRENAJE	ÁREA [m ²]	C
PERMEABLES	Campo de fútbol	7719.44	0.35
	Zonas verdes	4203.44	0.35
NO PERMEABLES	Cubierta ed. 115 Don Guillermo Castro S.J.	3735.9	0.85
	Cubierta del CJFD Oriental	1623.8	0.85
	Cubierta del CJFD Occidental	619.2	0.85

a) Zonas permeables

Las zonas permeables para esta microcuenca corresponden a un área total de 11922.5 m², en donde se incluye el área del campo de fútbol sintético y el área de sus laderas perimetrales, cuyo agua de escorrentía es drenada hacia el sistema por medio del sistema de drenaje tanto del campo de fútbol sintético como del drenaje lateral existente en la cota inferior de las zonas verdes, el cual a través de canaletas y cajas de inspección ingresa al sistema Humedal-Construido/Tanque-Regulador, específicamente al desarenador del costado occidental y este a su vez, directamente al tanque regulador (ver figura 4).

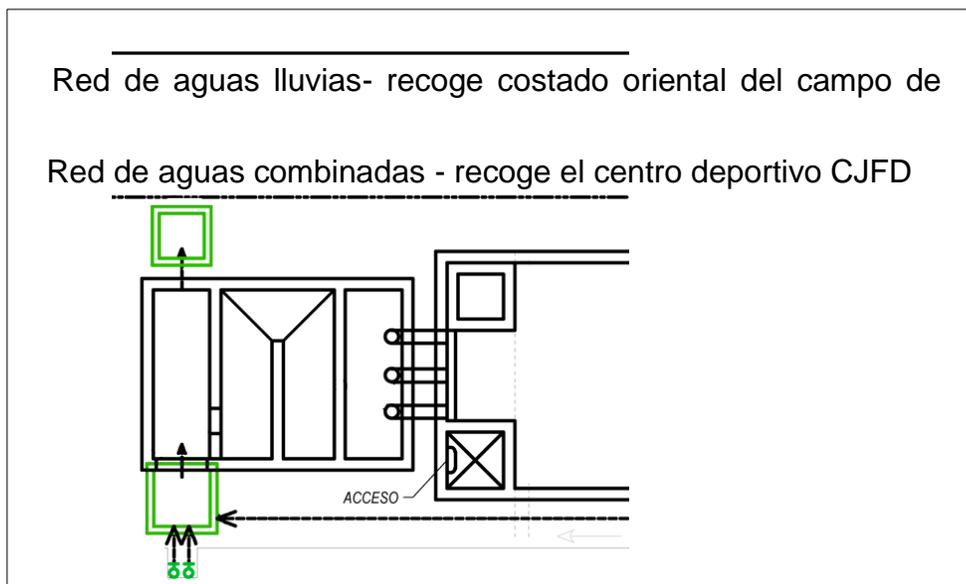


Figura 4. . Sección plano del sistema de drenaje de campo de Fútbol y sistema Humedal-Construido/ Tanque-Regulador

- Zona 1. Campo de Fútbol Sintético

El campo de fútbol sintético (ver figura 5) posee un área de 7719.44 m² y posee un sistema de drenaje tipo espina de pescado, el cual está compuesto por una zanja principal ubicada en el centro longitudinal del campo y zanjas secundarias encargadas de conducir el agua drenada hacia el sistema de drenaje lateral.

El césped es una estructura compuesta por monofilamentos de polietileno con protección U.V. y una altura de hilado de 63 mm, adherida a una base de soporte denominada Backing o manto permeable para permitir la evacuación de las aguas lluvias al sistema de drenaje antes mencionado (Indeportes Antioquia 2010).

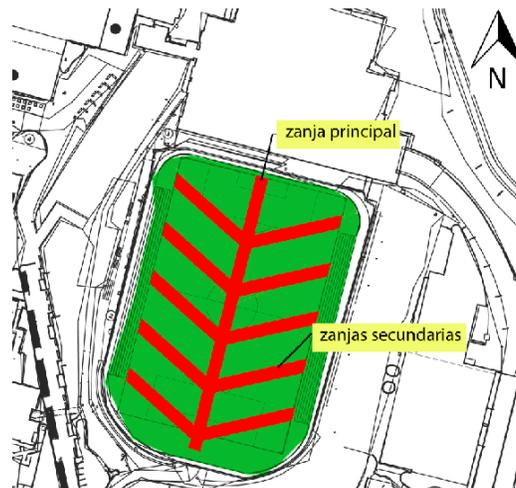


Figura 5. Esquema del sistema de drenaje del Campo de fútbol sintético de la PUJB

- Zona 2. Zonas verdes

Las zonas verdes (ver figura 6) están ubicadas en el perímetro del campo de fútbol sintético entre las cotas 2622 m.s.n.m y 2609 m.s.n.m., lo que corresponde a una pendientes de 53%, es decir es un terreno escarpado. Según estudios de suelos realizados en la zona, estos corresponden a una arcilla de alta plasticidad, cuya permeabilidad es de 8.7×10^{-9} cm/s.



Figura 6. Esquema de área de captación y drenaje correspondiente a las zonas verdes
(S: pendiente en %)

b) Zonas no permeables

Las zonas no permeables corresponden a las cubiertas del edificio 115, Don Guillermo Castro y del Centro Javeriano de formación deportivo (CJFD), las cuales aportan el caudal de escorrentía que requiere de un tratamiento secundario y primario, debido a los altos niveles de concentración de turbiedad, SST, DBO_5 y metales pesados (Torres et al., 2012), por lo cual el agua proveniente del edificio 115, entra al sistema Humedal-Construido/Tanque-Regulador a través de tuberías de 4" hacia el desarenador del costado oriental y posteriormente se dirige hacia el humedal construido para el tratamiento secundario; mientras el agua de la cubierta del CJFD, se une con el agua de las zonas permeables en una caja de inspección encargada de conducir el agua hacia el sistema (ver figura 7).

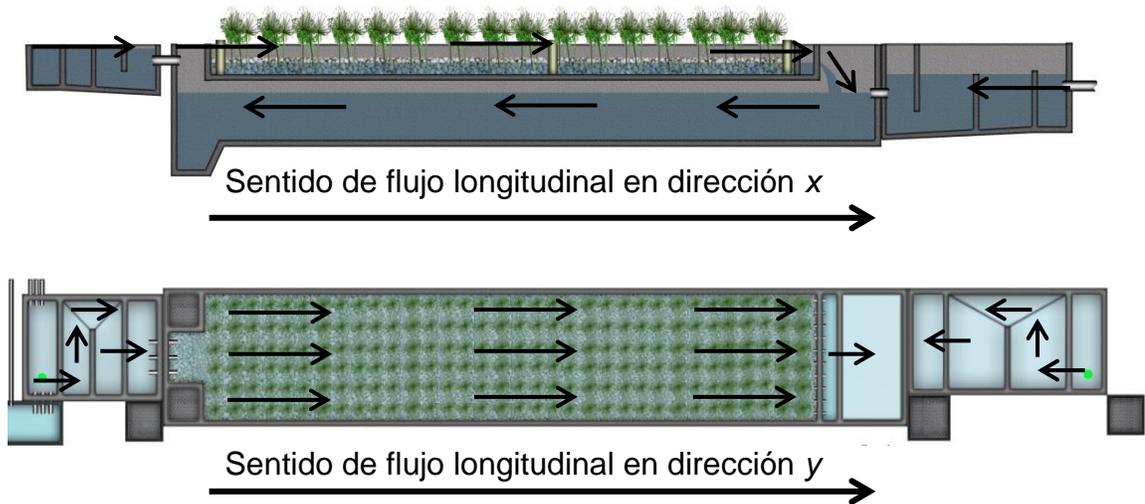


Figura 7. Esquema del flujo del agua a través del sistema Humedal-Constructivo/Tanque-Regulador

2.2.2 HUMEDAL-CONSTRUIDO

El humedal construido cuenta con un área de 88.7 m² (ver figura 16) y se caracteriza por que el material de drenaje varía longitudinalmente su diámetro cada 6.77 m, exceptuando la grava de la zona de entrada del desarenador de menor capacidad (ver figura 8). El material del lecho inicia con grava de 4" y termina con un diámetro de 1/2" en el sentido del flujo.

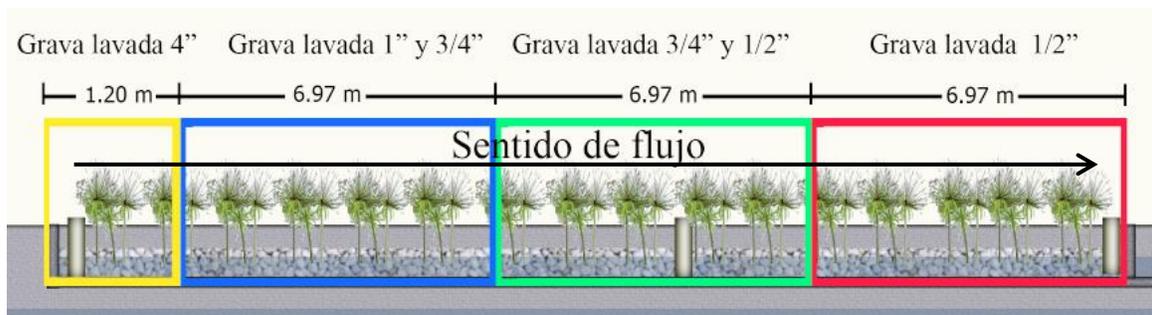


Figura 8. Zonificación del material de drenaje a lo largo del sistema H-T (Amarillo: grava de 4 pulgadas, Rosado: grava de 1 y 3/4 de pulgadas, Azul: grava de 3/4 y 1/2 de pulgadas, Verde: grava de 1/2 de pulgadas)

El humedal cuenta con plantas emergentes tipo Papiros (*Cyperus papyrus*), muy comunes a lo largo de los ecosistemas acuáticos en Colombia, los cuales tienen la función de fijar físicamente los contaminantes en la superficie del suelo y la materia orgánica, al igual que utilizar y transformar los elementos contaminantes por medio de los microorganismos que se produzcan, para finalmente lograr un nivel de tratamiento consistente al bajo consumo de energía y mantenimiento que el tratamiento requiere (J. A. Lara B. 1999), la densidad de estas plantas es de 16 papiros por metro cuadrado, con una separación de 30 cm aproximadamente entre ellos.

Adicionalmente se instalaron 16 piezómetros para determinar la altura de lámina de agua en el humedal con la distribución mostrada en la figura 9, a través de los cuales es posible determinar y analizar el perfil de lámina de agua empleando los datos obtenidos por los medidores ultrasónicos de nivel (ver sección 2.3.2.B), lo que a su vez permitirá la obtención de los volúmenes y tiempos de retención existentes en el humedal en un evento de lluvia, que finalmente permitirá ver la evolución de la lámina de agua en el tiempo y de la relación directa con el caudal existente en el sistema; con dicha información es posible analizar la conductividad hidráulica, la evolución del gradiente hidráulico y su posible relación con el índice de colmatación.

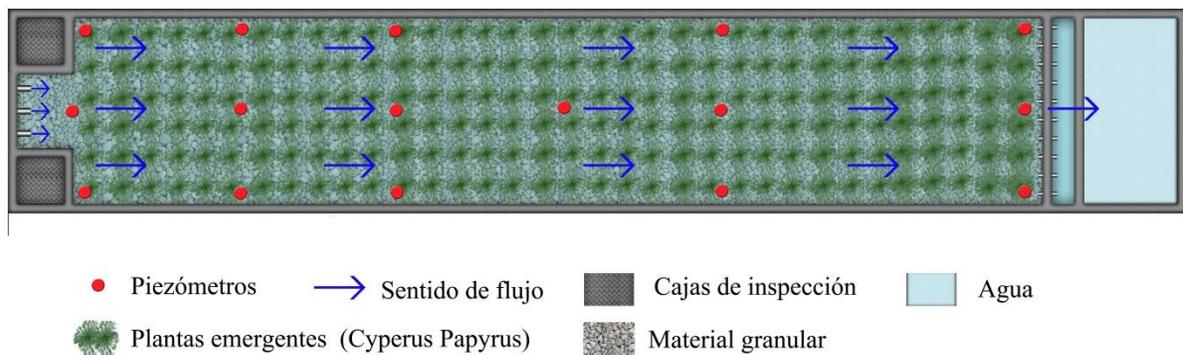


Figura 9. Esquema de distribución de piezómetros en el humedal construido (vista en planta sistema Humedal-Construido/Tanque-Regulador)

2.2.3 DESARENADORES

El sistema de recolección de agua lluvia contiene dos desarenadores, cuya función específica es retirar las partículas de mayor tamaño y posteriormente conducir el agua captada hacia donde corresponde en el sistema. Los desarenadores se ubican en los extremos longitudinales del sistema, los cuales

permiten el acceso del agua lluvia proveniente de las zonas permeables y no permeables. Los dos desarenadores se caracterizan por recibir agua lluvia de diferente calidad, lo que indica que poseen un tratamiento diferente: el agua proveniente del campo de futbol sintético, zonas verdes y cubierta del CJFD entra al sistema por el costado occidental; específicamente por el desarenador de mayor capacidad; mientras que el agua proveniente de la cubierta del edificio 115 que correspondiente al edificio de parqueaderos, entra al sistema por el costado oriental a través del desarenador de menor capacidad.

En la etapa de diseño se tuvieron en cuenta dos tipos de flujos principalmente longitudinales en diferente dirección, para el dimensionamiento de dichas estructuras, debido a las limitantes espaciales existentes; los cuales influyen en el transporte y tiempo de retención de las partículas a través de la estructura. Además se diseñaron elementos de rebose (ver figura 10) que permitirán encausar el agua captada a la red de alcantarillado del campus, para así evitar el colapso por sobre carga del sistema Humedal-Construido/Tanque-Regulador. En la figura 10 y en la figura 11, se puede observar la estructura y cuál es el movimiento longitudinal que tiene el agua en estas estructuras.

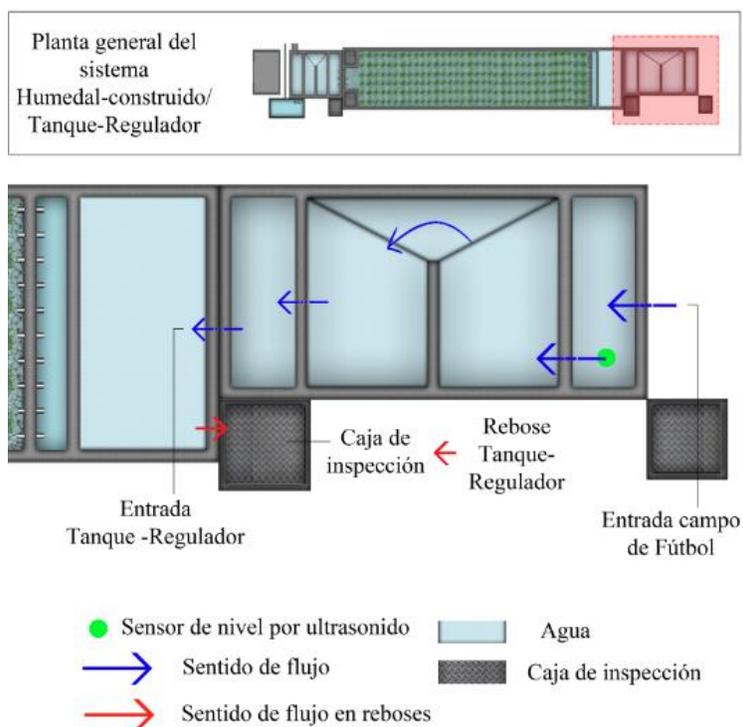


Figura 10. Desarenador de mayor capacidad (costado occidental del humedal) sentido de flujo del agua captada de las zonas permeables y de la cubierta del CJFD, vista en planta

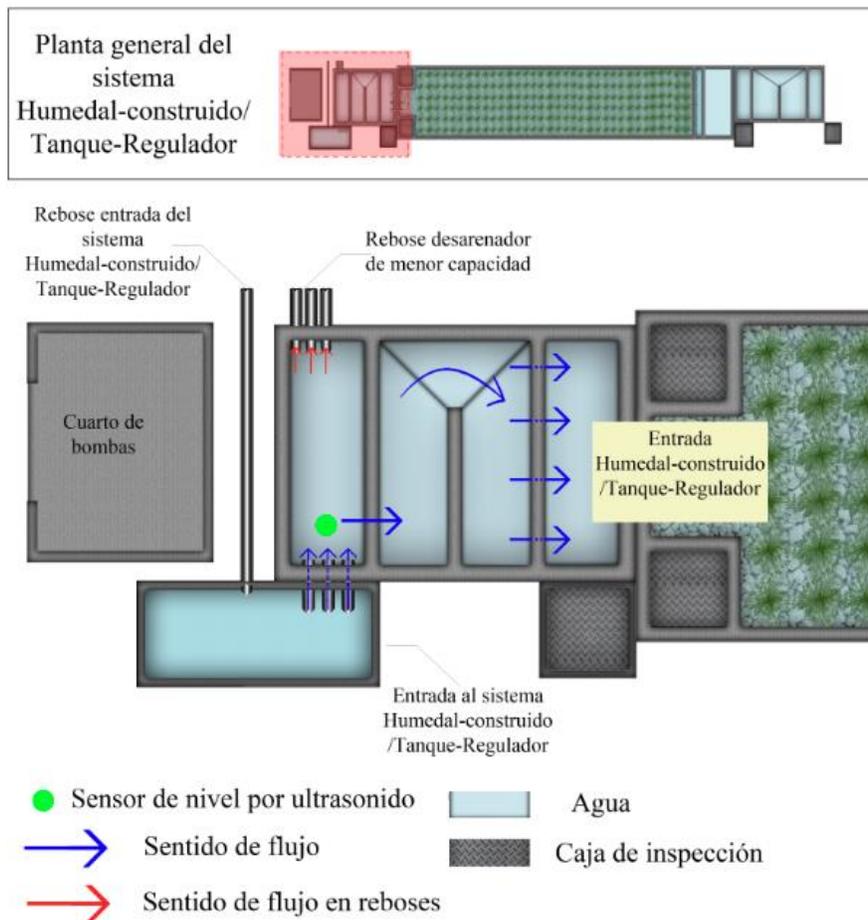


Figura 11. Desarenador de menor capacidad (costado oriental del humedal) sentido de flujo del agua lluvia captada del edificio 115, vista en planta

2.2.4 TANQUE-REGULADOR

El tanque-regulador (ver figura 12) se encuentra en la parte inferior del sistema Humedal-Construido/Tanque-Regulador, el cual sirve de plataforma del humedal construido y cuenta con una capacidad de almacenamiento de 250 m^3 , la cual puede ser empleada para el riego de las laderas cercanas al sistema y lavado de fachadas y de zonas duras (Galarza and Torres, 2013) Esta estructura posee una zona en donde se ubican 2 motobombas tipo lapicero (ver figura 12) con un caudal de descarga total de 10 l/s y un rango de presión de descarga de $40\text{-}45 \text{ psi}$. Dichas bombas trabajan cada una con el 100% de la capacidad total (10 l/s cada una), de tal manera que al entrar en funcionamiento el sistema de bombeo, únicamente funcionará una bomba al 100% de capacidad, impidiendo el uso simultaneo de estos dos equipos.

El volumen acumulado de agua lluvia principalmente es usado para alimentar el sistema de riego que poseen las laderas colindantes al campo de futbol sintético y zonas verdes cercanas; adicionalmente puede ser empleado para lavado de zonas duras, fachadas o lavado del mismo sistema de aprovechamiento. Al igual que los desarenadores, este tanque cuenta con un diseño de rebose (ver figura12).

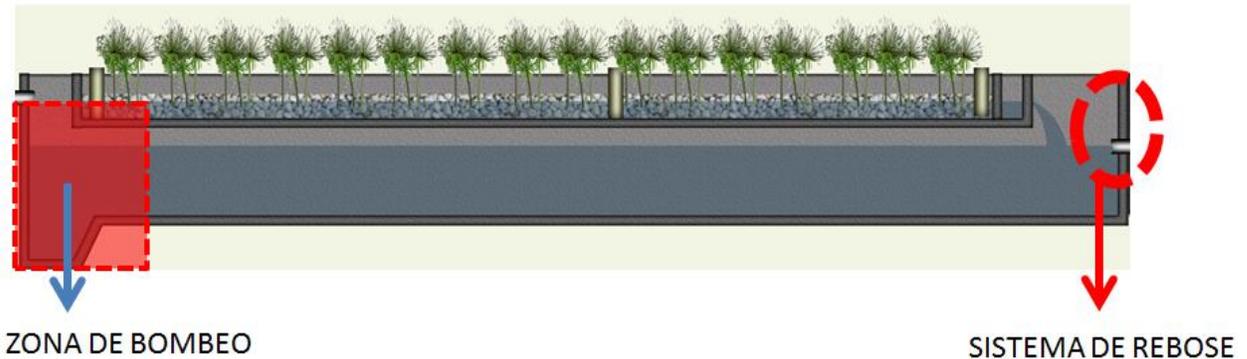


Figura 12. Corte general del tanque regulador y del humedal construido en donde se resalta la ubicación de la zona de bombeo y el sistema de rebose que posee

2.2.5 VERTEDEROS

A lo largo del sistema existen tres vertederos de sección triangular y de pared delgada. El vertedero 1 (ver figura 13) se encuentra en la entrada del desarenador de menor capacidad ubicado en el costado oriental del sistema Humedal-Constructivo/Tanque-Regulador, con un ángulo de apertura de 90°, está hecho de una lámina de aluminio de 1.5 mm de espesor y se encuentra anclado a las paredes del desarenador con tornillos del mismo material. Cuenta además con un empaque plástico que evita infiltraciones de agua de una cámara del desarenador a otra.

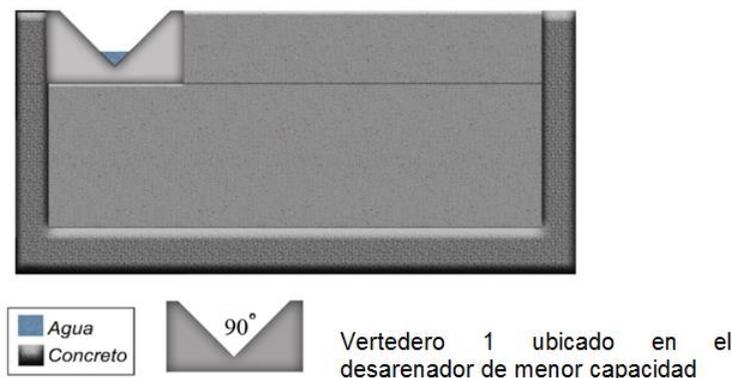


Figura 13. Corte general del desarenador de menor capacidad y detalle del vertedero 1

El vertedero 2 (ver figura 14) posee las mismas características del vertedero 1 y está ubicado a la salida del humedal-construido, aproximadamente en la parte central del sistema Humedal-Construido/Tanque-Regulador.

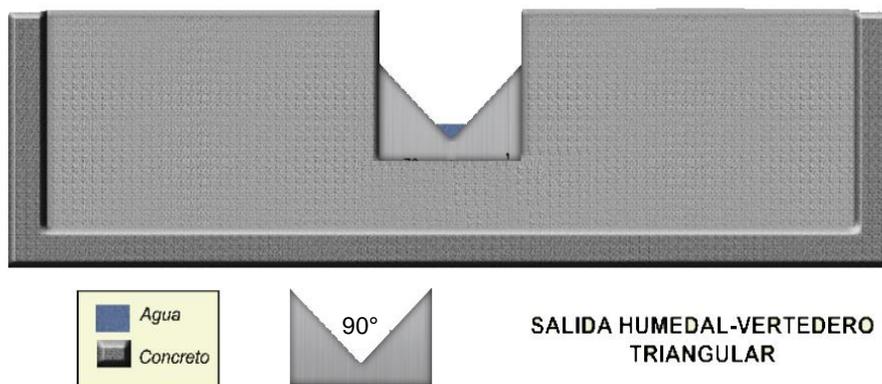


Figura 14. Corte general de la salida del humedal construido y detalle del vertedero 2

El vertedero 3 (ver figura 15) posee las mismas características del vertedero 1 y se encuentra en la entrada del desarenador de mayor capacidad ubicado en el costado occidental del sistema Humedal-Construido/Tanque-Regulador.

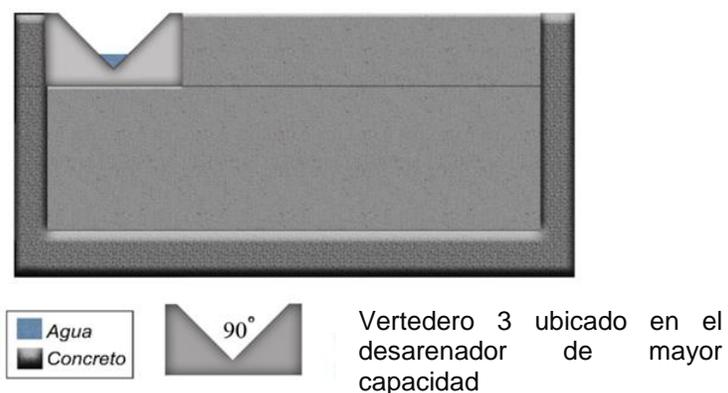


Figura 15. Corte general del desarenador de mayor capacidad y detalle del vertedero 3

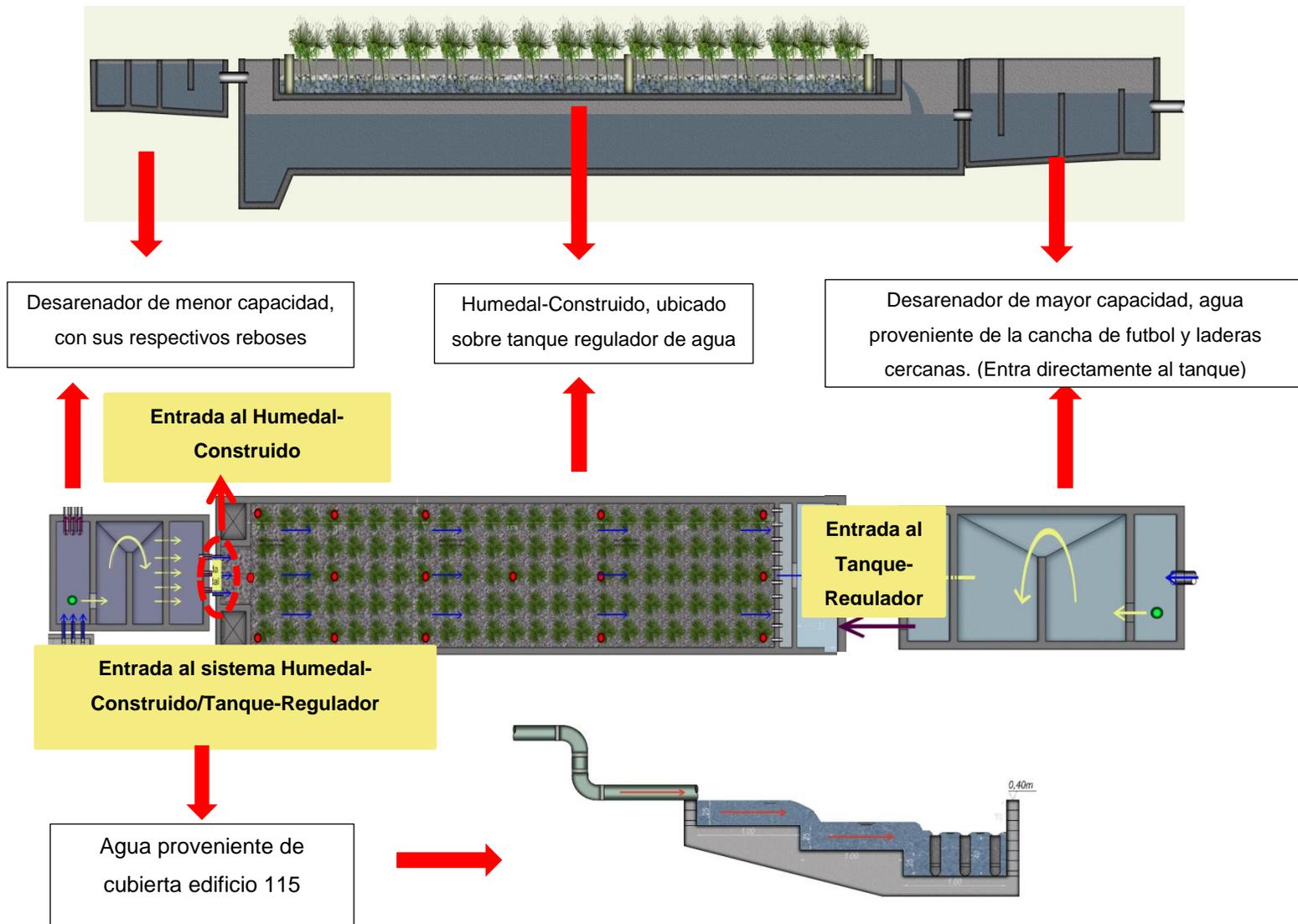


Figura 16. Diagrama general del sistema Humedal-Constructuido/Tanque-Regulador

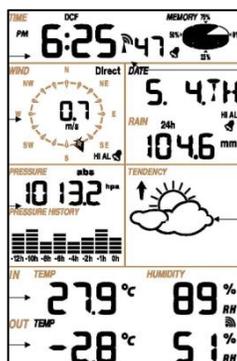
2.3 SISTEMA DE MEDICIÓN

La instrumentación utilizada para la medición de datos hidrológicos e hidráulicos en el sistema Humedal-Construido/Tanque-Regulador tiene la función de tomar medidas en continuo y en tiempo real, los cuales están ubicados en el campus de la PUJB, entre ellos se encuentran los sensores de nivel por ultrasonido ubicados a lo largo del sistema Humedal-Construido/Tanque-Regulador que permiten realizar las mediciones hidráulicas del sistema. Por otro lado, se cuenta con dos instrumentos de medición de precipitación ubicados en la cubierta del edificio 67, José Rafael Arboleda S.J de la PUJB.

2.3.1 INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN HIDROLÓGICA

a) Estación meteorológica Ambient Weather WS-2080A Wireless

La estación meteorológica Ambient Weather WS-2080A Wireless (figura 17) permite tomar datos de:



- Duración de lluvia
- Hora y fecha del evento
- Velocidad del viento
- Precipitación
- Presión barométrica
- Temperatura
- Humedad

Figura 17. Estación meteorológica y Display de la consola del equipo Ambient Weather WS-2080A Wireless

Este instrumento está ubicado en la cubierta del edificio 67, José Rafael Arboleda S.J de la PUJB. En este trabajo fue utilizado para capturar datos de precipitación cada cinco minutos, lo que permitió conocer la intensidad de cada evento registrado y a su vez permitir el análisis hidrológico de las microcuencas.

Es importante destacar que los datos obtenidos en campo, fueron almacenados en un computador para su análisis, empleando el software

Easy Weather software (ver sección 3), el cual se obtuvo como versión gratuita de internet; este permite la visualización en tiempo real de los datos que se observan en la consola del equipo.

Debido a que el equipo maneja diferentes propiedades (ver tabla 2) en su Display (ver figura 17) fue importante su configuración según lo requerido para el presente trabajo (ver sección 3). En estas se incluyen fecha (año, mes, día), tiempo (horas, minutos zona horaria), viento (verificar norte), lluvia (unidad de medida mm), presión barométrica (bar), graficas de presión (eje x entre 12 y 24 horas), proyección de la presión, temperatura (centígrados) y humedad relativa (porcentaje).

Tabla 2: Rango, precisión y resolución de la estación meteorológica, para tener en cuenta en la instalación

Medidas	Rango	Precisión	Resolución
Temperatura	-40 a 149 F	+ - 2 F	0.1 F
Humedad	10 a 99 %	+ - 5 %	1 %
Presión Barométrica	8.85.a.32,5 pulHG	+ -0.08 pulHg	0.01 pulHg
Lluvia	0 a 394 pul	+ - 10 %	0.01 pul
Dirección Viento	0 a 360 grados	22.5 grados	
Velocidad Viento	0 a 112 mph	+ - 2.2 mph	0.01 mph

b) Instrumento de medición de precipitación

Este instrumento de medición (ver figura 18) se ubica en la cubierta del edificio 67, José Rafael Arboleda S.J., su montaje está compuesto por una estructura metálica (ver anexo B), elaborada en perfiles de acero en C de tres tipos, PHR 160X60 3mm, PHR 120X60 3mm y PHR 60X60 3mm (Monzon S et al. 2012) la cual está constituida por un marco externo y cuatro columnas, mientras que el marco interno esta soportado por una columna central.

La estructura cuenta con una teja de zinc ondulada de 2.44 m de longitud, 0.80 m de ancho, un espesor de 1 mm y una inclinación de 3.4 grados (Rodriguez M 2013)

Este sistema esta instrumentado con una balanza electrónica (ver figura 19) encargada de medir la variación del peso de la lluvia de escorrentía almacenada en una caneca con capacidad de 20 L.



(*)



(**)

(*) Figura 18. Instrumento de medición de precipitación (Fuente: Autor, 2013)

(**)Figura 19. Balanza electrónica y soporte de caneca (Fuente: Rodriguez Maria, 2013)

2.3.2 MEDIDORES DE DISTANCIA (SENSORES DE NIVEL POR ULTRASÓNIDO)

Para realizar las medidas en el sistema Humedal-Construido/Tanque-Regulador, se emplearon seis medidores de distancia por ultrasonido (ver figura 20). Este sistema está basado en medir el tiempo que tarda el sensor en recibir un eco, tras haber emitido una señal sonora. Es el mismo sistema usado por los murciélagos para navegar en medio de la oscuridad. Un sonido es emitido en un rango de frecuencia fuera del alcance del oído humano¹, y se mide el tiempo que tarda en regresar el eco de dicho sonido.



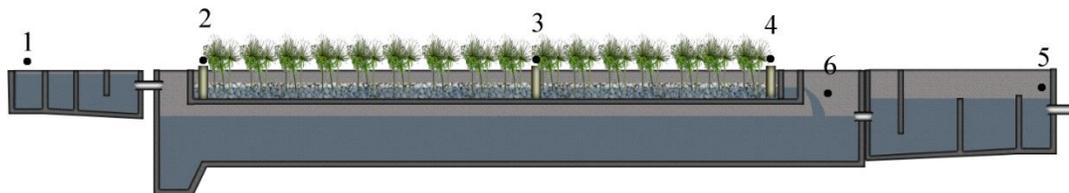
Figura 20. Montajes de sensores de nivel por ultrasonido ubicados en el sistema Humedal-Construido/Tanque-Regular

¹ El oído humano capta sonidos en un rango entre 0 Hz y 20000 Hz en su rango más extremo, dado que las señales usadas son de 40000Hz y de 200000Hz, están en un rango más allá del percibido por el ser humano.

En este proyecto se utilizaron dos tipos de sensores que emiten señales en diferente resolución; para realizar las mediciones en el tanque regulador se empleó un sensor que emite señales a 40000 Hz, mientras que para adquirir los datos sobre los vertederos y sobre los piezómetros se utilizaron sensores que emiten señales a 200000 Hz. Para seleccionar dicha precisión fue importante tener en cuenta, que la resolución mínima de medición corresponde a la longitud de onda del sonido emitido, por ejemplo, un sensor que emite a 200000 Hz tendría, en promedio, una resolución² efectiva cercana a los dos milímetros y un sensor a 40000 Hz tendría una resolución efectiva, cercana a 10 mm.

a) Montaje de los medidores

El montaje de los medidores (nodos) se realizó por los estudiantes del presente trabajo con asesoría del diseñador de los sensores. La instalación inició con la ubicación esquemática de los medidores, la cual se planeó para que estos se distribuyeran como se muestra en la figura 21. Basados en la ubicación planeada se instalaron tres brazos metálicos, cuya función es servir de soporte a los medidores 1, 5 y 6, ubicados en vertedero 1, tanque y vertedero 3 respectivamente. La ubicación de los brazos en el sistema, estuvo condicionada por la lámina máxima de agua que puede tener el sistema en cada sección, la cual es dada por la ubicación del sistema de rebose.



- | |
|---|
| <ol style="list-style-type: none">1. Medidor ubicado en el vertedero 12. Medidor ubicado en el piezómetro 1 (Entrada al Humedal-Construido)3. Medidor ubicado en el centro del Humedal construido (Piezómetro 2)4. Medidor ubicado en el piezómetro 3 (Salida del Humedal-Construido)5. Medidor ubicado en el vertedero 36. Medidor ubicado en el Tanque-Regulador |
|---|

Figura 21. Esquema ubicación medidores de distancia en el Sistema Humedal-Construido/Tanque-Regulador

² Capacidad de detectar cambios de dicha magnitud. La resolución efectiva es diferente a la resolución teórica, dado que existen factores ambientales y de funcionamiento que afectan dicha resolución.

Los medidores 2, 3 y 4 fueron empleados para el seguimiento de la altura de lámina de agua en los piezómetros, donde el medidor 2 se ubicó en la entrada del humedal, el 3 en la zona central del humedal construido y el 4 al final del humedal. Cada medidor fue anclado a los piezómetros por medio de tres cuñas realizadas en el tubo de PVC y tres tornillos que permiten asegurarlos (ver figura 20).

Una vez ubicados los medidores, se inició el cableado de estos a lo largo del sistema hasta el punto de captación, el cual consta de un computador industrial conectado en red lo cual facilita la adquisición de los datos medidos. El sistema de cableado está compuesto por un cable blindado de dos pares encargado de conectar cada uno de los medidores instalados hasta el computador y por una tubería Conduit eléctrica, que tiene por función proteger el cable transmisor; el cual se instaló bajo la grava que rodea el sistema Humedal-Construido/Tanque-Regulador de tal manera que no quedara a la vista y estuviera más protegido.

2.4 HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES

2.4.1 SOFTWARE R

Para realizar el análisis y la interpretación de cada uno de los eventos de lluvia medidos, se empleó el software R, el cual se caracteriza principalmente por ser una herramienta de libre adquisición, la cual va dirigida principalmente al estudio y análisis estadístico.

Este lenguaje y entorno computacional ofrece una gran variedad de modelos lineales y no lineales clásicos para análisis estadísticos, análisis de series de tiempo y técnicas para el análisis de gráficas; es importante agregar que tiene una amplia posibilidad de extender los códigos y mejorarlos, es decir es una herramienta que proporciona rutas de código abierto, y presenta la facilidad de adquirir herramientas y simbología matemática para el uso deseado.

R cuenta además con paquetes de funciones y comandos para la manipulación, cálculo y desarrollo de gráficas que incluyen una facilidad de manejo de los datos, cálculo y análisis de matrices, uso de una amplia gama de herramientas para el análisis de datos, facilidad para el desarrollo

de gráficas, que finalmente se puede traducir en un desarrollo de algoritmos de programación simples y efectivos que incluyen el uso de condicionales, ciclos, entradas y salidas, datos definidos por el usuario, etc.

2.4.2 EPASWMM (EPA's Storm Water Management Model)

EPASWMM es un software que permite la planeación, análisis y diseño relacionado con escorrentía, sistemas urbanos y rurales de drenaje. Este software tiene como objetivo permitir generar modelos dinámicos de lluvia escorrentía para un evento o una serie temporal de precipitación continua.

Esta herramienta proporciona diferentes tipos de métodos para transporte de la lluvia de escorrentía, ya sea en sistemas de presión, sistemas de canales abiertos, bombas, estructuras de tratamiento y almacenamiento, etc.; además tiene la capacidad de procesar una serie de procesos hidráulicos e hidrológicos, entre los que se incluyen, tiempo y variación de la lluvia, evaporación, acumulación de nieve, infiltración, percolación, etc.(US EPA 2013)

2.4.3 STATGRAPHICS Centurion (software libre)

Es una potente herramienta interactiva de análisis de datos que utiliza amplios procedimientos analíticos. Este incluye funciones estadísticas avanzadas capaces de analizar y desarrollar rigurosos y experimentados análisis con funciones de asistencia exclusivas lo cual proporciona simplicidad suficiente para permitir a un analista inexperto realizar procedimientos complejos.

Este software brinda más de 170 procedimientos estadísticos como análisis exploratorio de datos, análisis de variancia y distribución, control estadístico de procesos, diseño, experimentos, análisis de series temporales y de predicción, métodos multivariantes y técnicas no paramétricas, etc.

3 MÉTODOS

En esta sección se expondrán cada una de las metodologías que se emplearon para el desarrollo de la investigación. En primer lugar, se explican las metodologías para la instalación de cada uno de los equipos empleados (estación meteorológica y sensores de nivel por ultrasonido), posteriormente, se explicara la metodología que se debe hacer para obtener cada una de las mediciones hidrológicas e hidráulicas obtenidas en campo y de la forma en la cual se llega a la obtención de resultados, gráficas y conclusiones.

3.1 INSTALACIÓN

3.1.1 INSTALACIÓN DE ESTACIÓN METEOROLÓGICA

Para la cuenca en estudio se decidió ubicar la estación en la cubierta del edificio 67 (José Rafael Arboleda) situado al norte del campo de fútbol, para facilitar su mantenimiento y control; además de la cercanía que este tiene con el sistema. Una vez ubicada y asegurada la estación, fue importante verificar la configuración inicial empleando el software Easy Weather.

a) Easy Weather software

Al instalar el programa se genera un Display similar al ya configurado en la estación (ver anexo C). Al realizarse la configuración del programa, es importante tener claro las unidades que se obtienen del programa, según lo instalado inicialmente.

Este software permite generar alarmas para diferentes eventos, además tiene la opción de iniciar una nueva captura de datos o seguir con una base de datos de eventos de lluvias existentes.

Los datos obtenidos y almacenados pueden ser exportados a hojas de cálculo para terminar su análisis en los algoritmos generados en el software R.

Para exportar los datos medidos, se debe hacer con una extensión .txt, los cuales pueden ser interpretados por la hoja de cálculo, tomando en cuenta que la información vendrá en el siguiente formato (ver tabla 3).

Tabla 3: Formato de los datos obtenidos del software Easy Weather

Numero de datos	fecha y hora	intervalo de tiempo [min]	Humedad indoor [%]	Temperatura indoor [°c]	Humedad outdoor [%]	Temperatura outdoor [%]
Columna 1	Columna 2	Columna 3	Columna 4	Columna 5	Columna 6	Columna 7

Presión absoluta [mmHg]	Velocidad del viento [km/h]	Velocidad máxima de viento [km/h]	Dirección del viento	Presión relativa [mmHg]	Temperatura de rocío [°c]	Temperatura de sensación (windchill) [°c]
Columna 8	Columna 9	Columna 10	Columna 11	Columna 12	Columna 13	Columna 14

Precipitación en una hora [mm]	Precipitación en 24 horas [mm]	Precipitación semanal [mm]	Precipitación mensual [mm]	Precipitación total [mm]	nivel de viento [bft]	nivel de velocidad máxima de viento [bft]
Columna 15	Columna 16	Columna 17	Columna 18	Columna 19	Columna 20	Columna 21

En este caso en particular solo se emplearon las columnas [1], [2], [15], ya que solo se hizo el análisis de los eventos de lluvias y la información restante no era requerida para esta investigación.

3.1.2 INSTALACIÓN SENSORES DE NIVEL POR ULTRASONIDO

Para realizar la instalación y el montaje de estos medidores fue importante llevar a cabo el siguiente procedimiento:

- a) Inicia con una breve emisión de sonido ultrasónico que sale de cada sensor. Después de un cierto tiempo el mismo sensor espera el eco de rebote de la señal emitida. Cuando la señal emitida rebota y llega al sensor se mide el tiempo transcurrido entre la emisión del pulso y su llegada. El tiempo tomado se ajusta a partir de $x=v*t$, donde x es la distancia que recorre la partícula, v es la velocidad con la que se mueve la partícula y t es el tiempo en que demora la partícula en recorrer la distancia x con una velocidad v . conociendo la velocidad del sonido en el

aire que en promedio es 340m/s, se puede calcular cuánto tiempo transcurrido entre el sensor y el objeto (lámina de agua) que genera el eco.

- b) Los datos tomados por cada sensor son enviados al computador. Allí, la información recibida es interpretada y almacenada
- c) Con los datos almacenados, se genera una carpeta que corresponde al mes en el que se realizó la medición, dentro de la cual existen carpetas por día, las cuales almacenan dos archivos .csv, “absolutos.csv” y “raw.csv”. Para esta investigación es importante utilizar solo el archivo de “absolutos.csv”, ya que estos han sido filtrados y no poseen ecos secundarios, encargados de generar confusiones al hacerse el análisis de los mismos, además se encuentran en una escala temporal cada minuto.

3.2 MEDICIONES

En esta investigación se tomaron dos tipos de mediciones, mediciones hidrológicas e hidráulicas, las primeras fueron medidas por la estación meteorológica, la cual fue empleada para rectificar las medidas del instrumento de medición durante un evento, y el instrumento de medición de precipitación (ver sección 2.3.1). Por un lado, las mediciones que corresponden a la estación meteorológica permitieron confrontar los datos obtenidos por el instrumento de medición, ya fuera por su orden de magnitud, tiempos de medición, etc., lo que permitió tomar la decisión de emplear solo la información del instrumento de medición ubicado en el edificio 67, ya que este cuenta con una mayor precisión en la obtención de la información y además los intervalos de medición son más finos (mediciones cada minuto), lo que permite observar el comportamiento de un evento de lluvia de una manera más clara y precisa.

Las mediciones hidráulicas fueron realizadas con los sensores de nivel por ultrasonido a lo largo del sistema Humedal-Construido/Tanque-Regulador cuando se presentaba un evento de lluvia.

Es importante aclarar que las mediciones hidráulicas e hidrológicas fueron tomadas simultáneamente, para observar la respuesta del sistema con respecto al evento que se presentó, además solo fueron analizados los

eventos de lluvia en los cuales los datos representaran con claridad el evento de lluvia y su respuesta en los medidores de distancia.

3.2.1 MEDICIONES HIDROLÓGICAS

- a) En este trabajo de grado se contó con información pluviométrica captada por el instrumento de medición de precipitación ubicado en la cubierta del edificio 67, José Rafael Arboleda S.J.

Este equipo envía los datos medidos en continuo y en tiempo real a un computador encargado de guardarlos en una carpeta que posee las mediciones y se encuentran organizadas por mes y por día de medición y por medio de un software libre que permite la administración de ordenadores de manera remota, TeamViewer, se puede acceder al computador para descargar los datos de tal manera que la adquisición de los mismos se puede realizar en cualquier momento (ver anexo D).

Una vez descargados los datos según lo visto en el anexo D, es importante saber que en la carpeta que corresponde a un día de mediciones, existen tres archivos “pesos.csv”, “sheet adc2 a.csv” y “sheet adc a.csv”, en este caso, se elige el archivo “sheet adc a.csv”, el cual debe exportarse a una hoja de cálculo de Excel.

- Cambiar el nombre de archivo para llevar un control más riguroso de las mediciones realizadas (ver figura 22)

lluvia_dd_mm.csv { dd: Día
mm: Mes

Figura 22. Esquema para nombrar archivos de mediciones de lluvia según el día y el mes

- Al abrir el archivo antes modificado, es importante identificar las columnas que posee ya que la única columna que será empleada en ese caso es “Modbus1.300007” y la de “time”, en donde se incluye fecha y hora de la medición (ver figura 23).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Time		Modbus1.300001	Modbus1.300002	Modbus1.300003	Modbus1.300004	Modbus1.300005	Modbus1.300006	Modbus1.300007	Modbus1.300008
2	10/29/2013	00:00:00	3890	3096	3644	3446	3569	3615	1016	528
3	10/29/2013	00:01:00	3885	3091	3648	3449	3562	3613	1016	536
4	10/29/2013	00:02:00	3884	3092	3652	3449	3560	3615	1016	530
5	10/29/2013	00:03:00	3888	3089	3647	3445	3564	3612	1016	528
6	10/29/2013	00:04:00	3887	3089	3647	3449	3562	3610	1015	512

Figura 23. Esquema del formato de los datos obtenidos por el instrumento de medición de precipitación

- Los valores que se encuentran en el archivo (ver tabla 4) no son mediciones de pesos, por lo cual es importante multiplicar cada uno de los datos por el siguiente factor (ver Eq. 1):

$$datos [kg] = (dato - 1008) * 0.0088 \text{ (Eq.1)}$$

Tabla 4: Ejemplo de transformación de información obtenida en bruto del instrumento de medición de precipitación

Time	Modbus1.300007	Datos [kg]
	1008	
	0.0088	
10/28/2013 15:12:00	1048	0.352
10/28/2013 15:13:00	1081	0.6424
10/28/2013 15:14:00	1144	1.1968
10/28/2013 15:15:00	1305	2.6136

Aplicando Eq. 1



- Con los datos en peso real que se obtuvieron previamente, se procede a realizar un filtro en el cual se excluyen todos los valores negativos existentes entre los rangos de $0 < x < -0.3$, donde x , son los datos transformados. Esta condición es posible realizarla ya que el instrumento de medición se ve afectado por corrientes de vientos que se presentan durante la toma de mediciones en continuo (ver tabla 5).

Tabla 5: Ejemplo de aplicación del filtro inicial

Time	Modbus1.300007	Datos [kg]	Filtro
	1008 0,0088		
10/28/2013 15:09:00	1000	-0.0704	0
10/28/2013 15:10:00	1002	-0.0528	0
10/28/2013 15:11:00	1000	-0.0704	0
10/28/2013 15:12:00	1048	0.352	0.352

- Debido a que el instrumento de medición de precipitación (P) no es un pluviómetro convencional, se deben hacer la transformación de dicha información para ser utilizada correctamente, en donde se propone que el agua que llueve sobre el instrumento será extrapolado a la microcuenca de análisis, es decir que cada delta de alturas medido por el sensor de masa corresponde a una altura de lámina de agua sobre la microcuenca (ver figura 24).

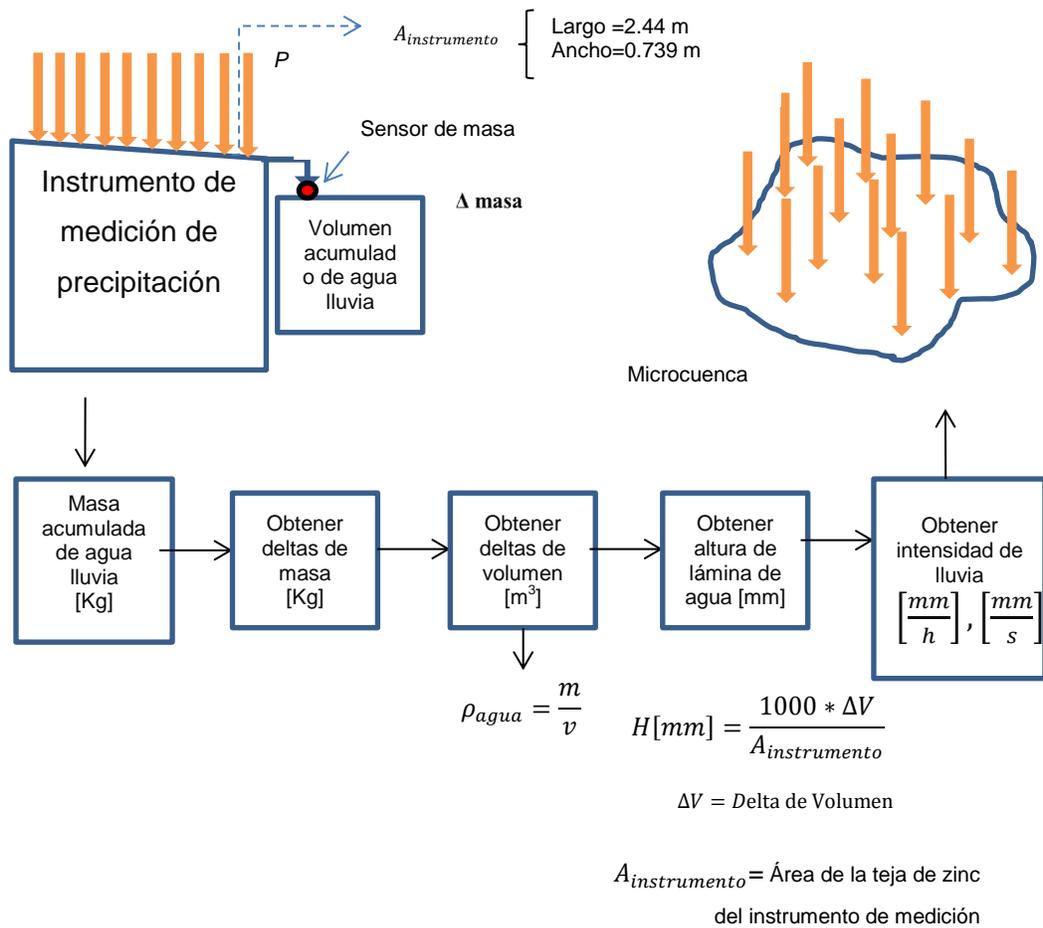


Figura 24. Esquema de transformación de datos obtenidos por el instrumento de medición de precipitación

3.2.2 MEDICIONES HIDRÁULICAS

Para realizar el análisis hidráulico de cada uno de los datos obtenidos por los sensores de nivel por ultrasonido, es importante llevar a cabo los pasos expuestos en el anexo D, tomando en cuenta que al descargar esta información, la carpeta posee dos archivos: "row.csv" y "absolutos.csv". El archivo posee la siguiente estructura cuando se exportan los datos a una hoja de cálculo en Excel (ver figura 25).

	Datos medidor 1		Datos medidor 3		Datos medidor 5	
	B	C	D	E	F	G
Time	dist_M1	dist_M2	dist_M3	dist_M4	dist_M5	dist_M6
10/28/2013 00:00:00	403.172	466.712	446.465	467.295	741.879	142.96
10/28/2013 00:01:00	403.172	466.162	446.465	467.324	741.726	142.812
10/28/2013 00:02:00	403.138	465.782	446.465	467.596	742.089	142.652

Fecha y hora en la que se tomó la medición Datos medidor 2 Datos medidor 4 Datos medidor 6

Figura 25. Formato inicial de los datos medidos por los sensores de nivel por ultrasonido

- a) Es importante cambiar el nombre de archivo (ver figura 26) para llevar un control más riguroso de las mediciones realizadas y el código desarrollado en R pueda ser leído y que permita hacer el análisis esperado.

medidores_dd_mm.csv { dd: Día
mm: Mes

Figura 26. Esquema para nombrar archivos obtenidos de los medidores de distancia

- b) Cada uno de los datos que se encuentran en el archivo “absolutos.csv” corresponden a la distancia medida entre la lámina de agua y el sensor (altura medida) en centímetros, debido a que esta distancia no es útil para realizar el análisis hidráulico es importante conocer la altura real de lámina existente en el sistema Humedal-Construido/Tanque-Regulador (ver figura 27)

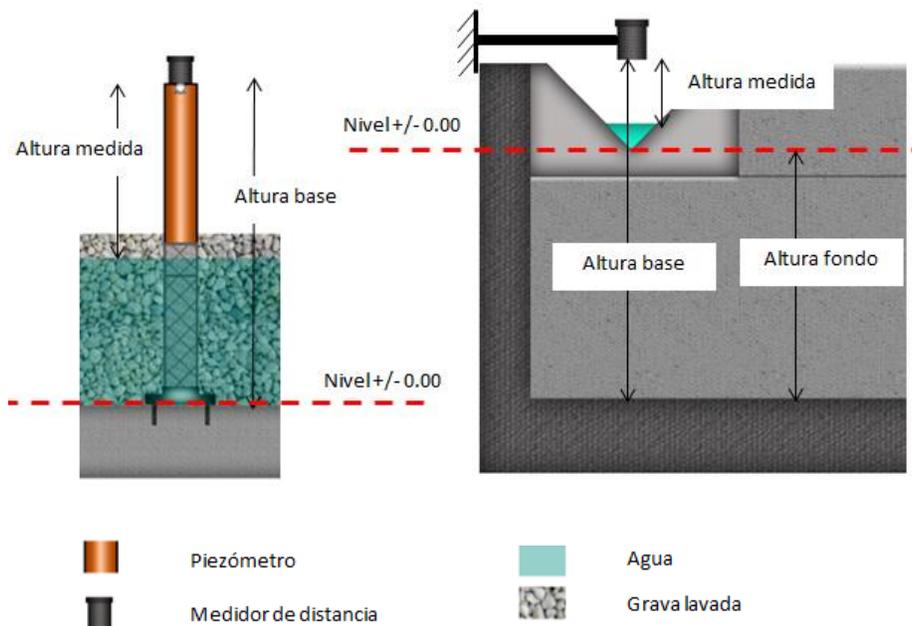


Figura 27. Esquema para nombrar archivos obtenidos de los medidores de distancia

Para obtener las dimensiones reales en el sistema fue importante realizar un levantamiento topográfico, obteniendo de esta manera cada uno de los niveles absolutos necesarios para realizar el análisis de caudales y aforos volumétricos (ver tabla 6).

Tabla 6: Tabla resumen alturas fijas empleadas para hacer el análisis hidráulico

Nombre Medidor	Medidor 1	Medidor 2	Medidor 3	Medidor 4	Medidor 5	Medidor 6
Ubicación	Vertedero 1	Piezómetro 1	Piezómetro 2	Piezómetro 3 / vertedero 2	Vertedero 3	Tanque-Regulador
Altura base (*) [m]	144,6	84,4	84,1	79,5	165,1	249,25
Altura fondo (**) [m]	1,09	-	-	0,53	0,965	-

(*) H_b=Corresponde a la distancia existente entre el medidor de distancia y el fondo de la estructura

(**) H_f=Corresponde a la distancia existente entre el fondo de la estructura y el nivel cero (ver figura 27)

c) Con base en la información mostrada en la tabla 6, cada uno de los datos medidos por los sensores de nivel por ultrasonido, deberán ser operados de la siguiente manera para obtener alturas de nivel aptas para realizar el análisis de caudal y aforos volumétricos (ver figura 28):

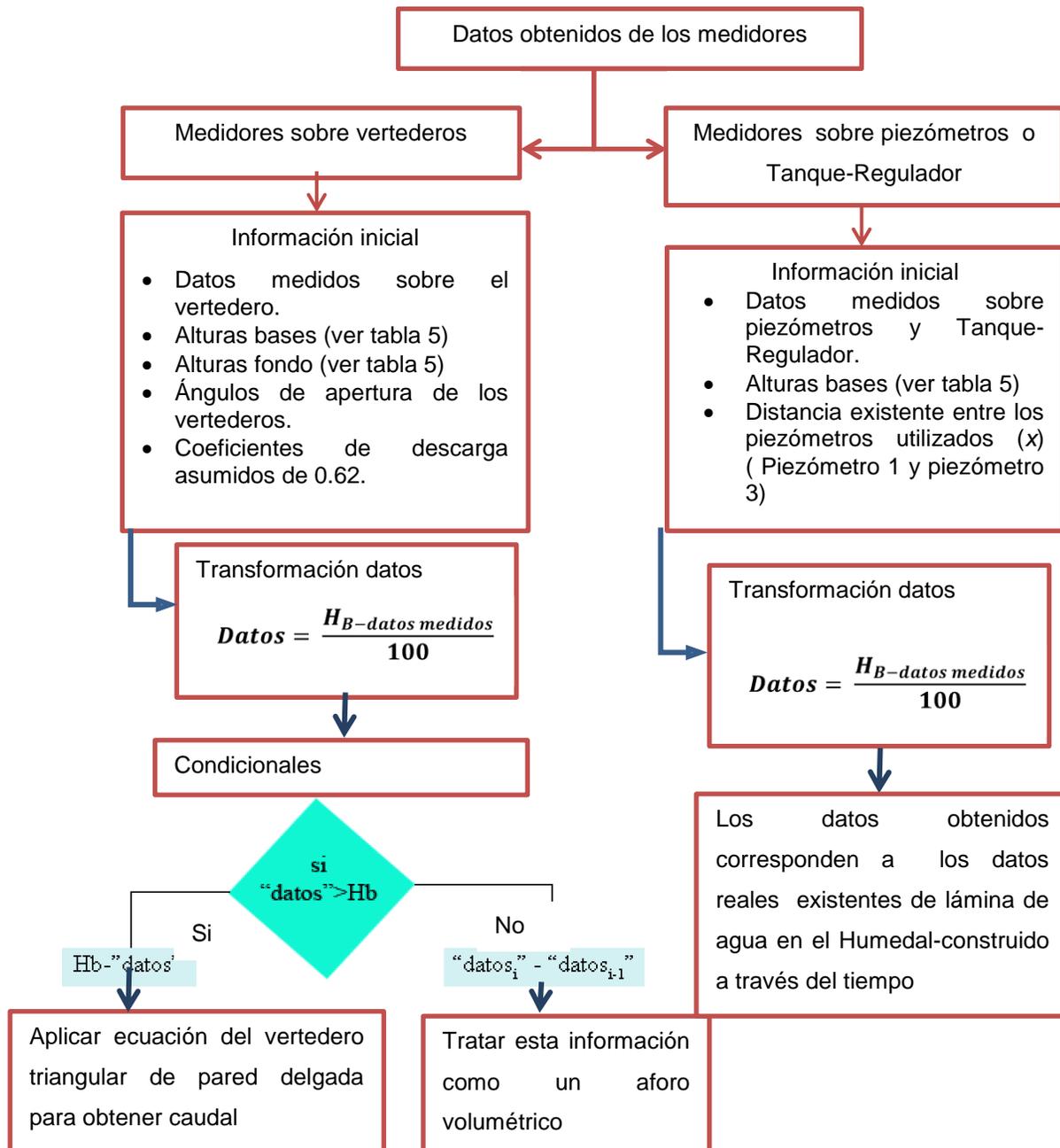


Figura 28 Esquema de metodología general para el análisis de datos hidráulicos

Nota 1: Todos los vertederos que posee el sistema Humedal-Constructivo/Tanque-Regulador tienen un ángulo de apertura de $[\theta]$ de 90° .

d) Con base en la información obtenida a partir del condicional, se debe hacer la transformación de dicha información ya sea en caudales o en aforos volumétricos.

- Para la obtención de caudal empleando la ecuación del vertedero triangular de pared delgada, cual la lámina de agua se encuentra sobre el vertedero (lámina de agua efectiva) (ver eq.2) (ver figura 29).

$$Q_w = \frac{8}{15} C_d \sqrt{2g} \tan \frac{\theta}{2} (h - p)^{\frac{5}{2}} \quad (Eq. 2)$$

En donde:

$$Q_w = \text{Caudal a través del vertedero} \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

C_d = Coeficiente de descarga

h = Altura lámina de agua [m]

p = Altura desde la base del vertedero hasta la apertura [m]

θ = Apertura del vertedero [Grados]

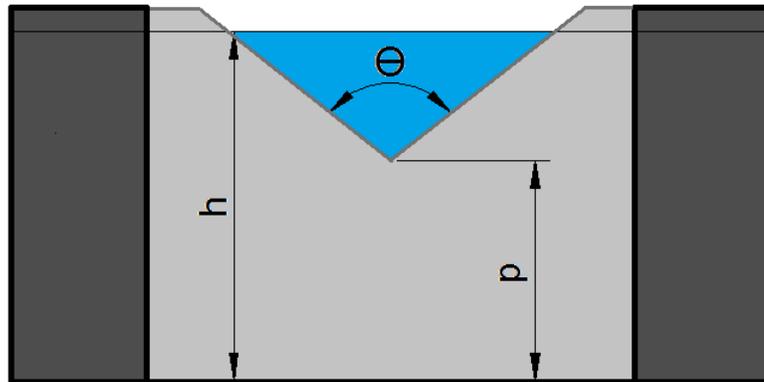


Figura 29. Esquema de un vertedero triangular de pared delgada y sus parámetros

Debido a que cada uno de los datos obtenidos de los sensores previamente pasan por un filtro ajustado a las condiciones del sistema; al aplicar la ecuación 2 en el código desarrollado en el software R, se ingresa directamente el valor sin hacer la diferencia que se muestra en la ecuación antes mencionada.

Cuando la lámina de agua durante un evento no supera el nivel cero (ver figura 27), los datos medidos se operaron como como un aforo volumétrico que fue transformado en caudal, en donde fue importante tomar en cuenta las dimensiones de las cámaras de aquietamiento en la cual se esté desarrollando el análisis (vertedero 1, vertedero 2, vertedero 3) (ver figura 30).

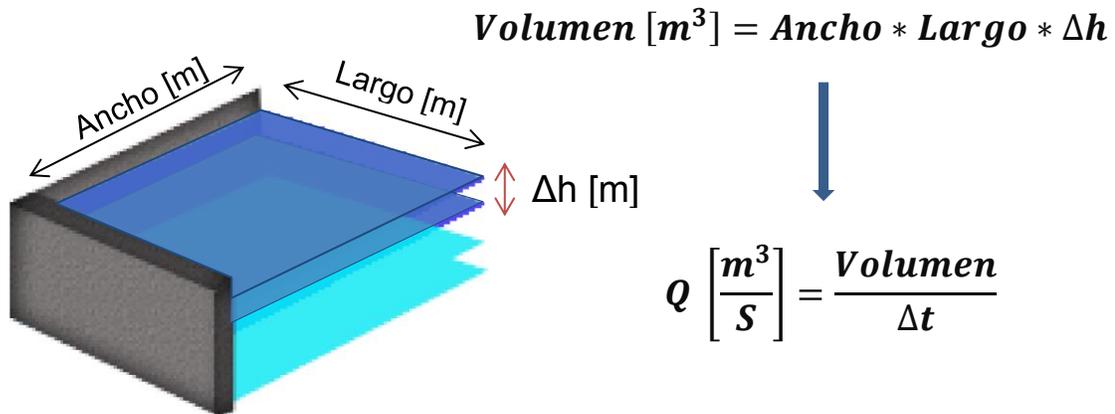


Figura 30. Esquema de obtención de aforos volumétricos y caudales (Δt = delta de tiempo; Q = caudal; Δh = delta de lámina de agua obtenido de las mediciones)

- e) Como ya fue mencionado, en primer instante se optó por utilizar un coeficiente de descarga ($C_d = 0.62$), sin embargo, para poder realizar el análisis de la información y comprender el impacto de dicho coeficiente en las medidas, se plantearon diferentes escenarios:
- Coeficiente obtenido de literatura ($C_d = 0.62$)
 - Un coeficiente ideal ($C_d = 1$)
 - El coeficiente será variable entre dos valores teóricos ($0.45 < C_d < 0.6$)
 - El coeficiente será variable entre dos valores teóricos ($0.5 < C_d < 0.7$)
 - El coeficiente solo tendrá la condición de ser menor que uno.

Al realizar cada uno de estos escenarios y generar modelos lineales para ser resueltos, fue importante tener en cuenta que la información empleada para esta fase, corresponde a la obtenida de los eventos de lluvia y del medidor 1.

En primer lugar se toman los datos de intensidad de los eventos de lluvia medidos, simultáneamente se usan los valores de caudal medidos sobre el vertedero 1.

Empleando la ecuación del método racional (ver eq. 3), se emplea la intensidad obtenida en los eventos para transformar dichos datos en caudales y posteriormente en volúmenes que se sumaron.

$$Q = C * i * A \quad (\text{eq. 3})$$

$$Q = \text{Caudal} \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

C= Coeficiente de escorrentía

$$i = \text{intensidad de lluvia} \left[\frac{mm}{h} \right]$$

Por otro lado, se transformaron las mediciones de caudal obtenidas por el medidor 1 en volumen que fueron sumados posteriormente. Con estas dos sumatorias, se realizó una diferencia entre volúmenes de tal manera que se podría cuantificar la diferencia entre los datos, lo cual será usado como criterio para determinar el valor de cada coeficiente, dado que cuando el diferencial de las suma sea igual a cero se podrá decir que los coeficientes resultantes son los que se ajustan al sistema Humedal-Construido/Tanque-Regulador.

3.3 HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES

Para realizar el análisis y la interpretación de cada uno de los eventos de lluvias medidos y de los datos de los medidores de distancia obtenidos a lo largo del sistema Humedal-Construido/Tanque-Regulador, se empleó el software R para desarrollar cada uno de los algoritmos empleados.

Se generó un algoritmo general, encargado de hacer la interpretación de los datos previamente seleccionados, esto significa que el usuario es el encargado de realiza la pre-selección de la información utilizada por el código para ser analizada; dicha selección consiste en identificar gráficamente el inicio y el fin del evento empleando las mediciones en bruto (información dada por el medidor de distancia). Una vez realizado esta pre-selección el archivo se deben guardar con las siguientes características:

Para generar los archivos de cada uno de los eventos de lluvias que se analizaron, es importante que se anteponga la palabra "lluvia" y

posteriormente el número de evento que se desea estudiar. Por ejemplo, para el evento de lluvia que se presentó el día 28 de octubre, que corresponde a la primera medición que se realizó, el archivo tipo .txt, debe ser nombrado como “lluvia_1”.

Para el vertedero 1, vertedero 2 y Tanque-Regulador es importante tener en cuenta que los archivos se nombraron con una estructura específica para que el algoritmo pudiera reconocerlos y lograra operar cada uno de los datos obtenidos.

En el caso de los datos de los vertederos, los archivos se nombraron, según la ubicación que correspondía a la medición, ya fuera vertedero 1, 2 o 3, y se tomó en cuenta el orden de los eventos analizados; los cuales deben corresponder al número de datos de lluvias obtenidas; de tal manera que el archivo pueda ser enumerado según el evento y la posición del vertedero (ver figura 31).

En cuanto a las mediciones realizadas en el tanque, se lleva acabo el mismo procedimiento anterior, pero al nombrarlos se tomó en cuenta la siguiente estructura: “tanque_numero de evento de lluvia”. Ejemplo: para el evento número 3, los datos obtenidos del medidor 6 deben ser nombrados, tanque_3.txt.

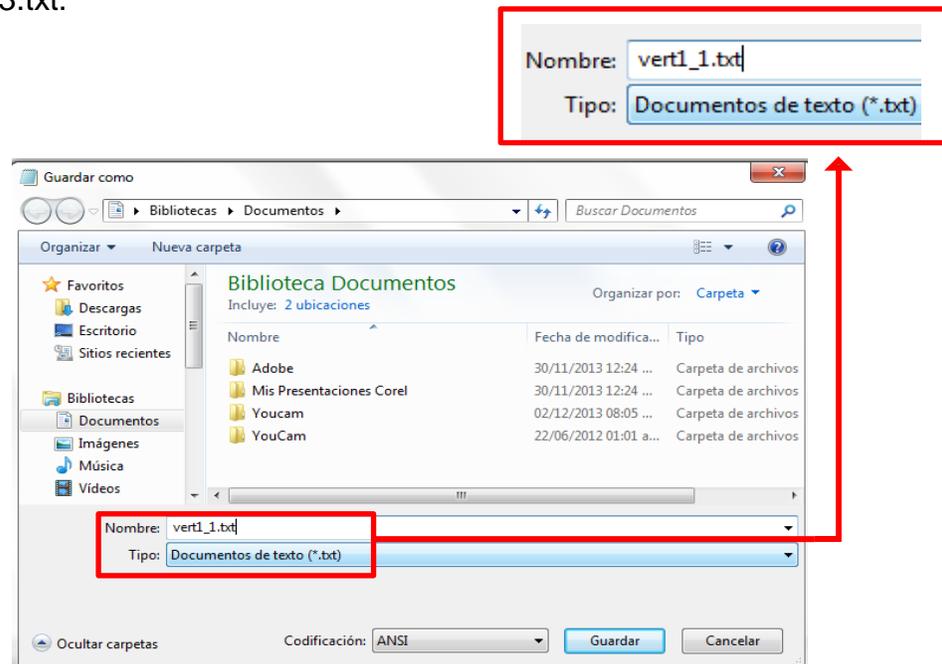


Figura 31. Forma de nombrar un archivo para uso del algoritmo medidores_humedal.R (ejemplo vertedero 1 en el evento 1)

Nota 2: Es importante tener en cuenta que ningún archivo debe contener letras en mayúscula ni espacios entre caracteres.

Después de nombrar los archivos, se debe tener clara la estructura en la cual el algoritmo desarrollado podrá hacer la lectura de los datos. En el caso de los vertederos y el Tanque-Regulador, el archivo posee 6 columnas, en donde se incluye la fecha (mes, día y año) y la hora (hora y minutos) y la medida realizada (ver figura 32).

Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda	
10	28	2013	15	11	1000
10	28	2013	15	12	1048
10	28	2013	15	13	1081
10	28	2013	15	14	1144
10	28	2013	15	15	1305
10	28	2013	15	16	1488
10	28	2013	15	17	1730

Fecha Hora Medición

Figura 32. . Formato de los datos obtenidos por los sensores de nivel por ultrasonido para uso del algoritmo `medidores_humedal.R` (ejemplo)

En el caso de las medidas obtenidos por los medidores 2, 3 y 4, en el momento de hacer el análisis solo se utilizaron los datos medidos simultáneamente con los del evento de lluvia, para lograr hacer el análisis de tiempos de retención del sistema.

Al realizarse el archivo que fue interpretado por el algoritmo fue importante tener en cuenta que por cada evento de lluvia que fue estudiado, debían existir tres columnas que correspondieran a fecha (mes, día y año), dos columnas de tiempo (hora y minutos) y las tres columnas restantes fueron los datos obtenidos por los medidores ubicados sobre los piezómetros.

3.3.1 ALGORITMOS DESARROLLADOS

En esta sección se presenta el algoritmo desarrollado (ver anexo E) para realizar el análisis de cada uno de los datos hidráulicos e hidrológicos obtenidos. Este algoritmo se divide en tres partes, en donde en la primer sección se desarrolla el análisis e hidrológico, encargado de capturas cada

una de las mediciones realizadas sobre el sistema Humedal-Construido/Tanque-Regulador; a partir de estas capturas se obtendrán las características básicas de los eventos y sus respectivos hietogramas.

En la segunda parte del algoritmo, se buscó analizar cada una de las mediciones hidráulicas hechas por los medidores de distancia para la obtención de los caudales de entrada del sistema, volúmenes de retención de Humedal-Construido, tiempos de retención de la microcuenca analizada y del Humedal-Construido, etc.

Finalmente en la última parte de este algoritmo se encuentra el código encargado de realizar el análisis estadístico de la información obtenida por los medidores 2 y 4 (ver figura 21) sobre piezómetros y de la obtenida por el medidor 1 ubicado sobre el vertedero 1. Este algoritmo permite la obtención de líneas de tendencia que se ajustan a los datos obtenidos con su respectivo filtro basado en la exclusión de los outliers, que permite observar un comportamiento optimizado mediante modelos lineales y no lineales del sistema Humedal-Construido/Tanque-Regulador.

a) Primera parte: Algoritmo para el análisis hidrológico

Para el análisis e identificación de los eventos lluvia se desarrolló un código en el programa computacional R, el cual adquiere los datos del instrumento de medición y los procesa para determinar la duración del evento, la altura máxima de precipitación y el caudal aportado por el evento. Las principales funciones usadas se puede observar en la tabla 7.

Tabla 7: Funciones principales algoritmo para el análisis hidrológico

FUNCIONES	DESCRIPCIÓN
read.table()	Forma de leer datos en forma tabular
plot(x,y)	Grafica x (en el eje x) e y (en el eje y)
which(x == a)	Vector de los índices que cumplan el valor lógico a

b) Segunda parte: Algoritmo para el análisis Hidráulico

Para el análisis de los datos medidos por los medidores ubicados en el Humedal-Construido esta parte del código se encarga de operarlos para identificar la altura y la variación de la lámina de agua durante cada evento. Con lo cual se puede determinar el comportamiento del evento

en el sistema Humedal-Construido/Tanque-Regulador y poder determinar parámetros del humedal. Las principales funciones usadas se puede observar en la tabla 8.

Tabla 8: Funciones principales algoritmo para el análisis Hidráulico

FUNCIONES	DESCRIPCIÓN
read.table()	Forma de leer datos en forma tabular
plot(x,y)	Grafica x (en el eje x) e y (en el eje y)
which (x == a)	Vector de los índices que cumplan el valor lógico a
length(x)	Identifica el número de elementos que tiene x
range(x)	Determina el rango de x o c(min(x),max(x))

c) Tercera parte: Algoritmo para la obtención de parámetros estadísticos

En esta parte se evalúa la confiabilidad del caudal medido a través del vertedero 1, vertedero 2 y el gradiente hidráulico entre la entrada del Humedal-Construido y la salida del mismo. Las principales funciones usadas se puede observar en la tabla 9.

Tabla 9: Funciones principales algoritmo para obtención de parámetros estadísticos

FUNCIONES	DESCRIPCIÓN
read.table()	Forma de leer datos en forma tabular
plot(x,y)	Grafica x (en el eje x) e y (en el eje y)
which(x == a)	Devuelve un vector de los índices de x que cumplan el valor lógico a
predict()	Calcula los valores predichos para datos nuevos de un modelo ya ajustado
cor(x)	Matriz de correlación de los datos de x

3.4 SIMULACIÓN DE MONTECARLO

“El método de Montecarlo es un método no determinístico, utilizado para aproximar expresiones matemáticas complejas; es decir se crean un gran número de juego de valores generados aleatoriamente para los parámetros de incertidumbre, en este caso en particular las variables de intensidad de lluvia y coeficientes de escorrentía; posteriormente se calcula la función de desempeño para cada juego de valores.

Procedimiento

1. Generar números aleatorios bajo una distribución uniforme ($\mu=0.0$, $\sigma=1$) entre un rango de 0 y 1
2. Se debe generar números aleatorios que sigan una distribución que se ajusten a los datos diferente a la antes mencionada (Distribución normal) basado en la ley normal reducida (algoritmo Box-Müller) que genera números aleatorios normales.

$$R_N(0,1) = \sqrt{-2 \ln u_1} \cos(2\pi u_2) \quad (\text{eq. 4})$$

Donde u_1 y u_2 son los números aleatorios uniformes

3. Ajustar los números aleatorios normales a una distribución con media y desviación igual a los de la variable aleatoria (μ_{xi} , σ_{xi})

$$R_N(\mu, \sigma) = \sigma R_N(0,1) + \mu \quad (\text{eq. 5})$$

4. Evaluar la función objetivo y con la variable aleatoria generada $R_N(\mu, \sigma)$
5. Tabular y graficar la frecuencia de los casos en donde $M.S < 0$ y $F.S < 1.0$

$$\Pr(F.S) = \frac{\sum \text{casos donde } F.S < 1}{N} \quad (\text{eq. 6})$$

$$\Pr(M.S) = \frac{\sum \text{casos donde } M.S < 0.00}{N}$$

Donde B es el número total de “realizaciones” evaluadas” (Prada Sarmiento L. 2013)

Cuando se realizó la metodología antes explicada, fue necesario en primer lugar tomar cada una de las iteraciones de Ce realizadas por el método explicado en la sección 3.2.2 y utilizando el programa STATGRAPHICS, se pudo obtener la distribución y el ajuste de los datos de lluvia medidos en campo al igual que de cada uno de los coeficientes obtenidos.

A partir de cada una de estas metodologías estadísticas de ajuste, es posible generar cada uno de los números aleatorios tanto de coeficiente de escorrentía o

de intensidad de lluvia donde cada uno de estos debe estar bajo la distribución que describe dicho comportamiento.

Sin embargo, es importante aclarar que cada uno de los pasos explicados con anterioridad se consideró una simulación en la cual se generaron 2000 coeficientes para cada área de drenaje y 2000 intensidades; a partir de estos se obtiene un promedio que corresponderá al caudal total (ver eq. _) y para completar el análisis se generaron 1000 iteraciones de dichas simulaciones.

$$Q_{total} = i(A_1 * C_{e1} + A_2 * C_{e2} + A_3 * C_{e3} + A_4 * C_{e4} + A_5 * C_{e5}) \quad (\text{eq. 7})$$

En donde

Q_{total} = Corresponde al caudal que llega al sistema Humedal-Construido/Tanque-Regulador

A_1 = Área del Campo de Fútbol sintético

A_2 = Área del edificio Don Guillermo Castro (Ed. 115)

A_3 = Área de las zonas verdes

A_4 = Área de la cubierta CJFD ala sur

A_5 = Área de la cubierta CJFD ala norte

C_{e1} = Coeficiente de escorrentía del área 1

C_{e2} = Coeficiente de escorrentía del área 2

C_{e3} = Coeficiente de escorrentía del área 3

C_{e4} = Coeficiente de escorrentía del área 4

C_{e5} = Coeficiente de escorrentía del área 5

i = intensidad de lluvia

Con base en las simulaciones realizadas se genera una tabla en la cual se realiza un análisis de la información, en donde se incluye:

Tabla 10: Resumen de información obtenida al final de realizar el método de Montecarlo

Media	-
Error típico	-
Mediana	-
Moda	-
Desviación estándar	-
Varianza de la muestra	-
Curtosis	-
Coeficiente de asimetría	-
Rango	-
Mínimo	-
Máximo	-
Suma	-
Cuenta	-

A partir de lo cual se obtienen los coeficientes de escorrentía de cada una de las áreas de drenaje y el caudal total (ver anexo F).

4 RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en campo durante el periodo comprendido entre el 28 de octubre y el 9 de noviembre de 2013. Estos resultados incluyen los datos tomados por el Instrumento de medición de precipitación y los medidores de nivel; de tal manera que para este caso solo se cuenta con 8 eventos medidos.

Los eventos de lluvia analizados corresponden a los medidos el 28, 29 y 30 de octubre del 2013 y del 5, 6, 8 y 9 de noviembre del 2013, en donde el 6 de noviembre se registraron dos eventos. El criterio de selección de dichos eventos se basó en la continuidad de medición de los sensores de nivel, ya que se presentaron interrupciones que causaron que los medidores no registraran completamente todos los eventos ocurridos en dicho periodo.

El capítulo se divide en dos partes, por un lado se realizará la caracterización hidráulica del sistema Humedal-Construido/Tanque-Regulador, utilizando cada una de las características de los eventos: intensidad [mm/s], caudal [m^3/s], alturas de lámina de agua [m] y volumen [m^3]; lo cual permitió hacer la descripción general del sistema empleando estos 8 eventos y en la segunda parte se realizará la verificación de los principios de diseño hidrológicos e hidráulicos buscando la relación existente entre los coeficientes de descarga y los coeficiente de escorrentía, lo cual permitió calibrar un modelo lluvia-escorrentía que representa el comportamiento de la microcuenca para las mediciones tomadas.

4.1 CARACTERIZACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA HUMEDAL-CONSTRUIDO/TANQUE-REGULADOR

Para realizar la caracterización del funcionamiento del sistema Humedal-Construido/Tanque-Regulador, se utilizaron los resultados obtenidos del algoritmo construido (ver sección 3.3), del cual se obtuvo información de caudal, hietogramas de cada uno de los eventos de lluvia, curvas de capacidad del Tanque-Regulador, información del comportamiento en el tiempo del gradiente hidráulico, etc.

4.1.1 CARACTERIZACIÓN DE CAUDALES Y LLUVIAS

Para la caracterización de lluvias y caudales, se emplearon los 8 eventos medidos en campo por el instrumento de medición de precipitación y sensores de distancia, a partir de la información hidrológica se obtuvo la siguiente tabla resumen de cada uno de los eventos medidos (ver tabla 10).

Tabla 11: Características de cada evento mes, día, año, hora de inicio, hora fin y duración [mm: mes; dd: día; yy: año; hh: Hora inicial; min: minutos inicial; hhf: hora final; minf: minutos final; dur [min]: duración del evento; ipico [mm/s]: intensidad máximo; iprom[mm/s]: Intensidad promedio (corresponde al promedio de todos los datos de intensidad obtenidos) ; itotal [mm/s]:intensidad total; htotal [mm]: altura lámina de agua; tcentro [min]: tiempo al centroide; tpicoeven[min]: tiempo al pico del evento; adwp [min]: tiempo anterior seco

evento	mm	dd	yy	Hh	min	hhf	minf	dur
1	10	28	2013	15	12	16	1	50
2	10	29	2013	14	45	15	35	51
3	10	30	2013	15	59	17	25	87
4	11	5	2013	17	7	19	1	115
5	11	6	2013	22	21	0	16	116
6	11	8	2013	11	49	13	48	120
7	11	9	2013	13	40	15	3	84
8	11	12	2013	13	50	15	26	97

evento	ipico	iprom	itotal	htotal	tcentro	tpicoeven	adwp
1	0,035	0,005	0,240	11,977	8,715	10	0
2	0,004	0,001	0,039	2,012	19,131	12	1364
3	0,003	0,001	0,048	4,140	25,170	9	1464
4	0,009	0,001	0,094	10,804	49,695	44	1422
5	0,009	0,002	0,199	23,098	46,700	30	1640
6	0,014	0,001	0,176	21,171	27,251	20	2133
7	0,023	0,003	0,238	19,971	54,935	77	1432
8	0,004	0,000	0,034	3,274	38,255	18	1367

Al comparar las características de los eventos (de la tabla anterior, se obtuvo que el evento de mayor duración corresponde al ocurrido el día 6 de Noviembre del 2013 (Evento 6) con una duración de 120 minutos, mientras que el de menor duración fue el del día 28 de Octubre de 2013 (Evento 1) con una duración de 50 minutos. Por otro lado, se observó que el evento de mayor intensidad de precipitación fue el del día 6 de Noviembre de 2013 (Evento 5) con una precipitación total de 23, 098 mm y el evento de mayor intensidad ocurrió el día 28 de Octubre de 2013 (evento 1) con una intensidad total de 0.24 mm/s.

Con base en la anterior información descrita y expuesta, es posible notar que los eventos que poseen la mayor intensidad no corresponden a los de mayor duración, además se observa que los tiempos al pico de los eventos medidos, en un 80% de los casos se presentan en los primeros minutos, acción que es

determinante en la atenuación hidráulica del sistema Humedal-Construido/Tanque-Regulador, ya que el sistema debe recibir en un corto periodo de tiempo, altos caudales; lo que se vio reflejado en la inundación del desarenador de mayor capacidad en el evento 1 (ver figura 33). Adicionalmente se generó reboses en el vertedero 1 causados por la velocidad de entrada del caudal escurrido del edificio 115, en los medidores de los piezómetros se perdió medidas dado a que la lámina de agua se acercó a los mismos nublando la capacidad de enviar la honda de sonido.



Figura 33. Fotografía del desarenador de mayor capacidad durante el evento 1 (fuente: autor, 2013)

En la figura 33 es posible observar el desarenador de mayor capacidad y el vertedero 3 inundado durante el primer evento registrado (evento 1), lo cual generó una serie de deficiencias en la toma de datos por lo cual se optó por no usar las medidas obtenidas por el medidor y fue necesario utilizar el procedimiento empleado más adelante.

Tabla 12: Características de las mediciones obtenidas de los medidores de distancia en el sistema Humedal-Construido/Tanque-Regulador (qpico1 [m³/s]:Caudal pico vertedero 1; qpico2[m³/s]: Caudal pico vertedero 2; tpico1[min]: tiempo al pico caudal sobre vertedero 1;tpico2[min]:tiempo al pico caudal sobre vertedero 2; tcm1[min]: tiempo del centroide del hidrograma producido por el evento en el vertedero 1; tcm2[min]: tiempo del centroide del hidrograma producido por el evento en el vertedero 2;vol1[m³]: Volumen total medido sobre el vertedero 1; vol2 [m3]: Volumen total medido sobre el vertedero 2; tdur [min]:tiempo de duración de toma de datos; TretencHumedal [min]: Tiempo de retención hidráulico entre el vertedero 1 y el vertedero 2

evento	qpico1(m ³ /s)	qpico2(m ³ /s)	tpico1(min)	tpico2(min)
1	0,028	0,010	17,000	42,000
2	0,001	0,000	27,000	35,000
3	0,013	0,825	1,000	1,000
4	0,013	0,825	1,000	1,000
5	0,000	0,000	1,000	50,000
6	0,018	0,012	50,000	107,000
7	0,015	0,012	28,000	112,000
8	0,024	0,004	81,000	83,000

evento	tcm1(min)	tcm2(min)	vol1(m3)	vol2(m3)	tdur(min)
1	45,475	78,192	35,042	9,149	12880
2	30,340	34,581	0,780	0,109	2080
3	17,280	37,189	1,108	300,500	3240
4	61,009	13,530	5,615	143,867	7503
5	15,523	40,265	0,050	0,023	1830
6	62,278	146,872	16,205	78,786	39340
7	36,903	123,041	16,229	53,431	17578
8	52,756	58,150	16,831	5,554	3570

Al observar los datos de la tabla 12, se evidencia que el caudal pico que fue medido sobre el vertedero 1 fue durante el evento 1, el mayor caudal pico presentado en el vertedero 2 fue el del evento 3 y 4 con un caudal de 0.82 m³/s; lo que indica que el evento que mayor aporte de agua dio al sistema Humedal-Construido/Tanque-Regulador, es el evento 1; lo que indica que será considerado como el evento máximo presentado, según las mediciones obtenidas.

En la tabla 13 se expone información con respecto a tiempos al centroide de los hidrogramas y hietogramas generado por las lluvias medidas y a partir de esta

información se obtuvieron datos con respecto al tiempo de concentración de la cuenca y tiempo de retención del humedal.

Tabla 13: Tabla resumen de los tiempos de retención y concentración del Humedal-construido y de las microcuencas (Tcentrohietograma [min]: Tiempo al centroide del hietograma generado por cada evento; tcm1 [min]: tiempo del centroide del hidrograma producido por el evento en el vertedero 1; tcm2 [min]: tiempo del centroide del hidrograma producido por el evento en el vertedero 2; tcm3 [min]: tiempo del centroide del hidrograma producido por el evento en el vertedero 3

Evento	Tcentro hietograma	tcm1(min)	tcm2(min)	Tcm3(min)	Tretenc	Tconcen	Tconcen
					Humedal(min)	Entrada oriental (min)	Entrada occidental 2(min)
1	8,72	45,48	78,19	48,04	32,72	36,76	39,33
2	19,13	30,34	34,58	24,64	4,24	11,21	5,51
3	25,17	17,28	37,19	37,37	19,91	7,89	12,20
4	49,70	61,01	13,53	72,48	47,48	11,31	22,79
5	46,70	15,52	40,27	21,08	24,74	31,18	25,62
6	27,25	62,28	146,87	61,70	84,59	35,03	34,44
7	54,94	36,90	123,04	30,57	86,14	18,03	24,36
8	38,26	52,76	58,15	27,49	5,39	14,50	10,76

Con los tiempos de retención del humedal y de concentración de la micro-cuenca analizada, se observó que durante el evento 1 la subcuenca que pertenece a la cubierta del parqueadero tiene un tiempo de concentración de 36.76 minutos y las sub-cuencas restantes tienen un tiempo de retención de 39 minutos, mientras que para el evento 8, que posee la menor intensidad total, es de 14.501 minutos; lo que indica que el tiempo de retención de la microcuenca se relaciona directamente con la duración del evento de lluvia, el tiempo al pico de los hietogramas y la intensidad total de lluvia, ya que entre menor duración exista entre el inicio del evento y el tiempo al caudal pico, existe mayor riesgo para el sistema, ya que esto permite que grandes volúmenes de agua entren al sistema Humedal-Constructivo/Tanque-Regulador en un menor tiempo.

Al observar los datos obtenidos se encontró además, que el sistema Humedal-Constructivo/Tanque-Regulador tiene un mayor tiempo de retención cuando el tiempo seco anterior al evento es menor, lo cual indica que las subcuencas analizadas, especialmente las subcuencas permeables se encuentran saturadas. En la entrada oriental, se da el caso que existen grandes pérdidas en las entradas al sistema, ya que existe un rebose que genera pérdidas puntuales y la tubería de

entrada al sistema se encuentra ubicada a un cota superior que la del fondo de la caja, por ende cuando los tiempos secos son menores, dicha caja de inspección ya se encontrará al nivel que se requiere para entrar al desarenador de mayor capacidad sin ningún tiempo de retardo, creando así entradas de caudal superiores a las del diseño del mismo.

En esta sección se presentan los resultados de los medidores de distancia con los cuales se hizo un análisis del comportamiento hidráulico del sistema Humedal-Construido/Tanque-Regulador empleando cada evento.

A continuación se presentan los hidrogramas comparativos entre la entrada al sistema Humedal-Construido/Tanque-Regulador (vertedero 1) y la salida del humedal (vertedero 2). Con lo cual se determinará el tiempo de concentración en el Humedal-Construido y descripción de caudales pico y volúmenes.

Para poder comparar los diferentes datos en cada evento primero se identifica la serie base, la cual corresponde a la serie con menor cantidad de datos medidos, de tal manera que puedan ser comparados en el mismo intervalo de tiempo. Adicionalmente los valores de corta magnitud menores a cero fueron omitidos para generar una serie de datos más viables, en esta sección solo se hará el análisis de los datos obtenidos para el primer evento ya que los restantes no poseen la información completa debido a problemas con los medidores de distancia, sin embargo sus gráficas y datos obtenidos se adjuntan en el ver anexo G.

- a) Caudales medidos en el vertedero 1 y en el vertedero 2 generados por el evento 1

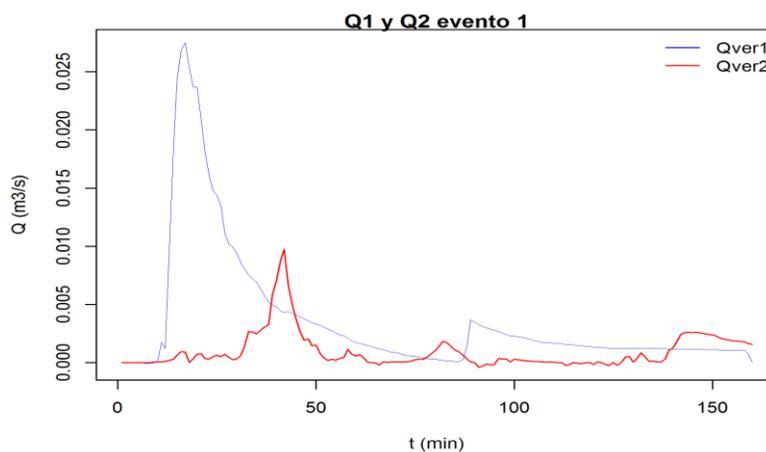


Figura 34. Hidrograma vertedero 1 y 2

En la figura anterior (figura 34) se puede observar el caudal que pasa por el vertedero 1 y el vertedero 2 durante 155 minutos causado por el evento 1, de la cual se pudo determinar que el caudal pico en el vertedero 1 es de 0.02751 (m³/s) y ocurrió a los 17 minutos del inicio del evento. En el caso del vertedero 2 el caudal pico es de 0.00974 (m³/s), el cual se dio a los 42 minutos, a partir de esta figura es posible observar la diferencia de magnitudes existente entre estos dos caudales, lo que permite inferir que la diferencia de los mismos será el volumen acumulado en el Humedal-Construido durante el tiempo concentración medido.

En este caso, el centroide del hidrograma generado por las mediciones sobre el vertedero 1 se ubica a los 45.48 minutos después del inicio del evento y en el vertedero 2 se da a los 78.19 minutos del inicio de las mediciones. A partir de la información anterior se determinan el tiempo de concentración del humedal-Construido, para el evento 1 es de 32.72 minutos.

Utilizando los datos obtenidos sobre el vertedero 1 y el vertedero 2, fue posible obtener el volumen transportado a través de estos, en donde durante el evento 1 el volumen que pasa por vertedero 1 es de 35.04 m³ y para el vertedero 2 es de 9.15 m³, en donde la diferencia de estos me permite obtener el volumen retenido por el Humedal-Construido que fue de 25.89 m³.

b) Comportamiento de los piezómetros ubicados en el Humedal-Construido durante el evento 1

En la figura 35 se puede observar el comportamiento de la altura de lámina de agua durante el evento 1 medida en los piezómetros por los medidores de distancia; en donde se observó que el medidor de distancia ubicado en el piezómetro 2 (P2) dejó de registrar alturas por lo cual se optó por comparar los datos correspondientes al piezómetro 1 (P1) y al piezómetro 3 (P3) (figura 35).

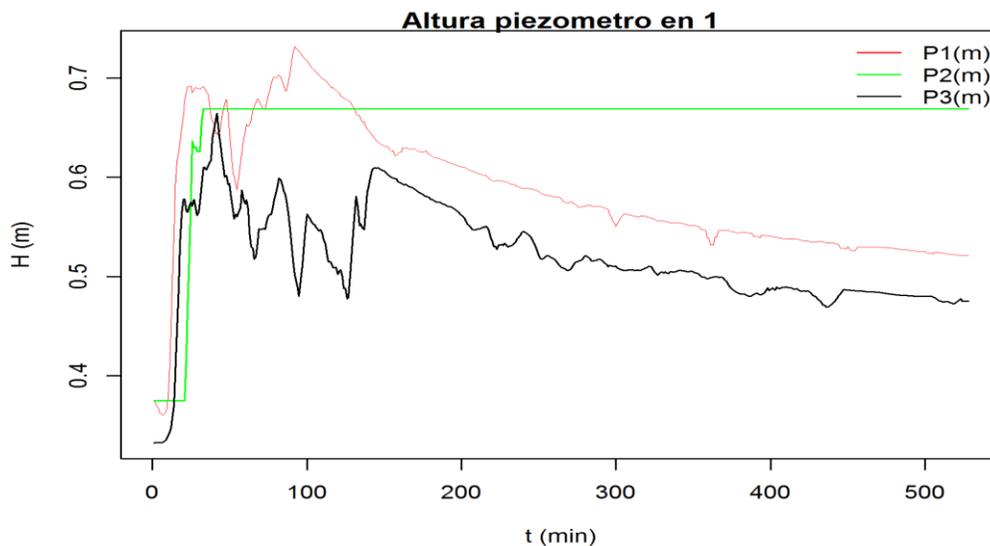


Figura 35. Comportamiento de alturas en los piezómetros 1, 2 y 3 por el evento del 28 de octubre 2013

Basados en los deltas de altura registrados en P1 y P3 y teniendo la distancia entre estos dos punto ($L=20$ m) se calcula la variación diferencial de las alturas a lo largo del humedal encontrando un gradiente hidráulico promedio de 0.0669 en el evento 1. A partir de esta información se observó que el comportamiento de los dos piezómetros fue similar, sin embargo las magnitudes son diferentes, pero es posible deducir que el caudal que se dio a través del Humedal- Construido en este evento fue constante al finalizar las mediciones, ya que se observa una tendencia a estabilizarse.

c) Alturas acumuladas en el Tanque-Regulador durante el evento 1

A continuación en la figura 36 se puede observar el llenado del tanque causado por el evento 1. Cabe recordar que este llenado es causado por el caudal que pasa por el vertedero 2 (salida del Humedal-Construido) y el vertedero 3 (entrada de campo de fútbol). El llenado se dio con una velocidad promedio de 0.024 m³/s hasta llegar a un volumen cercano a 1.75 m³.

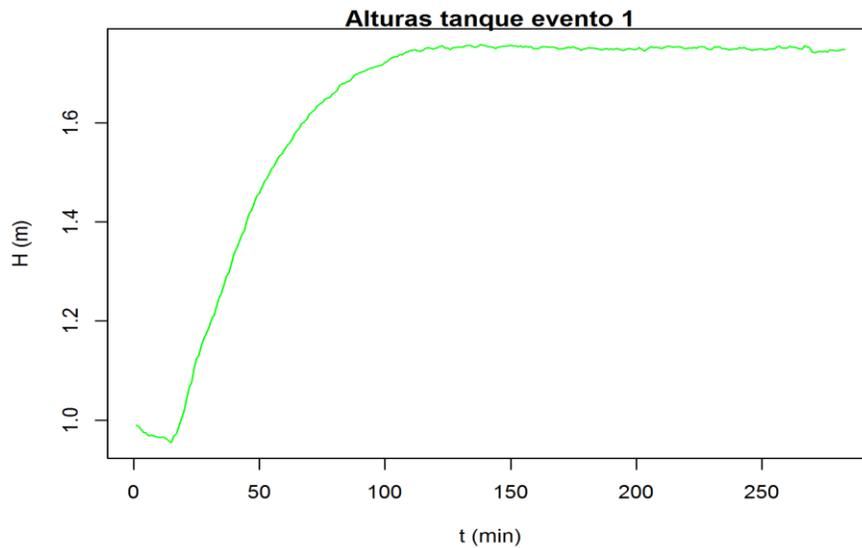


Figura 36 Comportamiento de altura en el tanque por el evento del 28 de octubre 2013

d) Comportamiento del Humedal-Construido entre los piezómetros 1 y 3 durante el evento 1.

En la figura 37 se presenta una gráfica donde se comparan los caudales medidos en el vertedero 1, en el vertedero 2 y el promedio de los mismos versus la variación de alturas entre el piezómetro 1 y el piezómetro 3, para observar si existía una relación entre la conductividad hidráulica y los caudales. Aplicando la ley de Darcy para una dimensión (eq. 8), la cual es restringida para flujo del régimen laminar, se determina la conductividad hidráulica del humedal.

$$u = \frac{Q}{A} = k * \frac{\Delta H}{\Delta L} \rightarrow Q = k * A * \frac{\Delta H}{\Delta L} \quad (\text{eq. 8})$$

Ecuación de Darcy (u: velocidad, Q: Caudal, A: Área, k: Conductividad Hidráulica, ΔH: Diferencia de altura, ΔL: Diferencia de distancia)

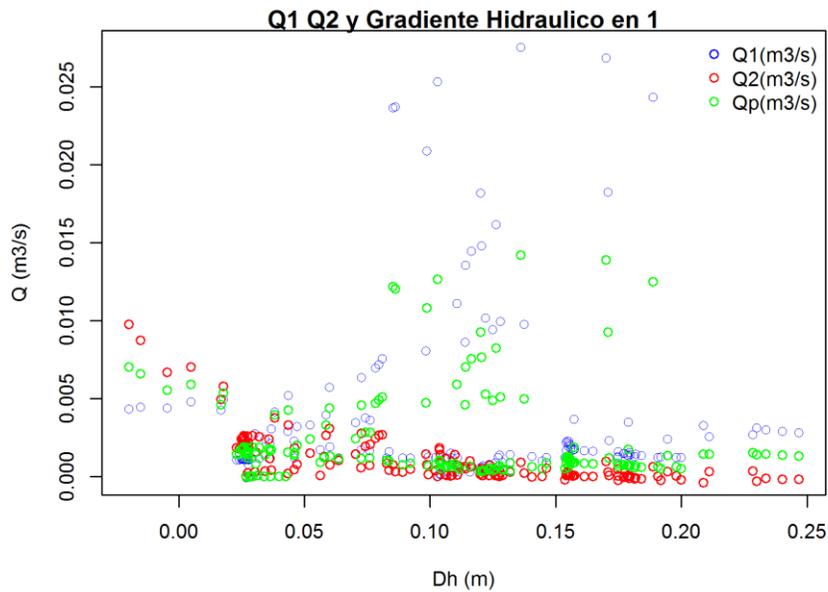


Figura 37 Comportamiento de los caudales 1 y 2 contra la variación de la altura entre los piezómetros por el evento del 28 de octubre 2013

Para analizar la conductividad hidráulica se optó por analizar los datos del promedio de los caudales de entrada y salida del Humedal-Construido, para lo cual por medio de un modelo lineal se hace una corrección y con estos resultados corregidos (ver figuras 38 y 39) fue posible observar una tendencia más clara de estos valores. Donde la figura 38 son los caudales promedios contra el diferencial de altura sin corrección y la figura 39 es la representación de los datos medios corregidos. Esta corrección se hace por medio del programa computacional R en el algoritmo desarrollado.

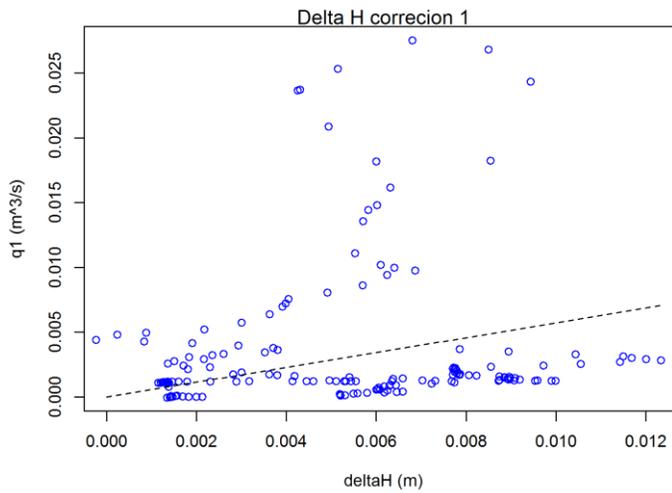


Figura 38 Caudales promedios vs variaciones de la altura en el evento del 28 de octubre 2013

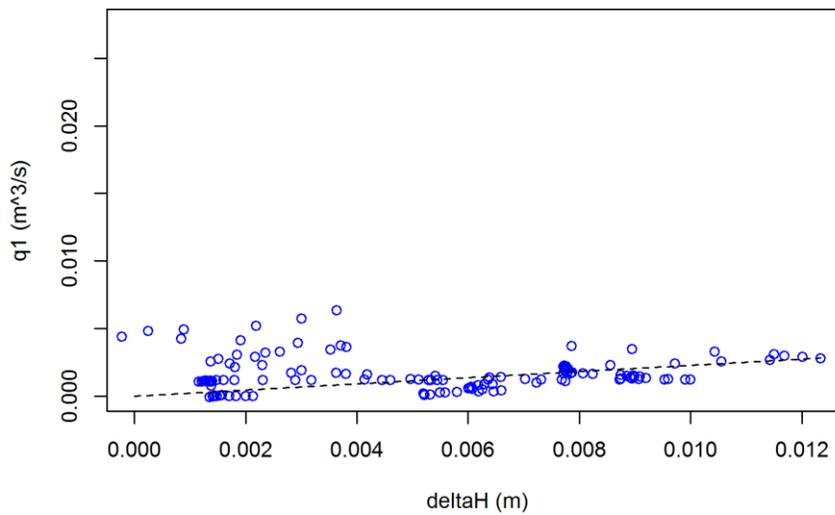


Figura 39 Corrección caudales promedios vs variaciones de la altura en el evento del 28 de octubre 2013

Como se observa, la relación entre el caudal promedio y las variaciones de la altura durante el evento 1 indica que hay una relación directa entre estas variables. Si aumenta el caudal, aumentará las alturas en los piezómetros.

- Determinación caudal entrada desarenador grande

A continuación se busca determinar el caudal que pasa por el vertedero 3, para lo cual se plantean dos metodologías; donde la primera busca por medio de datos medidos determinar el caudal que entraría por ese vertedero y la segunda busca por medio del método racional identificar el caudal que debería llegar al vertedero 3.

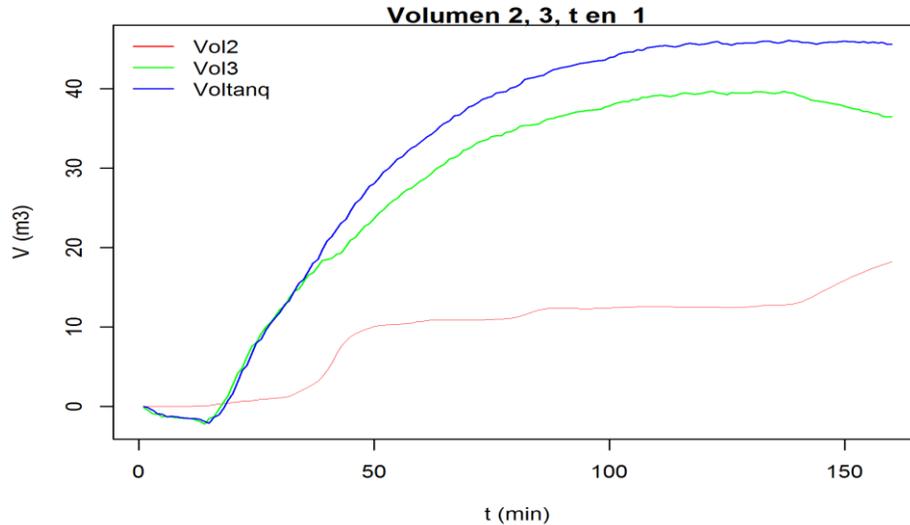


Figura 40. Grafica del volumen acumulado del vertedero 1,2 y Tanque-Regulador

En la figura 40 se observa el volumen que aporta el vertedero 2 al tanque en el evento 1 y el volumen acumulado del tanque donde al restarle el volumen del vertedero 2 se tiene el volumen que debería aportar el vertedero 3 empleando la ecuación 9.

$$V_t = V_2 + V_3 \rightarrow V_3 = V_t - V_2 \quad (\text{eq. 9})$$

donde:

V_t : Volumen que se acumula en el tanque

V_2 : Volumen que pasa por el vertedero 2

V_3 : Volumen que pasa por el vertedero 3

Para la segunda forma de obtener el volumen que pasa por el vertedero 3 se emplea el método racional (ver sección 3.2.2), de tal manera que identificando las intensidades de cada evento, conociendo el área estudiada (A: 7719.44 m² campo de fútbol, A: 4203.88 m² zonas verdes y A: 2243.4

m² Cubiertas CJFD) y los coeficientes de escorrentía de diseño (Ce: 0.35 campo de fútbol y Ce: 0.85 Cubiertas CJFD) se puede determinar el caudal que pasara por el vertedero 3 dado al evento de lluvia. En la figura 41 se presenta los caudales esperados generados por el evento para cada área de captación que alimentan el vertedero 3 (Q11 para el campo de fútbol y Q22 para las Cubiertas del CJFD) y al generar la suma se puede determinar el caudal que pasa por el vertedero 3 (Q33) durante el evento.

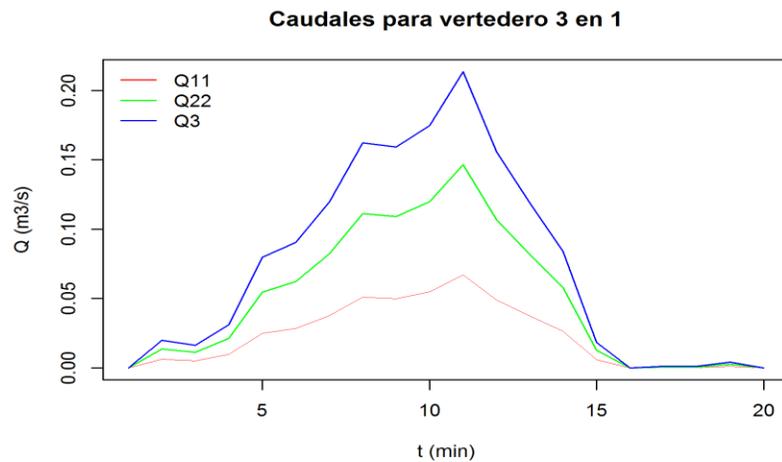


Figura 41. Grafica de caudal del vertedero 3

Para poderlo comparar se transformara el Q33 obtenido en volumen multiplicándolo por el delta de tiempo (60 segundos). Con lo cual se obtiene la acumulación de deltas de volúmenes esperados pro el evento de lluvia en el vertedero 3 (ver figura 37).

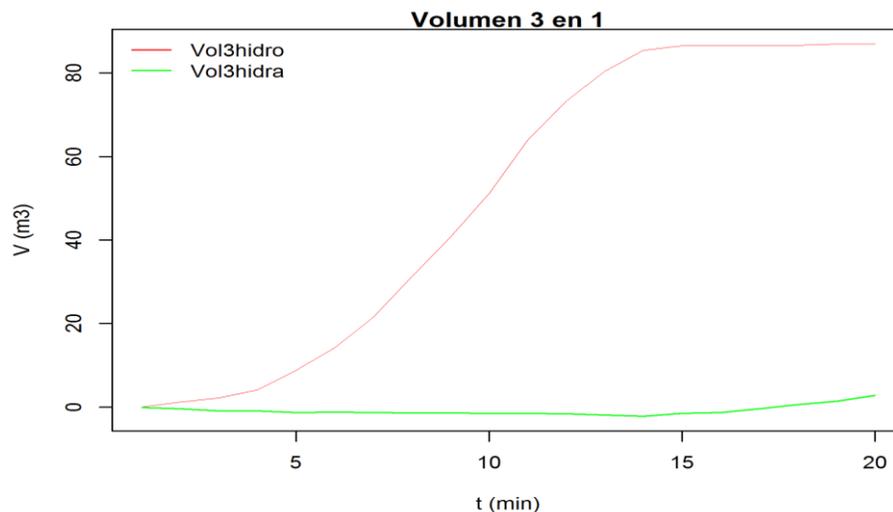


Figura 42. Grafica de volumen a través del vertedero 3

Al graficar los volúmenes obtenidos según lo explicado anteriormente (método racional y mediciones en campo), es posible observar que el volumen generado por el método racional durante el evento 1 genera todo su aporte de agua al sistema Humedal-Construido/Tanque-Regulador en los primeros 15 minutos del evento; mientras que el volumen obtenido de las mediciones en campo no genera su aporte en este intervalo de tiempo. Es importante aclarar que para realizar dicha comparación se tomó como escala temporal la correspondiente a la utilizada en el método racional, ya que era el de menor duración. Adicionalmente, se conoce que el aporte de volumen obtenido en campo se presenta a los 100 minutos del inicio del evento.

Lo anterior nos indica que a pesar de poder encontrar el volumen acumulado que aporta el campo de fútbol y las cubiertas del CJFD por el método racional y usando los coeficientes de descarga de diseño este no es comparable con los datos medidos por los sensores de nivel por ultrasonido ubicados en el Humedal-Construido/Tanque-Regulador

4.1.2 VERIFICACIÓN DE PRINCIPIOS DE DISEÑO HIDRAULICOS E HIDROLÓGICOS

A continuación se presentan los resultados de las optimizaciones de lo coeficiente de diseño tanto como coeficientes de descarga, para el vertedero 1, como

coeficientes de escorrentía para las áreas de drenaje de la microcuenca, estos coeficientes fueron comparados por medio de las modelaciones en el software EPA-SWMM, con el cual se obtiene el caudal que produce el evento con los coeficientes de escorrentía de diseño y se compara con los coeficientes de escorrentía optimizados. En este caso se asume que el coeficiente de escorrentía abarca todo lo que conlleva los sistemas de drenaje y sus posibles pérdidas. De tal manera que el coeficiente de escorrentía iterado representa todas las posibles pérdidas entre las áreas de captación y los puntos de control (entradas) al sistema Humedal-Construido/Tanque-Regulador. Cabe resaltar que el análisis se limita a las entradas del sistema y no incluye el Humedal-Construido.

Tabla 14: Tabla coeficientes de descarga y de escorrentía para el vertedero 1 y la cubierta del edificio 115 (Cd: coeficiente de descarga vertedero 1, Ce: coeficiente de escorrentía cubierta ed.115, NA: no registrado)

Vol evento y Vol medidos V1		
Evento	Cd	Ce
1	0.7263	0.6165
2	NA	0.0331
3	0.0620	0.0000
4	0.6198	0.0229
5	0.8332	0.4773
6	0.7578	0.5189
7	0.7301	0.4966
8	0.7476	0.5338

En la tabla 15 se encuentran los coeficientes de diseño y los coeficientes iterados tanto para el coeficiente de descarga del vertedero 1 como del coeficiente de escorrentía del área de captación de la cubierta del edificio 115. Cabe aclarar que los eventos 2, 3 y 4 son descartados para el análisis, debido a su alto margen de variación con respecto a los coeficientes de diseño, el cual se aproxima al 100 por ciento de variación. En el caso del coeficiente de descarga del vertedero 1 durante el evento 2 su valor no fue calculado dado que para ese evento la cámara de quietamiento se encontraba en un nivel bajo y la altura producida por el evento no fue suficiente para generar caudal real a través del vertedero.

- **COEFICIENTE DE DESCARGA VERTEDERO 1**

El coeficiente de descarga del vertedero 1 tiene una variación entre el 15 y el 35 por ciento con respecto al coeficiente de diseño ($C_d=0.62$), con lo cual los coeficientes de descarga de los eventos que mejor se comportan en relación con el de diseño son el evento 1 y el 7 con una variación del 17.1 y del 17.8 por ciento. A pesar de su variación, esto indica que el coeficiente obtenido al ser mayor que el coeficiente de diseño, representa mayores pérdidas y una retención en el paso por el vertedero.

- **COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA CUBIERTA EDIFICIO 115**

Para el caso de los coeficientes de escorrentía se puede observar una variación con respecto al coeficiente de diseño ($C_e=0.85$) entre el 27 hasta el 44 por ciento, donde el de mayor aproximación es el coeficiente calculado para el evento 1 con un C_e de 0.61 lo que equivale a una variación del 27.5 por ciento: lo que indica que la retención de la microcuenca es mayor que la esperada en el diseño.

En la tabla 15 se presentan los coeficientes iterados para cada área de drenaje durante los eventos estudiados.

Tabla 15: Tabla coeficientes de escorrentía para Cubiertas CJFD (Cubierta nor CJFD y Cubierta sur CJFD), Campo de fútbol, Zonas verdes y parqueadero (edf. 115) (C_d : coeficiente de descarga vertedero 1, C_e : coeficiente de escorrentía cubierta ed.115, NA: no registrado)

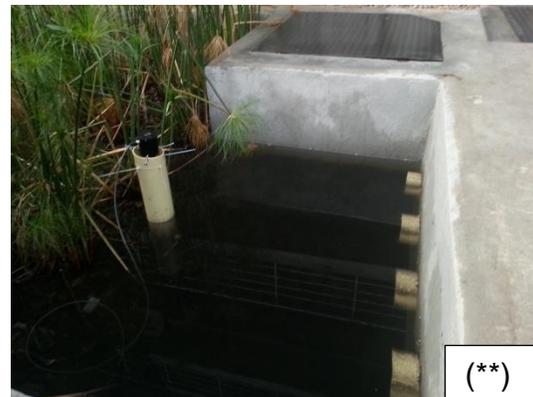
	Evento 1	Evento 2	Evento 3	Evento 4	Evento 5	Evento 6	Evento 7	Evento 8
Áreas	Ce iterado							
Campo	0.022	1.000	0.062	0.620	0.833	0.758	0.730	0.748
Ed. 115	0.616	0.033	0.000	0.023	0.477	0.519	0.497	0.534
Zona verde	0.022	1.000	0.062	0.620	0.833	0.758	0.730	0.748
Cubierta norte CJFD	0.796	1.000	0.000	0.023	0.477	0.519	0.497	0.534
cubierta sur CJFD	0.796	1.000	0.000	0.023	0.477	0.519	0.497	0.534

Tabla 16: Tabla coeficientes de escorrentía de diseño

Áreas	Ce diseño
Campo De fútbol sintético	0.35
Ed. Don Guillermo Castro 115	0.85
Zona verde	0.35
Cubierta norte CJFD	0.85
Cubierta sur CJFD	0.85

En la tabla 15 se puede observar los coeficientes iterados para las diferentes áreas de drenaje y al ser comparados con los coeficientes de escorrentía de diseño tabla 15, se puede determinar que:

En el único caso donde se puede determinar una relación entre los coeficientes de diseño y los iterados son en las cubiertas del CJFD durante el evento 1. Durante el evento 2 los coeficientes presentaron una variación del 6.3 y 17.6 por ciento respectivamente. Lo anterior indica que en las primeras iteraciones realizadas no es posible representar el comportamiento observado durante cada uno de estos eventos. Por el contrario, cuando ocurrió el evento 1, hubo una excedencia de caudal clara a lo largo de todo el sistema Humedal-Construido/Tanque-Regulador (ver figura 43), pero al observar los coeficientes iterados para este caso, se observa que poseen valores pequeños, lo que implica que el tiempo de retención de la microcuenca es mayor y no se debía presentar el fallo del sistema observado.



(*) Figura 43. Funcionamiento vertedero 2 durante el evento 1

(**) Figura 44. Inundación del Humedal-Construido final del evento 1

Adicionalmente se puede observar que en todos los eventos siempre se presenta una disminución del coeficiente. Para el coeficiente del campo de fútbol y de las zonas verdes se puede decir que la variación del coeficiente de diseño al coeficiente iterado es alta y en solo tres casos es menor que un cien por ciento (evento 1, 3 y 4), donde el evento 2 será descartado dado que en su iteración de optimización no cumple la condición de ser menor que 1.

a) MODELACIÓN

Con la siguiente modelación se busco evaluar el comportamiento de las áreas de captación basados en los coeficientes de escorrentía de diseño (ver tabla 15). Para la cual se siguió el siguiente procedimiento:

1. Para el presente trabajo se contaba con los planos de la microcuenca en formato de AutoCAD, para el cual fue necesario exportar las coordenadas de los puntos que generaban las polilíneas del plano a la plataforma de EPA-SWMM junto con su ubicación y conservando la magnitud de las áreas (ver figura 45).

2. Asignación atributos que requiere cada una de las subcuencas generadas, en donde se incluye información hidrológica e hidráulica:

Se evalúa la lluvia (rainfall/runoff) y además se define un modelo de infiltración de Green-amp. Debido a que no se posee información clara con respecto al sistema de drenaje y de transporte de aguas lluvias que conducen el agua de escorrentía hacia el sistema Humedal- Construido/Tanque-Regulador. Por lo anterior fue importante definir un solo nodo de descarga.

Para incluir cada uno de los eventos de lluvia se debe utilizar la pestaña de Hydrology-> Rain gages y allí se importa cada uno de los eventos que se quieren modelar. Es importante asignarle el evento de lluvia y el lugar a donde se realizara la descarga en este caso es la descarga 7 a cada una de las subcuencas.

En ese software, el coeficiente de escorrentía se llama porcentaje de impermeabilidad, en donde para una modelación inicial se utilizaron los coeficientes de diseño.

Es importante aclarar que para este modelo no se tomaron en cuenta los siguientes parámetros:

- No existen pérdidas en el sistema de drenaje
- No existe información relacionada con variables geoclimáticas (geoclimáticas, evapotranspiración, etc)
- No se hace la estimación de la capacidad de drenaje de las superficies impermeables.
- No se incluye información sobre las características reales del sistema Humedal-Constuido/Tanque- Regulador, es decir, niveles de entradas, conductividad hidráulica, etc.; ya que solo se buscaba conocer el caudal aproximado que llegaría al Tanque-Regulador.

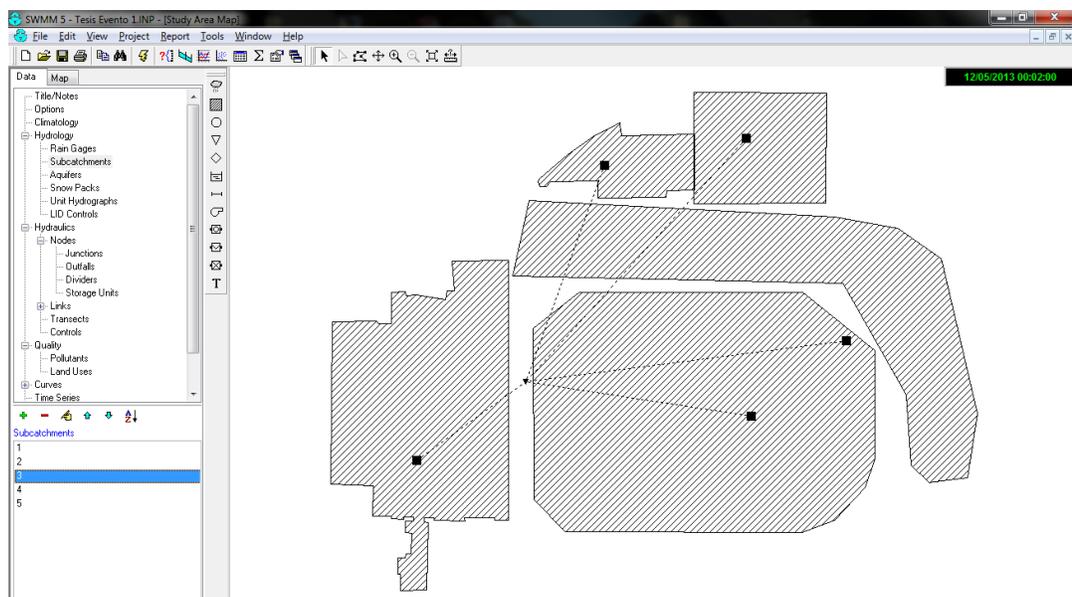


Figura 45. Display y montaje del modelo lluvia escorrentía generado #Tesis evento 1.inp”

Con el modelo de EPA-SWMM “Tesis evento 1.inp” se entraron las condiciones de diseño (Ce: 0.35 campo de fútbol y Ce: 0.85 Cubiertas CJFD) y con un Time Series equivalente a la intensidad del evento 1, se encontró que en el primer evento genera un volumen de entrada al sistema Humedal-Constuido/Tanque-Constuido de 62.66 metros cúbicos (ver figura 45). Al comparar el resultado aportado por el modelo “Tesis evento 1.inp” y el resultado encontrado con los medidores (Volumen tanque evento 1 = 20.54 metros cúbicos sobre segundos) se encontró que el caudal

calculado es 3.05 veces mayor que el caudal medido por los medidores de nivel ubicados en el Humedal-Construido/Tanque-Regulador.

Lo anterior se puede presentar debido al ruido encontrado en la señal del Sensor 6 ubicado en el Tanque-Regulador y con la poca información aplicada al modelo de EPA-SWMMM con la cual no se cuenta.

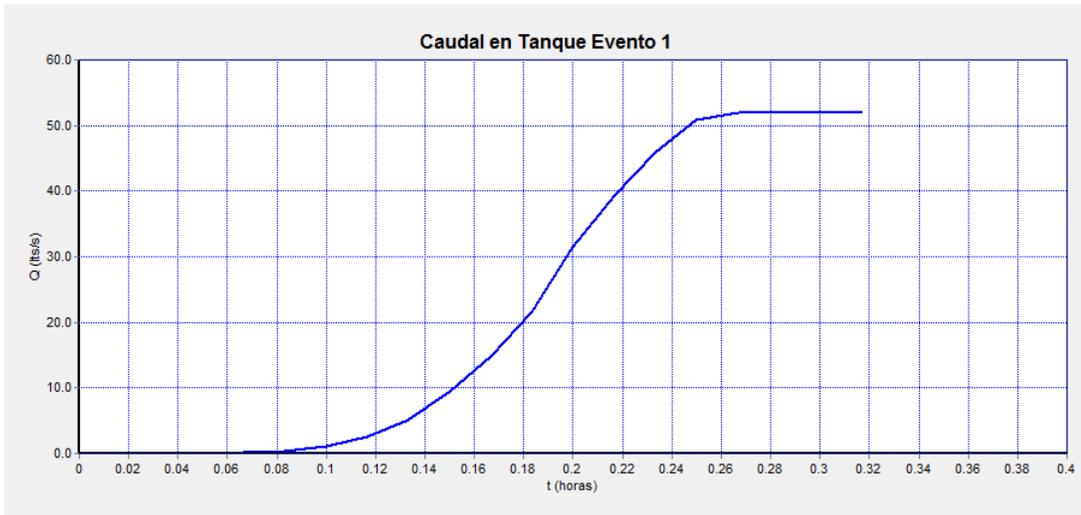


Figura 46. Caudal en el Tanque Modelo Tesis evento 1 ($C_e=0.85$)

b) MODELACIÓN ITERADA

En esta sección se prosiguió a comprobar la calibración de los datos de diseño (ver Métodos), en donde se entro al modelo “Tesis evento 1 ITERADA.inp” con los coeficientes iterados encontrados (C_e : 0.0221 campo de fútbol y C_e : 0.7962 Cubiertas CJFD) con lo cual el caudal que llega al Tanque-Regulador es de $15.93 \text{ m}^3/\text{s}$.

Por lo anterior podemos decir que la iteración generada con los coeficientes de escorrentía de diseño no son los adecuado para este evento en particular, de tal manera que para tener una mayor aproximación a los datos medidos en campo, se deberá implementar un coeficiente de escorrentía del campo de fútbol y de las laderas al campo de fútbol de 0.0221 y un coeficiente de escorrentía para las cubiertas de CJFD de 0.7962, que permite generar un modelo más confiable y ajustado a los datos medidos en campo.

c) RESULTADOS DE DISEÑO Y SUS ITERACIONES

Para la aplicación del modelo se tiene que tener en cuenta que las condiciones de la microcuenca analizada posee condiciones ideales, en donde el único factor que se recargan todas las perdidas desconocidas es el coeficiente de escorrentía.

Tabla 17: Tabla Caudales m³/s aportados al sistema en los eventos 1, 3 y 4 con los coeficientes de escorrentía de diseño y con los coeficientes iterados.

	Evento 1		Evento 3		Evento 4	
	Diseño	Iterado	Diseño	Iterado	Diseño	Iterado
Campo	19	19.38	1.8792	1.8792	3.519	3.519
Edf. 115	37	36.63	3.5496	0.2088	6.624	6.486
Zona verde	27	27.21	4.5936	4.5414	8.556	8.556
Cubierta nortCJFD	36	36.42	3.5496	0.0522	6.555	6.141
cubierta sur CJFD	37	36.57	3.5496	0.1044	6.624	6.348

Tabla 18: Tabla Caudales m³/s aportados al sistema en los eventos 5,6, 7 y 8 con los coeficientes de escorrentía de diseño y con los coeficientes iterados

	Evento 5		Evento 6		Evento 7		Evento 8	
	Diseño	Iterado	Diseño	Iterado	Diseño	Iterado	Diseño	Iterado
Campo	0.792	0.792	2.5704	2.5704	20.37	20.37	3.5568	3.5568
Edf. 115	1.44	1.44	4.8384	4.8384	38.354	38.296	6.7032	6.669
Zona verde	1.872	1.872	6.2496	6.2496	49.586	49.761	8.6526	8.6868
Cubierta nortCJFD	1.44	1.44	4.788	4.788	37.888	37.539	6.6348	6.5664
cubierta sur CJFD	1.44	1.44	4.8384	4.788	38.179	38.005	6.669	6.6348

En las tablas 17 y 18 se presenta los caudales generados por el sistema en las dos condiciones estudiadas, con los coeficientes de escorrentía de diseño (ver tabla 16) y con los coeficientes de escorrentía iterados (ver tabla 15). En las cuales se puede observar que en todos los eventos analizados menos en el evento 3 se observa que la variación del caudal que aporta cada área de drenaje en el sistema presenta variaciones de bajos porcentajes entre la modelación con los coeficientes de diseño y los coeficientes iterados. La variación observada es menor del dos por ciento. Con lo cual se puede determinar que empleando los

coeficientes iterados se obtuvo un modelo que corresponde a las condiciones medidas en campo.

4.1.3 MODELACION MONTECARLO

Empleando la metodología del método de Montecarlo explicada anteriormente (ver sección 3), se obtuvieron los siguientes coeficientes de escorrentía para las áreas de drenaje que conforman la microcuenca analizada.

Tabla 19: Tabla resumen de los coeficientes de escorrentía y caudal promedio obtenidos a través de la modelación de Montecarlo

Método	Q(m3/s) Promedio	Ce Cancha Promedio	Ce Parqueadero Promedio	Ce Zona Verde Promedio	Ce Cubierta Sur Promedio	Ce Cubierta Norte Promedio
Montecarlo 1000 iteraciones	0.023	0.634	0.391	0.634	0.536	0.535
Iterado modelado	1.018	0.597	0.337	0.597	0.481	0.481

En la tabla19 se presentan los coeficientes de escorrentía resultantes del método Montecarlo en 1000 iteraciones y con 2000 escenarios diferentes generados a partir de los diferentes números aleatorios dados por la macro realizada (ver anexo F) y los coeficientes iterados y probados en el modelo de EPASWMM. Se puede observar una estrecha relación entre los coeficientes obtenidos por la iteración con los coeficientes obtenidos por Montecarlo, donde el coeficiente de escorrentía de las zonas verdes y del campo de fútbol son similares, indicando que la variación de este con respecto al de diseño es comprobada y altamente factible, ya que las variaciones existentes oscilan entre el 6.31% y 6.35%. En el caso de los coeficientes de las zonas no permeables (cubiertas del CJFD y Cubierta del ed. 115) se observa una diferencia no superior al 15.72 %, con lo cual se puede decir que los valores obtenidos en las iteraciones son viables y permiten una descripción de la microcuenca a partir de la información obtenida en campo.

En la comparación directa de los dos métodos se resalta que el caudal obtenido por el método de Montecarlo (caudal promedio más probable) es un 90 por ciento menor que el obtenido por la optimización iterada, esta gran diferencia se puede

deber a la falta de información con la que se realizó el modelo en EPA-SWMM y por qué el modelo de Montecarlo solo se realizó con los eventos registrados en el presente trabajo, lo que indica que tiene un escenario muy limitado para desarrollar las simulaciones e iteraciones antes vistas.

4.1.4 INCERTIDUMBRE Y ESCALA DEL MODELO

Como es sabido la simulación es una técnica que permite reproducir la esencia de un sistema, sin reproducir el sistema como esta dado en la realidad; por lo cual un modelo será la representación de la operación de dicho sistema y posee; componentes, variables y parámetros; en donde los componentes son los subsistemas seleccionado para representar un proceso físico, en este caso en particular son las áreas de captación que recogen el agua de escorrentía en un tanque; las variables serán aquellos valores que describen cuantitativamente el fenómeno que se busca explicar, para este caso en particular será el caudal de escorrentía que se genera gracias a un evento de lluvia; y por último se encuentran los parámetros que son los valores que caracterizan el sistema analizado (Amancio, R 2007); en este trabajo de grado se emplearon los parámetros del terreno conocidos como la pendiente y el área de cada zona de drenaje, al igual que su coeficiente de escorrentía.

Según la investigación realizada por Amancio, es importante tomar en cuenta la influencia directa que tiene la escala en el proceso analizado, sin embargo, para este trabajo de grado se resalta que el modelo realizado es un modelo meramente conceptual, es decir hizo la representación de la cuenca como una serie de depósitos internos en series que se caracterizan individualmente en función de un comportamiento dinámico, es decir estos incluyen una descripción general de los procesos involucrados sin entrar en detalles específicos, por lo cual dan una idea del comportamiento cualitativo del sistema analizado, sin que ésta se aproxime a la realidad observada (Aguilar, C 2006).

Como es posible observar, en este trabajo de grado, lo que se quiso observar era el resultado directo obtenido de un balance hidrológico computacional, empleando el método de lluvia-escorrentía para la obtención y comparación de resultados; lo que indica que la calibración de parámetros en el modelo de EPA-SWMM no se hizo directamente en el modelo, sin embargo; con las otras metodologías matemáticas antes explicadas se buscó generar una calibración más aproximada a los resultados obtenidos.

A la luz de los resultados obtenidos se nota, la gran influencia que estos coeficientes de corrección tienen en el modelo y que es importante generar un método de calibración más acertado que abarque cada uno de los errores de las mediciones obtenidas en campo y que sopesa la información desconocida, como lo son los sistemas de drenaje y captación de aguas lluvias que dirigen.

a) INFLUENCIA DE LA ESCALA EN LOS MODELOS MATEMATICOS

En los últimos años, la comunidad científica se ha preocupado de manera específica en la influencia de la escala en los modelos matemáticos y su influencia específicamente en la ingeniería hidráulica, ya que se deben abordar dichos problemas con modelos elaborados en diferentes escalas significativamente más extensas (Barrios, M 2009).

En la investigación realizada por Pedraza, se evidencio claramente los grandes problemáticas existentes con respecto a la modelación hidrológica, ya que es sabido que la ecuaciones utilizadas para la modelación hidrológica e hidráulica están gobernadas por la ley de conservación de masa, momento y las ecuaciones de resistencia; sin embargo estas tienen la limitante que fueron desarrolladas para escalas pequeñas y en las aplicaciones prácticas los modelos utilizan escalas mayores (Aguilar, C 2006; Amancio, R 2007; Barrios, M 2009); por lo cual, es importante tomar en cuenta que numerosos trabajos se han reportado y se ha descubierto que aún no se han determinado relaciones de similitud que expresen la variación de parámetros efectivos en función de la escala (Amancio, R 2007).

Actualmente, todo proceso hidrológico presenta una serie de variaciones espaciales y temporales debido a diferentes factores, ya sean geoclimáticas, fisiográficas, etc. (Barrios, M 2009). En este trabajo de grado y por medio de la modelación realizada con un modelo de EPASWMM, modelación matemática directa y modelación estocástica como lo es el método de Montecarlo, debido a que cada una de estas modelaciones tienen factores completamente diferentes y posiblemente no son comparables; es importante aclarar que en este caso de estudio, se buscó que estos fueran mínimamente comparables, es decir; se tomaron como variables de corrección las mismas para los tres casos, generando así cuadros comparativos que nos permitió observar la eficiencia de los datos

obtenidos y de igual manera la incertidumbre implícita que estos tenían, debido a la poca información con la que alimentaron.

b) INCERTIDUMBRE Y FACTOR DE CORRECCIÓN

A partir de la obtención de datos y análisis de lo mismos, se generaron modelaciones básicas, es decir no incluían todos los parámetros de variabilidad que lograrán dar como respuesta la representación del sistema Humedal-Construido/Tanque-Regulador; lo que indica que el grado de incertidumbre en estos modelos es muy alto, pues factores de gran importancia para la descripción del sistema no fue incluida.

- Hipótesis A: si el modelo se hubiese alimentado con cada uno de los factores geoclimaticas adecuados, los sistemas de drenaje y cada uno de sus características propias; las calibraciones realizadas a partir de las tres metodologías anteriormente expuestas, pudieron representar los coeficientes de escorrentía reales de esta microcuenca en estudio.
- Hipótesis B: Debido a que los coeficientes de escorrentía son validaciones empíricas realizadas en laboratorios y en pequeñas áreas de estudio; es posible que los resultados obtenidos de las tres metodologías de modelación representen el comportamiento real de cada una de las subcuencas de captación debido a la pequeña área que estas poseían
- hipótesis C: Si el modelo se alimentara con toda la información adecuada y de una manera coherente, es imposible generar un análisis real, ya que el sistema tiene una corta edad y es necesario que este se estabilice, para así poder observar un comportamiento real de este novedoso sistema.

Con los escenarios planteados anteriormente, es posible decir que a partir de la obtención de datos y análisis de los mismos se pueden obtener parámetros que pueden permitir conocer mejor la influencia de cada una de dichas incógnitas, que favorecerán a la creación de mejores modelaciones y de esta forma permitir que los coeficientes de escorrentía que se buscan analizar sean más reales y no incluyan errores que eviten generar una metodología futura de obtención de coeficientes de escorrentía para sistemas con múltiples áreas de drenaje.

5 CONCLUSIONES

Este trabajo de grado estuvo encaminado a la descripción del comportamiento hidráulico del sistema Humedal-Construido/Tanque-Regulador con base en la caracterización hidrológica observada entre el 28 de Octubre y el 9 de Noviembre del 2013; dicha caracterización se logró a partir de la unificación de las mediciones de caudales e intensidades de lluvias adquiridas en campo; lo cual permitió establecer tiempos de retención y tiempos de concentración del sistema Humedal-Construido/Tanque-Regulador, y la verificación de los coeficientes de escorrentía y de descarga empleados para el diseño del sistema Humedal-Construido/Tanque-Regulador mediante modelos matemáticos y computacionales. Con lo cual se concluye:

Los tiempos de concentración en la subcuenca de la cubierta del parqueadero muestran una respuesta que varía con respecto a los tiempos secos anteriores, ya que a menor tiempo seco anterior mayor caudal de entrada se esperará en un menor tiempo; razón por la cual es posible concluir que es importante tener en cuenta los tiempos de concentración de las cuencas para el diseño de un sistema de captación de aguas lluvias con múltiples áreas de drenaje, puesto que este se puede ver afectado operacionalmente y disminuir su vida útil.

Los tiempos de retención en el Humedal-Construido encontrados para cada evento tienen un comportamiento variable que oscilan entre 4 minutos y 86 minutos, razón por la cual no es posible comprender la manera de operar del mismo, lo que implica que con este número de eventos tan limitado es imposible explicar la efectividad del sistema de tratamiento natural y su relación con la conductividad hidráulica. Sin embargo se observó que cuando el evento de lluvia tiene una larga duración es posible evidenciar que el Humedal-Construido posee un tiempo de retención mayor, lo que implica que el volumen almacenado es mayor que el de diseño, ya que supera el nivel de la grava lavada, es decir su comportamiento no corresponde a un humedal artificial con flujo subsuperficial y por ende se inunda el sistema de medición, ocasionando la pérdida de información útil para entender la relación existente entre un evento de lluvia y los tiempos de retención.

Con relación al vertedero 3 se puede concluir que a pesar de poder determinar el volumen y caudal de entrada occidental del sistema, la cual tiene un comportamiento semejante al observado en el Tanque-Regulador; es importante comprender que en los cálculos realizados no se tomaron en cuenta pérdidas en la entrada; las cuales pudieron haber permitido una mayor

confiabilidad en los valores resultantes y a su vez tener una mayor claridad en los tiempos de retención del sistema de drenaje y de transporte hacia el sistema Humedal-Construido/Tanque-regulador, que hubiese permitido obtener caudales esperados para diferentes intensidades de lluvia y así generar un modelo lluvia-escorrentía más detallado.

En la calibración de los coeficientes de descarga del vertedero 1 se observó que varía con respecto al coeficiente de diseño empleado y esa variación no es similar en cada uno de los eventos, por lo cual a pesar de que se necesita una corrección a los coeficientes de diseño no se pudo generar un intervalo más preciso para su formalización.

Los coeficientes de escorrentía encontrados una variación con respecto a los de diseño y por medio de la modelación computacional se pudo determinar que el caudal aportado por cada coeficiente (C_e diseño y C_e iterado) es similar y no representa una gran variación, teniendo en cuenta la poca información para la generación del modelo computacional. Sin embargo, al realizar una comparación entre los resultados obtenidos por el método de Montecarlo, las iteraciones realizadas empleando el modelo lluvia-escorrentía generado en el software EPASWMM y los coeficientes de diseño; se observó que en estos casos es evidente que los coeficientes de escorrentía promedios (iteraciones EPASWMM y Montecarlo) de zonas no permeables bajan su magnitud con respecto a los empleados para el diseño, en donde existe una disminución aproximadamente del 48 por ciento; mientras que los coeficientes de las zonas permeables promedios entre los obtenidos por el modelo de Montecarlo y la calibración inicial realizada aumentan su magnitud aproximadamente en un 50 por ciento. Estos resultados implican que las áreas de drenaje no permeables tendrán un tiempo mayor de retención de agua de escorrentía, mientras que las áreas permeables a portaran un caudal al sistema Humedal-Construido/Tanque-Regulador en menor tiempo; lo cual se refleja en que el volumen de entrada por la zona oriental será mayor que el que entra por la zona occidental, la cual no está diseñada para recibir eventos de grandes magnitudes de precipitación total sin evitar el daño al sistema.

Finalmente, se concluye que a pesar de que el modelo no fue calibrado de tal manera que hiciera una descripción total y fiel a las mediciones obtenidas, es importante tomar en cuenta el factor de incertidumbre que cada una de las mediciones y modelaciones tuvo, para poder generar modelaciones más finas y que permitan obtener información real de los coeficientes de escorrentía y descarga iterados y sea posible su análisis.

6 RECOMENDACIONES

En el presente trabajo de grado partió de la comparación entre los conceptos del método racional para la transformación de información de precipitación a caudal y los datos obtenidos por el sistema de medición en campo. De esta forma se realizó el análisis del comportamiento hidráulico del sistema Humedal-Construido/Tanque-Regulado y la verificación de los coeficientes de escorrentía y de descarga empleados para el diseño del sistema Humedal-Construido/Tanque-Regulador. Con lo anterior se encontraron variaciones en los coeficientes de diseño los cuales determinan el buen funcionamiento del Humedal-Construido/Tanque-Regulador diseñado, por lo cual se recomienda al grupo de investigación Ciencia e Ingeniería del Agua y el Ambiente, identificar las características del sistema de drenaje y un monitoreo de los sistemas de drenaje para generar una mejor modelación del sistema Humedal-Construido/Tanque-Regulador, para obtener una modelación más detallada, lo que permitirá profundizar en transporte de aguas lluvias a través de sistemas de drenajes adaptados para llevar agua a sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias.

Se observó que las medidas obtenidas por los sensores de nivel por ultrasonido ubicados a lo largo del sistema fueron afectadas por los eventos de lluvia que se presentaron en los meses de octubre y noviembre; de tal manera que se perdió información útil para poder hacer la descripción del sistema de una forma más precisa. Por lo cual se recomienda a la facultad de ingeniería generar un mejor sistema de protección para los medidores y de su sistema de cableado para asegurar la continuidad de las mediciones y evitar la pérdida de información y el retraso en la obtención de la misma, que favorecerá la línea de investigación desarrollada por el grupo de investigación Ciencia e Ingeniería del Agua y el Ambiente.

De igual forma se observó que para la entrada del vertedero 1 el coeficiente de descarga puede deber su variación a la cercanía existente al sistema de alimentación (tubos de entrada oriental), se recomienda la generación de obras hidráulicas que ayuden al aquietamiento o reducción de la velocidad del caudal de entrada al sistema Humedal-Construido/Tanque-Regulador, evitando así, daños al sistema de medición; en donde es importante la reubicación del medidor 1, el cual a pesar de no presentar fallos en las mediciones realizadas

se encuentra muy cerca al sistema de alimentación, lo que implica que las mediciones puedan contar con algún tipo de error.

Según los resultados observados y la experiencia que se tuvo en campo, se recomienda generar un manual de operación y mantenimiento adecuado a las condiciones del sistema Humedal-Construido/Tanque-Regulador; ya que la acumulación de sedimentos y materiales orgánicos pueden ocasionar variaciones y cambios en el comportamiento esperado por los desarenadores y el Tanque-Regulador, ya que estos pueden afectar la calidad de agua almacenada por el Tanque-Regulador que será utilizada para el riego y lavado de fachadas y pisos, generando problemas de saturación o taponamiento en el sistema de riego.

A partir de las modelaciones matemáticas realizadas se observó que los coeficientes de escorrentía poseen un comportamiento muy cercano a los de diseño, sin embargo, es importante realizar más comprobaciones a partir de los datos medidos en campo, pues se considera que estos eventos medidos no representan el comportamiento real del sistema Humedal-Construido/Tanque-Regulador y por ende se puede entrar a subestimar o sobreestimar la calibración realizada del modelo desarrollado en el software EPA-SWMM.

A la luz de los resultados obtenidos por el método de Montecarlo, se recomienda implementar coeficientes de escorrentía para zonas permeables entre un rango de 0.59 a 0.64 y para zonas no permeables en un rango entre 0.43 y 0.5 para lograr una mejor calibración del sistema Humedal-Construido/Tanque-Regulador en el modelo de EPASWMM.

7 BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, C. 2006. "Efectos de La Escale En Procesos Hidrologicos, Aplicacion a La Cuenca Rio Guadalfeo". Universidad de Cordoba.
- Amancio, R. 2007. "Efectos de Escala Sobre La Simulación Del Flujo de Agua Superficial En Áreas Urbanas Usando Modelos Basados En La Onda Cinemática". Cordoba, Argentina: Universidad nacional de Cordoba.
- Barrios, M. 2009. "Análisis de Escalabilidad Espacial Para Un Modelo Conceptual de Producción de Escorrentía". Valencia: Universidad politecnica de Valencia.
- C A Booth, R Attwater, C Derry, and B Simmons. 2003. "The Hawkesbury Water Reuse Scheme." *Water Reuse*: 28–30.
- Campisano, Alberto, and Carlo Modica. 2012. "Optimal Sizing of Storage Tanks for Domestic Rainwater Harvesting in Sicily." *Resources, Conservation and Recycling* 63 (0): 9–16. doi:10.1016/j.resconrec.2012.03.007.
- Chow, Ven Te. 1994. *Hidrología Aplicada*. <http://www.scribd.com/doc/33259919/Ven-Te-Chow-Hidraulica-de-Canales-Abiertos>.
- Fewkes, A., and P. Wam. 2000. "Method of Modelling the Performance of Rainwater Collection Systems in the United Kingdom." *Building Services Engineering Research and Technology* 21 (4): 257–65. doi:10.1177/014362440002100408.
- Galarza M S, and Torres A. 2013. "SIMPLIFIED METHOD FOR RAINWATER HARVESTING TANK SIZING USING LONG DAY-RESOLUTION RAINFALL TIME SERIES / Méthode Simplifiée de Dimensionnement Des Réservoirs Pour La Réutilisation Des Eaux Pluviales à Partir de Séries de Pluies Prolongées à Résolution Journalière." *Evento: Novatech 2013, 8th International Conference on Planning and Technologies for Sustainable Urban Water Management, June 23rd to 27th, 2013 ¿ Lyon, France*.
- Galarza M., Sandra L. 2011. "Desarrollo de Una Herramienta de Análisis Multi-criterio Para El Soporte de Toma de Decisiones En El Aprovechamiento de Aguas Lluvias En El Campus de La Pontificia Universidad Javeriana, Sede Bogotá". Tesis maestría, Bogotá D.C: Pontificia Universidad Javeriana.
- GALARZA, SANDRA LORENA, STEPHANIE LEON, ANDRES TORRES, SANDRA MENDEZ, and JAIME ANDRES LARA LARA. 2013. "Constructed-wetland/reservoir-tank System Used for Rainwater Harvesting in an Experimental Catchment." *En: Colombia. 2013. Evento: Seminario Internacional UrbanGreen, 16 a 17 de Mayo de 2013, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá*.
- Ghisi, Eneid, Davi da Fonseca Tavares, and Vinicius Luis Rocha. 2009. "Rainwater Harvesting in Petrol Stations in Brasília: Potential for Potable Water Savings and Investment Feasibility Analysis." *Resources, Conservation and Recycling* 54 (2): 79–85. doi:10.1016/j.resconrec.2009.06.010.
-

-
- Gires, Auguste, and Bernard de Gouvello. 2009. "Consequences to Water Suppliers of Collecting Rainwater on Housing Estates." *Water Science and Technology: a Journal of the International Association on Water Pollution Research* 60 (3): 543–53. doi:10.2166/wst.2009.361.
- Imteaz, Monzur Alam, Omotayo B. Adeboye, Scott Rayburg, and Abdallah Shanableh. 2012. "Rainwater Harvesting Potential for Southwest Nigeria Using Daily Water Balance Model." *Resources, Conservation and Recycling* 62 (0): 51–55. doi:10.1016/j.resconrec.2012.02.007.
- Imteaz, Monzur Alam, Aatur Rahman, and Amimul Ahsan. 2012. "Reliability Analysis of Rainwater Tanks: A Comparison Between South-East and Central Melbourne." *Resources, Conservation and Recycling* 66 (0): 1–7. doi:10.1016/j.resconrec.2012.05.009.
- Indeportes Antioquia. 2010. *Guía Cancha de Fútbol*. 2da. Edición. Mede, Colombia.
- Lara B, Jaime, Andrés Torres A, María C Campos P, Leonardo Duarte C, Jairo I Echeverri R, and Paula A Villegas G. 2007. "Aprovechamiento Del Agua Lluvia Para Riego y Lavado de Zonas Duras y Fachadas En El Campus de La Pontificia Universidad Javeriana (Bogotá)." *Ingeniería y Universidad* 11 (2): 193–202.
- Lara B., Jaime A. 1999. "Depuración de Aguas Residuales Municipales Con Humedales Artificiales". Tesis maestría, Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Mitchell, V G, A Deletic, T D Fletcher, B E Hatt, and D T McCarthy. 2007. "Achieving Multiple Benefits from Stormwater Harvesting." *Water Science and Technology: a Journal of the International Association on Water Pollution Research* 55 (4): 135–44.
- Montoya Araujo, F, and G Suárez Esparragoza. 1987. "Diseño de Un Sistema de Recolección y Almacenamiento de Aguas Lluvias Para La Población de Moñitos-Córdoba". Trabajo de grado, Bogota, Colombia: Universidad de Los Andes.
- Monzon S, Robajo S, and Hernandez A. 2012. "PROYECTO DE CONSTRUCCION DE LA ESTRUCTURA DE SOPORTE PARA LA IMPLEMENTACION DEL PROYECTO PILOTO TECHOS VERDES (proyecto PSU)."
- Palacio C, Natalia. 2010. "Propuesta de Un Sistema de Aprovechamiento de Agua Lluvia, Como Alternativa Para El Ahorro de Agua Potable, En La Institución Educativa María Auxiliadora de Caldas, Antioquia". Monografía, Medellín: Universidad de Antioquia.
- Pérez Murillo, Gabriel. 2013. "Implementación de un modelo físico para el análisis de retención de agua lluvia en techos verdes modulares" presented at the Seminario Internacional: Urbangreen, May 17, Pontificia Universidad Javeriana.
- Prada Sarmiento L. 2013. "Diseño Basado En Confiabilidad (Notas de Clase Geotecnia Aplicada(1551))."
- Rodriguez M. 2013. "Entrega 2. Proyecto Especial de Techos Verdes."
-

-
-
- Torres, Andrés, Sandra Méndez F, Jaime Lara B, Jorge L Estupiñan P, Héctor O Ovidio Z, and Óscar M Torres M. 2012. "Hacia Equipamientos Urbanos Sostenibles: Aprovechamiento de Aguas Lluvias En El Campus de La Pontificia Universidad Javeriana En Bogotá." *Cuadernos de Vivienda y Urbanismo* 5 (9): 124–41.
- US EPA, ORD National Risk Management Research Laboratory. 2013. "US EPA Risk Management Research". Announcements & Schedules. <http://www.epa.gov/nrmrl/wswrd/wq/models/swmm/#Description>.
- Ward, S, D Butler, S Barr, and F A Memon. 2009. "A Framework for Supporting Rainwater Harvesting in the UK." *Water Science and Technology: a Journal of the International Association on Water Pollution Research* 60 (10): 2629–36. doi:10.2166/wst.2009.655.
- White, I. 2010. "Rainwater Harvesting: Theorising and Modelling Issues That Influence Household Adoption." *Water Science and Technology: a Journal of the International Association on Water Pollution Research* 62 (2): 370–77. doi:10.2166/wst.2010.891.
- Yuen, E, M Anda, K Mathew, and G Ho. 2001. "Water Harvesting Techniques for Small Communities in Arid Areas." *Water Science and Technology: a Journal of the International Association on Water Pollution Research* 44 (6): 189–94.
- Zhou, Yong-chao, Wei-yun Shao, and Tu-qiao Zhang. 2010. "Analysis of a Rainwater Harvesting System for Domestic Water Supply in Zhoushan, China." *Journal of Zhejiang University SCIENCE A* 11 (5): 342–48. doi:10.1631/jzus.A0900608.
-
-

ANEXO 2

CARTA DE AUTORIZACIÓN DE LOS AUTORES
(Licencia de uso)

Bogotá, D.C., 27 de Enero de 2014

Señores
Biblioteca Alfonso Borrero Cabal S.J.
Pontificia Universidad Javeriana
Ciudad

Los suscritos:

Stephanie León Bernal , con C.C. No 1018446272
Jorge Enrique Medina Otero , con C.C. No 1020739000
_____, con C.C. No _____

En mi (nuestra) calidad de autor (es) exclusivo (s) de la obra titulada:

Comportamiento hidráulico de un sistema Humedal-construido/ Tanque-regulador para
Aprovechamiento de aguas lluvias en el campus de la Pontificia Universidad Javeriana sede
Bogotá (por favor señale con una "x" las opciones que apliquen)

Tesis doctoral Trabajo de grado Premio o distinción: Si No

cual: _____
presentado y aprobado en el año 2014 , por medio del presente escrito autorizo
(autorizamos) a la Pontificia Universidad Javeriana para que, en desarrollo de la presente licencia
de uso parcial, pueda ejercer sobre mi (nuestra) obra las atribuciones que se indican a
continuación, teniendo en cuenta que en cualquier caso, la finalidad perseguida será facilitar,
difundir y promover el aprendizaje, la enseñanza y la investigación.

En consecuencia, las atribuciones de usos temporales y parciales que por virtud de la presente
licencia se autorizan a la Pontificia Universidad Javeriana, a los usuarios de la Biblioteca Alfonso
Borrero Cabal S.J., así como a los usuarios de las redes, bases de datos y demás sitios web con los
que la Universidad tenga perfeccionado un convenio, son:

AUTORIZO (AUTORIZAMOS)	SI	NO
1. La conservación de los ejemplares necesarios en la sala de tesis y trabajos de grado de la Biblioteca.	x	
2. La consulta física (sólo en las instalaciones de la Biblioteca)	x	
3. La consulta electrónica - on line (a través del catálogo Biblos y el Repositorio Institucional)	x	
4. La reproducción por cualquier formato conocido o por conocer	x	
5. La comunicación pública por cualquier procedimiento o medio físico o electrónico, así como su puesta a disposición en Internet	x	
6. La inclusión en bases de datos y en sitios web sean éstos onerosos o gratuitos, existiendo con ellos previo convenio perfeccionado con la Pontificia Universidad Javeriana para efectos de satisfacer los fines previstos. En este evento, tales sitios y sus usuarios tendrán las mismas facultades que las aquí concedidas con las mismas limitaciones y condiciones	x	

De acuerdo con la naturaleza del uso concedido, la presente licencia parcial se otorga a título gratuito por el máximo tiempo legal colombiano, con el propósito de que en dicho lapso mi (nuestra) obra sea explotada en las condiciones aquí estipuladas y para los fines indicados, respetando siempre la titularidad de los derechos patrimoniales y morales correspondientes, de

acuerdo con los usos honrados, de manera proporcional y justificada a la finalidad perseguida, sin ánimo de lucro ni de comercialización.

De manera complementaria, garantizo (garantizamos) en mi (nuestra) calidad de estudiante (s) y por ende autor (es) exclusivo (s), que la Tesis o Trabajo de Grado en cuestión, es producto de mi (nuestra) plena autoría, de mi (nuestro) esfuerzo personal intelectual, como consecuencia de mi (nuestra) creación original particular y, por tanto, soy (somos) el (los) único (s) titular (es) de la misma. Además, aseguro (aseguramos) que no contiene citas, ni transcripciones de otras obras protegidas, por fuera de los límites autorizados por la ley, según los usos honrados, y en proporción a los fines previstos; ni tampoco contempla declaraciones difamatorias contra terceros; respetando el derecho a la imagen, intimidad, buen nombre y demás derechos constitucionales. Adicionalmente, manifiesto (manifestamos) que no se incluyeron expresiones contrarias al orden público ni a las buenas costumbres. En consecuencia, la responsabilidad directa en la elaboración, presentación, investigación y, en general, contenidos de la Tesis o Trabajo de Grado es de mí (nuestro) competencia exclusiva, eximiendo de toda responsabilidad a la Pontificia Universidad Javeriana por tales aspectos.

Sin perjuicio de los usos y atribuciones otorgadas en virtud de este documento, continuaré (continuaremos) conservando los correspondientes derechos patrimoniales sin modificación o restricción alguna, puesto que de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación de los derechos patrimoniales derivados del régimen del Derecho de Autor.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, "Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores", los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables. En consecuencia, la Pontificia Universidad Javeriana está en la obligación de RESPETARLOS Y HACERLOS RESPETAR, para lo cual tomará las medidas correspondientes para garantizar su observancia.

NOTA: Información Confidencial:

Esta Tesis o Trabajo de Grado contiene información privilegiada, estratégica, secreta, confidencial y demás similar, o hace parte de una investigación que se adelanta y cuyos resultados finales no se han publicado. Si No

En caso afirmativo expresamente indicaré (indicaremos), en carta adjunta, tal situación con el fin de que se mantenga la restricción de acceso.

NOMBRE COMPLETO	No. del documento de identidad	FIRMA
Stephanie León Bernal	1018446272	Stephanie León B.
Jorge Enrique Medina	1020739000	Jorge Enrique Medina

FACULTAD: Facultad de Ingeniería

PROGRAMA ACADÉMICO: Ingeniería Civil

TÍTULO COMPLETO DE LA TESIS DOCTORAL O TRABAJO DE GRADO

Comportamiento hidráulico de un sistema Humedal-Constructivo/Tanque-Regulador para aprovechamiento de aguas lluvias en el campus de la Pontificia Universidad Javeriana sede Bogotá
SUBTÍTULO, SI LO TIENE

AUTOR O AUTORES

Apellidos Completos	Nombres Completos
León Bernal	Stephanie
Medina Otero	Jorge Enrique

DIRECTOR (ES) TESIS O DEL TRABAJO DE GRADO

Apellidos Completos	Nombres Completos
Torres Abello	Andrés Eduardo

FACULTAD

Facultad de Ingeniería

PROGRAMA ACADÉMICO

Tipo de programa (seleccione con "x")

Pregrado	Especialización	Maestría	Doctorado
X			

Nombre del programa académico

Ingeniería Civil

Nombres y apellidos del director del programa académico

María Patricia León Neira

TRABAJO PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

Ingeniero Civil

PREMIO O DISTINCIÓN (En caso de ser LAUREADAS o tener una mención especial):

CIUDAD	AÑO DE PRESENTACIÓN DE LA TESIS O DEL TRABAJO DE GRADO	NÚMERO DE PÁGINAS
Bogotá	2014	98

TIPO DE ILUSTRACIONES (seleccione con "x")

Dibujos	Pinturas	Tablas, gráficos y diagramas	Planos	Mapas	Fotografías	Partituras
X		X	X		X	

SOFTWARE REQUERIDO O ESPECIALIZADO PARA LA LECTURA DEL DOCUMENTO

Nota: En caso de que el software (programa especializado requerido) no se encuentre licenciado por la Universidad a través de la Biblioteca (previa consulta al estudiante), el texto de la Tesis o Trabajo de Grado quedará solamente en formato PDF.

MATERIAL ACOMPAÑANTE					
TIPO	DURACIÓN (minutos)	CANTIDAD	FORMATO		
			CD	DVD	Otro ¿Cuál?
Vídeo					
Audio					
Multimedia					
Producción electrónica		1	x		
Otro Cuál?					
DESCRIPTORES O PALABRAS CLAVE EN ESPAÑOL E INGLÉS					
Son los términos que definen los temas que identifican el contenido. <i>(En caso de duda para designar estos descriptores, se recomienda consultar con la Sección de Desarrollo de Colecciones de la Biblioteca Alfonso Borrero Cabal S.J en el correo biblioteca@javeriana.edu.co, donde se les orientará).</i>					
ESPAÑOL			INGLÉS		
Aprovechamiento de aguas lluvias			Rainwater harvesting		
SUDS (Sistemas urbanos de drenajes sostenibles)			SUDS (Sustainable urban drainage systems)		
Aguas lluvias			Rainwater/ Stormwater		
Humedales Construidos			Constructed Wetlands		
Operación de humedales construidos			Operation of constructed wetlands		
RESUMEN DEL CONTENIDO EN ESPAÑOL E INGLÉS					
(Máximo 250 palabras - 1530 caracteres)					
<p>El aprovechamiento de aguas lluvias es un concepto que en los últimos años ha incrementado su popularidad, no solo por la rentabilidad económica que estas técnicas brindan a los usuarios, sino por la concientización masiva naciente en el planeta sobre la conservación de los recursos hídricos (C A Booth et al. 2003); por lo cual, es importante comprender que el agua captada tiene múltiples usos y beneficios enfocados a la conservación del medio ambiente y al mejoramiento de la salud pública, ayudando a la rehabilitación de suelos, paisajismo y como fuente alternativa de agua potable. Este artículo presenta una descripción del comportamiento hidráulico de un sistema Humedal-Construido/Tanque-Regulador utilizado como componente del sistema de aprovechamiento de aguas lluvias de la PUJB, en el cual se buscó hacer la caracterización del funcionamiento hidráulico del sistema antes mencionado durante un evento de lluvia; lo que permitió realizar la verificación de principios de diseño hidrológico e hidráulico del sistema a la luz de los resultados medidos en campo, empleando como variable de calibración los coeficientes de escorrentía y de descarga para generar un modelo lluvia-escorrentía teórico; con el cual fue posible hacer una comparación y una optimización del mismo. Los resultados sugieren que las variaciones del método de calibración no influyen en los resultados obtenidos, pero permiten ver la importancia de la calibración del modelo planteado para futuros estudios.</p>					
<p>In the last years a new attitude towards the rainwater usage is becoming more frequently, not only for the economic benefits this technique brings to the users but the new growing mass awareness about the conservation of water resources (C A Booth et al. 2003); whereby, is important to understand that the collected waters have different kind of uses and benefits all of</p>					

them focused to the environmental conservation and the improvement of public health, helping the soil improvement, landscaping and as an alternative source of potable water. This paper describes the hydraulic behavior of a Constructed- wetland/Reservoir- tank used as a component of the rainwater collection system from PUJB during a raining event; allowing verification of hydrologic and hydraulic principles of this system in accordance with the gotten field results, using as calibration variable, all the runoff and discharge coefficients in order to create a rain-runoff theorist model; with these results a comparison and optimization of this model was made. The results, suggest that the variations of the calibration method do not affect the gotten results. Also, it let us understand how important is the calibration of the working model for the next researches.
