

DISEÑO DE UN SISTEMA URBANO DE DRENAJE SOSTENIBLE PARA EL APROVECHAMIENTO DE LAS AGUAS
LLUVIAS EN EL CAMPUS DE LA PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA CALI

GRACE MILAGROS ROJAS GERALDINO

Nota de Aceptación

Certificamos que el presente Trabajo de Grado
Satisface, en alcances y calidad, todos los requisitos
Que demanda un Trabajo de Grado de Maestría.

JOSÉ LUIS RAMÍREZ
Director

CESAR CAMILO CAÑÓN
Jurado

RAFAEL CLEMENT
Jurado

Aprobado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la
Pontificia Universidad Javeriana Cali, para optar el título de
Magister en Ingeniería Civil.

HERNÁN CAMILO ROCHA NIÑO Ph. D.
Decano Facultad de Ingeniería y Ciencias

JUAN CARLOS MARTÍNEZ ARIAS
Director Posgrados de Ingeniería y Ciencias

Santiago de Cali, 24 de diciembre de 2020

Acta de Correcciones al Documento de Trabajo de Grado

Santiago de Cali, diciembre 24 de 2020

Autor: Grace Milagros Rojas Geraldino

Título del Trabajo de Grado: “DISEÑO DE UN SISTEMA URBANO DE DRENAJE SOSTENIBLE PARA EL APROVECHAMIENTO DE LAS AGUAS LLUVIAS EN EL CAMPUS DE LA PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA CALI”

Director: PhD. José Luis Ramírez

Como indica el artículo 2.13 de las Directrices para Trabajo de Grado de Maestría, he verificado que el estudiante indicado arriba ha implementado todas las correcciones que los Jurados del Proyecto de Trabajo de Grado definieron que se efectuaran, como consta en el Acta de Evaluación correspondiente.



Firma del Director del Trabajo de Grado



Pontificia Universidad
JAVERIANA
Cali

Maestría en Ingeniería
Facultad de Ingeniería y Ciencias

DATOS DEL ESTUDIANTE
ANTEPROYECTO DE TRABAJO DE GRADO DE MAESTRÍA

1. NOMBRE COMPETO: Grace Milagros Rojas Geraldino
2. DIRECCIÓN: Avenida El Lago Calle La Fontana Entrelagos 802-1
3. TELÉFONO DE CONTACTO: 3168312975
4. CORREO ELECTRÓNICO: grace.rojas@javerianacali.edu.co, gracerojasg@hotmail.com
5. PROFESIÓN: Ingeniera Civil
6. EGRESADA DE: Universidad del Norte
7. EMPRESA DONDE LABORA: OVAC Grupo Consultor SAS
8. CARGO: Project Manager



Pontificia Universidad
JAVERIANA
Cali

Maestría en Ingeniería
Facultad de Ingeniería y Ciencias

FICHA RESUMEN
TRABAJO DE GRADO DE MAESTRÍA

TITULO: “Diseño de un sistema urbano de drenaje sostenible para el aprovechamiento de las aguas lluvias en el campus de la Pontificia Universidad Javeriana Cali”

1. ÉNFASIS: Ingeniería Construcción
2. ÁREA DE INVESTIGACIÓN: Recursos hídricos
3. ESTUDIANTE Grace Milagros Rojas Geraldino
4. CORREO ELECTRÓNICO: grace.rojas@javerianacali.edu.co
5. DIRECTOR: Jose Luis Ramirez Duque
6. CO-DIRECTOR(ES): Sandra Lorena Galarza Molina
7. GRUPO QUE LO AVALA: _____
8. OTROS GRUPOS: _____

9. PALABRAS CLAVE: aprovechamiento aguas lluvias, sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS), análisis multicriterio
10. CÓDIGOS UNESCO CIENCIA Y TECNOLOGÍA: 3305.06, 3305.30,3308.06
11. FECHA DE INICIO: 24 de Febrero de 2020 DURACIÓN ESTIMADA: 6 Meses
12. RESUMEN (máximo una página).



DISEÑO DE UN SISTEMA URBANO DE DRENAJE SOSTENIBLE PARA EL
APROVECHAMIENTO DE LAS AGUAS LLUVIAS EN EL CAMPUS DE LA PONTIFICIA
UNIVERSIDAD JAVERIANA CALI

POR:

GRACE MILAGROS ROJAS GERALDINO

PROYECTO DE TRABAJO DE GRADO
PARA OPTAR AL TÍTULO DE MAGISTER EN INGENIERIA CIVIL

DIRECTOR:

PhD. JOSÉ LUIS RAMIREZ

CODIRECTOR:

PhD. SANDRA LORENA GALARZA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS

SANTIAGO DE CALI

2020

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	10
2.	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	12
3.	OBJETIVOS.....	16
3.1	Objetivo General.....	16
3.2	Objetivos Específicos	16
4.	JUSTIFICACION.....	17
5.	MARCO TEÓRICO	18
5.1	Marco Normativo Colombiano.....	18
5.2	Estrategias para la Gestión de las aguas Pluviales.....	19
5.3	Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS).....	19
5.3.1	Pavimentos Permeables.....	28
5.3.2	Techos Verdes.....	29
5.3.3	Trincheras de Retención/Zanjas de infiltración.....	31
5.3.4	Tanque de Almacenamiento.....	32
5.3.5	Humedales Construidos.....	32
5.3.6	Humedales Construidos de Flujo Subsuperficial.....	34
5.3.7	Humedales Construidos de Flujo Superficial.....	34
5.4	Cálculo de la Escorrentía	37
5.4.1	Método Racional.....	37
5.4.2	Relaciones Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF).....	38
5.5	Cálculo demanda de caudales del sistema de aprovechamiento de aguas lluvias ..	39
5.5.1	Método Racional o Español.....	39
5.5.2	Método Hunter (NTC 1500).....	39
5.5.3	Método Hunter UNAL.....	41
5.5.4	Metodología LEED® (Leadership in Energy and Environmental Design) ..	41
6.	METODOLOGÍA.....	44

6.1.1	Selección del sitio de Estudio.....	47
6.1.2	Determinación Consumo de Agua.....	50
6.1.3	Población de Estudio.....	50
6.1.4	Demanda doméstica de agua.....	51
6.1.5	Cálculo de demanda de agua a reemplazar por agua lluvia.....	51
6.1.6	Cálculo de caudal máximo probable.....	55
6.1.7	Cálculo Consumo de agua.....	58
6.1.8	Cálculo por Metodología LEED®.....	58
6.1.9	Determinación de la oferta de agua lluvia.....	60
6.1.10	Superficie de Captación.....	63
6.1.11	Recolección y Conducción.....	64
6.1.12	Almacenamiento y Red de distribución de aguas lluvias.....	64
6.1.13	Balance Hídrico.....	65
6.1.14	Análisis de Calidad del Agua.....	75
6.1.15	Selección de Tipologías de SUDS.....	78
6.2	DISEÑO DE LA ALTERNATIVA SELECCIONADA.....	91
6.2.1	Descripción del sistema de aprovechamiento de aguas lluvias.....	91
6.2.2	Material y Diámetro de Tuberías.....	93
6.2.3	Pérdidas en Accesorios.....	96
6.2.4	Ruta Crítica red de distribución.....	96
6.2.5	Equipo de Presión.....	96
6.2.6	Estructuras preliminares al Sistema.....	100
6.2.7	Presupuesto.....	112
6.2.8	Viabilidad Económica del diseño.....	112
7.	CONCLUSIONES.....	118
8.	RECOMENDACIONES.....	123
9.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	124
10.	ANEXOS.....	134

TABLAS

Tabla 1. Identificación de los usos del agua en la Pontificia Universidad Javeriana Seccional Cali (Quintero, 2018).	13
Tabla 2. Capacidad de las diferentes técnicas SuDs. (Adaptada de: Woods Ballard et al., 2015).	27
Tabla 3. Usos de accesorios predeterminados por tipo de ocupación por día. Tomado de (U.S. Green Building Council, Inc., n.d.-b).	42
Tabla 4. Períodos de estudio para el cálculo de la población.	53
Tabla 5. Distribución Poblacional Cafeterías Edificio Almendros.	54
Tabla 6. Inventario de Aparatos sanitarios Edificio Almendros.	56
Tabla 7. Comparación resultados de Caudal Máximo Probable (Qp) en (l/s) por los Métodos Racional, Hunter Modificado (NTC 1500) y Hunter UNAL.	57
Tabla 8. Cálculo para determinar Demanda Acumulada (Dai), Oferta Acumulada (Aai), Volumen de Almacenamiento (Vi) y Porcentaje de potencial de ahorro de agua potable (PPWS).	71
Tabla 9. Cálculo para determinar Demanda Acumulada (Dai), Oferta Acumulada (Aai), Volumen de Almacenamiento (Vi) y Porcentaje de potencial de ahorro de agua potable (PPWS) considerando pérdidas en la oferta.	72
Tabla 10. Volumen de Exceso o faltante en (m ³) e Índice de Precipitación por mes.	75
Tabla 11. Dimensiones Tanque de Almacenamiento.	75
Tabla 12. Análisis de muestras tomadas a la atmósfera y en cubiertas en el campus Universidad del Valle, sede Meléndez. Adaptado de (Valentina Feijoo Moreno & Andrés David Perea Agredo, 2014).	77
Tabla 13. Parámetros de calidad de agua lluvia para usos no potables. Adaptada de (Valentina Feijoo Moreno & Andrés David Perea Agredo, 2014).	78
Tabla 14. Calificación de tipologías según eficiencia en la remoción de contaminantes. Modificado de (Geosyntec Consultants, 2013).	82
Tabla 15. Calificación tipologías según eficiencia de reducción de volumen escorrentía.	83
Tabla 16. Calificación tipologías según contribución a la amenidad.	84
Tabla 17. Calificación tipologías según conflictos de uso.	85
Tabla 18. Matriz de evaluación de tipologías seleccionadas según contribución a la amenidad y conflictos de uso.	86
Tabla 19. Tipos actividades de mantenimiento para las tipologías de SUDS (Woods Ballard et al., 2015).	86
Tabla 20. Matriz resumen de las actividades generales de mantenimiento para las tipologías de SUDS. Adaptado de (Woods Ballard et al., 2015).	87
Tabla 21. Calificación de tipologías según frecuencia de mantenimiento. Adaptada de (Centro de Investigación en Ingeniería Ambiental CIIA, 2017).	88
Tabla 22. Calificación tipologías según costos. Adaptada de (Centro de Investigación en Ingeniería Ambiental CIIA, 2017).	89
Tabla 23. Matriz final de selección de tipologías.	90
Tabla 24. Puntajes asignados según el desempeño de cada tipología de SUDS para todos los procesos. Adaptado de (Centro de Investigación en Ingeniería Ambiental CIIA, 2017).	91

Tabla 25. Unidades de Hunter por equipos sanitarios y para aseo del Edificio Almendros.	94
Tabla 26. Determinación de la Altura Dinámica Total.	97
Tabla 27. Ruta crítica Red de distribución Edificio Almendros.	99
Tabla 28. Dimensiones Aliviadero de Vertedero Transversal.	101
Tabla 29. Comparación entre los sistemas de flujo de los humedales. Adaptado de (Delgadillo et al., n.d.).	102
Tabla 30. Parámetros de diseño humedal subsuperficial de flujo horizontal (Delgadillo et al., n.d.).	104
Tabla 31. Lámina de agua requerida para el volumen de primer lavado según diferentes fuentes. Adaptado de (Valentina Feijoo Moreno & Andrés David Perea Agredo, 2014).	105
Tabla 32. Ingresos por ahorros en el consumo de agua Edificio Almendros PUJ Cali.	113
Tabla 33. Análisis Financiero para la construcción de un sistema Humedal Construido/Tanque de almacenamiento para el Edificio Almendros en la PUJ Cali.	115
Tabla 34. Comparación Resultados Análisis Financiero para Escenario 2 y Escenario 3.	114
Tabla 35. Comparación Resultados Análisis Financiero por escenarios con facturación EMCALI E.I.C.E.ESP.	114

ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1.</i> Capas en techos verdes. (Tomado de www.hidrosym.cl)	29
<i>Ilustración 2.</i> Sección transversal de trinchera de retención (Adaptado de Vermont Stormwater Management Manual 1, 2002)	31
<i>Ilustración 3.</i> Principales componentes y procesos depurativos en humedales artificiales. Adaptado de (Luna Pabello & Aburto Castañeda, 2014).	33
<i>Ilustración 4.</i> Humedal de flujo sub-superficial. Adaptado de Foidl, 1999.	34
<i>Ilustración 5.</i> Humedad de flujo superficial. Adaptada de Foidl, 1999.	35
<i>Ilustración 6.</i> Clasificación de humedales artificiales con macrófitas. Adaptado de (Delgadillo et al., n.d.).	36
<i>Ilustración 7.</i> Tipos de macrófitas. Tomado de (Pérez López, 2009).	36
<i>Ilustración 8.</i> Curvas intensidad-duración-frecuencia para lluvia máxima en Chicago, Estados Unidos (Chow et al., 2000).	38
<i>Ilustración 9.</i> Curva de Demanda – Gráfica de Hunter Modificado. Tomado de (Castro et al., 2006).	40
<i>Ilustración 10.</i> Método Hunter UNAL. Tomado de (Alex Javier, 2014).	41
<i>Ilustración 11.</i> Flujograma de la metodología empleada.	46
<i>Ilustración 12.</i> Propuesta metodológica Fase Descriptiva. Adaptada de (Muñoz Triviño, 2016).	47
<i>Ilustración 13.</i> Caracterización consumo de agua en el Edificio Almendros. Tomado de (Valencia, 2011).	49
<i>Ilustración 14.</i> Selección Ubicación SUDS. Tomado de Plano General EIR 2-11 de la Pontificia Universidad Javeriana Cali	50
<i>Ilustración 15.</i> Total de estudiantes de Pregrado y Posgrado en el Edificio Almendros en los periodos 2016 - 2019.	53
<i>Ilustración 16.</i> Cantidad Total de personas en el Edificio Almendros en los periodos 2016-2019.	55

<i>Ilustración 17.</i> Comparación de los métodos para la determinación del caudal máximo probable en el Edificio Almendros.	57
<i>Ilustración 18.</i> Consumo Total diario por uso de aparatos sanitarios por empleados y estudiantes en el Edificio Almendros en los períodos 2016-2019.	59
<i>Ilustración 19.</i> Consumo Máximo, Mínimo y Promedio Mensual por usos sanitarios y de limpieza desde 2016 hasta 2019.	60
<i>Ilustración 20.</i> Precipitación Máxima mensual en 24 horas desde 1994 hasta 2019.	61
<i>Ilustración 21.</i> Oferta hídrica mínima, promedio y máxima mensual desde 1994 hasta 2019.	62
<i>Ilustración 22.</i> Área de cubierta efectiva para captación Edificio Almendros. Tomada de Plano General EIR 2-11 de la Pontificia Universidad Javeriana Cali	63
<i>Ilustración 23.</i> Ubicación tragantes y bajante en cubierta Edificio Almendros. Tomada de Plano General EIR 2-11 de la Pontificia Universidad Javeriana Cali	64
<i>Ilustración 24.</i> Promedio Oferta de Agua lluvia mensual (m ³) en los últimos 26 años.	66
<i>Ilustración 25.</i> Comportamiento de la Oferta y la Demanda de usos sanitarios Mensual Multianual.	67
<i>Ilustración 26.</i> Volúmenes de almacenamiento acumulado en (m ³) para los meses de los años analizados.	73
<i>Ilustración 27.</i> Potencial de ahorro en agua potable en el Edificio Almendros.	74
<i>Ilustración 28.</i> Configuración del sistema de aprovechamiento de agua lluvia. Adaptado de (Pinzon et al., 2016).	93
<i>Ilustración 29.</i> Cyperus papyrus (papiro). Tomado de TurboSquid, 2015.	103
<i>Ilustración 30.</i> Zonas típicas de un humedal de flujo subsuperficial. Tomado de (U.S. EPA, 2000).	109
<i>Ilustración 31.</i> Componentes del Diseño de SUDS. 1. Vista Aliviadero, Caja Electroválvula, Humedal/Tanque almacenamiento y caseta de bombas. 2. Sección Longitudinal Aliviadero, Caja Electroválvula, Humedal/Tanque almacenamiento y caseta de bombas. 3. Sección transversal Humedal/Tanque almacenamiento y caseta de bombas.	111
<i>Ilustración 32.</i> Diagrama de Conexión Propuesta Aprovechamiento aguas lluvias Edificio Almendros.	112

ANEXOS

Anexo 1. Caudal Máximo Probable Método Hunter para Colombia. Tomado de (Castro et al., 2006).	134
Anexo 2. Caudales Mínimos Método Racional. Tomado de Gallizio, en Roca y Carratala 2002	135
Anexo 3. Consumo Total Edificio Almendros (Litros por día) para Usos sanitarios y lavado de pisos	135
Anexo 4. Plano General EIR 2-11 de la Pontificia Universidad Javeriana Cali	136
Anexo 5. Evaluación Tipologías de SUDS en eliminación de contaminantes.	136
Anexo 6. Evaluación Tipologías de SUDS por su eficiencia en la reducción de volumen escorrentía.	137
Anexo 7. Evaluación Tipologías de SUDS por su amenidad y conflictos de uso	137
Anexo 8. Evaluación Tipologías de SUDS por frecuencia de mantenimiento.	137

Anexo 9. Evaluación Tipologías de SUDS según costos de construcción	137
Anexo 10. Curva Equipo de Presión. IHM S.A.S.	138
Anexo 11. Tipologías de SUDS y valores de tiempo de drenaje, α y C. Tomado de (EAAB, 2016).....	138
Anexo 12. Presupuesto de Obras. Elaboración Propia.	139
Anexo 13. Presupuesto de Mantenimiento y Operación Humedad Construido. Elaboración Propia.....	141
Anexo 14. Planos de Diseño del SUDS.....	142

DEDICATORIA

A mis hijos Tomás y Tobías, quienes entregaron con amor su tiempo, para que pudiera realizar este trabajo. A mi esposo Oscar, mi compañero, mi mejor amigo, mi mayor fanático y mi crítico más exigente.

“Sólo aquello que por medio de mi trabajo se transforma en mí mismo, sana, nutre y libera al hombre.” Rudolf Steiner.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a los Profesores José Luis Ramírez y Sandra Galarza, mi director y codirectora de trabajo de grado, quienes me guiaron y motivaron siempre.

A Mónica Tobón, Margarita Jaramillo, Wilmer Camacho, Alexander León, Carlos Salazar, Luis Fernando Guevara, por su tiempo e invaluable colaboración.

A los profesores Tito Morales y especialmente a Julián Lasso de la UTP, por sus valiosos aportes y observaciones.

Al Arquitecto Oscar Vélez, a la Ingeniera Elizabeth Luengas y a la Diseñadora Industrial Natalia Vélez por su apoyo y colaboración incondicional durante todo este proceso.

ABSTRACT

This document presents the project for the design of a sustainable urban drainage system for the use of rainwater on the campus of the Pontificia Universidad Javeriana Cali. Colombian regulations, firstly in Law 373 of 1997, define the obligatory water reuse, regardless of its origin (shallow, underground, or rainfall), and the PUJ Cali presents in its Ecological and Environmental Policy its commitment to the execution of actions and strategies to contribute to a sustainable society; these are frameworks that ratify the importance of developing rainwater reuse and harvesting projects. For the execution of this particular project, the Almendros Building was selected due to its high consumption of drinking water for sanitary uses; the supply of rainwater and the demand for drinking water for sanitary uses were calculated, according to its current population. For this, a SUDS design was developed that includes the best combination of various typologies or treatment train, consisting of a storage tank and an artificial wetland. Subsequently, its basic engineering was developed and with it the investment, maintenance and operation costs were determined, to carry out the financial analysis through Net Present Value, Internal Rate of Return, benefit-cost ratio, taking into account the tax benefits according to Decree 2532 of 2001 and Resolution 486 of 2002. The sustainable urban drainage system designed allows a reduction in sanitary uses, 70% of the consumption of drinking water in the Almendros Building of the Pontificia Universidad Javeriana Cali, which represents 13,7% of the total consumption of drinking water, for the same uses. Although this project did not show financial viability, it does have it from a technical and environmental point of view, because it allows reducing dependence and demand on external water sources and thereby increasing the conservation of ecosystems, without leaving aside the positive impact on the environmental awareness of society and on its responsibility in changing consumption models for efficient use of water resources.

RESUMEN

Este documento presenta el proyecto para el diseño de un sistema urbano de drenaje sostenible para el aprovechamiento de las aguas lluvias en el campus de la Pontificia Universidad Javeriana Cali. La normatividad colombiana, primeramente en la Ley 373 de 1997, define la obligatoriedad de la reutilización del agua, sea de origen superficial, subterránea o lluvias, y la PUJ Cali presenta en su Política Ecológica y Ambiental su compromiso con la ejecución de acciones y estrategias para contribuir a una sociedad sostenible; éstos son marcos que ratifican la importancia del desarrollo de proyectos de reutilización y aprovechamiento de aguas lluvias. Para la ejecución de este proyecto en particular, se seleccionó el Edificio Almendros debido a sus altos consumos de agua potable para usos sanitarios; se calculó la oferta de agua lluvia y la demanda de agua potable para usos sanitarios, según su población actual. Para esto, se elaboró un diseño de SUDS que incluye la mejor combinación entre varias tipologías o tren de tratamiento, conformado por un tanque de almacenamiento y un humedal artificial. Posteriormente, se desarrolló su ingeniería básica y con ésta se determinaron los costos de inversión, de mantenimiento y operación, para realizar el análisis financiero mediante Valor Presente Neto, Tasa interno de Retorno, relación beneficio costo, teniendo en cuenta los beneficios tributarios según el Decreto 2532 de 2001 y la Resolución 486 de 2002. El sistema urbano de drenaje sostenible diseñado permite disminuir en los usos sanitarios, un 70% del consumo de agua potable del Edificio Almendros de la Pontificia Universidad Javeriana Cali, lo que representa un 13,7% del consumo total de agua potable, para los mismos usos. Aunque este proyecto no arrojó viabilidad financiera, sí la tiene desde el punto de vista técnica y ambiental, debido a que permite disminuir la dependencia y demanda sobre fuentes hídricas externas y con esto aumentar la conservación de ecosistemas, sin dejar a un lado el impacto positivo sobre la conciencia ambiental de la sociedad y sobre su responsabilidad en el cambio de los modelos de consumo para un uso eficiente del recurso hídrico.

1. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso indispensable para todas las formas de vida del planeta, y aunque sea renovable por su ciclo natural, se ha convertido en uno limitado debido a la constante intervención del hombre, siendo el crecimiento de la población y su expansión urbana, una de las principales causas de su afectación. Esto ha generado mayor atención en el agua lluvia como fuente potencial de agua, excluyendo inicialmente la producción de agua potable (Hatt et al., 2006).

En consecuencia, ha surgido un profundo interés a nivel mundial de desarrollar tecnologías y generar estrategias para reducir el impacto ambiental por el aumento de la población, sin afectar la calidad de vida de las personas; generando desarrollos urbanos que permitan una mejor interacción con el medio ambiente, por lo que la gestión del drenaje urbano y el ciclo del agua urbana han experimentado un cambio significativo en las últimas décadas, pasando de un enfoque limitado (reducción de inundaciones) a un enfoque de múltiples objetivos (suministro adicional, mayor biodiversidad, microclima mejorado) (Fletcher et al., 2015).

En Colombia, la Ley 373 de 1997, en su artículo 5°, define la obligatoriedad de la reutilización del agua, sean de origen superficial, subterránea o lluvias. A partir del Decreto 1285 del 2015 y con la Resolución 549 de julio del mismo año, las edificaciones están llamadas a implementar medidas activas y pasivas para alcanzar los porcentajes mínimos de ahorro en consumo de energía y agua, lo cual no solo permitirá contribuir al desarrollo sostenible urbano y obtener ahorros durante la operación de las edificaciones, sino también acceder a incentivos tributarios por parte del Gobierno Nacional. Por otro lado, la Resolución 330 de 2017 en su Art.153, menciona la obligatoriedad de implementar Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible SUDS para nuevos desarrollos urbanos, con el fin de mitigar el efecto de

la impermeabilización de las áreas en el aumento de los caudales de escorrentía y la oportunidad de implementarlos en Colombia para observar su comportamiento y su impacto en la disminución de recargas de los sistemas pluviales y posteriores inundaciones.

Alineada con esta reglamentación, la Pontificia Universidad Javeriana Seccional Cali, en su Política Ecológica y Ambiental busca propiciar un campus universitario sustentable, con estándares ambientales y criterios de responsabilidad ambiental que reflejen el manejo adecuado de los recursos, la infraestructura y el compromiso con el entorno natural y urbano (Pontificia Universidad Javeriana Cali, 2015.).

El trabajo a desarrollar presentará el diseño de un sistema urbano de drenaje sostenible, que permita captar, almacenar y reutilizar las aguas lluvias en la PUJ Cali, mediante la evaluación de alternativas de algunos sistemas urbanos de drenaje sostenibles SUDS; aquellos que tengan el mejor comportamiento para garantizar los volúmenes de demanda necesarios; la calidad de agua para su reutilización; la mejor relación beneficio/costo y el mayor porcentaje de ahorro en el consumo actual de agua potable de la Pontificia Universidad Javeriana Seccional Cali.

2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

El Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2018 (WWAP, 2018), menciona que:

La demanda mundial de agua ha ido aumentando a un ritmo del 1% anual aproximadamente en función del aumento de población, el desarrollo económico y los cambios en los patrones de consumo, entre otros factores, y seguirá creciendo de manera significativa en las dos próximas décadas. La demanda industrial y doméstica de agua aumentará mucho más rápidamente que la demanda agrícola, aunque el sector agrícola seguirá siendo el principal consumidor de agua en el mundo. La gran mayoría de la creciente demanda de agua se producirá en países con economías emergentes o en desarrollo.

Al mismo tiempo, el ciclo global del agua se está intensificando debido al cambio climático: las regiones más húmedas se están volviendo más húmedas y las regiones secas se están volviendo aún más secas. En la actualidad, se estima que hay 3.600 millones de personas (casi la mitad de la población mundial) que viven en áreas con riesgo de sufrir escasez de agua al menos un mes al año, y esta población podría llegar a alcanzar entre 4.800 y 5.700 millones en 2050.

Según el Estudio Nacional del Agua (ENA) del 2014, en Colombia, se identificaron 318 cabeceras municipales que sufren desabastecimiento de agua, de éstas 15 son capitales de departamento y 37 tienen más de 50.000 habitantes (IDEAM, 2015). Por otro lado, en el mismo estudio, pero del 2018, se identificó que la demanda de agua en nuestro país aumentó alrededor de un 5%, al pasar de 35.582 millones de metros cúbicos al año en 2014, a 37.308 millones en el 2018. Además, presentó que 391 municipios son susceptibles a sufrir

desabastecimiento de agua; cerca de 3.200.000 de personas están expuestas a sufrir inundaciones, en gran medida a la transformación de humedales incorporados a zonas urbanas; y por cuenta de los cambios climáticos, en los últimos 30 años, la masa glaciaria se ha reducido un 56%, y solo en la última década un 22%. (IDEAM, 2018).

Dada la localización de la Pontificia Universidad Javeriana, y gracias a la presencia de intensas lluvias se presentan inundaciones en el campus, principalmente al margen de la avenida Cañasgordas. Esto debido al desbordamiento de cauces, sobresaturación de los sistemas de drenaje de las vías circundantes, falta de mantenimiento de estos y mayor densidad de zonas duras, tanto en el campus como en su entorno, disminuyendo las zonas de infiltración y aumentando la escorrentía (Valencia, 2011).

Como consecuencia del cambio climático y de fenómenos de variabilidad climática tales como el del Niño y de la Niña (Montealegre Bocanegra, 2007), se pueden presentar épocas de baja precipitación, que afectarán el suministro de agua al campus, proveniente de la Derivación 4 del río Pance, la cual abastece el acueducto de la PUJ Cali mediante Resolución de Concesión No. 4133.0.21.1411 del 27 de diciembre de 2016 (Pontificia Universidad Javeriana Cali, 2017), agravado por el mayor consumo de agua potable, a causa del crecimiento de la población (estudiantes y colaboradores) y por los demás usos para la operación de la institución, relacionados y descritos en la Tabla 1.

Tabla 1.
Identificación de los usos del agua en la Pontificia Universidad Javeriana Seccional Cali (Quintero, 2018).

Usos del Agua	Justificación
Edificios sanitarios, duchas) (Lavamanos, lavaplatos y	Estas actividades requieren de un tratamiento de potabilización para preservar, conservar y mejorar la salud de los individuos frente al consumo y el contacto directo con el agua.
Cafeterías	Los establecimientos en que se produzcan, elaboren, transformen, fraccionen, expendan, consuman o almacenen productos deben disponer de agua potable para lavado desinfección de sus equipos

Usos del Agua	Justificación
	y utensilios en cantidad y calidad suficiente para mantener sus condiciones adecuadas de higiene y limpieza (Ley 9 1979, Título V "Alimentos", Artículo 264), es decir debe existir un proceso de potabilización del fluido antes de ser usado en estas labores.
Laboratorios	El agua para uso en laboratorio debe ser una sustancia en estado líquido, sin olor, que por inspección visual sea transparente y sin color, para su uso específico como un componente de un proceso de medición analítico y cumple o excede las especificaciones de la NTC5395 según la clase de agua, en los que el uso de agua no potable se considera inadecuado. La presencia de microorganismos y contaminantes físicos y químicos causan la alteración de las pruebas que se realicen causando interferencias o reacciones colaterales, disminuyendo la confiabilidad de resultados. Se requiere en consecuencia, un previo tratamiento de potabilización del agua para poder utilizarla en los procesos investigativos del laboratorio.
Recreativo	Usos del agua para fines recreativos cuando se produce contacto primario (natación, buceo), el agua que se emplea en las piscinas deberá cumplir con las características fisicoquímicas y bacteriológicas que establezca el Ministerio de Salud o la entidad encargada de control (Ley 9 de 1979).
Incendio (Red contra incendio)	Los sistemas contra incendios almacenan y transportan agua fría (calidad de agua de consumo humano), por lo tanto, se debe tratar la corrosión e incrustaciones y el crecimiento de microorganismos para el mantenimiento de la calidad fisicoquímica y microbiológica del, agua en condiciones normales de operación en el sistema, ya que los trabajadores y usuarios se ven potencialmente expuestos en la ejecución de pruebas hidráulicas y durante el uso de los equipos en una situación de emergencia. A la hora de presentarse un conato de incendio, por ser una emergencia no es importante la calidad del agua que se emplee para apagar el incendio.
Edificios (Sanitarios, orinales, lava traperos) Lavado de fachadas, zonas comunes y pisos Ornamental Riego de (Lago y fuentes) - Jardines	En estas labores, el agua no es empleada para el consumo, la manipulación de alimentos y/o labores de higiene personal, por lo cual no requieren agua potable. Dependiendo de su procedencia (Agua de lluvia, grises, residuales, subterránea) el agua puede requerir un tratamiento preliminar para ser empleada en estas tareas. (On-site Non-potable Water Use, 2013).

De acuerdo con la información de la Tabla 1, se pudo identificar que hay un mayor consumo de agua potable, debido a que ésta se está empleando en actividades que requieren una calidad diferente de agua y, por lo tanto, se podría disminuir el consumo total.

Ante la problemática expuesta en este documento, surge la pregunta de investigación: ¿Cómo aprovechar las aguas lluvias para disminuir los consumos de agua potable y contribuir a la sostenibilidad de la Pontificia Universidad Javeriana Cali?

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo General

Diseñar un sistema urbano de drenaje sostenible para el aprovechamiento de las aguas lluvias, logrando disminuir los consumos de agua potable en la Pontificia Universidad Javeriana Cali.

3.2 Objetivos Específicos

- Determinar la oferta y demanda de agua en el campus de la Pontificia Universidad Javeriana Cali, para plantear diferentes escenarios de reutilización de aguas lluvias y seleccionar el más adecuado.
- Desarrollar un diseño de ingeniería básica que permita cumplir con la reglamentación vigente y acceder a beneficios tributarios.
- Analizar la viabilidad financiera y técnica de la ejecución y operación del sistema.

4. JUSTIFICACION

Para garantizar la supervivencia de las próximas generaciones y de la vida en el planeta, es de vital importancia cuidar y conservar el recurso hídrico, trabajando por mantener su ciclo hidrológico. Es por esto, que en la Pontificia Universidad Javeriana, en Cali, en Colombia y en el resto del mundo, se deben desarrollar e implementar estrategias y acciones para lograr ahorro y uso sostenible del agua, lo que va de la mano del objetivo de su Política Ecológica y Ambiental y de su responsabilidad con la creación de una sociedad “justa y sostenible” (Pontificia Universidad Javeriana Cali, 2015).

Este proyecto busca optimizar el consumo de agua potable en la Pontificia Universidad Javeriana Cali, aprovechando las aguas lluvias en usos en los cuales la calidad de la misma puede ser diferente; empleando sistemas urbanos de drenaje sostenibles que permitan recrear de la mejor manera el ciclo natural del agua, y que ayuden a reducir la escorrentía y la recarga de acuíferos, por el aumento de áreas impermeables, y con esto, disminuir la afectación por inundaciones en el campus y sus alrededores.

Al aprovechar las aguas lluvias en el campus, se lograrán beneficios económicos representados en ahorro de consumos, acceso a beneficios tributarios y cumplimiento de normatividad; beneficios ambientales, integrando la reutilización de agua y disminución de escorrentía; y beneficios sociales, al contribuir con la transformación cultural que se puede generar al conseguir mayor eficiencia entre la operación de la edificación y el usuario, acompañada de la educación y de la promoción de estas prácticas, hacia adentro y fuera de la Pontificia Universidad Javeriana Seccional Cali.

5. MARCO TEÓRICO

5.1 Marco Normativo Colombiano

La Ley 373 de 1997, por la cual se establece el programa para el uso eficiente y de ahorro de agua, en su artículo 5º, se establece la reutilización obligatoria del agua: “Las aguas utilizadas, sean éstas de origen superficial, subterráneo o lluvias, en cualquier actividad que genere afluentes líquidos, deberán ser reutilizadas en actividades primarias y secundarias cuando el proceso técnico y económico así lo ameriten y aconsejen según el análisis socio-económico y las normas de calidad ambiental”.

Posterior a esta Ley, el Decreto 1285 del 2015 modifica al Decreto 1077 del mismo año, en lo relacionado con los lineamientos de construcción sostenible, determinando los porcentajes obligatorios de ahorro en agua y energía según clima y tipo de edificación, los procedimientos para la aplicación, certificación, seguimiento y control a la implementación de las medidas, y la promoción de incentivos a nivel local para la construcción sostenible.

En la Resolución 549 de julio de 2015, se establecen los porcentajes mínimos de ahorro de agua y energía a alcanzar, en las nuevas edificaciones y la definición de medidas activas y pasivas; se adopta la guía de construcción sostenible para el ahorro de energía y agua en edificaciones, siendo esta guía, una herramienta para la implementación de estrategias de construcción sostenible en todos los municipios del país y en la cual se promueve la eficiencia energética y conservación del agua.

En cuanto a incentivos tributarios, el Decreto 2532 de 2001 y la Resolución 486 de 2002, relacionan deducción sobre el impuesto sobre las ventas para los sistemas de control ambiental que disminuyan la demanda recursos naturales, prevengan o reduzcan el volumen

y/o mejoren la calidad de los residuos líquidos, las emisiones atmosféricas y los residuos sólidos.

Por otro lado, la Resolución 330 de 2017 en su artículo 153, determina la obligatoriedad de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenibles, para nuevos desarrollos urbanos con el fin de evitar sobrecargas de los sistemas pluviales y posteriores inundaciones.

5.2 Estrategias para la Gestión de las aguas Pluviales

Según LEED® (U.S. Green Building Council, Inc., n.d.) la aguas pluviales se pueden gestionar, a través del diseño y en las operaciones y mantenimiento de la edificación. En el diseño, se pueden minimizar áreas impermeabilizadas, mediante la utilización de techos verdes, pavimentos permeables y adoquines. También controlar las aguas pluviales, mediante lagunas secas, jardines pluviales, entre otros sistemas de drenaje urbano sostenible, que ayuden a contener las aguas y ralentizar el índice de escorrentía; e incorporar la gestión de las aguas pluviales del sitio del proyecto, incluyendo, por ejemplo, calles que incluyan biocanales para capturar y conservar el agua lluvia, entre otros.

La gestión de las aguas pluviales en la operación y mantenimiento de la edificación podría incluir estrategias como la redirección de las aguas pluviales, dirigir la escorrentía a lagunas secas, jardines pluviales, biocanales de drenaje, entre otros; y recolectar agua lluvia para descargas de aparatos sanitarios o riego.

5.3 Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS)

Los SUDS buscan minimizar el impacto por la cantidad y calidad de la escorrentía, y maximizar su valor en la recreación y biodiversidad de los desarrollos urbanos (Woods Ballard et al., 2015). Son sistemas que permiten la captación, descontaminación, retención,

infiltración, transporte y evacuación de las aguas lluvias, replicando el drenaje natural del sitio antes de su desarrollo urbano.

Estos sistemas generan una serie de beneficios económicos, sociales y ambientales, debido a que estos son más sostenibles que los métodos convencionales, puesto que controlan los altos flujos de la escorrentía, incrementan el tiempo de concentración, conservan o mejoran la calidad del agua, simpatizan con el medio ambiente y las necesidades de la comunidad local, proveen un hábitat a los animales en los cursos de agua y fomentan la recarga de los acuíferos (Durrans, 2003).

Existe una clasificación para los SUDS: los de tipo estructural y los de tipo no estructural. Los primeros, aumentan la infiltración y minimizan el volumen de escorrentía y realizan detenciones y tratamientos temporales a la misma, previo a la entrega final (Durrans, 2003). Los de tipo no estructural, son prácticas educativas que buscan el control en la fuente, y están encaminadas a reducir o eliminar el ingreso de contaminantes a las aguas lluvias (Urbonas, 1999), tales como, control de disposición de desechos, orden y limpieza de espacios comerciales e industriales, políticas de manejo de escombros, control de disposición de residuos animales, modificación del uso de pesticidas, fertilizantes y herbicidas, eliminación de descargas ilícitas, mantenimiento de cuencas, caminos, calles, estacionamientos, entre otros (Marchena Ávila, 2012).

A continuación, se describen algunos ejemplos de SUDS de tipo estructural.

- Zanjas de infiltración: Estas son áreas de pasto u otra vegetación densa y suavemente inclinada que tratan la escorrentía de áreas adyacentes impermeables.

- Canales: Son anchos y poco profundos cubiertos de hierba u otra vegetación adecuada. Están diseñados para transportar y / o almacenar la escorrentía, y el agua puede infiltrarse (si las condiciones del terreno lo permiten).
- Cuencas de infiltración: Son depresiones en la superficie que están diseñadas para almacenar la escorrentía e infiltrarse en el agua al suelo. También pueden ser ajardinados para proporcionar valor estético y de servicios.
- Estanques húmedos: Son cuencas que cuentan con una piscina de agua permanente para el tratamiento de la calidad del agua. Proporcionan almacenamiento temporal para la escorrentía adicional de la tormenta por encima del nivel permanente del agua. Los estanques húmedos pueden proporcionar comodidad y beneficios para la vida silvestre.
- Depósitos de retención: Las cuencas de detención prolongada son normalmente secas, aunque pueden tener pequeñas piscinas permanentes en la entrada y salida. Están diseñados para detener un cierto volumen de escorrentía, así como para proporcionar un tratamiento de calidad del agua.
- Humedales: Los humedales construidos son estanques con áreas poco profundas y vegetación de humedales para mejorar la eliminación de contaminantes y mejorar el hábitat de la vida silvestre.
- Filtros de desagüe y tuberías perforadas: Los drenajes de filtro son zanjas que están llenas de material permeable. El agua superficial del borde de las áreas pavimentadas fluye hacia las zanjas, se filtra y se transporta a otras partes del sitio. Se puede

construir un tubo ranurado o perforado en la base de la zanja para recoger y transportar el agua.

- Dispositivos de infiltración: Los dispositivos de infiltración almacenan temporalmente la escorrentía de un desarrollo y permiten que se filtre hacia el suelo.
- Superficies permeables: Las superficies permeables permiten que el agua de lluvia se infiltre a través de la superficie hacia una capa de almacenamiento subyacente, donde el agua se almacena antes de la infiltración en el suelo, se reutiliza o se libera al agua superficial.
- Techos verdes: Los techos verdes son sistemas que cubren el techo de un edificio con vegetación. Se colocan sobre una capa de drenaje, con otras capas que proporcionan protección, impermeabilización y aislamiento.

Según Woods Ballard et al., 2015, para imitar los procesos naturales de captación lo más cerca posible, es necesaria una "cadena de gestión". Este concepto utiliza técnicas de drenaje en serie para reducir progresivamente la contaminación, caudales y volúmenes de escorrentía; y debe considerar lo siguiente:

- a. Prevención: El buen diseño del sitio y las condiciones de mantenimiento de este para prevenir escorrentía y contaminación, y la reutilización / recolección de aguas pluviales.
- b. Control de fuente: control de la escorrentía en o muy cerca de su fuente, por ejemplo, métodos de infiltración, techos verdes, pavimentos permeables.
- c. Control del sitio: gestión del agua en un área o sitio, por ejemplo, desviando el agua desde techos y estacionamientos para una gran cuenca de infiltración o detención.

- d. Control regional: gestión de la escorrentía de un sitio o varios sitios, generalmente en un estanque de equilibrio o humedales.

El diseño del sistema de drenaje deberá considerar el transporte natural del agua mediante cunetas o trincheras de infiltración, o mediante el uso de tuberías perforadas en caso de restricción de espacio. El tratamiento previo, para la eliminación de sedimentos gruesos y mantenimiento, son aspectos muy importantes a tener en cuenta en la selección de los SUDS.(Woods Ballard et al., 2015)

Para administrar y controlar la escorrentía, existen varios procesos(Woods Ballard et al., 2015):

- a. Infiltración: Es el proceso más deseable porque restaura los procesos hidrológicos naturales; las tasas de infiltración varían según el tipo y condición del suelo, sus antecedentes y con el tiempo; no puede utilizarse en áreas donde las fuentes de aguas subterráneas son vulnerables.
- b. Detención/Atenuación: Es la ralentización de la escorrentía antes de su conducción aguas abajo. Generalmente se logra con el uso de almacenamiento y con restricción en la salida. El almacenamiento se puede realizar en una cuenca seca, en un estanque permanente o mediante estructuras subsuperficiales.
- c. Transporte: Es la transferencia de la escorrentía de un lugar a otro. Puede realizarse mediante el uso de canales abiertos, tuberías y zanjas. El transporte no controlado a un punto de descarga en el medio ambiente, no se considera sostenible, por el contrario, un transporte controlado constituye una herramienta esencial para gestionar flujos y vincular componentes de SUDS entre sí.

- d. Recolección de agua: Es la captación directa y el uso de la escorrentía en el sitio. Se puede emplear para descarga de sanitarios, riego de jardines o lavado de pisos. Sin embargo, la contribución a la gestión del riesgo de inundación dependerá de la escala del sistema de recolección de agua, por lo cual el diseño deberá garantizar disponibilidad permanente del almacenamiento para el control de la escorrentía y un riesgo aceptablemente bajo de que el almacenamiento esté lleno cuando ocurra una inundación.

En cuanto a los procesos para el control de calidad de la escorrentía, existen varios procesos de tratamiento para la calidad del agua, lo cuales aplican a una o varias técnicas de SUDS y estar presentes en diferentes etapas de la cadena de tratamiento. Estos son (Woods Ballard et al., 2015):

- a. Sedimentación: Es uno de los mecanismos primarios de remoción en los SUDS. La mayor parte de los contaminantes están unidos a los sedimentos, por lo cual disminuirlos contribuirá a reducir la contaminación de la escorrentía. La sedimentación se logra, disminuyendo las velocidades de flujo, de tal manera, que las partículas de sedimento caen fuera de la suspensión.
- b. Filtración y Biofiltración: Los contaminantes que se transportan junto con los sedimentos pueden filtrarse, esto puede evitarse al cubrir el suelo o los agregados con plantas o capas de geotextil en la construcción. La instalación de cualquier filtración dependerá de cada tipo de SUDS.
- c. Adsorción: Se produce cuando los contaminantes se adhieren a la superficie del suelo o a los. El proceso es complejo, pero tiene a ser una combinación de reacciones superficiales por adsorción, por intercambio de cationes, quemisorción y absorción.

El cambio de la acidez de la escorrentía puede aumentar o disminuir, según la adsorción de contaminantes por partículas de suelo y materiales de construcción.

- d. Biodegradación: Además de los procesos físicos y químicos, que pueden ocurrir dentro de una técnica de SUDS, también pueden darse procesos biológicos. Las comunidades microbianas pueden establecerse dentro del suelo, utilizando el oxígeno dentro de los materiales de drenaje y los nutrientes suministrados en los flujos de entrada, para degradar contaminantes orgánicos como aceites y grasas. El nivel de actividad de dicha biorremediación se verá afectado por las condiciones ambientales, como la temperatura y el suministro de oxígeno y nutrientes, condiciones físicas del terreno e idoneidad de los materiales para la colonización.
- e. Volatilización: Consiste en el cambio de estado de sólido a gaseoso, sin pasar por el estado líquido. La conversión a gas o vapor se produce debido al calor, reducción de la presión, reacción química o una combinación de estos procesos. La tasa de volatilización de un compuesto es controlada por varias de sus propiedades y las del suelo circundante. En los esquemas SUDS, la volatilización se refiere principalmente a los compuestos orgánicos en productos derivados del petróleo y pesticidas.
- f. Precipitación: Es el mecanismo más común para eliminar metales solubles. La precipitación implica reacciones químicas entre los contaminantes y el suelo o los agregados, que transforman los componentes disueltos para formar una suspensión de partículas de precipitados insolubles. Los metales se precipitan en forma de hidróxidos, sulfuros y carbonatos, según los precipitantes presentes y el nivel de pH. La precipitación puede eliminar la mayoría de los metales (arsénico, cadmio, cromo

III, cobre, hierro, plomo, mercurio, níquel, zinc) y muchas especies aniónicas (fosfatos, sulfatos, fluoruros).

- g. Captación por plantas: Es un importante mecanismo de eliminación de nutrientes (fósforo y nitrógeno). Los metales también se pueden eliminar de esta manera (aunque se requiere un mantenimiento intermitente de las plantas, de lo contrario los metales volverán al agua cuando las plantas mueran). Las plantas también crean condiciones adecuadas para la deposición de metales, por ejemplo, sulfuros en la zona de la raíz.
- h. Nitrificación: El amoníaco y los iones de amonio pueden ser oxidados por bacterias en el suelo para formar nitrato (nutriente para las plantas), que es una forma altamente soluble de nitrógeno.
- i. Fotólisis: Consiste en la descomposición de los contaminantes orgánicos por exposición a la luz ultravioleta.

En la Tabla 2 se presentan las diferentes técnicas o tipologías de SUDS y su capacidad frente a los procesos en la gestión de la cadena sustentable, para administrar y controlar la escorrentía, para el control de la calidad de la misma y según sus beneficios ambientales.

Tabla 2.

Capacidad de las diferentes técnicas SUDS. (Adaptada de: Woods Ballard et al., 2015)

Técnica	Descripción	Gestión de la Cadena Sustentable			Cantidad de Agua				Calidad del Agua						Beneficios Ambientales							
		Prevención	Transporte	Pre-tratamiento	Control en la fuente	Control en el sitio	Control regional	Transporte	Detención	Infiltración	Recolección de agua	Sedimentación	Filtración	Adsorción	Biodegradación	Volatilización	Precipitación	Captación por plantas	Nitrificación	Estéticos	Conveniencia	Ecología
Reservorios de agua lluvia, diseño y gestión del lugar	Buenas prácticas ambientales de mantenimiento y de diseño	◆	⊗		◆			⊗	⊗	◆	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗
Pavimentos permeables	Permitir la entrada de agua a la estructura subyacente / suelo	◆			◆	⊗			◆	◆	⊗	◆	◆	◆	◆					⊗	⊗	⊗
Drenajes filtrantes	Drenajes / trincheras lineales rellenos con un material permeable, a menudo con un tubo perforado en la base de la zanja		◆		◆	⊗		◆	◆			◆	◆	◆	◆							
Franjas filtrantes	Franjas con vegetación en terreno suavemente inclinado, diseñadas para drenar el agua de las áreas impermeables y filtrar el sedimento y otras partículas			◆	◆			⊗	⊗	⊗	◆	◆	◆	◆						⊗	⊗	⊗
Cunetas	Canales de vegetación poco profundos que conducen y / o retienen agua (y pueden permitir la infiltración cuando no están alineados). La vegetación filtra partículas.		◆		◆	◆		◆	◆	⊗	◆	◆	◆	◆			⊗			⊗	⊗	⊗
Estanques	Depresiones utilizadas para almacenar y tratar el agua. Cuentan con una piscina permanente y con vegetación emergente y acuática en la orilla.					◆	◆		◆	⊗	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆
Humedales	Como estanques, pero la escorrentía fluye lenta pero continuamente a través de la vegetación acuática que atenúa y filtra el flujo. Menos que los estanques.		⊗			◆	◆	⊗	◆	⊗	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆
Cuencas de detención	Depresiones secas diseñadas para almacenar agua durante un tiempo de retención específico					◆	◆		◆		◆	⊗	⊗	◆			⊗			⊗	⊗	⊗
Pozos de absorción	Estructuras subsuperficiales que almacenan y evacúan el agua a través de la infiltración.				◆				◆			◆	◆	◆								
Trincheras de infiltración	A medida que el filtro se drena, se permite la infiltración a través de la base y los lados de la zanja .		⊗		◆	◆		⊗	◆	◆			◆	◆	◆	◆						
Cuencas de infiltración	Depresiones que almacenan y evacúan el agua por infiltración.					◆	◆		◆	◆		◆	◆	◆	◆					⊗	⊗	⊗
Techos verdes	Techos con vegetación que reducen el volumen y la tasa de escorrentía.	◆		◆	◆				◆			◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	⊗	◆
Áreas de bioretención	Áreas con vegetación para recoger y tratar el agua antes de la descarga corriente abajo, o al suelo, a través de la infiltración.				◆	◆			◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆
Filtros de arena	Dispositivos de tratamiento utilizando lechos de arena como medio filtrante.			◆	◆	⊗		◆	⊗			◆	◆	◆	◆	◆						
Remoción de sedimentos	Boca de inspección (manhole) y / o dispositivos para eliminar el sedimento.			◆							◆											
Tuberías, depósitos subterráneos	Conductos y sus accesorios como medidas de transporte y / o almacenamiento. La calidad del agua puede ser precisada utilizando sedimentación y medios filtrantes.		◆		◆			◆	◆		⊗	⊗										

◆ Proceso Alto / Primario

⊗ Algunas oportunidades, sujeto a diseño

De acuerdo con estos procesos y a la capacidad de las diferentes tipologías frente a los mismos, relacionadas en la Tabla 2, el diseño del sistema hidráulico se enfocará en el uso de los SUDS de tipo estructural, entre los cuales a continuación se describen trincheras de retención, superficies permeables (concretos permeables), tanques de almacenamiento, humedales artificiales y techos verdes.

5.3.1 Pavimentos Permeables.

Los pavimentos permeables son estructuras que permiten la infiltración, cuya función principal es la de reducir la escorrentía superficial, gracias al incremento de la permeabilidad de la carpeta de rodadura y la subbase, lo cual requiere de una granulometría especial (MINVU, 1999; Instituto de Pesquisas Hidráulicas, 2000; Interpave, 2008).

La estructura de los pavimentos permeables generalmente consta de tres capas: (i) una capa de rodadura que permite el paso del agua, puede ser en asfalto, concreto (pavimentos porosos), arcilla, grava, pasto, adoquines (ii) una capa de material granular fino, la cual permite una instalación adecuada de la capa de rodadura y (iii) una capa compuesta por una matriz de material granular de gran tamaño, o por módulos o geo-células plásticas donde el agua se almacena. (Castro Espinosa, 2011).

Este sistema puede comportarse como un sistema de infiltración (sistema tipo A), o almacenamiento temporal (sistema tipo B), o almacenamiento permanente (sistema tipo C), según las características de los suelos del lugar, o si se desea utilizar el agua lluvia recolectada. Estas estructuras se pueden emplear en zonas como andenes, estacionamientos, canchas de uso múltiple, ciclovías, senderos en áreas verdes y vías (MINVU, 1999; Instituto de Pesquisas Hidráulicas, 2000; Interpave, 2008)(S. L. Galarza Molina, 2011).

5.3.2 Techos Verdes.

Según Woods Ballard et al., 2015, los techos verdes comprenden un sistema de varias capas que cubren el techo de un edificio o estructura con una cubierta de vegetación / paisajismo, sobre una capa de drenaje. Están diseñados para interceptar y retener la precipitación, reduciendo el volumen de escorrentía y atenuando los flujos máximos.

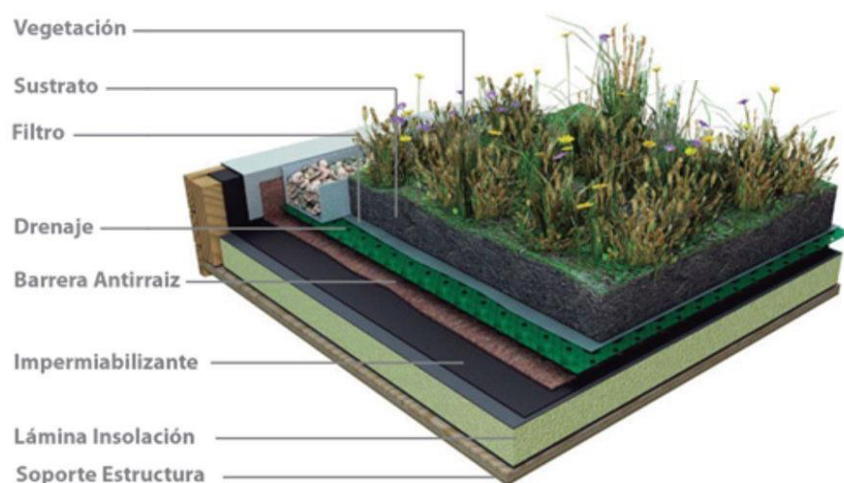


Ilustración 1. Capas en techos verdes. (Tomado de www.hidrosym.cl)

Algunas de las principales ventajas de los techos verdes se describen a continuación (Callaghan, Peck, et al., 1999; United States. Environmental Protection Agency, 2000; Woods-Ballard, Kellagher, et al., 2007b; Taylor, 2008):

- Extender la vida útil de las cubiertas.
- Mejorar la calidad del aire ya que tienen la capacidad de remover contaminantes que se encuentran presentes en la atmósfera urbana.
- Reconstruir el paisaje natural y generar hábitat.
- Retener altos niveles de humedad en áreas de la ciudad.

- Generar aislamiento térmico lo cual lleva a minimizar el consumo energético.
- Reducir la cantidad del agua de escorrentía y mejorar en la calidad de esta.
- Absorber el ruido.
- Mitigar el efecto isla de calor que se genera en las ciudades debido a la reducción de emisión de gases de efecto invernadero.
- Ahorros en cuanto al mantenimiento de la estructura.
- Mejorar la estética de las edificaciones e incrementar su valor comercial.

Los techos verdes pueden tener dos clasificaciones; una primaria, determinada por el propósito y uso del techo verde, y son: (i) techos verdes autorregulados, (ii) techos verdes ajardinados, (iii) techos verdes ecológicos especializados y (iv) techo verde huerta. Y una clasificación secundaria, determinada por la robustez del sistema del techo verde en función del porte y vegetación empleada, y son: (i) liviano, (ii) moderado y (iii) robusto. (Ambiente & Alcaldía Mayor de Bogotá, 2011).

Es interés de este estudio, los techos verdes autorregulados, cuyo sistema se caracteriza por requerir la menor inversión, mínima cantidad de materiales, y menor peso, empleando vegetación adaptada a las condiciones ambientales del sitio, de tal forma que mantenga su vitalidad sin riego adicional a las lluvias y con mínimo mantenimiento. Sus funciones básicas son estanqueidad, drenaje efectivo, retención, estabilidad y nutrición; generando disminución en el volumen de escorrentía, atenuación del caudal de evacuación y aislamiento térmico y acústico. Respecto a sus componentes activos, el espesor del medio de crecimiento oscila entre 20 y 120 mm; y se define según las necesidades de las raíces de las plantas, las cuales

deben tener capacidad de sobrevivir en sustratos de bajo contenido orgánico; con una altura máxima de la cobertura vegetal de 50 cm.(Ambiente & Alcaldía Mayor de Bogotá, 2011).

En su clasificación secundaria, los techos verdes autorregulados pueden ser: (i) livianos, con una carpeta vegetal resistente a condiciones ambientales extremas con altura máxima de 20 cm y peso total hasta 80 kg/m² en estado saturado; (ii) moderados, con carpeta vegetal con altura máxima de 50 cm y peso total entre 80 kg/m² y 120 kg/m² en estado saturado; y (iii) robustos, con carpeta vegetal con altura máxima de 50 cm y peso total entre 120 kg/m² y 150 kg/m² en estado saturado (Ambiente & Alcaldía Mayor de Bogotá, 2011).

5.3.3 Trincheras de Retención/Zanjas de infiltración.

Son excavaciones poco profundas rellenas de gravas u otros materiales porosos con el fin de crear vacíos y así generar un almacenamiento temporal de aguas lluvias y posteriormente conducir las aguas abajo. (Woods Ballard et al., 2015). Estas trincheras cuentan con una base impermeable y sus componentes se muestran en la Ilustración 2.

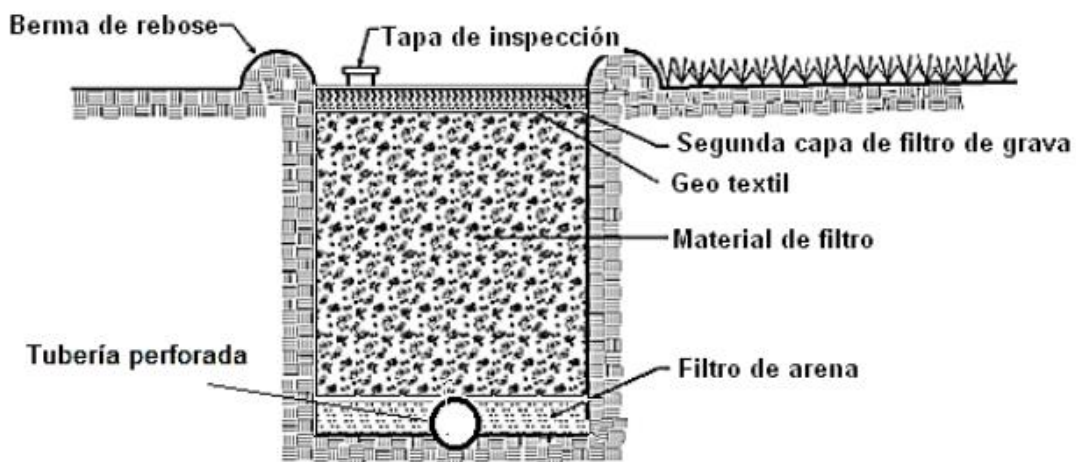


Ilustración 2. Sección transversal de trinchera de retención (Adaptado de Vermont Stormwater Management Manual 1, 2002)

Para el dimensionamiento de las trincheras se puede emplear la Metodología Mora (Mora *et al.* 2011, Vanegas Tamayo & Flórez Vitola, 2012) ya que esta metodología no tiene en cuenta

la infiltración, por lo tanto, no hay reducción en el volumen generado por el evento; además, es la única que permite determinar las dimensiones de la estructura de almacenamiento hasta cierto volumen y luego, transportar el volumen adicional a otro lugar por medio de tuberías, esto contribuye a requerir menos espacio para su construcción. Sin embargo, deberá tenerse en cuenta el dimensionamiento para la redirección del flujo, el tiempo de retención y la colmatación en el sistema.

5.3.4 Tanque de Almacenamiento.

Según (EAAB, 2016), este tipo de estructura de SUDS, tiene como objetivo retener el agua de escorrentía para almacenarla. El volumen de agua acumulado puede ser reutilizado para usos no potables o ser dispuesto en cuerpos receptores o en sistemas convencionales de drenaje. Puede provenir de superficies impermeables como cubiertas, vías, canaletas y puede ser dispuesta, superficial o subterráneamente.

Esta tipología requiere de un sistema para el aprovechamiento de las aguas lluvias, compuesto por el área de captación, conducción, interceptor de primeras aguas y almacenamiento. La captación y reutilización de aguas lluvias ayuda a reducir la escorrentía, mientras se evita el consumo innecesario de agua potable (U.S. Green Building Council, Inc., n.d.).

Algunas ventajas de este tipo de SUDS, son que la calidad fisicoquímica del agua es alta y/o suficiente, en algunas zonas y según el uso que se le daría; el mantenimiento es de baja complejidad y permite reducción de los costos de consumo de agua potable.

5.3.5 Humedales Construidos.

Son humedales artificiales en terrenos excavados e inundados de poca profundidad, con fondo relativamente impermeable y una capa de suelo u otro medio filtrante, que soporta

vegetación emergente y permite el movimiento lento del agua (Brand Torres, 2014 que cita a D. Bernal, Cardona, Galvis, & Peña, 2008). Es en la zona radicular y el tallo de la vegetación que se permite el crecimiento de la película bacteriana que facilita la filtración y adsorción de algunos constituyentes del agua residual, siendo ésta, junto con la vegetación, el medio soporte y la población microbial, los componente que participan en la remoción de contaminantes, dichos componentes están representados en la Ilustración 3 (Brand Torres, 2014).

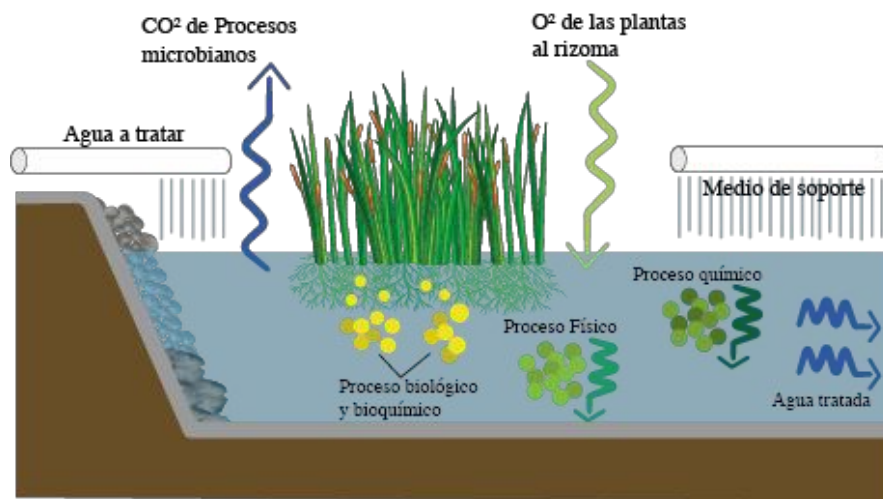


Ilustración 3. Principales componentes y procesos depurativos en humedales artificiales. Adaptado de (Luna Pabello & Aburto Castañeda, 2014).

Estos componentes depuran el afluente que ingresa al sistema, eliminando gran cantidad de materia orgánica, sólidos suspendidos, Nitrógeno, Fósforo, metales pesados y patógenos, a través de diferentes proceso biológicos, en mayor o menor cantidad, según el tipo de humedal construido (Torres Harker, 2016). Los sistemas de humedales construidos o artificiales (HA), según (Kadlec & Wallace, 2009), pueden ser de flujo Subsuperficial (HASFSS) y de flujo superficial (HAFS). Sin embargo, también existen humedales de flujo vertical subsuperficial (VSF) y humedales que tienen flujo horizontales y verticales pero que operan e etapas diferentes, denominados humedales híbridos (Torres Harker, 2016).

5.3.6 Humedales Construidos de Flujo Subsuperficial.

Consisten en canales excavados con un fondo impermeable que puede ser arcilla compacta o geomembrana, rellenos de un medio de soporte poroso que generalmente es grava o arena de 5 - 15 mm de diámetro, donde se planta la vegetación y fluye horizontalmente el agua, manteniéndose por debajo de la superficie del medio poroso (entre 0,1 a 0,15 m). (Brand Torres, 2014), en la Ilustración 4 se representan estos componentes.

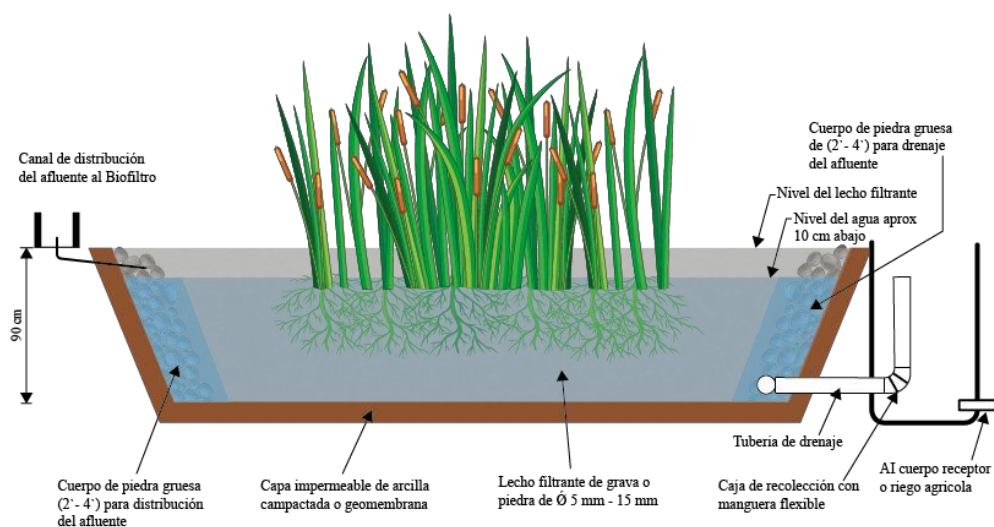


Ilustración 4. Humedal de flujo sub-superficial. Adaptado de Foidl, 1999.

5.3.7 Humedales Construidos de Flujo Superficial.

En este tipo de humedal, el agua residual circula a través de los tallos y raíces de la vegetación emergente, de manera continua y manteniendo el nivel del agua sobre el suelo aproximadamente entre 30 y 40 cm. (Brand Torres que cita a Tchobanoglous, Burton, & Stenser, 1998). Son sistemas inundados con espejo de agua expuesto al ambiente y acompañada de una extensa vegetación hidrófila (Luna Pabello & Aburto Castañeda, 2014). En la ilustración 5, se representan estos componentes.

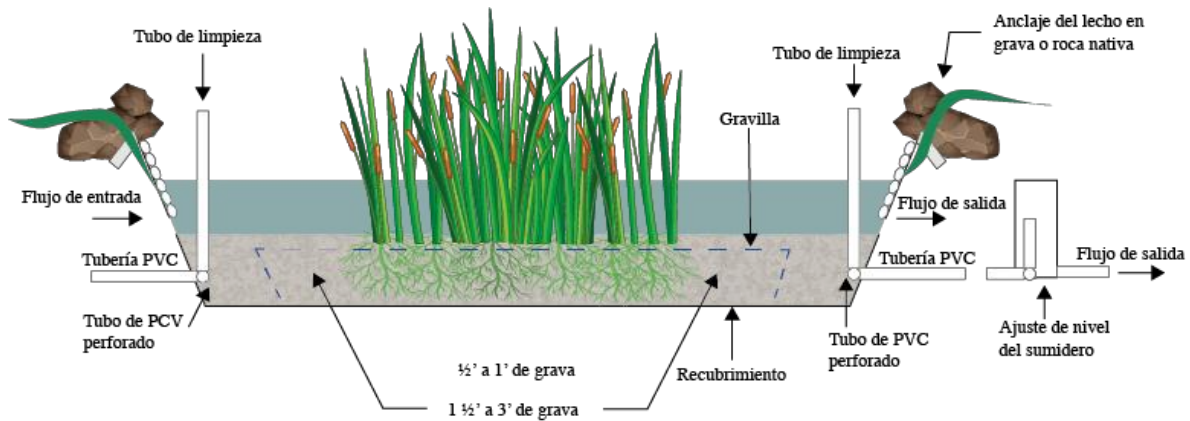


Ilustración 5. Humedad de flujo superficial. Adaptada de Foidl, 1999.

Según D. Bernal et al., 2008, si se comparan estos dos sistemas, los de flujo sub-superficial son más efectivos que los de flujo superficial para remover contaminantes a altas cargas de aplicación, además éstos requieren mayor área que los primeros, bajo las mismas condiciones de operación (Brand Torres que cita a Tchobanoglous, Burton, & Stenser, 1998).

La vegetación susceptible de ser incorporada a estos sistemas, dependerá de la concentración de contaminantes orgánicos o carga orgánica influente (Luna Pabello & Aburto Castañeda, 2014). Según el tipo de macrófitas (plantas acuáticas) que se emplean en el funcionamiento de los humedales, pueden ser fijas al sustrato (enraizadas) o macrófitas flotantes libres. En la Ilustración 6, se esquematiza la clasificación de los humedales artificiales, según el tipo de macrófita que empleen. (Delgadillo et al., n.d.) y en la Ilustración 7, se muestran los tipos de macrófitas.

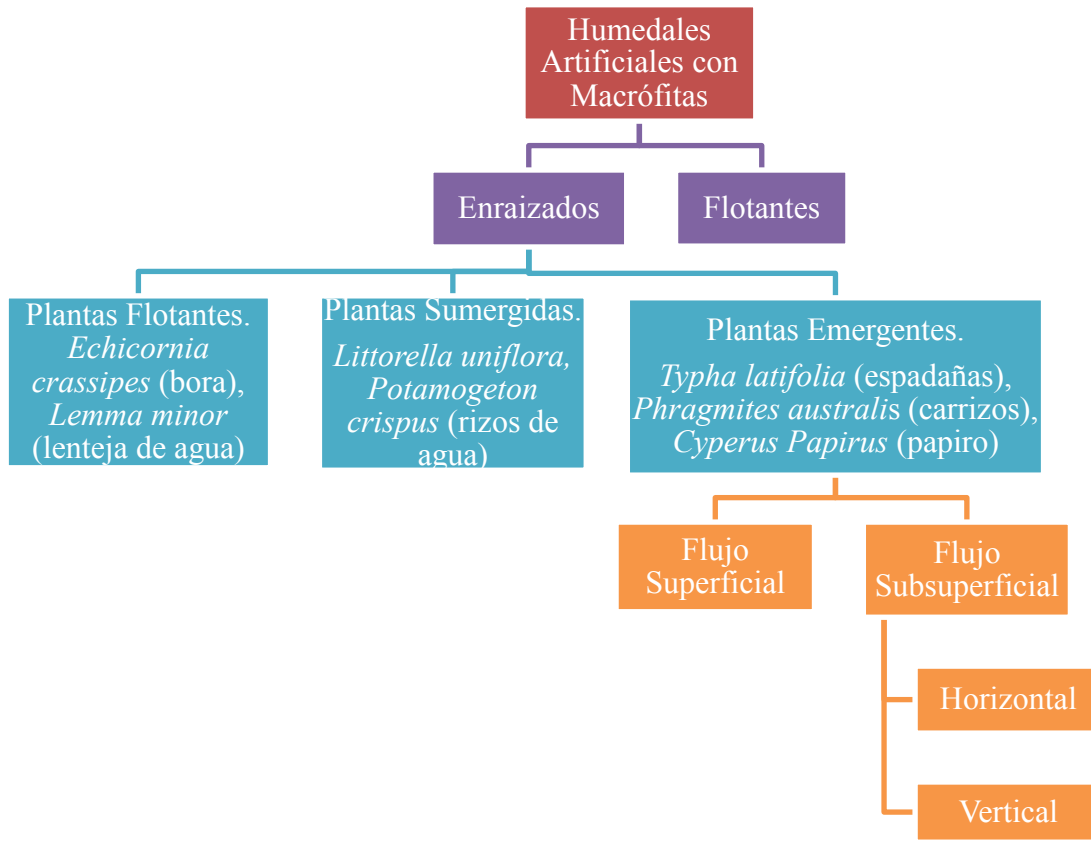


Ilustración 6. Clasificación de humedales artificiales con macrófitas. Adaptado de (Delgadillo et al., n.d.).

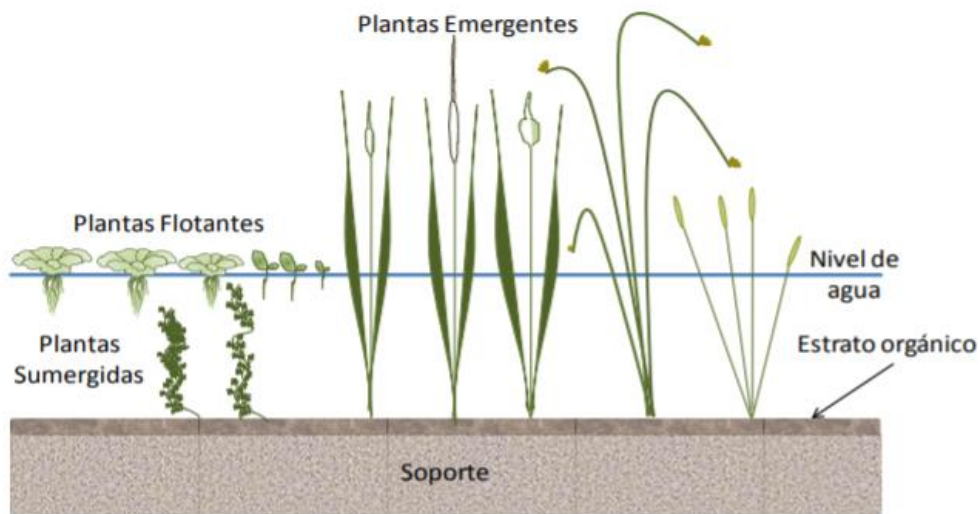


Ilustración 7. Tipos de macrófitas. Tomado de (Pérez López, 2009).

Los humedales artificiales construidos, específicamente en el tratamiento de aguas lluvias, contribuyen a la remoción de materia orgánica (DBO₅), sólidos suspendidos totales (SST) y organismos patógenos, Nitrógeno, Fósforo, metales pesado y componentes orgánicos refractarios (Pérez López, 2009).

5.4 Cálculo de la Escorrentía

La escorrentía es el flujo proveniente de la precipitación que llega a alimentar las corrientes superficiales, continuas o intermitentes de una cuenca. Según su procedencia, ésta puede clasificarse como (i) superficial o directa, (ii) hipodérmica o subsuperficial, y (iii) subterránea. Para este estudio, se analizará la escorrentía superficial.

La escorrentía se puede calcular mediante varios métodos entre los que se encuentran el método racional, el método Soil Conservation Service (SCS), mediante hidrogramas y mediante el Modelo de Gestión de Aguas Pluviales (SWMM) (Quintero Arias, 2018).

5.4.1 Método Racional.

Para efectos de esta investigación se empleó el método racional para determinar el caudal máximo (Q)(L/s) de descarga a una cuenca hidrográfica, mediante la ecuación (1), donde C es el coeficiente de escorrentía, I es la intensidad promedio de las lluvias (L/s.ha) y A es el área de la cuenca de drenaje en (ha)(López, 2009). Si A está dado en km², I en mm/h y Qp en m³ /s, la ecuación queda igual a: $Q = 0.278 C i A$ (Manual de Invias).

$$Q = C x I x A \quad (1)$$

5.4.2 Relaciones Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF)

Para el diseño, se deben determinar el o los eventos de lluvia que inciden. Las curvas IDF permiten escoger dicho evento con la intensidad, período de retorno y sitio de estudio (Chow *et al.*, 2000). La ilustración 8, muestra un ejemplo de curvas IDF:

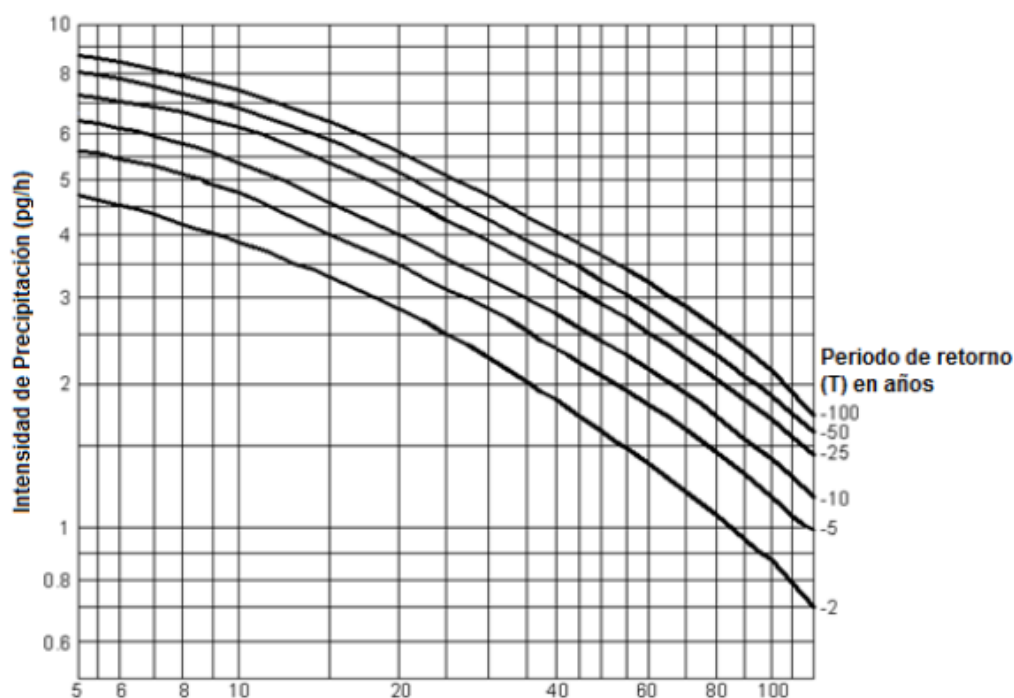


Ilustración 8. Curvas intensidad-duración-frecuencia para lluvia máxima en Chicago, Estados Unidos (Chow *et al.*, 2000).

La intensidad promedio se representa en el eje Y, y se entiende como la tasa temporal de precipitación; la duración del evento se representa en el eje X, y cada curva relaciona el periodo de retorno del evento de diseño, con una duración y una intensidad dada. (Chow *et al.*, 2000; Vanegas Tamayo & Flórez Vitola, 2012).

La intensidad promedio se calcula a partir de siguiente ecuación (2):

$$i = \frac{P}{Td} \quad (2)$$

dónde

P: Profundidad de lluvia (precipitación) (mm)

Td: Duración del evento P (h)

5.5 Cálculo demanda de caudales del sistema de aprovechamiento de aguas lluvias

Para determinar la demanda de agua, que se podrá sustituir con agua lluvia, pueden adaptar y emplear diferentes métodos, existen de tipo empírico, semiempírico y probabilístico (Nelson Yovani et al., 2006), los cuales pueden considerar el número y tipo de aparatos sanitarios, el uso (público o privado) y la cantidad de descargas. A continuación, se presentan algunos.

5.5.1 Método Racional o Español.

En este método de tipo semiempírico, la demanda o caudal máximo probable (Qmp) se obtiene de la sumatoria de caudales de los diferentes aparatos de fontanería, en este caso aparatos sanitarios, se suman y se multiplican por un factor de simultaneidad (K1) y se calcula mediante la ecuación (3) (Nelson Yovani et al., 2006)

$$K1 = \frac{1}{\sqrt{(n - 1)}} \quad (3)$$

Dónde:

n= Número de aparatos conectados al sistema

5.5.2 Método Hunter (NTC 1500).

En este método, de tipo probabilístico, se calcula el caudal determinado por Roy Hunter mediante una unidad de consumo según la forma de descarga (fluxómetro o de tanque) y el uso (público o privado) de cada aparato sanitario. Las principales variaciones de este método respecto al original, fueron la duración de uso de las válvulas de tanque y el caudal del aparato

(Alex Javier, 2014), ya que estos parámetros han cambiado debido al uso de aparatos fluxómetro economizadores de agua. Los valores presentados de este método son aceptados por el Código de Fontanería Colombiana (NTC 1500 de 2004), su unidad es en litros por segundo (L/s). Para calcular el caudal máximo probable (Qmp), se totaliza el número de unidades de consumo del edificio teniendo en cuenta los datos de la ilustración 9 y tabulados en el Anexo 1, y se ajusta el caudal por el factor de simultaneidad (f), mediante la fórmula (4).

$$f = \frac{1}{(n - 1)} \quad (4)$$

Dónde:

n= Número de aparatos conectados al sistema

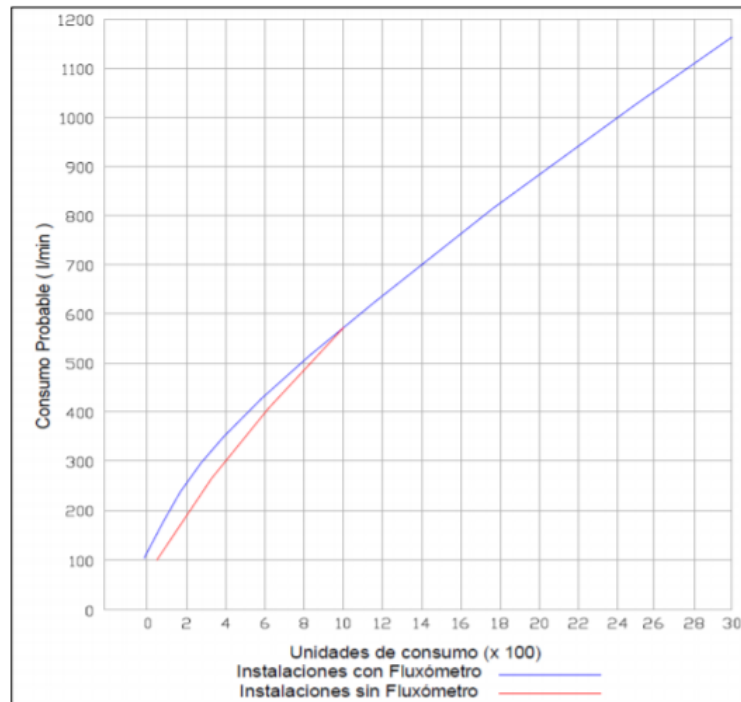


Ilustración 9. Curva de Demanda – Gráfica de Hunter Modificado. Tomado de (Castro et al., 2006).

5.5.3 Método Hunter UNAL.

Corresponde a un ajuste al Método de Hunter, antes mencionado, realizado por profesores de la Universidad Nacional (Castro et al., 2006) mediante una investigación en la cual se revisan las condiciones en 8 diferente edificaciones de Colombia, y el cual está sujeto a modificaciones y/o comprobaciones. Este método difiere del anterior, en la disminución en el tiempo de uso y llenado de las unidades de tanque y del caudal promedio de los aparatos, haciendo que la simultaneidad en el uso sea menor y se presente menor variación ante una mayor cantidad de aparatos instalados, representado gráficamente, en la Ilustración 10.

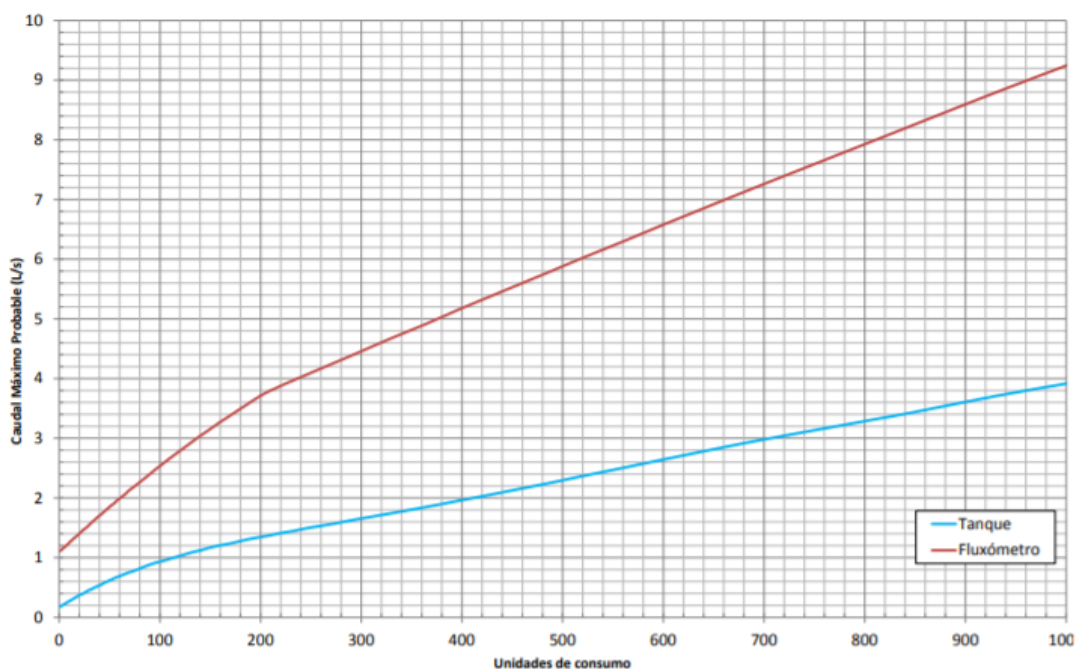


Ilustración 10. Método Hunter UNAL. Tomado de (Alex Javier, 2014).

5.5.4 Metodología LEED® (Leadership in Energy and Environmental Design).

Adicionalmente a los métodos antes mencionados, existe desde 1993 y creado por el Consejo de la Construcción Ecológica de los Estados Unidos (U.S. Green Building Council, USGBC), un estándar enfocado a la sostenibilidad de las edificaciones a lo largo de todo su ciclo de vida, desde su concepción, diseño, construcción, operación, rehabilitación y/o demolición,

denominado LEED® (Liderazgo en Energía y Diseño Ambiental) (U.S. Green Building Council, Inc., n.d.-b). Los lineamientos que componen este estándar buscan evaluar y asignar una puntuación por cumplimiento a los proyectos, en las categorías sitios sostenibles, con eficiencia en el uso del agua, calidad del ambiente interior, materiales y uso de recursos, eficiencia energética, atmósfera e innovación en el diseño. La puntuación se asigna en cuatro niveles, de menor a mayor: Certificado LEED®, Plata, Oro y Platinum.

En la categoría de Eficiencia de agua (Water Efficiency, WE) que se centra en obtener reducciones en el uso de agua potable, se puede determinar el consumo de agua para uso sanitario, determinando el uso y tipo de los aparatos, el gasto o consumo de cada uno y las frecuencias de uso para hombres y mujeres, empleando la Tabla 3.

Tabla 3.

Usos de accesorios predeterminados por tipo de ocupación por día. Tomado de (U.S. Green Building Council, Inc., n.d.-b)

Tipo de Accesorio	FTE	Estudiante/visitante	Cliente minorista	Residente
Usos/Día				
Inodoro				
- Mujer	3	0,5	0,2	5
- Hombre	1	0,1	0,1	5
Orinal				
- Mujer	0	0	0	n/d
- Hombre	2	0,4	0,1	n/d

Para determinar la demanda empleando este estándar, se deben identificar los ocupantes o usuarios del edificio y los visitantes. Según la Guía de conceptos Básicos de edificios verdes y LEED® (U.S. Green Building Council, Inc., n.d.), los ocupantes son los empleados de tiempo parcial y tiempo completo, los residentes, voluntarios que habitualmente utilizan el

edificio, estudiantes de escuelas primarias y secundarias, huéspedes de hoteles y pacientes hospitalizados. Y los visitantes, o transeúntes que emplean el edificio intermitentemente, son los clientes de superficies comerciales, pacientes externos, voluntarios que visitan periódicamente las instalaciones y estudiantes de educación superior. Sin embargo, para este estudio y debido al comportamiento de la población estudiantil, estos se considerarán como ocupantes de tiempo parcial.

Para calcular el total de empleados tiempo completo y de tiempo parcial, se utiliza la Equivalencia de Tiempo Completo (ETC), mediante la ecuación (5) (Edge, 2018). De esta forma, se pueden identificar los empleados de ETC, añadiendo a los empleados de tiempo completo los empleados de tiempo parcial, ajustándolos la jornada laboral.

Empleado ETC =

$$\text{Empleados tiempo completo} + (\Sigma \text{ horas diarias empleados tiempo parcial} / 8) \quad (5)$$

6. METODOLOGÍA

El desarrollo metodológico de esta investigación está resumido en el flujograma que se muestra en la ilustración 11. Éste se dividió en tres fases, una primera de tipo exploratorio, en la cual se realizó la revisión de la literatura y antecedentes, y así definir las variables dependientes e independientes. En la fase descriptiva, se identificó la zona de estudio y, los datos hidrológicos tales como, las precipitaciones de los últimos 25 años en el área de estudio, determinando el año típico promedio con los promedios mensuales multianuales y un año representativo con los valores mínimo y máximo. También se identificaron las curvas de Intensidad, Duración y Frecuencia (IDF), y se determinaron los criterios para evaluar las posibles alternativas o escenarios, teniendo en cuenta las variables de diseño y aspectos técnicos, hidráulicos, ambientales, sociales, de planeación, económicos, y de operación y mantenimiento, identificados por Martin *et al.* (2007).

Las variables independientes del diseño del SUDS a evaluar en este proyecto fueron: la precipitación, las áreas impermeables, la topografía del terreno y el volumen de agua disponible para reutilización.

Las variables dependientes fueron: la calidad del agua lluvia recolectada, el caudal de escorrentía, la relación beneficio costo de la inversión y costos de mantenimiento y operación.

A su vez, para la fase descriptiva de la propuesta metodológica de esta investigación se tomó como referencia la metodología de selección y optimización de SUDS propuesta por (Muñoz Triviño, 2016). En la Ilustración 12 se presenta el esquema general para este desarrollo, así como algunos de los factores más relevantes para el desarrollo de sus componentes.

Finalmente, una tercera fase explicativa, se analizaron los resultados obtenidos, y sobre la alternativa de diseño seleccionada, se determinaron costos de inversión, tasa de retorno de la inversión, relación beneficio costo y costos de mantenimiento y operación.

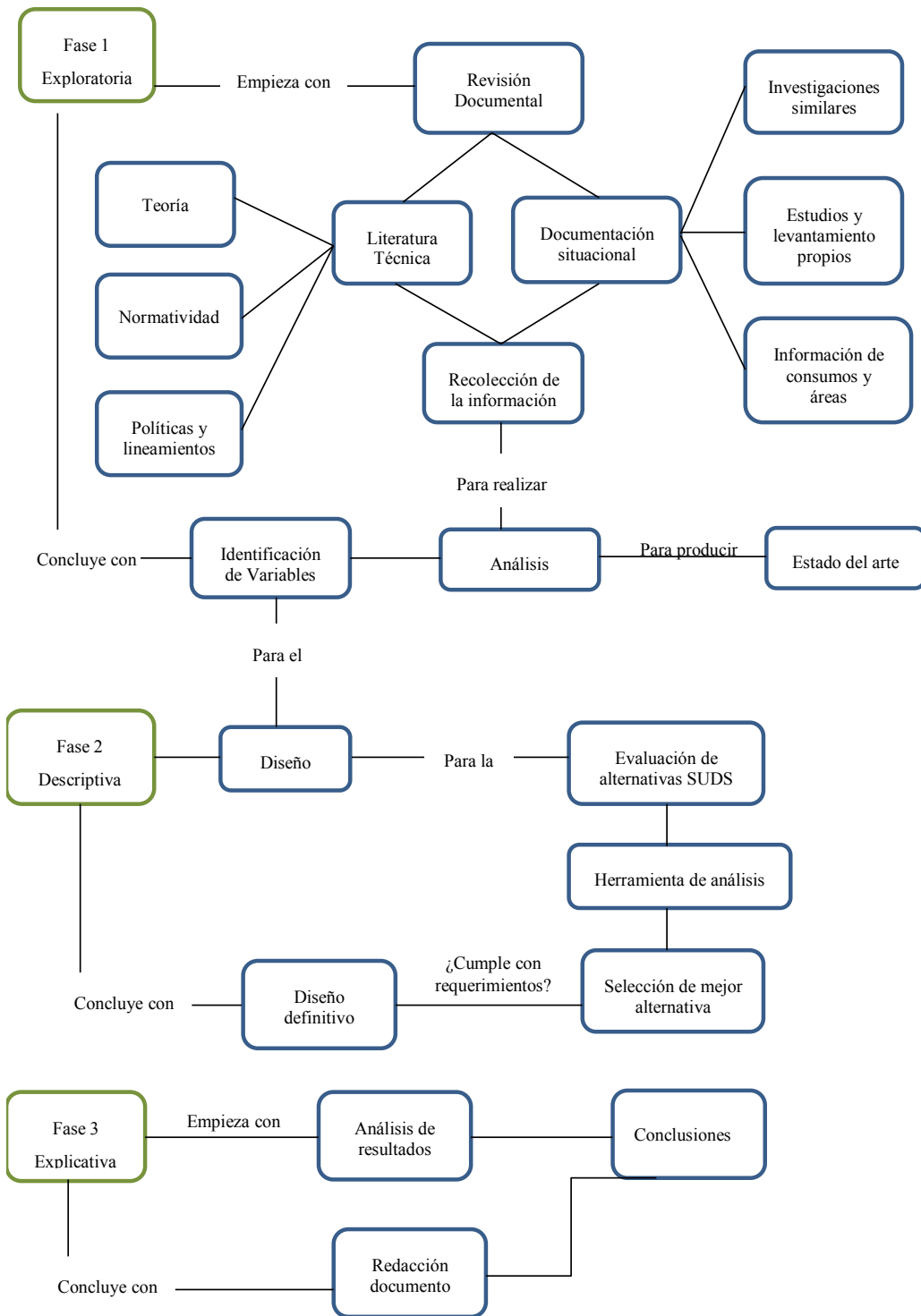


Ilustración 11. Flujograma de la metodología empleada.

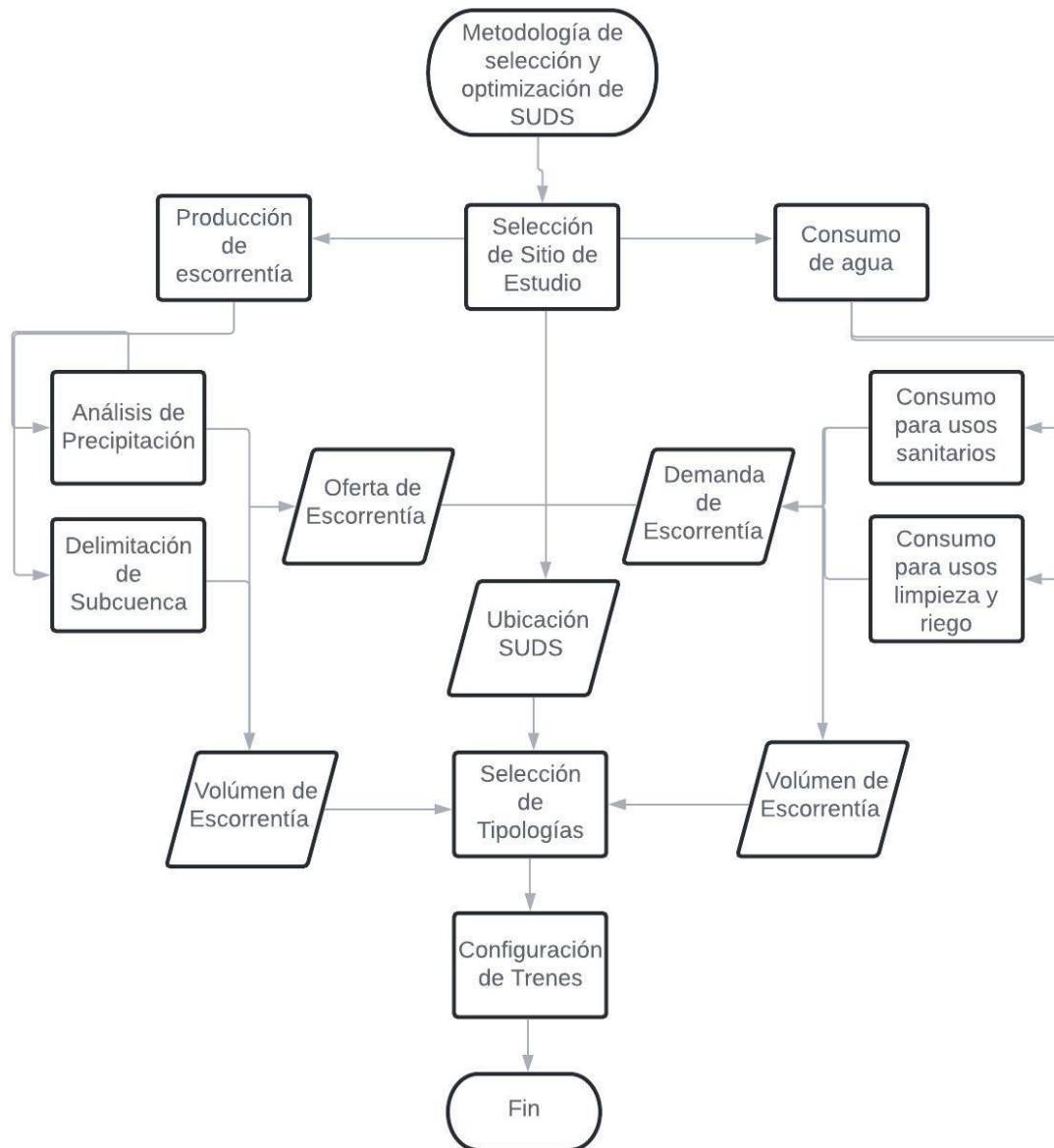


Ilustración 12. Propuesta metodológica Fase Descriptiva. Adaptada de (Muñoz Triviño, 2016)

6.1.1 Selección del sitio de Estudio.

Con base en la Guía de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible, Documento Técnico de soporte EAB; la selección de tipologías y trenes de SUDS, implica el análisis del sitio de implementación, con el fin de establecer las áreas potenciales escogidas según los objetivos propuestos en el alcance, así como las limitaciones físicas para implementar algunas

tipologías. Adicionalmente, para esta evaluación se tuvieron en cuenta cinco criterios: (i) mejoramiento de la calidad de agua, (ii) control de volumen de agua lluvia, (iii) amenidad, (iv) mantenimiento y (v) costo. A su vez, pueden resultar trenes de SUDS según la cantidad de tipologías del tren y los procesos que sean más convenientes en el lugar de implementación, como son transporte, almacenamiento, infiltración y aprovechamiento de escorrentía (riego u otros usos).

Tomando la caracterización de consumo de agua en el edificio Almendros (Valencia, 2011) representada en la ilustración 13, y teniendo en cuenta que el 48% del consumo total de agua de la PUJ Cali es producto de actividades que no requieren el uso de agua potable, con esta investigación se determinaron los consumos de agua para dichas actividades, específicamente, para descarga de sanitarios y orinales, limpieza de pisos y riego de jardines. Dado que los edificios Samán y Almendros presentan los mayores consumos de agua en el campus de la PUJ Cali (Valencia, 2011) por tener las mayores ocupaciones, los estudios a desarrollar en el presente trabajo se desarrollarán para el edificio Almendros, debido a que es que tiene mayor consumo de agua por uso de baños, representados en un 20% del consumo total por edificios en la PUJ Cali, según (Valencia, 2011).

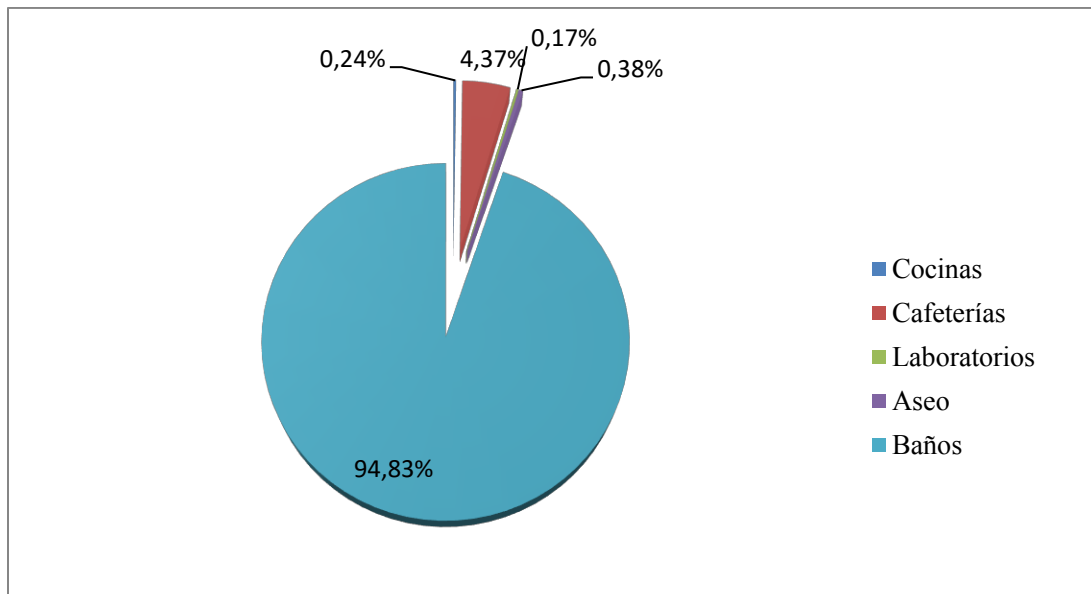


Ilustración 13. Caracterización consumo de agua en el Edificio Almendros. Tomado de (Valencia, 2011).

Una vez determinado el Edificio Almendros como sitio para la implementación de las posibles tipologías de SUDS, se identificaron las áreas potenciales de implementación y la información disponible en cuanto nivel freático, tasa de infiltración, distancia a cimientos y tipo de espacio disponible (Centro de Investigación en Ingeniería Ambiental CIIA, 2017). Se determinó que el área disponible era la circundante al Edificio Almendros, para ello se revisaron los planos suministrados por el área de Recursos Físicos de la PUJ Cali con los que se pudo identificar niveles, pendientes, distancias y se pudo revisar el estudio de suelos realizado para el edificio continuo (EDUCON), en el cual no se identificó el nivel freático de la zona hasta la profundidad de exploración, seleccionando el costado posterior del edificio señalado en la ilustración 14.



Ilustración 14. Selección Ubicación SUDS. Tomado de Plano General EIR 2-11 de la Pontificia Universidad Javeriana Cali

6.1.2 Determinación Consumo de Agua.

En la PUJ Cali no existen registros de consumo en el edificio Almedros, ya que no cuenta con medidores de agua, por lo cual se realizaron proyecciones de consumo con base en la población que utiliza las instalaciones del edificio en estudio.

6.1.3 Población de Estudio.

El Edificio Almedros tiene un área total construida de 7.809,36 m², según Javeriana en Cifras; consta de tres pisos, en el primero se encuentran ubicadas la emisora y el estudio de televisión junto con oficinas de la carrera de Comunicación social, en el piso 2 se encuentra la sala de consulta de la carrera de Psicología junto con 2 oficinas; el edificio cuenta en su totalidad con 19 salones, 1 auditorio, 19 laboratorios, 12 oficinas, con espacios para usos de servicios, taller y consultorios médicos (Javeriana en Cifras); patio interno con jardín, 5 cafeterías, 9 baños distribuidos en 6 para estudiantes, 2 en las instalaciones de comunicaciones y 1 de uso de psicología; alrededor del edificio existe zona verde con jardines, pero sin sistema de riego instalado.

La PUJ Cali contaba con 8338 estudiantes matriculados a 2019-2, distribuidos en 6957 de pregrado y 1381 de posgrado; con 828 profesores hora cátedra y 382 de planta (a 2019-2), según la última Ficha técnica de Tendencia histórica de matriculados (Javeriana en Cifras).

6.1.4 Demanda doméstica de agua.

Para determinar la demanda de agua, se debe determinar la dotación per cápita, la cual según la NTC 1500, es de 50 litros/persona/día para instituciones educativas, sin embargo en muchos casos este valor no se ajusta a la realidad, estando por encima de los reales, es por esto, que como dotación se escogió la analizada en el Programa de uso eficiente y ahorro de agua (PUEEA), correspondiente a 31,4 litros/persona/día, con este valor y empleando la ecuación (6), se calculó la demanda de agua doméstica en (l/s) de agua en el Edificio Almendros.

$$Demanda = \frac{P \times D_{bruta}}{86400} \quad (6)$$

Donde, P es la población en habitantes o usuarios y que corresponde al promedio diario de ocupación del Edificio Almendros, evaluado en los últimos 4 años, y la Dotación Bruta corresponde a 31,4 litros/persona/día, obteniendo una demanda de 0,66 l/s.

$$Demanda = \frac{1816 \text{ personas} \times 31,4 \frac{l}{\text{persona}} / \text{día}}{86400} = 0,66 \text{ l/s}$$

6.1.5 Cálculo de demanda de agua a reemplazar por agua lluvia.

Para calcular el consumo de agua en descarga de baños, se identificó la máxima población de estudiantes de pregrado y posgrados, y según el género, la cantidad de usos por días de sanitarios y orinales. (U.S. Green Building Council, 2012). También se incluyeron a los estudiantes que hacen uso de los laboratorios de psicología % hombre y mujeres.

Debido a que en el edificio Almendros no existen medidores de agua, fue necesario estimar la población y el caudal, mediante la organización y análisis de los datos de ocupación de los

espacios del edificio, a través de los registros de reservas generados por el software Discover de la oficina de Registro académico y Admisiones de la PUJ Cali. Para la clasificación y análisis de dichos datos, se identificaron reservas semestrales, las cuales indican la ocupación de un salón con la población matriculada en una franja y en ciertos días de la semana a lo largo de todo el semestre; reservas puntuales, que indican la ocupación de un espacio y una franja de tiempo en una fecha específica; y reservas continuas pero interrumpidas, las cuales se asignan a un espacio por un período de tiempo pero cambian de espacio en algunas franjas de tiempo. Siendo estas últimas, las más difíciles de identificar y representan alrededor de un 20% del total de reservas por semestre, es por esto que para identificar la población se repitió el análisis que hace la oficina de Registro Académico y Admisiones, y fue generar una ventana de tiempo, es decir, se analizaron las reservas identificadas en un período tipo del semestre, en este caso se tomó la cuarta semana luego del inicio de clases en cada período de análisis, porque, según la oficina de Registro Académico, en dicha semana la población de estudiantes y la asignación de espacios está estabilizada, en otras palabras, para ese momento, ya se cuenta con el total de estudiantes matriculados y las reservas ya están programadas.

El análisis de la población estudiantil se realizó desde 2016-1 hasta 2019-2, y no se tuvo en cuenta la ocupación de los espacios para eventos puntuales, se tomaron como ventana de análisis los períodos por semestre, presentados en la Tabla 4.

Tabla 4.

Períodos de estudio para el cálculo de la población.

Período	Inicio de Clases	Semana de Análisis
2016-1	Enero 25	Febrero 15 – Febrero 20
2016-2	Julio 25	Agosto 8 – Agosto 13
2017-1	Enero 23	Febrero 13 – Febrero 18
2017-2	Julio 24	Agosto 14 – Agosto 19
2018-1	Enero 22	Febrero 12 – Febrero 17
2018-2	Julio 23	Agosto 13 – Agosto 18
2019-1	Enero 14	Febrero 4 – Febrero 9
2019-2	Julio 16	Agosto 5 – Agosto 10

La cantidad de estudiantes se determinó por día y por franja horaria en los períodos académicos antes mencionados en la semana tipo, la ilustración 15 permite evidenciar los resultados.

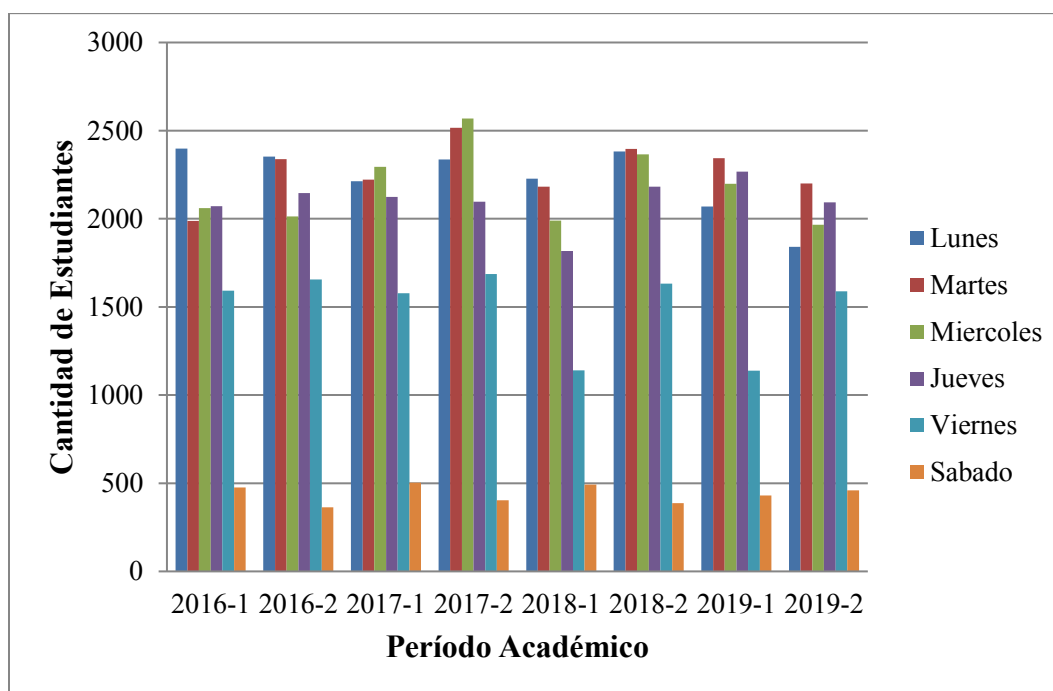


Ilustración 15. Total de estudiantes de Pregrado y Posgrado en el Edificio Almendros en los períodos 2016 - 2019.

El Edificio Almendros cuenta con espacios asignado para las carreras de psicología y comunicación social, pero para este estudio sólo se considerarán las personas de planta dado

que la información de ocupación de estos espacios no está incluida, a la fecha, en el sistema Discover, las reservas se manejan manualmente o con PeopleSoft y estos registros están por semestre y por cantidad de préstamos de libros realizados, las cuales son 2 en psicología y 8 en comunicación.

En el edificio se localizan 5 cafeterías: La frutería con 7 personas, Tekers con 4 personas, Charlott con 6 personas, Wok Express La Boquería con 5 personas y La Merkatería con 1 persona.

Dentro del cálculo de consumo se incluyeron las cinco cafeterías que se encuentran ubicadas en el edificio Almendros y que utilizan los baños de este, con la distribución poblacional descrita en la tabla 5, teniendo en cuenta desde que iniciaron operación y la jornada diaria.

Tabla 5.

Distribución Poblacional Cafeterías Edificio Almendros.

Cafetería	Mujeres	Hombres	Inicio de Operación
La Frutería	4	3	2004
Tekers	4	0	2015
Charlott	4	2	2006
Wok Express La Boquería	5	0	2019-2
La Merkatería	1	0	2019-2

Con esta información, se determinó la cantidad total de estudiantes y personas diario con base en la ventana semanal de la revisión de datos, que han ocupado y utilizado los servicios del Edificio Almendros en los últimos 6 períodos académicos, desde el 2016 hasta el 2019, identificando en promedio 1816 personas por día. Haciendo el cálculo de ocupación se determinan los valores mensuales representados en la ilustración 16.

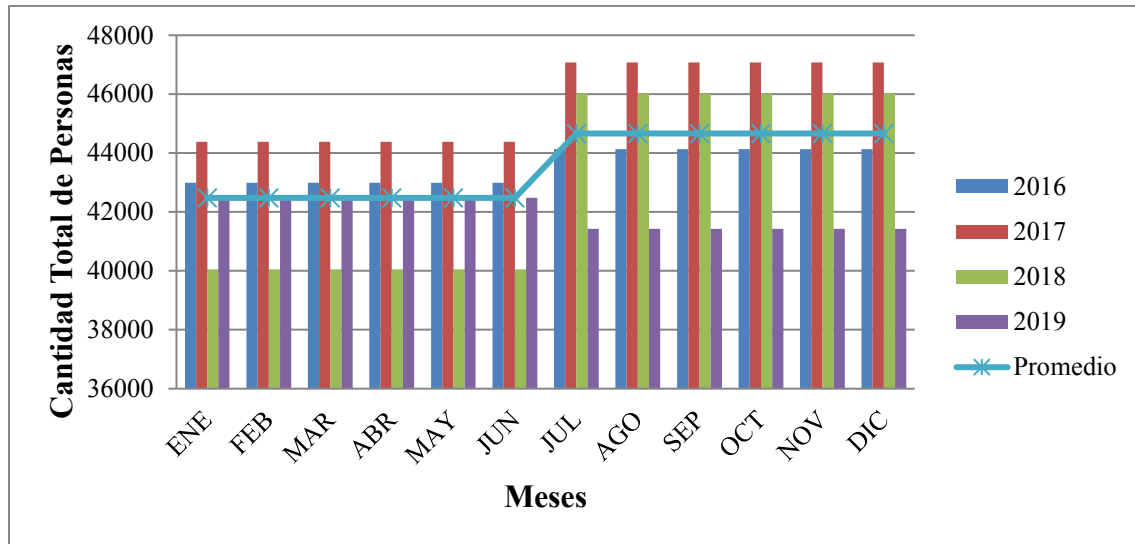


Ilustración 16. Cantidad Total de personas en el Edificio Almendros en los períodos 2016-2019.

6.1.6 Cálculo de caudal máximo probable.

El caudal máximo probable (Q_p) es el caudal más alto que probablemente se puede presentar en cada tramo de tubería y con el que se puede diseñar el sistema de distribución determinando el diámetro de cada tramo de tubería. También puede entenderse como el caudal efectivo de la tubería con el uso normal de los equipos sanitarios, teniendo en cuenta que estos no funcionan al mismo tiempo, por lo que se involucra un factor de simultaneidad relacionado con el número de aparatos instalados, ya que a mayor cantidad de aparatos instalados, disminuye la probabilidad de su uso simultáneo (Alex Javier, 2014).

Se realizaron los cálculos por el Método Racional, el Método de Hunter (NTC 1500) y el Método Hunter UNAL. Estos resultados, se compararon y analizaron a fin de obtener el caudal máximo probable (Q_p) para lo que se identificaron el tipo y número de aparatos sanitarios del Edificio Almendros, relacionados en la Tabla 6.

Tabla 6.*Inventario de Aparatos sanitarios Edificio Almendros.*

Tipo de Accesorio	Públicos	Privados
Inodoro		
- Mujer	10	2
- Hombre	7	1
Orinal		
- Mujer	0	0
- Hombre	9	1

Con el Método Hunter modificado para Colombia y Hunter UNAL, y partiendo de que todos los aparatos sanitarios son de fluxómetro, de acuerdo con su uso (público o privado), se estableció el consumo máximo probable, al sumar las unidades y buscar su equivalente en L/s en las respectivas curvas de caudal máximo, Ilustración 6 y 7; y multiplicarse por el factor de simultaneidad (f), calculado según la ecuación (4).

$$f = \frac{1}{(30 - 1)} = 0,0345$$

También se calculó el factor de simultaneidad (K1) empleando la ecuación (3) para realizar los cálculos con el Método Racional, antes descrito.

$$K1 = \frac{1}{\sqrt{(30 - 1)}} = 0,186$$

Este resultado se aproxima a 0,2 tomando la recomendación de (Nelson Yovani et al., 2006) de que el valor de K1, por ningún motivo sea inferior a este valor.

En la tabla 7, se presenta se presenta la comparación de los resultados de los Métodos Racional, Hunter Modificado para Colombia y el Hunter UNAL.

Tabla 7.

Comparación resultados de Caudal Máximo Probable (Q_p) en (l/s) por los Métodos Racional, Hunter Modificado (NTC 1500) y Hunter UNAL.

Aparato Tipo de Uso	Sanitario (Fluxómetro)		Orinal (Fluxómetro)	
	Público	Privado	Público	Privado
Cantidad	14	3	8	1
Caudales Mínimos (Anexo 2)	0,95	0,95	0,1	0,1
Q_p (l/s) Método Racional	2,66	0,57	0,8	0,1
Total Q_p (l/s)			3,41	
Unidades de Hunter	10	6	10	10
Total Unidades de Consumo	140	18	80	10
Total Unidades			248	
Q_p (l/s) Hunter Modificado (NTC 1500)			4,71	
Q_p (l/s) Hunter UNAL			4,08	

Al totalizar los resultados se obtiene que, el consumo por el Método Racional es de 3,41 l/s, por el Método Hunter Modificado NTC (1500), es de 4,71 l/s y por el Método Hunter UNAL, es de 4,08 l/s. Con esto se pudo identificar que los tres métodos arrojan valores cercanos y se representaron en la Ilustración 17.

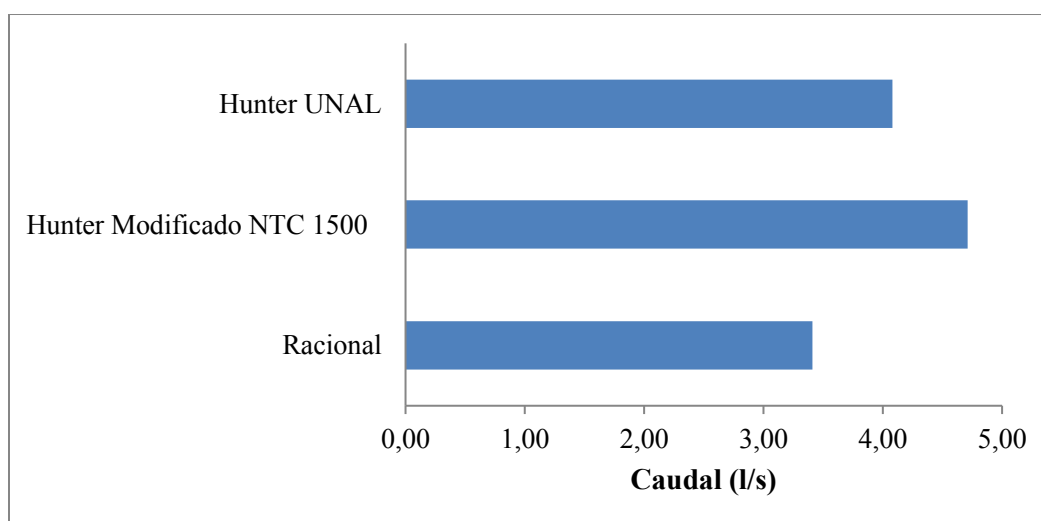


Ilustración 17. Comparación de los métodos para la determinación del caudal máximo probable en el Edificio Almendros.

6.1.7 Cálculo Consumo de agua.

El consumo diario o dotación, es el caudal de consumo en un día por habitante que presenta un tipo de edificación determinada. El RAS 2000 establece una dotación para uso escolar de educación media y superior igual a 25 Litros/estudiante/día. Por su parte, el código Colombiano de Fontanería NTC 1500, asigna un valor de consumo promedio diario de 50 Litros/persona/día. Sin embargo, teniendo en cuenta el Programa de Uso Eficiente y Ahorro de Agua (Pontificia Universidad Javeriana Cali, 2017), la dotación es de 31,4 Litros/estudiante/día.

Con este trabajo se determinó el consumo diario para usos sanitarios y limpieza de pisos, cuyo consumo se calculó para ser suplido por aguas lluvias.

Para calcular el consumo de agua para aseo de pisos se tomó el área de piso de todo el edificio por la frecuencia de lavado por el consumo estimado de agua para esta actividad. Para determinar dicho consumo se entrevistó a la señora Diana Villasmil prestadora de este servicio, quien informó que los pisos de corredores y salones se limpian dos veces al día (mañana y tarde), los tres pisos del edificio, y utilizan dos baldes de agua de 13 litros cada uno, en cada operación de limpieza, adicionalmente para el lavado de baños, el cual se realiza una vez al día, utilizan un balde de 13 litros.

De acuerdo con lo consultado con el área de recursos físicos, los jardines del edificio Almendros tanto al interior como al exterior no tienen sistema de riego, ni tampoco una rutina de riego, es decir, solo se riegan con el agua lluvia que cae en la zona.

6.1.8 Cálculo por Metodología LEED®.

Aplicando la ecuación (5) y con la información obtenida de la oficina de Registro Académico con la ocupación por franja horaria se determinaron los ocupantes ETC, correspondientes a

los colaboradores de Psicología, Comunicación, y personal de cafetería que ocupan el edificio Almendros tiempo completo, y la población estudiantil de pregrado y posgrados, según Anexo 3. Una vez se determinaron los ocupantes ETC, se realizaron los cálculos para determinar los consumos de agua potable al emplear por el uso y cantidad de sanitarios y orinales de fluxómetro en el Edificio Almendros, empleando los valores de la tabla 6 y con un gasto de 6 litros por descarga (LPD) para sanitarios de fluxómetro y de 3,8 litros por descarga (LPD) para orinales de fluxómetro, de acuerdo con los valores máximos establecidos en la NTC 1500. Los resultados se consignaron en la Ilustración 18.

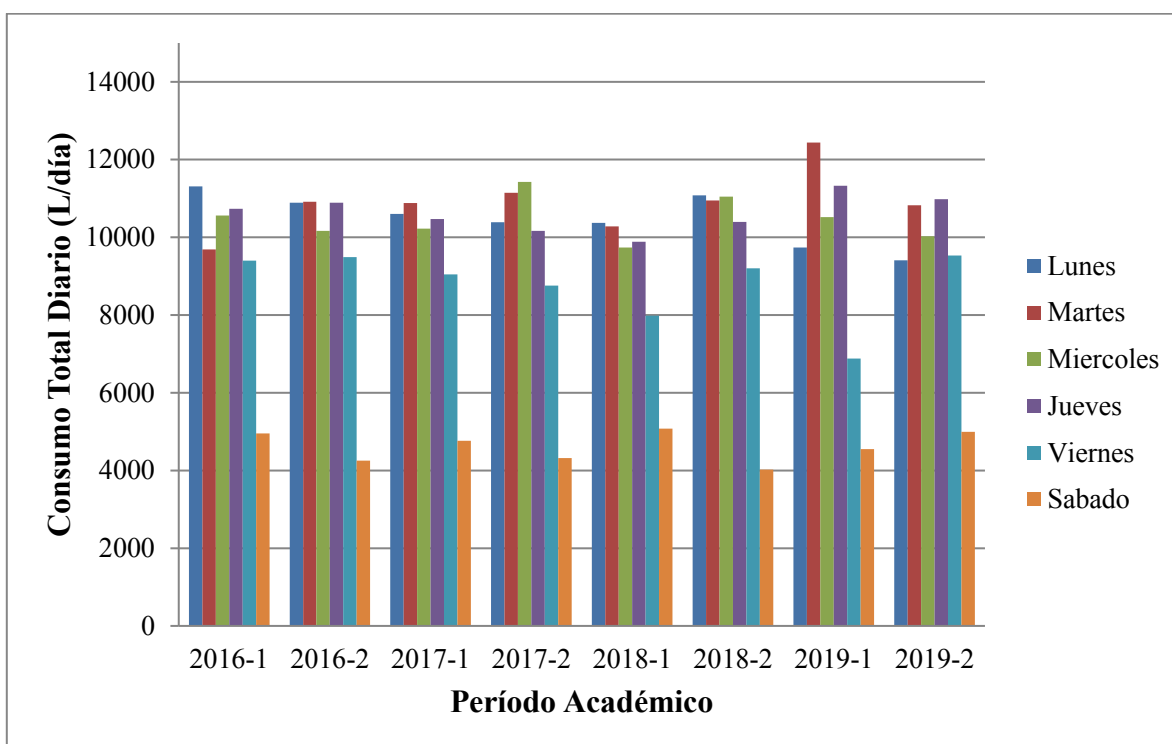


Ilustración 18. Consumo Total diario por uso de aparatos sanitarios por empleados y estudiantes en el Edificio Almendros en los períodos 2016-2019.

Con base en esto se obtuvo un promedio diario de consumo, según los períodos académicos analizados, de 9.318,67 l/día, equivalente a 0,11 l/s.

Con el fin de que este trabajo contribuya a la sostenibilidad del campus de la Pontificia Universidad Javeriana Cali y que pueda aplicar posteriormente, a un sello de certificación LEED® en la operación, se tomaron los resultados de consumo de agua bajo esta metodología. Con base en esto, se determinaron los consumos mensuales en metros cúbicos (m³) por mes, específicamente para usos sanitarios y para limpieza de pisos y baños del Edificio Almendros, mostrados en la Ilustración 19. Para cálculos posteriores se tomaron los consumos promedios.

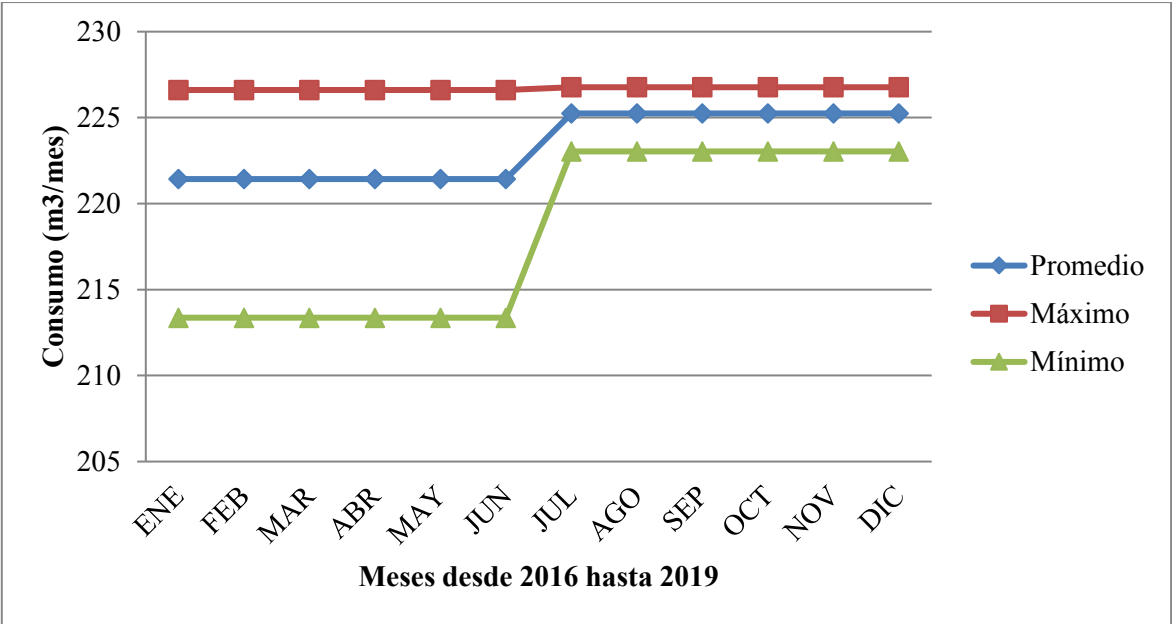


Ilustración 19. Consumo Máximo, Mínimo y Promedio Mensual por usos sanitarios y de limpieza desde 2016 hasta 2019.

6.1.9 Determinación de la oferta de agua lluvia.

Para determinar la oferta hídrica se identificó la información de la estación climatológica de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC Cañaveralejo- Edificio, coordenada este 1059854.91, coordenada norte 868389.07, de la cual se obtuvieron las precipitaciones máximas mensuales desde 1994 hasta 2019, representadas en la ilustración 20.

De la cual se puede identificar mayores precipitaciones entre abril y mayo, y menores, en los meses de junio y agosto, lo cual coincide con los históricos de los fenómenos de El Niño y la Niña (Castañeda, 2010).

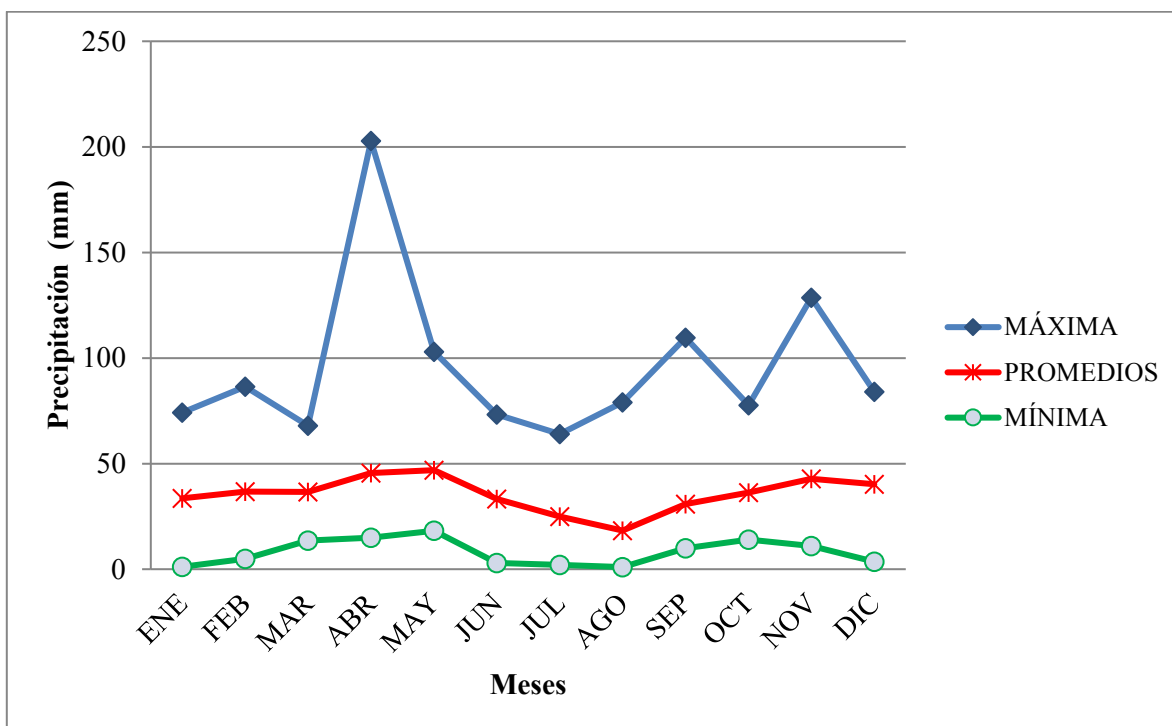


Ilustración 20. Precipitación Máxima mensual en 24 horas desde 1994 hasta 2019.

Con base en la información pluviométrica obtenida y empleando la metodología CEPIS propuesta en la Guía de diseño para captación del agua lluvia (Organización Panamericana de la Salud, 2004), se determinará la cantidad de agua captada para el área de techo determinada por mes, empleando la ecuación (7), como una modificación de la ecuación (1).

$$A_i = \frac{P_{pi} * C_e * A_c}{1000} \quad (7)$$

Donde, A_i en (m^3), representa la oferta del agua en el mes “i”, P_{pi} en (L/m^2), representa la precipitación promedio mensual; C_e , el coeficiente de escorrentía y, A_c en (m^2), representa el área de captación.

También se obtuvieron las precipitaciones promedio mensuales desde 1991 hasta 2019 provenientes de la estación climatológica de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC Cañaveralejo- Edificio, coordenada este 1059854.91, coordenada norte 868389.07, representadas en la Ilustración 15, y necesarias en el desarrollo de la metodología del CEPIS (Organización Panamericana de la Salud, 2004).

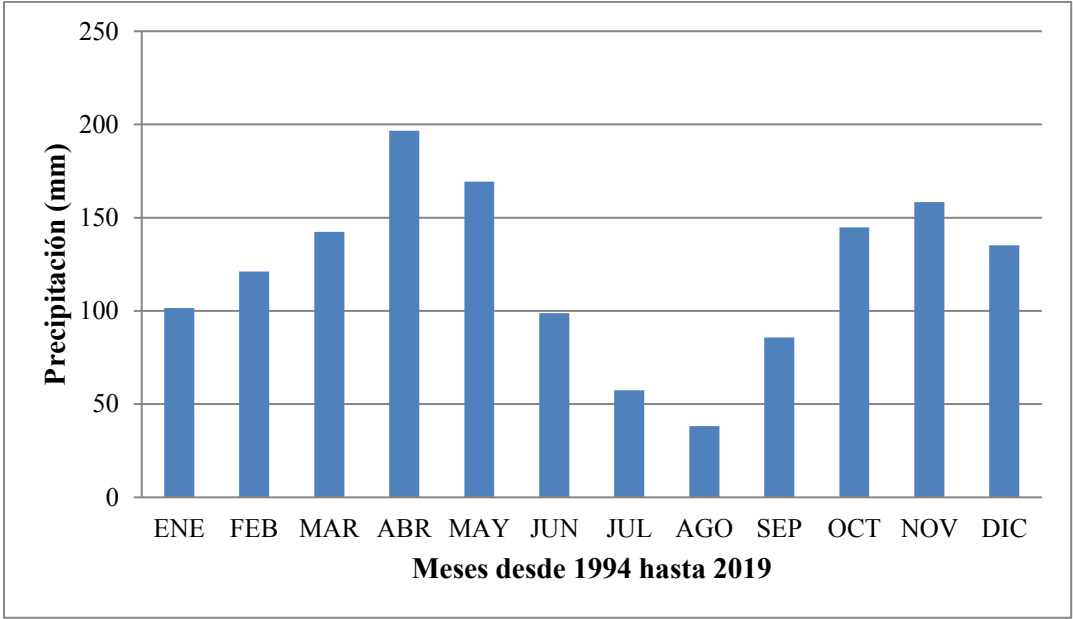


Ilustración 21. Oferta hídrica mínima, promedio y máxima mensual desde 1994 hasta 2019.

Considerando pérdidas anuales de un 20% debidas a la evaporación, a la textura del material del techo, a las pérdidas en canaletas y en el almacenamiento, y a la ineficiencia del sistema de captación según Abdulla y Al-Shareef (2006 y 2009). Considerando esto, la oferta disponible se afecta por dicho porcentaje y de esta forma no se sobredimensiona el sistema, de acuerdo con la ecuación (8).

$$A'i = Ai - \left[Ai * \frac{0.2}{12} \right] \tag{8}$$

Donde,

A'i: oferta de agua en el mes "i" en (m³) considerando las pérdidas.

A_i : oferta de agua en el mes “i” en (m^3)

Determinando la demanda mensual acumulada de agua potable en los usos estipulados y la oferta mensual acumulada de agua lluvia, y calculando la diferencia entre ellas, se podrá identificar el volumen de almacenamiento requerido en el mes (V_i), y posteriormente, con el cociente entre las mismas, calcular el potencial de ahorro (PPWS). Con este trabajo se busca obtener una disminución en el consumo de agua potable y contribuir al porcentaje de ahorro agua estipulado por la normatividad colombiana (Resolución 549 de 2015, n.d.).

6.1.10 Superficie de Captación.

El área de captación destinada para la recolección de aguas lluvias, corresponde a la cubierta o techo del Edificio Almendros, la cual cuenta con una pendiente adecuada ($>5\%$) (Pinzon et al., 2016). Para determinar el área de captación se calcularon las dimensiones de la cubierta del edificio en estudio, con un área de $2.603,12 m^2$ y un área efectiva de captación de $2.369,4 m^2$, indicada en la ilustración 22, obtenida de Planos Generales EIR 2-11, suministrado por Recursos Físicos y como Anexo 4 en este trabajo.

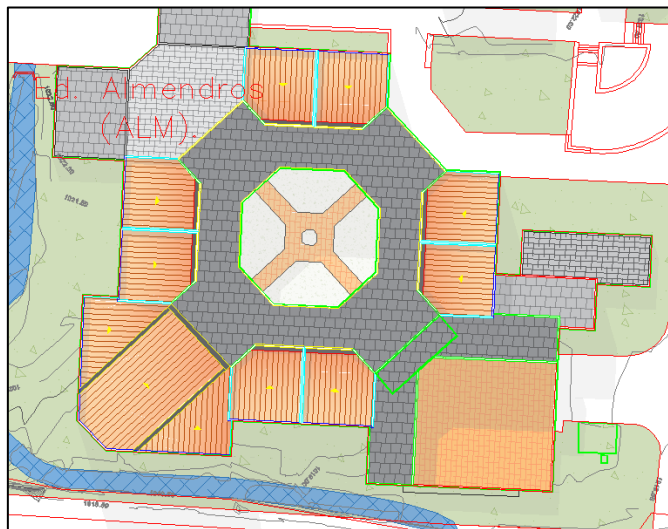


Ilustración 22. Área de cubierta efectiva para captación Edificio Almendros. Tomada de Plano General EIR 2-11 de la Pontificia Universidad Javeriana Cali

El techo en estudio cuenta con una superficie de fácil escurrimiento hacia el sistema de recolección y conducción existente, cuyo material es de concreto y teja de cemento, dado esto, el coeficiente de escurrimiento se determinó en 0,95, según (Monsalve Sáenz, 1995).

6.1.11 Recolección y Conducción.

Se identificaron cincuenta y dos (52) tragantes de 4 pulgadas cada uno y diecisiete (17) bajantes de aguas lluvias de 4 pulgadas de diámetro cada uno mostrados en la Ilustración 23, lo cuales conducen a cajas receptoras en el primer piso y a su vez a tres salidas hacia la acequia adyacente a la Calle Cataya para entregar finalmente a la acequia.

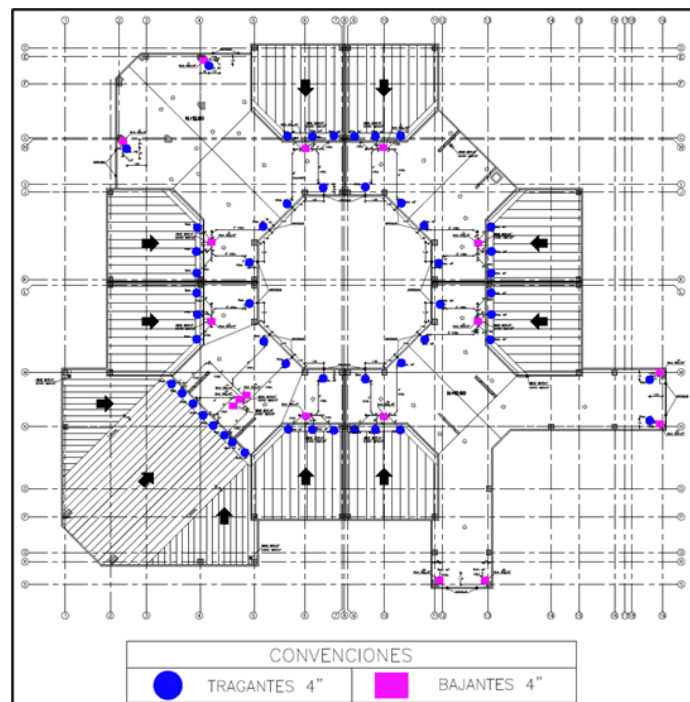


Ilustración 23. Ubicación tragantes y bajante en cubierta Edificio Almendros. Tomada de Plano General EIR 2-11 de la Pontificia Universidad Javeriana Cali

6.1.12 Almacenamiento y Red de distribución de aguas lluvias.

En la PUJ Cali existen tres depósitos de almacenamiento, uno de 100 m³, otro de 60 m³, ambos localizados en el acueducto; y un tercero, de 90 m³, ubicado en la parte baja trasera

de la oficina de recursos físicos (primer piso Edificio Central) (Pontificia Universidad Javeriana Cali, 2017).

Podría considerarse un almacenamiento para las aguas lluvias en la cubierta del edificio y que por gravedad otra red paralela a la existente alimentara los sanitarios y orinales de este, sin embargo, esto conllevaría a un reforzamiento estructural de todo el edificio, para así poder soportar las cargas muertas adicionales debido al peso del contenedor y del agua almacenada.

6.1.13 Balance Hídrico.

6.1.13.1 Precipitación Promedio Mensual (Ppi).

La precipitación promedio mensual expresada en milímetros (mm), sin considerar la evaporación, es equivalente a la precipitación mensual en litros por metro cuadrado (L/m^2), ya que se requiere 1 mm de agua para mojar $1m^2$ de área.(Castañeda, 2010).

Con base en la información meteorológica antes referenciada y empleando la ecuación (7) se obtiene la oferta mensual multianual de agua lluvia en m^3 , representada en la ilustración 24.

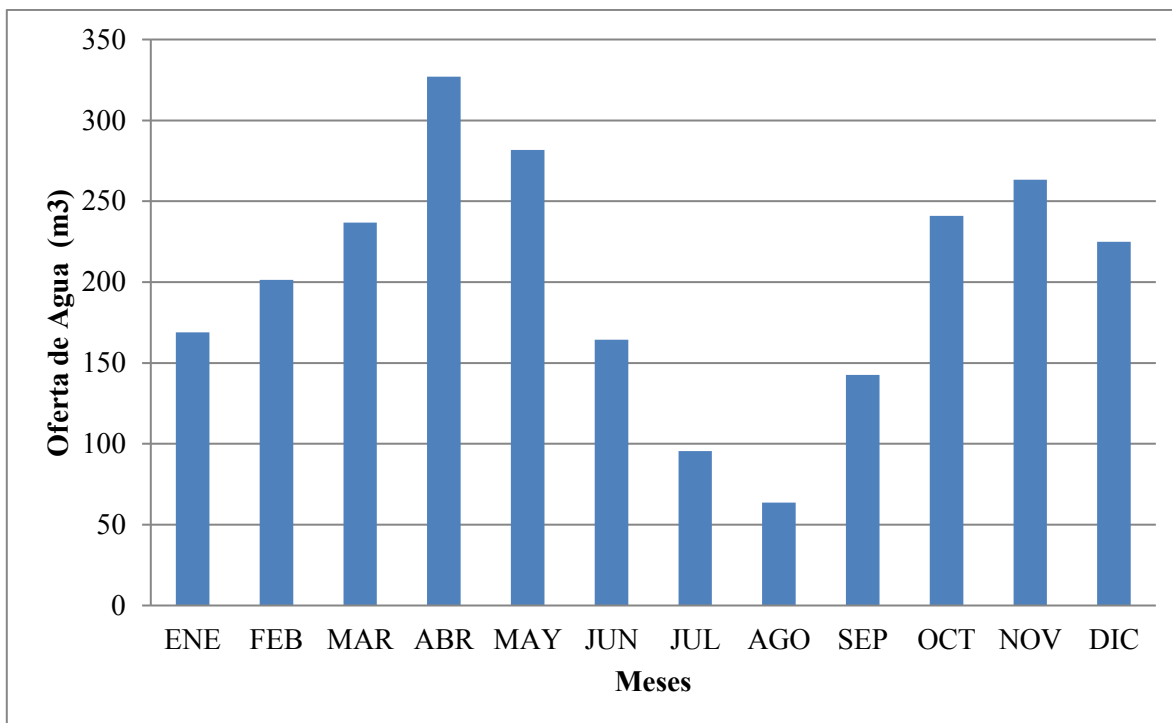


Ilustración 24. Promedio Oferta de Agua lluvia mensual (m³) en los últimos 26 años.

Evaluando la oferta hídrica mensual determinada mediante la captación de las aguas pluviales, empleando la ecuación (7), con un área de captación de 2.369,4 m² se pudo comparar con los consumos mensuales de agua calculados en los últimos 4 años, gráficamente, mediante la Ilustración 25.

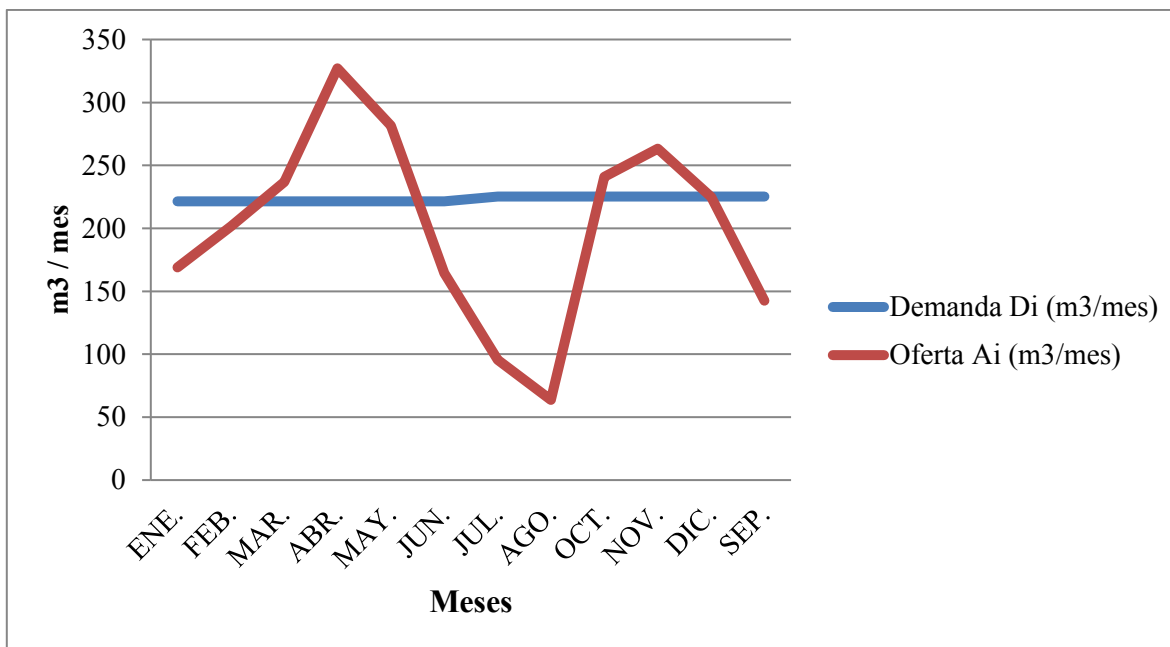


Ilustración 25. Comportamiento de la Oferta y la Demanda de usos sanitarios Mensual Multianual.

6.1.13.2 Dimensionamiento del almacenamiento.

Los métodos Inglés, Alemán y portugués son métodos simplificados y empíricos, recomendados en las normativas sobre aprovechamiento de agua lluvia del Reino Unido (UKRHA), Alemania (DIN 1989-1) y Portugal (ETA 0701), respectivamente, para determinar el volumen del reservorio para agua lluvia. El uso de estos tres métodos permitió conocer la metodología y evaluar su similitud con el método de Rippi, en el cual se evalúa la relación oferta-demanda durante un determinado periodo de tiempo para establecer el volumen de almacenamiento requerido por la demanda mensual a ser suplida por el sistema. (Latorre Montero et al., 2015).

6.1.13.2.1 Método ETA 0701.

Según (De et al., n.d.), para un dimensionamiento simplificado del tanque de almacenamiento, se proponen las ecuaciones (9), (10) y (11):

$$V = \text{Min} (V1 \text{ o } V2) \quad (9)$$

$$V1 = 0,0015 * P * A * N \quad (10)$$

$$V2 = 0,003 * D * N \quad (11)$$

En donde:

V1 = Volumen aprovechable (litros)

P = Precipitación media anual del lugar de estudio (mm)

A = Área de captación (m²)

N = Número máximo de días de retención de agua en el tanque (entre 20 y 30 días)

V2 = Volumen consumido

D = Demanda total de agua en el año (litros)

6.1.13.2.2 Método Práctico Inglés.

Este método, según (UKRHA, 2012), garantiza una buena calidad del agua en el sistema y determina el volumen de agua aprovechable mediante la expresión (12).

$$V = 0,05 * C * P * A \quad (12)$$

En donde, C es el coeficiente de escorrentía, P la precipitación media anual en milímetros y A el área de captación en metros cuadrados.

6.1.13.2.3 Método Práctico Alemán.

En este método empírico, el volumen de agua del almacenamiento (Va) en litros, corresponde al 6% del menor valor entre el volumen aprovechable de agua lluvia (V) y el consumo o demanda anual de agua no potable (D), en litros, se expresa mediante la ecuación (13). (DIN 1989-1, 2001)

$$Va = \text{Min} (V, D) * 0,06 \quad (13)$$

6.1.13.2.4 Método Rippi.

También conocido como “método de masas” y referenciado también en la metodología planteada por CEPIS (Organización Panamericana de la Salud, 2004), permite estimar el almacenamiento requerido por un reservorio, comprobando el límite superior del volumen de acumulación del depósito de aguas lluvias (Tomas, P. 2012 citado por Latorre Montero et al., 2015). Para su utilización se debe contar con las precipitaciones de al menos los últimos 10 años, incluyendo series mensuales o diarias de la zona. El volumen de agua del reservorio en el tiempo $S(t)$, es igual a la diferencia entre la demanda o consumo en tiempo $D(t)$, menos el volumen de lluvia aprovechable en el tiempo $Q(t)$. Siendo que $\Sigma D(t) < \Sigma Q(t)$, entonces el volumen (V) del reservorio en (m^3) se determina mediante la expresión (14), suponiendo que el reservorio está lleno al inicio con salida de agua constante.

$$V = \Sigma S(t) \text{ solo para } S(t) > 0 \quad (14)$$

6.1.13.2.5 Cálculo del almacenamiento por el Método ETA 0701.

Empleando las ecuaciones (9) (10) y (11):

$$V1 = 0,0015 * \frac{1.449,1 \text{ mm}}{1000} * 2.369,4 \text{ m}^2 * 30 \text{ días} = 154,51 \text{ m}^3$$

$$V2 = 0,003 * 2.680,03 \text{ m}^3 * 30 \text{ días} = 241,20 \text{ m}^3$$

Entonces, el volumen de almacenamiento (V) corresponde a:

$$V = \text{Min} (V1, V2) = 154,51 \text{ m}^3$$

6.1.13.2.6 Cálculo por el Método Práctico Inglés.

Empleando la ecuación (12) y el coeficiente de escurrentía C , igual a 0,95 el volumen de almacenamiento (V) es igual a:

$$V = 0,05 * 0,95 * \frac{1.449,1 \text{ mm}}{1000} * 2.369,4 \text{ m}^2 = 163,1 \text{ m}^3$$

6.1.13.2.7 Cálculo por el Método Práctico Alemán.

Teniendo en cuenta que el volumen de agua aprovechable anual es igual a:

$$V = 0,95 * \frac{1.449,1 \text{ mm}}{1000} * 2.369,4 \text{ m}^2 = 3.261,8 \text{ m}^3$$

Y la demanda es igual a 2.680 m³, el volumen de almacenamiento (Va), según la ecuación (13) es igual a:

$$Va = \text{Min} (3.261,8; 2.680) * 0,06 = 160,8 \text{ m}^3$$

6.1.13.2.8 Cálculo por el Método Rippi.

Se consignan los resultados obtenidos, con base en la demanda acumulada (Dai) y la oferta acumulada (Aai) para así determinar el volumen de almacenamiento (Vi) y el porcentaje de ahorro de agua potable posible (PPWS), mostrados en la Tabla 8, en la que inicialmente, se distribuyó la precipitación, ubicando en la fila superior el mes de mayor lluvia durante los años evaluados, que en este caso fueron 26 años, y se continuó con el orden regular de los meses siguientes.

Tabla 8.

Cálculo para determinar Demanda Acumulada (Dai), Oferta Acumulada (Aai), Volumen de Almacenamiento (Vi) y Porcentaje de potencial de ahorro de agua potable (PPWS).

Mes	Ppi (l/m ²)	Demanda Di (m ³ /mes)	Dai (m ³ /mes)	Oferta Ai (m ³ /mes)	Aai (m ³ /mes)	Vi (m ³ /mes)	PPWS (%)
ABR	196,58	221,43	221,43	327,10	327,10	105,67	147,72
MAY	169,29	221,43	442,86	281,69	608,79	165,93	137,47
NOV	158,29	225,24	668,10	263,39	872,17	204,07	130,55
OCT	144,82	225,24	893,34	240,97	1113,15	219,80	124,60
MAR	142,3	221,43	1114,77	236,78	1349,92	235,15	121,09
DIC	135,13	225,24	1340,02	224,85	1574,77	234,76	117,52
FEB	121,06	221,43	1561,44	201,44	1776,21	214,77	113,75
ENE	101,5	221,43	1782,87	168,89	1945,10	162,23	109,10
JUN	98,78	221,43	2004,30	164,36	2109,47	105,17	105,25
SEP	85,69	225,24	2229,54	142,58	2252,05	22,50	101,01
JUL	57,38	225,24	2454,79	95,48	2347,53	-107,26	95,63
AGO	38,28	225,24	2680,03	63,70	2411,22	-268,81	89,97
						Promedio	116,14

Según la información arriba tabulada, se pudo identificar que, con el área de captación correspondiente a la cubierta del Edificio Almendros, es posible suplir la totalidad de la demanda de agua potable, empleada actualmente en la descarga de sanitarios y orinales y para el lavado de pisos. Al considerar en la oferta, las pérdidas del 20%, por evaporación, textura del material del techo, pérdidas en canaletas y en el almacenamiento, e ineficiencia del sistema de captación, antes referenciadas, se obtienen los resultados tabulados en la Tabla 9.

Tabla 9.

Cálculo para determinar Demanda Acumulada (Dai), Oferta Acumulada (Aai), Volumen de Almacenamiento (Vi) y Porcentaje de potencial de ahorro de agua potable (PPWS) considerando pérdidas en la oferta.

Mes	Ppi (l/m ²)	Demanda Di (m ³ /mes)	Dai (m ³ /mes)	Oferta Ai (m ³ /mes)	Aai (m ³ /mes)	Vi (m ³ /mes)	PPWS (%)
ABR	196,58	221,43	221,43	321,65	321,65	100,22	145,26
MAY	169,29	221,43	442,86	276,99	598,64	155,79	135,18
NOV	158,29	225,24	668,10	259,00	857,64	189,54	128,37
OCT	144,82	225,24	893,34	236,96	1094,59	201,25	122,53
MAR	142,3	221,43	1114,77	232,83	1327,43	212,65	119,08
DIC	135,13	225,24	1340,02	221,10	1548,53	208,51	115,56
FEB	121,06	221,43	1561,44	198,08	1746,61	185,16	111,86
ENE	101,5	221,43	1782,87	166,08	1912,68	129,81	107,28
JUN	98,78	221,43	2004,30	161,62	2074,31	70,01	103,49
SEP	85,69	225,24	2229,54	140,21	2214,51	-15,03	99,33
JUL	57,38	225,24	2454,79	93,89	2308,40	-146,39	94,04
AGO	38,28	225,24	2680,03	62,63	2371,03	-309,00	88,47
						Promedio	114,20

En este caso, el volumen de almacenamiento máximo, con esta área de captación fue de 212,65 m³, que se aproximó a 213 m³. Este valor se determinó al identificar la mayor de las diferencias acumulativas entre oferta y demanda. En caso de que no se hubiese podido suplir el consumo de agua potable, el área de captación debía ser mayor, y para determinar el área mínima requerida, la diferencia acumulativa entre oferta y demanda debe ser igual a cero (0). (Organización Panamericana de la Salud, 2004).

En la ilustración 26 se pueden observar los volúmenes de almacenamiento calculados para el área de captación del edificio Almendros de 2.369,4 m².

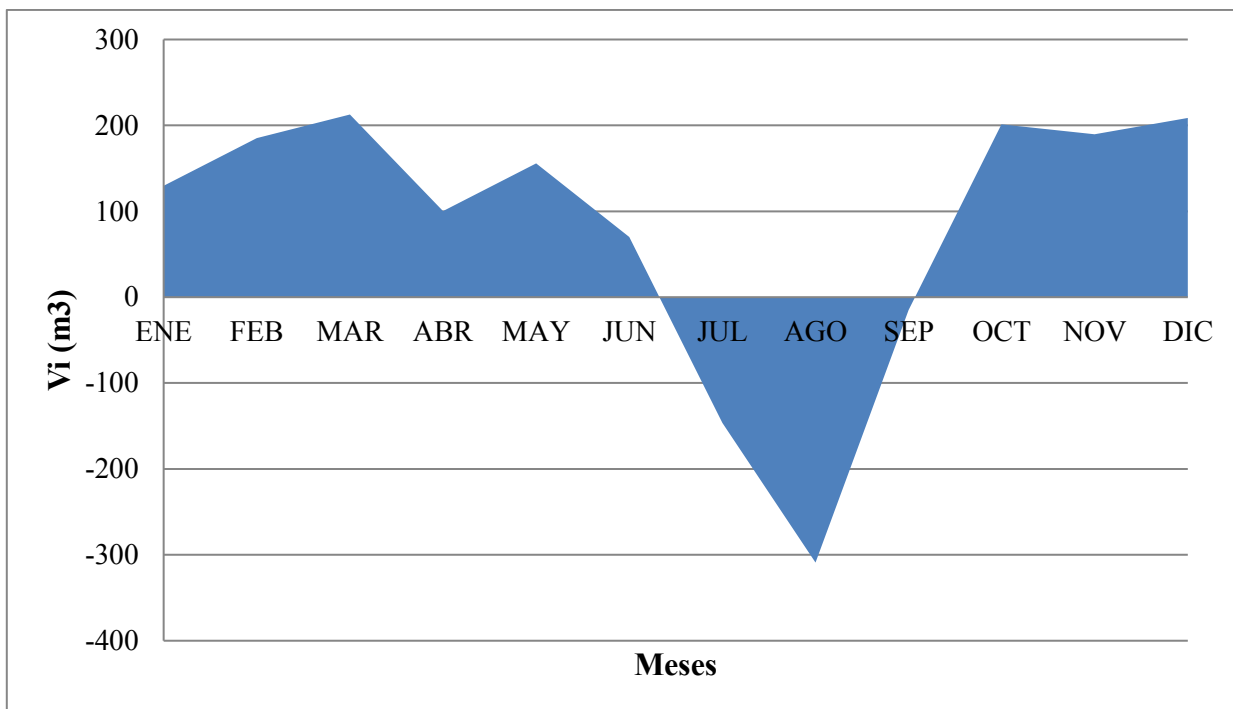


Ilustración 26. Volúmenes de almacenamiento acumulado en (m³) para los meses de los años analizados.

De acuerdo con este análisis, y considerando que se mantenga el comportamiento de las condiciones hidrológicas mostradas en la Ilustración 21, se pudo identificar que solo 3 meses del año (julio, agosto y septiembre), al ser la demanda superior a la oferta, se emplearía toda el agua lluvia almacenada y se requeriría emplear el suministro de agua potable de la red de la PUJ Cali, sin embargo, en los 9 meses restantes, la oferta es mayor que la demanda.

6.1.13.3 Potencial de Ahorro de Agua Potable (PPWS).

Con este parámetro se pudo identificar el porcentaje de la demanda cubierto por la oferta de agua lluvia y corroborar que, para los meses de julio, agosto y septiembre, los excedentes de meses anteriores podrían suplir la demanda de estos meses, con valores muy cercanos al 100%, mostrados mes a mes en la Ilustración 27. En promedio, el porcentaje potencial de ahorro de agua potable es de 114,2%, lo cual demostró la viabilidad técnica de este sistema

y contribuye a la sostenibilidad del Edificio Almendros, al disminuir el consumo de agua potable para los usos antes especificados.

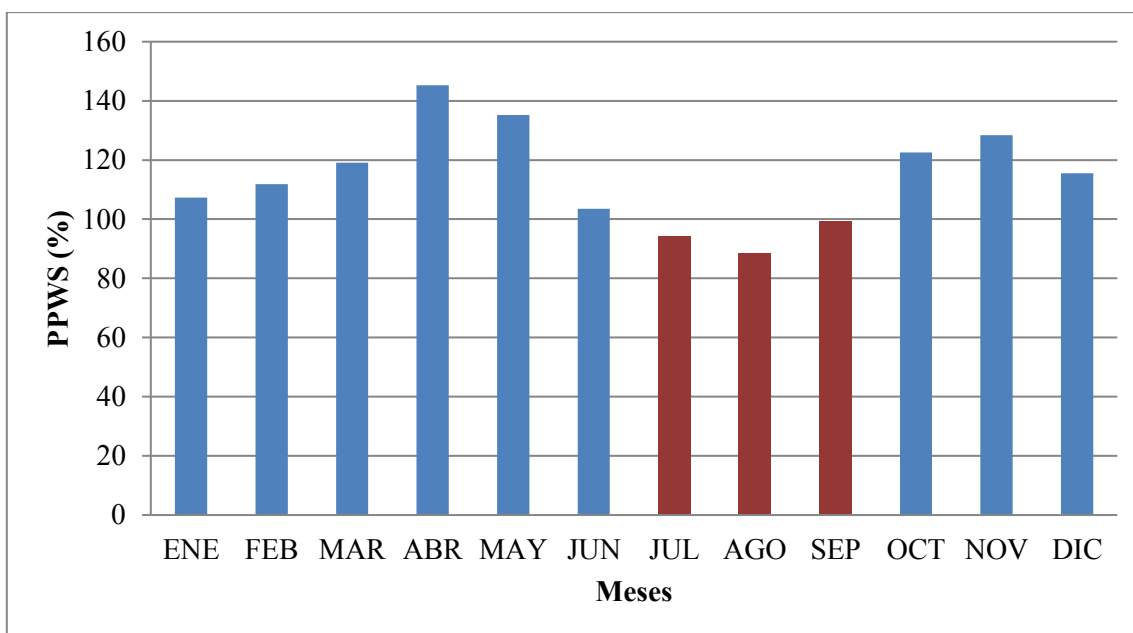


Ilustración 27. Potencial de ahorro en agua potable en el Edificio Almendros.

6.1.13.4 Dimensionamiento del Almacenamiento.

Con base en el análisis anterior e identificando los meses con excesos y faltantes respecto a la oferta de agua lluvia y la demanda, se identificaron los meses secos, húmedos y normales, según el Índice de Precipitación (IP) propuesta por el IDEAM y calculado mediante la ecuación (14).

$$IP = \frac{Pt}{\bar{P}tm} * 100 \quad (14)$$

Donde P_t es la precipitación acumulada mensual o anual en (mm) y $\bar{P}tm$ la precipitación media mensual o anual multianual en (mm) en m años. Estos resultados se indican en la Tabla 10 y muestran que el mes de agosto puede clasificarse como período seco, con el volumen faltante por suplir en este mes se determinó el volumen de almacenamiento del sistema igual a 162.61 m^3 aproximado a 163 m^3 .

Tabla 10.*Volumen de Exceso o faltante en (m³) e Índice de Precipitación por mes.*

Mes	Exceso o Faltante (m ³)	IP (%)
ENE.	-55,35	182,11
FEB.	-23,35	217,21
MAR.	11,41	255,32
ABR.	100,22	352,71
MAY.	55,57	303,74
JUN.	-59,80	177,23
JUL.	-131,36	102,95
AGO.	-162,61	68,68
SEP.	-85,04	153,75
OCT.	11,71	259,84
NOV.	33,75	284,01
DIC.	-4,14	242,45

Teniendo en cuenta los resultados anteriores y las restricciones de área para la instalación del sistema, se determina que el volumen del tanque será de 112 m³, equivalente al 70% de del volumen total para suplir la demanda en los usos sanitarios del Edificio Almendros.

Para un volumen de almacenamiento de 112 m³, las dimensiones del tanque fueron las enunciadas en la tabla 11.

Tabla 11.*Dimensiones Tanque de Almacenamiento.*

Dimensión	m
Largo	7,5
Ancho	7,5
Profundidad	2,0

6.1.14 Análisis de Calidad del Agua.

El análisis de calidad de agua, para la reutilización de aguas lluvia de escorrentía en zonas urbanas es fundamental en la selección del modelo y de la eficiencia del sistema de recolección de esta (Xue & Kang, 2012).

Con el fin de verificar la calidad del agua de escorrentía, y el tipo de tratamiento mínimo para los usos antes estipulados, se referenciaron los parámetros indicados en la Resolución 2115 de 2007 de los Ministerios de la Protección Social y de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial para agua potable, sin embargo los usos proyectados no involucran el consumo de agua potable, por ello se referenció el Decreto 1594 de 1984, en el cual se establecen los usos del agua, entre los cuales están los usos recreativos, unos de contacto primario, como en la natación y el buceo, y otros de contacto secundario, como en los deportes náuticos y la pesca, clasificando los usos de descargas sanitarias bajo estos últimos parámetros, cuyos parámetros se relacionan en la Tabla 12.

Inicialmente, para esta investigación se planteó realizar los estudios de calidad del agua lluvia con el Laboratorio de Aguas de la Universidad del Valle EIDENAR, y desarrollar el análisis de agua bajo los siguientes parámetros: pH, turbiedad, sólidos suspendidos totales y coliformes fecales. Sin embargo, dada la situación de cuarentena en el territorio nacional por la presencia del SARS COVID-19, no se alcanzaron a tomar las muestras de aguas y por ende realizar su análisis. No obstante, con la revisión de literatura se pudieron determinar los valores más comunes de estos parámetros en aguas lluvias, tomando como referencia los determinados por Valentina Feijoo Moreno & Andrés David Perea Agredo, 2014, en las muestras tomadas en espacios abiertos (cancha, lago y plazoleta) y sobre cubiertas (Edificios 331, 334 y 348) en el campus de la Universidad del Valle, sede Meléndez. Para efectos de esta investigación, se promediaron los resultados obtenidos a cielo abierto y en las cubiertas y se compararon con el Decreto 1575 de 2007 para agua potable y con el Decreto 1594 de 1984, los cuales se resumen en la tabla 12.

Tabla 12.

Análisis de muestras tomadas a la atmósfera y en cubiertas en el campus Universidad del Valle, sede Meléndez. Adaptado de (Valentina Feijoo Moreno & Andrés David Perea Agredo, 2014).

Parámetro	Método	Punto de Muestreo		Agua Potable	Uso Secundario
		Atmosférico	Cubiertas	Decreto 1575 de 2007	Decreto 1594 de 1984
Turbiedad (NTU)	Nefelómetro	1,91	6,15	≤ 2,00	
Color Aparente (UPC)	Espectrofotométrico	1,67	88,67	≤ 15,00	
pH (Unidades)	Potenciométrico	5,53	5,82	6,50 – 9,00	5,0 – 9,0
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	Gravimétrico	1,03	11,20	≤ 500,00	
Coliformes Fecales (UFC/100mL)	Filtración por membrana	5,33	5363	0,00	200/100 ml

Estos resultados muestran que la calidad del agua lluvia es menor, una vez entra en contacto con las cubiertas, por lo que para sus usos no potables también será necesario un tratamiento que permita mejorarla. En la reglamentación nacional no se evidenciaron parámetros para el aprovechamiento de agua lluvia para usos no potables como riego, limpieza o descargas de sanitarios, sin embargo, en normas internacionales si existen referencias de estos parámetros, tal es el caso de la norma americana (EPA, 2008), australiana (NSW, 2006) y escocesa (NHS, 2013), referenciadas en la tabla 13.

Tabla 13.

Parámetros de calidad de agua lluvia para usos no potables. Adaptada de (Valentina Feijoo Moreno & Andrés David Perea Agredo, 2014).

Parámetro/Usos	Turbiedad (NTU)	Color (UPC)	pH (Unidades)	Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	Coliformes Fecales (UFC/100mL)
Descarga de sanitarios, limpieza externa	< 10 ¹	No objetable ¹	6 – 8 ¹	Visualmente limpia y libre de escombros flotantes ¹	< 100 ³
Riego de jardines	N/A ¹	N/A ²	6 – 8 ¹	flotantes ¹	N/A ³

1. NHS, 2013
2. NSW, 2006
3. EPA, 2008

Con base en lo anterior, la calidad del agua lluvia proveniente de las cubiertas de la zona de estudio, puede ser mejorada realizando un tratamiento sobre el primer volumen captado durante el período de la precipitación “First Flush” y emplearse en usos como descargas de sanitarios y orinales, limpieza de pisos y riego de jardines.

6.1.15 Selección de Tipologías de SUDS.

Con esta información, y según los objetivos del proyecto que implican principalmente el aprovechamiento de las aguas lluvias para su reutilización en el Edificio Almendros y con base en la Tabla No. 2, se preseleccionan las siguientes tipologías: Pavimentos permeables, tanques de almacenamiento, zanjas de infiltración, zonas de bio-retención y humedales construidos. Se descartó la tipología de techos verdes, por no contar con la información estructural del edificio al momento de la revisión documental, ya que la instalación de este sistema, por su peso, implicaría un chequeo estructural para verificar las nuevas cargas muertas que se añadirían a la edificación.

Luego se evaluó cada tipología de acuerdo al mejoramiento de la calidad del agua, al control de volúmenes de agua lluvia, requerimientos de mantenimiento, costos de implementación y generación de amenidad y conflictos de uso (Woods Ballard et al., 2015), asignando un peso a cada uno de estos criterios, para hacer una evaluación ponderada de las tipologías y seleccionar la más adecuada. La asignación de los pesos de los criterios se hizo con base en ellos objetivos del proyecto y a los principales procesos: almacenamiento y aprovechamiento de aguas lluvias. Debido a la situación generada por el SARS COVID-19, no se pudieron concertar las entrevistas, por ello se asignaron los pesos según (S. L. Galarza Molina, 2011) ya que su ejercicio, al desarrollarse en la PUJ Bogotá guarda estrecha relación con el campus de la PUJ Cali y su política ambiental. Posteriormente, se determinaron los posibles trenes y sobre esta alternativa se desarrolló el diseño para su construcción.

6.1.15.1 Evaluación y Selección de Tipologías de SUDS.

Con las tipologías preseleccionadas, según la ubicación seleccionada, se realizó un análisis comparativo (cualitativo y cuantitativo), de cada uno de los criterios establecidos. Para esto se tomó la información referenciada en la Guía de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible, Documento Técnico de soporte EAB, se asignó un peso a cada criterio y luego se ponderó el puntaje total para identificar la tipología que más se ajustaba al sitio de estudio.

6.1.15.2 Mejoramiento de la Calidad del agua.

Dado que el flujo de escorrentía urbana generada durante las precipitaciones puede transportar contaminantes (p.ej. sedimentos, nutrientes, metales, patógenos, entre otros), los cuales pueden ser removidos a través de mecanismos como sedimentación, filtración, adsorción biológica y degradación, mediante de diferentes estructuras de SUDS; según la eficiencia o calidad de remoción se categorizaron en: alta >80%, media 30 – 80% y baja

<30% (Geosyntec Consultants, 2013). A continuación, se describen los contaminantes más frecuentes en la escorrentía:

- Sedimentos/Sólidos suspendidos: correspondientes a procesos erosivos de diferentes superficies, transportados por la acción del viento, agua y gravedad y pueden depositarse en diferentes zonas urbanas como cubiertas y componentes del sistema de drenaje, durante tiempo seco. Pueden contener una variedad de contaminantes que son partículas sólidas o que poseen una alta afinidad por la unión a material orgánico. Los sedimentos son removidos principalmente a través de infiltración y sedimentación. Entre las tipologías o SUDS más apropiadas para remover estos contaminantes son las zanjas de infiltración y los pavimentos porosos (Geosyntec Consultants, 2013), los tanques de almacenamiento no remueven por sí solos ningún contaminante del agua.
- Nutrientes (Nitrógeno y Fósforo): una excesiva concentración de nutrientes en el volumen de escorrentía puede ocasionar problemas de eutrofización y liberación de toxinas. Sus principales fuentes en las áreas urbanas corresponden a los fertilizantes, basuras, escombros y suelos erosionados. La concentración de nutrientes puede disminuirse mediante sedimentación y filtración, y con tratamiento biológico de descomposición orgánica mediante plantas y bacterias, cuando los nutrientes se encuentran en forma disuelta. Entre las tipologías o SUDS más apropiadas para remover nutrientes son las zonas de bio-retención (Geosyntec Consultants, 2013)
- Metales: como el Cadmio, Cobre, Plomo, Mercurio y Zinc, presentes principalmente en pinturas, combustibles y productos automotrices. Estos pueden ser desprendidos de las superficies originales por procesos erosivos y ser transportados por la

escurriría luego de las precipitaciones. Los procesos empleados para la remoción de estos metales incluyen sedimentación, filtración y procesos bioquímicos. Entre las tipologías o SUDS más apropiadas para remover nutrientes son las zonas de bio-retención (Geosyntec Consultants, 2013), para tanques de almacenamiento la eficiencia es nula.

- Patógenos: en áreas urbanas están comúnmente asociados al transporte de desechos fecales animales y/o humanos, desbordamientos de alcantarillado sanitario, conexiones erradas de tubería sanitaria al alcantarillado pluvial, entre otras. Los patógenos pueden ser removidos mediante la reducción del volumen y el control en la fuente de contaminación. Entre las tipologías o SUDS más eficientes en la remoción de patógenos están cuenca seca de drenaje extendido y zanjas de infiltración; una eficiencia media tipologías como pavimentos porosos y zonas de bio-retención; no son recomendables las cunetas verdes y/o tanques de almacenamiento (Geosyntec Consultants, 2013).
- Aceites y grasas: están usualmente asociadas a productos industriales y derivados del petróleo y pueden afectar a algunos organismos como los macro y micro invertebrados acuáticos y ser tóxica para los organismos que habitan los cuerpos receptores. Entre las tipologías o SUDS que presentan alta eficiencia son las zonas de bio-retención y los pavimentos porosos (Geosyntec Consultants, 2013), los tanques de almacenamiento no cuentan con procesos propios para remover estos contaminantes.
- Basura y escombros: en caso de que no sean manejados adecuadamente. La mayoría de las tipologías o SUDS son eficientes para la remoción de basuras, exceptuando los

pavimentos porosos, cuya eficiencia es media (Geosyntec Consultants, 2013), la eficiencia de los tanques de almacenamiento en la remoción de estos contaminantes, depende del pretratamiento al flujo de escorrentía previo a su ingreso a esta estructura.

6.1.15.3 Calificación de las tipologías según la eficiencia de remoción de contaminantes.

Los resultados del análisis anterior se representan en la Tabla 14, con base en la eficiencia de remoción de los contaminantes más frecuentes en las aguas lluvias por las tipologías preseleccionadas.

Tabla 14.

Calificación de tipologías según eficiencia en la remoción de contaminantes. Modificado de (Geosyntec Consultants, 2013).

Tipología	Nutrientes	Metales	Patógenos	Sedimentos	Aceites y Grasas	Basuras y Escombros
Tanques de almacenamiento	Diseñados específicamente para reducción del volumen de escorrentía y retención no para remoción de contaminantes					
Zonas de bio-retención	Media	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta
Zanjas de infiltración	Media	Alta	Alta	Alta	Media	Alta
Pavimientos permeables	Media	Media	Media	Alta	Alta	Baja
Humedales construidos	Media	Alta	Baja	Alta	Alta	-

Para evaluar las tipologías seleccionadas para el sitio de estudio, se asignó una calificación numérica, teniendo en cuenta la eficiencia de remoción, donde uno (1) equivale a Baja remoción, dos (2) a Media y tres (3) a Alta remoción. Luego se promediaron los resultados y con el mayor resultado, se identificó la tipología más eficiente en la eliminación de contaminantes. Siendo las zonas de bio-retención las más eficientes, en un segundo lugar, las zanjas de infiltración, luego los pavimientos permeables y por último los humedales construidos. La evaluación cuantitativa se presenta en el Anexo 5.

6.1.15.4 Control de volúmenes de agua lluvia.

Teniendo en cuenta el incremento del volumen de escorrentía y caudales pico, dado el incremento de zonas impermeables en la cuenca, las tipologías de SUDS pueden manejarlas por procesos como infiltración y evapotranspiración, en ese orden de ideas, la reducción de volumen corresponde a la fracción del agua manejada por la tipología que no es descargada a los cuerpos de agua, es decir, la fracción que es infiltrada, evaporada, transpirada o utilizada en usos no potables. Así mismo, la reducción de la descarga máxima corresponde al desempeño de los sistemas para atenuar el caudal pico de salida mediante procesos de detención y retención (Centro de Investigación en Ingeniería Ambiental CIIA, 2017).

En la Tabla 15 se presenta la comparación cualitativa entre las topologías seleccionadas respecto a su eficiencia en la reducción del volumen de escorrentía según (Geosyntec Consultants, 2013).

Tabla 15.

Calificación tipologías según eficiencia de reducción de volumen escorrentía.

Tipología	Reducción Volumen	Reducción Descarga máxima
Tanques de almacenamiento	Media	Media
Zonas de bio-retención	Media	Bajo
Zanjas de infiltración	Alta	Alta
Pavimentos permeables	Alta	Media
Humedales construidos	Bajo	Alto

Nuevamente se asignó una calificación numérica según la eficiencia de reducción del volumen, donde uno (1) equivale a una baja reducción, dos (2) una reducción media y tres (3) un alta. Posteriormente, se promediaron los resultados y con el mayor resultado, se identificó que la tipología más eficiente en la reducción del volumen de escorrentía son las zanjas de infiltración, en segundo lugar, los pavimentos permeables, en tercer lugar, los

tanques de almacenamiento y humedales construídos, y en último lugar las zonas de bio-retención (Anexo 6).

6.1.15.5 Amenidad y conflictos de uso.

La amenidad corresponde a elementos relacionados con la calidad del paisaje, posibilidades de recreación, seguridad del entorno entre otros. La implementación de algunas tipologías de SUDS contribuye a estos aspectos, con base en esto, se evaluaron las tipologías de SUDS preseleccionadas de acuerdo con su potencial de favorecer la recreación y mejorar la percepción del entorno (Centro de Investigación en Ingeniería Ambiental CIIA, 2017). En la Tabla 16 se presenta la calificación.

Tabla 16.

Calificación tipologías según contribución a la amenidad.

	Tanques de Almacenamiento	Zonas de bio-retención	Zonas de infiltración	Pavimentos permeables	Humedales construídos
Amenidad	Nula	Alta	Nula	Nula	Alta

Se asignó una calificación numérica, según la contribución de cada tipología a este criterio, donde cero (0) equivale a nula, don (2) a media y tres (3) a alta. El mayor resultado lo obtuvieron zonas de bio-retención y humedales construídos, las demás tipologías preseleccionadas no contribuyen a este criterio.

De la mano de la amenidad, se evaluaron dos factores que corresponden a la posibilidad de que las tipologías de SUDS preseleccionadas afecten las actividades del sitio de su implementación, es decir, si imposibilita las actividades para las que está concebido el sitio (alto), si interfiere en las actividades para las que está concebido (media) y si es acorde o favorece las actividades para las que está concebido (alta). El segundo factor, evalúa el riesgo que estas tipologías, puedan representar para la seguridad de los usuarios del sitio, asignando

alta, si representa un riesgo directo para los usuarios, medio si representa un riesgo menor y bajo, si no representa riesgo. En la Tabla 17 se presenta la calificación de las tipologías según estos factores.

Tabla 17.

Calificación tipologías según conflictos de uso.

	Tanques de Almacenamiento	Zonas de bio-retención	Zonas de infiltración	Pavimentos permeables	Humedales construidos
Actividades en el sitio	Bajo	Alta	Media	Bajo	Bajo
Riesgo	Bajo	Media	Media	Bajo	Bajo

Alto: 1 Medio: 2 Bajo:3

Luego de asignar la calificación numérica y a su ponderación, se obtuvieron los mayores resultados en las tipologías de tanques de almacenamiento, pavimentos permeables y humedales construidos, en segundo lugar, zanjas de infiltración y por último zonas de bio-retención.

De acuerdo con la evaluación realizada en la Tabla 16 y la Tabla 17, se generó la matriz que combina los criterios de amenidad y conflictos de uso para las tipologías de SUDS preseleccionadas con los resultados numéricos obtenidos, ponderando los resultados y obteniendo que los mayores puntajes entre las tipologías corresponde a los humedales construidos, en segundo lugar tanques de almacenamiento, en tercer lugar, zonas de bio-retención y pavimentos permeables, y en último lugar, zanjas de infiltración (Anexo 7). En la Tabla 18 se presentan los resultados.

Tabla 18.

Matriz de evaluación de tipologías seleccionadas según contribución a la amenidad y conflictos de uso.

	Tanques de Almacenamiento	Zonas de bio-retención	Zonas de infiltración	Pavimentos permeables	Humedales construidos
Amenidad	2	3	0	0	3
Conflictos de Uso	6	3	4	6	6
Total	8	6	4	6	9

6.1.15.6 Mantenimiento.

Las actividades de mantenimiento son necesarias para garantizar el adecuado funcionamiento y operación de las tipologías de SUDS, por lo cual deben considerarse su frecuencia y los recursos requeridos, a su vez la complejidad de las actividades. En la Tabla 19 se resumen los tipos de actividades de mantenimiento para las tipologías SUDS (Woods Ballard et al., 2015), teniendo en cuenta el alcance del mantenimiento, la frecuencia y las actividades a desarrollar.

Tabla 19.

Tipos actividades de mantenimiento para las tipologías de SUDS (Woods Ballard et al., 2015).

Tipo de Medidas	Mantenimiento	Ejemplo
Preventivo	Regular	Limpieza de sedimentos, basura y vegetación muerta Reparación estructural Rehabilitación parcial
	Ocasional	Inspección visual de estructuras de salida, obstrucciones y manejo de excesos Remoción de residuos Manejo de la cobertura del suelo y la vegetación
	Correctivo/ Remedial	Rehabilitación Reconstrucción

A continuación, en la tabla 20 se presenta la matriz resumen con las actividades generales de mantenimiento para las tipologías preseleccionadas, incluyendo las frecuencias recomendadas según (Woods Ballard et al., 2015).

Tabla 20.

Matriz resumen de las actividades generales de mantenimiento para las tipologías de SUDS. Adaptado de (Woods Ballard et al., 2015).

Actividad	Tipología				
	Zonas de bio-retención	Humedales artificiales construidos	Pavimentos permeables	Zanjas de infiltración	Tanques de almacenamiento
Mantenimiento Regular					
Inspección	●	●	●	●	●
Remoción de residuos	●	●	●	●	●
Poda de césped	●	●	○	●	○
Mantenimiento de arbustos y árboles	●	●	—	—	—
Mantenimiento de vegetación acuática	○	●	—	—	—
Control de plantas invasoras y maleza	○	○	○	○	○
Mantenimiento Ocasional					
Remoción de basuras y sedimentos	●	●	●	●	●
Sustitución de especies vegetales	○	○	—	—	—
Mantenimiento Correctivo					
Reparación estructural					
Rehabilitación de la superficie infiltrante	—	—	○	○	—

● Debe realizarse obligatoriamente y con alta frecuencia
 ○ Puede requerirse con una baja frecuencia
 — No se requiere

6.1.15.7 Calificación de las tipologías según los requerimientos de mantenimiento.

Con base en la clasificación asignada por la Guía Técnica para el Diseño y Construcción de SUDS (Centro de Investigación en Ingeniería Ambiental CIIA, 2017), teniendo en cuenta las actividades y frecuencia (mensual, semestral y anual) de mantenimiento para las tipologías preseleccionadas, se realizó la evaluación de estos criterios. De la mano del riesgo asociado

a cada tipología, por colmatación del medio filtrante o reservorio y las capas superiores, ya que esto influye en el tipo y frecuencia de mantenimiento. En este orden de ideas, si la estructura no cuenta con un medio filtrante, el riesgo se categorizó como bajo, si tiene una capa filtrante, pero incluye vegetación, el riesgo es medio, y si no tiene vegetación, el riesgo es alto; determinando así las necesidades de mantenimiento para cada tipología, representadas en la Tabla 21.

Tabla 21.

Calificación de tipologías según frecuencia de mantenimiento. Adaptada de (Centro de Investigación en Ingeniería Ambiental CIIA, 2017).

Criterio	Tanques de Almacenamiento	Zonas de bio-retención	Zonas de infiltración	Pavimentos permeables	Humedales construidos
Riesgo de Colmatación	Bajo	Media	Alto	Alto	Media
Total Requerimientos	Bajo	Alto	Alto	Alto	Alto

Posteriormente, se asignó la calificación numérica respecto a los requerimientos de mantenimiento, donde tres (3) equivale a bajo, dos (2) a media y uno (1) a alto, obteniendo la matriz de evaluación, que permitió determinar que la tipología con mayor puntaje es el tanque de almacenamiento, en segundo lugar los humedales construidos y zonas de bio-retención y en último lugar las zanjas de infiltración y pavimentos permeables, es decir, son estas tipologías de SUDS las que tienen mayores requerimientos de mantenimiento (Anexo 8).

6.1.15.8 Costos.

La evaluación de costos aquí presentada se hizo con base en los costos de construcción y de mantenimiento para las tipologías de SUDS preseleccionadas, según la revisión de literatura

realizada en la Guía Técnica para el Diseño y la Construcción de SUDS (Centro de Investigación en Ingeniería Ambiental CIIA, 2017) y a nivel de prefactibilidad, es decir, que un análisis adecuado de los costos implicará la evaluación de factores que permitan cuantificar los beneficios de la tipología seleccionada, con un análisis detallado de los costos de mano de obra, materiales, equipos y herramientas para su construcción y mantenimiento, según precios de mercado de la zona de implementación.

En la Tabla 22 se presenta la calificación cualitativa de los costos de capital y mantenimiento para cada tipología preseleccionada, en donde los costos se definen como bajos, medios y altos. Cabe mencionar que para los costos de humedales construidos se consideró una calificación similar a la de las zonas de bio-retención (Centro de Investigación en Ingeniería Ambiental CIIA, 2017).

Tabla 22.

Calificación tipologías según costos. Adaptada de (Centro de Investigación en Ingeniería Ambiental CIIA, 2017).

Costos	Tanques de Almacenamiento	Zonas de bio-retención	Zonas de infiltración	Pavimentos permeables	Humedales construidos
Costos de Capital	Media	Media	Media	Alto	Media
Costos de Mantenimiento	Media	Media	Media	Media	Media

Alto: 1 Medio: 2 Bajo: 3

Se realizó la ponderación de los resultados, de acuerdo con la puntuación asignada y se obtuvo que los pavimentos permeables son la tipología con los mayores costos, y las demás obtuvieron la misma calificación, en primer lugar (Anexo 9).

6.1.15.9 Evaluación Ponderada de las tipologías de SUDS preseleccionadas.

Según los puntajes obtenidos en las calificaciones de los distintos criterios se presenta la Tabla 23, para la selección de la alternativa más adecuada según los objetivos del proyecto,

en ese orden, las tipologías con mayor puntuación fueron seleccionadas como las más adecuadas para el sitio de emplazamiento y para conformar los trenes de tratamiento (Centro de Investigación en Ingeniería Ambiental CIIA, 2017).

Tabla 23.

Matriz final de selección de tipologías.

Criterio	Peso	Tanque de Almacenamiento	Zonas de Bio-retención	Zanjas de Infiltración	Pavimentos permeables	Humedales construidos
Mejoramiento de la Calidad de agua	25%	0	4,25	4	3,75	3
Control de Volúmenes	22%	0,88	0,66	1,32	1,1	0,88
Amenidad y Conflictos de uso	18%	1,44	1,08	0,72	1,08	1,62
Mantenimiento	19%	1,14	0,57	0,38	0,38	0,57
Costos	16%	0,64	0,64	0,64	0,48	0,64
Total	100%	4,10	7,20	7,06	6,79	6,71

6.1.15.10 Conformación y evaluación de trenes de tratamiento.

Para determinar la conformación de los trenes factibles se consideraron principalmente los procesos de almacenamiento (A) y aprovechamiento de escorrentía para usos no potables (Ri) como lavado de pisos, descargas de sanitarios o riego, por ser los procesos alineados con los objetivos del proyecto. Para esto se emplearon las combinaciones de tipologías de SUDS preseleccionadas que pueden ser empleadas de acuerdo con la asociación de estos dos procesos tratamiento (Centro de Investigación en Ingeniería Ambiental CIIA, 2017), utilizando la Tabla 24, donde se presentan los puntajes obtenidos bajo la siguiente escala de colores y de menor a mayor: en rojo los valores igual a cero (0), en amarillo los valores iguales a tres (3), en verde claro los valores iguales a cuatro (4) y en verde oscuro los iguales a cinco (5).

Tabla 24. Puntajes asignados según el desempeño de cada tipología de SUDS para todos los procesos. Adaptado de (Centro de Investigación en Ingeniería Ambiental CIIA, 2017).

Tipología	Procesos				
	Infiltración (I)	Almacenamiento/Detención (A)	Transporte (T)	Aprovechamiento de agua pluvial (R)	Aprovechamiento de agua pluvial para otros usos (Ri)
Tanques de almacenamiento	0	5	0	5	5
Zonas de Bio-retención	3	5	0	0	4
Zanjas de Infiltración	5	3	3	0	0
Pavimentos Permeables	5	3	0	0	0
Humedales Construidos	3	5	0	0	4

De acuerdo con esta matriz y a los puntajes obtenidos, los trenes recomendados para los procesos requeridos en esta investigación fueron los conformados por tanques de almacenamiento y zonas de bio-retención y tanques de almacenamiento y humedales construidos. Se escogió realizar un tren compuesto por tanque de almacenamiento y un humedal construido, principalmente por la mayor eficiencia de éstos sobre las zonas de bio-retención, en la remoción de sedimentos y polución (Geosyntec Consultants, 2013), dado que la principal fuente de escorrentía es la cubierta del Edificio Almendros en la que pueden predominar estos contaminantes.

6.2 DISEÑO DE LA ALTERNATIVA SELECCIONADA

6.2.1 Descripción del sistema de aprovechamiento de aguas lluvias.

El sistema propuesto es ampliamente usado y muy referenciado en el mundo, sin embargo en Colombia existen pocas experiencias documentadas de cosecha de lluvia para satisfacer

demandas de operación en viviendas, edificaciones y grandes superficies (Pinzon et al., 2016).

El sistema de cosecha de lluvia presentado en la ilustración 28 y que representa al propuesto en este trabajo, está compuesto por P, que es la precipitación (litros/m²), CS, que es la superficie efectiva de captación de agua (m²); RC, es el coeficiente de escorrentía (0 a 1); FC, es el coeficiente de filtros (0 a 1); R, es la escorrentía útil o flujo de entrada al tanque de almacenamiento de agua lluvia (litro/día); S(t), es el volumen en litros, de agua en el depósito de agua lluvia en el tiempo; Dye, es la demanda de agua lluvia para usos externos (litros/día), que para este estudio no se tendrá en cuenta ya que en la actualidad no se emplea agua para riego de jardines; Dyi, es la demanda de agua lluvia para usos internos (litros/día), en este estudio se considera la descarga de sanitarios y orinales y lavado de pisos; Y, es el flujo de agua suministrado por el depósito de agua lluvia (litros/día); Yi, es el flujo de agua lluvia para usos internos (litros/día); Ye, es el flujo de agua lluvia para usos externos (litros/día), que no será considerado en este trabajo; O, es el excedente de agua lluvia (litros/día), cuando la capacidad máxima del almacenamiento del depósito de agua lluvia Smax (litros), sea excedida. Adaptado de (Pinzon et al., 2016).

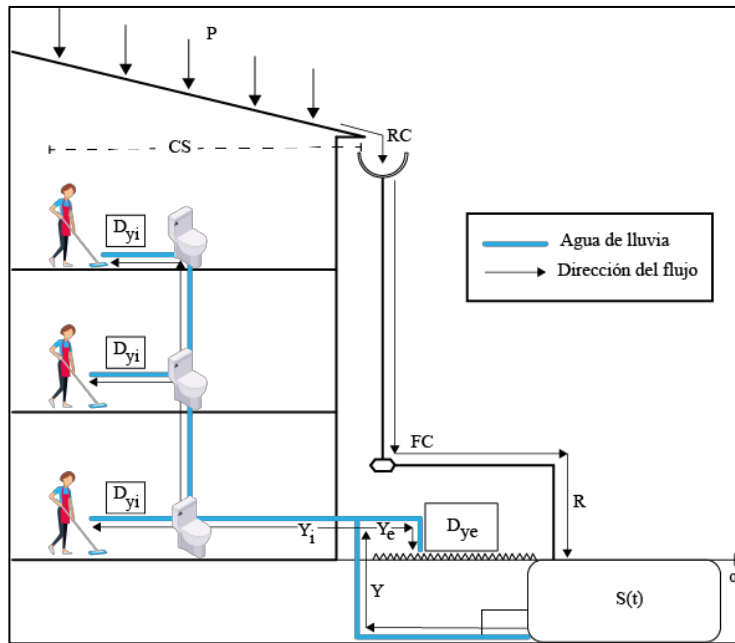


Ilustración 28. Configuración del sistema de aprovechamiento de agua lluvia. Adaptado de (Pinzon et al., 2016).

El diseño para el sistema de aprovechamiento de aguas lluvias estará comprendido de una captación y red de aducción a través de un flujo libre, y una distribución entre en tanque de almacenamiento y las redes de entrega, conceptualizada como un sistema a presión (Estupiñán Perdomo & Zapata García, 2011), empleando la infraestructura de drenaje actual como red de aducción, conduciendo el volumen de agua captada al tanque de almacenamiento. Para el tratamiento de las aguas de primer lavado o “First flush”, se realizó el predimensionamiento de un humedal construido que permitiese mejorar la calidad de éstas para su uso en la descarga de sanitarios y limpieza de pisos. Previa decantación y reducción de velocidad de las aguas, mediante un aliviadero.

6.2.2 Material y Diámetro de Tuberías.

Para el diseño de la red de distribución, se analizó el flujo a través de las tuberías, calculando las velocidades, gradiente de energía y presiones manométricas óptimas. En el diseño de la red de distribución a presión se empleó tubería y accesorios de Polivinilo de Cloruro (PVC),

RDE 21 con presión de trabajo de 200 PSI (14.06 Kg/cm²). En el RAS se menciona un diámetro mínimo de 50mm o 2”, para una red menor de distribución y para el nivel de complejidad bajo y medio.

Mediante el método de Hunter Modificado se calculó el total de unidades a suministrar, con base en los equipos existentes en el edificio Almendros, para los usos determinados, según la Tabla 25 y según la NTC 1500.

Tabla 25.

Unidades de Hunter por equipos sanitarios y para aseo del Edificio Almendros.

Aparato Uso	Sanitario (Fluxómetro)		Orinal (Fluxómetro)		Grifo*
	Público	Privado	Público	Privado	
Piso 1	5	2	3	1	2
Piso 2	5	0	3	0	2
Piso 3	4	1	2**	0	1
Total	14	3	8	1	5
Unidades de Hunter	10	6	10	10	3
Total Unidades de Consumo	140	18	80	10	15
Total Unidades			263		

(*) Los grifos corresponden a las salidas de lava traperos y una salida para la caseta de bombas.

(**) Estos orinales en la actualidad son tipo seco, sin embargo, están considerados en el sistema, previendo un aumento futuro en el consumo.

Para 263 unidades de Hunter el caudal máximo es de 4,89 l/s y que equivale a 78 GPM.

El RAS-2000 recomienda velocidades de flujo entre 0,50 m/s y 2,00 m/s para garantizar que no se genere sedimentación o erosión en los conductos. Considerando presiones entre 4,0 y 10,00 Metros de Columna de Agua (MCA) (Estupiñán Perdomo & Zapata García, 2011).

Para determinar las pérdidas por fricción en tuberías de PVC con diámetros pequeños, se emplea la fórmula de Flamant, expresada en la ecuación (15) (Perez Carmona, 2001).

$$j = \frac{4 C V^{1.75}}{D^{1.25}} \quad (15)$$

En donde:

J = Pérdida de carga en m/m

C = Coeficiente de fricción, para PVC es 150

D = Diámetro en m

Q = Caudal en m³/s

Para diámetros mayores o iguales a 2" y para agua de diferentes temperaturas, siempre y cuando no difiera significativamente su viscosidad, es empleada la fórmula empírica desarrollada por los investigadores Hazen y Williams (Perez Carmona, 2001), expresada mediante la ecuación (16).

$$Q = 0,28 C \cdot D^{2.63} j^{0.54} \quad (16)$$

$$V = 0,355 \cdot C \cdot D^{0.63} j^{0.54} \quad (17)$$

En donde:

Q = Está dado en m³/s

V = Velocidad media en m/s

C = Coeficiente de fricción

D = Diámetro de la tubería en m

J = Pérdida de carga en m/m

Cuando el caudal se expresa en litros por segundo (l/s), se emplea la ecuación (18)

$$j = \left(\frac{Q}{280 C D^{2.63}} \right)^{1.85} \quad (18)$$

Empleando el análisis de la ruta crítica, en donde se localiza el aparato más alejado de la red hasta la salida de la tubería del tanque, se pueden chequear los diámetros de tubería de cada tramo, mediante un proceso iterativo, teniendo en cuenta los parámetros de velocidad, presión y pérdidas antes mencionados.

6.2.3 Pérdidas en Accesorios.

Mediante el método de las longitudes equivalentes, se suma a la longitud del tubo, longitudes que correspondan a la misma pérdida de carga a causa de los accesorios de la tubería (Perez Carmona, 2001). Teniendo en cuenta todos los accesorios y demás causas de pérdidas, se obtiene la longitud total. Los valores correspondientes a las longitudes de los accesorios se encuentran consignados en tablas, basadas en la fórmula de Darcy-Weisbach, adoptando valores precisos de K, empleando la expresión (19).

$$Le = (K1 \phi \pm K2) \left(\frac{120^{1,85}}{C} \right) \quad (19)$$

6.2.4 Ruta Crítica red de distribución.

Con el fin de calcular las pérdidas de carga en el sistema, se establece la ruta crítica, localizando el aparato más crítico, es decir, el más alejado de la red hasta el equipo de presión. En la tabla 26, se presenta cada tramo analizado, mediante la identificación de aparatos, las unidades de Hunter correspondientes (Método Hunter NTC 1500), asignando un factor de simultaneidad, según ecuación (4) y empleando las tablas de Hazen Williams se calculan las pérdidas, caudales y velocidades de cada tramo.

6.2.5 Equipo de Presión.

Para el cálculo del TDH (Altura Dinámica Total) de la bomba se deben tener en cuenta las pérdidas totales del sistema: (i) la altura estática desde el equipo de presión hasta el nivel más alto de la edificación, (ii) las pérdidas por fricción de la ruta crítica desde el equipo de presión hasta el aparato crítico, (iii) la pérdida del medidor individual, (iv) la altura estática de succión y (v) funcionamiento del aparato con mayor requerimiento.

En este diseño se escogió un medidor con un diámetro 2", con una pérdida de 3,0 m.c.a, trabajando con el 55% de su capacidad nominal y con un caudal de diseño de 4,9 l/s y caudal

nominal de 8,4 l/s, empleando la tabla que correlaciona estos parámetros en (Perez Carmona, 2001). En la tabla 26 se representa los resultados para este cálculo.

Tabla 26.

Determinación de la Altura Dinámica Total.

Altura Dinámica Total	38,2 m
(i)	12,0 m
(ii)	0,22 m
(iii)	3,0 m
(iv)	3,0 m
(v)	20,0 m

(i) Tomada de la altura del edificio Almendros y sus 3 pisos.

(ii) Tomada de tabla 27.

Para efectos de diseño, este valor se incrementó en un 20%, como factor de seguridad para la operación, trabajando con una altura dinámica total igual a 45m.

Determinación de la Potencia

La Potencia de la bomba en Hp, se calcula mediante la ecuación (20).

$$P = \frac{\gamma * Ht * Q}{76\eta} \quad (20)$$

En donde,

Γ : Peso específico del agua = 1 kg/l

Ht: Altura dinámica total = 45m

Q: Caudal =4,9 l/s

H: Eficiencia de la bomba motor = entre 60 y 75% (Perez Carmona, 2001), se empleó 65%

Reemplazando los valores en la ecuación (20), se obtuvo que la Potencia de la bomba es de 4,46 Hp, sin embargo para el diseño se incrementó este resultado en un 20% (Perez Carmona, 2001), para finalmente obtener 5,35 Hp. Teniendo en cuenta que debe ser una bomba

comercial se proponen 2 bombas de 6 Hp con variador de velocidad, conectadas al sistema de emergencia eléctrico, la segunda bomba es de respaldo en el sistema, según la curva mostrada en Anexo 10.

$$P = \frac{1 \frac{kg}{l} * 45m * 4,9l/s}{76 * 0,65} = 4,46 Hp * 1,20 = 5,35 Hp$$

Tabla 27.*Ruta crítica Red de distribución Edificio Almendros.*

Tramo	Cant. Aparatos	Und. Hunter	Und. Hunter totales	Q (GPM)	q (lps)	K	Q (L/s)	q (gpm)	Ø. Pulg	Ø. Interno (m)	L (m)	Le (m) Acc.	L total (m)	V (m/s)	Pérdidas j (m/m)	Pérdidas Totales (m)
1 - 2	1	6	6	5	0,32	1,00	0,32	4,99	2	0,0546	7,00	0,92	7,92	0,13	0,0005	0,00
2 - 3	1	3	9	8	0,50	1,00	0,19	3,00	2	0,0546	6,00	1,23	7,23	0,08	0,0002	0,00
3 - 4	2	20	29	20	1,26	1,00	0,95	14,98	2	0,0546	1,00	0,77	1,77	0,40	0,0035	0,01
4 - 5	2	20	49	29	1,83	1,00	0,95	14,98	2	0,0546	4,00	1,23	5,23	0,40	0,0035	0,02
5 - 6	2	23	72	38	2,40	1,00	1,13	17,97	2	0,0546	4,00	2,15	6,15	0,48	0,0049	0,03
6 - 7	1	3	75	39	2,46	1,00	0,19	3,00	2	0,0546	5,00	0,77	5,77	0,08	0,0002	0,00
7 - 8	8	80	155	58	3,66	0,38	0,95	15,10	2	0,0546	5,00	0,77	5,77	0,41	0,0036	0,02
8 - 9	8	80	235	73	4,58	0,38	0,95	15,10	2	0,0546	9,00	3,07	12,07	0,41	0,0036	0,04
9 - 10	1	3	238	73	4,61	1,00	0,19	3,00	2	0,0546	5,00	0,77	5,77	0,08	0,0002	0,00
10 - 11	1	3	241	74	4,64	1,00	0,19	3,00	2	0,0546	19,50	2,46	21,96	0,08	0,0002	0,00
11 - 12 (EP)	3	22	263	78	4,90	0,71	0,76	12,00	2	0,0546	35,00	3,99	38,99	0,32	0,0023	0,09
TOTAL																0,22

6.2.6 Estructuras preliminares al Sistema.

6.2.6.1 Aliviadero de Vertedero Transversal.

Dada la restricción de espacio se consideró un aliviadero de vertedero transversal, con el fin de mejorar la calidad del agua (ayuda a la suspensión de sólidos) y a desviar los flujos de escorrentía de primer lavado hacia el humedal artificial y el otro flujo hacia el tanque de almacenamiento. En este diseño, la tubería de entrada de 10" se planteó completamente ahogada antes de que se alcance el nivel de operación del vertedero (Ministerio de Vivienda, 2010). Se empleó la ecuación (21) para determinar el caudal de salida en relación con la altura de la lámina de agua por encima del vertedero.

$$Q = \frac{2}{3} C_d * b * \sqrt{2g}(H + 0,0012)^{3/2} \quad (21)$$

Donde:

Q: Caudal de vertimiento (m³/s)

C_d: Coeficiente de descarga (adimensional), calculado mediante la ecuación (22)

b: Ancho de vertedero (m)

g: Aceleración de la gravedad (m/s²)

H: Altura de agua por encima de la creta del vertedero (m)

$$C_d = 0,602 + 0,0832 * \frac{H}{H_v} \quad (22)$$

Donde:

H_v: Altura del vertedero (m)

De acuerdo con la configuración y recomendaciones de esta estructura dadas en RAS, se determinaron las dimensiones en función del diámetro de la tubería de entrada, lo cual arrojó los resultados presentados en la Tabla 28.

Tabla 28.

Dimensiones Aliviadero de Vertedero Transversal.

Parámetro	Dimensión
Q	0,87 m ³ /s
b	0,51m
H	0,7 m
Hv	0,31 m
Longitud	2,0 m

Para la regulación de la salida en 2” hacia el humedal, se planteó un dispositivo de control de salida, una electroválvula tipo mariposa de 2” para flujo libre de presión con medidor de flujo a 220V de cierre total y con actuador de cierre lento hasta el volumen máximo que el humedal está en capacidad de tratar.

6.2.6.2 Consideraciones de diseño del Humedal Construido.

Para el diseño se seleccionó un humedal artificial de flujo horizontal subsuperficial, teniendo en cuenta la restricción de espacio para su construcción y su mayor capacidad de remoción de contaminantes a altas cargas de aplicación (Bernal, 2008). Adicionalmente, en este tipo de humedales, al agua no queda expuesta durante el proceso de tratamiento, se minimiza el riesgo asociado al contacto de humanos o vida silvestre a organismos patógenos, también si son operados adecuadamente no proporcionan hábitat para mosquitos. (Kadlec & Wallace, 2009). Estas consideraciones son de alta importancia para el desarrollo del sistema en el Edificio Almendros de la PUJ Cali. En la tabla 29 se realiza la comparación entre ambos sistemas.

Tabla 29.

Comparación entre los sistemas de flujo de los humedales. Adaptado de (Delgadillo et al., n.d.).

Criterio	Flujo Superficial	Flujo Subsuperficial
Tratamiento	Tratamiento de flujos secundarios (aguas ya tratadas por otros medios, ej. Lagunas, fangos activados, etcétera.). Son tratamientos adicionales a los sistemas convencionales (tratamiento terciario y mejoramiento de calidad de agua)	Para tratar flujos primarios (aguas pretratadas, ej. Tanques IMHOFF, pozos sépticos). Pueden usarse como tratamiento secundario.
Operación	Opera con baja carga orgánica	Opera con altas tasas de carga orgánica
Olores	Los olores pueden ser controlados	No hay presencia de olores
Insectos	El control de insectos es costoso	No hay presencia de insectos
Protección térmica	Las bajas temperaturas afectan el proceso de remoción	Por acumulación de restos vegetales y el flujo subterráneo el agua mantiene una temperatura casi constante. Puede operar bajo condiciones más frías que los sistemas superficiales (Kadlec & Wallace, 2009)
Área	Requieren mayores superficies	Requieren superficies de menor tamaño
Costo	Menor costo de construcción	Mayor costo de construcción por el material granular requerido
Valor ecosistema	Mayor valor como ecosistemas para la vida salvaje, el agua es accesible a la fauna	Menor valor como ecosistema para la vida, el agua es difícilmente accesible a la fauna
Usos generales	Son de restauración y creación de nuevos ecosistemas	Tratamiento de aguas residuales, principalmente para casas aisladas o pequeñas comunidades

En cuanto a la selección de las especies de macrófitas, se tuvieron en cuenta varios criterios, principalmente su capacidad para remover contaminantes (depuradora) y su función estética (ornato), también se consideró (Luna Pabello & Aburto Castañeda, 2014):

- Profundidad de la raíz adecuada (entre 0,4 y 0,6 m), de lo que depende la cantidad de oxígeno disuelto del sistema.(U.S. EPA, 1993)
- Resistencia a la temperatura del sitio

- Tolerancia a exposición prolongada y directa al sol
- Sencillez de manipulación
- Disponibilidad en la zona
- Facilidad de mantenimiento

Para este diseño se seleccionó la *Cyperus papyrus* (papiro) mostrado en la Ilustración 29, por cumplir todos los criterios antes mencionados, por emplearse comúnmente y con éxito en sistemas similares en el país (S. Galarza Molina et al., 2015) y por estar identificada entre la especies de flora existentes en los humedales de la ciudad de Santiago de Cali (Carmona Tobar & Muñoz Azcarate, 2004) y registrados por el GBIF (Infraestructura Mundial de Información en Biodiversidad), como especie presente en humedales en 11 municipios del departamento del Valle del Cauca, también como una de las especies posibles según (EAAB, 2016).



Ilustración 29. *Cyperus papyrus* (papiro). Tomado de TurboSquid, 2015.

6.2.6.3 Predimensionamiento del Humedal

En la Tabla 30, se resumen los principales parámetros de diseño de los humedales subsuperficiales de flujo horizontal.

Tabla 30.*Parámetros de diseño humedal subsuperficial de flujo horizontal (Delgadillo et al., n.d.).*

Parámetro	Unidad	Intervalo	Valor usual
Tiempo de retención hidráulico	Días	4 - 15	7
Profundidad agua	m	0,1 – 0,8	0,6
Área	M ² /heq	2,5 - 5	
Carga orgánica	g DBO ₅ /m ² día	3 – 7,5	<11
Carga orgánica	Kg DBO ₅ /heq.día	<70	
Carga hidráulica	m ³ /m ² día	0,1 – 0,2	
Características constructivas			
Grava ingreso salida	mm	50 - 100	50
Grava media	mm	3 – 6 5 – 10 6 – 12	19
Coefficiente de uniformidad		3 – 5	<5
Profundidad medio	m	0,70 – 1,5	0,7
Pendiente	%	0 – 1	0,5
Relación Largo-ancho		2:1 – 7:1	3:1
Drenaje			
Tubería perforada – tamaño	Pulgada	3 – 4	4
Distribución de agua			
Tubería perforada – canal	Pulgada	2 – 4	3

Según (Brand Torres, 2014) existen diferentes procedimientos para el diseño de humedales artificiales de flujo superficial y subsuperficial, algunos utilizan como criterio de diseño, parámetros de reactores de biomasa adherida y reacciones cinéticas de primer orden para la remoción de contaminantes. Mientras otros utilizan análisis de diseño de regresión múltiple de datos obtenidos de sistemas en operación. También se puede realizar mediante la determinación del volumen de calidad o tratamiento (V_c), calculado mediante la ecuación (23), y calcular el área del humedal en comparación con el área de la cuenca contribuyente, mediante la relación entre el área del humedal y el área de la cuenca (WWAR), el rendimiento

implícito de una WWAR particular, se infiere de los datos de rendimiento de sistemas operativos similares.(Kadlec & Wallace, 2013).

Para el predimensionamiento del humedal primero se determinó el volumen de tratamiento (V_c) en m^3 , mediante la ecuación (23).

$$V_c = C * hp * A \quad (23)$$

Donde A es el área de drenaje (m^2), hp es la profundidad de lluvia (m) y C el coeficiente de escorrentía. Para determinar hp, como la lámina de agua calculada según los factores climáticos y ambientales de la zona, se empleó la sugerida según las referencias relacionadas en la tabla 31. (Valentina Feijoo Moreno & Andrés David Perea Agredo, 2014).

Tabla 31.

Lámina de agua requerida para el volumen de primer lavado según diferentes fuentes. Adaptado de (Valentina Feijoo Moreno & Andrés David Perea Agredo, 2014).

Lámina (mm)	Consideración	Fuente
1,0	-----	CEPIS, 2004
0,4 – 0,8	-----	Texas Manual, 2005
0,5	Baja Contaminación ¹	ARCSA, 2012
2,0	Media Contaminación	
5,0	Alta Contaminación ²	

¹ se considera cuando se presentan frecuentes lluvias que mantienen la superficie de recolección limpia y/o una contaminación mínima.

² cuando se presenta un alto contenido de materia orgánica proveniente de animales, árboles adyacentes y/o contaminación del aire.

Se calculó el volumen a tratar, reemplazando en la ecuación (23) una altura de lámina igual a 5,0mm de acuerdo con las consideraciones presentadas en la tabla 31, obteniendo un volumen a tratar de 10,13 m^3 .

$$V_c = 0,95 * 0,005m * 2.369,4m^2 = 11,25m^3$$

Por otro lado, teniendo en cuenta que para el diseño de los SUDS, dependiendo de su funcionalidad, se puede considerar un periodo de retorno entre 2 y 10 años, si bien en zonas urbanas muy pobladas se puede considerar hasta 20 o 50 años (Sañudo-Fontaneda & Rodriguez-hernandez, 2012). Respecto a la duración de la precipitación, como en el cálculo del drenaje de carreteras, esta se tomó igual al correspondiente tiempo de concentración de la cuenca impermeable vertiente al SUDS, considerando un mínimo de 5 minutos.(Sañudo-Fontaneda & Rodriguez-hernandez, 2012).

Realizando una estimación aproximada de h_p , mediante las curvas IDF de la Estación Universidad del Valle Código 2605507, empleando un periodo de retorno (T_r) de 2 años y una duración (t) de 5 minutos, para calcular I (intensidad mm/h) mediante la ecuación (24).

$$I = \frac{C1}{(D + X_o)^{C2}} \quad (24)$$

Se obtuvo que:

$$I = \frac{5727.629}{(5+45.495)^{1.061}} = 89,30 \text{ mm/h}$$

Realizando la correlación entre el valor obtenido de I y $h_{2,5}$, al multiplicarlo por $(5/60)$, se obtiene:

$$h(2,5) = 89,30 \text{ mm/h} * \frac{5}{60} = 7,44 \text{ mm}$$

Donde $h_{2,5}$, es la profundidad de lluvia con un periodo de retorno de 2 años y una duración de 5 minutos (mm). Para determinar el volumen de calidad (V_c) en m^3 , se emplea la ecuación (23)

$$V_c = 0,95 * 0,00744m * 2.369,4m^2 = 16,75m^3$$

Al comparar ambos resultandos se realizó el predimensionamiento con base en un volumen a tratar de $16,75 m^3$ correspondiente al primer lavado. Teniendo en cuenta una profundidad

de 0,8 m, el área superficial del humedal será de 20,94 m² según las recomendaciones de la Tabla 30, y manteniendo una relación longitud - ancho 2:1, tendría un ancho de 3,0 m y una longitud de 7 m. Sin embargo, también debió adicionarse el volumen aportado por la precipitación que cae directamente sobre el humedal, para esto también se aplicó la ecuación (), en donde para calcular h_p (profundidad de lluvia), se determinó la Intensidad del evento de diseño que según la bibliografía consultada, se encontraron varias formas de determinar la profundidad de lluvia (EAAB, 2016), entre las cuales está el hacerlo a partir de las curvas IDF y para retener, detener o infiltrar el volumen de diseño de escorrentía para un evento de lluvia de 6 horas y un período de retorno de 5 años (EAAB, 2016), calculando así $h_{5,360}$. Posteriormente se realizó la correlación mediante la ecuación (25) para calcular h_p .

$$h_p = 10,19 \ln(h(5,360)) - 16,785 \quad (25)$$

Para identificar el C (coeficiente de escorrentía) se tomó un valor de 1,0 para humedal artificial, de acuerdo con los valores comúnmente usados según las tipologías de SUDS empleados de acuerdo con la tabla de tipologías de SUDS y valores de tiempo de drenaje y C, del Anexo 11 (EAAB, 2016).

Reemplazando en la ecuación (24) se obtuvo una Intensidad de 12,4 mm/h para un evento de 6 horas con un período de retorno de 5 años.

$$I = \frac{22423,996}{(360+71,651)^{1,242}} = 12,4 \text{ mm/h}$$

Realizando la correlación entre el valor obtenido de I y $h_{5,360}$, al multiplicando por (360/60), se obtiene:

$$h(5,360) = 12,4 \text{ mm/h} * \frac{360}{60} = 74,4 \text{ mm}$$

Aplicando la ecuación (25) se obtuvo que la profundidad de lluvia (h_p) es de 27,13 mm

$$h_p = 10,19 \ln(74,4) - 16,785 = 27,13 \text{ mm}$$

Al reemplazar en la ecuación (23) se obtuvo el volumen adicional sobre el humedal.

$$V_c = 1,0 * 0,027m * 21m^2 = 0,57m^3$$

Para un volumen total de $17,32 \text{ m}^3$, el humedal se diseñó con un área superficial de $21,75 \text{ m}^2$, un ancho de 2,9 m, una longitud de 7,5 m y una profundidad de 0,8 m, manteniendo una relación largo/ancho 2:1. Por restricciones de espacio, el humedal se diseñó sobre el tanque de almacenamiento.

6.2.6.4 Composición del Humedal artificial de flujo subsuperficial.

Está compuesto por (i) la impermeabilización del fondo y laterales, (ii) una estructura de entrada del afluente, (iii) el medio granular, (iv) la vegetación emergente y (v) la estructura del humedal.

- (i) Con respecto a la impermeabilización, es necesario disponer de una barrera impermeable para confinar el sistema y en este caso no permitir la infiltración. Para este diseño se empleó una geomembrana, previa compactación del terreno existente conformado principalmente por suelos de mediana a alta plasticidad de los tipos MH-ML y MH de la Clasificación Unificada de Suelos, de acuerdo con el estudio de suelos realizado en el 2011 para la ampliación del edificio de Registro académico, contiguo a la zona donde se planteó el sistema.
- (ii) La estructura de entrada del efluente debe lograr una distribución uniforme a través de toda el área transversal del borde de entrada del lecho, donde el flujo se distribuye en la zona de entrada compuesta por grava entre 1 1/2" y 3". La entrada al humedal se planteó en tubos pasante de PVC de 2" desde el aliviador al humedal.

- (iii) El medio poroso, es donde crecen las plantas, los microorganismos y se realizan los principales procesos de depuración. El lecho de grava se diseñó con diferentes tamaños de grava ubicados en las tres zonas del humedal; en la primera grava de 1", en la segunda grava de ¾" y la tercera zona, grava de ½", según (S. Galarza Molina et al., 2015) y de esta forma minimizar la posible obstrucción. La colocación se realizó de manera escalonada.
- (iv) La vegetación emergente seleccionada fue la especie *Cyperus papyrus*, las cuales se distribuyeron cada metro cuadrado en cantidades de 16 plantas y separadas cada 30 cm, de acuerdo a la práctica realizada en la Pontificia Universidad Javeriana Bogotá (Brand Torres, 2014).
- (v) El humedal se divide en tres grandes zonas: una zona de entrada, una zona de tratamiento y una zona de salida. Una zona de entrada de aproximadamente 2 m de largo y con una grava de 1" y una segunda zona, con una longitud de 4,2m, y la zona de salida e aproximadamente 1 metro de largo.(García Botero, 2005). La Ilustración 30 muestra las zonas típicas de un humedal de flujo subsuperficial.

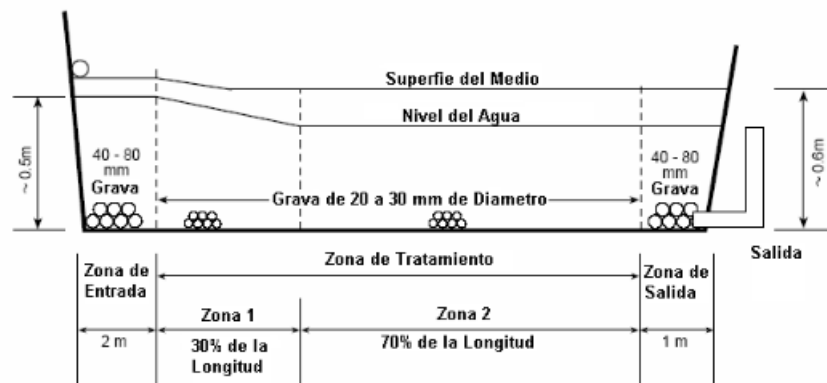


Ilustración 30. Zonas típicas de un humedal de flujo subsuperficial. Tomado de (U.S. EPA, 2000).

El sistema quedó constituido por un tanque de almacenamiento de 112 m³, sobre el que se proyectó el humedal artificial de 17,32m³, alimentados por la aguas lluvias captadas en la cubierta del Edificio Almendros, que se conducen por el sistema de colectores y bajantes existentes, llegando a un aliviadero de vertedero transversal que reduce la velocidad de las aguas y al final separa las de primer lavado, mediante una electro válvula tipo mariposa de 2” de cierre completo y lento con medidor de flujo, para su ingreso y mejoramiento de la calidad en el humedal y posterior ingreso al tanque. Las demás aguas son conducidas directamente al tanque de almacenamiento y mediante un sistema de presión eléctrico conformado por dos bombas de 6Hp con variador de velocidad, que distribuye el agua lluvia almacenada mediante tubería de PVC de 2” a los puntos sanitarios y de lava traperos en todos los pisos del Edificio Almendros. En el Anexo 14, se presenta la ingeniería básica de este sistema, mediante planos hidráulicos y constructivos. En la Ilustración 31, se presentan esquemáticamente cada uno de dichos componentes.

Un componente adicional lo constituye el sistema de medición, que posteriormente permitirá mantener el óptimo funcionamiento del humedal y verificar la turbidez del agua obtenida. Ajustando lo empleado en la PUJ Bogotá (Brand Torres, 2014), se propuso para este trabajo la instalación de 13 piezómetros, 5 de ellos con sensores ultrasónicos para la medición de la lámina de agua, lo que permitirá determinar los volúmenes y tiempos de retención reales en el humedal durante los eventos de lluvia. Cada uno de estos sensores estarán ubicados en diferentes puntos del sistema; a la entrada del aliviadero, sobre uno de los piezómetros de la entrada, del centro y de la salida del humedal construido y otro en el tanque de almacenamiento. Para medir la turbidez del efluente, se propuso la utilización de un turbidímetro que permita identificar cambios ante la presencia de sedimentos.

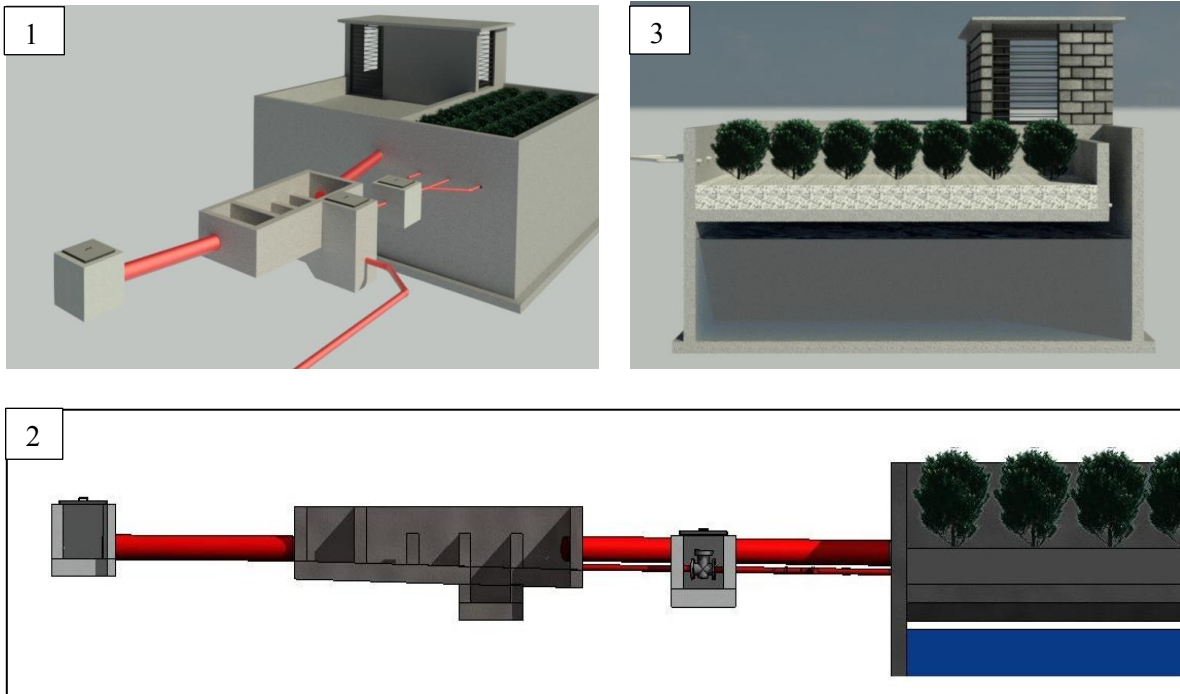


Ilustración 31. Componentes del Diseño de SUDS. 1. Vista Aliviadero, Caja Electroválvula, Humedal/Tanque almacenamiento y caseta de bombas. 2. Sección Longitudinal Aliviadero, Caja Electroválvula, Humedal/Tanque almacenamiento y caseta de bombas. 3. Sección transversal Humedal/Tanque almacenamiento y caseta de bombas.

En la Ilustración 32 se presenta, a nivel esquemático la red de distribución y conexión del sistema completo de aprovechamiento de aguas lluvias en el Edificio Almendros de la PUJ Cali, detallado en los planos del Anexo 14.

02 DIAGRAMA DE CONEXIÓN PROPUESTA
SUMINISTRO APROVECHAMIENTO AGUAS LLUVIAS

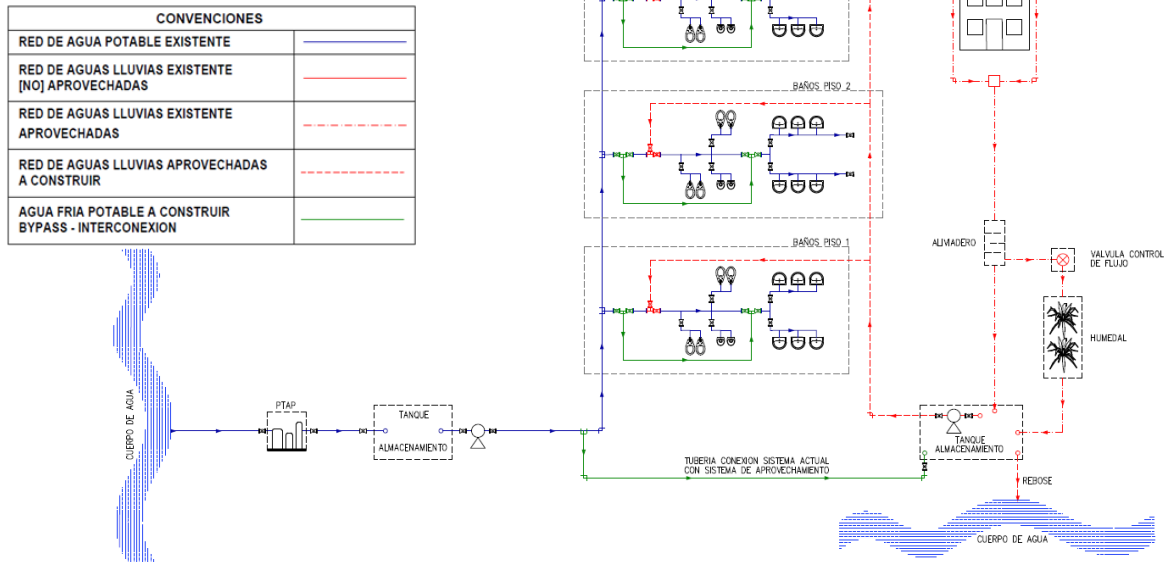


Ilustración 32. Diagrama de Conexión Propuesta Aprovechamiento aguas lluvias Edificio Almendros.

6.2.7 Presupuesto.

Con el desarrollo del diseño anteriormente expuesto, se realizó el estimado de costos para su construcción, se determinaron los costos directos con base en estas cantidades de obras y precios unitarios provenientes de base de datos de Construplan y precios de mercado, los costos indirectos se estimaron en un 22%, arrojando un valor total de (\$271.638.956 COP) antes de IVA. En la Anexo 12 se presentan los costos por capítulos y actividades del sistema.

6.2.8 Viabilidad Económica del diseño.

Para definir la viabilidad económica del proyecto, se realizó el análisis financiero, a través de la aplicación de los conceptos de Valor Presente Neto (VPN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y Relación Beneficio-Costo (B/C). Para esto, se definió un período de evaluación de 30 años (Woods Ballard et al., 2015), y se determinaron:

1. Inversión inicial, correspondiente a los costos de construcción del sistema (\$285.286.093 COP).
2. Ingresos, correspondientes al ahorro en el costo de potabilizar un metro cúbico de agua en la PUJ Cali que se deja de pagar, ya que la Universidad cuenta con acueducto propio. Este costo es de \$706 COP e incluye el salario del operario, los insumos de proceso y el mantenimiento a los equipos, de acuerdo con la información suministrada por Luis Fernando Guevara, Coordinador de Mantenimiento de la Oficina de Recursos Físicos de PUJ Cali. Estos costos se presentan en la Tabla 32.

Tabla 32.

Ingresos por ahorros en el consumo de agua Edificio Almendros PUJ Cali.

Componente	Valor
Consumo anual Edificio Almendros (m ³)	2680,08
Costo Anual (\$)	\$1.892.136
Reducción consumo (%)	70%
Ahorro (m ³ /año)	1876,06
Ahorro (\$/año)	\$1.324.496

3. Egresos, que corresponden a los gastos necesarios para la operación y mantenimiento de la infraestructura construida (tanque de almacenamiento, humedal, estructuras adicionales y redes). Estos costos fueron estimados anualmente, mediante la valoración de costos para cada componente de infraestructura del sistema, según las actividades de mantenimiento preventivo y correctivos (EAAB, 2016), estos costos se detallaron en el Anexo 13, obteniendo un valor anual de \$1.718.750 COP, antes de IVA.
4. Tasas de interés (Tasa de Oportunidad, Tasa de Inflación), corresponde al máximo indicador de bondad financiera. La Tasa de Oportunidad se evaluó con el valor de la

Tasa promedio Ponderada de las nuevas captaciones que hacen entidades financieras (DTF), igual a 2,25% según las proyecciones mensuales del Banco de la República de Colombia. Por otro lado, la Tasa de Inflación se evaluó a partir del cálculo promedio de la tasa de inflación desde los últimos 10 años, igual al 3,67% (Banco de la República de Colombia, 2020).

Para calcular el Valor Presente Neto VPN, la Tasa Interna de Retorno TIR y la relación Beneficio Costo del proyecto, se realizó el análisis para un período de 30 años (Woods Ballard et al., 2015), aplicando a cada período (ingresos y egresos) un incremento lineal con la tasa de inflación calculada, lo cual arrojó valores negativos para VPN, una TIR mucho menor a la Tasa de Oportunidad y una relación Beneficio Costo inferior a 1, demostrando que no es financieramente rentable la inversión del sistema propuesto. Estos resultados se indican en la Tabla 33.

Tabla 33.

Análisis Financiero para la construcción de un sistema Humedal Construido/Tanque de almacenamiento para el Edificio Almendros en la PUJ Cali.

Período en años	Egresos	Ingresos	Flujo Neto Efectivo (FNE)
0	\$ 285.286.093		-\$ 285.286.093
1	\$ 1.718.750	\$ 1.324.496	\$ 394.254
2	\$ 1.781.828	\$ 1.373.105	\$ 408.724
3	\$ 1.847.221	\$ 1.423.497	\$ 423.724
4	\$ 1.915.014	\$ 1.475.740	\$ 439.274
5	\$ 1.985.295	\$ 1.529.899	\$ 455.396
6	\$ 2.058.156	\$ 1.586.047	\$ 472.109
7	\$ 2.133.690	\$ 1.644.255	\$ 489.435
8	\$ 2.211.996	\$ 1.704.599	\$ 507.397
9	\$ 2.293.177	\$ 1.767.158	\$ 526.019
10	\$ 2.377.336	\$ 1.832.012	\$ 545.324
11	\$ 2.464.584	\$ 1.899.247	\$ 565.337
12	\$ 2.555.035	\$ 1.968.950	\$ 586.085
13	\$ 2.648.804	\$ 2.041.210	\$ 607.594
14	\$ 2.746.016	\$ 2.116.122	\$ 629.893
15	\$ 2.846.794	\$ 2.193.784	\$ 653.010
16	\$ 2.951.272	\$ 2.274.296	\$ 676.976
17	\$ 3.059.583	\$ 2.357.763	\$ 701.821
18	\$ 3.171.870	\$ 2.444.292	\$ 727.578
19	\$ 3.288.278	\$ 2.533.998	\$ 754.280
20	\$ 3.408.957	\$ 2.626.996	\$ 781.962
21	\$ 3.534.066	\$ 2.723.406	\$ 810.660
22	\$ 3.663.766	\$ 2.823.356	\$ 840.411
23	\$ 3.798.227	\$ 2.926.973	\$ 871.254
24	\$ 3.937.622	\$ 3.034.393	\$ 903.229
25	\$ 4.082.132	\$ 3.145.755	\$ 936.378
26	\$ 4.231.947	\$ 3.261.204	\$ 970.743
27	\$ 4.387.259	\$ 3.380.890	\$ 1.006.369
28	\$ 4.548.271	\$ 3.504.969	\$ 1.043.303
29	\$ 4.715.193	\$ 3.633.601	\$ 1.081.592
30	\$ 4.888.241	\$ 3.766.954	\$ 1.121.286
		VPN	-\$ 273.877.166,85
		TIR	-11,29%
		Relación B/C	0,120

Por otro lado, al ser el producto de este proyecto, un sistema de control ambiental, según la definición del Decreto 2532 de 2001, aplican los beneficios tributarios a la inversión

ambiental, tales como. la exclusión del impuesto sobre las ventas IVA, de acuerdo con los artículos 424 numeral 7 y 428 literales (f) e (i) del Estatuto Tributario Colombiano, para: los equipos y elementos nacionales o importados que se destine a la construcción, instalación, montaje y operación de sistemas de control y monitoreo ambiental. El otro beneficio tributario al que pueden aplicar este tipo de proyectos, de acuerdo al artículo 158-2 del Estatuto Tributario Colombiano, es el poder descontar el valor de la inversión en control y mejoramiento ambiental, de la base de liquidación de renta, hasta un monto que no supere el 20% de la renta líquida, sin embargo la PUJ Cali por ser una IES (institución de Educación Superior), aprobada por el ICFES, no es contribuyente del impuesto sobre la renta, pero si debe reinvertir las utilidades resultantes del ejercicio contable, así que este proyecto podría respaldar la reinversión de su capital. En consecuencia, se realizó el análisis financiero con base en dos escenarios adicionales; uno en el cual la Universidad comprase directamente los equipos necesarios para el proyecto, conformados por el equipo de presión, la electroválvula, la válvula de compuerta tipo chapaleta y la válvula de corte, que corresponden al 14% del costo directo total de las obras y sobre esos poder deducir el IVA, obteniendo un ahorro de \$5.197.650. El tercer escenario, es deduciendo el IVA de todos los materiales sobre los que aplica este impuesto y que hacen parte de los insumos para la ejecución de este proyecto, para esto, se determinó el peso porcentual de los materiales en cada actividad y a ese valor se aplicó el descuento de IVA, en ese ejercicio se obtuvo un ahorro de \$22.144.798, lo que corresponde a un 9% del costo total directo del proyecto. Al realizar la evaluación financiera con estos escenarios adicionales y, empleando el mismo período de análisis (30 años) y los ingresos y egresos antes presentados, tampoco se obtuvo viabilidad financiera. Los resultados se resumen en la Tabla 34.

Tabla 34.*Comparación Resultados Análisis Financiero para Escenario 2 y Escenario 3.*

	Escenario 2	Escenario 3
Inversión	\$ 274.890.793	\$ 258.943.645
VPN	-\$ 263.481.866,7	-\$ 247.534.718,9
TIR	-11,22%	-11,00%
Relación B/C	0,122	0,129

También se realizó el análisis financiero bajo los escenarios antes mencionados, asumiendo que la PUJ Cali pagara por el suministro de agua potable, con una tarifa de \$2.280/m³ por servicio especial y un cargo fijo mensual de \$6.860, según las Tarifas de EMCALI E.I.C.E. ESP., para los consumos a partir del 1 de julio de 2019, mediante Resolución CRA 830 de 2018 y Resolución JD No. 0001 de 2018; obteniendo resultados negativos y por ende la no viabilidad financiera, estos resultados se presentan en la Tabla 35.

Tabla 35.*Comparación Resultados Análisis Financiero por escenarios con facturación EMCALI E.I.C.E. ESP.*

	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Inversión	\$ 280.088.433	\$ 274.890.793	\$ 258.943.645
VPN	-\$ 206.045.928,93	- \$ 200.848.278,87	-\$ 184.901.131,06
TIR	-3.66%	-3,57%	-3,29%
Relación B/C	0,389	0,395	0,416

Por otro lado, cabe mencionar que existen líneas de crédito, tales como la Línea Verde de Davivienda, la Línea de Crédito Ambiental, Crédito Verde Bancolombia y la Línea de Desarrollo Sostenible de Bancoldex que ofrecen tasas de interés preferenciales, plazos hasta 12 años, períodos de gracias hasta 1 año y algunos con reembolso hasta del 25% del crédito según la disminución del impacto ambiental conseguida con el proyecto y que podrían favorecer la amortización de la inversión. Los procedimientos y formatos para solicitar los beneficios tributarios están contemplados en la Resolución 978 de 2007, para la exclusión de Iva; y en la Resolución 136 de 2004, para la deducción en Renta.

7. CONCLUSIONES

Se diseñó un sistema urbano de drenaje sostenible con el que se consigue disminuir en los usos sanitarios, un 70% del consumo de agua potable del Edificio Almendros de la Pontificia Universidad Javeriana Cali, lo que representa un 13,7% del consumo total de agua potable, para los mismos usos, de la PUJ Cali.

Con esta investigación se pudo determinar, mediante un análisis muestral realizado con los registros de reservas de la Oficina de Registro Académico de la PUJ Cali, que la población diaria del Edificio Almendros es de 1816 personas. Con esta población se estimaron los consumos actuales de agua potable para descarga de sanitarios, orinales y lavado de pisos en el Edificio Almendros, de 223,34m³ por mes, determinando así la demanda de agua a sustituir. También se pudo calcular la oferta de agua lluvia promedio mensual, captada en la cubierta del Edificio Almendros de la PUJ Cali, arrojando un valor mínimo de 62,63 m³ en el mes de agosto y un valor máximo de 321,65m³ en el mes de abril. Al realizar el balance hídrico, se pudo determinar que es posible reemplazar durante todo el año el 100% de los consumos actuales, excepto en los meses de julio, agosto y septiembre; lo cual demuestra que esta práctica permite un uso eficiente del recurso hídrico.

Aunque no se pudo determinar la calidad del agua lluvia en la zona de estudio, debido a la restricción de acceso al campus para la toma de muestras por SARS COVID-19, se identificó con base en la revisión de los parámetros estipulados en el Decreto 1575 de 2007 y en el Decreto 1594 de 1984, que el agua lluvia normalmente tiene una calidad adecuada para los usos determinados, sin embargo, en contacto con las cubiertas esta disminuye, principalmente las aguas de primer lavado, y aunque no existen parámetros reglamentados para este uso, esto determinó considerar un tratamiento adicional por la presencia común de contaminantes como sedimentos o patógenos.

Mediante un análisis comparativo cuantitativo y cualitativo de las tipologías de SUDS basado en la metodología desarrollada en la Guía Técnica de Diseño y Construcción de SUDS por el Centro de Investigaciones de Ingeniería Ambiental de la Universidad de los Andes, se identificó y seleccionó la mejor alternativa de diseño que permitiese el mayor aprovechamiento de agua lluvia de escorrentía, mejorara su calidad para su reutilización en los usos antes mencionados, permitiese una adecuada amenidad y menor riesgo durante su construcción y operación, y con los costos más favorables económicamente frente a la inversión inicial y a su mantenimiento, y que se ajustara a las restricciones de espacio actuales. Lo anterior permitió escoger un tren de tratamiento conformado por un tanque de almacenamiento y un humedal artificial construido. Este sistema permite que el agua lluvia captada por la cubierta del Edificio Almendros, sea conducida, tratada y almacenada, para posteriormente reincorporarse a la red hidráulica de agua potable existente, mediante una nueva red de distribución presurizada, y de esta forma suplir el uso de agua potable en las descargas de sanitarios y orinales y en los puntos de lava traperos para lavado de pisos.

Para el predimensionamiento del tanque de almacenamiento de agua lluvia, se analizó la relación oferta-demanda y se determinó que el volumen de almacenamiento fuera de 112 m³, el cual puede suplir hasta el 70% del consumo para los usos antes mencionados en el Edificio Almendros. Cabe mencionar que el acueducto de la PUJ Cali se abastece de la Derivación 4 del Río Pance, con un caudal otorgado de 3,72 l/s (Pontificia Universidad Javeriana Cali, 2017), este estudio permitió determinar que con el aprovechamiento de estas aguas lluvias se pueden suplir 0,11 l/s, es decir, un 3% del caudal otorgado, lo que permitirá que el caudal asignado no crezca, aunque la población aumente en el tiempo.

En caso de incluir la totalidad de las cubiertas de las PUJ Cali que totalizan alrededor de 23.620 m², se podrían obtener una oferta hídrica mensual de 1,05 l/s en promedio, lo que

permitiría suplir el 28% del caudal tomado de la Derivación 4 del Río Pance, lo cual contribuiría de manera importante a la conservación de las fuentes hídricas actuales.

En lo concerniente al predimensionamiento del humedal artificial, se calculó que el volumen de tratamiento es de 17,32 m³, correspondiente a las aguas del primer lavado “First Flush”.

Al realizar el análisis financiero mediante Valor Presente Neto VPN, Tasa Interna de Retorno TIR y Relación Beneficio Costo, empleando para este el presupuesto de la construcción del sistema, los costos de mantenimiento y de operación, se obtuvieron resultados negativos, permitiendo evidenciar la influencia de contar con bajos costos por m³ por suministro, mantenimiento y operación, esto debido a la concesión de aguas que tiene la PUJ Cali. También se realizó el análisis bajo la consideración de las tarifas actuales de la empresa de servicios públicos de la ciudad de Cali (EMCALI E.I.C.E. ESP.), arrojando también resultados negativos, evidenciando que el proyecto no es viable desde el punto de vista financiero, sin embargo, sí lo es desde el punto de vista técnico y ambiental, en cuanto al uso eficiente del recurso hídrico y el compromiso de fomentar en la comunidad educativa una cultura ecológica y sostenible hacia la región, el país y el planeta.

La implementación de este tipo de sistemas en una edificación existente puede acarrear mayores costos dadas las intervenciones necesarias para dicho fin, por lo que considerarlos o incluirlos en las etapas iniciales de los proyectos garantizará un menor costo en la inversión inicial, permitiendo mejorar su viabilidad financiera.

Este trabajo podrá ser incluido dentro del Programa de Uso Eficiente y Ahorro de Agua (PUEAA) de la Pontificia Universidad Javeriana Cali, como una de las estrategias de implementación para la reducción del consumo de agua en el campus, demostrando que, mediante la captación y almacenamiento de la oferta hídrica actual mediante SUDS, la PUJ Cali puede obtener ahorros en el consumo de agua potable que emplea para descargas de

sanitarios y orinales y para lavado de pisos del Edificio Almendros, contribuyendo a la sostenibilidad del campus y aumentando así la eficiencia en el uso del recurso hídrico.

De igual forma, esta investigación podrá ser empleada en la evaluación y proyección de la PUJ Cali para la aplicación de un sello de certificación LEED® o EDGE (Excellence in Design for Greater Efficiencies) en la categoría de gestión eficiente del agua durante la operación de la edificación, y de esta forma alinearse con la Política Ambiental de la Universidad.

En relación con los incentivos tributarios, este proyecto aplica a los beneficios estipulados en el Estatuto Tributario Colombiano, principalmente a la exención del IVA sobre equipos y elementos para la construcción, instalación, montaje y operación del sistema. No obstante, dado que la PUJ Cali por su naturaleza como IES, está exenta al pago del impuesto de renta, podría respaldar la reinversión de utilidades en este proyecto. Sin dejar a un lado, las líneas de crédito a las que este tipo de proyectos pueden acceder con tasas de interés preferenciales, en plazos y períodos de gracia.

El agua como recurso natural y vital es limitada, por ello toda la humanidad debe enfocar esfuerzos en optimizar este recurso y ser facilitadores en la reproducción de su ciclo hidrológico, mediante sistemas urbanos de drenaje sostenible SUDS. El aprovechamiento de aguas lluvias permite su optimización, disminuyendo los consumos de agua potable para usos que no la requieran. Lamentablemente, se evidencia que el aprovechamiento de aguas lluvias, no es una práctica común en nuestra región y ni en nuestro país, lo que puede asociarse a un bajo nivel de conciencia en el uso eficiente del agua, dada la abundancia de fuentes hídricas naturales, pero que con el cambio climático ya presentan grandes alteraciones, es por lo que cobra importancia la capacitación y sensibilización de estudiantes, empleados, colaboradores y demás usuarios de la PUJ Cali, en el uso eficiente del agua.

Finalmente, es importante destacar que proyectos de esta naturaleza son de gran valor por el impacto positivo que pueden generar sobre la conciencia ambiental de la sociedad y sobre la responsabilidad en el cambio de los modelos de consumo de los recursos naturales y cómo pueden generar una transformación sobre la conservación de los recursos para las generaciones futuras.

8. RECOMENDACIONES

En esta investigación se tuvo que realizar el análisis de datos y estimación de comportamiento de usos para determinar los consumos, por lo que se recomienda contar con medidores de flujo en la entrada de todas las edificaciones de la PUJ Cali.

El análisis hidrológico se realizó con información pluviométrica de estaciones cercanas a la zona de estudio, se recomienda contar con una estación meteorológica en la PUJ Cali o la puesta en operación, de la que al momento de este estudio se encontraba inoperante.

Se recomienda realizar la toma de muestras para el análisis de calidad del agua en cubierta y a cielo abierto, con el fin de corroborar la calidad del afluente y del efluente del humedal artificial y del tanque de almacenamiento.

El diseño se planteó con base en los planos suministrados por el diseñador del Edificio Almendros, se recomienda contar con planos récord de Obra, y realizar una actualización de los recorridos y niveles de las redes existentes, y verificar el estado de estas.

Este estudio se podrá complementar incluyendo una gestión integral de agua, adicionando la reutilización de aguas grises y negras, aprovechamiento de escorrentía de pisos y andenes, y alimentación de acuíferos o cuerpos de agua.

Se recomienda implementar un manual de operación y de mantenimiento preventivo y correctivo del sistema. Este manual deberá incluir un apartado de señalización que permita identificar las salidas o aparatos sanitarios que utilicen las aguas aprovechadas y tratadas de este sistema.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdulla, F.A. and Al-Shareef, A. (2006). Assessment of Rainwater Roof Harvesting Systems for Household Water Supply in Jordan. NATO Security through Science Series, Integrated urban water resources management, 10: 291–300.
- Abdulla, F.A. and Al-Shareef, A. (2009). Roof Rainwater Harvesting Systems for Household Water Supply in Jordan. Desalination, 243(1–3): 195–207.
- Alex Javier, G. O. (2014). Evaluación patrones de consumo y caudales máximos instantáneos de usuarios residenciales de la ciudad de Bogotá.
- Ambiente, S. D. de, & Alcaldía Mayor de Bogotá. (2011). Guía de techos verdes en Bogotá.
- Banco de la República de Colombia (2020). Listado promedio de las tasas de captación mensuales de la República de Colombia. <https://www.banrep.gov.co/es/estadisticas/tasas-captacion-semanales-y-mensuales>.
Fecha de Consulta: Octubre de 2020. Fecha de Consulta: Octubre de 2020.
- Banco de la República de Colombia (2020). Listado de inflación total y meta de la República de Colombia. <https://www.banrep.gov.co/es/estadisticas/inflacion-total-y-meta>. Fecha de Consulta: Octubre de 2020.
- Bernal, D., Cardona, D., Galvis, A., & Peña, M. (2008). Guía de selección de tecnología para el tratamiento de aguas residuales domésticas por métodos naturales. Seminario Internacional sobre métodos naturales para el Tratamiento de Aguas Residuales. CINARA. Universidad del Valle. Cali. Colombia.

- Brand Torres, M. (2014). Evaluación de un sistema humedal construido – tanque regulador como sistema de aprovechamiento de aguas lluvias en el campus de la pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, con base en criterios hidrológicos e hidráulicos.
- Carmona Tobar, A. M., & Muñoz Azcarate, L. A. (2004). Plan de manejo ambiental para el humedal urbano Lago Panamericano ubicado en la ciudad de Santiago de Cali.
- Castañeda, N. P. (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.
- Castro Espinosa, M. L. (2011). Pavimentos permeables como alternativa de drenaje urbano.
- Castro, N. Y., Garzón, J. E., & Ortiz, R. O. (2006). Adaptación del Método de Hunter para las condiciones locales en Colombia Nelson Yovani Castro Ladino 1 ,Jorge Enrique Garzón Garzón 2 ,Rafael Orlando Ortiz Mosquera 3. 3–9.
- Chow, V. (1994). Hidráulica de canales abiertos (4 ed.). México.
- Centro de Investigación en Ingeniería Ambiental (CIIA). (2017). Investigación de las Tipologías y/o tecnologías de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) que más se adapten a las condiciones de la ciudad de Bogotá D.C. Bogotá D.C. Producto 3- Guía técnica de diseño y construcción de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS)
- De, S. D. E. A., Pluviais, G., & Edif, E. M. (n.d.). ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA ANQIP ETA 0701.
- Delgadillo, O., Camacho, A., & Serie, M. A. (n.d.). Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales.

DEUTSCHES INSTITUT FUR NORMUNG-DIN 1989-1. “Norma Alemana de Aprovechamiento de Agua de Lluvia”. 2001.34p.

Durrans R. (2003). Stormwater conveyance modeling and desing. 1ed, Haestad Methods, Inc., USA. ISBN 0-965-75808-7

EAAB. (2016). Criterios para Diseño y Construcción de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS). In Norma técnica de servicio NS-166.

Edge, D. (2018). Guía del usuario de EDGE. 1–336.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA. “Managing Wet Weather with Green Infrastructure: Rainwater Harvesting Policies” USA. 2008. 16p.

Estupiñán Perdomo, J. L., & Zapata García, H. O. (2011). Requerimientos de infraestructura para el aprovechamiento sostenible del agua lluvia en el campus de la Pontificia Universidad Javeriana, sede Bogotá. https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/1265#XIa_KmArdX8.mendeley

Fletcher, T. D., Shuster, W., Hunt, W. F., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S., Trowsdale, S., Barraud, S., Semadeni-Davies, A., Bertrand-Krajewski, J. L., Mikkelsen, P. S., Rivard, G., Uhl, M., Dagenais, D., & Viklander, M. (2015). SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage.

Urban Water Journal, 12(7), 525–542.

<https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.916314>

- Foidl, N. (1999). Investigaciones en un proyecto y manejo adecuado de biofiltros Tratamiento de aguas residuales a través de humedales naturales y artificiales, y lagunas de estabilización (pp. 16): OPS.
- Galarza Molina, S. 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. <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/1453#.XIK-pE3vV3w.mendeley>
- Galarza Molina, S., Torres, A., Lara-Borrero, J., Méndez-Fajardo, S., Solarte, L., & González, L. (2015). Towards a Constructed-Wetland / Reservoir- Tank System for Rainwater Harvesting in an Experimental Catchment in Colombia 1. 19(2), 415–421. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.iyu19-2.tcws>
- García Botero, T. (2005). Diseño, construcción y evaluación preliminar de un humedal de flujo subsuperficial.
- Geosyntec Consultants. (2013). Stormwater Best Management Practices: Guidance Document. January, 640.
- Hatt B.E., Deletic A., Fletcher T.D. (2006). A review of integrated storm water treatment and re-use in Australia. *Journal of Environmental Management*, 76:102–113.
- IDEAM (2015). Estudio Nacional del Agua 2014. Bogotá, D. C. 496 páginas
- IDEAM (2019). Estudio Nacional del Agua 2018. Bogotá, D. C. 452 páginas.
- Interpave. (2008). Guide to the Design, Construction and Maintenance of Concrete

Permeable Pavments. Interpave, Leicester, UK.

Instituto de Pesquisas Hidráulicas. (1999) Area de Download. [En línea]. Brasil, Portable document format. www.iph.ufrgs.br/grad/disciplinas/dhh/iph01014/pavimentos.

Kadlec, R. H., & Wallace, S. D. (2009). Treatment wetlands.

Kadlec, R. H., & Wallace, S. D. (2013). Treatment Wetlands. Second Edition. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Latorre Montero, J. (Director de T. o T. de G., Feijoo Moreno, V., & Perea Agredo, A. D. (2015). Aprovechamiento de agua lluvia como alternativa para el ahorro de agua potable en la Universidad del Valle sede Meléndez [recurso electrónico. <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/handle/10893/8507>

Luna Pabello, V. M., & Aburto Castañeda, S. (2014). Sistema de humedales artificiales para el control de la eutroficación del lago del Bosque de San Juan de Aragón.

Marchena Ávila, D. C. (2012). Techos verdes como sistemas urbanos de drenaje sostenible. 1–82.

Ministerio de Agricultura de la República de Colombia. "Por el cual se reglamente parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II y el Título III de la Parte III -Libro I- del Decreto-Ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos". [Decreto 1594 de 1984].

Ministerio de la Protección Social de la República de Colombia (9 de mayo de 2007). "Por el cual se establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano". [Decreto 1575 de 2007].

Ministerio de Medio Ambiente de la República de Colombia. (7 de junio de 2002). “Por la cual se establece la forma y requisitos para presentar ante el Ministerio del Medio Ambiente las solicitudes de calificación de exclusión de impuesto a las ventas de que tratan los artículos 424- 5 numeral 4o y 428 literal f del Estatuto Tributario, así como el procedimiento interno para el trámite correspondiente. [Resolución 486 de 2002].

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de la República de Colombia. (12 de junio de 2015). Por el cual se modifica el Decreto 1077 de 2015, Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio, en lo relacionado con los lineamientos de construcción sostenible para edificaciones. [Decreto 1285 del 2015].

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de la República de Colombia (10 de julio de 2015). Por la cual se reglamenta el Capítulo 1 del Título 7 de la parte 2, del Libro 2 del Decreto 1077 de 2015, en cuanto a los parámetros y lineamientos de construcción sostenible y se adopta la Guía para el ahorro de agua y energía en edificaciones. [Resolución 549 de 2015].

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de la República de Colombia. (26 de mayo de 2015). Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio. [Decreto 1077 del 2015].

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de la República de Colombia. (8 de junio de 2017). Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS y se derogan las resoluciones 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2015, 14474 de 2005 y 2320 de 2009. [Resolución 330 del 2017].

Ministerio de Vivienda, C. y T. (2010). Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y

Saneamiento Básico - RAS. In Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico.

<http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/TITULO030714.pdf>

MINVU – Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (1999). Técnicas alternativas para soluciones de aguas lluvias en Sectores urbanos. Guía de Diseño. “Diario Oficial” N°35.713, Santiago de Chile, Chile.

Monsalve Sáenz, G. (1995). Hidrología en la Ingeniería.

Montealegre Bocanegra, J. E. (2007). Modelo institucional del IDEAM sobre el efecto climático de los fenómenos El Niño y La Niña en Colombia. *Ideam*, 81. <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/440517/Modelo+Institucional+El+Niño++La+Niña.pdf/232c8740-c6ee-4a73-a8f7-17e49c5edda0>

Muñoz Triviño, A. F. (2016). Metodología de selección y optimización de Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible para aprovechamiento de escorrentía . Caso de estudio : campus de la Universidad de los Andes Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental Maestría en Ingeniería Ambiental.

NATIONAL SERVICES SCOTLAND-NHS. “Research Report Rainwater Harvesting”. Inglaterra. 2013. 28p.

Nelson Yovani, C. L., Jorge Enrique, G. G., & Rafael Orlando, O. M. (2006). Aplicación de los Métodos para el Cálculo de Caudales Máximos Probables Instantáneos, en edificaciones de diferente tipo. 14. <http://www.lenhs.ct.ufpb.br/html/downloads/serea/6serea/TRABALHOS/trabalhoA>

(6).pdf

Organización Panamericana de la Salud. (2004). Guía de diseño para captación del agua de lluvia.

Perez Carmona, R. (2001). Instalaciones Hidrosanitarias y de Gas para edificaciones.

Pérez López, M. E. (2009). Selección de plantas acuáticas para establecer humedales en el estado de Durango.

Pinzon, T. M., Flórez, M. T., & Orozco, I. E. (2016). Aprovechamiento del agua no convencional en sistemas urbanos.

Pontificia Universidad Javeriana Cali. (2015). Política Ecológica y Ambiental de la Pontificia Universidad Javeriana. Acuerdo N° 617. 2015, 617.

Pontificia Universidad Javeriana Cali (2017). Programa de Uso Eficiente y Ahorro de Agua PUEAA.

Pontificia Universidad Javeriana Cali. Javeriana en Cifras. (2020). <https://unicifras.javerianacali.edu.co/#/views/Profesores/Profesores?.iid=2>. Fecha de Consulta: Octubre de 2020.

Quintero Arias, A. (2018). Estudio de factibilidad para un sistema de recolección y aprovechamiento de agua de escorrentía en la Pontificia Universidad Javeriana Cali como alternativa de uso eficiente de agua.

Roca, M., Carratala, J. (2006). Departamento de Construcción Arquitectónica Escuela Técnica Superior de Arquitectura Las Palmas de Gran Canaria. Tema V. Editorial de Construcción.

- Sañudo-fontaneda, L. A., & Rodriguez-herandez, J. (2012). Diseño y Construcción de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS). October. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1647.6003/1>
- Tchobanoglous, G., Burton, F. L., & Stensel, H. D. (1998). Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, Reuse Metcalf & Eddy, Inc
- Torres Harker, M. A. (2016). Humedales Construidos: una alternativa para recuperar funciones ecológicas de los humedales naturales de Bogotá D.C.
- Turbosquid. (2015). Consultado en: <https://www.turbosquid.com/es/3d-models/3d-cyperus-papyrus-plant-set-model/916276>. Fecha de consulta: octubre de 2020.
- UNITED KINGDOM RAINWATER HARVESTING ASSOCIATION - UKRHA. “Rainwater Harvesting Workshop Manual”. Reino Unido. 2012. 36p.
- Urbonas, B. 1999. Design of a Sand Filter for Water Quality Enhancement. Water Environment Research. Vol. 71, No. 1, pp. 102-113.
- U.S. EPA. (1993). Guía para el diseño y construcción de un humedal construido con flujos subsuperficiales.pdf.
- U.S. EPA .(2004). A handbook of constructed wetlands, Volume 2, Domestic Wastewater
- U.S. Green Building Council, Inc., U. (n.d.). Guía de Conceptos Básicos de Edificios verdes y LEED (Core Concepts and LEED Guide) Segunda edición (second edition).
- U.S. Green Building Council. (2012). Guía adicional para la reducción del uso del agua.

- Valencia, M. (2011). Caracterización de consumo y manejo del agua en la pontificia universidad javeriana cali, para propuesta de uso eficiente.
- Valentina Feijoo Moreno, & Andrés David Perea Agredo. (2014). Aprovechamiento de agua lluvia como alternativa para el ahorro de agua potable en la universidad del valle sede meléndez.
- Vanegas Tamayo, A. F., & Flórez Vitola, S. H. (2012). Trincheras de Retención / Infiltración utilizadas como sistemas alternativos al drenaje urbano.
- Woods Ballard, B., Wilson, S., Udale-Clarke, Illman, S., Scott, T., Ashley, R., & Kellagher, R. (2015). The SUDS manual. In Ciria. <https://doi.org/London C697>
- WWAP (Programa Mundial de las Naciones Unidas de Evaluación de los Recursos Hídricos) / ONU-Agua. (2018). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2018: Soluciones basadas en la naturaleza para la gestión del agua. Paris, UNESCO.
- Xue, B., & Kang, X. (2012). Study on the Pollution Control and Resource Recovery of Urban Street Rainwater. Science Direct, Energy Procedia 16 (2012) 2 – 7.

10. ANEXOS

Anexo 1. Caudal Máximo Probable Método Hunter para Colombia. Tomado de (Castro et al., 2006).

Unidades	Caudal (l/s)		Unidades	Caudal (l/s)		Unidades	Caudal (l/s)	
	Flujómetro	Tanque		Flujómetro	Tanque		Flujómetro	Tanque
1	0.63	0.13	66	1.91	0.68	775	5.97	3.16
2	0.67	0.14	69	1.93	0.70	811	6.17	3.27
3	0.71	0.15	73	1.96	0.72	850	6.37	3.39
4	0.75	0.16	76	1.98	0.74	931	6.80	3.66
5	0.78	0.17	82	2.02	0.78	1009	7.20	3.89
6	0.82	0.18	88	2.05	0.82	1091	7.61	4.13
7	0.86	0.19	95	2.09	0.86	1173	8.02	4.38
8	0.89	0.20	102	2.13	0.89	1254	8.41	4.61
9	0.92	0.21	108	2.17	0.92	1335	8.80	4.85
10	0.96	0.22	116	2.21	0.96	1418	9.19	5.08
11	0.99	0.23	124	2.25	1.00	1500	9.57	5.31
12	1.02	0.24	132	2.30	1.04	1583	9.94	5.55
13	1.05	0.25	140	2.35	1.07	1668	10.32	5.78
14	1.08	0.26	148	2.39	1.11	1755	10.69	6.02
15	1.11	0.27	158	2.45	1.15	1845	11.08	6.27
16	1.14	0.28	168	2.52	1.18	1926	11.41	6.49
18	1.19	0.30	176	2.57	1.21	2018	11.78	6.74
20	1.24	0.32	186	2.63	1.25	2110	12.14	6.99
21	1.27	0.33	195	2.69	1.28	2204	12.50	7.24
23	1.32	0.34	205	2.75	1.31	2298	12.86	7.49
25	1.36	0.36	214	2.80	1.34	2388	13.18	7.74
26	1.38	0.37	223	2.86	1.37	2480	13.51	7.98
28	1.42	0.39	234	2.92	1.40	2575	13.83	8.24
30	1.46	0.41	245	2.98	1.44	2670	14.15	8.49
31	1.48	0.41	270	3.13	1.51	2765	14.45	8.74
33	1.52	0.43	295	3.28	1.59	2862	14.76	9.00
35	1.55	0.45	329	3.48	1.69	2960	15.12	9.26
37	1.58	0.46	365	3.69	1.80	3060	15.49	9.53
39	1.62	0.48	396	3.87	1.90	3150	15.82	9.76
42	1.66	0.50	430	4.06	2.01	3620	17.61	11.01
44	1.69	0.52	460	4.23	2.11	4070	19.38	12.18
46	1.71	0.54	490	4.40	2.21	4480	21.04	13.24
48	1.74	0.55	521	4.58	2.32	5380	24.69	15.53
50	1.76	0.57	559	4.79	2.45	6280	28.13	17.78
52	1.78	0.58	596	5.00	2.58	7280	31.65	20.28
54	1.80	0.60	631	5.19	2.70	8300	35.21	22.93
57	1.83	0.62	666	5.38	2.82	9000	37.81	24.89
60	1.86	0.64	700	5.57	2.93	10000	41.52	28.01
63	1.88	0.66	739	5.78	3.05			

Anexo 2. Caudales Mínimos Método Racional. Tomado de Gallizio, en Roca y Carratala 2002

APARATO	Q (lt/seg)	P (Kg/cm ²)	P (mca)
Lavabo	0,10	0,35	3,50
Sanitario con depósito	0,10	0,35	3,50
Ducha	0,20	1,00	10,00
Lavadero	0,20	0,35	3,50
Lavadora	0,20		
Lavaplatos	0,20		
Llave Exterior	0,25		
Fregadero	0,20	0,35	3,50
Bidet	0,10	0,35	3,50
Bañera	0,30	1,00	10,00
"Oficce"	0,15	0,35	3,50
Fluxómetros	0,95 - 2,0	1,00	10,00

Nota: Según normatividad española

Anexo 3. Consumo Total Edificio Almendros (Litros por día) para Usos sanitarios y lavado de pisos

Semestre	CONSUMO TOTAL (litros por día)					
	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	sábado
2016-1	11322,51	9704,94	10570,64	10750,37	9414,37	4966,95
2016-2	10906,13	10928,10	10181,22	10903,14	9500,24	4262,11
2017-1	10616,57	10894,15	10237,14	10479,77	9056,91	4777,34
2017-2	10398,89	11158,75	11436,34	10179,22	8767,35	4328,01
2018-1	10386,91	10292,05	9749,87	9897,65	8000,50	5092,87
2018-2	11090,85	10964,05	11057,90	10409,88	9212,68	4034,46
2019-1	9749,31	12452,25	10530,14	11340,92	6893,60	4562,11
2019-2	9424,14	10837,01	10039,21	10989,78	9541,96	5004,77
Máximo	11322,51	12452,25	11436,34	11340,92	9541,96	5092,87
Promedio	10486,91	10903,91	10475,31	10618,84	8798,45	4628,58
Mínimo	9424,14	9704,94	9749,87	9897,65	6893,60	4034,46
Prom l/s	0,12	0,13	0,12	0,12	0,10	0,05

Anexo 4. Plano General EIR 2-11 de la Pontificia Universidad Javeriana Cali



Anexo 5. Evaluación Tipologías de SUDS en eliminación de contaminantes.

	Tanque de Almacenamiento	Zonas de Bio-retención	Zanjas de Infiltración	Pavimentos permeables	Humedales construidos
Nutrientes	0	2	2	2	2
Metales	0	3	3	2	3
Patógenos	0	3	3	2	1
Sedimentos	0	3	3	3	3
Aceites y grasas	0	3	2	3	3
Basura y escombros	0	3	3	3	0
Total	0	2,8	2,7	2,5	2,0

Anexo 6. Evaluación Tipologías de SUDS por su eficiencia en la reducción de volumen escorrentía.

	Tanque de Almacenamiento	Zonas de Bio-retención	Zanjas de Infiltración	Pavimentos permeables	Humedales construidos
Reducción Volumen	2	2	3	3	1
Reducción descarga máxima	2	1	3	2	3
Promedio	2,0	1,5	3,0	2,5	2,0

Anexo 7. Evaluación Tipologías de SUDS por su amenidad y conflictos de uso

	Tanque de Almacenamiento	Zonas de Bio-retención	Zanjas de Infiltración	Pavimentos permeables	Humedales construidos
Amenidad	2	3	0	0	3
Conflictos de uso	6	3	4	6	6
Promedio	4	3	2	3	4,5

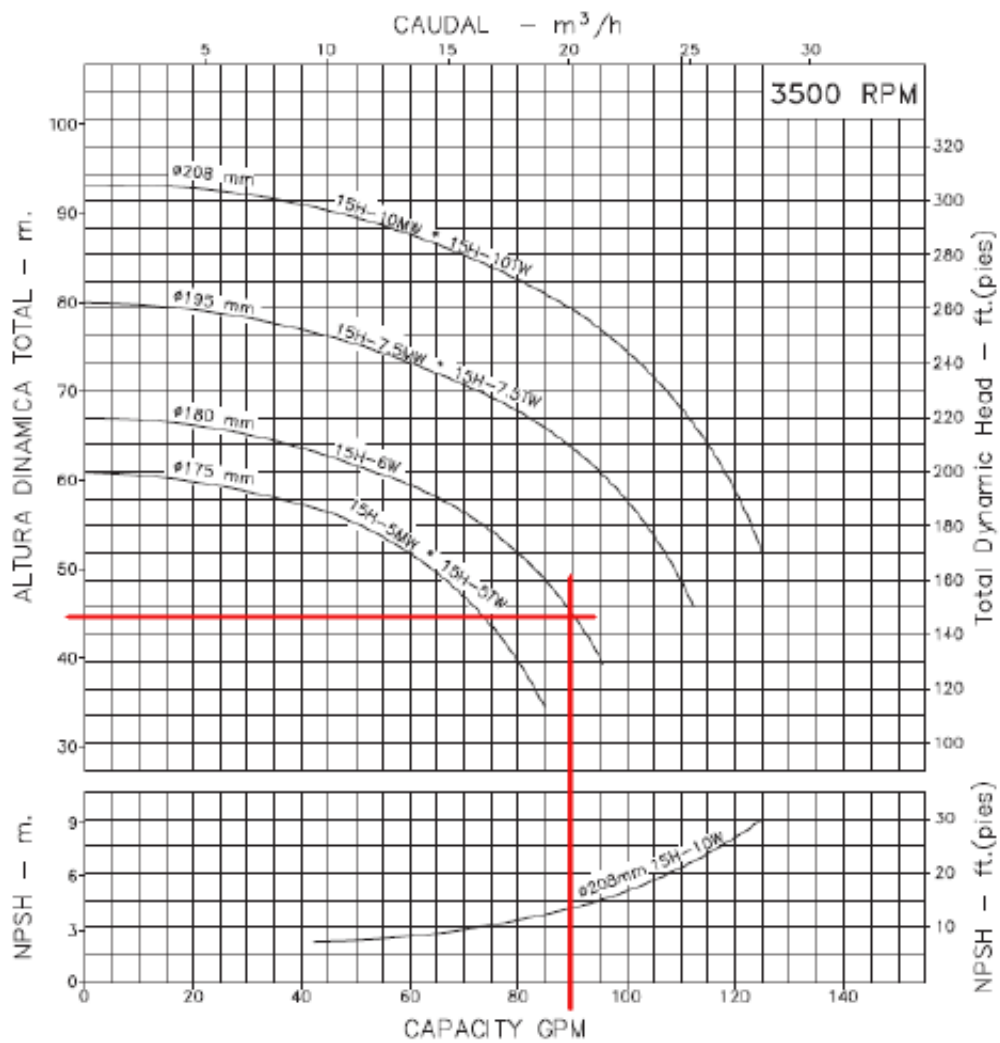
Anexo 8. Evaluación Tipologías de SUDS por frecuencia de mantenimiento

	Tanque de Almacenamiento	Zonas de Bio-retención	Zanjas de Infiltración	Pavimentos permeables	Humedales construidos
Riesgo colmatación	3	2	1	1	2
Total requerimientos	3	1	1	1	1
Promedio	3	1,5	1	1	1,5

Anexo 9. Evaluación Tipologías de SUDS según costos de construcción

	Tanque de Almacenamiento	Zonas de Bio-retención	Zanjas de Infiltración	Pavimentos permeables	Humedales construidos
Costos Capital	2	2	2	1	2
Costos Mantenimiento	2	2	2	2	2
Promedio	2	2	2	1,5	2

Anexo 10. Curva Equipo de Presión. IHM S.A.S.




Anexo 11. Tipologías de SUDS y valores de tiempo de drenaje, α y C. Tomado de (EAAB, 2016).

Tipología	Tiempo de drenaje (hr)	α	C	Lugar
Cuenca seca de drenaje extendido (CSDE)	12	0.8	1.3	Aspen
	40	1.0	1.2	Rapid City
	40	1.0	1.2	Denver
Porous landscape detention	12	0.8	1.0	Rapid City
Humedal artificial	24	0.9	1.0	Rapid City
	12	0.8	>0.75	Aspen
Zona de bio-retención*	24	0.9	1.0	Denver
	12	0.8	1.0	Denver
Pavimento poroso	12	0.8	1.0	Aspen
	12	0.8	1.0	Denver
Filtro de arena	24	0.9	1.0	Denver
Pondaje húmedo	12	0.8	1.0	Denver
Tanque de almacenamiento (aislado y subterráneo)	12	0.8	1.0	Denver

*Para los alcorques inundables se pueden considerar valores similares para los parámetros presentados

Anexo 12. Presupuesto de Obras. Elaboración Propia.

		PRESUPUESTO DE OBRA Y EQUIPOS			Versión:	1,01
		SISTEMA URBANO DE DRENAJE SOSTENIBLE PARA APROVECHAMIENTO DE AGUAS LLUVIAS PARA EL CAMPUS DE LA PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA DE CALI			Elaboró:	G. Rojas
					Fecha:	18/10/2020
ítem	Descripción	Un	Cantidad	V. Unitario	V. Total	
1,	PRELIMINARES					
1,01	Trazado y replanteo.	glb	1,00	\$ 3.978.488,00	\$ 3.978.488,00	
1,02	Oficina de obra ó Contenedor (2 contenedores)	mes	6,00	\$ 2.548.781,00	\$ 15.292.686,00	
1,03	Cerramiento provisional en tela. h= 2.20 mts.	ml	190,00	\$ 12.454,00	\$ 2.366.260,00	
1,04	Instalaciones provisionales de energía.	glb	1,00	\$ 2.984.643,00	\$ 2.984.643,00	
1,05	Instalación provisional agua potable	glb	1,00	\$ 1.989.344,00	\$ 1.989.344,00	
1,06	Señalización y seguridad industrial en obra	glb	1,00	\$ 2.854.377,00	\$ 2.854.377,00	
1,07	Baños Mviles (3 baños)	mes	6,00	\$ 1.245.788,00	\$ 7.474.728,00	
1,08	Planos record de la obra. (As-built)	un	10,00	\$ 154.545,00	\$ 1.545.450,00	
				Subtotal	\$ 38.485.976,00	
2,	DESMONTES, DEMOLICIONES Y ADECUACIONES					
2,01	Desmonte Cielo raso existente, incluye retiro	m2	160,00	\$ 7.848,00	\$ 1.255.680,00	
2,02	Demolición muro Fachada para pase de nueva tubería Ø2" UM, incluye resaneS.	glb	1,00	\$ 957.888,00	\$ 957.888,00	
2,03	Demolición caja ALL existente. Incluye retiro sobrantes	un	1,00	\$ 345.788,00	\$ 345.788,00	
2,04	Adecuación caja ALL existente para sello o ingreso de nueva tubería. Incluye reconstrucción de cañuelas y resane con mortero de reparación SikaTop®-122 Plus Monocomponente o similar	un	1,00	\$ 345.788,00	\$ 345.788,00	
2,05	Demolición parcial canal existente para adecuar entrega de tubería Ø 10" aguas lluvias. Incluye corte con cortadora y resane con mortero de reparación SikaTop®-122 Plus Monocomponente o similar	glb	1,00	\$ 784.878,00	\$ 784.878,00	
2,06	Taponamientos salidas de tubería en canal de aguas lluvias. Incluye corte con cortadora y resane con mortero de reparación SikaTop®-122 Plus Monocomponente o similar	glb	1,00	\$ 784.878,00	\$ 784.878,00	
				Subtotal	\$ 4.474.900,00	
3,	EXCAVACIONES					
3,01	Excavación mecánica (incluye retiro)	m3	236,80	\$ 30.212,00	\$ 7.154.201,60	
3,02	Excavación manual (incluye retiro)	m3	166,40	\$ 38.548,00	\$ 6.414.387,20	
				Subtotal	\$ 13.568.588,80	
4,	RELLENOS Y NIVELACIONES					
4,01	Conformación y compactación de la subrasante.	m2	182,00	\$ 4.125,00	\$ 750.750,00	
4,02	Relleno en material granular tipo Art.311-13 INVIAS (Afirmados)	m3	158,40	\$ 71.245,00	\$ 11.285.208,00	
4,03	Relleno en material granular tipo SBG-NT1 Art.320-13 INVIAS	m3	37,00	\$ 98.878,00	\$ 3.658.486,00	
4,04	Relleno con arena de río (cama tuberías)	m3	20,25	\$ 76.545,00	\$ 1.550.036,25	
				Subtotal	\$ 17.244.480,25	
5,	CONCRETO ESTRUCTURAS (Incluye Refuerzo)					
5,01	Concreto tanque de almacenamiento/Humedal f'c = 21,1 Mpa	m3	54,02	\$ 987.788,00	\$ 53.360.307,76	
5,02	Concreto tanque aliviadero aguas escorrentías f'c = 21,1 Mpa	m3	2,54	\$ 848.788,00	\$ 2.155.921,52	
				Subtotal	\$ 55.516.229,28	
6,	CASSETAS Y EQUIPOS					
6,01	Construcción caseta de bombas a todo costo, según diseño	m2	14,40	\$ 1.345.878,00	\$ 19.380.643,20	
6,02	Suministro e instalación de un (1) Equipo de Presión Constante EQ.SKP 15H-6TW(2) LA100 220V. Preensamblado	glb	1,00	\$ 25.329.150,00	\$ 25.329.150,00	
6,03	Suministro e instalación de Electrovalvula tipo mariposa con actuador electrónico + telemetría	glb	1,00	\$ 4.578.888,00	\$ 4.578.888,00	
				Subtotal	\$ 49.288.681,20	

7,	CIELO RASO (Incluye Estructura de soporte)				
7,01	Cielo raso en panel yeso. Resistente a la humedad. Ref Placa RH (Gyplac)	m2	160,00	\$ 56.466,00	\$ 9.034.560,00
				Subtotal	\$ 9.034.560,00
8,	ACABADOS				
8,01	Pintura muros 1 mano	m2	230,50	\$ 16.545,00	\$ 3.813.622,50
				Subtotal	\$ 3.813.622,50
9,	EMPRADIZACION				
9,01	Suministro e instalación tierra negra para jardín	m3	59,40	\$ 73.533,00	\$ 4.367.860,20
9,02	Suministro e instalación prado	m2	396,00	\$ 10.212,00	\$ 4.043.952,00
				Subtotal	\$ 8.411.812,20
10,	RED E INSTALACIONES HIDRAULICAS PVC-P				
10,01	Tubería PVC-Presión ø2 " U.M	ml	121,50	\$ 10.095,00	\$ 1.226.542,50
10,02	Llave de paso R.W. ø2" [sobre cielo Drywall]	un	3,00	\$ 298.974,00	\$ 896.922,00
10,03	Tapa registro regular Invisible 40x40 [sobre cielo Drywall]	un	3,00	\$ 84.245,00	\$ 252.735,00
				Subtotal	\$ 2.376.199,50
11,	RED E INSTALACIONES AGUAS LLUVIAS PVC-S				
11,01	Tubería PVC-S ø10"	ml	69,50	\$ 187.488,00	\$ 13.030.416,00
11,02	Tubería PVC-S ø8"	ml	70,75	\$ 129.887,00	\$ 9.189.505,25
11,03	Construcción cajas de paso Aguas Lluvias (60*60*80)	un	6,00	\$ 256.466,00	\$ 1.538.796,00
11,04	Construcción cajas de paso Aguas Lluvias (80*80*80)	un	2,00	\$ 312.455,00	\$ 624.910,00
11,05	Construcción cajas de inspección valvula de corte. Incluye tapa en alfajor e:1/4" (60*60*80)	un	1,00	\$ 415.455,00	\$ 415.455,00
11,06	Construcción cajas de inspección Electrovalvula. Incluye tapa en alfajor e:1/4" (1,00*1,00*1,00)	un	1,00	\$ 524.001,00	\$ 524.001,00
11,07	Compuerta válvula tipo chapaleta ø10" [Entrega rebose]	un	1,00	\$ 1.645.877,00	\$ 1.645.877,00
11,08	Valvula de corte en hierro Bridada ø4" [Aliviadero]	un	1,00	\$ 999.788,00	\$ 999.788,00
				Subtotal	\$ 27.968.748,25
12,	OBRAS ELECTRICAS				
12,01	Adecuación tablero existente para inclusión de totalizador 30A	glb	1,00	\$ 548.788,00	\$ 548.788,00
12,02	Sistema puesta a tierra. [1 varilla CW + 40m Cable desnudo #4 AWG Cu-Cu]	glb	1,00	\$ 647.888,00	\$ 647.888,00
12,03	Acometida 3#8 + 1#10 AWG + Tubería ø1" desde T-220E a Celda Caseta Bombas	ml	40,00	\$ 23.155,00	\$ 926.200,00
12,04	Celda Tablero Trifásico de 12 circuitos [IP65]	un	1,00	\$ 645.458,00	\$ 645.458,00
12,05	Salida 220V para equipo de presión	un	1,00	\$ 124.554,00	\$ 124.554,00
12,06	Salida 220V para valvula con actuador eléctrico	un	1,00	\$ 124.554,00	\$ 124.554,00
12,07	Salida Toma 220V GFI	un	1,00	\$ 145.454,00	\$ 145.454,00
12,08	Salida Toma 110V GFI	un	1,00	\$ 139.488,00	\$ 139.488,00
12,09	Salida 110V iluminación Caseta + Luminaria Hermetica LED	un	1,00	\$ 354.878,00	\$ 354.878,00
				Subtotal	\$ 3.657.262,00
				COSTO DIRECTO	233.841.059,98
				Administración	10%
				Imprevistos	4%
				Utilidad	8%
				VALOR ANTES DE IVA	285.286.093,18
				IVA (19% sobre la utilidad)	19%
				VALOR TOTAL	288.840.477,29

Anexo 13. Presupuesto de Mantenimiento y Operación Humedad Construido. Elaboración Propia.

PRESUPUESTO DE MANTENIMIENTO ACTUAL TANQUE ALMACENAMIENTO, HUMEDAL Y ALIVIADERO				Versión:	1,01
SISTEMA URBANO DE DRENAJE SOSTENIBLE PARA APROVECHAMIENTO DE AGUAS LLUVIAS PARA EL CAMPUS DE LA PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA DE CALI				Elaboró:	G. Rojas
				Fecha:	18/10/2020
Descripción	Frecuencia	# eventos Año	Horas Hombre	V. Unitario (HH)	V. Total
ACTIVIDADES DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO					
Remover residuos acumulados en canalones, bajantes y rejillas	mes	12,00	1,00	\$ 10.416,67	\$ 125.000,00
Remover arena y sedimentos de las rejillas aliviaderos	semanal	52,00	0,50	\$ 10.416,67	\$ 270.833,33
Remover los lodos acumulados en el tanque y aliviaderos	semestral	2,00	3,00	\$ 10.416,67	\$ 62.500,00
Reparar o reemplazar componentes dañados equipo de presión	anual	1,00	8,00	\$ 10.416,67	\$ 83.333,33
				Subtotal	\$ 541.666,67
VEGETACION					
Remover la maleza que crezca sobre el tanque o en áreas circundantes	mes	12,00	1,00	\$ 10.416,67	\$ 125.000,00
Remover plantas invasoras en humedal	mes	12,00	1,00	\$ 10.416,67	\$ 125.000,00
Podar arbustos (reúso para la capa orgánica)	quincenal	26,00	1,00	\$ 10.416,67	\$ 270.833,33
				Subtotal	\$ 520.833,33
REQUERIMIENTOS DE INSPECCION					
Estados y funcionamiento de bajantes, rejillas y canalones	mes	12,00	1,00	\$ 10.416,67	\$ 125.000,00
Acumulación de residuos en los componentes del sistema	mes	12,00	1,00	\$ 10.416,67	\$ 125.000,00
Perdida de estructuras o daños en estas por acciones de vandalismo	mes	12,00	0,50	\$ 10.416,67	\$ 62.500,00
Daños físicos en las estructuras por eventos extremos	mes	12,00	0,50	\$ 10.416,67	\$ 62.500,00
Verificar el funcionamiento apropiado del sistema de bombeo	semestral	2,00	2,00	\$ 10.416,67	\$ 41.666,67
				Subtotal	\$ 291.666,67
CONTROL DE PLAGAS					
Eliminar posibles zonas que promuevan la proliferación de vectores	trimestral	4,00	2,00	\$ 10.416,67	\$ 83.333,33
				Subtotal	\$ 83.333,33
SUSTRATO Y/O CAPA FILTRANTE					
Aplicar aireación al suelo si hay pondaje excesivo	anual	1,00	4,00	\$ 10.416,67	\$ 41.666,67
Escarificar la capa superior del suelo	anual	1,00	4,00	\$ 10.416,67	\$ 41.666,67
				Subtotal	\$ 83.333,33
OTROS					
Barrido de áreas circundantes	quincenal	26,00	0,50	\$ 10.416,67	\$ 135.416,67
				Subtotal	\$ 135.416,67
VALOR ANTES DE IVA					1.718.750,00
				IVA (19% sobre la utilidad)	19%
					\$ 326.562,50
VALOR TOTAL					2.045.312,50

Anexo 14. Planos de Diseño del SUDS

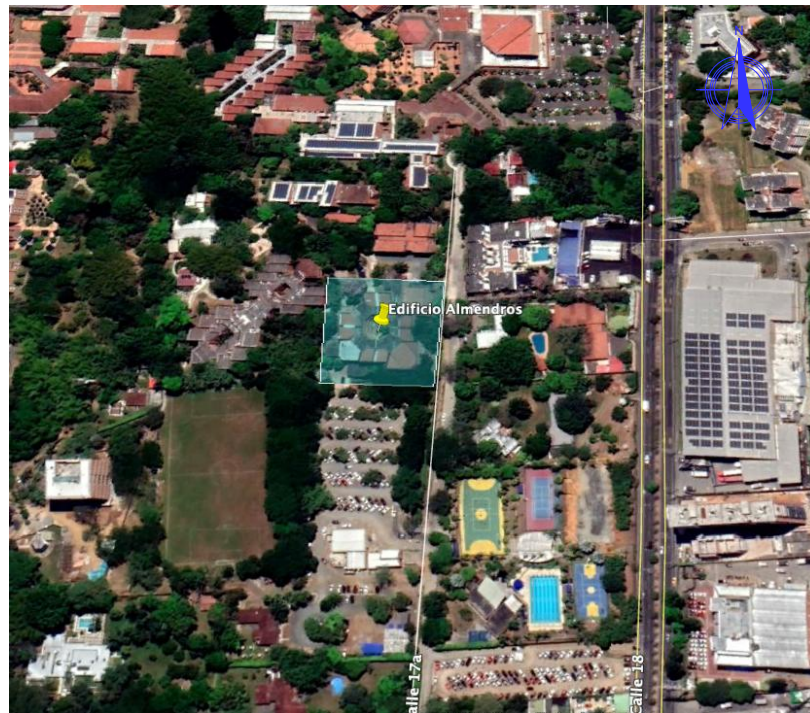
Plano No.	Contiene
1/13	Localización General
2/13	Planta Urbana
3/13	Planta de Cubierta
4/13	Planta Actual Instalaciones Sanitarias Aguas Lluvias Piso 1- Sótano
5/13	Planta Propuesta Intersección y Conducción aguas lluvias A tanque de almacenamiento Piso 1 - Sótano
6/13	Planta Actual Red Distribución Agua Potable Piso 1 - Sótano
7/13	Planta Actual Detalle Red Distribución Agua Potable Piso 2 y Piso 3
8/13	Planta Propuesta Conexión de la Red de Distribución dl Sistema de Aprovechamiento de Aguas Lluvias Piso 1 - Sótano
9/13	Planta Propuesta Conexión de la Red de Distribución al Sistema de Aprovechamiento de Aguas Lluvias Piso 2 / Piso 3
10/13	Diagrama de Conexión Red de Aprovechamiento Agua Lluvias Red de Distribución Actual
11/13	Planta Arquitectónica Caseta de Bombas y Tanque de Almacenamiento Aguas Lluvias Piso 2 / Piso 3
12/13	Planta Arquitectónica y Cortes de Aliviadero Aguas De Escorrentías
13/13	Planta Arquitectónica Humedal y Tanque de Almacenamiento Aguas Lluvias Piso 2 / Piso 3



01 LOCALIZACION
SIN ESCALA



02 LOCALIZACION UNIVERSIDAD
SIN ESCALA




03 LOCALIZACION EDIFICIO ALMENDROS
SIN ESCALA

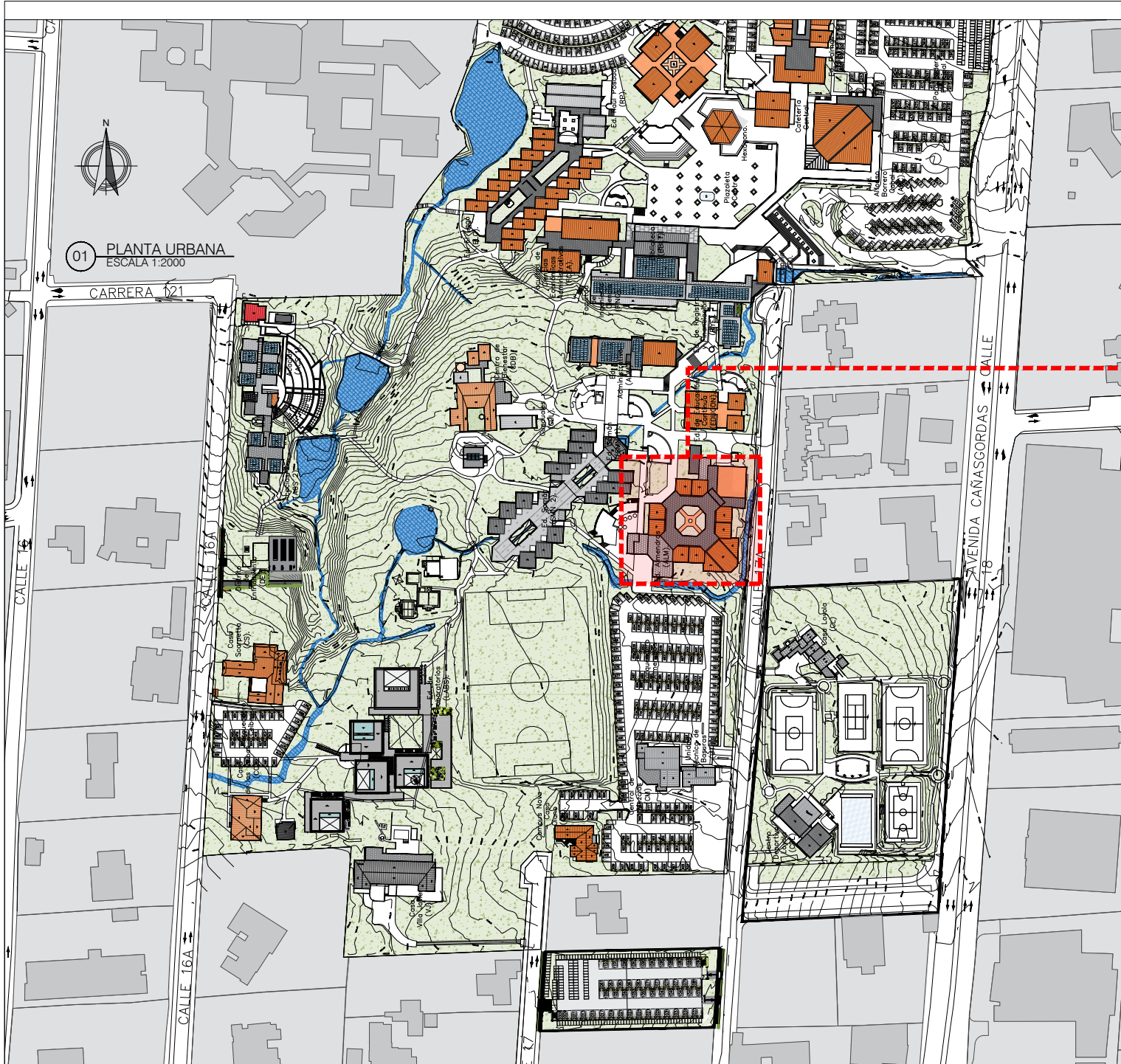
NOTAS

Fuente:
GOOGLE EARTH | Copyright 202 GOOGLE | Copyright 202 MAXAR TECHNOLOGIES

REV. N°	FECHA	DESCRIPCION	REVISO	APROBO
01	28/04/2020	PRIMERA REVISION	GR	JR

	DISEÑO DE SISTEMA URBANO DE DRENAJE SOSTENIBLE PARA APROVECHAMIENTO DE AGUAS LLUVIAS EN EL CAMPUS DE LA PONTIFICIA JAVERIANA CALI	
	Proyecto: PROYECTO TRABAJO DE GRADO MAESTRIA INGENIERIA CIVIL FACULTAD DE INGENIERIA Y CIENCIAS	
	Elaborado por: GRACE M. ROJAS GERALDINO	

Título:	Plano #:
LOCALIZACION GENERAL	01
	De:
	13
	Escala:
	INDICADA
Archivo: PUJC-ALMENDROS-H501 de 14 (Localizacion).dwg	Fecha:
	ABRIL 28 DE 2020




01 PLANTA URBANA
ESCALA 1:2000

NOTAS

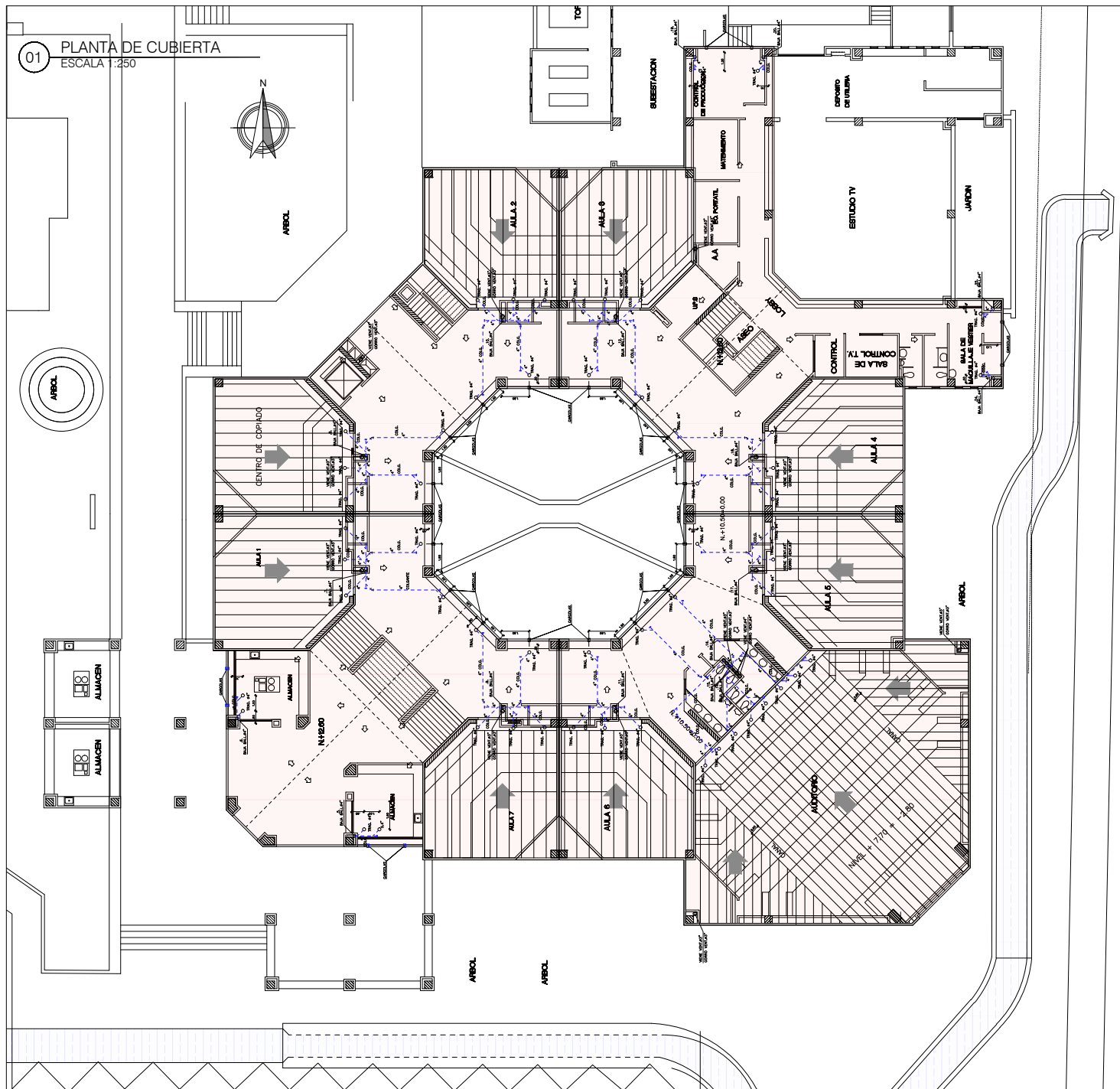
Fuente: ESQUEMA DE IMPLANTACIÓN Y REGULARIZACIÓN | PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA CALI | AGOSTO 2019

REV. N°	FECHA	DESCRIPCIÓN	REVISO	APROBO
01	28/04/2020	PRIMERA REVISIÓN	GR	JR

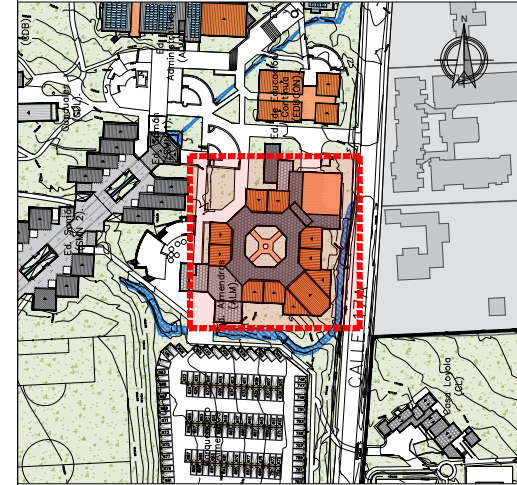

PROYECTO: PROYECTO TRABAJO DE GRADO MAESTRIA INGENIERIA CIVIL FACULTAD DE INGENIERIA Y CIENCIAS
Elaborado por: GRACE M. ROJAS GERALDINO

Título:	Plano #:
PLANTA URBANA	02
	De:
	13
	Escala:
	1:2000
Archivo: PUJC-ALMENDROS-H502 de 13 (Planta Urbana).dwg	Fecha:
	ABRIL 28 DE 2020

01 PLANTA DE CUBIERTA
ESCALA 1:250



UBICACION




CONVENCIONES

AREA AFERENTE CALCULO ALL	
TUBERIA AGUAS LLUVIAS ACTUAL	

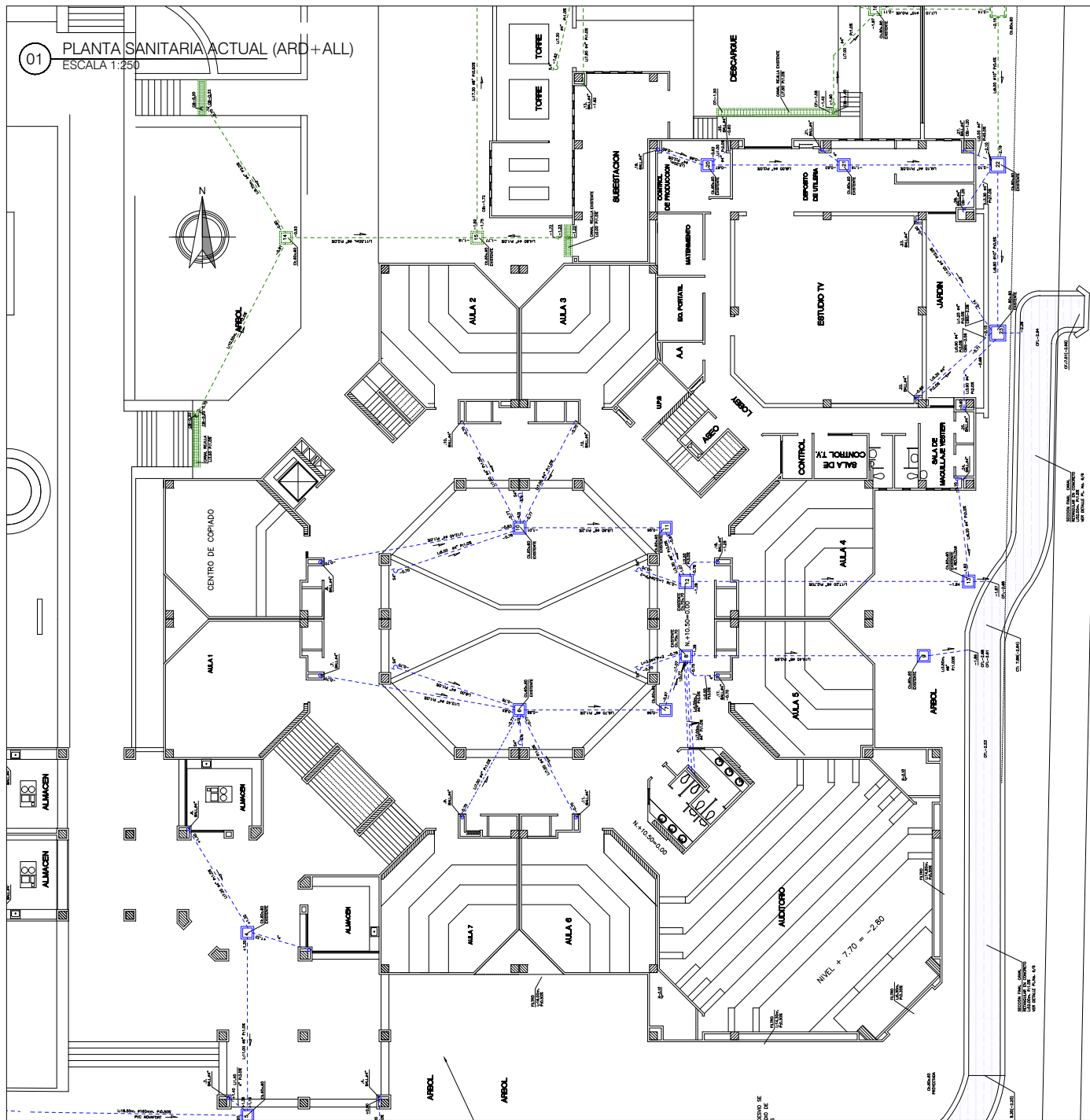
FUENTE:
SE ELABORA DISEÑO CON BASE EN LOS PLANOS ELABORADOS POR LA EMPRESA CONSAM EN MAYO DE 2003

01	28/04/2020	PRIMERA REVISION		GR	JR
REV. N°	FECHA	DESCRIPCION		REVISO	APROBO

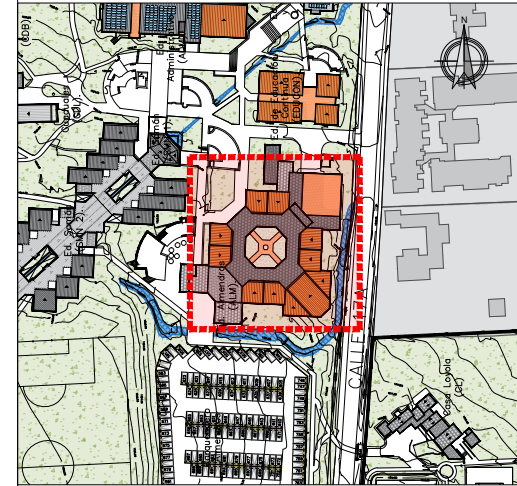

DISEÑO DE SISTEMA URBANO DE DRENAJE SOSTENIBLE PARA APROVECHAMIENTO DE AGUAS LLUVIAS EN EL CAMPUS DE LA PONTIFICIA JAVERIANA CALI
 Proyecto: **PROYECTO TRABAJO DE GRADO MAESTRIA INGENIERIA CIVIL FACULTAD DE INGENIERIA Y CIENCIAS**
 Elaborado por: **GRACE M. ROJAS GERALDINO**

Título:	PLANTA DE CUBIERTA	Plano #:	03
De:			13
Escala:	INDICADA	Fecha:	ABRIL 28 DE 2020
Archivo:	PUJC-ALMENDROS-I4503-04-05 de 14 (Planta Recoleccion ALL).dwg		

01 PLANTA SANITARIA ACTUAL (ARD+ALL)
ESCALA 1:250



UBICACION




CONVENCIONES

TUBERIA AGUAS LLUVIAS ACTUAL	---
TUBERIA AGUAS LLUVIAS ESCORRENTIAS	---

FUENTE:
SE ELABORA DISEÑO CON BASE EN LOS PLANOS ELABORADOS POR LA EMPRESA CONSAM EN MAYO DE 2003

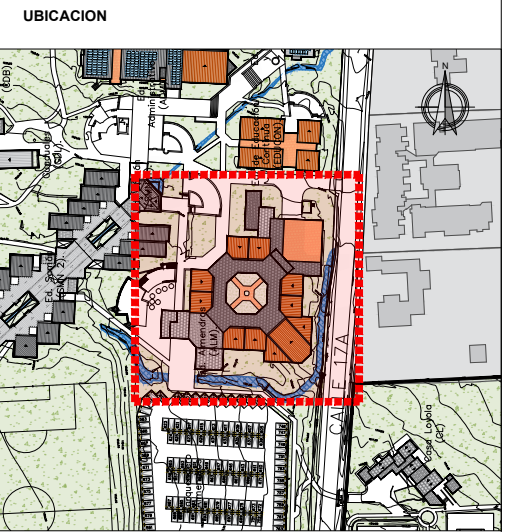
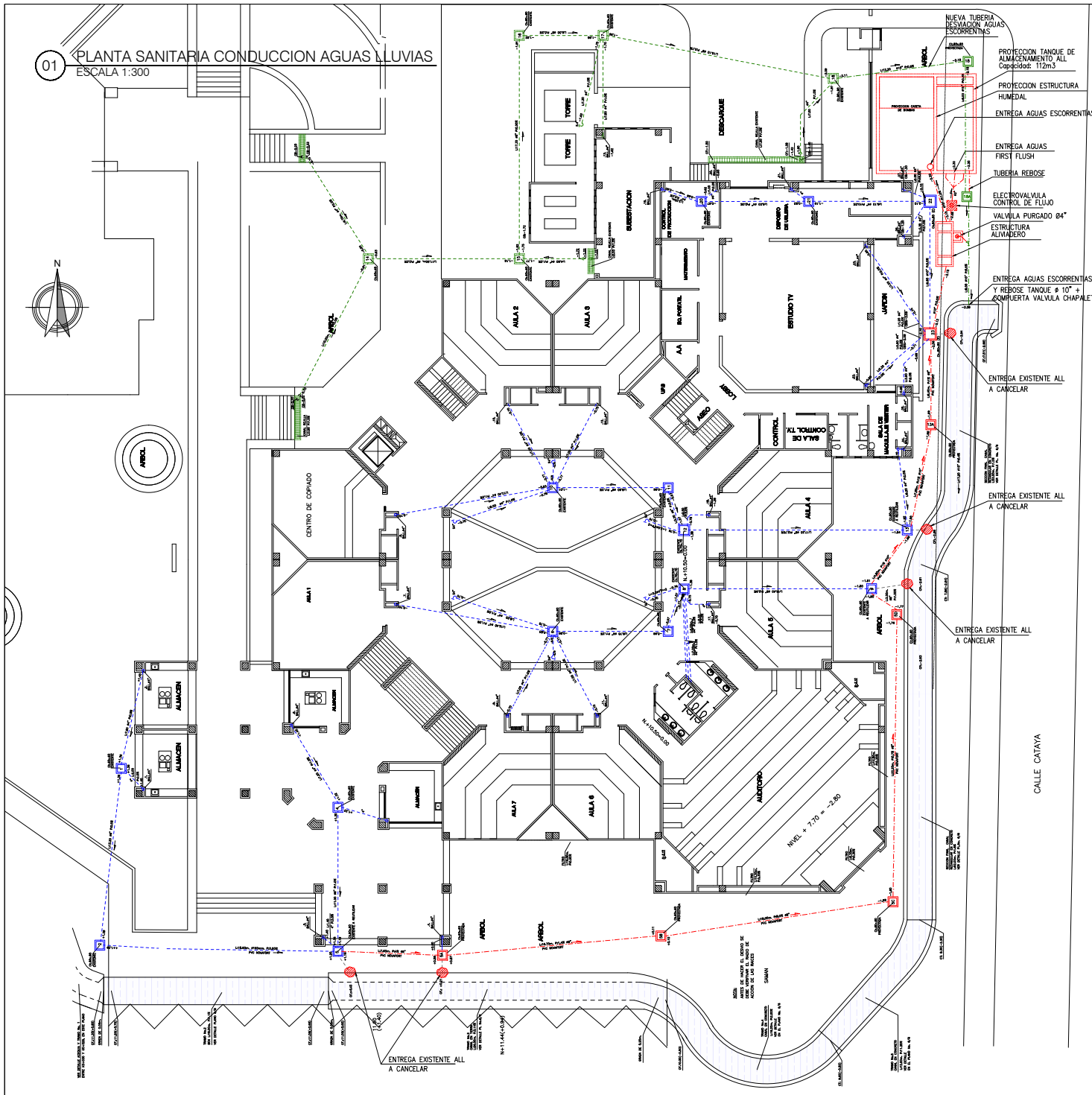
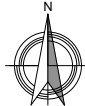
REV. N°	FECHA	PRIMERA REVISION	DESCRIPCION	OPC	AJP
01	28/04/2020				


DISEÑO DE SISTEMA URBANO DE DRENAJE SOSTENIBLE PARA APROVECHAMIENTO DE AGUAS LLUVIAS EN EL CAMPUS DE LA PONTIFICIA JAVERIANA CALI
 Proyecto: **PROYECTO TRABAJO DE GRADO MAESTRIA INGENIERIA CIVIL FACULTAD DE INGENIERIA Y CIENCIAS**
 Elaborado por: **GRACE M. ROJAS GERALDINO**

Título:	PLANTA ACTUAL INSTALACIONES SANITARIAS ALL PISO 1 - SOTANO	Plano #:	04
		De:	13
		Escala:	INDICADA
Archivo:	P:\JC\ALMENDROS-H503-04-05 de 13 (Planta Recreacion ALL).dwg	Fecha:	ABRIL 28 DE 2020

CALLE CATAYA

01 PLANTA SANITARIA CONDUCCION AGUAS LLUVIAS
ESCALA 1:300



CONVENCIONES

TUBERIA AGUAS LLUVIAS ACTUAL	---
TUBERIA AGUAS LLUVIAS ESCORRENTAS	---
TUBERIA AGUAS LLUVIAS APROVECHADAS	---

FUENTE:
SE ELABORA DISEÑO CON BASE EN LOS PLANOS ELABORADOS POR LA EMPRESA CONSAM EN MAYO DE 2003

REV. N°	FECHA	PRIMERA REVISION	DESCRIPCION	REVISO	APROBO
01	28/04/2020	PRIMERA REVISION		GR	JR

DISEÑO DE SISTEMA URBANO DE DRENAJE SOSTENIBLE PARA APROVECHAMIENTO DE AGUAS LLUVIAS EN EL CAMPUS DE LA PONTIFICIA JAVERIANA CALI

Proyecto: **PROYECTO TRABAJO DE GRADO MAESTRIA INGENIERIA CIVIL FACULTAD DE INGENIERIA Y CIENCIAS**

Elaborado por: **GRACE M. ROJAS GERALDINO**

Título: **PLANTA PROPUESTA INTERSECCION Y CONDUCCION AGUAS LLUVIAS A TANQUE DE ALMACENAMIENTO PISO 1 - SOTANO**

Plano #: **05**

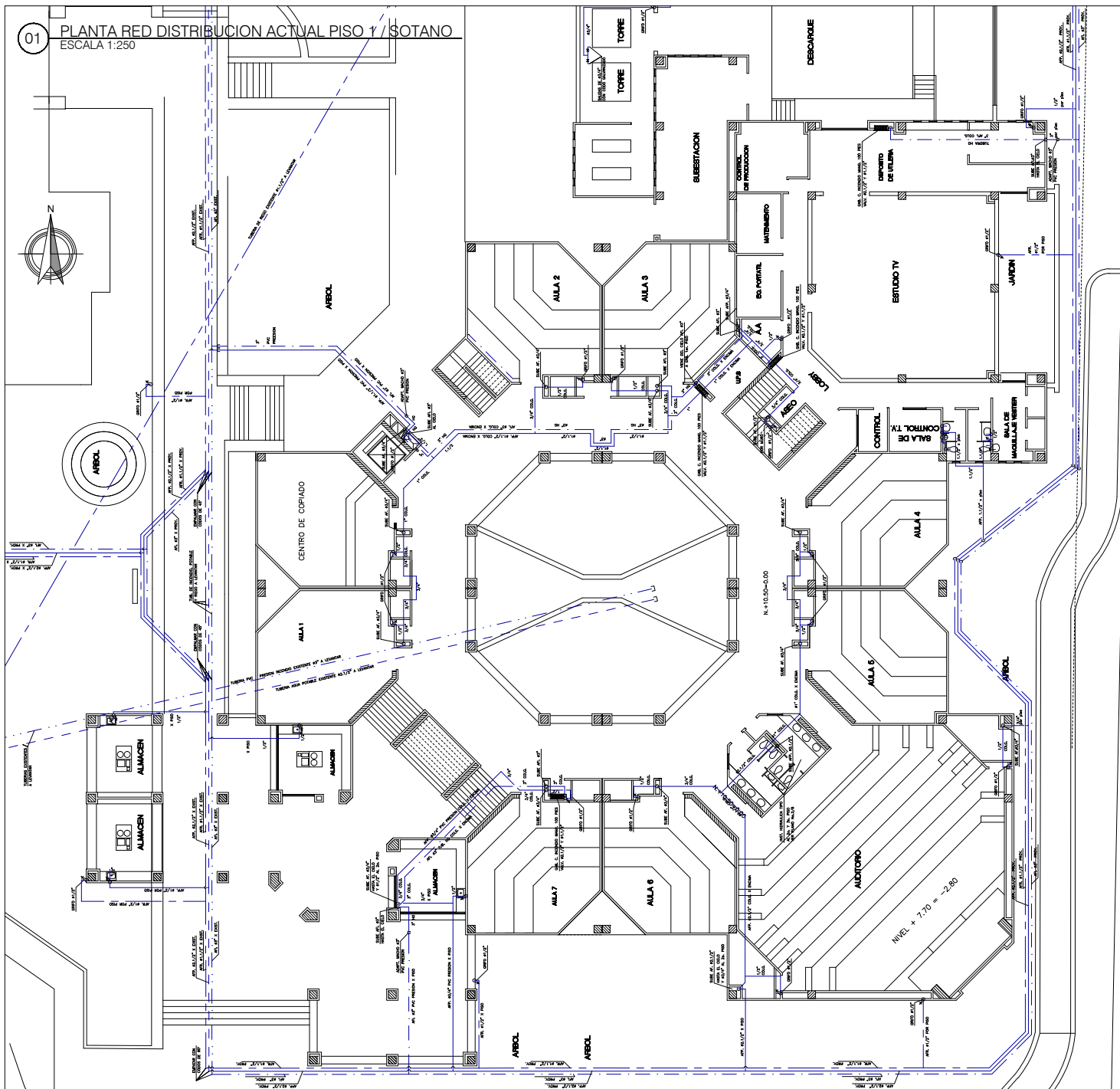
De: **13**

Escala: **INDICADA**

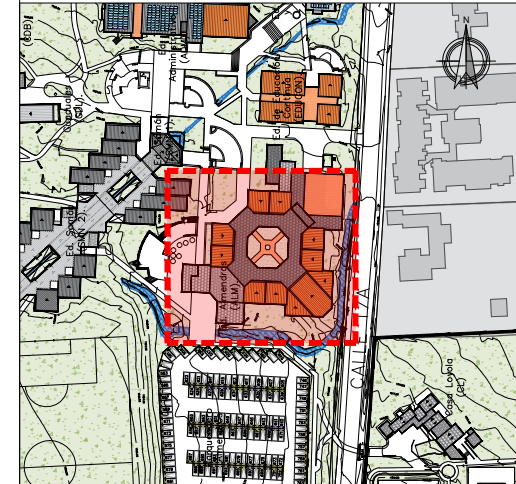
Fecha: **ABRIL 28 DE 2020**

Archivo: PUJC-ALMENDROS-H503-04-05 de 14 (Planta Receccion ALL).dwg

01 PLANTA RED DISTRIBUCION ACTUAL PISO 1 / SOTANO
ESCALA 1:250



UBICACION




CONVENCIONES

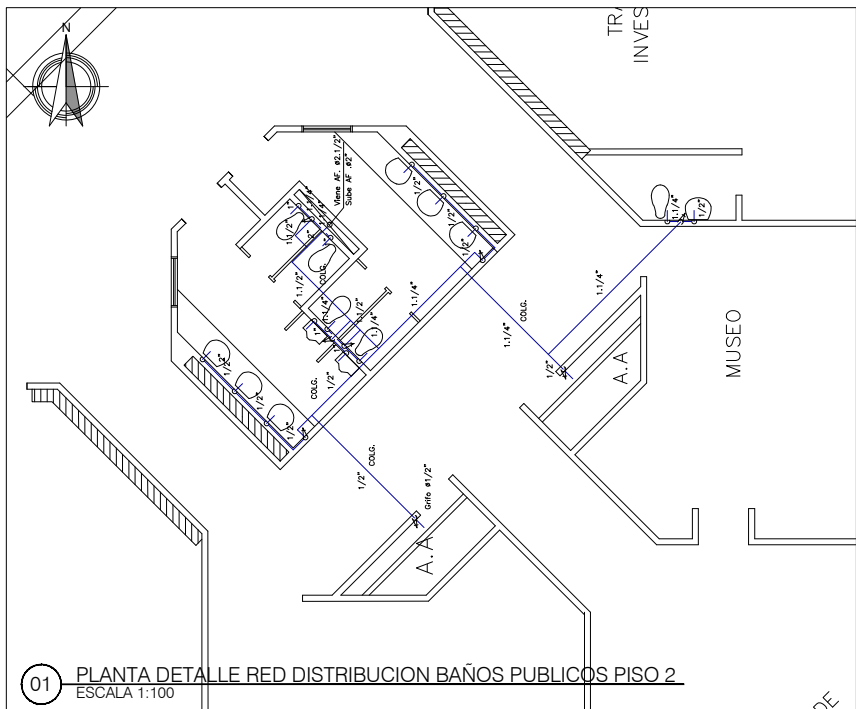
AGUA FRIA POTABLE EXISTENTE	—
AGUA FRIA RIEGO EXISTENTE	- - - - -
AGUA FRIA INCENDIO EXISTENTE	— · — · — · —
AGUA FRIA POTABLE EXISTENTE	—
AGUA FRIA RIEGO EXISTENTE	- - - - -
AGUA FRIA INCENFIO EXISTENTE	— · — · — · —

FUENTE:
SE ELABORA DISEÑO CON BASE EN LOS PLANOS ELABORADOS POR LA EMPRESA CONSAM EN MAYO DE 2003

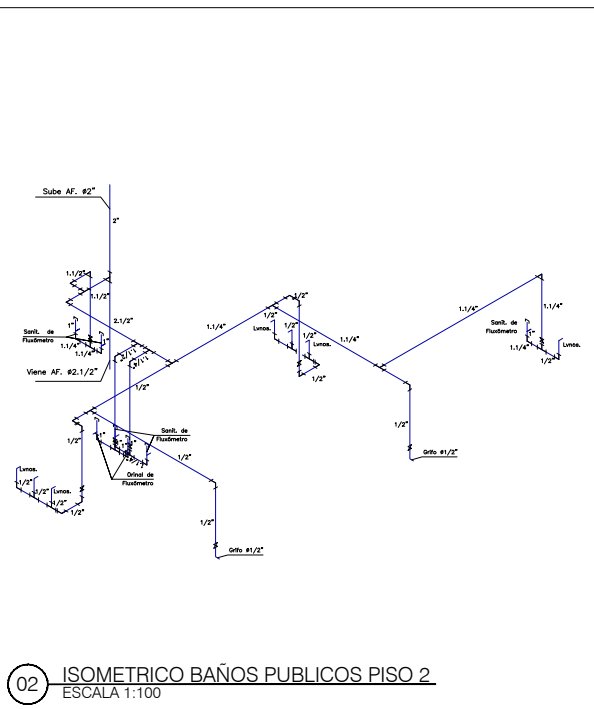
REV. N°	FECHA	DESCRIPCION	REVISO	APROBO
01	28/04/2020	PRIMERA REVISION	GR	JR


DISEÑO DE SISTEMA URBANO DE DRENAJE SOSTENIBLE PARA APROVECHAMIENTO DE AGUAS LLUVIAS EN EL CAMPUS DE LA PONTIFICIA JAVERIANA CALI
 Proyecto: **PROYECTO TRABAJO DE GRADO MAESTRIA INGENIERIA CIVIL FACULTAD DE INGENIERIA Y CIENCIAS**
 Elaborado por: **GRACE M. ROJAS GERALDINO**

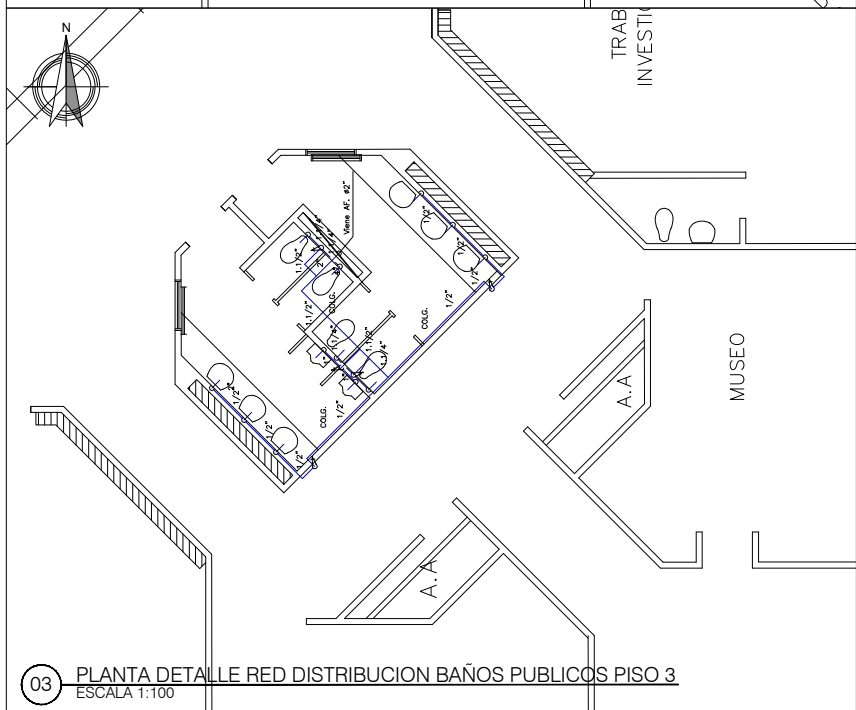
Título:	PLANTA ACTUAL RED DISTRIBUCION AGUA POTABLE PISO 1 / SOTANO	Plano #:	06
		De:	13
		Escala:	INDICADA
Archivo:	P:\J.C. ALMENDROS-H506-07 de 14 (Planta Red Distribucion Actual).dwg	Fecha:	ABRIL 28 DE 2020



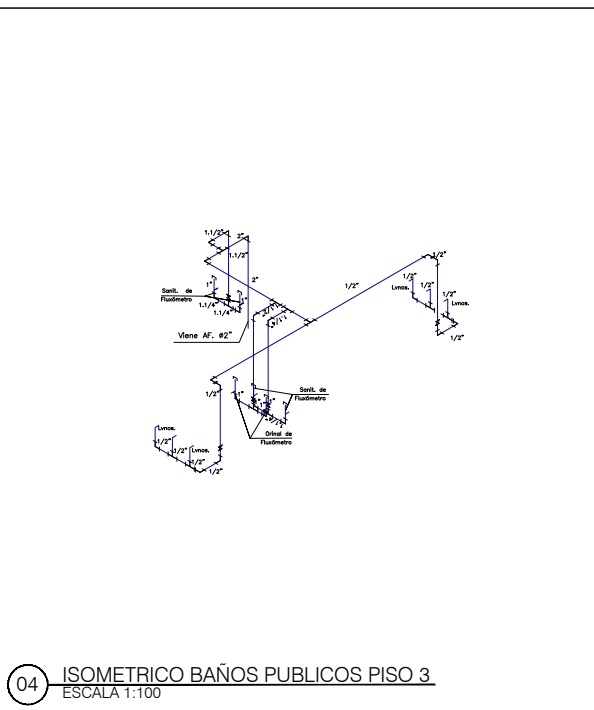
01 PLANTA DETALLE RED DISTRIBUCION BAÑOS PUBLICOS PISO 2
ESCALA 1:100



02 ISOMETRICO BAÑOS PUBLICOS PISO 2
ESCALA 1:100

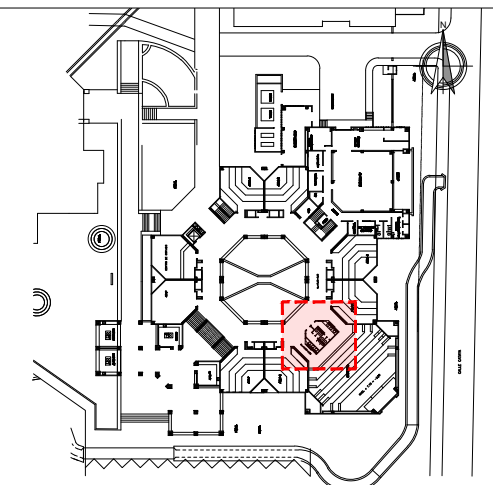


03 PLANTA DETALLE RED DISTRIBUCION BAÑOS PUBLICOS PISO 3
ESCALA 1:100



04 ISOMETRICO BAÑOS PUBLICOS PISO 3
ESCALA 1:100

UBICACION




CONVENCIONES

AGUA FRIA POTABLE EXISTENTE	—
AGUA FRIA RIEGO EXISTENTE	- - - - -
AGUA FRIA INCENDIO EXISTENTE	· · · · ·
AGUA FRIA POTABLE EXISTENTE	—
AGUA FRIA RIEGO EXISTENTE	- - - - -
AGUA FRIA INCENFIO EXISTENTE	· · · · ·

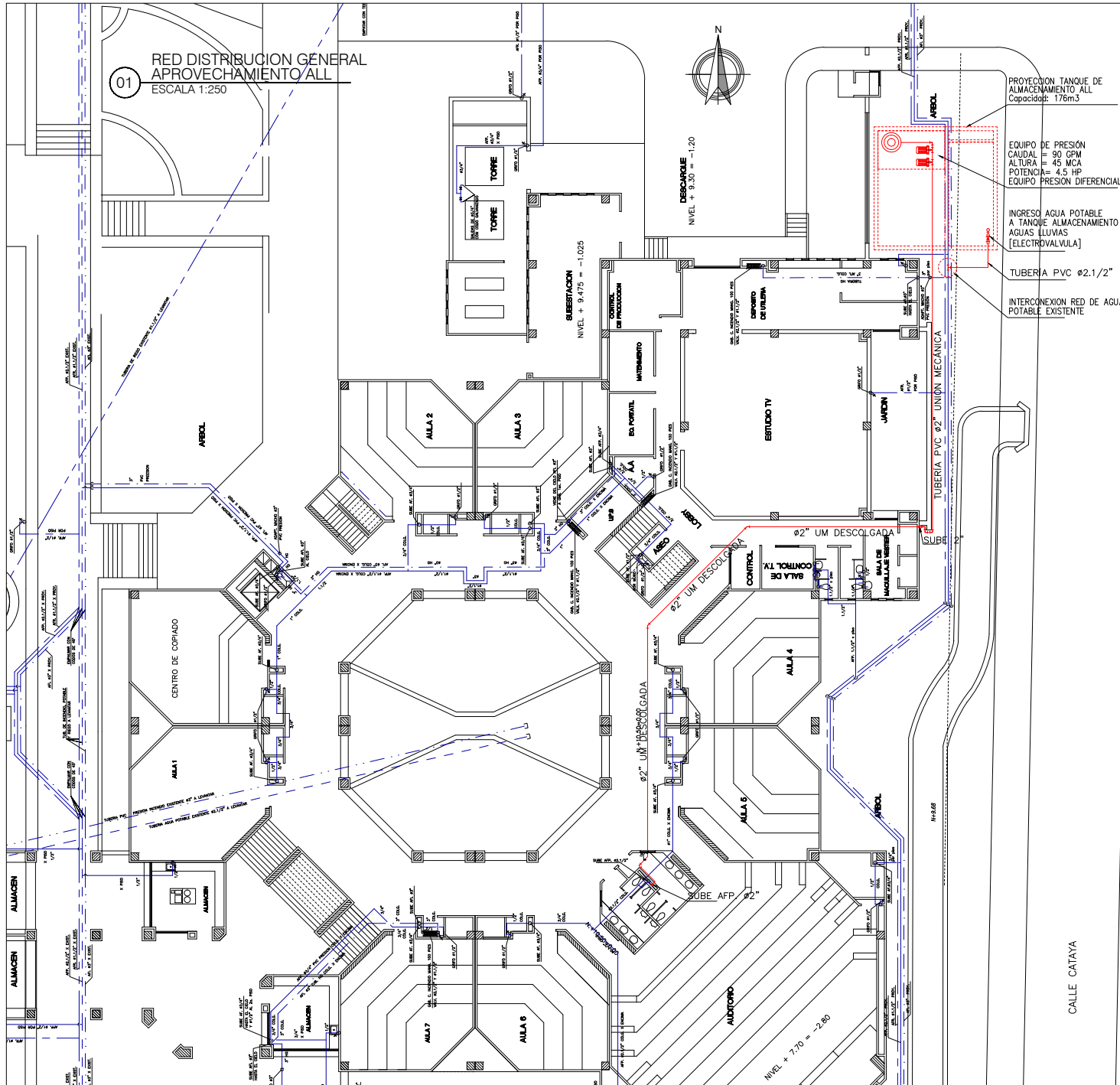
Fuente:
SE ELABORA DISEÑO CON BASE EN LOS PLANOS ELABORADOS POR LA EMPRESA CONSAM EN MAYO DE 2003

01	28/04/2020	PRIMERA REVISION		GR	JR
REV. N°	FECHA	DESCRIPCION		REVISO	APROBO


DISEÑO DE SISTEMA URBANO DE DRENAJE SOSTENIBLE PARA APROVECHAMIENTO DE AGUAS LLUVIAS EN EL CAMPUS DE LA PONTIFICIA JAVERIANA CALI
 Proyecto: **PROYECTO TRABAJO DE GRADO MAESTRIA INGENIERIA CIVIL FACULTAD DE INGENIERIA Y CIENCIAS**
 Elaborado por: **GRACE M. ROJAS GERALDINO**

Titulo: **PLANTA ACTUAL DETALLE RED DISTRIBUCION AGUA POTABLE PISO 2 Y PISO 3**
 Escala: **INDICADA**
 Archivo: **FUJJC-ALMENDROS-H506-07 de 14 (Planta Red Distribucion Actual).dwg**

Plano #: **07**
 De: **13**
 Fecha: **ABRIL 28 DE 2020**



01 RED DISTRIBUCION GENERAL APROVECHAMIENTO ALL
ESCALA 1:250



PROYECCION TANQUE DE ALMACENAMIENTO ALL
Capacidad: 176m³

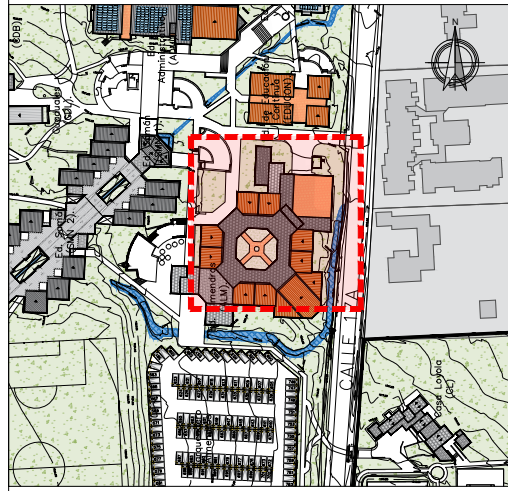
EQUIPO DE PRESION CAUDAL = 90 GPM
ALTURA = 45 MCA
POTENCIA = 4.5 HP
EQUIPO PRESION DIFERENCIAL

INGRESO AGUA POTABLE A TANQUE ALMACENAMIENTO AGUAS LLUVIAS [ELECTROVALVULA]

TUBERIA PVC Ø2.1/2"

INTERCONEXION RED DE AGUA POTABLE EXISTENTE


UBICACION



CONVENCIONES	
AGUA FRIA POTABLE PROYECTADA	— (solid blue line)
AGUA FRIA RIEGO PROYECTADA	— (dashed blue line)
AGUA FRIA INCENDIO PROYECTADA	— (dotted blue line)
AGUA FRIA POTABLE EXISTENTE	— (solid blue line)
AGUA FRIA RIEGO EXISTENTE	— (dashed blue line)
AGUA FRIA INCENDIO EXISTENTE	— (dotted blue line)
AGUA FRIA AGUAS LLUVIAS APROVECHADAS	— (solid red line)

Fuente:
SE ELABORA DISEÑO CON BASE EN LOS PLANOS ELABORADOS POR LA EMPRESA CONSAM EN MAYO DE 2003

REV. N°	FECHA	DESCRIPCION	GRD	A.R
01	28/04/2020	PRIMERA REVISION		

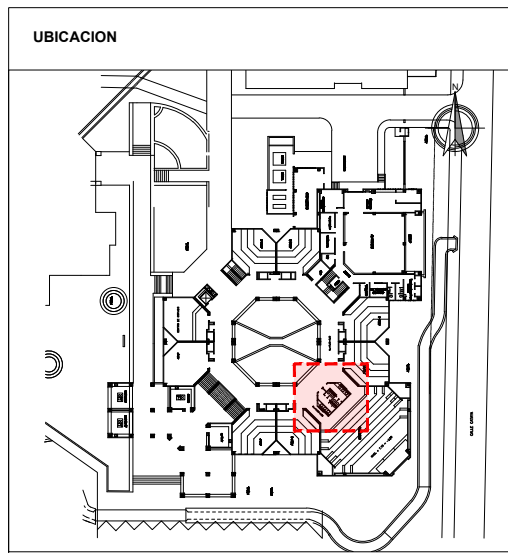
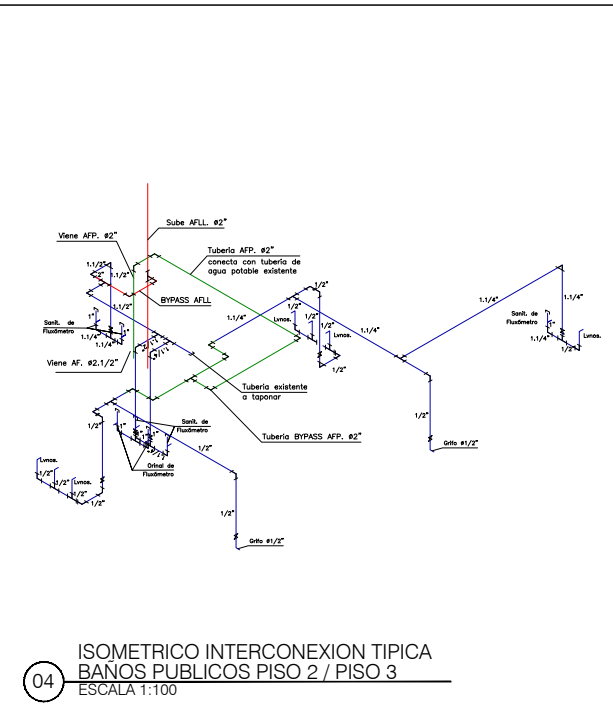
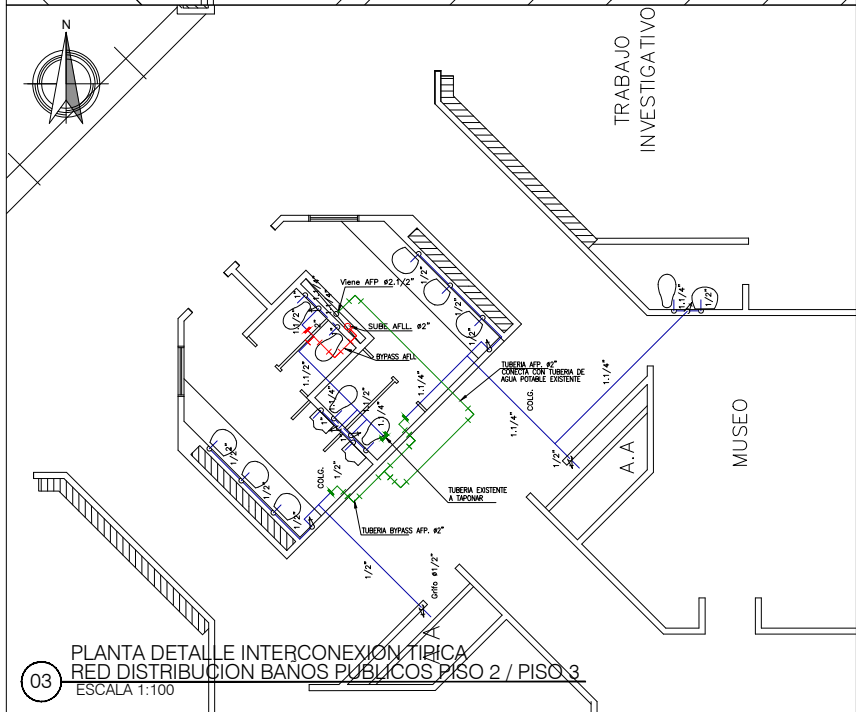
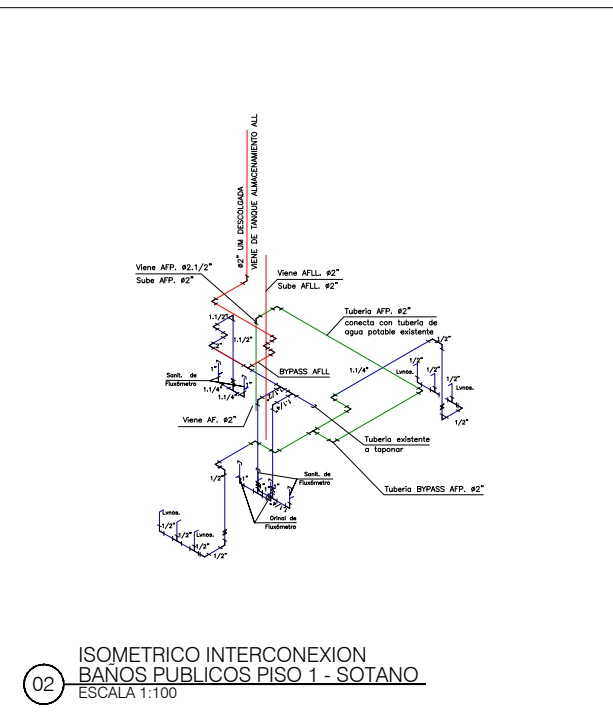
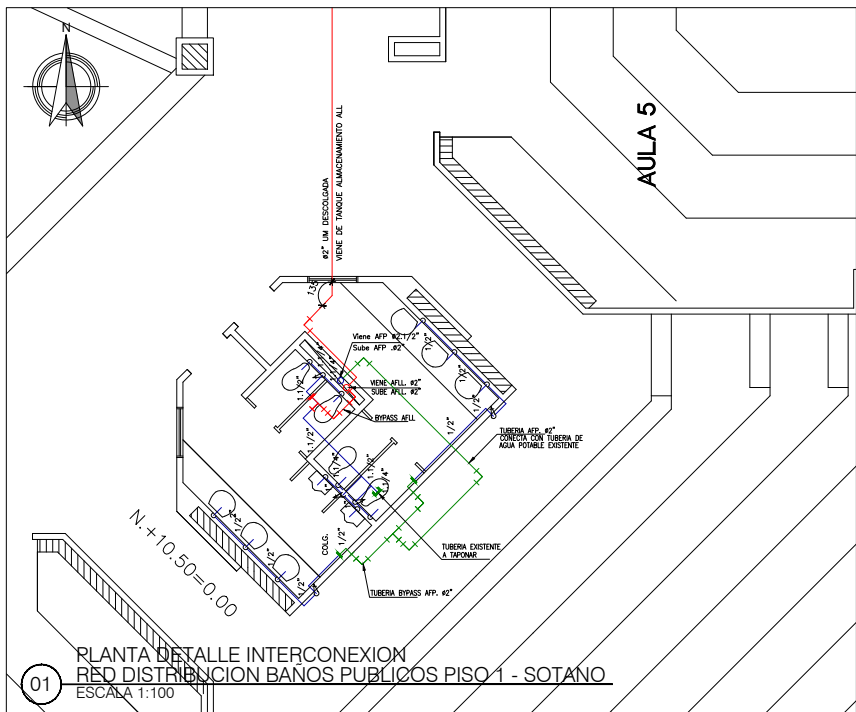

DISEÑO DE SISTEMA URBANO DE DRENAJE SOSTENIBLE PARA APROVECHAMIENTO DE AGUAS LLUVIAS EN EL CAMPUS DE LA PONTIFICIA JAVERIANA CALI
 Proyecto: **PROYECTO TRABAJO DE GRADO MAESTRIA INGENIERIA CIVIL FACULTAD DE INGENIERIA Y CIENCIAS**
 Elaborado por: **GRACE M. ROJAS GERALDINO**

PLANTA PROPUESTA CONEXION DE LA RED DE DISTRIBUCION AL SISTEMA DE APROVECHAMIENTO DE AGUAS LLUVIAS PISO 1 - SOTANO
 Escala: **INDICADA**
 Fecha: **ABRIL 28 DE 2020**

Titulo: **PLANTA PROPUESTA CONEXION DE LA RED DE DISTRIBUCION AL SISTEMA DE APROVECHAMIENTO DE AGUAS LLUVIAS PISO 1 - SOTANO**
 Plano #: **08**
 De: **13**
 Escala: **INDICADA**
 Fecha: **ABRIL 28 DE 2020**

Archivo: PUJ-C-ALMENDROS-H508-09 de 14 (Planta Propuesta Red Distribucion).dwg

CALLE CATAYA



CONVENCIONES	
AGUA FRIA POTABLE EXISTENTE	
AGUA FRIA AGUAS LLUVIAS APROVECHADAS	
AGUA FRIA POTABLE A CONSTRUIR BYPASS - INTERCONEXION	

Fuente:
SE ELABORA DISEÑO CON BASE EN LOS PLANOS ELABORADOS POR LA EMPRESA CONSAM EN MAYO DE 2003

REV. N°	FECHA	DESCRIPCION	OPC	AJP
01	28/04/2020	PRIMERA REVISION	OPC	AJP

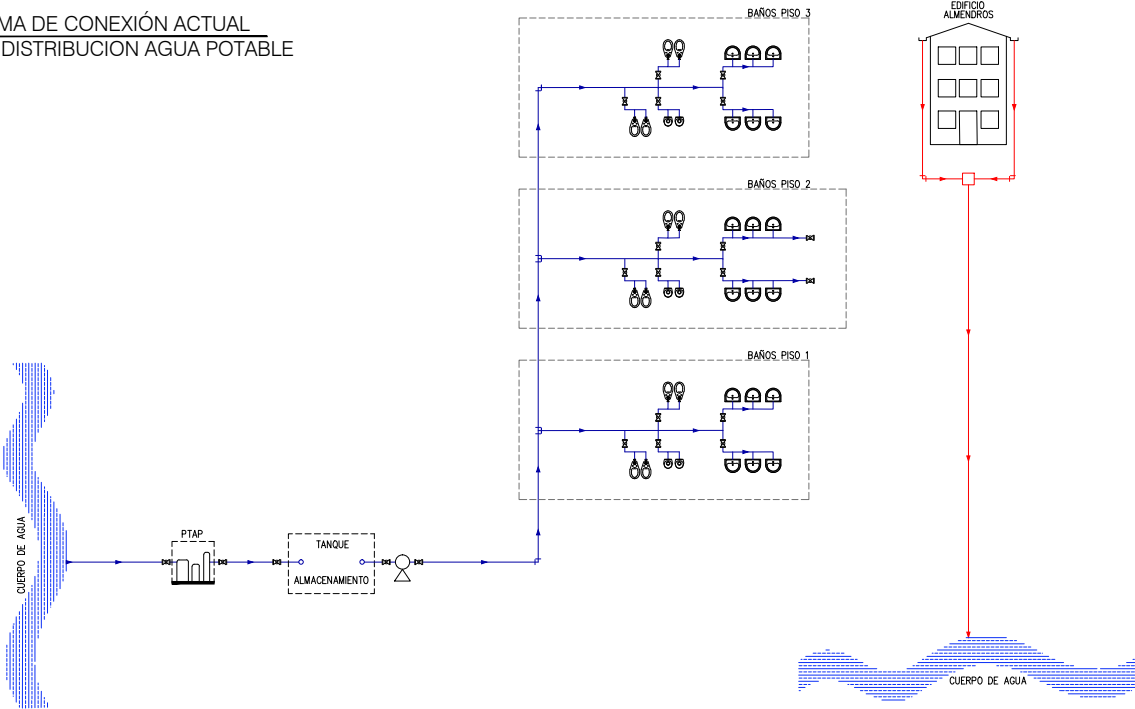
**PROYECTO TRABAJO DE GRADO
MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL
FACULTAD DE INGENIERIA Y CIENCIAS**
 Elaborado por: **GRACE M. ROJAS GERALDINO**

**PLANTA PROPUESTA
CONEXION DE LA RED DE DISTRIBUCION
AL SISTEMA DE APROVECHAMIENTO DE
AGUAS LLUVIAS PISO 2 / PISO 3**

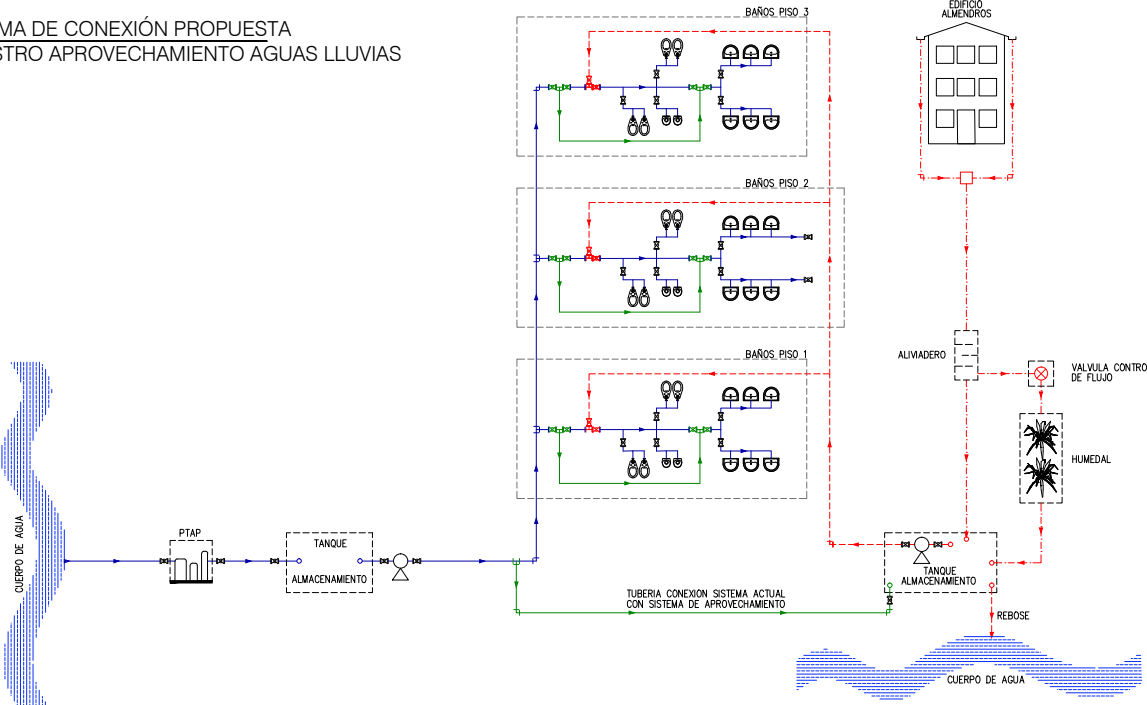
Titulo: **09**
 De: **13**
 Escala: **INDICADA**
 Fecha: **ABRIL 28 DE 2020**

Archivo: PUJ-C-ALMENDROS-H508-09 de 14 (Planta Propuesta Red Distribucion).dwg

01 DIAGRAMA DE CONEXIÓN ACTUAL
RED DE DISTRIBUCIÓN AGUA POTABLE



02 DIAGRAMA DE CONEXIÓN PROPUESTA
SUMINISTRO APROVECHAMIENTO AGUAS LLUVIAS




CONVENCIONES

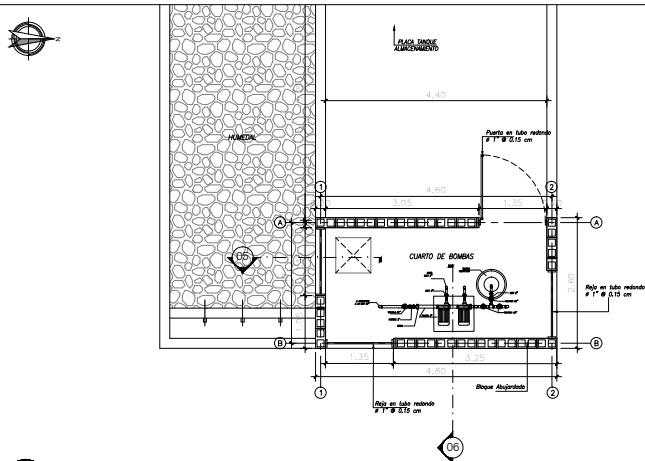
RED DE AGUA POTABLE EXISTENTE	— (Blue solid line)
RED DE AGUAS LLUVIAS EXISTENTE [NO] APROVECHADAS	— (Red solid line)
RED DE AGUAS LLUVIAS EXISTENTE APROVECHADAS	- - - (Red dashed line)
RED DE AGUAS LLUVIAS APROVECHADAS A CONSTRUIR	- - - (Red dashed line)
AGUA FRIA POTABLE A CONSTRUIR BYPASS - INTERCONEXION	— (Green solid line)

Fuente:

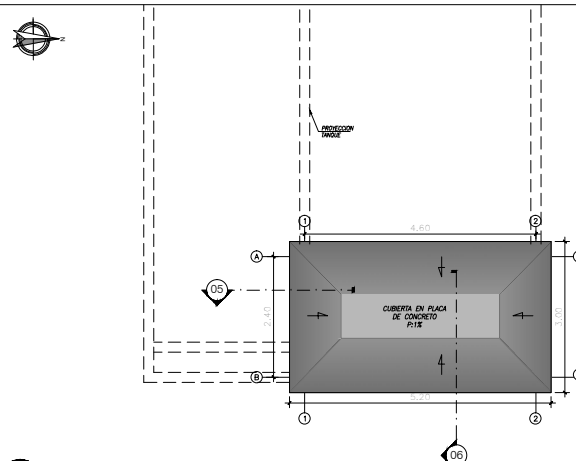
01	28/04/2020	PRIMERA REVISION		GR	JLR
REV. N°	FECHA	DESCRIPCION	REVISO	APROBO	


DISEÑO DE SISTEMA URBANO DE DRENAJE SOSTENIBLE PARA APROVECHAMIENTO DE AGUAS LLUVIAS EN EL CAMPUS DE LA PONTIFICIA JAVERIANA CALI
 Proyecto: **PROYECTO TRABAJO DE GRADO MAESTRIA INGENIERIA CIVIL FACULTAD DE INGENIERIA Y CIENCIAS**
 Elaborado por: **GRACE M. ROJAS GERALDINO**

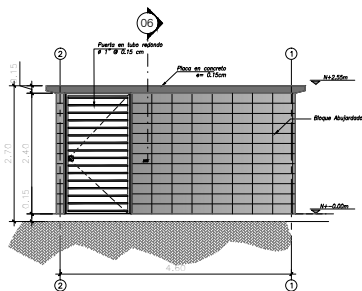
Título:	DIAGRAMA DE CONEXION RED DE DISTRIBUCION ACTUAL RED DE APROVECHAMIENTO AGUA LLUVIAS	Plano #:	10
De:		De:	13
Archivo:	FUJ/C-ALMENDROS-H510 de 13 (Diagrama Conexiones).dwg	Escala:	INDICADA
		Fecha:	ABRIL 28 DE 2020



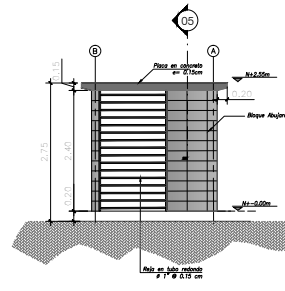
01 PLANTA ARQUITECTONICA CASETA
ESCALA 1:100



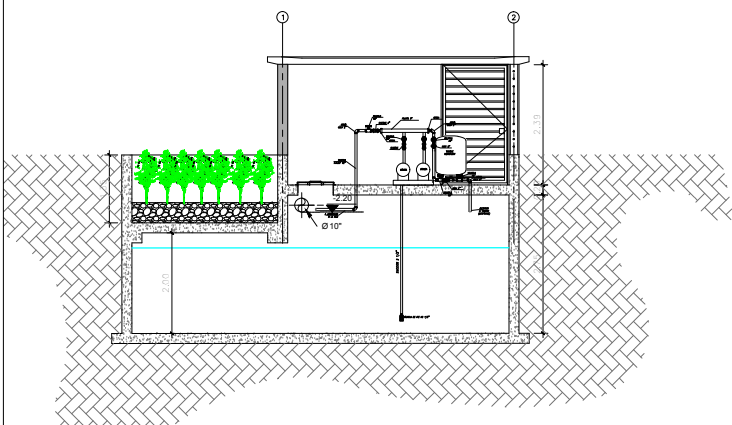
02 PLANTA CUBIERTA CASETA
ESCALA 1:100



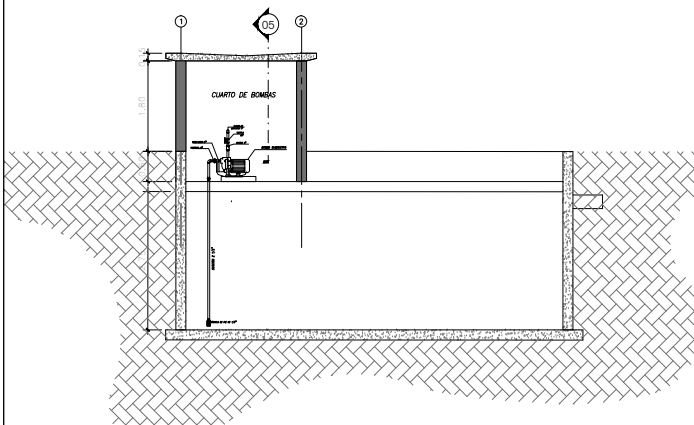
03 FACHADA FRONTAL
ESCALA 1:100



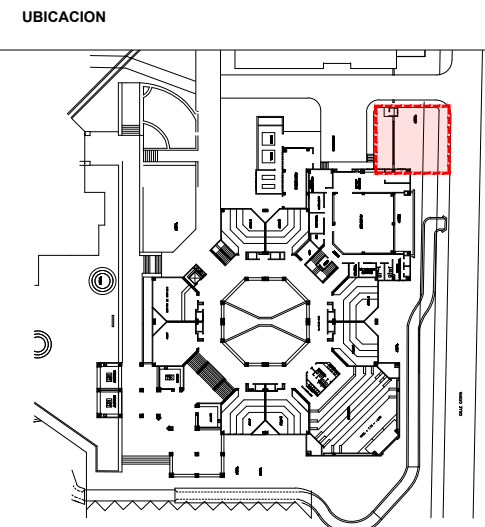
04 FACHADA LATERAL
ESCALA 1:100



05 CORTE LONGITUDINAL
ESCALA 1:100




06 CORTE TRANSVERSAL
ESCALA 1:100

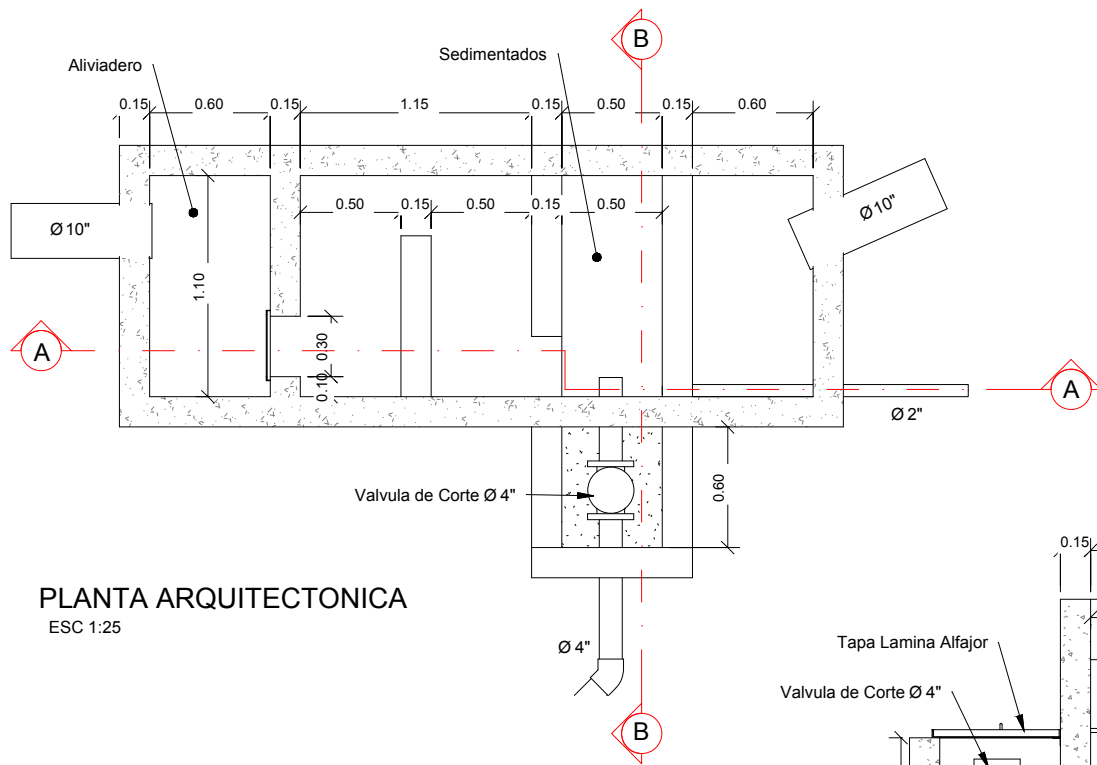


UBICACION

NOTAS

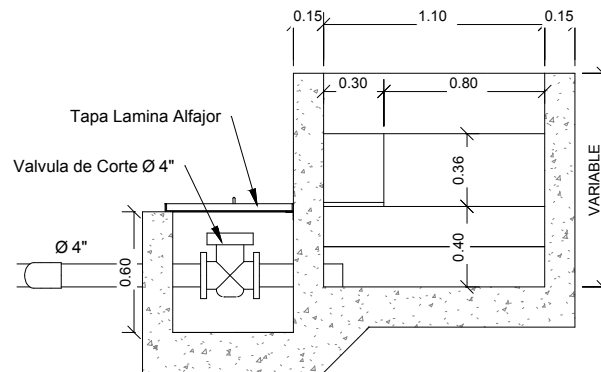
Fuente:

01	28/04/2020	PRIMERA REVISION		GR	A.R
REV. N°	FECHA	DESCRIPCION	REVISO	APROBO	
 DISEÑO DE SISTEMA URBANO DE DRENAJE SOSTENIBLE PARA APROVECHAMIENTO DE AGUAS LLUVIAS EN EL CAMPUS DE LA PONTIFICIA JAVERIANA CALI					
Proyecto: PROYECTO TRABAJO DE GRADO MAESTRIA INGENIERIA CIVIL FACULTAD DE INGENIERIA Y CIENCIAS					
Elaborado por: GRACE M. ROJAS GERALDINO					
Título: PLANTA ARQUITECTONICA CASETA DE BOMBAS Y TANQUE DE ALMACENAMIENTO AGUAS LLUVIAS PISO 2 / PISO 3				Plano #: 11 De: 13	
				Escala: INDICADA	
Archivo: PUJC-ALMENDROS-H511 de 13 [Caseto - Tanque Almacenamiento].dwg				Fecha: ABRIL 28 DE 2020	



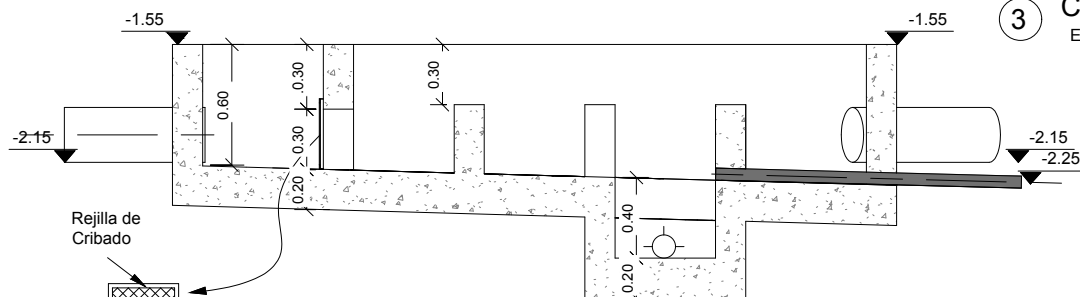
PLANTA ARQUITECTONICA

ESC 1:25



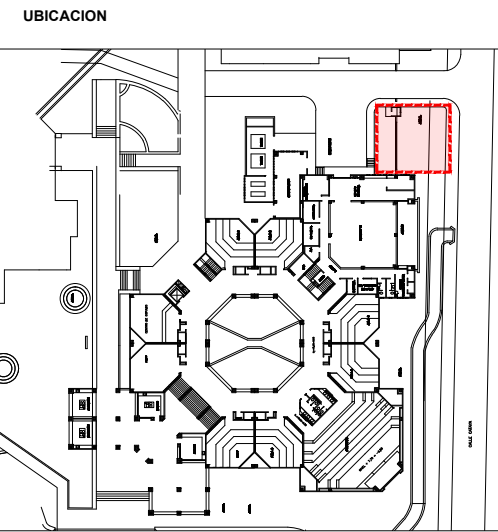
3 CORTE B-B

ESC 1:25




2 CORTE A-A

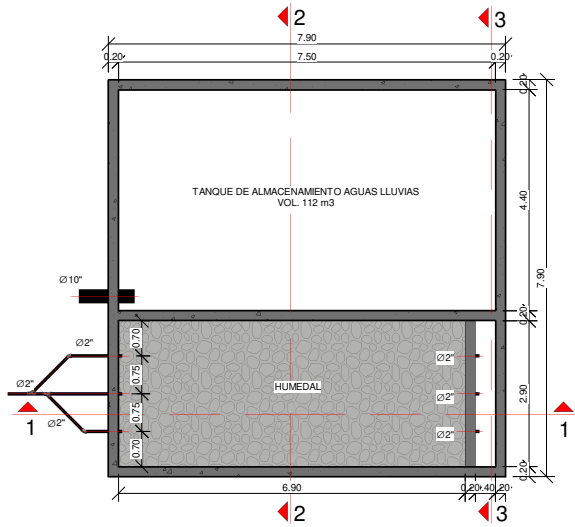
ESC 1:25



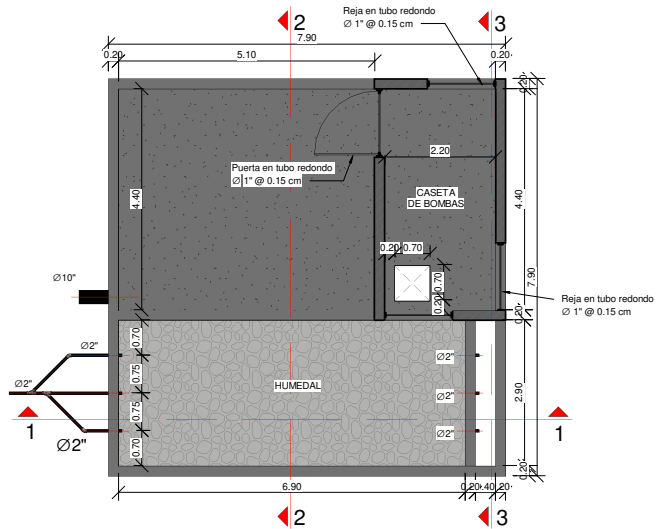
NOTAS

Fuente:

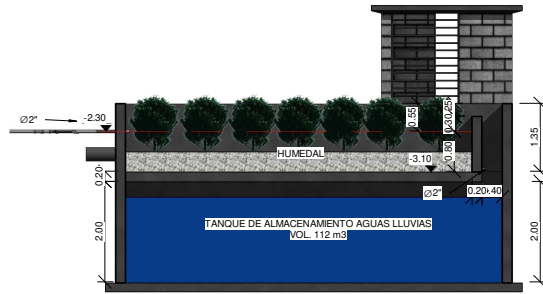
REV. N°	FECHA	DESCRIPCION	REVISO	APROBO
		DISEÑO DE SISTEMA URBANO DE DRENAJE SOSTENIBLE PARA APROVECHAMIENTO DE AGUAS LLUVIAS EN EL CAMPUS DE LA PONTIFICIA JAVERIANA CALI		
Proyecto:		PROYECTO TRABAJO DE GRADO MAESTRIA INGENIERIA CIVIL FACULTAD DE INGENIERIA Y CIENCIAS		
Elaborado por:		GRACE M. ROJAS GERALDINO		
Titulo:		PLANTA ARQUITECTONICA Y CORTES DE ALIVIADERO AGUAS DE ESCORRENTIAS		Plano #:
De:		12		13
Escala:		INDICADA		
Archivo: PUJC-ALMENDROS-H512 de 13 [Aliviadero Aguas de Escorrentias].dwg		Fecha:		OCTUBRE 27 DE 2020



① PLANTA ARQUITECTONICA TANQUE
ESC 1:100



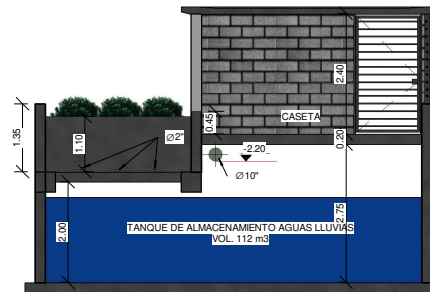
PLANTA ARQUITECTONICA CASETA
ESC 1:100



CORTE 1-1
ESC 1:100

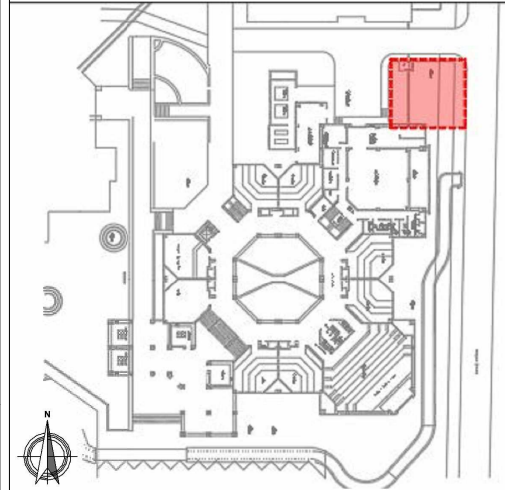


CORTE 2-2
ESC 1:100



CORTE 3-3
ESC 1:100


UBICACION



NOTAS

Fuente:

147	12246	02/10/2020	10:00	10:00
-----	-------	------------	-------	-------

	<p>DISEÑO DE SISTEMA URBANO DE DRENAJE SOSTENIBLE PARA APROVECHAMIENTO DE AGUAS LLUVIAS EN EL CAMPUS DE LA PONTIFICIA JAVERIANA CALI</p>	
	Proyecto:	<p>PROYECTO TRABAJO DE GRADO MAESTRIA INGENIERIA CIVIL FACULTAD DE INGENIERIA Y CIENCIAS</p>
	Elaborado por:	<p>GRACE M. ROJAS GERALDINO</p>

Título:	<p>PLANTA ARQUITECTONICA HUMEDAL Y TANQUE DE ALMACENAMIENTO AGUAS LLUVIAS PISO 2 / PISO 3</p>	Plano #:	13
De:			13
Archivo:	<p>PUC-ALMENDROS4613 de 13 (Humedal y Tanque de Almacenamiento ALL).dwg</p>	Escala:	INDICADA
		Fecha:	OCTUBRE 27 DE 2020